第Ⅰ編

腐食した鋼構造物の残存耐荷性能評価

1　はじめに

供用中の構造物(既設構造物)の合理的な維持管理を行うには，構造各部における劣化・損傷度を的確に評価し，それらをもとに構造物および部材の性能(健全性)を総合的に評価することが重要である．既設構造物の性能は，それまでの作用履歴や時間経過による種々の劣化損傷によって，特に抵抗形態が本来のものから著しく異なるものとなるのが特徴である．したがって，劣化・損傷度の主要因である腐食による構造物および部材の性能評価の具体的な実施方法となると，

1) 損傷に関する正確な情報を得ることが極めて難しい
2) 作用の評価が構造物の形式により大きく異なる
3) 新旧の構造部材が混在する過程が必ず存在する
4) 設計・建設の過去の基準の根拠が不明な場合が存在する

などの理由から，点検・調査技術者の経験的評価に依存している．

腐食による構造物および部材の健全度は，点検・調査結果をもとに安全性(耐荷性能)および耐久性などからの評価が中心となり，高度な技術的判断を必要とする．耐荷性能の低下は，鋼材の断面欠損により生じることになるが，一般に鋼構造は塗装が実施されることから塗膜劣化による塗膜厚の減少，さびの発生が大きく影響してくる．しかし，この塗膜劣化損傷および耐荷性能と供用期間の関係は，定量的および定性的にも明確されていないのが現状である．

このような背景のもと，本委員会の耐荷性能評価ワーキンググループでは，健全度評価，計測技術，および残存耐荷性能評価に関する最新の研究状況について検討した．まとめられた本報告書の第Ⅰ編：腐食した鋼構造物の耐荷性能評価は，第2章　健全度評価，第3章　計測技術，第4章　残存耐荷性能評価から構成されている．

第2章の健全度評価では，鋼道路橋，鋼鉄道橋，港湾鋼構造物，堰・水門の健全度評価の現状について詳細に紹介している．また各種構造物の腐食損傷事例を紹介するとともに最後に健全度評価への提言をまとめている．

第3章の計測技術では，まず橋梁と海洋構造物の腐食形状の傾向と分類についてまとめ，つぎに腐食した板厚計測のための前処理方法，実際に板厚を計測する方法として直接計測する方法および表面形状から板厚を計測する方法を紹介している．代表的板厚計測法による適用事例では，特定の対象腐食試験体を対象に測定方法と精度について検討している．最後に計測作業および結果の取扱についてまとめている．

第4章の残存耐荷性能評価では，残存耐力評価の現状について述べるとともに部材および構造物(鋼橋，港湾施設，水門)の耐荷力評価法に関する最新の検討結果を紹介している．さらに，腐食形状を考慮した部材および構造物のFEM解析による残存耐荷力評価とその精度，さらには腐食と補修履歴および残留応力の変化と残存耐荷力についての最新の成果を紹介している．

２　健全度評価

2.1　はじめに

鋼構造物は，計画時に想定した目的に適合するように設計・施工されていることから，供用中は期待される性能を寿命期間中に十分満足するように維持管理されなければならない．このためには，構造物管理者は，鋼構造物が供用中に受ける荷重や環境に対して十分な安全性，使用性，耐久性など種々の要求性能を確保しているか否かを定量的に確認することが必要である．このような状況において既存鋼構造物が初期の要求性能を確保しているかどうかを適切に確認するためには，使用材料，各部材（各部品），構造などについて正しく保有性能を評価しなければならない．

既存鋼構造の保有性能評価は，材料，部材の劣化状態，変状程度および評価時の規格（基準）に対する適合性などについて客観的，総合的に評価することであり，これらの行為を健全度評価としている．構造物の維持管理を適切に行うには,既存鋼構造物の寿命を設定し､その時々の構造物の現状を把握するため、各種点検を実施することによる劣化・変状の程度や進行速度を推定し，その結果を通して健全度を評価すること，また適切な対処を適切な時期に実施することが必要不可欠である．

本章では，鋼構造物の健全度評価について解説する．

2.1.1　一般

鋼構造物の健全度とは，構造物に定められたもしくは想定された要求性能に対し，当該鋼構造物が保有する健全さの程度である．対象鋼構造物の健全度評価は，既存鋼構造物に対して実施する各種点検，調査実施した結果から得られる腐食，疲労，変形，損傷程度による耐久性能および経年，適用基準，環境等から得られる安全性能（耐荷性能）を総合的に評価し、定量的に診断された結果を示すことであり，維持管理レベル，補修・補強，余寿命判定などを決定するための重要な要素でもある．鋼構造物の維持管理において，過去の事例や報告から主たる損傷を挙げると，全面腐食や局部腐食を総称する腐食，疲労やきずから発生する亀裂，想定以上の作用力や支点沈下・移動から発生する変位・変形，各部材を結合するボルトやリベットなど添接部品に発生する緩み・脱落などがあげられ，これらの損傷から構造物全体の現有する保有性能の状態を定量的に診断するのが健全度評価である。

2.1.2　適用の範囲

本章の健全度評価適用範囲は，鋼材を主材料とする橋梁などの道路構造物，鉄道構造物，水門などの河川構造物，港湾構造物，鉄塔とする．

2.1.3 用語の定義

本章で用いる代表的な用語の定義を以下に示す．本章では腐食に対する健全度評価を対象としているので，用語についても腐食に関連する代表的な語句について定義するものとする．

表 2.1.3.1 用語の定義

用 語	定 義
性能評価	将来継続使用される構造物の信頼性を確認する行為.
健全性	構造物あるいは構造部位の全体の安全性，耐久性，使用性などの機能および美観が，腐食により損なわれることなく保持されている状態.
健全度	健全性の度合い.
劣化度※1	構造物あるいは構造部位の性能が腐食により時間とともに損なわれていく程度もしくは度合い。
損傷度	腐食により性能が低下する現象の度合い．変状の悪影響の度合い．主に構造物や部材の部分や局部に対する劣化の評価指標となる.
健全度評価	構造物あるいは構造部位の健全度を調査し，構造物に期待される本来の性能がどの程度保持されているかを示すこと.
耐荷力評価	構造物あるいは構造部位が実際に作用する荷重に耐えることができるかどうかの程度を示すこと.
機能性	構造物あるいは構造部位が有する，その目的とする働き及びその度合い.
安全性	構造物あるいは構造部位が腐食により耐荷重性，耐震性，耐風性，耐久性，耐火性などの構造的な要件を失うことにより，その働きを発揮することができなくなって，使用者などが危険な状態に陥ることのない状態のこと.
使用性	想定した構造物に対して，構造物あるいは構造部位がその目的とする働きを不都合なく発揮できる性能のこと.
耐久性	構造物あるいは構造部位の経時的な性能低下に対する抵抗性.

※1　劣化：鋼材については腐食により板厚が減じる現象を示す。

【参考文献】

1)　（財）鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，平成 4 年 7 月
2)　（社）土木学会：土木用語大辞典，平成 11 年 2 月
3)　東京埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，平成 15 年 3 月
4)　日本工業規格
5)　（社）日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧共通編，平成 17 年 12 月
6)　（社）日本道路協会：道路橋補修便覧，昭和 54 年 2 月
7)　国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，平成 14 年 10 月
8)　（独）水資源機構：機械設備管理指針，平成 15 年 11 月
9)　（社）日本建築学会：建築物の改修の考え方・同解説，平成 14 年 2 月
10)　ISO2394：構造物の信頼性に関する一般原則，平成 10 年 6 月
11)　ISO13822：構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価，平成 13 年 12 月

2.2　鋼構造物における健全度評価とは

2.2.1　健全度の定義

鋼構造物の健全度とは，供用中の構造物が劣化損傷し，安全性，耐荷性，耐久性の要求性能に対し，どの程度，保有性能が低下しているのかの度合いということで定義される．

健全度評価に用いるデータは，道路橋，鉄道橋，港湾構造物，堰・水門等の各構造物管理者で実施している点検結果がベースになる．しかしながら，健全度評価を行う評価手法は開発・検討段階である．今後は，これまで得られている知見や経験と最新の検査技術，解析技術等を用いて，早期に評価手法・基準を作成することが必要である．この評価手法が確立されると，例えば，耐荷力がまだ十分残存しているにもかかわらず，撤去されるなどの事態を防げるなど，公共構造物の長寿命化や経済性の向上，安全・安心な使用が可能となる．さらに，この健全度評価に求められるのは，損傷部材や構造の損傷程度，劣化進行度などを，定量的に推定し，その結果を基に，補修補強の時期などが判断できる手法を示すことである．損傷が構造物の安全性をどの程度低下させるものか，ただちに対応が必要か，あるいは補修までに時間的余裕があるかなどの判定指標を提示し，適切な時期に適切な補修の実施を判定できる技術支援となることが望まれている．

次に，現在行われている鋼構造物の健全度評価について，道路橋の腐食損傷を事例として以下に示す．道路橋の場合，多くは２段階に分けて健全度の評価を行い，構造物の補修および補強の必要性を判定しているのが一般的である．

第一段階では，定期点検等で発見され各種損傷に対し，「要緊急対策」，「要対策」，「要監視」，「損傷なし」の４つの損傷ランクに区分する．ここで，「要緊急対策」と判定されるものは，構造物の安全性や交通および第三者に影響を及ぼす著しい損傷であり，緊急対策後は，「要対策」のランクとして扱われるものである．道路橋の腐食損傷の例を以下に示す．

「要緊急対策」：損傷が著しく構造物の安全性が短期間に失われる可能性がある場合
「要対策」　　：劣化（フクレ，ワレ，ハガレ）が相当範囲に広がっている場合
「要監視」　　：劣化が部材に発生しているが，即時対策が必要でない場合
「損傷なし」　：損傷がない場合

第二段階では，第一段階で「要対策」と判定された損傷に対し，定期点検の場合の目視外観調査主体から、非破壊試験などを活用し，より詳細な調査を実施するのが一般的である．

・構造物の設計・施工の情報を把握するための設計図書や構造物管理台帳の調査，
・過去の点検履歴および補修・補強履歴の調査，
・腐食している部位の減厚調査として非破壊検査（超音波垂直探傷試験，レーザー計測等）
・減厚による強度および剛性の低下の程度の把握を目的とした応力計測，構造解析

これらの調査結果を総合的に分析し，健全度評価を実施しており，補修補強の必要性や実施時期の判定指標としている．今後，益々経年劣化する構造物が増加する状況のもと，適切な維持管理や長期耐久性を求められる反面，十分な維持管理費用の確保が困難な時代になることを考えると，構造物の健全度評価は，益々，重要になるといえる．

【参考文献】

1)　構造物点検要領：首都高速道路株式会社保全・交通部，2001.

2.2.2　点検･調査要領

鋼構造物を長期間健全な状態に維持管理するためには，定期的に点検を行なうことが必要である．しかし，この定期点検で不十分な点検を行なうと，時間と費用の浪費だけでなく，重大な損傷を見落とす危険性がある．次の定期点検までに損傷が急激に拡大している可能性があり，最悪，構造物の機能を損なう危険性を含んでいる．

点検で重要なことは，点検員が，損傷が生じる原因，損傷が発生しやすい箇所などを基礎知識として持っていることである．アメリカ合衆国では橋梁点検員の資格制度が取り入れられており，日本においても，財団法人海洋架橋・橋梁調査会における「橋梁点検員」認定制度に続き，平成 17 年度から社団法人日本鋼構造協会において「鋼構造診断士制度」を設立している．この資格は、土木鋼構造物の点検・診断技術を含む維持管理全般に係る広い知識を有し，鋼構造部材・部位に発生する様々な損傷・劣化に適切に対応できる技術者を養成することが目的となっている．今後，各鋼構造物の管理者が，点検要領や維持管理基準の中に，この資格を有しているものが点検業務を行なうことなどを明記するなどが必要であると思われる．

表 2.2.2.1 に、各鋼構造物の管理機関の点検要領の概要を示す．一般的に点検は，日常点検，定期点検，臨時点検の３つに区分されて実施されている．それらの点検について，鋼橋を例に各点検の特徴を以下に示す．

写真 2.2.2.1 は，年に２，３回実施する高架橋梁下からの日常点検の状況を示す．この点検では，剥落しそうなもの，漏水跡，異常音，主桁の下フランジ下面等の高架下から確認できる範囲でのさびや防食機能の劣化状況などが発見される．

写真 - 2.2 は，高所作業車を用いた定期点検状況を示す．この点検は５年に１回の頻度で実施される定期的に実施される点検に区分され，鋼桁等に可能な限り近づいて点検するが，点検作業が制限されたり，接近不可能な箇所があったりして点検精度が低下する場合もある．定期点検により,主桁下フランジの上面や支承部の腐食状況などが発見できる．

写真 2.2.2.3 は，補強工事等で設置した足場上で行なう点検状況を示す．この点検は，定期点検と異なり，ほとんどすべての構造物に対し接近点検が実施できる．この点検により，あらゆる損傷が発見される機会となり得る．工事用の吊足場が設置された場合は，精度の高い点検が実施できる貴重な機会なので，構造物の管理者は事前に点検計画を策定し，効率的な点検を行なう必要がある．



写真 2.2.2.1　高架下からの遠望目視点検の状況





(a) (b)

写真 2.2.2.2　高所作業車を用いた定期点検状況



写真 2.2.2.3　工事用足場上での詳細調査の状況

定期点検等で，鋼構造物に腐食損傷が発見された場合に一般的に行われる詳細調査の概要を以下に示す．

①調査方法の立案

詳細調査を行なう前に，鋼構造物管理台帳，竣工図，設計計算書，過去の点検結果，および補修補強履歴などの基本データを整理し，調査方法の立案を行なうことが必要である．前回の点検時期（点検間隔）と点検結果は，詳細調査において重要な資料となる．

②詳細調査

詳細調査には，「腐食による板厚の減少量の測定」「腐食による断面欠損の影響度の把握を目的とした応力計測および構造解析」，「腐食の発生原因である浸水箇所や排水施設調査」などがある．特に，腐食の発生原因の調査を十分に行わず補強を行ったり，十分な下地処理を実施せず再塗装した場合は次回の点検時までに腐食が再発する場合があるので注意が必要である．

写真 2.2.2.4 は，床版損傷部からの漏水による中主桁で腐食が再発した事例を示し，写真 2.2.2.5 は，伸縮装置からの漏水による桁端および支承部の腐食事例を示す．このように，腐食の発生原因である床版損傷や伸縮装置を補修しないと，時間の経過とともに腐食は進行し，除々に鋼構造物の耐荷力が低下することになる．



(a)　　(b)

写真 2.2.2.4　床版損傷部からの漏水による中主桁で腐食



写真 2.2.2.5　伸縮装置からの漏水による桁端および支承部の腐食事例

表 2.2.2.1　鋼構造物の管理機関別点検要領

構造物管理者	国土交通省	東京都	各日本高速道路㈱	首都高速道路㈱	阪神高速道路㈱	本州四国連絡高速道路㈱	ＪＲ	ダム、堰、水門施設管理者
点検要領名	橋梁定期点検要領	橋梁の点検要領	道路構造物点検要領	構造物等点検要領	道路構造物の点検要領	長大橋梁点検	鉄道構造物等維持管理標準（構造物変）・同解説	ダム、堰施設技術基準
点検の種類	・通常点検 ・中間点検 ・特定点検 ・異常時点検 ・定期点検	・日常点検 ・定期点検 ・異常時点検	・初期点検 ・日常点検 ・定期点検 ・詳細点検 ・臨時点検	・日常点検 ・定期点検 （接近点検、初回点検、追跡点検） ・臨時点検	・初期点検 ・日常点検 ・定期点検 ・臨時点検	・定期点検 （巡回点検、基本点検、精密点検） ・不定期点検 （異常時点検、臨時点検）	・全般検査 （通常全般検査、特別全般検査） ・個別検査 ・初回検査 ・臨時検査	・巡視 ・定期点検 ・総合点検 ・臨時点検 ・精密調査
点検の頻度	【定期点検】 ・供用後２年以内に１回目実施。 ・２回目以降は原則５年以内に実施。	【定期点検】 １回/５年	【初期点検】 供用開始前等に実施。 【定期点検】 1回/年 【詳細点検】 1回／５年 1回/10年	【定期点検】 接近点検 ：１回/５年 初回点検 ：供用１年後 追跡点検 ：適宜	【初期点検】 供用開始前等に実施 【定期点検】 １回/４～８年	【基本点検】 １回/１～２年 【精密点検】 １年目，３年目，５年目，以降５年毎	【全般検査】 １回/２年（告示）	【定期点検】 ・月点検 （１ヶ月点検） ・年点検 （１ヵ年点検） ：洪水期の前などの適切な時期
点検の方法	・目視 ・ノギス ・長音波板厚計による板厚計測 （必要に応じて）	【定期点検】 接近目視 点検機器 （必要に応じて）	【初期点検】 近接目視 【定期点検】 遠望目視 【詳細点検】 近接目視	【定期点検】 接近目視 点検器機	【初期点検】 接近目視 【定期点検】 接近目視	【基本点検】 接近目視、非破壊検査（管理路および点検車上） 【精密点検】 計器による高度な測定	【全般検査】 目視による検査 【個別検査】測定機器等を用いた詳細な検査	【定期点検】 ・月点検 ：目視による外観 ・年点検 ：月点検のレベルより詳細に各部の点検および計測

【参考文献】

1)　構造物点検要領：首都高速道路株式会社保全・交通部，2001.

2)　鋼橋における劣化現象と損傷の評価：土木学会，1996

2.2.3 目的

本報告書においては，道路，鉄道，港湾，水門ゲート等の各構造物の耐荷性能に関わる健全度評価を行う場合の健全度評価の目的について示す.鋼構造物の健全度の評価は現状では各構造物毎に様々であるが，本基準では鋼構造物が健全で所要の耐荷性能を満足することを示すことにより行うものとする.

全ての構造物は，外力や環境の影響によって経年とともに性能が低下する．したがって，想定される作用のもとで，構造物本体あるいは構造物を構成する部材が継続して要求性能を満足している必要がある．そのために，設計・施工時には，性能の低下を考慮に入れた様々な配慮が行われるが，一方で適切な維持管理を行うことにより性能低下のレベルを抑制することが極めて重要である.そこで,本標準においては,構造物が要求性能を満足しているかどうかを検査により確認し，必要に応じて措置し，記録を行うという性能規定型の維持管理体系の考え方を採用することとした．なお，ここでいう要求性能として，列車が安全に走行できるとともに，旅客，公衆の生命を脅かさないための安全性や腐食耐久性を考慮しなければならないが，必要に応じて使用性や復旧性などを考慮することができる．また，要求性能は供用期間中に変化することがあるので，実状に応じて構造物が要求性能を満足しているかどうかを適宜，確認する必要がある．変状には，部材の一部に発生するものから構造物全体にわたるものまで，その種類と程度は千差万別であり，それぞれの変状が構造物の性能にどのように関連しているかを把握することは容易ではない．また，性能の確認には，性能項目の照査のほか，変状原因の推定や変状の予測を含めて総合的な評価が必要と考えられる.

2.2.4 判定要領

構造物に生じる変状は，部材の一部に発生するものから構造物全体にわたるものまで，その種類と程度は千差万別である．それらの全ての変状に対して，それぞれの変状が構造物の性能低下にどのように影響するのかを把握することは容易ではない．また，適切な維持管理を行うためには，変状原因の推定や変状の予測を行い，それらの情報を含めて総合的に判定を行う必要がある.

健全度の判定は，例えば上記に示すように各健全度ランクに応じて区分される．判定区分は各構造物の特性を考慮して定まることが望ましい．代表的な判定区分の例を表 2.2.4.1 から表 2.2.4.6 に示す.

健全度の判定により，機能性，安全性に問題がある場合には，健全度のランクに応じて，再度詳細な検査を実施する．健全度評価の結果は，次回の調査・点検時期あるいは補修時期の決定や補修・補強に反映させることが望ましい.

旧日本道路公団においては，道路構造物では以下のような健全判定に基づいて行っている.

表 2.2.4.1 判定区分

判定区分		一般的状況
機能面に対する判定	AA	損傷・変状が著しく、機能面から見て緊急補修が必要である場合
	A	損傷・変状があり、機能低下が見られ補修が必要であるが、緊急補修を要しない場合、または、調査が必要な場合
	B	損傷・変状はあるが機能低下が見られず、損傷の進行状態を継続的に観察する必要がある場合
	ＯＫ	損傷・変状がないか、もしくは軽微な場合
第三者被害に対する判定	E	安全な交通または第三者に対し支障となる恐れがあり、緊急的な対策が必要な場合

旧首都高速道路公団では，道路構造物では以下のような健全判定に基づいて行っている．

Ａランク：緊急対策が必要な損傷等

　A0 ランク：構造物全体の安全性に影響のあるＡランク損傷

　A1 ランク：構造物全体の安全性に影響はないが，第３者被害を生ずる恐れがあるＡランク損傷等

Ｂランク：対応策が必要な損傷等

Ｃランク：次回点検時まで対応策が必要ない損傷等

Ｄランク：異常なし（点検実施の事実を記録に残す）

東京都では，道路構造物では以下のような健全判定に基づいて行っている．

日常点検

表 2.2.4.2　日常点検の判定基準

判定区分		状況	措置
Ⅰ	健全	損傷が特に認められない	―
Ⅱ	損傷がある	損傷がある	記録
Ⅲ	損傷が著しい	損傷が著しい	緊急補修

表 2.2.4.3　定期点検の判定基準（部材別）

判定区分		状況	措置
a	健全	損傷が特に認められない	―
b	ほぼ健全	損傷が小さい	記録
c	やや注意	損傷がある	記録 動態観測
d	注意	損傷が大きい	記録・確認
e	危険	損傷が著しい．または，第三者へ影響を与える可能性がある	確認 緊急補修

表 2.2.4.4　定期点検の判定基準（径間別）

判定区分		状況	措置
a	健全	総合健全度判定式による	―
b	ほぼ健全		記録
c	やや注意		記録 動態観測
d	注意		記録・確認
e	危険		確認 緊急補修

鉄道では，以下のような健全度判定に基づいて行っている.

表 2.2.4.5　構造物の状態と標準的な健全度の判定

健全度		構造物の状態
A		運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす，またはそのおそれのある変状等があるもの
	AA	運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり，緊急に措置を必要とするもの
	A1	進行している変状等があり，構造物の性能が低下しつつあるもの，または，大雨，出水，地震等により，構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2	変状等があり，将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B		将来，健全度 A になるおそれのある変状等があるもの
C		軽微な変状等があるもの
S		健全なもの

注：健全度 A1，A2，および健全度 B，C，S については，各鉄道事業者の検査の実状を勘案して区分を定めてもよい.

港湾構造物では，以下のような健全度判定に基づいて行っている.

表 2.2.4.6　塗装の劣化度

劣化度	一般的状況
0	全く健全な状態
1	損傷や劣化が認められるが，防食機能は維持している状態
2	部分的に損傷が生じ，防食機能が一部損なわれている状態
3	全面的に損傷や劣化が生じ，防食機能が失われている状態

参考資料

各構造物の管理者別の健全度判定表を以下に示す

日常点検の判定標準

⑴　国土交通省(旧建設省)

表2.2.4.7

判定区分	一般的状況
Ⅰ	損傷が著しく，交通の安全確保の支障となる恐れがある.
Ⅱ	損傷が大きく，詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある.
Ⅲ	損傷が認められ，追跡調査を行う必要がある.
Ⅳ	損傷が認められ，その程度を記録する必要がある.
ＯＫ	点検の結果から，損傷は認められない.

⑵　旧日本道路公団

表2.2.4.8

判定区分	一般的状況
ＡＡ	損傷が著しく，交通の安全確保，または第三者に対し，支障となっているか，もしくはその恐れがあり，緊急補修の必要がある場合.
Ａ	損傷が大きく，補修するかどうかの検討が必要な場合.
Ｂ	損傷は小さいが補修するかどうかの検討が必要な場合.
ＯＫ	損傷がないか，あっても軽微で，補修する必要がない場合.

⑶　首都高速道路株式会社(旧首都高速道路公団)

表2.2.4.9

判定区分	一般的状況
Ⅰ	損傷が著しく，交通の支障や第三者への影響が大であり，緊急補修のひつようがあるもの.
Ⅱ	損傷が中程度，あるいは環境条件を阻害するもので交通に与える影響は小さいが要補修と考えられるもの.
Ⅲ	損傷が小さく，現在のところ交通に与える支障もなく機能の低下が見られないもので，日常点検を続けて，変状の進行程度に留意していくもの.

(4)　阪神高速道路株式会社(旧阪神高速道路公団)

表 2.2.4.10

判定区分	一般的状況
A	損傷が著しく道路構造物の機能低下を招き,安全かつ円滑な交通の確保に支障をきたす恐れ，または第三者への影響が大であると考えられ，緊急に補修の必要がある場合.
A	損傷が著しく，早急に補修する必要がある場合.
B	損傷があり，状況に応じて補修する必要がある場合.
ＯＫ	上記以外の場合

(5)　東京都　港湾施設

表 2.2.4.11　一般点検

判定区分		状況
異常の有無	有	各調査項目の判定基準に示した異常がみられる場合
	なし	異常が見られない場合

一時点検

表 2.2.4.12　一時点検

判定区分	状況
A	施設の機能上の問題があり，緊急に補修の必要がある場合.
B	計画的な補修・補強を実施する必要がある場合.
C	現状では補修・補強の必要がないが，継続して観測する必要がある場合,
D	異常が見られない場合.
Q	異常の程度を判定できない場合で，詳細な調査を要する場合

(6)　東京都　橋梁

表 2.2.4.13　一般点検

判定区分	判定の内容
A	健全で，損傷が認められない.
B	ほぼ健全で，損傷が軽微で補修を行う必要がない.
C	状況に応じて補修を行う必要がある.
D	補修等を行う必要がある,
E	橋梁構造の安全性の観点から，緊急対応の必要がある.

(7) 鉄道（ＪＲ）

表 2.2.4.14 構造物の状態と標準的な健全度の判定

健全度		構造物の状態
A		運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす，またはそのおそれのある変状等があるもの
	AA	運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり，緊急に措置を必要とするもの
	A1	進行している変状等があり，構造物の性能が低下しつつあるもの，または，大雨，出水，地震等により，構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2	変状等があり，将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B		将来，健全度Aになるおそれのある変状等があるもの
C		軽微な変状等があるもの
S		健全なもの

2.2.5　部材評価と構造物評価

（1）鋼道路橋の健全度評価

国土交通省道路局で策定された「橋梁定期点検要領(案)・ 平成 16 年 3 月」を参考に，部材評価の考え方を整理する．一般には，この部材評価に基づき，後述する対策区分の判定が実施される（一部，構造物評価に対応する）が，ここでは，現在，国土交通省で一部検討が進められている構造物評価，東京都及び横浜市で展開されている構造物評価についても言及したい．

（a）損傷程度の評価

定期点検において，損傷（以下では，腐食損傷を指すものとする）の程度は，後述の損傷評価基準に基づき，要素毎に評価される．これらの記録は，橋梁の状態を示す最も基礎的なデータとして蓄積され，維持・補修等の計画の検討などに利用される．そのため，損傷程度の評価は，できるだけ正確かつ客観的となるように行う必要がある．

損傷程度の評価では，損傷種類に応じて定性的な区分で評価するものと定量的な数値データとして評価されるもの，あるいは，その両方で評価することが必要なものがあるが，何れの評価においても，複数の部位，部材の組合せによる総合的な評価（主観的な構造物評価）である対策区分の判定とは異なり，損傷の程度を表す客観的な事実を示すものにすぎない点に注意が払われる．

これらのデータは，橋梁の状態を示す最も基礎的なデータとなるだけでなく，対策区分の評価やその将来予測などを行う際にも必要となる．したがって，これらのデータには，客観性だけでなく，点検毎に採取されるデータ間で相対比較が行えるような連続性，データの均質性も要求される．データ採取に当たっては，これらの点についても留意する必要がある．

（b）対策区分の判定

定期点検では，橋梁の損傷状況を把握した上で，構造上の部材区分あるいは部位毎の対策区分について，（d）の対策区分判定要領を参考に，表 2.2.5.1 の判定区分に基づく判定が実施される．

A以外の判定区分については，損傷の状況，損傷の原因，損傷の進行可能性，当該判定区分とした理由など，定期点検後の維持管理に必要な所見が記録される．加えて，複数の部材の，複数の損傷を総合的に評価するなど，橋梁全体としての状態についての所見も記録される．

表 2.2.5.1　対策区分の判定区分

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか，損傷が軽微で補修を行う必要がない．
B	状況に応じて補修を行う必要がある．
C	速やかに補修等を行う必要がある．
E 1	橋梁構造の安定性の観点から，緊急対応の必要がある．
E 2	その他，緊急対応の必要がある．
M	維持工事で対応する必要がある．
S	詳細調査の必要がある．

1)定期点検では，当該橋梁の各損傷に対して，補修，補強，緊急対応，維持工事対応，詳細調査など，何らかの対策の必要性について，点検で得られる情報の範囲で概略判定される．ここで，橋梁検査員は

点検結果から損傷原因の推定に努め，補修等の範囲や工法の検討などが行えるよう必要な所見を記録するとともに，複数の部材の，複数の損傷を総合的に評価（構造物評価）するなど，橋梁全体としての状態についての所見も記録する．

対策区分の判定の評価単位は，「構造上の部材区分あるいは部位」毎に，次に示すとおりである．

・「主桁」，「横桁」，「縦桁」，「主構トラスの上・下弦材」，「アーチのアーチリブ，補剛桁」，「ラーメンの主構（桁・脚）」，「斜張橋の塔柱」は，径間毎の桁等各１本単位

・「橋台」等は，下部構造一基単位

・「床版」，「対傾構」等，上記以外のものは，径間単位

また，Ａを除く判定区分については，対策が講じられた場合には，速やかに表 2.2.5.1 によって再判定を行い，その結果を記録に残すことが必要である．

2) 上記の対策区分の判定の基本的な考え方は，次のとおりである．

①判定区分Ａとは，少なくとも定期点検で知りうる範囲では，損傷が認められないか損傷が軽微で補修の必要がない状態をいう．

②判定区分Ｂとは，損傷があり，補修の必要があるが，損傷の原因，規模が明確であり，直ちに補修するほどの緊急性はなく，放置しても次回の定期点検まで（＝５年程度以内）に構造物の安全’性が著しく損なわれることはないと判断できる状態をいう．

③判定区分Ｃとは，損傷が相当程度進行し，当該部位，部材の機能や安全率の低下が著しく，次回の定期点検まで（＝５年程度以内）には補修等が必要であると判断できる状態をいう．

④判定区分Ｅ１とは，橋梁構造の安全’性が著しく損なわれており，緊急に処置されることが必要と判断できる状態をいう．

判定区分Ｅ２とは，自動車，歩行者の交通障害や第三者等への被害の恐れが懸念され，緊急に処置されることが必要と判断できる状態をいう．なお，一つの損傷でＥ１，Ｅ２両者の理由から緊急対応が必要と判断される場合はＥ１に区分する．

⑤判定区分Ｍとは，損傷があり，当該部位，部材の機能を良好な状態に保つために日常の維持工事で早急に処置されることが必要と判断できる状態をいう．

⑥判定区分Ｓとは，損傷があり，補修等の必要性の判定を行うに当たって原因の特定など詳細な調査が必要と判断できる状態をいう．本区分には，詳細調査を経ないで追跡調査が必要と判断できる場合も含められる．なお，主要部材についてＣ又はＥ１の判定を行った場合は，対策として補修で足りるか，又は更新（部材の更新又は橋の架替）が必要か，併せて判定される．

3) この判定は，各損傷に対して維持・補修等の計画を検討する上で特に参考とされる基礎的な評価であるため，統一的な評価基準で行われることが重要である．そこで，表-2.2.15 に示す標準的な判定区分の目安を上述の 2)に示すとともに，**（ｄ）**対策区分判定要領が提示された．

以上の判定に当たっては，橋梁についての高度な知識や経験が不可欠であり，橋梁検査員がこれを行うこととなるが，状況に応じて，詳細調査を実施し，また，別途専門的知識を有する有識者の協力を得て判定を行うことも肝要である．

4) この判定は，点検して発見した個別の損傷に対する対策区分を判定するものである．したがって，部材に生じた複数の損傷を総合的に評価して補修等を行う場合や予防保全の観点から補修等を行う場合には，判定区分よりも早い時期に補修等を行う場合もあり得る．例えば，防食機能の劣化でＢと判定された場合であっても，ライプサイクルコストの観点から５年以内に塗り替えを行う場合などが，その事例である．

（c）損傷評価基準

1）腐食

a)一般的性状・損傷の特徴

腐食は，（塗装やメッキなどによる防食措置が施された）普通鋼材では集中的にさびが発生している状態，または，さびが極度に進行し，断面減少や腐食を生じている状態をさす．耐候性鋼材の場合には，保護性さびが形成されず，異常なさびが生じている場合や，極度なさびの進行により断面減少が著しい状態をさす．

腐食しやすい個所は，漏水の多い桁端部，水平材上面など滞水しやすい箇所，支承部周辺，通気性，排水性の悪い連結部，泥や埃の堆積しやすい下フランジの上面，溶接部等である．

b)他の損傷との関係

基本的には，断面欠損を伴うさびの発生を腐食として評価し，断面欠損を伴わないと見なせる程度の軽微なさびの発生は防食機能の劣化として評価する．断面欠損の有無の判断が難しい場合には，腐食として扱う．また，耐候性鋼材で保護性さびを生じるまでの期間は，さびの状態が一様でなく異常腐食かどうかの判断が困難な場合があるが，断面欠損を伴わないと見なせる程度の場合には防食機能の劣化として評価する．なお，ボルトの場合も同様に，断面欠損を伴うさびの発生を腐食として評価し，断面欠損を伴わないと見なせる程度の軽微なさびの発生は防食機能の劣化として評価する．

c)その他の留意点

腐食を記録する場合，塗装などの防食機構にも損傷が生じていることが一般的であり，これらについても同時に記録する必要がある．鋼材に腐食が生じている場合に，溶接部近傍では，き裂損傷が見落とされることが多いので注意が必要である．

d)損傷程度の評価

損傷程度の評価は，次の区分（表 2.2.5.2 参照）によるものとする．なお，区分に当たっては，損傷程度に関係する次の要因毎にその一般的状況（表 2.2.5.3 参照）から判断した規模の大小の組合せによることを基本とする．

表 2.2.5.2　損傷程度の評価区分

区分	一般的状況		備考
	損傷の深さ	損傷の面積	
a	損傷なし		
b	小	小	
c	小	大	
d	大	小	
e	大	大	

表 2.2.5.3(a)　要因毎の一般的状況（損傷の深さ）

区分	一般的状況
大	鋼材表面に著しい膨張が生じているか，または明らかな板厚減少が視認できる．
中	－
小	さびは表面的であり，著しい板厚の減少は視認できない．

表 2.2.5.3(b)　要因毎の一般的状況（損傷の面積）

区分	一般的状況
大	着目部分の全体にさびが生じている．または拡がりのある発さび箇所が複数ある．
小	損傷箇所の面積が小さく局部的である．

２）防食機能の劣化

a)防食機能の分類

防食機能の分類を表 2.2.5.4 に示す．

表 2.2.5.4　防食機能の分類

分類	防食機能
1	塗装
2	メッキ，金属溶射
3	耐候性鋼材

b)一般的性状・損傷の特徴

鋼部材を対象とし，分類１や２においては，防食皮膜の劣化により変色，ひび割れ，膨れ，剥がれ等が生じている状態を，分類３においては保護性さびが形成されていない状態をさす．

c)他の損傷との関係

鋼材にさびが生じている場合には腐食としても評価する．耐候’性鋼材で安定さびを生じるまでの期間は，さびの状態が一様でなく異常腐食かどうかの判断が困難な場合があるが，著しい断面欠損を伴っていると見なせる場合には腐食としても評価する．

d)損傷程度の評価

損傷程度の評価は，次の区分（表 2.2.5.5 参照）によるものとする．

表 2.2.2.5(a)　損傷程度の評価（分類１：塗装）

区分	一般的状況
a	損傷なし．
b	－
c	最外層の防食皮膜に変色したり，局部的なうきが生じている．
d	部分的に防食皮膜が剥離し，下塗りが露出している．
e	防食皮膜の劣化範囲が広く，点さびが発生している．

表 2.2.5.5(b)　損傷程度の評価（分類２：メッキ，金属溶射）

区分	一般的状況
a	損傷なし．
b	－
c	局部的に防食皮膜が劣化し，点さびが発生している．
d	－
e	防食皮膜の劣化範囲が広く，点さびが発生している．

表 2.2.5.5(c)　損傷程度の評価（分類３：耐候性鋼材）

区分	一般的状況
a	損傷なし（保護性さびは粒子が細かく，一様に分布，黒褐色を呈す）． （保護性さびの形成過程では黄色，赤色，褐色を呈す）．
b	－
c	さびの大きさは１～５㎜程度で粗い．
d	さびの大きさは５～25㎜程度のうろこ状である．
e	さびは層状の剥離がある．

（ｄ）対策区分判定要領

１）対策区分判定の基本

対策区分判定は，部材の重要性や損傷の進行状況，環境の条件など様々な要因を総合的に評価し，原則として，構造上の部材区分あるいは部位ごとに，損傷状況に対する判断を行うものである．より的確な判定を行うためには，対象である橋梁構造（含付属物）について，構造的特徴や使用材料などに関する十分な知識が必要である．したがって，判定に当たっては，現地の損傷状況のみならず必要な書類等についても調査を行うことが重要である．

判定に当たって，一般的に必要となる情報の中，代表的なものは次のとおりである．

①構造に関わる事項

・構造形式，規模，構造の特徴

②設計・製作・施工の各条件に関わる事項

・設計年次，適用示方書，架設された年次，使用材料の特’性

③使用条件に関わる事項

・交通量，大型車混入率，橋梁の周辺環境・架橋条件

・維持管理の状況（凍結防止剤の散布など）

④各種の履歴に関わる事項

・橋梁の災害履歴，補修・補強履歴

２）対策区分判定の流れ

対策区分判定の基本的な流れは，図 2.2.5.1 のとおりである．

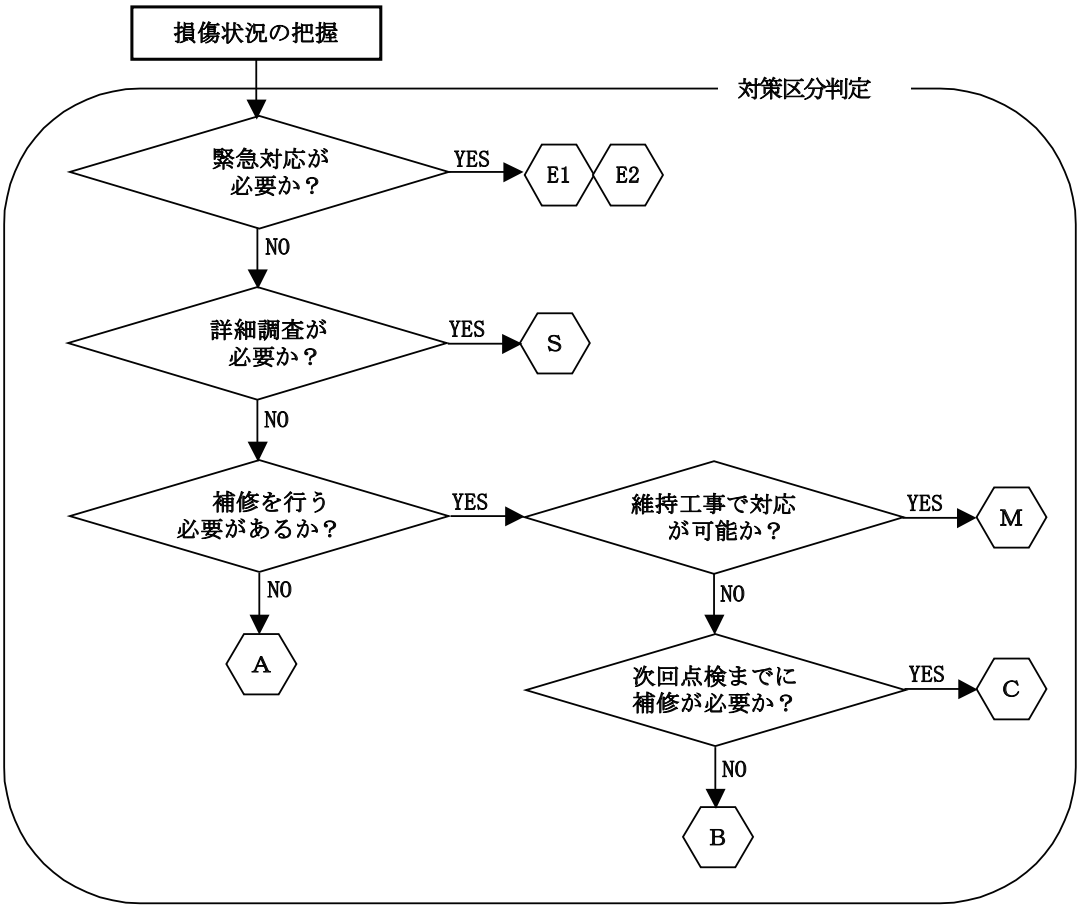


図 2.2.5.1　対策区分判定の流れ

3）対策区分判定

a)腐食

①判定区分Ｅ１：橋梁構造の安全性の観点から緊急対応が必要な損傷

ケーブル構造物のケーブル材に著しい腐食を生じており，その腐食が構造安全性を著しく損なう状況や，鈑桁形式の桁端の腹板が著しい断面欠損を生じており，対象部材の耐荷力の喪失によって構造安全性を著しく損なう状況では，緊急対応が妥当と判断できる場合がある．

②判定区分Ｅ２：その他に緊急対応が必要な損傷

③判定区分Ｓ：詳細調査が必要な損傷

同一の路線における同年代に架設された橋梁と比べて損傷の程度に大きな差があり，環境や地域の状況など一般的な損傷要因だけでは原因が説明できない状況などでは，進行性の評価や原因の特定など，損傷の正確な判定のために詳細調査を実施することが妥当と判断できる場合がある．

④判定区分Ｍ：維持工事で対応が必要な損傷

全体的な損傷はないが，部分的に小さなあてきずなどによって生じた腐食があり，損傷の規模が小さく措置のしやすい場所にある状況などでは，維持工事で対応することが妥当と判断できる場合がある．

⑤判定区分Ｂ，Ｃ：補修等が必要な損傷

b)防食機能の劣化

①判定区分Ｅ１：橋梁構造の安全性の観点から緊急対応が必要な損傷

②判定区分Ｅ２：その他に緊急対応が必要な損傷

③判定区分Ｓ：詳細調査が必要な損傷

大規模な膨れや剥がれが生じており，施工不良や塗装系の不適合などによって急激に剥がれ落ちることが懸念される状況や，異常な変色があり，環境に対する塗装系の不適合，材料の不良，火災などによる影響などが懸念される状況では，詳細調査を実施することが妥当と判断できる場合がある．

④判定区分Ｍ：維持工事で対応が必要な損傷

全体的な損傷はないが，部分的に小さな当てきずによって生じた塗装の剥がれ・発さびがあり，損傷の規模が小さく措置のしやすい場所にある状況では，維持工事で対応することが妥当と判断できる場合がある．

⑤判定区分Ｂ，Ｃ：補修等が必要な損傷

（ｅ）構造物評価（全体・総合評価）

前述したように，**（ｂ）**対策区分の判定において，Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｅ１，Ｅ２，Ｍ，Ｓの判定を行うためには，高度な知識や経験を有する橋梁点検員が，部材評価の結果を受け，総合的な判断に基づき実施することが不可欠であり，結果として，判定結果は主観的ではあるが，構造物評価（全体・総合評価）となっている．現状においては，損傷した橋梁の増加に伴い，このような熟練した橋梁点検員の数が不足していることは言うに及ばない．

国土交通省では，従来から橋梁マネージメントシステム（ＢＭＳ）構築への足掛かりとして，既往の研究成果に基づく評価手法「橋梁マネージメントシステムの開発に関する調査研究報告書(H11.3)，建設省土木研究所」によって，橋梁の健全性を客観的に示す指標（健全度）を試算・検証し，米国で開発された健全度評価手法である「減点法」の問題点を整理するとともに，改善点を洗い出し，実用的な評価手法の確立を計ろうとしている．

ここでは，以上のような国土交通省が現在纏めようとしている改良型の減点法について，要約するとともに，東京都の事例，横浜市の事例についても言及する．

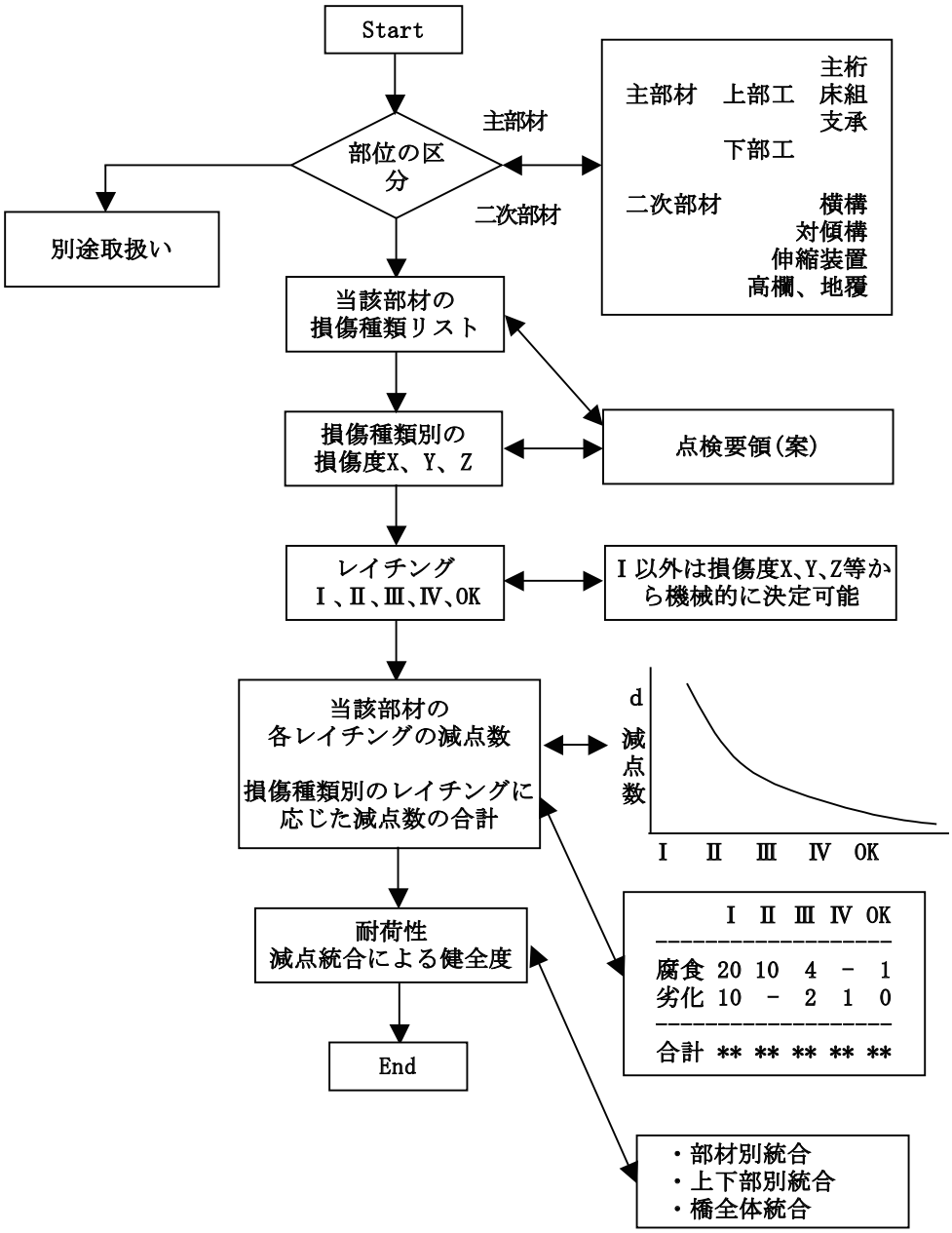


図2.2.5.2　減点法に基づく健全度評価の手順

1）減点法に基づく健全度評価

以下に，減点法に基づく健全度評価の手順を示す（図2.2.5.2参照）.

①着目する部位は，耐荷性に関係する主部材とする．すなわち，上部工は主桁・床組（縦桁・横桁）・床版・支承(便宜的に上部工に含める）に区分し，下部工は駆体（橋脚・橋台）・基礎に区分する.

②点検要領(案)に従い，部材の損傷度は一義的に損傷重み付け（Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，OK）を決定する．但し，損傷度判定ランクⅠは，道路管理者，点検者の判断とするため，評価項目より除外する．なお，Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，OKは表2.2.5.2のｅ，ｄ，ｃ，ｂ，ａに対応する.

③各部材における損傷パターン毎の最悪の損傷度判定がⅠの場合の減点数と損傷度判定Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，

OK の場合の減点低減率を予め決定しておく．

④損傷種類別の重み付けに応じた減点数の合計を部材毎に算出する．但し，当該部材の最大減点数を超えないものとする．

⑤減点統合法に従って，上下部工ごと及び橋全体の総減点数（Σｄ）を算出する．

⑥無損傷状態の持点から総減点数を減じた値を健全度評価値とする．例えば，持点 100 の場合，健全度評価値 U=100－Σｄとなる．

a)減点法の問題点

上記の減点法に基づく健全度評価法の妥当性を検証するために，数橋について試算した結果と専門家の評価結果を比較し，種々の検討を行った．その結果，以下の結論を得た．

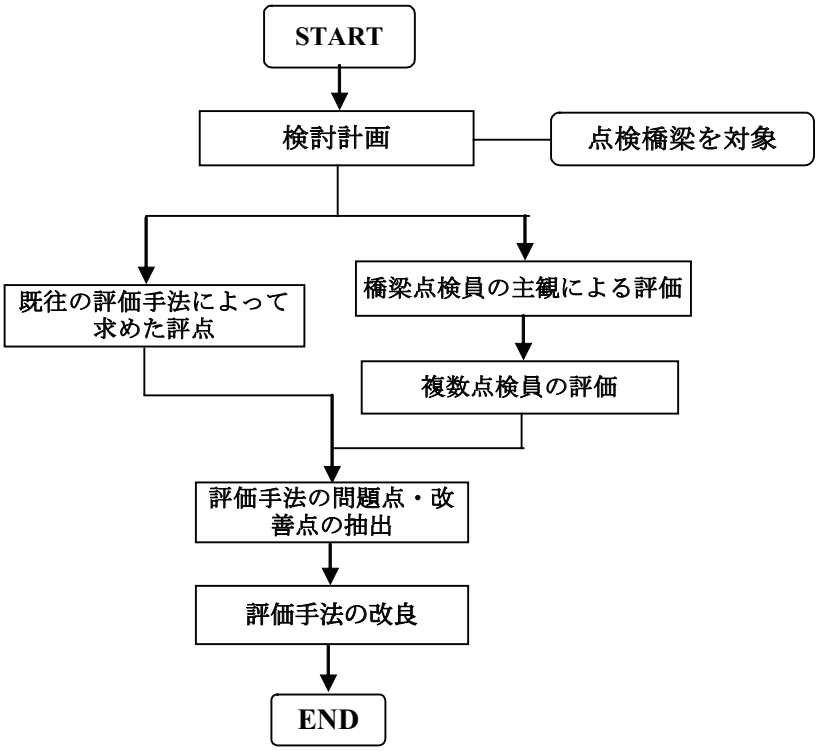


図 2.2.5.3　検討方針とその手順

①減点法によって得られた評点が，専門家によって判定された評点と大きく乖離する場合がある．

②検証ケースは少ないものの，減点方法の変更などの方法で，両者の評点を近づけることが可能である．

③より多くの検証結果から，評価手法の問題点・改善点を洗い出し，実用的な評価手法を検討すべきであると考えられる．

b)検討方針

上記の①～③の検討結果を踏まえ，より多くの橋梁に対して，減点法に基づく健全度評価法によって得られた評点と，専門家によって判定された評点を比較することにより，評価手法の問題点・改善点を洗い出すことを目的として,図 2.2.5.3 に示す手順で評価手法の改良を行うこととした(ここで，点検対象橋梁は，国土交通省管内の 175 橋であり，橋梁マネジメントシステム検討会の委員である多数の専門家の評定結果を参考とした)．

c)主観による健全度評価要領

径間毎に，評価は１００点満点で，以下の点数を目安として，各部材・径間全体の健全度評価を専門家（橋梁診断員）の主観によって下表に記入する．

＜評価点の目安＞

１００～９０点：ほぼ新橋状態で，問題なし．

９０～８０点：若干の劣化は認められるが，特に問題なし．

８０～７０点：現状で供用可能だが，継続的な点検が必要である．

７０～６０点：現状で供用可能だが，軽微な補修が望ましい．

６０～５０点：現状で供用可能だが，補修が望ましい．

５０～４０点：現状で当面，供用可能だが，至急，補修が必要である．

４０～２０点：現状では供用不可能で，補修が必要である．

２０～　０点：現状では供用不可能で，大規模な補修・架替えが必要である．

表 2.2.5.6　健全度評価シート

	全体評価	上部工						下部工		
		全体評価	主桁	支承	縦桁	横桁	床版	全体評価	躯体	基礎
第一径間										
第二径間										
第三径間										
第四径間										

d)健全度算出結果

橋梁診断員による主観的評価を横軸，橋梁点検結果から算出した減点法に基づく健全度評価を縦軸として，両者の相関関係を調べた結果，以下の結論を得た．

①全体評価：橋梁全体評価及び上部工について，橋梁診断員による主観的評価よりも，橋梁点検結果から算出した健全度の方が，評価点が低く，バラツキが大きい傾向が見られた．

②部材単位の評価：部材単位の比較では，ほとんどの部材でバラツキが小さく，橋梁診断員による主観的評価と橋梁点検結果から算出した健全度評価との間には，相関関係が認められた．

③問題点の抽出：橋梁全体の評価において，橋梁診断員による主観的評価よりも，減点法より算出した健全度の方が，評価点が低い傾向が見られるが，これは，橋梁診断員は，各部材の評点を加重平均して橋梁全体の評価を行っていることに対し，減点法に基づく健全度評価は，各部材の減点数をグループ毎に順次統合する方法で評価していることが原因と考えられる（減点法に基づく健全度評価では，各部材の減点数を統合するときに，グループの最大減点数を定めているものの，軽微な損傷状況でも評価点は０点となることが多い）．

e)評価手法の改良

加重平均による健全度評価を行うに当たり，「橋梁マネージメントシステムの開発に関する調査研究報告書(H11.3)，建設省土木研究所」を参考として，以下の構成部材比率を用いることとした．

主桁：0.30，床組：0.10，床版：0.15，支承：0.05，躯体：0.15，基礎：0.25

また，基礎に損傷が認められない事例については，以下を用いることとした．

主桁：0.40，床組：0.10，床版：0.20，支承：0.10，躯体：0.20

f)今後の課題

構造物評価において，橋梁診断員による主観的評価よりも減点法に基づく健全度の方が，評価点が低くなる傾向が見られたが，各部材毎の減点数を加重平均により統合することによって，橋梁診断員の主観的評価と減点法に基づく健全度評価を近づけることができた．

加重平均は，各部材の構成比率を用いて算出した部材評価の累加で全体評価が行われるため，特定の部材に著しい損傷があり部材毎の評価が低い場合でも，不健全な部材の評価がかなり薄められることになる．

減点法は，評価が極端に低くなる場合が多いが，特定部材の損傷による減点を各統合の過程を経て全体統合まで延長して行くので，不健全な部材の点数は最後まで反映される．また，どの部材で何点減点され全体的に何点か，健全度評価が感覚的に捉えやすい．

以上より，健全度評価の利用目的に応じた評価手法と評価基準のすり合わせを行いながら，橋梁定期点検結果の維持管理計画への活用という観点から，健全度評価手法の再構築を行うことは有意義であると考えられる．今後，橋梁点検結果からより合理的に健全度評価を行うためには，一連の流れをプログラム化する必要があるとともに，過去の点検結果から部材評価と構造物評価が簡便に実施できるシステムを活用して，橋梁の維持管理計画を展開することが肝要である．

２）東京都の健全度評価法

a)判定標準

東京都建設局では，健全度判定の基準を点検の種別毎に設け，日常点検の結果は，表 2.2.5.7 判定基準により判定することとしている．

表 2.2.5.7　日常点検の判定標準

判定区分		状　　況	措　置
Ⅰ	健全	損傷が特に認められない．	－
Ⅱ	やや注意	損傷がある．	記　　録
Ⅲ	危険	損傷が著しい．	緊急補修

また，定期点検の結果は，表 2.2.5.8，表-2.2.5.9 の判定により部材別判定（部材評価）及び径間単位での総合判定（構造物評価）により判定することとしている（なお，臨時点検の判定標準は省略するが，定期点検の判定基準と基本的には同じ考えに立脚している）．ここで，表－９の総合健全度判定式には，後述する式が用いられる．

表 2.2.5.8　定期点検の判定標準（部材別）

判定区分		状　　況	措　置
a	健　　全	損傷が特に認められない．	－
b	ほぼ健全	損傷が小さい．	記録
c	やや注意	損傷がある．	記録，動態観測
d	注　　意	損傷が大きい．	記録・確認
e	危　　険	損傷が著しい．または，第三者への影響を与える可能性がある．	確認，緊急補修等

表 2.2.5.9　定期点検の総合判定標準（径間別）

判定区分		状　　況	措　置
A	健　　全	総合健全度判定式による.	―
B	ほぼ健全		記録
C	やや注意		記録，動態観測
D	注　　意		記録・確認
E	危　　険		確認，緊急補修等

b) 点検の流れ

定期点検の流れを図 2.2.5.4 に示す.

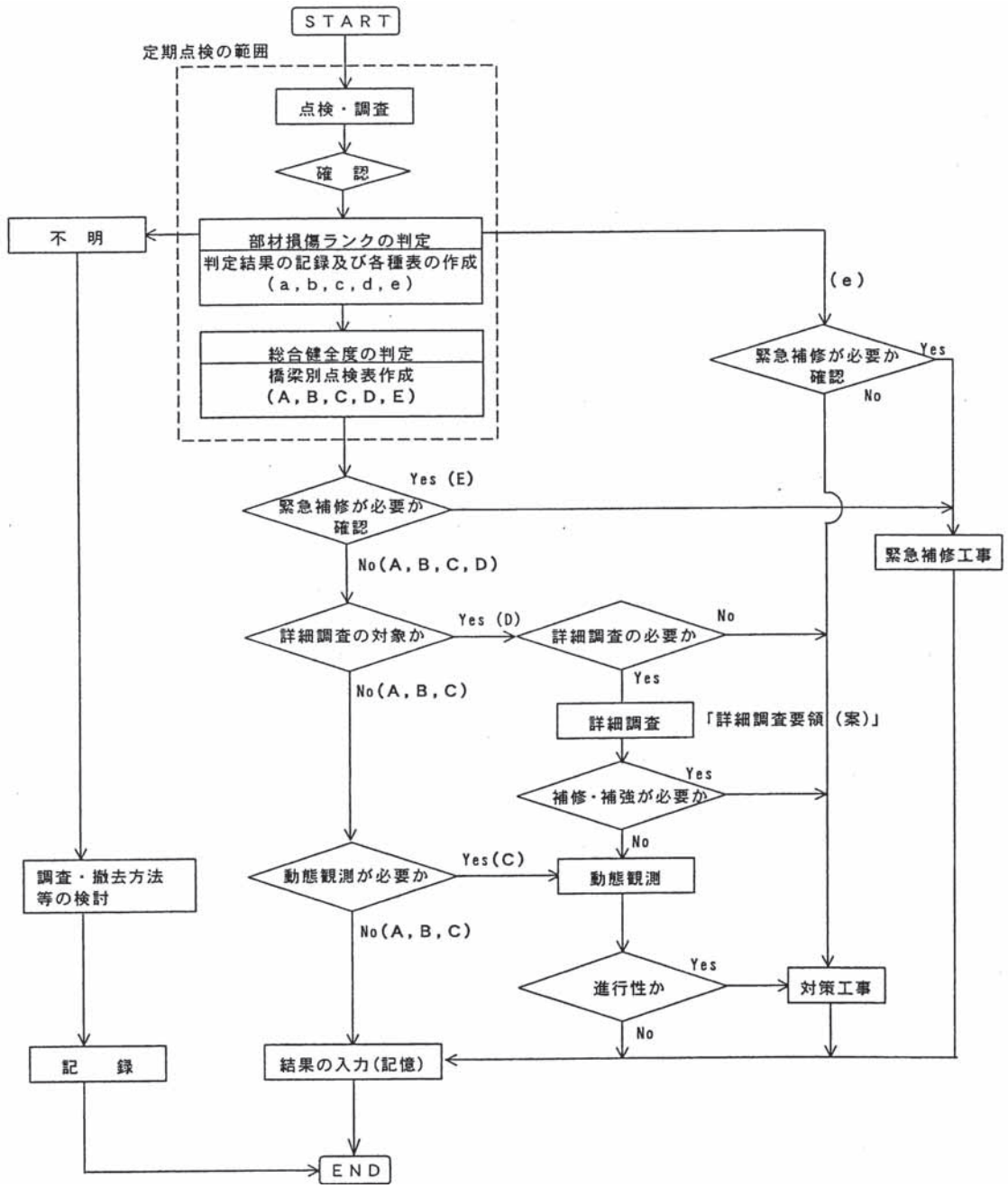


図 2.2.5.4　定期点検の流れ

b)判定基準

判定基準を表2.2.5.10に示す．ここで，鋼部材の中で二次部材については，その部材のその部材の最もランクの高い損傷が，直ちに橋の安全性や第三者に重大な影響を与えることは少ないので，損傷ランクはｅではなく，ｄとすることとしている．

表2.2.5.10　判定基準

部材判定	損　傷	損傷ランク				
		a	b	c	d	e
上部工　主桁	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
主構	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
上部工　横桁	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損	－
縦桁等	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
下部工	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
橋脚躯体	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
支承　鋼	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
ｱﾝｶｰﾎﾞﾙﾄ	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
高欄・地覆・	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
防護柵	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
伸縮装置	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
排水設備	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大*
	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
落橋防止装置	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大
	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
点検装置	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大*
	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－
遮音照明設備	腐　食	なし	表面積　中	表面積　大	断面欠損　小	断面欠損　大*
標　識　柱	塗装劣化	なし	規　模　中	規　模　大	－	－

(*：場合によっては，ｄランクとする場合があるもの.)

鋼部材の腐食損傷は，塗装の塗り替えが定期的に実施されることから，通常，大きな断面欠損が発生することは，本来稀であるが，点検結果では，常時水に浸っていたり，海水等を被ることが多い部材の中には，大きな断面欠損を生じている事例も見られる．

このような事由により，点検橋梁が塗り替えられた直後で綺麗に塗装されていても，主要部材は，必ず点検することが必要であるとの考えを明記している．なお，鋼部材では，塗装の塗り替えが定期的に実施されるため，逆に，欠損部がそのまま塗り替えられ，欠損を見落とす原因となることがあることを指摘している．

c)総合健全度判定

前述のように，東京都建設局では，定期点検の結果を受けて，健全度評価を実施する場合，評価の対象を部材と径間や橋梁単位で総合評価（部材評価と構造物評価）することとしている．径間単位や

橋梁単位の総合健全度評価の判定方法は以下の通りである.

総合健全度判定のための指標α（：耐久性を表す），β（：安全性を表す）は，式 (2.2.1)，(2.2.2) により算出し，図－５の総合評価判定図を用いて，健全度の総合評価（構造物評価）を実施することとしている．ここで，式の数値には表 2.2.5.11 の重み係数及び評価因子別の評点を代入し，値を求めることとしている.

総合健全度判定式（α，β）を以下に示す.

$$\alpha = a_1^{b1} \cdot a_2^{b2} \cdot a_3^{b3} \cdot a_4^{b4} \cdot a_5^{b5} \cdot a_6^{b6} \cdot a_7^{b7} \cdot a_8^{b8}$$

$$= a_1^{30} \cdot a_2^{5} \cdot a_3^{5} \cdot a_4 \cdot a_5^{30} \cdot a_6 \cdot a_7^{4} \cdot a_8^{4} \qquad (2.2.1)$$

$$\beta = a_9^{b9} \cdot a_{10}^{b10} \cdot a_{11}^{b11}$$

$$= a_9^{2} \cdot a_{10} \cdot a_{11} \qquad (2.2.2)$$

上記の健全度判定式における評価因子別の評価点と重み係数は，過去の損傷事例を分析して，鋼橋の更新理由や構造上の重要度等から勘案し，部材毎の重要度が設定されている．また，鋼橋の健全度は，耐久性，安全性及び脂溶性の３点から判断すべきであるが，利用者（管理者）の主観的判断が強いことから，使用性については，現状では評価し難く，ここでは，主に損傷の程度から判断する耐久性と，設計示方書・交通量・供用年数による安全性の２つの指標を用いて，判定することとしている.

表 2.2.5.11　重み係数及び評価因子別の評価

		評価項目	i	評価因子別の評価［ai］		重み係数［bi］
	上部工	主　　桁	1	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		30
		縦　　桁	2	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		5
		横　　桁	3	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		5
		横構・対傾構	4	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		1
		床　　版	5	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		30
		支　　承	6	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		1
	下部工	橋　　台	7	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		4
		橋　　脚	8	a=1　b=2　c=3　d=4　e=5		4
	活荷重	設計荷重	9	≧H5	1.0	2
				H5＞～≧S31	1.1	
				S31＞～≧S14	1.4	
				S14＞	1.5	
	交通量	大型車交通量（台／日）	10	2000≧	1	1
				2000＜～≦8000	2	
				8000＜～≦12000	3	
				12000＜	4	
		供用年数	11	≧S60	1	1
				S60＞～≧S40	2	
				S40＞～≧S20	3	
				S20＞～≧S1	4	
				S1＞	5	

総合健全度判定式で求めた耐久性，安全性の指標（α，β）の数値をそれぞれ図2.2.5.5の縦軸と横軸にプロットし，その交点がA～Eのどのゾーンに入るか，により判定される．ここで，耐久性α，安全性βのゾーニングの境界値は，過去の事例を分析し，その結果によって管理される鋼橋の損傷と設計活荷重，大型車交通量及び供用年数から健全度を判定したトライアル計算を100例程度実施して，決定されたものである．

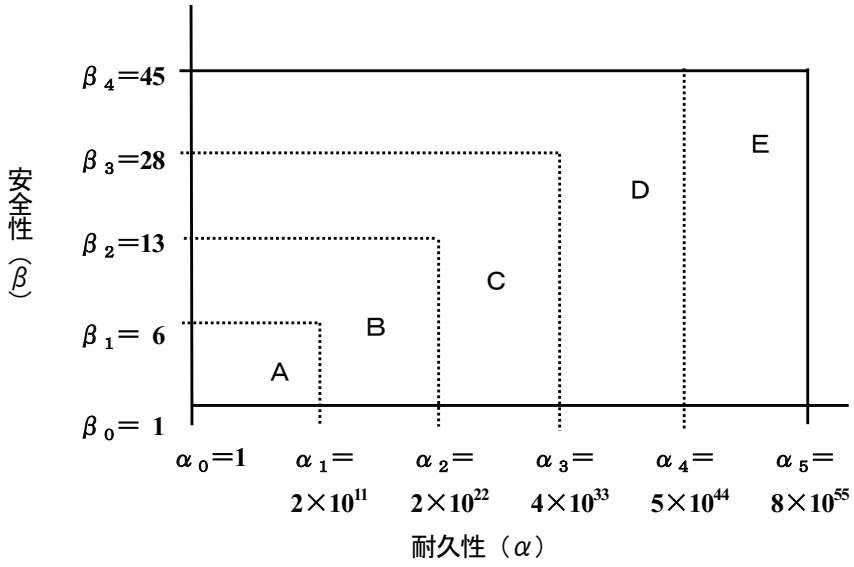


図2.2.5.5　総合評価判定図

3）横浜市の健全度評価法

横浜市道路局では，重要な社会基盤施設である橋梁の維持保全を合理的かつ効率的に実施するため，「横浜市橋梁長期保全更新計画検討委員会」を発足させ，平成16年3月には「同検討報告書」を取り纏め，橋梁の長寿命化に向けた取り組みを鋭意展開しているところである．

同検討報告書には，点検，健全度評価，優先度評価等，横浜市独自の検討が加えられており，健全度評価を実施する上で参考になるものと考え，以下にその概要を述べる．

a)点検

耐震対策及び橋梁管理全般の視点から，重点的に管理すべき橋梁を「主要橋梁」，その他を「一般橋梁」と大別し，主要橋梁については，重要度や交差条件から3グループに，一般橋梁は，規模により2グループに分類されている．

管理区分
- 主要橋梁（643橋）
  - グループ1（228橋）：跨線・跨道橋
  - グループ2（372橋）：渡河部・陸上部の主要橋梁
  - グループ3（ 43橋）：跨線人道橋
- 一般橋梁（998橋）
  - グループ4（421橋）：橋長＞10m
  - グループ5（577橋）：橋長≦10m

点検は，管理者として橋梁を効率的に管理し，安全性を保持していくために，最も重要な業務である，と位置付け，点検の定義緒世に今後の点検計画が策定されている．点検は，必要性により

①定期点検：表－12に基づく頻度・方法で実施される点検

②緊急点検：災害や事故等により被災した橋梁について対応の要否を確認する場合や，第三者被害を及ぼす可能性や構造上の不具合を類似の橋梁についてその有無を確認する必要が

生じた場合に，表 2.2.5.12 とは別に緊急に行う点検（原則として詳細点検が実施される.）

また，方法により

①詳細点検：横浜市点検要領(案)に基づき，専門家に外注して実施される点検

②通常点検：横浜市点検要領(案)に基づき，市の職員が実施する点検（基本的に足場や高所作業車等は用いず，遠方目視を基本とする．また，実施に先立ち，職員等に対する研修等が行われる.）

に分類されている.

表 2.2.5.12　橋梁管理区分別の点検頻度

管理区分				点検方法・頻度		
グループ１ グループ２	グループ３	グループ４	グループ５	名称	方法・頻度 詳細点検	通常点検
YBHI＜70				1G	１回/ 6年	詳細点検の３年後
70≦YBHI＜80	YBHI＜80			2G	１回/ 8年	詳細点検の４年後
80≦YBHI	80≦YBHI	YBHI＜70		3G	１回/10年	詳細点検の５年後
		70≦YBHI＜80	YBHI＜80	4G	１回/16年	詳細点検の８年後
		80≦YBHI	80≦YBHI	5G	―	１回/10年

横浜市では，平成 17 年度までに，全ての管理橋梁について，詳細点検を実施して，現状を把握し，それに基づき，各橋について，管理区分及び点検結果から決定される横浜橋梁健全度指標（YBHI）により点検の頻度・方法を５段階（1G～5G）で設定し，定常的に管理することとしている.

b)健全度評価

点検により観察・確認された損傷状況から，橋梁を構成する「部材毎の健全度」を判定する方法及び部材毎の健全度から補修の要否を判断するための基準値である「管理レベル」が以下のように設定されている.

①部材毎の健全度評価

点検結果について，表 2.2.5.13 に示す関係から健全度を数値化している.

表 2.2.5.13　点検結果と部材の健全度の関係

健全度	点検		簡易点検
4	OK		損傷なし
3	C	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。また、損傷状況によっては追跡調査を行う必要がある。	} 2.5 ○ 損傷が認められる
2	B	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。	
1	A	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある。	} 1.5 ◎ 損傷が著しい

注：簡易点検とは，より多くの橋梁の現状を把握するために，平成 15 年度に約 600 橋について横浜市職員によって実施された点検

②管理レベル

管理区分毎に管理レベルを設定し，それに基づいて対策（要監視，補修・補強検討，大規模補強対策）を講じるものとしている.

表 2.2.5.14 に損傷状況と管理レベルを一般化したものを示す. ここで, 定期監視とは表 2.2.5.12 の点検頻度に従って点検を実施するものであり，要監視とは，定期監視に加えて点検パトロールにより橋梁を関しするものである.

上述の点検要領では，点検を簡素化するために，損傷度を４ランク（A・B・C・0K）に設定している．但し，平成 14 年度に実施された点検結果では，B判定の損傷が多数を占め，損傷程度にもばらつきが見られたことを受け，実際の維持管理業務では，B判定を細分化し，表 2.2.5.14 の５ランク（A・B^{+}・B・C・0K）で評価するものとしている.

表 2.2.5.14　一般的な損傷状況と管理レベル

点検要領 損傷度	健全度	構造物の一般的状況	管理レベル		
			グループ 1・2・3	グループ 4	グループ 5
0K	4	損傷は認められない。軽微な損傷である。	定期監視	定期監視	定期監視
C	3	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。また、損傷状況によっては、追跡調査を行う必要がある。	定期監視	定期監視	定期監視
B	2	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうか検討を行う必要がある。	補修・補強検討	要監視	定期監視
B+	1.5	損傷が大きく、健全度1へ進展する可能性がある。	補修・補強検討	補修・補強検討	要監視
A	1	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある。	大規模補強対策（架替・部材取替）	大規模補強対策（架替・部材取替）	大規模補強対策 架替・部材取替

c)優先度評価

橋梁保全更新の優先度について,「橋梁の健全度」及び「橋梁の重要度」をそれぞれ定量的に算定し, これらを総合的に評価することとしている.

①横浜橋梁健全度指標

橋梁全体の健全度については，各部材の点検結果を総合評価した指標，「横浜橋梁健全度指標（YBHI：YOKOHAMA Bridge Health Index）」により評価される.

YBHI は，既設橋梁に求められる要求性能を表 2.2.5.15 のように整理し，各要求性能に影響を及ぼす部材別に重み係数を設定し，加重平均法により式（2.2.3）を用いて算定される.

表 2.2.5.15　要求性能と点検対象部材

要求性能		点検対象部材
安 全 性	耐荷性・耐久性	橋面工 上部工（床版） 上部工（主桁･横桁） 下部工（橋台・橋脚） 基礎、その他（支承）
使 用 性	走行性・機能性	橋面工 その他（支承）
第三者影響度に関する性能		上部工（床版） 上部工（主桁・横桁） 下部工（橋台・橋脚）

$$YBHI = \Sigma_i (a_i \cdot w_i) / \Sigma_i (w_i) \times 100 \qquad (2.2.3)$$

ここに, YBHI は, 橋梁の部材毎の損傷に対する点検結果を考慮した橋梁全体の健全度指標である.

a_iは損傷$_i$の健全度指標であり，各部材の健全度に対して表 2.2.5.16 のように設定されている．また，w_iは損傷$_i$に対する要求性能，部材及び損傷種別に応じた重み係数を表す（$w_1+w_2+\cdots w_n=100$）．

表 2.2.5.16　健全度指標 a_i

健 全 度	a_i
4	1.00
3	0.60
2	0.30
1	0.00

次に，重み係数の設定イメージを図 2.2.5.6 に示す．YBHI は，100 点満点で評価し，橋梁の要求性能３項目（安全性，使用性，第三者影響度に関する性能）に点数を配分する．この配分割合は，管理区分毎の特性に応じて変化する．部材・損傷別については，既往の研究等を参考に，各部材または損傷毎に小計１となるように配分比率を設定し，重み係数が算定される．例えば，グループ２の安全性・橋面工・腐食の重み係数は，50×0.15×0.05＝0.375 となる．

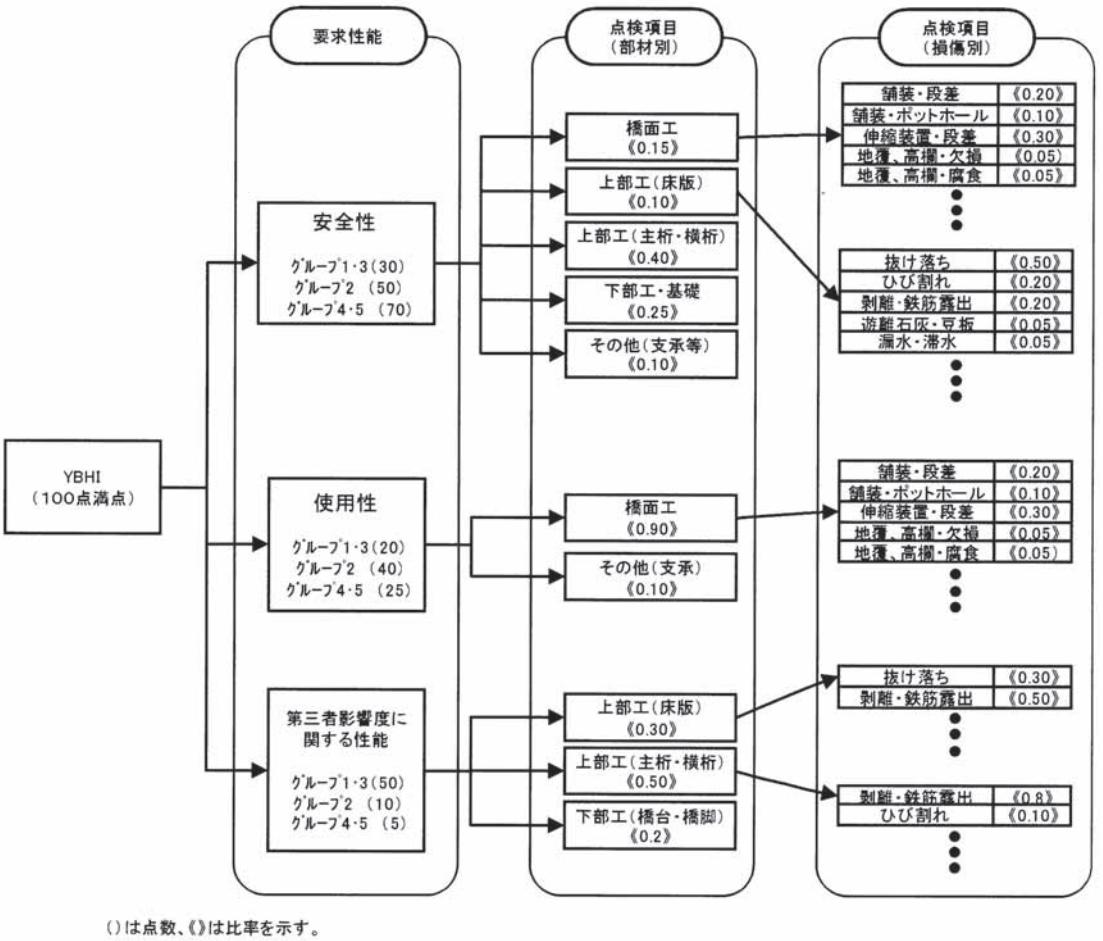


図 2.2.5.6　重み係数の設定イメージ

②横浜橋梁重要度指標

橋梁全体の重要度については，路線の重要度及び交通量を総合評価した指標，「横浜橋梁重要度指

標（YBPI：YOKOHAMA Bridge Public Index）」により評価される．

YBPI は，路線の重要度，交通量に着目して表 2.2.5.17 に示す具体的内容に対して重み係数を設定し，加重平均法により式（2.2.4）を用いて算定される．

$$YBPI = \Sigma_i (p_i \cdot w_i) / \Sigma_i (w_i) \times 100 \qquad (2.2.4)$$

ここに，p_iは各項目について該当する場合 1.0，該当しない場合 0.0 となり，w_iは重み係数を表す（$w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 100$）．

表 2.2.5.17　YBPI の重み係数

重要度指標	重み	具体的な項目		項目別重み係数 W_i
路　線	60	緊急輸送路	緊急輸送路（１次）	15
			緊急輸送路（２次）	10
			緊急輸送路（３次）	5
		跨線・跨道橋		30
		優先整備路線（物流路線）		5
		バス路線		5
		都心・副都心等（立地条件）		5
交 通 量	40	車道幅員＜ 4m		20
		4m≦車道幅員＜ 6m		25
		6m≦車道幅員＜12m		30
		12m≦車道幅員		40
合　計				100

※　一般橋梁に関しては、一律の値（YBPI= 20）を与える。
※　交通量は、現時点でデータが整備されていないため、交通容量（車道幅員）に着目した。

③優先度指標

橋梁保全更新の優先度（P：Priority）は，橋梁健全度指標（YBHI）と橋梁重要度指標(YBPI)を用いて，次式より算定される．

$$P = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 \qquad (2.2.5)$$

ここに，$P_1 = 100 - YBHI$，$P_2 = YBPI$，$\alpha_1 = 0.6$，$\alpha_2 = 0.4$ である．

YBHI については，その値が小さいほど橋梁全体の損傷度が大きく，補修優先度が高いため，保全更新の優先度指標 P の算定に当たって，満点（100 点）から引いた値が用いられている．また，係数α_i（$i = 1, 2$）については，健全度をより重視し，がより大きくされている．これらの値については，必要に応じて修正される．

４）残存耐荷性能を考慮した部材評価と構造物評価

従来の健全性評価は，塗装の劣化及び腐食の状態に応じた損傷度により部材評価が実施され，これに橋梁の重要度等を勘案して構造物評価（総合評価）が実施されている．これらは，あくまでも損傷状況に着目した健全性の評価であり，実際の腐食量，残存板厚に対応する耐荷性能に基づいて健全性を評価したものではなく，より合理的な健全性の評価を確立する必要がある．

まず，点検では，均一腐食，局部腐食，残存板厚，表面粗さ等をどのようにして計測するかが問題となり，腐食計測技術 SWG の成果を反映したものでなければならない．次に，部材の健全性評価については，残存板厚と耐荷性能の関係から算定されるべきものであり，評価法の確立については，耐荷性能評価 SWG の成果を参照しまければならない．構造物評価については，腐食が構造物全体にどのような影響を及ぼすか，詳細に検討しなければならず，これも耐荷性能評価 SWG の成果に依存する．また，構造物評価では，部材・構造物の重要度等を勘案した重み係数の設定（レイチング）が重要な課題となる．

これらの案件は，今後の研究成果に基づき，評価されるものである．

（２）鋼鉄道橋の健全度評価

（ａ）鋼鉄道橋の健全度評価項目

ストック・メンテナンスという時代の要請を受け，従来の維持管理手法をさらに発展させていく必要があることが認識されている．例えば，輸送量増大に伴う累積疲労の問題，老朽化に伴う耐荷力不足や腐食・磨耗の問題，速度向上に伴う走行性や振動の問題など，従来の評価にはあまり見られなかった分野に対する定量的評価が，鋼鉄道橋において重要な要件になっている．

これらの要件を満たすためには，従来の健全度評価手法を改良して，より定量的な診断ができる手法を再構築する必要があると考えられ，その評価手法を確立するために，健全度を下記に示す項目に分けて，整理・検討する必要がある，との認識が示された（このような考え方は，鋼鉄道橋特有のものである）．

①***損傷度***（変状の悪影響の度合い）

②***健全性***（耐力・耐久性等強度上の安全性の度合い）

③***使用性***（走行性・機能性）

鋼鉄道橋では，従来，定量的な診断より，扱いが容易となることに重点が置かれたため，評価項目は各要因を集約し，１つにまとめたものとして評価・判定されるケースが多かった．そのため，各項目について評価方法が明文化されておらず，多くの場合，健全度評価は，主に，現れた変状そのものに重点を置いて評価された．その結果，変状の評価結果は損傷の評価として妥当であっても，それが部材や構造物全体の健全度にどの程度影響するのかは不明であり，問題となっていた．また，主に表面に現れた損傷等の変状に着目するため，過度に厳しい評価となる場合や逆に実態より危険側に判定する場合等があり，大きな問題となっていた．さらに，事後保全的な維持管理を実施していたため，計画的予算措置の実施や投資の平準化を図る予防保全的な対策を講ずるのに不便な面もあった．

以上の問題を解決するため，***健全度***の要因を上記のように①～③に分解し，部材に関係なく損傷として現れたものを***損傷度***で表し，構造全体の性能（主に強度面からみた安全性の度合い）に関するものを***健全性***，要求される使用機能に対する性能を***使用性***として分離して評価することが試みられた．鋼鉄道橋において，***健全度評価***を行う目的は，1)構造物の状態をより正確に，また，2)構造物が果たすべき役割に対する適応性能を的確に把握して，3)適切なタイミングで対策をとりながら，4)合理的に維持管理することであり，構造物の評価では，常に，構造物の維持・保持すべき***性能***を意識して実施する必要があることが示された．以下では，構造物の性能を意識した健全度評価のシナリオの一例が示されている．

構造物は，経年とともに，除々に劣化してその性能は低下するが，***健全度***の評価はこのこともある程度考慮して行うのが合理的である．例えば，***損傷***とは，通常の経年劣化以上に急激に性能が低下する現象であり，その度合いによって，とるべき措置に差が出てくる．

図－７は，構造物の性能の経時変化を説明するために仮定された劣化曲線（劣化曲線は腐食や疲労に対するものなど，着目する変状の項目に対して設定される）であり，縦軸に**性能**，横軸に**経年**を示している．ここで，同図には，**設計時の初期性能レベル**，主に，構造物の安全性を合理的に確保していく上で，管理上最適な投資時期と考えられる，いわゆる保守管理上の対策が必要となる限界ともいうべき，**管理上の保守限界レベル**及び構造物の破壊等，構造物が物理的にその機能を失う，**物理的限界レベル**が示されている．なお，図に示された**管理上の保守限界**と**物理的限界**の比が，**安全率**もしくは**余裕度**と考えることもできる．

損傷に対する経費の投入の面から考えると，膨大な数の構造物を全て**管理上の保守限界**に達してから補修していくことは必ずしも合理的でなく，一般には，経済性も考慮して投資の平準化が図られる．その時期は，一般に**管理上の保守限界**より早期であり，図 2.2.5.7 では，これを**経費投入の標準レベル**として示されている．その他，同図には定期検査のインターバルが縦線で示されている．これらは損傷の進行性に

対する評価（措置方法や対策の緊急性の判断など）に用いられる．

従来，損傷に対する評価のランク付けは，図中の左端に示す保持する性能に対する**ランキング区分**により行われている．これをベースにしている点では，図2.2.5.7に示した方法も変わりはないが，実構造物では無視できない時間的変化もある程度加味して，経年劣化した橋梁に期待される性能（例えば，補修や補強で期待される性能レベル）の目安が考えられるようになっている．さらに，種々の要因に対する影響の度合い（例えば，進行性等）の評価が行えるようになっている．

以下に，上記の考えを踏まえ，①***損傷度***，②***健全性***の評価方法について示す．なお，③***使用性***については，腐食損傷とは関連しないため，省略するものとする．

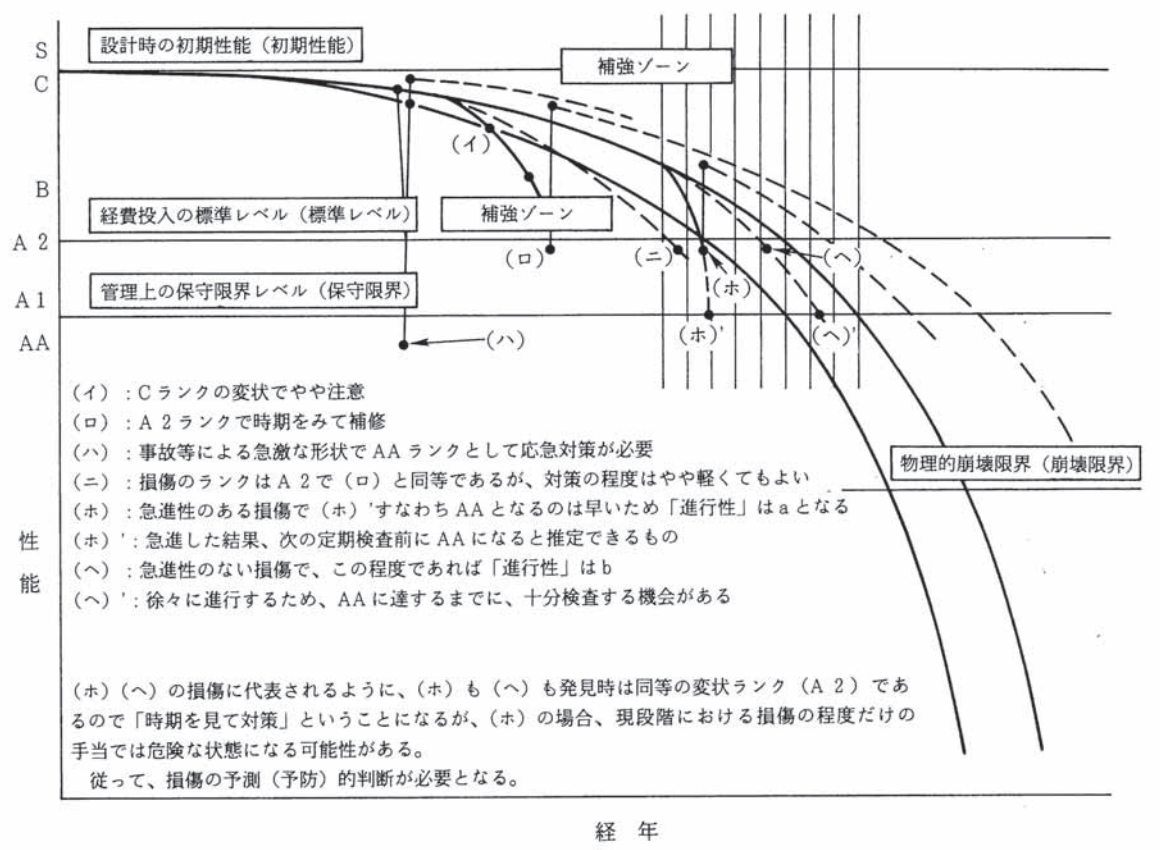


図2.2.5.7　構造物の性能と経時変化

（b）損傷度

1）損傷度とその評価要因

鋼鉄道橋に発生する損傷のパターンには次の２通りがあり，これらは損傷度に関する健全度評価として判定が行われる．

①沓座の破損や疲労き裂などに代表される表面に現れた損傷（目視で確認できるもの）

②累積疲労に代表される内在的損傷（目視では発見しにくいが，兆候として症状が出ている．）

従来，対策を必要とする損傷のパターンは，主に①の場合が一般的であったが，外見には現れなくても，一旦，表面に現れると急進して，構造物に重大な影響を与える，進行性の早い種類の損傷もあり，その中には①より対策をとることが難しくなるものもある．従って，この種の損傷に対しては，②の場合として，内在的兆候（累積疲労など）のうちに検知して対処していくことが有効になる．これは，予

防保全に対応し，構造物延命化の決め手となる．

以上のように，損傷には，表面に現れ，目視で発見できるものと，内在的な兆候が現れた時点でキャッチしなければ，表面に現れてからでは急進して対策が手遅れになるものがあり，いずれの場合も，発生した損傷に対しては何らかの対策を講ずる必要がある．従って，①と②の損傷に対して，**いつ，どんな方法**で，対策するかが評価の目的となる．具体的には，**いつ**，については措置の緊急性について評価される．また，**どんな対策**については，原因の究明と構造物の重要度が主な判断要因として検討されることになる．

表 2.2.5.18　損傷に対する健全度判定区分

判定区分		運転保安等に対する影響	変状の程度	措　　置
AA		・安全を脅かす	重　　大	直ちに措置
A	A_1	・早晩脅かす ・異常外力の作用時危険	変状が進行し，機能低下も進行	早急の措置
	A_2	・将来脅かす	変状が進行し，機能低下の恐れ	必要な時期に措置
B		・進行すればAランクになる	進行すればAランクになる	監視必要に応じて措置
C		・現状では影響なし	軽　　微	重点的に検査
S		・影響なし	健　　全	

表 2.2.5.19　組み合わせから決まる判定区分

進行性＼冗長性	a	b	c	d
a	A_1	A_1	A_2	A_2
b	A_2	A_2	B	C
c	B	B	C	C
d	C	C	C	S

表 2.2.5.20　進行性及び冗長性の評価表（１）「進行性」

評価ランク	状　　況
a	変状を発見してから４～５年以内(全般検査で１回見落としを考慮)に機能の限界もしくはその部材(品)の破断等に達する可能性のあるもの.
b	変状を発見してから 10 年（塗装期間）以内に機能の限界もしくはその部材(継手)の破断等に達する可能性のあるもの.
c	変状が認められるものの進行は遅く，計算上設計想定寿命程度は満足できると思われるもの.
d	変状が発生しても通常はほとんど進展しないか，進展しても破断に至らないもの.

具体的には，**健全度**の評価（ここでは，***損傷度***の評価）は，以下に示す項目に対し，表 2.2.5.19，表 2.2.5.20 及び表 2.2.5.21 に示す評価表を用いて，表 2.2.5.18 に示す判定区分を用いて実施される．

①進行性

②冗長性

③変状が与える影響（変状の重要度）

表 2.2.5.21　進行性及び冗長性の評価表（２）「冗長性」

評価ランク	状　　況
a	直接，部材や構造物の安全を脅かす著しい機能低下や崩壊につながるもの．
b	連鎖的もしくはある特定の使用条件になった時に構造物の著しい機能低下や崩壊に結びつくもの．
c	耐久性の低下として長期的には機能低下や崩壊に結びつくもの．
d	その継手や部材が崩壊しても構造物全体の強度や機能にあまり影響を与えないもの．

表 2.2.5.22　損傷の影響を大とする項目

①放置すると他に多大な影響を及ぼすもの． ②多発する可能性のあるもの． ③早期対策が維持管理上著しく有利なもの． ④他にも同類の箇所があり，その箇所の検査が比較的難しいもの． ⑤構造物としての重要度が特に高いもの．

なお，①～③は次に示すものをいう．

a)損傷の進行性

損傷の進行性とは，主要部材に限らず，横構等の２次部材であっても，損傷が発見された時，何時，その部材が破断等によって機能を失う状態になるか，さらに，それが通常の検査で発見され，適切な処置をとっていく余裕のある早さで進行するか否かを判断するものであり，重要な評価の対象となる．この項目は，従来から判定の要因としてきた**変状の種類**，**発生した位置**，**量**，**交通量**などを加味したものである．

b)冗長性（Redundancy）

構造物が損傷によって崩壊もしくは，機能を失うに至らないための能力の有無や大きさ，を表す尺度と定義されている．すなわち，構造物の冗長性は，今，発見された損傷が進展して破断状態に達した時，構造物全体としての崩壊等，構造物としての機能を失う状態になるかどうかを評価するものであり，絶対に防がなければ成らない損傷に相当する．従来の**部材の重要度**，**部材の強度に与える影響**や**列車の走行安全性**等を反映したものである．

進行性及び***冗長性***に対する具体的なランク付けは表 2.2.5.21 に示し，これらを組み合わせた判定区分を表 2.2.5.19 に示す．

c)変状が与える影響

a)，**b)**の評価以外に，一旦変状が発生すると，多方面に種々の影響をもたらすことがある．その影響の度合いが大きく，そのために，出来るだけ早期に対応すべきものを**a)**，**b)**で評価した結果に重みが付けられるように設けられたものである．なお，以下に取り上げた項目は，今まで行われてきた予算投入の順位付けの実績を重視して決められたものである．

①その変状が２次的に他の変状を誘発する原因となるもの．

②対象とする構造物中で，発見された変状箇所と同条件のものが非常に多くあり，変状が一箇所のみにとどまらないもの，かつ，発生箇所が特定できないもの．

③疲労き裂のように，早期対策が特に有利なもの，もしくは必要なもの．

④足場のない箇所に現れる損傷や，バックルプレートなど，通常の検査でよく見られない箇所や，

影に隠れているような箇所で見られる変状.

⑤特に，安定輸送の確保や資産的に重要と考えられるもの.

これらをまとめると表 2.2.5.22 となる．この項目に該当する場合，総合評価の際，組合せから決まる判定結果を１ランクアップさせることによって対策時期を早める必要がある.

以上のランク付けは，鋼鉄道橋の健全度判定で用いられている判定区分を，可能な限り共通の評価基準となるように見直されたものである．すなわち，従来から行われてきた鋼鉄道橋の健全度に対する判定手法の実績をベースにして見直されたものである

２）具体的な評価方法

既に発見された損傷や兆候の現れた損傷は，図 2.2.5.8 の流れで評価される.

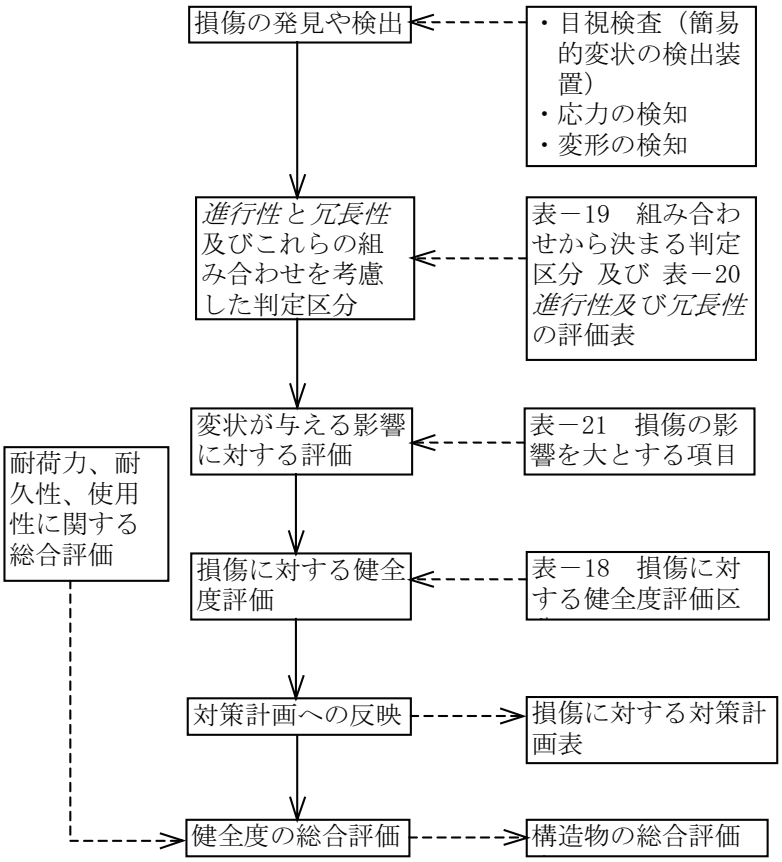


図 2.2.5.8　損傷評価の流れ

損傷に対する**定期検査**あるいは**日常検査**は，主に，**目視検査**（あるいは簡易検出器による検査）で行われ，その目的は，変状の有無の確認，変状の進行等を確認することによって，措置に緊急性を要するか，判断することが中心となる．しかし，鋼鉄道橋の場合，一般的には緊急性の高いもの，もしくは，その恐れのあるものについては，***応急措置***の１つとして専門家による判断を要請するケースが多い．これらの進め方は図 2.2.5.8 に示す損傷評価の流れに従って行われる．このうち，**定期検査**あるいは**日常検査**は，変状，異常の発見と，発見された損傷に対する***一次判定***が主な役割となる．この場合の判定は，ほとんどの場合，**目視検査**で行われる．**定期検査**の具体的な流れを図 2.2.5.9 に示す．なお，判定結果は**台帳**や**検査記録簿**等に記載され，報告される.

次に，**詳細検査**は，検査の専門家によって，より定量的な判定や評価をするために行われ，措置方法が判断される．この場合の評価や判定も基本的には図 2.2.5.8 に示す流れに従って進められる．また，詳細検査は図 2.2.5.10 に示す流れで作業が進められる．なお，緊急を要する判断については専門家による判断が有効である．

調査結果は，**変状調書**及び**損傷整理表**等に記載される．また，これらの結果を基に，表 2.2.5.20 に示す***進行性***と***冗長性***が，より定量的に判断される．一般的には，個別検査は，定量的なデータに基づいて行われるのが基本であるが，場合によっては，専門家による判断も有効である．

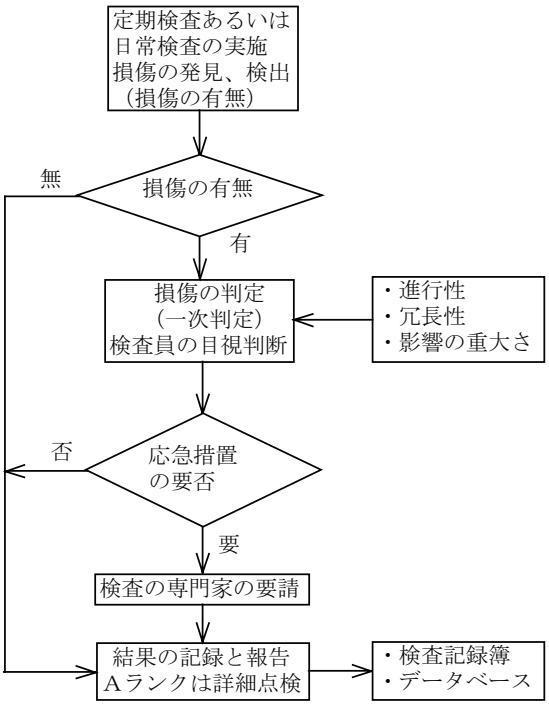


図 2.2.5.9　定期検査あるいは日常検査における評価の流れ

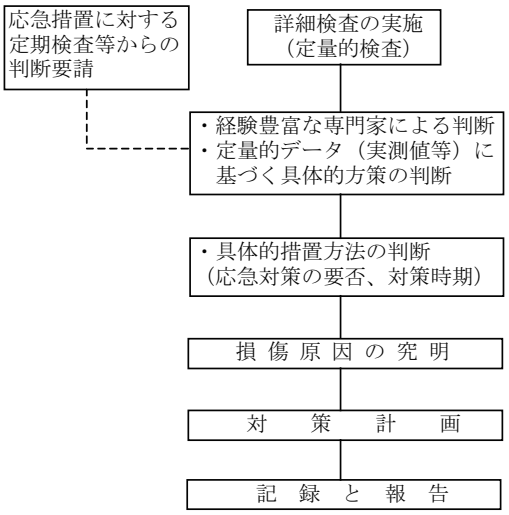


図 2.2.5.10　詳細検査における評価の流れ

（c）健全性（主に耐力，耐久性）

鋼鉄道橋では，***損傷度***が主に構造物や部材の部分や局部に対する劣化の評価指標として用いられ，***健全性***は，構造物や部材全体の健全度を示す指標として用いられている．また，***健全***性と***使用性***の違いは，***健全性***が耐力・耐久性といった，構造物に共通する強度上の安全性に対する性能を対象とし，***使用性***は特定の性能に対する使用性能を対象としている．

1）耐力・耐荷力

a)現有耐力の算定

鋼鉄道橋では，既存構造物の耐力は，現有応力比率 (SR)，現有耐力として評価され，SR は式 (2.2.6) によって求められる．

$$\text{現有応力比率（SR）} = \frac{\text{保守限応力度（}\sigma_m\text{）}}{\text{実働荷重によって部材に生じる最大応力度（}\sigma\text{）}} \qquad (2.2.6)$$

ここに，σは当該線区の許容最高速度で車両が入線した際に部材に発生する最大応力度である．部材

に生じる最大応力度σは，現断面に対して実働荷重が作用した時のものであり，また，断面欠損の影響は局部腐食については孔引きと同様に考えるが，断面欠損が梁の全長に及ぶ場合は中立軸も変化すると考え算定される．

保守限応力度（σ_m）は，既存構造物を評価する時に用いられる許容'応力度のことで，引張に対しては，鋼材の設計許容応力度及び通過する列車の本数及び桁に発生する応力の影響を考慮して決定される．同様に，圧縮部材についてもσ_mの違いだけで扱いは同様である．

b)保守限応力度

引張部材に対する保守限応力度は，静的耐力と，一部疲労強度の両面を考慮して決定されている（詳細は文献*）を参照されたい）．これは，静的には保守の実績や米国の AREA(American Railway Engineering Association, Chapeterl5, Steel Structure, 1981）において既存桁の評価で用いられている方法に基づいている．すなわち，静的評価応力 に関して，$0.8\sigma_y$(非溶接桁)，$0.7\sigma_y$(溶接桁)を上限値としたものに対し，疲労の影響を加味したものである．なお，疲労の影響は，その当時の設計の考え方である昭和 58 年の設計標準の疲労条項に基づき，非溶接桁ではリベット継手（B等級：1270kgf／cm^2)，溶接桁では縦ビート継手（A等級：1530kgf／cm^2）に対する強度を基本許容応力範囲（σ_{f0}）とし，これにスパンや通トンの影響をγ_1，γ_2として加味している．

$$\sigma_m = \sigma_{f0} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot / \alpha \qquad (2.2.7)$$

なお，αは計算作用応力度に対する実測応力の比であり，過去の実橋測定結果を基に，スパン 10m 以下の部材については0.65，スパン10m以上の部材については0.75としている．

引張部材の保守限応力度は，上記で計算される静的，疲労両面から許容できる応力の値の小さい方が用いられている．但し，保守限応力度は，一般的な在来鉄道の鋼構造物に適用することを前提としており，電車専用線などのように設計荷重が実荷重に非常に近いものや，応力の繰り返しに影響する軸数が著しく多いものにはそのまま適用できない．

一方，圧縮部材に対しては，耐荷力曲線を基に設定されている．桁の耐荷力曲線は，リベット桁と溶接桁では，残留応力や初期不正の生じ方に違いがあるため，分けられている．設計曲線に対し，短柱域では，引張材と同様の考えで許容応力度を割増できるものとされているが，長柱域では，老朽化等による部材の変形に対する安全性を考慮して，許容応力の割増は小さくし，Euler 座屈の領域では，設計許容応力の耐荷力曲線にすりつけられている．ただし，短柱域における頭打ちは，圧縮の許容応力度を引張の保守限応力度の９割以内に押さえるという従来の設計標準の習慣に習い，設定された．

その他，せん断や支圧に関する保守限応力度は，材料の保有強度（降伏点応力度や硬度等）と安全率の考え方は引張の場合と同じ方法で定められている．

なお，SR 値が100%を割ると補強や徐行等の措置が必要となるが，対策が困難であったり，長期間徐行ができない場合は，寿命の想定を短くして保守限応力を設定し直すか，実橋測定等による詳細な個別診断を行って健全度を把握し，対処することとしている．

表 2.2.5.23　現有耐力比率に対する健全度判定区分の目安

健全度判定区分	現有応力比率（SR%）	旧実耐率の参考値（β）
ＡＡ	SR≦100	おおよそ 80%以下
Ａ１またはＡ２	100＜SR≦120	おおよそ 80～100%
Ｂ	120＜SR≦150	おおよそ 100～120%
ＣまたはＳ	SR＞150	おおよそ 120%を超えるもの

c)現有耐力からみた健全度判定区分の目安

現有耐力の評価結果は，現時点におけるその荷重に対する構造物の耐荷力を意味するものであるが，ある程度，予防保全的な対応をとるためには，措置すべき時期に対するおおよその目安が必要となる．これについては，現行の保守標準では明確な基準は示されていないが，従来の予算措置の実績を目安として大凡の値が示されている（表 2.2.5.23 参照，参考値として旧実耐率（β）も示されている）．

２）現有耐力評価の変遷（実耐率と現有応力比率）

老朽構造物の**耐用性**（耐力と耐久性を総称したもの）については，当初，次に示す項目が評価の要因になるものと判断されていた．

①負荷（荷重）の増大
②腐食による判断欠損と材質の劣化
③変状の程度
④使用環境の変化
⑤累積疲労

上記の考え方は現在でも基本的に変わりはないが，③と④を除く，強度に関する評価を可能な限り定量的に行える指標を設けようとしたものが，現有耐力評価（実耐率）の考え方であり，老朽桁の強度評価の面から，以下に示す項目について，当時から評価が必要とされていた．

①当初想定されていた荷重に変化が見られた時や，長年の使用により部材断面が腐食等により欠損を生じ，断面変化を生じた時の耐荷力評価
②繰り返し応力を受けることによる累積疲労に対する評価

なお，上記の考え方が提唱されたその当時は，疲労に関する知見が不十分であったこともあり，先に静的強度に対する指標が定められた．

当時の静的強度面からみた耐用性は，部材のもつ現有強度を抵抗モーメント，せん断力，抵抗軸力及びリベット継手等の抵抗力と，外力（負荷）とのバランスを荷重相当値（ＫＳ荷重）の比率で表すものであり，この比率を***実耐率***と呼び，耐用性の指標として用いられた．

$$\text{実耐率}=\frac{\text{鉄桁の現有ＫＳ相当値}}{\text{実荷重のＫＳ相当値}}\times 100\% \qquad (2.2.8)$$

その後，静的のみの評価にある程度疲労の影響を考慮する試みが検討され，そこで定められたのが，現行の**保有限応力**の導入である．従来，現有強度の評価では活荷重相当値，すなわち耐力（部材力）で表現されていたが，疲労の影響を考慮する場合は，以下に示すように，実耐率の式を応力で表示するように見直された．

$$\text{実耐率}=\frac{(\text{設計許容応力})-(\text{現断面に対する死荷重応力})}{(\text{現断面に対する車両による応力})+(\text{衝撃応力})}\times 100\% \qquad (2.2.9)$$

上式でβを実耐率，γをγ＝残存断面積／設計断面積，あるいは，

$$\gamma=\frac{\text{残存断面に対する断面２次モーメント}}{\text{設計時の断面２次モーメント}} \qquad (2.2.10)$$

で表すと，実耐率βは次式で与えられる．

$$\beta=(1200-\sigma_d/\gamma)/\{\sigma_i(1+i)/\gamma\}=(1200\gamma-\sigma_d)/\{\sigma_i(1+i)\} \quad (2.2.11)$$

ここに，σ_d，σ_iはそれぞれ死荷重応力，活荷重応力を表し，iは衝撃係数，1200は設計許容応力を固定したものである．

3）耐久性（耐用年数）

構造健全性で定義される耐用年数や余寿命を取り上げる観点から，ここでは，構造物全体に対する**耐久性**を対象とし，部材の耐久性が構造全体の耐用年数（期間）に与える影響が大きい場合もこの範疇に含められる．以下では，構造物全体の耐久性を，その構造物の耐用年数（あるいは耐用期間）として捉え，評価する方法・考え方が示されている．

a)鋼鉄道橋における耐用年数

鋼構造物の耐用年数として，一般的には，①経済的な耐用年数，②機能的な耐用年数，③物理的な耐用年数が用いられている．①～③に対し，土木構造物の健全度評価における耐用年数は，次に示すように定義される場合が多い．すなわち，「土木構造物の耐用年数を決定づける**寿命**は，構造物の物理的強度や機能面の劣化状態が，経済性を加味した上で致命的となる状態に至るまでの期間とする」というものであり，この考え方を基に評価される．

ここで，留意点として，耐用年数の算定では，対象となる橋梁が供用期間中に，構造的に致命的とはいえない程度の変状が生じた場合は，通常の保守管理において修繕されることが前提とされている点である．すなわち，**耐用年数**とは，構造物を建設した以後，放置したまま寿命に到る期間ではなく，通常の維持管理体制下で寿命に到る期間のことである．なお，構造物の使用条件や環境条件の変化に伴う取替等による寿命は対象外とする．

表 2.2.5.24　鋼鉄道橋における寿命を決定づける変状例と評価手法の適用

	線形累積被害則	破壊力学による方法
変状項目	1．主要部材でフランジの不特定箇所から橋軸直角方向に生じるき裂（縦ビード，リベット孔，溶接ガセット）	1．同左箇所で溶接欠陥や不溶着部もしくはノッチを初期き裂と見なし，それが限界き裂長に達する繰返し数
	2．主要部材の腹板の設計で強度照査をしない切欠き部や腹板ガセット端から生じたき裂	2．同左箇所で通常の検査で発見できる初期き裂長さから限界き裂長に達するまでの繰返し数
	3．圧縮フランジの欠食等の断面欠損もしくは引張フランジ腐食部からのき裂	
	4．主要部材の溶接補強箇所から再発したき裂（溶接によるカバープレート，当板補修）	4．溶接欠陥を初期き裂とし，それが限界き裂長に達するまでの繰返し数
	5．ピントラスアイバーの円孔部もしくは首部からのき裂	5．ピントラスのアイバーの腐食部や摩耗部のノッチを初期き裂と見なした場合の限界き裂長に達するまでの繰返し数
	6．腐食による断面欠損が構造物全体に広く分布し，対策が経済的合理性を欠く場合	

b)耐用年数の算定条件

一般に，鋼鉄道橋の耐用年数の算定は，その構造物の寿命を決定づける変状と着目する継手の疲労

強度及び過去に受けた応力履歴が判れば，推定することができる．

鋼鉄道橋における寿命を決定づける変状の例を表 2.2.5.24 に示す．一般に，鋼構造物が供用後に生ずる劣化現象の代表的なものとして，疲労，遅れ破壊及び腐食が挙げられる．この中，遅れ破壊については，高力ボルトの遅れ破壊が一般的であり，強度面から構造物として一挙に，致命的になることはほとんどない．また，腐食については寿命を決定する重要な要因ではあるが，一般には徐々に進行するため，その間に種々の対策を講じることが可能であり，急激に致命的状態になることは稀であり，余寿命を推定する必要性は少ない．

そのため，鋼鉄道橋において，余寿命の推定が必要となるのは，一部の場合（表 2.2.5.24 において，線形累積疲労被害則の 3. と 6. の場合，破壊力学による方法の 5. の場合）を除いて，継手の疲労が致命的となる場合であり，その評価法として，表 - 2.2.5.24 に示すように，線形累積疲労被害則と破壊力学による手法が用いられている．

c)耐用年数と余寿命

構造物が供用を開始して停止に至るまでの耐用年数（耐用期間）と余寿命の関係を示すと図 2.2.5.11 の通りである．

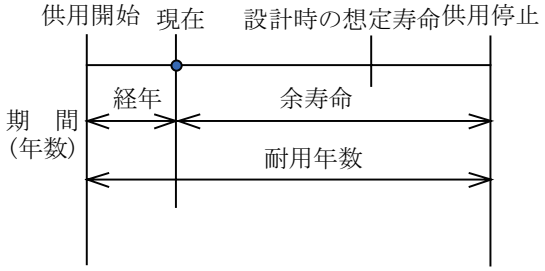


図 2.2.5.11　鋼鉄道橋の寿命・経年図

ここで，設計時の想定寿命と耐用年数が一致していないのは，評価に用いる条件が異なるためである．すなわち，設計時の想定寿命は，設計時に想定した車両の軸重・軸距とその時点の交通量を用いて計算されているが，耐用年数は，実働荷重と，その交通状況を用いて算出されるためである．一般には，実働荷重の方が設計荷重より小さいので，耐用年数の方が設計時の想定寿命より長寿命となるが，逆に設計時の想定より厳しい条件（例えば，列車本数の増大や軸重の増大）で供用されたとすれば短寿命となる．なお，耐用年数の算定は，原則として，実態に即した条件で評価すべきであるが，過去の荷重や応力履歴が十分に分からない場合が多く，明確でない場合も少なくない．

４）耐用年数の算定式（腐食部材の疲労寿命の評価）

一般に，設計では構造物に腐食が起こらないように配慮しており，一部の部材を除いて，強度照査に，腐食の影響は考慮されていない．維持管理における疲労寿命の評価も，断面欠損の影響は考慮しているものの，腐食による疲労強度の低下は考慮されていない場合が多い．この理由として，通常，構造物は適切に塗装管理がなされていることを前提にしていること，また，実橋として使用された古桁を用いた疲労試験から，腐食部材に生じる疲労き裂は，局部的に浸食した腐食の深い位置で発生したとしても，途中で停止し，最終破断は最小断面部で起こることが確かめられているためである．従って，腐食部材の疲労は，実構造物で考える限り，局部的な凹凸のみに囚われて評価する必要はない．しかし，実際の構造物の腐食部材で最小断面部（断面欠損やリベット孔のある断面）に局部的に深い腐食があり，そこからき裂が発生する場合がないとはいえないので，このことに対する配慮は必要である．さらに一端き裂が発生すると破断には至らなくても水の進入による腐食の問題もある．それゆえ，腐食の影響につい

ては，評価が危険側に成らないように配慮することが肝要である．

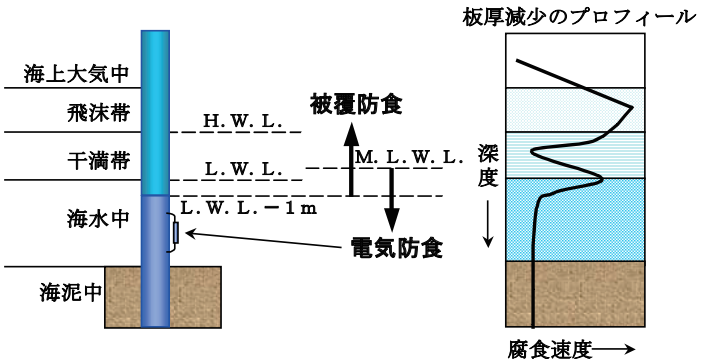
（３）港湾鋼構造物の健全度評価

港湾鋼構造物がその供用期間に渡って保有すべき機能の水準を満足するために行うべき維持管理の標準が「港湾構造物の維持・補修マニュアル（1996.6)」に詳述されている．同マニュアルでは，港湾施設のうち，係留施設と外郭施設（岸壁，桟橋，護岸）を対象としているが，海洋環境下にあるその他の港湾鋼構造物（海底パイプライン，沈埋函，貯蔵船，海洋鋼構造物）に対しても適用可能であるとしている．

港湾鋼構造物の劣化損傷の種類として，①外力による物理的変状と②使用材料の経年劣化の二つが考えられるが，ここでは，後者のみをその対象とする．また，港湾鋼構造物は，海洋環境下では，防食工を行った状態で使用されるのが普通であるが，防食工が不十分であると，鋼材の腐食が進み，その機能低下が避けられないため，港湾鋼構造物においては，第一に定期点検を主体とした防食工の維持管理が重要であり，防食工に異常が認められた場合，鋼材単体の維持管理を実施することとなる．なお，防食工が実施されていない既存の無防食構造物についても，定期的に点検・調査等を行い，腐食により構造物の機能が損なわれないように，と注意を喚起している．

（ａ）港湾鋼構造物の腐食環境と腐食特性

港湾鋼構造物は，海洋環境中に暴露されるため，陸上鋼構造物と比較して，厳しい腐食環境下にあり，その形態も異なる．



腐食環境	腐食速度（mm／y）
H.W.L.以上	0.3
H.W.L.～L.W.L.-1.0m	0.1～0.3
海中部	0.1～0.3
海底土中部	0.03

図 2.2.5.12　港湾鋼構造物の腐食特性

表 2.2.5.25　代表的な腐食環境の特徴

環　境	環　境　の　特　徴	腐　食　特　性
海上大気部	風が微細な海塩粒子を運ぶ．（海面からの距離により環境の腐食性は変化する．風速，風向き，降雨，気温，日射量，埃，季節，汚染などの環境因子）	日陰で風雨が当たる部位は，風雨が当たらない部位より，腐食速度が大きい．
飛沫帯	鋼表面は，十分に酸素を含む薄い水膜で濡れている．生物付着はない．	腐食速度は最も大きい．
干満帯	海水の潮汐により乾湿が繰り返される．	干満帯から海中部に連続している構造物では，平均水面（M.S.L.）付近が酸素濃淡電池のカソードとして作用する．塗膜の損傷部での腐食速度は大きい．
海中部	生物付着，流速などが腐食因子として作用する．	干満帯から海中部に連続している構造物では，M.L.W.L.直下付近が酸素濃淡電池のアノードとして作用し，腐食速度が大きい．
海底土中部	硫酸塩還元ﾊﾞｸﾃﾘｱなどが存在することもある．	硫化物は，鋼の腐食や電気防食特性に影響を及ぼす．
背面土中部	1)残留水位より上では土壌環境とほぼ同じ． 2)残留水位より下では海底部とほぼ同じ．	1)土壌環境に類似している． 2)海底土中部に類似している．

港湾鋼構造物が設置されている腐食環境は，海上大気部，飛沫帯，干満帯，海中部，海底土中部，背面土中部の６つのゾーンに区分されている（図2.2.5.12に参照）．これら６つのゾーンの腐食環境の特徴とその腐食性を整理したものが表2.2.5.25である．図2.2.5.12の板厚減少のプロフィールは，無防食の鋼管杭の腐食速度を模式的に表したものである．飛沫帯が最大であり，海中部の表層部，表層部を除く海中部の順に減少する．

図2.2.5.12の中の表は,港湾における無防食鋼構造物施設で計測された腐食速度を整理して得られた腐食速度の標準値であり，表2.2.5.25の背面土中部の1)では0.03，2)では0.02㎜／yである．前述のように，港湾鋼構造物に使用された鋼材が最大の腐食速度を示す海洋環境は，一般に飛沫帯であるが，実構造物の飛沫帯に当たる部位は,大部分がコンクリートなどで被覆されているため,腐食が問題となる環境は,飛沫帯よりも低い部位であることが多い．港湾鋼構造物のM.L.W.L.（平均干潮面）直下付近では，鋼に激しい局部腐食が発生することが知られており，集中腐食と呼んでいる．このような部位では，局部的に板厚が大きく減少しており，その取扱いに注意を要する．

以上のような港湾鋼構造物の腐食環境とその腐食特性を考慮した維持管理計画を策定する必要があることは言うまでもない．以下では，上記の点を踏まえ，港湾鋼構造物の維持管理における点検・調査結果に基づく判定や健全度評価について整理する．

（b）維持管理における点検・調査

維持管理のための点検及び調査は，維持管理計画に基づいて作成された点検・調査フローに従って実施される．その一例を図2.2.5.13に示す．

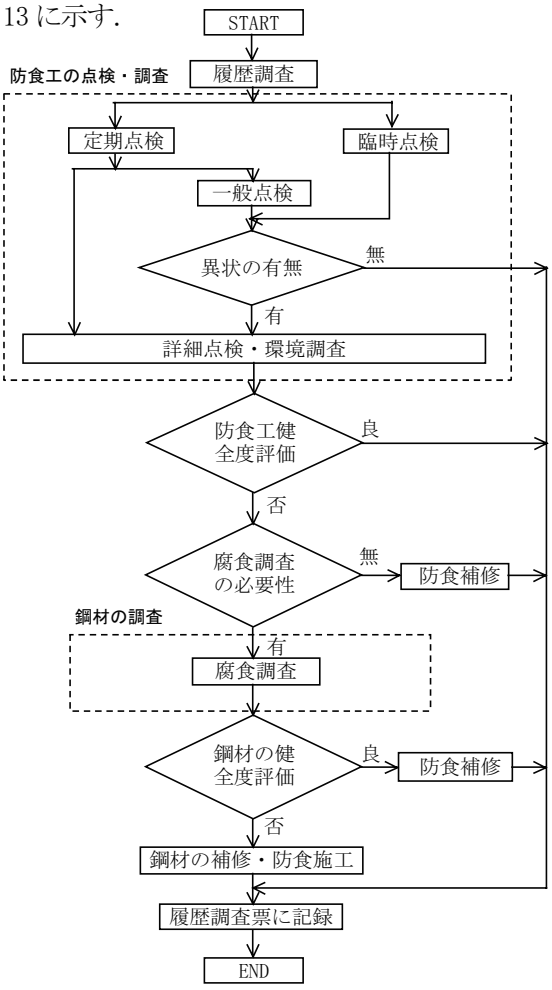


図2.2.5.13　港湾鋼構造物の点検・調査フロー

ここで，履歴調査は，対象とする構造物の設計・施工条件及び防食工の設計条件を参考にして，構造物の特徴や点検・調査における重点箇所，注意点等を把握するために実施されるものであり，過去に実施した点検・調査・補修に関する追跡調査も含まれる．定期点検は，既設構造物の防食状態を定期的に点検するものであり，一般点検と詳細点検に分けられる．

一般点検は，既設構造物の電気防食や塗覆装の状態を確認するもので，海面上からの目視点検に加え，電気防食では電位測定も併せて実施される．また，塗覆装では，目視観察により塗覆装が健全な状態にあるか確認するものとしている．一般点検の頻度は，通常，２年に１回程度である．詳細点検は，防食工の状態をより詳細に把握し，健全度評価のための基礎資料を得るために実施され，電気防食では，電位測定により鋼材の防食状態を確認するとともに，陽極調査により陽極の残存寿命を推定し，塗覆装では水面上及び水中の目視観察により塗覆装全体の状態を確認するとともに，防食状態を塗覆装開放検査等により可能な限り把握することとしている．詳細点検の頻度は，一般的に５年に１回程度を標準としているが，劣化等の異常が求められた場合には，点検間隔を短くする必要がある．

環境調査は，対象構造物が置かれている腐食環境の状況を把握するために実施されるものであり，構造物周辺の水質等，防食工の劣化や鋼材の腐食の進行に影響を与える様々な環境条件を把握し，詳細点検の結果を踏まえて，防食工の健全度評価が実施される．鋼材の腐食調査は，防食工が十分に機能していないと判断された場合に実施されるものであり，その結果を受け，鋼材及び構造物の健全度評価が実施される．

つぎに，維持管理のための点検及び調査は，一般的に，その目的により，1)目視観察（①水面上の観察，②水中の観察），2)電位測定，3)肉厚測定，の３つの方法が採られる．水面上の観察は，一般に船上から実施され，水中の観察は，潜水士によって行われる．また，主として，前者では塗覆装の範囲に，後者では電気防食の範囲に適用される．

目視観察は，1)赤橙色の発さび箇所の有無・範囲，2)集中腐食の有無・位置，3)孔食の発生の有無・箇所・形状・寸法，4)付着物の状況，5)船舶や漂流物等の衝突の痕跡の有無など，に留意して行い，記録に残すとともに，必要に応じて写真撮影を行い，データベース化を計ることが肝要である．なお，水面上の観察は，L.W.L.（朔望平均干潮面）あるいはそれに近い低潮位時に観察可能な範囲全域に渡って実施するものとしている．上記の電位測定と肉厚測定については，次項で詳細に取り上げる．

（ｃ）電気防食の維持管理

以下では，電気防食において特徴的な点検・調査，健全度評価等について詳述する．電気防食の維持管理の手順を図 2.2.5.14 に示す．

１） 流電陽極方式の点検・調査

a)点検・調査内容

流電陽極方式の維持管理のための点検・調査は，目視観察の他に 1)電位測定，2)陽極調査，3)テストピースによる防食効果の確認，4)環境調査があり，一般点検及び詳細点検における点検項目及びその内容を表 2.2.5.26 に示す．

b)電位測定

防食対象施設の電位分布状況を把握するために，高抵抗電圧計（内部抵抗が１MΩ／V 以上の直流電圧計）と照合電極を用いて実施され，防食状態が調べられる．海水中に浸漬されている鋼の電位が，照合電極として海水塩化銀電極を使用して測定した場合に－780mV（防食電位）より卑の値であれば防食状態にあると考えられている（飽和甘汞電極で測定した場合，－770mV が防食電極である）．

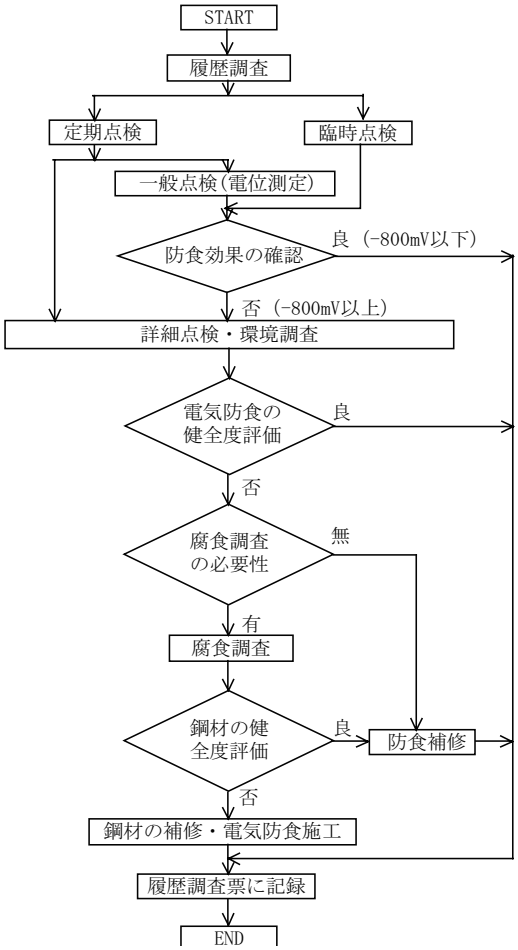


図 2.2.5.14　電気防食の維持管理手順

表 2.2.5.26　流電陽極方式の点検項目

種類 / 項目	一般点検	詳細点検
電　位	・測定箇所は，測定装置設置位置及び中間点． ・構造物の深度方向の測定は 1m 間隔で行う． ・測定装置の状況を合わせて調査する．	・施設の法線上 20～50m ごとに測定装置設置点及びその中間点における構造物の電位を測定する．桟橋では，前列杭のみを対象としてよい． ・構造物の深度方向の測定は 1m 間隔で行う．矢板の場合には，法線方向に隣接する電極取付点の中間点も測定する．桟橋で電極を取り付けていない杭がある場合には，その杭も測定する．
電　極		・陽極取付状況を全数目視観察するとともに必要に応じて写真撮影を行う． ・取付総数の 5～10%について陽極消耗量調査を行う． ・施設の両端，中央部及び異常消耗部の陽極で電流測定を行う．
テストピース		・取り外して秤量及び評価を行う．

c)陽極調査

陽極調査は，電気防食装置が設計通り作動していることの確認や，陽極の残存寿命の推定を行うものであり，調査項目としては，陽極の取付状況，形状寸法，重量，発生電流及び陽極の消耗量等がある．陽極の取付状況の確認が全数目視観察により行われる．また，陽極の発生電流を測定することにより，装置の作動状況の確認と，陽極のおよその残存寿命を求めることができる．ここで，電流測定は，一般的にシャントの電圧を測定する電圧降下法によって行われる（シャントは，陽極と防食対象である鋼材間に絶縁材を挿入し，この間を電気的に接続するように取り付けられる）．また，陽極の残存寿命ｒは，陽極の初期重量W_1，陽極の残存重量W_2，経過年数Ｎを用いて，$r = NW_2 / (W_1 - W_2)$ より求められる．

d)テストピースによる防食効果の確認

テストピースによる防食効果の判定は，定量的な防食状態の確認を行うために実施される．テストピースを予め構造物に取り付けておき，詳細点検時に取り外して，防食期間内における防食状態を把握することができるので，電気防食を適用する段階でその取り付けを行うことが肝要である．テストピースの取り付けは，電気的に接続した試験片と絶縁して取り付けた試験片を組み合わせて，構造物の各深度に水中溶接や電線等で取り付けられる．設置場所は，施設の両端部及び中間部とし，深度方向の取り付けは，±0m，中間部（陽極と陽極の中間点），海底面付近とする場合が多い．

テストピースによる腐食速度及び防食率は，腐食減量(C)，試験片表面積(S)，試験期間(T)，試験片密度(D)，不通電試験片の減量(F)，通電試験片の減量(E)を用いて，次式で与えられる．

$$\text{腐食速度} = C/(S \times T \times D) \quad , \quad \text{防食率} = (F - E)/F \qquad (2.2.12)$$

テストピースの肉厚測定は，一般にポイント型マイクロメータが使用される．なお，場合によっては，電気防食を施した構造物自体の鋼材の肉厚測定を行い，防食効果の確認が実施される場合もある．

e)環境調査

電気防食の効果を判断するために，また，陽極の残存寿命をより正確に予測するために，環境調査が実施される．さらに，陽極の耐用年数以内に防食状態が保持されなくなった場合の原因究明にも必要となる．詳細点検時に実施されることが望ましい．環境調査は，水質及び底質について実施され，**a)**～**d)**までの点検・調査等におけるデータの精度を向上する上で重要な案件である．

２） 外部電源方式の点検・調査

a)点検・調査内容

外部電源方式の点検・調査は，電位測定に加えて，直流電源装置について実施される．ここで，電位測定，テストピース，肉厚測定及び環境調査は，流電陽極方式と共通するので，**１）**の**b)**，**d)**，**e)**の事項を準用して差し支えない．ただし，出に測定の頻度は，２ヶ月に１回を標準とする．

外部電源方式では，流電陽極方式の陽極調査に替わって，外部の電源から防食対象施設に向かって防食電流を流入させるための外部電源装置の点検が重要となる．表 2.2.5.27 は，外部電源方式の点検項目を整理したものである．

b)外部電源装置の点検

外部電源方式の点検は，次の項目について実施される．

①直流電源装置の運転状況

②電極装置の通電電流

③配線路の絶縁抵抗

表 2.2.5.27　外部電源方式の点検項目

種類／項目	一般点検	詳細点検
直流電源装置	直流電圧，電流	直流電圧，電流，整流器の絶縁
電　位	・測定箇所は，測定装置設置位置及び中間点． ・構造物の深度方向の測定は 1m 間隔で行う．なお，直流調整を行った場合には，その回路の電極近傍及び中間点，深度方向の測定は 1m 間隔で行う． ・測定装置の状況を目視で観察する．	・施設の法線上 20～50m ごとに測定装置設置点及びその中間点における構造物の電位を測定する．桟橋では，前列電源装置の電流杭のみを対象としてよい． ・構造物の深度方向の測定は 1m 間隔で行う．矢板の場合には，法線方向に隣接する電極取付点の中間点も測定する．桟橋で電極を取り付けていない杭がある場合には，その杭も測定する．
電気設備	・目視（端子の変色等） ・ボルト，ナットのゆるみ等	・点検，清掃 ・回路の絶縁，接地抵抗
陽　極	電極電流	電極電流
テストピース		１／３箇所のテストピースを取り外し秤量，評価

直流電源装置の運転状況の確認は，毎日実施され，それを記録することが肝要である．毎日の点検が困難な場合には，最低でも２ヶ月に１回程度の点検は不可欠である．運転状況の確認に当たっては，前回の点検記録と比較して出力電圧や電流値に大幅な変動があるかどうかに最も注意する必要がある．前回の通電記録と大幅に異なる場合，電気防食回路に異常が発生していることが考えられるので，その回路の詳細点検を行う必要がある．

直流電源装置の電圧，電流が定格値通りに作動しているかを電圧調整器で電圧を切換えて点検するとともに，直流電源装置の変圧器，整流体，開閉器，端子等に異常がないか，点検を行う必要がある．外部電源方式に用いる陽極は不溶性電極であるので，電極の消耗状態を目視観察で判断することは難しい．したがって，詳細点検時あるいは異常が認められた際に各電極からの通電電流を測定し，設計上の電流値または許容電流以下で通電されているかの確認を行う必要がある．

３） 電気防食の健全度評価

a)流電陽極方式

流電陽極方式による電気防食装置の健全度評価は，電位測定と陽極調査結果に基づき，実施される．すなわち，電気防食の健全度評価は，電位測定によって行われ，陽極の残存寿命を評価するために，陽極調査が実施される．

電位測定の結果，電位が防食管理電位（－800mV）以下(卑)であれば，防食状態は維持されていると判断される．一方，電位が防食管理電位以上(貴)の場合は，防食状態が部分的に保持されていない可能性があるので，詳細点検が必要となる．

海水中における鋼の防食電位は，海水塩化銀電極を使用した場合は－780mV（飽和甘汞電極を使用した場合は－770mV）であるが，防食管理電位として－800mV を標準としている．電気防食の設計では，初期の平均電位を－800mV に設定し，その後，時間の経過とともに分極が進み，陽極電位に近くなることを想定している．なお，陽極が消耗している場合や，鋼材の電位が自然腐食の状態で長期間経過している場合は，鋼材の肉厚測定を行うことが望ましい．肉厚測定の方法は，後述の**（e）**による．

b)外部電源方式

外部電源方式による電気防食装置の健全度評価は，電位測定と直流電源装置の作動状況の点検・調

査結果に基づき実施される．ここで，電位測定結果に基づく健全度評価は，**1）**の**b)**に従って行われる．また，直流電源装置の運転状況及び作動状況の点検・超過結果が設計値あるいは許容値以内にあることを確認する必要がある．さらに，防食効果が低下していると判断された場合には，鋼材の肉厚測定を実施することが肝要である（後述の**（e）**参照）．

（d）塗覆装の維持管理

塗覆装の維持管理は，防食効果を確認するために，適切な維持管理計画に基づき実施される．その維持管理フローを図2.2.5.15に示す．

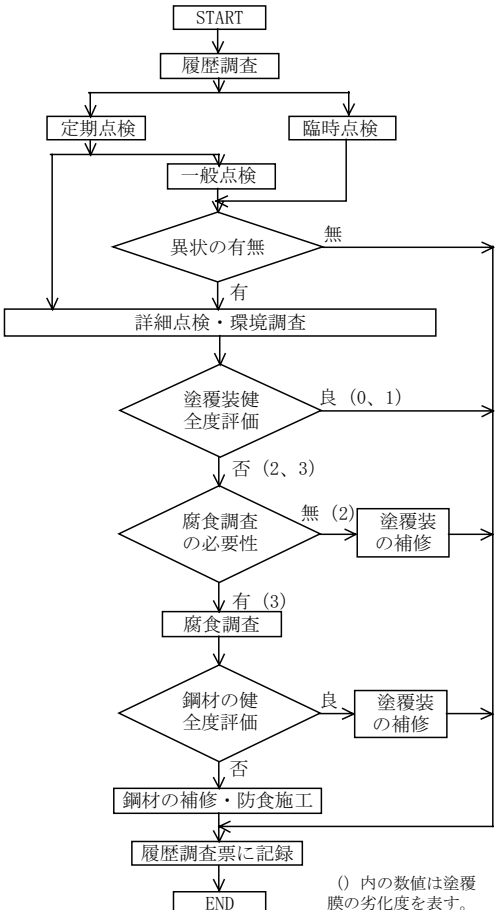


図2.2.5.15　塗覆装の維持管理フロー

1）塗覆装の点検・調査

a)塗覆装の一般点検は，対象施設全域について，目視観察により実施される．目視観察の方法は**（b）**による．

b)塗覆装の経年劣化や流木，船舶の衝突等による損傷について，定期的に点検し，異常がないことを確認することが重要である．有害な損傷や劣化等が発見された場合には，詳細点検を早急に実施し，適切な対策を講じる必要がある．

c)塗覆装の詳細点検の頻度は，構造形式，重要度，塗覆装の種類等により異なるので，維持管理計画において適切に設定する必要があるが，一般的には，５年に１回程度行うことが多い．

d)詳細点検は，全ての矢板や杭について行うことが望ましいが，不可能な場合には，できるだけ構造物の状況を代表できる箇所を選定して行う必要がある．通常，施設の法線方向に20～30m程度に１箇所，

桟橋の場合は１ブロックに１箇所程度の点検箇所が選定される．

e) 詳細点検の調査範囲は，飛沫帯，干満帯及び海水中の塗覆装が適用されている範囲で，杭の場合は，点検箇所毎に１本，矢板の場合は点検箇所毎に凹部，凸部各１枚が調査される．

f) 目視観察は，塗覆装の変状に十分注意して行い，代表的な箇所及び変状箇所については写真撮影も合わせて行う．塗覆装の種類によって変状の形態が異なるが，次の変状に着目して実施される（ここでは，腐食以外の変状についても取り上げる）．塗装では，膨れ，割れ，剥がれ，さび，有機ライニングでは，剥離，き裂，ペトロラタムライニングでは，保護カバーの脱落，き裂，変形，ボルト・バンド・端部シール・当板の異常，モルタルライニング・保護カバー無しでは，ひび割れ，剥離，脱落，保護カバー有りでは，保護カバーの脱落，き裂，変形，ボルト・当板の異常，金属ライニングでは，さび，脱落である．なお，ライニングとは，鋼材を腐食性環境から遮断して防食するため，耐食性材料で鋼材を被覆する方法の一つであり，厚膜で高い防食機能を有する被覆の総称である（図 2.2.5.16 参照）．

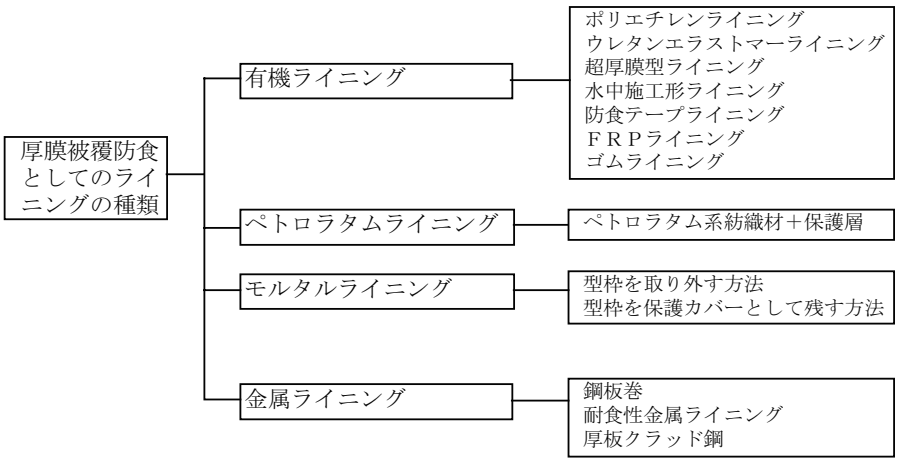


図 2.2.5.16　ライニング工法の分類

g) 塗覆装に何らかの変状が認められた場合には，鋼材のさびの程度が重要となるので，これに着目した目視観察が実施される．

h) 点検方法は，塗覆装の種類によって異なるため，以下に塗覆装の種類毎に整理する．

①塗装

塗膜の劣化には，塗膜の膨れ，割れ，剥がれ及び塗膜下の腐食などがある．塗膜の欠陥が鋼面に達すると流れさびが発生するので，塗装の防食被覆の詳細点検はさびや塗膜の膨れ，割れ，剥がれに着目した外観の詳細な目視観察を主体に行う．目視観察時には，鋼面への付着力を失った塗膜が鋼面に残っていることがあるので，プラスチックハンマーを用いた打音検査が実施される．

機器による調査が可能な部位では，塗膜の膜厚，付着力，インピーダンス等の測定を併用して定量的に行い，塗膜の劣化状況を総合的に判断することが肝要である．

さび，膨れ，割れ，剥がれの程度を表す指標として，大きさや発生密度を数段階に分類した標準写真を用いて評点をつける方法やその面積率により定量化する方法がある．

さび，膨れ，剥がれ等の面積率の目視判定は，ASTM-D610 等の基準を参考にして行う．さび面積は鋼材がさびている部分の面積であり，流れさびが塗装表面に付着している部分はさび面積に含まない．流れさびが塗膜表面に付着している部分と鋼材がさびている部分の判別が十分でないと，さび面積を過大に算出する恐れがあるので，構造物の近くからの点検が必要である．ASTM-D610

のさび面積率判定基準を図 2.2.5.17 に示す.

②有機ライニング

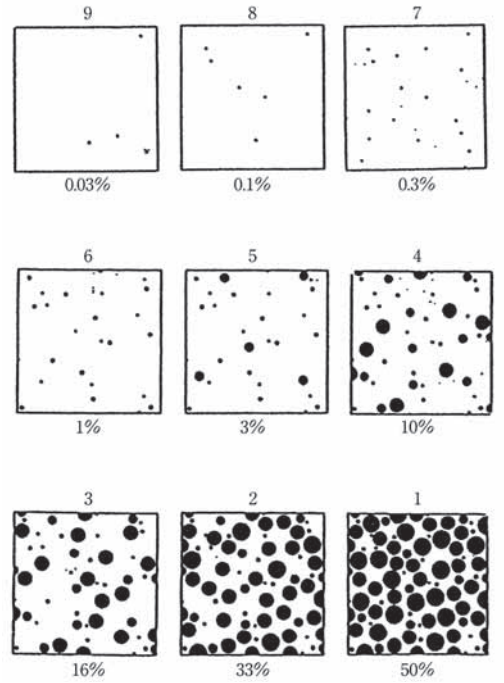


図 2.2.5.17　さび発生面積率（ASTM-D610）

調査項目は，塗装の場合と基本的に同じで，外観観察が主体となる．また，塗装の場合と同様に機器による調査を行い，劣化状況を総合的に把握することが望ましい．一般に，有機ライニングは，塗装と比べ塗膜が厚く，耐久性に優れている．有機ライニングの中，特にポリエチレン及びポリウレタンを被覆材料とするものは，長期耐久性を確保するために，次項に示す点検・調査が必要となる．

③ペトロラタムライニング

ペトロラタムライニングは，ペトロラタム系防食材と保護カバーで構成されているので，目視観察では，保護カバーの点検・調査が主体となる．ペトロラタムライニングの場合は，内部に空隙がない場合，保護カバーが健全であれば内部のペトロラタム防食材も健全で，鋼管杭の腐食も認められていない．したがって，一般には，保護カバーの健全度及び空隙の有無を調査すればよい．保護カバーの点検は，カバーの亀裂，変形及び締め付けボルトの腐食や緩みなどに着目し，空隙調査は，プラスチックハンマーを用いた打音検査によって実施される．

④モルタルライニング

モルタルライニングには，保護カバー付きのものと，保護カバーのないものがあるが，何れの場合もモルタルの持つアルカリ性により腐食を防止できるため，その機能が阻害されない限り健全である．

保護カバーがない場合は，外観観察によりモルタルの欠落やひび割れについて調査する．劣化が進行すると，欠落部，ひび割れ部や端部からさび汁が滲み出てくる状態になる．保護カバーがある場合は，ペトロラタムライニングと同様に保護カバーが健全であれば，一般的に内部は健全と考えてよい．したがって，詳細点検では，保護カバーの亀裂，ひび割れ等について調査される．また，

保護カバーとモルタルの間に空隙があり，海水がこの空隙に流入する状態になると，保護カバーの機能は損なわれるので，打音検査により空隙の有無が調査される．

⑤金属ライニング

金属ライニングは，一般には耐食性金属による被覆のため，被覆材に損傷がなければ健全である．しかし，一旦損傷を受けると，鋼材と金属ライニングとの間で異種金属接触腐食が起こり，短期間で大きな腐食となるため，小さな損傷にも十分注意して観察する必要がある．

２）ポリエチレン，ポリウレタン被覆鋼矢板の点検・調査

鋼矢板の塗覆装として，ポリエチレンあるいはポリウレタンを使用している（重防食工法を用いている）場合には，以下に示す要領で塗覆装の耐久性に関する点検・調査を実施する必要がある．

点検・調査の項目は，1)履歴調査，2)被覆部の外観調査（全体調査，付着生物状況調査，詳細調査），3)継手嵌合部の腐食調査，4)水質調査であり，調査の流れを図 2.2.5.18 に，調査項目及びその数量を表 2.2.5.28 に示す．

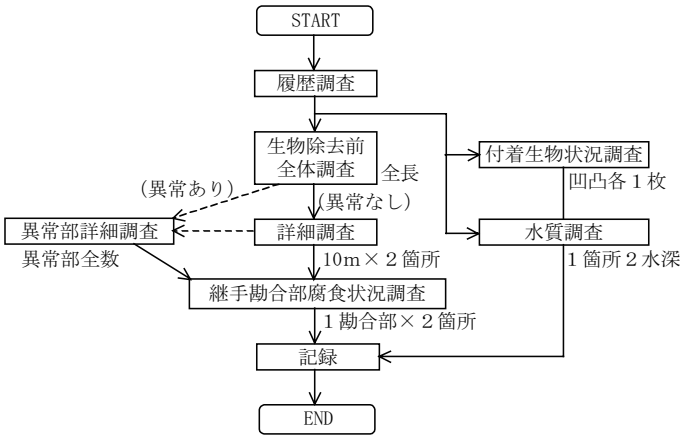


図 2.2.5.18　調査の流れ

表 2.2.5.28　調査項目及び調査数量

調査項目	内　　容	調査方法及び数量
１．全体調査	調査範囲全体の観察	・被覆材の付着物を落とさない状態で潜水士により観察する． ・調査範囲は全長である．
２．付着生物状況調査	被覆材に付着している生物調査	・調査範囲内の代表的な場所において１地点（凹凸各１枚）の水中連続写真撮影を行う．
３．詳細調査	被覆材表面状況 被覆材浮きの有無の調査	・調査範囲内で代表的な場所２箇所を選定し，鋼矢板表面の付着物を除去し，詳細な観察を行う． ・１箇所につき 10㎝ 範囲とする． ・１箇所につき凹凸鋼矢板１枚ずつを写真撮影する． ・異常箇所は全数スケッチ記録する．
４．継手嵌合部腐食状況調査	未被覆部における腐食調査	・詳細調査箇所において，継手嵌合部の腐食状況を写真撮影する． ・詳細調査箇所１箇所につき，継手嵌合部１箇所を全数調査する．

３）塗覆装の健全度評価

塗覆装の健全度評価は，詳細点検結果から判断された劣化度に基づき実施される．ここで，塗覆装の劣化度は，表 2.2.5.29 のように分類され，表 2.2.5.30 に示す劣化度評価の目安を参考に決定される．ただし，ポリエチレン・ポリウレタン被覆の場合は，図 2.2.5.19 に基づき劣化度評価が実施される．

劣化度は２もしくは３と判定された場合，塗覆装の防食効果が失われており，何らかの補修が必要と

なる．また，劣化度が３の場合，鋼材の調査を行い，構造物の健全度を評価しなければならない．その詳細は次項（e）に示す．

判定された劣化度に基づき，次回の点検時期または補修時期が決定される．

表 2.2.5.29　塗覆装の劣化度

劣化度	調　査　結　果
0	全く健全な状態
1	損傷や劣化が認められるが，防食機能は維持している状態
2	部分的に損傷や劣化が生じ，防食機能が一部損なわれている状態
3	全面的に損傷や劣化が進行し，防食機能が失われている状態

表 2.2.5.30　塗覆装の劣化評価の目安

劣化度	塗　装	有機ライニング	ペトロラタム ライニング	モルタル ライニング	金属ライニング
0	・初期状態とほとんど変化なく，健全な状態 （欠陥面積率 0.03%未満）	・初期状態と変化なく，健全な状態.	・初期状態と変化なく，健全な状態.	・初期状態と変化なく，健全な状態.	・初期状態と変化なく，健全な状態.
1	・さび・膨れが点在. ・上塗り塗料の剥がれ，ひび割れが点在している. （欠陥面積率 0.03%以上，0.1%未満）	・素地まで達していない擦り傷，当て傷が点在している.	・保護カバーに変色や白亜化が認められる. ・表面に微細なクラックが認められる状態. ・ボルト，ナットやバンド材に多少緩みがある.	・表面に小さなひび割れが認められる状態. ・保護カバーに小さなクラックが認められる状態.	・ライニング材に小さな当て傷や僅かな腐食が認められる.
2	・かなり大きなさび・膨れが点在している. ・さびを伴う剥がれが広範囲に発生している. （欠陥面積率 0.1%以上，0.3%未満）	・一部に素地まで達する擦り傷，当て傷，剥がれが生じ，僅かにさびが求められる状態.	・保護カバーや当て板にき裂が認められる. ・ボルト，ナット等に腐食が見られる.	・ひび割れ幅が大きくなり，一部小さな欠落が見られるが，さびの流出はない. ・一部保護カバーの欠損等が見られるが，さびの流出はない.	・ライニング材に腐食や傷が認められ，近々，素地の鋼材まで達する状態.
3	・広範囲にさび・膨れが求められる. ・さびを伴う剥がれ，ひび割れが広範囲に発生している. （欠陥面積率 0.3%以上）	・剥がれや欠損が著しく，さび面が露出し，さびが発生している状態.	・保護カバーが脱落し，ペトロラタム材が露出又は脱落し，さび面からさびが出ている状態.	・セメント硬化体が欠落し，さび面にさびが盛られる状態.	・さび面まで達する傷やはく離があり，さび面からさびがでている状態.

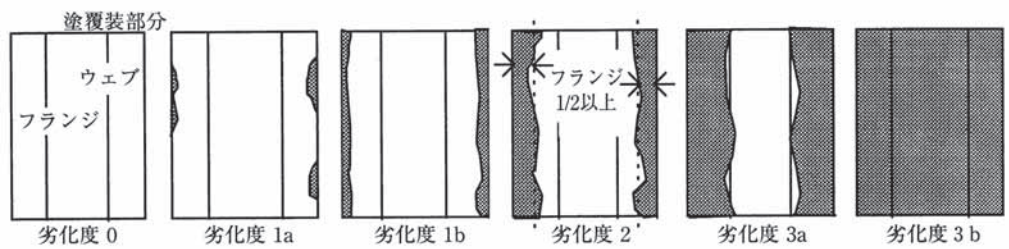


図 2.2.5.19　塗覆装の劣化度（ポリエチレン・ポリウレタン被覆）

劣化度０：従来通りの定期点検を継続する．

劣化度１：軽微な劣化が求められた段階であり，塗覆装の種類により，以後の点検時期を早めるなどの調整が必要となる．

劣化度２：構造物全体について，補修対策調査を実施し，部分的に劣化した箇所を補修する．塗覆装の補修後は，次回の点検時期を早める等の配慮が必要となる．

劣化度３：全面的に補修を行う必要がある．鋼材の腐食状況によっては，構造物の補修も必要となる．

調査箇所により劣化度が異なる場合には，劣化度の大きい方を採用し，安全側の見地から管理する．

（ｅ）鋼材の腐食調査及び構造物の健全度評価

港湾鋼構造物では防食工が十分に機能していない場合，あるいは，無防食鋼構造物では，鋼材自体の腐食状況を調査し，その健全度を評価する必要がある．以下では，鋼杭（鋼管杭）及び鋼矢板（鋼管矢板）よりなる構造物を主な対象として，腐食調査結果に基づく構造物の健全度評価の詳細を説明する．

１）腐食調査

a)調査内容と目的

鋼材の腐食調査は，目視観察と肉厚測定がその中心であり，目視観察は，鋼材自体の腐食状態の概要を確認するとともに，肉厚測定箇所を決定するために実施されるものである．また，肉厚測定により，腐食による鋼材肉厚の減少量や腐食傾向が定量的に把握される．

b)目視観察

鋼材自体の目視観察は，防食工を対象とした目視観察と同時に行われる場合がほとんどであると考えられるため，その調査・点検において，鋼材の腐食にも着目した調査を行うことが望ましい．目視観察は，水面上の観察と水中での観察があり，（ｂ）の維持管理における点検・調査に基づく．

２）肉厚測定

肉厚測定は，防食工が十分な機能を有していない（防食状態が良好でない）場合に，鋼材自体が健全であるかどうかを確認するために実施される．肉厚測定では，以下に述べる調査地点，測定箇所，測定点を，調査の目的に応じて適切に選定しなければならない．また，測定結果は腐食速度で評価するほか，鋼材の残存肉厚の値にも留意する必要がある．

a)肉厚測定方法

肉厚測定には，一般に超音波厚み計が使用される．超音波厚み計は，鋼材の表面にあてた探触子から放射された超音波パルスが鋼材底面で反射され，探触子に戻るまでの時間が超音波の通過する距離に比例することを利用して，鋼材の肉厚を測るものである．水中部と陸上部では，それぞれ専用の探触子が用いられる．なお，超音波厚み計では，測定対象鋼材とほぼ同じ厚さの肉厚既知の基準鋼板によるキャリブレーションを行い，正確な肉厚が表示されるように予め調整しておく必要がある．

肉厚測定点では，ほぼ 10cm 四方をハンマーやスクレイパー等で付着物を除去し，金剛砥石やワイヤブラシ等で鋼材面をこすり，鋼材の地肌を露出させ，測定を行う．ここで，超音波厚み計の探触子は，定められた測定点においてそれぞれ３回ずつ当てて測定し，その平均値を測定値とする．

b)調査地点の選定

調査地点は，測定箇所を施設の法線上に平面的に表した点のことで，腐食の状況を表すとともに，健全度評価を行う場合の施設を代表する点となる．そのため，目視点検等の結果に基づき，孔や孔食の発生状況，さびの範囲等の腐食状況，施設建設後の経過年数，鋼材の初期肉厚等を考慮して，腐食が激しく，対策が必要と推定される箇所を重点的に選定することが肝要である．また，構造物の部位

の重要度，発生応力の大きな断面等も考慮して重点的に選定することが望まれる．

目視観察の結果より，腐食状態が法線方向にかなりの区間に渡ってほぼ一様であると判断される場合は，その区間に対して以下を参考に調査地点が選定される．

①孔の発生あるいは平均干潮面付近からL.W.L.付近にかけて広範囲に連続して赤桜色のさびが見られる状態で，建設後５年以上経過している場合は法線方向約20mに１調査地点を選定（桟橋１ブロックに相当）する．

②平均干潮面付近からL.W.L.付近において赤燈色のさびが部分的に見られる状態で，建設後１０年以上経過している場合は法線方向約50mに１調査地点を選定する．

③上記の①，②以外の場合，すなわち平均干潮面付近からL.W.L.付近において赤燈色のさびがごく部分的かまたは見られない場合，あるいは①もしくは②の腐食状態であっても，建設後の経過年数が短い場合は，法線方向約100mに１調査地点を選定する．

なお，１施設あたり最低でも２調査地点を採ることが望ましい．桟橋の場合は，１調査地点において法線直角方向１列の杭群を対象とする．また，鋼製セル式構造物の場合は，セル本体と杭それぞれについて調査地点を選定する．

c) 測定箇所の選定

測定箇所は，部材の鉛直方向における肉厚測定点の位置を表した点のことで，部材鉛直方向の腐食の分布状態を表すための点であり，以下の点に留意して選定する必要がある．

1) 測定箇所は，防食工の健全度を十分に考慮し，目視観察の結果に基づき，鋼材の腐食状態を確認した上で集中腐食の有無等，腐食の形態が分かるように選定する．また，最大応力発生点のように構造物の安全上問題となる点を選定する必要がある．

2) 腐食の激しい部分は，H.W.L.付近以上と平均干潮面付近～L.W.L.付近であるが，H.W.L.付近以上については塗覆装が，平均干潮面付近～L.W.L.付近については塗覆装と電気防食が施されている場合が多い．したがって，塗覆装と電気防食の健全の状態に応じて測定箇所は異なる．一方，桟橋の鋼管杭においてはそれらの部分は応力の大きい箇所でもある．また，矢板構造では応力は小さいが，孔が発生した場合，裏埋材の流出が生じるので，何れも肉厚測定を行わなければならない．

3) 詳細調査では，図2.2.5.20を標準として，測定する箇所が選定される．

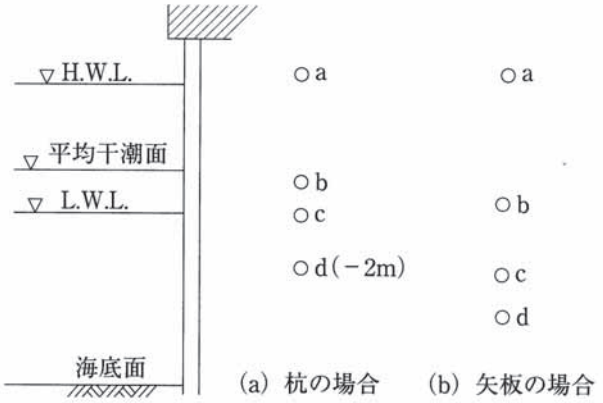


図2.2.5.20　測定箇所の標準

4) 図 2.2.5.20 において，測定箇所を４点にしたのは次の理由による．杭の場合，ａ点は杭の最上部であり，応力が大きい箇所であるとともに，H.W.L.付近以上では腐食量も大きい．ｂ点及びｃ点は応力も大きいが，集中腐食が生じる箇所であり，この部分の断面剛性が構造物の応力解析結果に大き

く影響するので，最大腐食量を可能な限り正確に把握するためである．したがって，b 点及び c 点は，平均干潮面付近～L.W.L.付近のさびの状況により，最も腐食していると思われる箇所を選定する．なお，海水中では，L.W.L.付近で集中腐食が生じている場合でも，－2m 以深では腐食速度はあまり変化しないこと，及び応力解析結果に及ぼす影響が小さいことから，d 点を－2m としている．

5) 矢板では，H.W.L.付近や平均干潮面付近～L.W.L.付近における応力は小さいが，腐食が進行して孔が発生した場合，裏埋材の流出が生じるので測定箇所として選定する．したがって，b 点は平均干潮面付近～L.W.L.付近間で最も腐食していると思われる箇所を選定する．また，最大応力は海水中で発生するから，最大腐食量を把握するため，海水中は２点選定する．なお，２点の間隔は鉛直方向に 0.5～1.0m とする．

d) 肉厚測定点の選定

肉厚測定点は，防食工の劣化状況及び鋼材の形状を考慮して選定される．また，肉厚測定点の測定値は，測定箇所の断面形状を与え，以下の点に留意して選定される．

1) 肉厚測定点は，鋼材の形状に応じて，公称肉厚が一様な約 10cm×10cm の範囲内であり，図 2.2.5.21 の位置を標準としている．

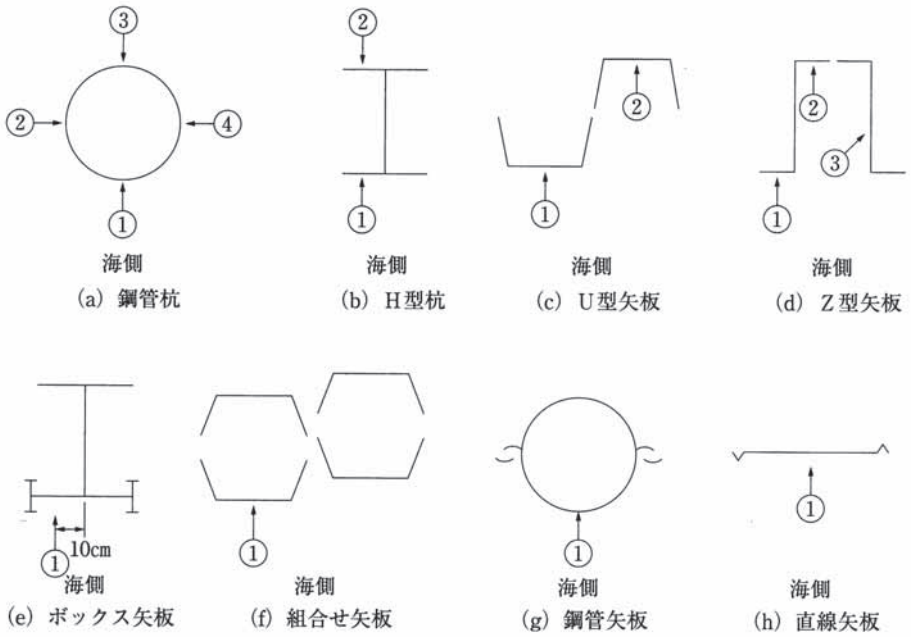


図 2.2.5.21　肉厚測定点の標準

2) 塗覆装が部分的に劣化している場合は，その劣化部分を肉厚測定点に選定する．

3) 腐食量は局所的にばらつくが，それを詳細に表現するには１肉厚測定点において，数点の肉厚を測定し，それらの平均値を肉厚とするのが実際的である．一般的には，図 2.2.5.22 に示すように，５点または３点が測定点として選定されている．

4) 測定箇所における部材の水平断面形状を知るには，水平面内で密に肉厚を測る方がよいが，図 2.2.5.21 及び図 2.2.5.22 に示したように選定すれば，応力解析に必要な腐食の状態をほぼ把握できる．

5) なお，孔が明いている場合，その点を肉厚測定点の一点に選定し，肉厚を 0 とする．

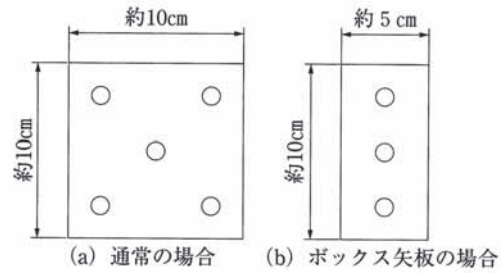


図 2.2.5.22　厚み計の探触子を当てる点

e)局部腐食の測定

局部腐食が発見された場合，局部腐食測定が実施される．

腐食した鋼材表面は，平均的に腐食が進行した平坦な部分と，大小の局部腐食が多数点在している部分がある．局部腐食部分は，集中腐食により局部的に肉厚が大きく減少している．そのため，鋼材の健全度評価の精度を上げるには，局部腐食による肉厚減少を調査し，局部腐食の実態を調査することが重要である．

肉厚測定において局部腐食（深さ約 3㎜ 以上のもの）が発見された場合，型を取ったり，デプスゲージ等で深さを測定し，最小肉厚を把握するとともに，腐食の形状等を記録に残す必要がある．図 2.2.5.23 に調査方法の一例を示す．

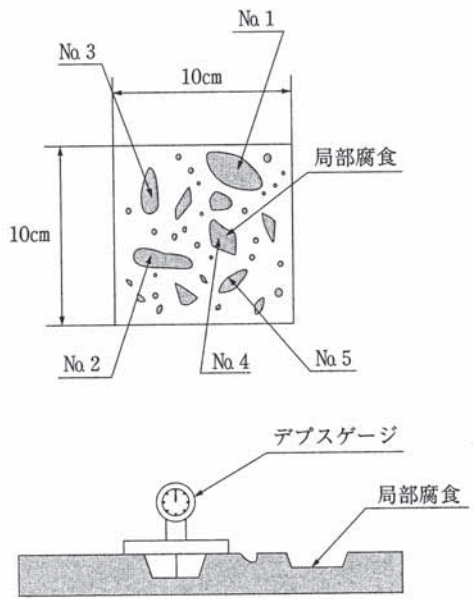


図 2.2.5.23　局部腐食測定方法の一例

f)腐食後の肉厚評価

腐食した鋼構造物の耐力や変形等を計算する場合，一般には腐食調査により得られた平均肉厚を用いてよい．しかし，腐食により鋼材表面が大きな凹凸を示す場合には，局部座屈に対する耐力が低下することが実験的に明らかにされている．したがって，腐食による肉厚減少が大きく，鋼材表面の凹凸が大きい場合には，平均肉厚から凹凸の影響を差し引いた肉厚を用いる必要がある．また，局部腐食として孔食が発生している場合，肉厚測定のデータにばらつきが生じるので，さらに詳細な調査を

行い，孔食の程度を十分に把握する必要がある．特に，杭式構造物では，最大腐食量が杭の応力に大きく影響するため，肉厚測定を精度よく実施して，その位置を明確に捉えなければならない．

３）鋼構造物の健全度評価

構造物に要求される性能は，耐荷力，変形性能等多岐に亘るが，通常，港湾鋼構造物では，耐力に着目して，健全度の判定を行っている．その際，肉厚測定により得られた肉厚によって求めた断面耐力と設計外力から求まる断面力を比較して評価される．

杭式あるいは矢板式構造物のように変位が制限される場合には，変位の検討を行わなければならない．また，矢板に孔が発生した場合には，耐力は満足していても裏埋材が流出する恐れがあるので，それを考慮した健全度評価を実施する必要がある．健全度評価を行う際には，解析の目的に応じ，それが現時点のものであるのか，あるいは将来のどの時点のものであるのかを明確にする必要がある．

a) 腐食評価

肉厚測定の結果から得られた腐食後の肉厚及び腐食速度に基づき，腐食評価（腐食の程度の評価）が実施される．現有肉厚は健全度評価のために行う構造計算等に用いられるが，腐食後の断面を適切にモデル化して定める必要がある．また，腐食速度は，腐食量と経過年数により計算で求められるが，当該構造物の腐食程度を一般的な傾向との比較によって把握するたねに，さらに，将来の腐食傾向を推定するために用いられる．

b) 腐食が生じた鋼構造物の健全度評価

腐食した鋼構造物の健全度評価は，構造形式，腐食範囲，腐食程度（肉厚）等に応じて，構造物に要求される耐力等の性能が保持されているかどうか適切な方法により，実施される．また，その評価は，腐食範囲が部分的であるか，全体的に拡がっているかに応じて適切な方法を用いる必要がある．部分的に腐食が発生し，局部的に肉厚が減少している場合，平均応力的に問題なくても，その箇所での応力集中や疲労破壊の危険性が増すので注意を要する．

防食工の点検・調査を適切に実施していれば，鋼材の腐食が万一生じても，その範囲が構造物全体に拡がることはほとんどない．しかし，腐食範囲が全体的に拡がっている場合には，無防食鋼材での腐食パターンと同様な腐食量を想定して応力解析を行い，健全度評価を行う必要がある．また，部分的に腐食が発生している場合には，測定された肉厚に基づいて腐食パターンをモデル化し，そのモデルに基づき，変断面構造としての構造計算を行い，健全度評価を行うことが肝要である．

c) 杭式構造物の健全度評価

杭式構造物の健全度評価は，耐力により行うことを基本としている．その際，外力及び許容応力度は，当初設計で設定したものとする．ただし，当初設計の設定値が不明な場合には，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示されている事項が準用される．また，さらに変位が制限される場合には，構造物の変位の検討を行わなければならない．

解析では，杭の腐食調査結果に基づいて，腐食量及び腐食プロフィールから杭のモデル化を検討する必要がある．杭のモデル化を行うには，腐食量の設定及び腐食プロフィールの考慮が必要である．杭の腐食プロフィールとして

①杭の鉛直方向腐食プロフィール

②杭断面の腐食プロフィール

③桟橋法線直角方向における鉛直方向の腐食プロフィールの変化

を考慮しなければならない．

鉛直方向の腐食プロフィールは図 2.2.5.24 及び図 2.2.5.25 に示すように分類される．

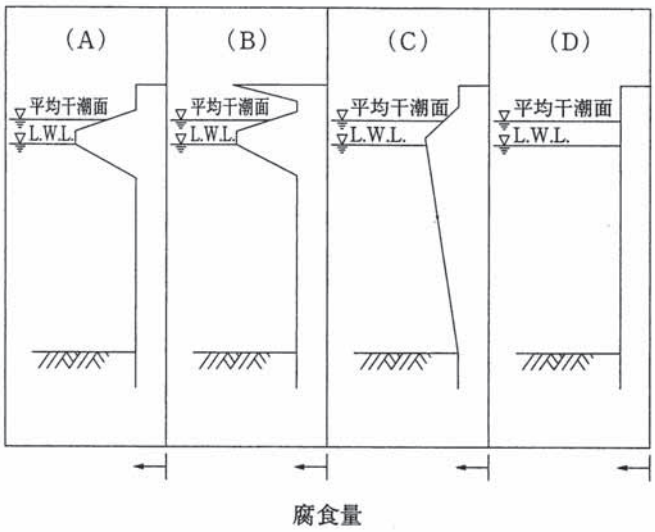


図 2.2.5.24　鋼管杭の鉛直方向プロフィールの分類

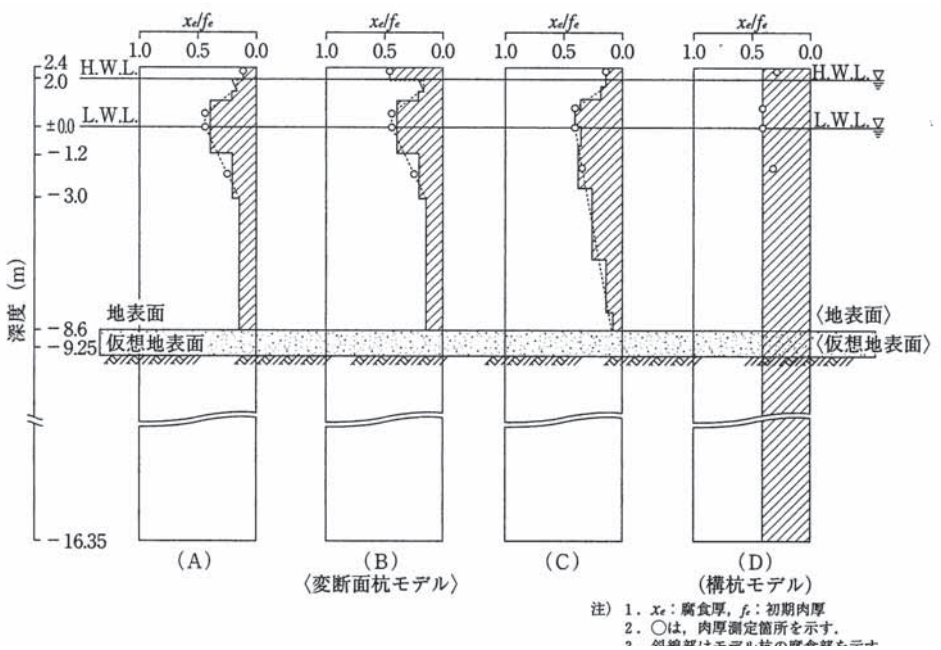


図 2.2.5.25　鋼管杭の鉛直方向腐食プロフィールとモデル化例

d)矢板式構造物の健全度評価

矢板式構造物の健全度評価も，耐力により行うことを基本としている．その際，外力及び許容応力度は，当初設計で設定したものとする．ただし，当初設計の設定値が不明な場合には，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示されている事項が準用される．また，さらに変位が制限される場合には，構造物の変位の検討を行わなければならない．

矢板に孔が発生した場合，耐力には問題がなくても，裏埋材が流出する恐れのあるほか，矢板の裏側からの腐食が進行するため，孔の発生を考慮する必要がある．また，矢板式構造物の健全度評価も，杭式構造物と同様に腐食量に大きく影響されるため，海水中の測定箇所は，矢板の最大曲げモーメン

ト発生点と，その上方0.5～1.0mの肉厚測定を精度よく実施しなければならない．

解析では，矢板の腐食調査結果に基づいて，腐食量及び腐食プロフィールから矢板のモデル化を検討する必要がある．矢板のモデル化を行うには，腐食量の設定及び腐食プロフィールの考慮が必要である．矢板の腐食プロフィール4)として，

①矢板の鉛直方向の腐食プロフィール

②矢板の断面の腐食プロフィール

③構造物の法線方向における矢板の鉛直方向の腐食プロフィールの変化

を考慮しなければなない．

海水中，特に最大曲げモーメント発生点付近の腐食量が大きい腐食プロフィール以外では，軟弱地盤中の矢板の曲げモーメントや，最大変位及び矢板の根入長の安全率への腐食の影響は小さい．

②の断面内の腐食プロフィールは，断面係数等を算定するため設定する必要がある．矢板の凸部と凹部の腐食量に差を生ずると，一般に腐食量の大きい凸部端に対する断面係数の方が小さい値となり，発生応力が凹部端より大きくなる．そのため，凸部端に対する断面係数の値を用いる．

矢板の側面の腐食量については，凸部と凹部の腐食量の平均値を用いる．これは，以下の理由による．

1) 側面部の肉厚測定が困難である．

2) U形は側面部にテーパーがついているため，腐食量の設定が難しい．

3) 既往の調査結果では，側面腐食は凹部とほぼ同じ程度であった．

4) 凹部と同一腐食量とした場合と，凸部と凹部の平均値とした場合では，断面係数があまり変化しない．

③の構造物の法線方向における矢板の鉛直方向の腐食プロフィールまたは腐食量が異なる場合は，それぞれの腐食状況に応じて，腐食プロフィール等を設定して応力計算を行う必要がある．

（ｆ）要求性能と予定供用期間

港湾施設の多くは，25～30年程度経過しており，維持管理費の増大が懸念されている．このため，鋼道路橋や鋼鉄道橋の場合と同様に，既存施設の適切な維持管理を実施することで施設の長寿命化を計り，更新比を抑制することが急務の課題となっている．

当初述べたように，港湾鋼構造物がその供用期間に渡って保有すべき機能の水準を満足するために行うべき維持管理の標準が「港湾構造物の維持・補修マニュアル（1996.6)」に詳述されており，港湾鋼構造物の健全度評価を実施する上で，同マニュアルは不可欠なものとなっている．

構造物の健全度評価は，鋼材の肉厚を測定し，その残存耐力を評価することが主体であり，鋼鉄道橋における健全度評価と類似する考え方が採られている．しかしながら，基本的には，許容応力度設計を基準にした設計がベースとなっており，供用期間についても明記されておらず，前述の観点から，より合理的な維持管理手法の確立が望まれている．

このような状況の下，(財)東京港埠頭公社では，港湾施設，特に，埠頭施設の維持管理を戦略的に実施するため，「土木施設維持管理マニュアル（2004.6)」を作成し，予防保全の視点からライフサイクルコストの最小化を目指した維持管理手法の体系化を図った．同管理マニュアルは，上記の補修マニュアルをベースに作成されたものであり，予防保全の視点と限界状態設計（性能照査型設計）への移行を想定した内容が一部含まれている．

以下では，港湾施設に要求される性能と予定供用期間について言及する．

１） 維持管理すべき性能（要求性能）

港湾施設を供用するために，各施設は以下に示す性能が要求性能を下回らないように，維持管理しなければならない. 桟橋上部工, 桟橋下部工, 鋼矢板岸壁･護岸について, 維持管理すべき性能を表 2.2.5.31 に示す.

表-2.2.3.31　港湾施設の維持管理すべき性能と具体的な内容

施設	管理すべき性能		
	安全性能	使用性能	耐久性能
桟橋 上部工	・船舶が着船できる.（着船時の水平力に対する抵抗性） ・荷役ができる.（車両やコンテナなどの静的・動的荷重に対する抵抗性）	・荷役作業がスムーズにできる.（上部工に段差がなく，剛性低下による振動が少ない. ・床版の抜落ち（走行制限が必要となる）がない.	・予定供用期間（供用開始後 100 年間）において，塩害等が原因となって安全性能や使用性能が低下し，埠頭機能が停止しない.
桟橋 下部工	・船舶が着船できる.（着船時の水平力に対する抵抗性） ・荷役ができる.（車両やコンテナなどの静的・動的荷重に対する抵抗性）	（直接請求されることはない）	・予定供用期間（供用開始後 100 年間）において，下部工の腐食量が許容値以下である.
鋼矢板 岸壁 護岸	・背後地からの土圧に耐え，荷役作業のヤードを確保する.（土圧に対する抵抗性）	・矢板の変位，傾斜，法線の凹凸，土砂の流出などが少なく，荷役作業に支障がない.	・予定供用期間（供用開始後 100 年間）において，鋼矢板の腐食による断面減少が許容値以下である. ・予定供用期間（供用開始後 100 年間）において，矢板の変位，傾斜，法線の凹凸，土砂の流出

一般に，時管理すべき性能として，安全性能，使用性能，第三者影響度，美観・景観，耐久性能及び復旧性能があるが，港湾施設の特殊性を勘案して，安全性能，使用性能及び耐久性能について管理することとしている．ここで，耐久性能は，安全性能や使用性能などの性能が後述の予定供用期間の間に許容値を下回らない性能であり，現状では，劣化予測から推定される構造物の劣化程度を予測することによって管理される.

２） 予定供用期間

一般に，構造物または部材が供用できなくなるまでの期間を**耐用年数（耐用期間）**と呼んでいる．耐用年数には，**1)機能的耐用年数**（施設の機能が不足・低下により限界に達するまでの年数），**2)物理的耐用年数**（構造部材の腐食・劣化等による強度低下，外的要因による構造破壊など，物理的な原因で使用に耐えられなくなるまでの年数），**3)経済的耐用年数**（施設の陳腐化等によって効率的な利用ができなくなり，経済的な面から限界となる年数），**4)社会的耐用年数**（社会的要請や新規計画により施設の当初機能が不要となるか，または別の機能が求められるまでの年数）があり，**1)～4)**の中で最小のものが施設の耐用年数となる.

機能的耐用年数と社会的耐用年数は，外部からの制約条件であり，施設の機能の向上や施設の重要性（社会的な要請）から判断すると，何れも相当長いと考えられている．このため，物理的耐用年数を管理して，延命化を計ることが維持管理計画の重要な課題である.

設計時において，構造物または部材がその目的とする機能を十分に果たさなければならないと規定した期間が**設計供用期間**であり，一般に，港湾鋼構造物では，50 年程度と考えられている（鋼橋の法定耐用年数に対応する）．設計供用期間は，構造部材の劣化（物理的耐用年数）と密接に関連し，これを超

えて供用する場合には，適切な維持管理によって部材の劣化を遅らせる（物理的耐用年数を延ばす，あるいは，延命化を計る）ことが必要となる．

構造物を供用したい期間を**予定供用期間**と呼び，「土木施設維持管理マニュアル（2004.6)」では，既存港湾鋼構造物において100年間としている．この理由は以下の通りである．

1)既存施設が法定耐用年数（50年）に達するまでの期間が短く，早期に全面改修することは，現状では考えられず，長期の供用が求められる．

2)一部供用を停止して大規模な補修を行うことは不可能であり，経済的にも困難である．将来の社会的・経済的な環境の変化に柔軟に対応できるように，現在保有している施設を可能な限り保全することが肝要である．

3)100 年以上の耐久性を有する鋼構造物が実際に存在することから，適切な維持管理を実施すれば，100年程度の供用は可能であると考えられる．

以上の事由により，現在供用中の鋼構造物の予定供用年数を建設後100年とし，維持管理計画が策定されている．予定供用年数が100年という考え方は，鋼道路橋及び鋼鉄道橋の場合と対応する．

（4）水門扉の健全度評価

一般的に，水門扉を含む水力発電所の土木構造物は許容応力度で設計されている．これらの構造物の維持管理は，定期的な巡視や点検を基本として，建設後数十年が経過した時点で，健全性診断を行い，その後の運用に反映している．

水門扉の維持管理に関わる指針や要領が，下記の文献等にまとめられている．各設備管理者（電気事業者）は，これらの文献を参考にして，それぞれの健全性評価基準を策定し，運用しているのが現状である．

- 通商産業省資源エネルギー庁：鋼構造物の診断マニュアル（案），2003.4
- 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準　水門扉編，1997.9
- ダム・堰施設技術協会：ゲート点検・整備要領（案），2005.1
- 水資源機構：機械設備管理指針，2003.11
- 電気事業連合会：ダム管理調査要領，1987.3

ここでは，「鋼構造物の診断マニュアル（案）」を中心として，上記文献を参考に，ダム洪水吐ゲート（以下，ゲートと略す）を例として，健全性評価についてまとめる．

（a）ゲートの構成

ゲートは，表2.2.5.32に示すような扉体・戸当り・固定部・開閉装置で構成されるが，ここでは，腐食による劣化が耐荷性能に影響を及ぼす扉体を対象とする．

表2.2.5.32　ダム洪水吐ゲートの構成

名称	説明
扉体	扉体は，直接水圧等の荷重を受け，これを支持する可動体であり，一般にスキンプレートと補助桁等で構成された受圧部，主桁・脚柱等の架構部，水密部，支承部を備えるものである．
戸当り	戸当りは，一部コンクリートの中に埋め込まれ，扉体の水密を図る部分，および扉体を円滑に開閉するためのガイド部分を総称する．また，ヒンジ形式以外のゲートでは，扉体の支承部からの荷重をコンクリートに伝達させる部分も含む．
固定部	固定部は，ヒンジ形式のゲートにおいて，一部コンクリート中に埋め込まれ，扉体の支承部からの荷重をコンクリートに伝達させる基礎材およびピン受け金物をいう．
開閉装置	開閉装置は，扉体を開閉するための装置をいう．

（b）ゲートの維持管理フロー

ゲートの維持管理は，他の鋼構造物の場合と同様に図‐2.26のようなフローに基づいて行われる．

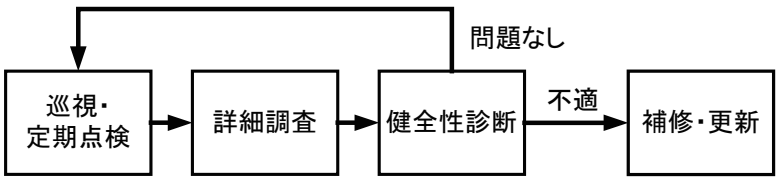


図2.2.5.26　水門扉の維持管理フロー

このうち，巡視は日常的に行われ，目視や状態監視を主体とした定期点検は半年～２年毎の間隔で実施される．詳細調査は，10年～数十年の間隔で実施され，水門扉の健全性診断を目的に，精密な計測機器を

用いて，板厚，ひずみ，変位，振動等を測定するものである．詳細調査の結果をもとに，健全性診断を行い，補修・更新の要否を判定する．なお，詳細調査は，定期点検で異常が発見された場合にも実施される．

（c）巡視・定期点検

1）点検種別

巡視・定期点検の頻度や内容は設備管理者によって異なるが，水門扉の維持管理に関わる指針や要領に記載されている点検種別は表 2.2.5.33～2.2.5.35 に示したようになっている．個別に点検種別の名称は異なるが，日常的に実施する巡視，定期的に実施する点検，および異常時に実施する点検に分類できる．

表 2.2.5.33　「鋼構造物の診断マニュアル（案）」に記載された点検種別

種別	頻度	内容
巡視	日常的に実施	設備の異常を早期に発見するもので，定期点検を補完し，臨時点検の要否を判定するために簡易に行う日常的な行為
定期点検	年１回	定められた期間ごとに，目視，操作確認等を行ない，異常の有無，調査の要否を判定するものである
臨時点検	適時	定期点検に準じて適時行うもの

表 2.2.5.34　「ゲート点検・整備要領（案）」に記載された点検種別

種別		頻度	内容
定期点検	月点検	原則月１回	目視による外観の異常の有無と前回点検時以降の変化の有無を確認する
	年点検	年１回 (洪水・出水期前に実施)	月点検より詳細な各部の点検および計測を実施する
	管理運転	定期点検時 (管理実態を勘案して実施時期を決定)	ゲートの全開・全閉操作，負荷状態での開閉動作の確認，予備動力系の動作確認，安全装置，保護装置の確認
臨時点検		当該設備あるいはその周辺で異常な事象が生じた場合	地震・出水・落雷，その他の要因により設備に異常が発生したおそれがある場合に設備全体に異常が無いかどうかを確認する．
総合点検		機器の更新時期や塗替塗装時	機器の機能を停止させるなどの通常より大がかりな体制・手段で詳細に行う点検

表 2.2.5.35　「機械整備管理指針」に記載された点検種別

種別		頻度	内容
日常点検	巡視点検	月１回以上	設備の状況を主に目視で，異常の有無や次回運転時の支障となる事象の確認を行う
	運転時点検	設備の運転時	設備の運転時に操作員が設備の状況を目視，聴診，触診，計器類のモニタ等により，異常の有無の確認や監視データを記録する
定期点検		設備重要度等により設定	日常点検では把握できない設備の構造的，老朽的，偶発的損傷の発見と防止および状態把握を目的として各部の計測，動作確認，調整を中心に行う
管理運転		定期点検時	特に待機系設備において設備全体の故障発見，機能維持および運転操作の習熟のために実施する
分解（詳細）点検		日常点検，定期点検の結果および運転時間を勘案して決定	当該設備，機器に経時変化が認められ，さらに詳細な点検を必要とする場合や通常の点検では実施しない機器内部状態の調査を目的に機器の分解等を伴って実施するもの

2）巡視点検項目

巡視では，目視を主体とした外観状態の点検が行われ，例えば，表 2.2.5.36 に示すような内容の点検が実施される．各点検項目ついて，事象の有無を点検する．

表 2.2.5.36　巡視点検における外観状態の点検項目の例

点検項目	対象部位					
	主桁	脚柱	スキンプレート	縦桁	補助部材	水密部
腐食状態	○	○	○	○	○	
漏水			○			○
たまり水	○	○				
塵芥	○	○				○
局所的変形	○	○	○	○	○	

この他，扉体全体の使用状態として片吊りの有無や異音・振動の有無も点検する．

3）定期点検項目

定期点検では，巡視より詳細な目視点検や計測による点検が実施される．定期点検での項目の例を表 2.2.5.37 に示す．またこれらの項目は表 2.2.5.38 に示すような方法で点検される．

表 2.2.5.37　定期点検項目の例

対象	点検項目
動作状況	振動，異常音，片吊り
主桁，脚柱	たわみ（弾性変形），変形（永久変形），腐食（塗膜劣化）
スキンプレート	変形，腐食（塗膜劣化）
補助部材	補助桁のたわみ・変形，整流板の変形
継手部	漏水，リベット・ボルトのゆるみ・脱落，溶接部の割れ
扉体・戸当り	相対位置関係

表 2.2.5.38　定期点検項目の点検方法

点検項目	点検方法
振動	目視
異常音	聴音（操作確認を含む）
片吊り	目視および計測（操作確認を含む）
たわみ・変形	目視および計測
腐食	目視および計測
塗膜劣化	目視（ランク付け）
継手部の漏水	目視
リベット・ボルトのゆるみ	目視およびテストハンマ
リベット・ボルトの脱落	目視
溶接部の割れ	目視
扉体と戸当りの相対位置関係	計測

このうち，塗膜劣化の目視によるランク付けは，発さび，ふくれ，亀裂，はく離のうち，必要と判断される項目で行われ，発生表面積や発生密度等で評価される．この場合，点検者による個人差をなくするように，標準図や標準写真と比較する方法がとられる．

なお，塗膜劣化のうち，変退色と白亜化については，防食上は問題なく，美観上の問題として考慮される．

（d）防食のための定期点検

月点検は毎月１回，年点検は毎年１回適切な時期に行う．

目視による塗膜の劣化程度の評価基準例を**表 2.2.5.39** 以下に示す．

表 2.2.5.39(a)　目視による塗膜の劣化程度の評価基準例（発さび）

劣化程度	発　　生　　状　　態
A	外観的には発錆が認められないか，あっても無視できる程度。 （さびの面積が０～0.05％で，標準写真のランク１に相当）
B	僅かに発錆が認められるが，発錆部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると判断される。 （さびの面積が0.05～0.5％で，標準写真のランク２に相当）
C	明らかに発錆している状態。 （さびの面積が0.5～５％で，標準写真のランク３に相当）
D	見掛け上はほぼ全面にわたって発錆している。 （さびの面積が５％以上で，標準写真のランク４および５に相当）

表 2.2.5.39(b)　目視による塗膜の劣化程度の評価基準例（ふくれ）

発生面積 / ふくれの大きさ	0～0.05％ （標準写真 ランク２以下）	0.05～0.5％ （標準写真 ランク３相当）	0.5～５％ （標準写真 ランク４相当）	５％以上 （標準写真 ランク５以上）
正常な矯正視覚でやっと見える程度以下。 （標準写真ランク２相当）	A	A	B	C
正常な矯正視覚で明瞭に見える。(0.5㎜未満) （標準写真ランク３相当）	A	B	C	D
0.5㎜～５㎜の範囲。 （標準写真ランク４相当）	B	C	C	D
５㎜を超える。 （標準写真ランク５相当）	C	D	D	D

表 2.2.5.39(c)　目視による塗膜の劣化程度の評価基準例（き裂）

劣化程度	発　生　状　態
A	外観的には亀裂が認められないか，あっても無視できる程度。 （発生面積が 0 ～0.05％で，標準図のランク 1 に相当）
B	僅かに亀裂が認められるが，亀裂が観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると判断される。 （発生面積が0.05～0.5％で，標準図のランク 2 相当）
C	明らかに亀裂が見られる。 （発生面積が0.5～10％で，標準図のランク 3 相当）
D	見掛け上ほぼ全面にわたって亀裂が発生している。 （発生面積が10％以上で，標準図のランク 4 ～ 5 相当）

表 2.2.5.39(d)　目視による塗膜の劣化程度の評価基準例（はく離）

劣化程度	発　生　状　態		
	外　観　状　態	大　き　さ	発生面積
A	外観的にははく離が認められないか，あっても無視できる程度。 （標準図ランク 1 相当）	1 ㎜未満	0.1％未満
B	僅かにはく離が認められるが，はく離が観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると判断される。 （標準図ランク 2 相当）	1 ～ 3 ㎜	0.1～0.3％
C	明らかにはく離が見られる状態。 （標準図ランク 3 ～ 4 相当）	10～30㎜	0.3～ 5 ％
D	見掛け上ほぼ全面にわたってはく離が発生している。 （標準図ランク 5 以上）	30㎜以上	5 ％以上

表 2.2.5.39(e)　目視による塗膜の劣化程度の評価基準例（変退色・白亜化）

劣化程度	発　生　状　態	
	変　退　色	白　亜　化
A	初期と比べてほとんど変化なし。	初期と比べて変化なし。 離脱粉末付着なし。
B	初期と比べて変色している。	初期と比べて僅かに白っぽくなっている。 離脱粉末僅かに付着。
C	初期と比べて著しく変色している。	初期と比べてかなり白っぽくなっている。 離脱粉末付着。
D	初期の色をほとんどとどめていない。	著しく白っぽくなっている。 離脱粉末付着大。

1）防食における精密調査

精密調査には，目視調査のほか，計測機器を用いて塗膜等の劣化程度を把握する調査も含まれる（**表** 2.2.5.40 参照）.

表 2.2.5.40　塗膜の劣化程度の評価基準例（計器測定）

点検項目	評価基準			
	A	B	C	D
脆化	0 ～ 0.3	0.3～0.5	0.5～1.0	1.0 以上
付着力	0 ～10%	10～30%	30～60%	60%以上

（注）(1) 脆化の数値は 1 kHz の場合の tanδ 値(抵抗値と静電容量値から決まる数値)である。
(2) 付着力の数値は，クロスカットテープテストのはく離パーセントである。

2）防食における整備

塗膜の補修及び塗装時期等の判定は以下の表によるものとするが，過去の点検・補修データを基に塗膜の劣化・欠陥等の進捗状況に考慮して決定するものとしている.

表 2.2.5.41　塗膜劣化補修および塗替時期等判定基準例

劣化程度	劣化の状態	対策	対策の内容
A	良好な塗膜状態。	必要なし	劣化の進行状態を継続して調査。
B	①表層のみが全般に劣化している。	必要により上塗り塗装	景観上特に必要がある場合は，上塗り塗装の塗替えを行う。
	②軽微であるが，局部的に下層まで劣化している。	部分塗装（局部塗装）	劣化の著しい部分について，下塗り塗装も含めて局部的な補修を行う。
C	①表層，中間層が全体的に劣化した部分がある。	部分塗装	劣化している部分について，中・上塗り塗装の塗替えを行う。
	②部分的に下層まで達する大きな欠陥がある。	部分塗装	早期に劣化部分の部分補修塗装を行い，近い将来に全面塗替を計画する。
D	全体に発錆あるいは他の塗膜欠陥が認められ非常に劣化している。	全面塗替	速やかに全面塗替塗装を行う。 また，放置すると塗替時期を失するので可能な限りDランクに移行するまでに塗替えを計画する。

（注）(1) 劣化程度の各ランクは，表8.2-1～表8.2-5および表8.4-1の評価基準例に基づいた各点検項目の評価値を総合的に判定したものである。
(2) 部分塗装は面的に全体の一部分を補修するものであるが，景観上特に必要がある場合は上塗り塗装もあわせて塗替えを検討する。
(3) 劣化程度が「C」であっても，常時接水または水没している堰や水門等のように，予備ゲートの設置や仮締切り工事等塗装を行うための準備作業が大掛かりになる場合は，これらの仮設費も含めて，長期的に見て部分塗装と全面塗替塗装のいずれの方式が経済的であるかを検討したうえで判断する。

（e）詳細調査

健全性評価の前提として行われるゲートの詳細調査は，次の３種類に大別される.

- 外観および使用状態の調査
- 板厚測定を中心とした調査
- 応力測定を中心とした調査

このうち，「外観および使用状態の調査」と「板厚測定を中心とした調査」は，詳細調査として実施されることが多いが，「応力測定を中心とした調査」は，費用がかかるため，実施される場合には，対象を限定することが多い.

また，上記の調査と並行して，塗膜の調査を行うこともあるが，ゲートの力学的な健全性を直接調査するものではないので，詳細については割愛する．

以下で，これらの調査の一般的な内容をまとめる．

１） 外観および使用状態の調査

外観および使用状態の調査は，定期的に行われている点検と調査項目が重複するが，詳細調査時点での状況を把握し，健全性評価の一部として参照するために実施される．本調査は，大きく外観状態の目視調査と使用状態の調査に分けられる．

a) 外観状態の調査

外観調査は，巡視の外観状態の点検に準じて行われる．

b) 使用状態の調査

使用状態の調査は，下記のような項目で実施される．使用状態は，ゲートの操作状態，周辺の環境状態，維持管理状態に大別される．ゲートの操作状態，および周辺の環境状態は，現地担当者が判断するものである．

- 動作状態（振動，片吊り）
- 水質
- 流（堆）砂量
- 環境関係（鉄砲水の影響，下流域への影響）
- 管理者の心理，信頼度
- 過去のトラブル
- 長期計画等

２） 板厚測定を中心とした調査

板厚測定を中心とした調査は，経年変化を定量的に把握するための必要最低限の調査である．板厚測定は，腐食・摩耗実態を測定し，その進行速度やゲート全体の健全性を解析的に確認するためのもので，構造力学的な診断結果を得ることができる．ただし，板厚計測結果を用いた解析的な健全性の確認には，使用されている鋼材の機械的性質（物性値）が必要である．

a) 板厚測定

板厚測定では，以下に示す箇所の板厚を測定し，平均値，最大値，最小値を求め，平均腐食量や最大腐食量等を算出することが多い．

- 主桁：各主桁３箇所以上
- 脚柱：各脚柱１箇所以上
- スキンプレート：９箇所以上

また，元厚が不明な際は，設計板厚を確認するために補足的な計測を行うこともある．

板厚計測には，１箇所5～25点で測定が行われることが多い．測定には，超音波板厚計が使用されることが一般的である．ラジアルゲートとローラゲートの標準的な測定箇所を**図** 2.2.5.27 に示す．

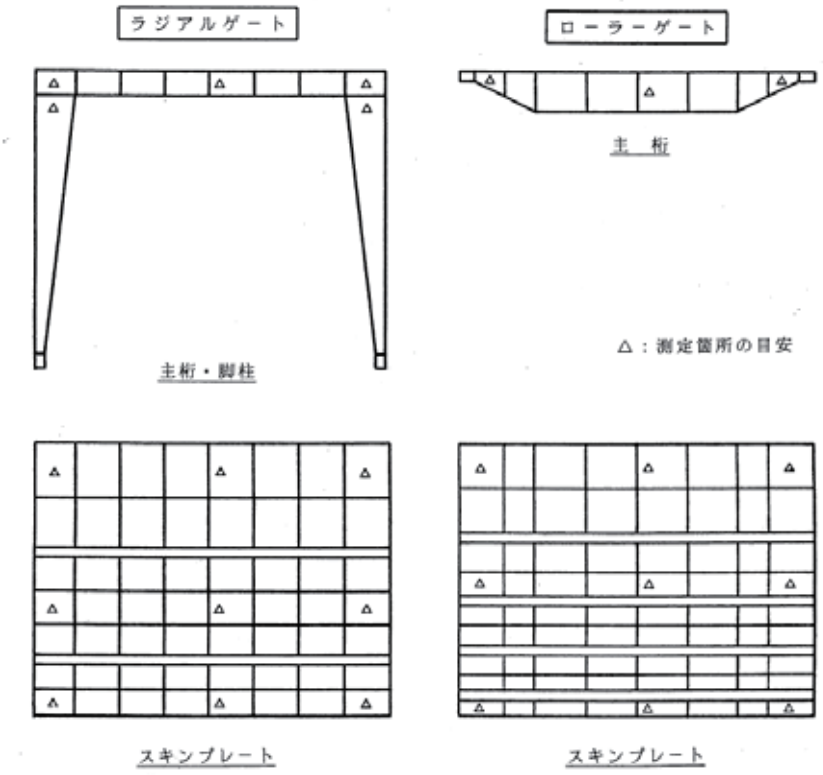


図 2.2.5.27　標準的な板厚測定箇所の配置（鋼構造物の診断マニュアル（案）より引用）

曲げ部材（主桁）では，フランジの腐食が，軸力部材（脚柱）ではウェブおよびフランジ両者の腐食が，耐力低下に影響するため，測定箇所の選定にあたっては留意する必要がある．

「水門鉄管技術基準　水門扉編」では，経年による腐食や摩耗を考慮して，設計板厚に**表** 2.2.5.42 の余裕厚を加えることが規定されている．維持管理においては，通常，この余裕厚も含んだ板厚を評価する．

表 2.2.5.42　水門鉄管技術基準　水門扉編に規定されている余裕厚（単位 mm）

接水条件 / 水質条件	常時接水している		常時接水していない	
	片面接水	両面接水	片面接水	両面接水
淡水	1.0	2.0	0.5	1.0
海水	1.5	3.0	1.0	2.0

b)解析的な健全性の確認

板厚測定結果および使用鋼材の機械的性質を用いて，解析的な健全性の確認を行う．ゲートの構造解析には，設計時に用いられる梁・柱理論による２次元モデルによって部材単位で行われることが多い．

解析に用いられる板厚は，平均板厚が多いが，解析結果の位置付けにより平均板厚以外を使用する場合もある．使用鋼材の機械的性質が不明な場合は，試験等により機械的性質を特定する．

３）応力測定を中心とした調査

応力測定を中心とした調査は，ゲートの力学的挙動を把握するために実施されるもので，経年したゲートの詳細な力学的挙動を把握したい場合や，板厚測定を中心とした調査結果からより詳細な力学的挙動を

把握する必要があると判断された場合等に実施される．

本調査では，以下のような調査が行われる．

- 静応力測定　　：ゲート全閉時の静水圧負荷状態での応力測定
- 変位測定　　：ゲート全閉時の静水圧負荷状態でのたわみ測定
- 動応力測定　　：ゲート操作時または放流時の応力測定
- 振動測定　　：ゲート操作時または放流時の振動測定

a)静応力測定

ゲートに静水圧を負荷して，一般的に以下に示す箇所のひずみを測定し，ゲート全体の応力状態を把握する．

- 主桁：各主桁３断面以上
- 脚柱：各脚柱１断面以上
- スキンプレート：上下各１パネル程度
- 補助部材：上下各１箇所程度

ラジアルゲートとローラゲートの標準的な測定箇所を**図** 2.2.5.28 に示す．主桁，脚柱とも，曲げ応力分布が把握できるように，ゲートの形状に即してひずみ測定位置に留意する必要がある．なお，スキンプレートと補助部材は，外観および使用状態の調査や板厚測定を中心とした調査から，特に必要と判断された場合に実施する．　静応力測定は，水位下降時または水位上昇時に実施する．測定時の最大水位は，測定結果を設計水位相当に補正する上で重要であり，扉高の 80%程度以上を目安とする．

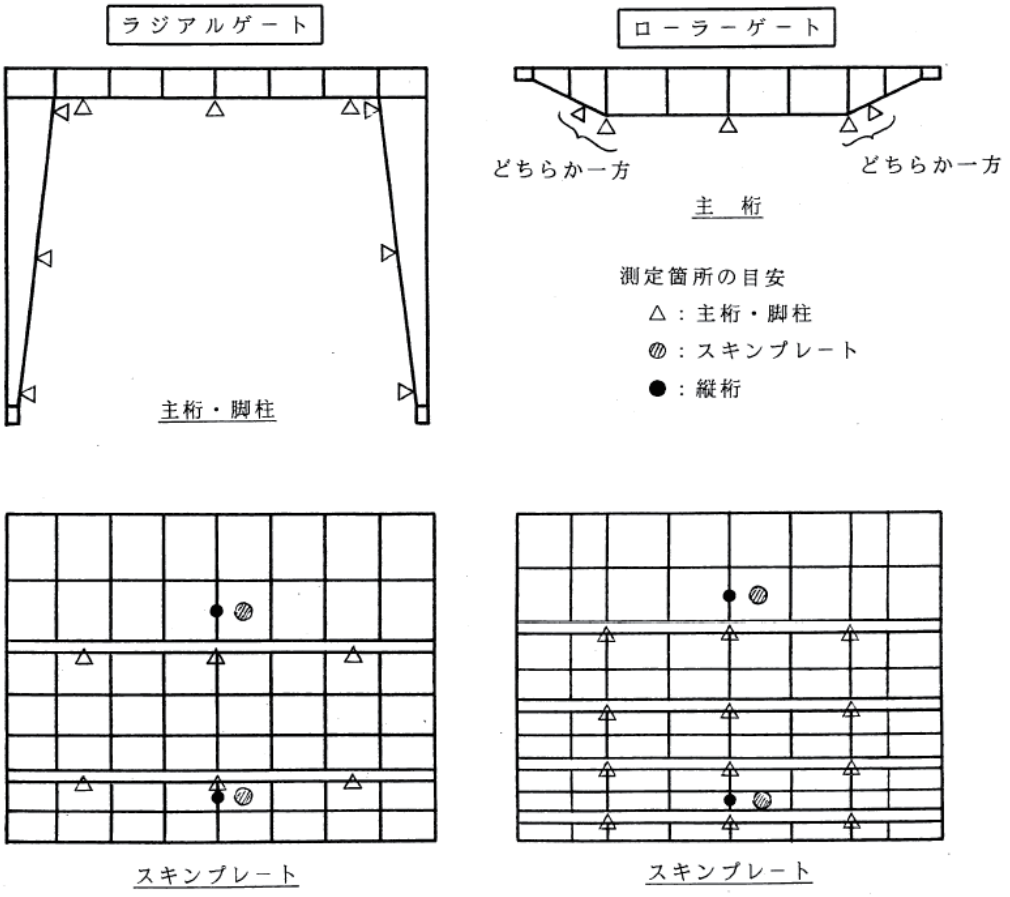


図 2.2.5.28　標準的な応力測定箇所の配置（鋼構造物の診断マニュアル（案）より引用）

b)変位測定

変位測定は,ゲートに静水圧が作用した場合に,主に主桁の曲げによる弾性変形を測定するものである．主桁の弾性変形が大きい場合には，ゲートの剛性が不足していることが考えられ，これにより水密性の低下，動的安定性の低下，および円滑な開閉動作が行えないことが生じる可能性がある．よって，静水圧による弾性変形が規定値以下であることを確認する．

「水門鉄管技術基準　水門扉編」では，例えばゴムで水密を行う水門扉については，径間の 1/800 が設計時の許容たわみ度として規定されている．

c)動応力測定

動応力測定は,ゲートの開閉操作時の過渡的な応力や,ゲートの振動による応力を測定するものである．これらの応力は，静応力が大きい箇所に生じやすく，該当する主桁中央，主桁と脚柱の取り付け部，脚柱の支承部付近等を測定するのが有効である．測定は，ゲート全閉かつ最高水位の状態から，ゲートを順次開いていく過程で実施される．

d)振動測定

振動測定は，動応力測定と同時に行われることが多く，ゲート操作時の過渡的な振動，および各ゲート開度での定常的な振動を測定する．

（ｆ）健全度評価

水門鉄管技術基準には，水門扉に求められる基本条件として下記のものが挙げられている．

- 確実に開閉ができること
- 考慮すべき荷重に対して安全であること
- 適切な水密性と耐久性を有すること
- 有害な振動を生じないこと
- 操作が確実で，保守が容易なこと

したがって，水門扉の健全性評価は，詳細調査の結果から，当該水門扉が上記の基本条件を満足していることを評価することに他ならない．基本条件を満足しているかどうかの判断は，設計時に考慮した応力条件や変位条件を基準とすることが基本である．

基本条件を満足しているかの判断は，詳細調査によって得られた下記のデータをもとに，基準値と比較することによって行われる．

- 外観調査結果
- 使用状態の調査結果
- 板厚（板厚計測による実測値）
- 静応力（板厚計測結果による解析値，静応力測定による実測値）
- たわみ（外観調査による簡易計測結果，変位計測結果）
- 振動（放流時の実測値）
- 動応力（放流時の実測値）

塗装等の防食に対する健全度評価については，（ｄ）で述べたとおりであるが，種々の損傷に対する健全度評価は，以下のようにして実施される．

点検結果総括表を作成し，不良・不具合に対する処置として処理ランク（緊急度→健全度）を記入する．処置の緊急度に関するランク付けは，次のとおりであり，ゲートの部品，部材，設備製品等に対して処置の緊急度を評価・判定する（**表** 2.2.5.43 参照）．

表 2.2.5.43　損傷度に対する評価・判定

評価	評　価　内　容	判定	判　定　内　容
A	・現在支障が生じており，緊急に対策を講じないと，ゲート等の安全性，機能が確保できないもの，および日常管理業務に支障があるもの.	1 2	更新が必要である. 整備が必要である.
B	・現状では支障は生じていないが，早急に対策を講じないと，年内の内にゲート等の安全性や機能に支障が生じる恐れがあるもの，および日常管理業務に支障が生じる恐れがあるもの.	1 2 3 4 5	調整が必要である. 給油が必要である. 塗装が必要である. 場合によっては更新が必要である. 場合によっては整備が必要である.
C	・現状では支障は生じていないが，このまま放置すると，将来，ゲート等の安全性や機能および日常管理業務に直接または間接的に影響を及ぼすと思われるもの.	1 2	整備が望ましい. 清掃することが望ましい.

ここに，A，B，Cは以下の意味をもつ.

A：早急な処置の実施を検討する.

B：なるべく早い処置（2，3年以内）の実施を検討する.

C：状況の推移を観察して処置の実施を検討する.

以上の判定・評価の手順は，個々の緊急度の結果を受けて総合的に評価する（換言すれば，部材評価から構造物評価を行う）ことを示しているが，重要度・優先度等の指標が示されていないため，総合的な評価を行う場合，注意を要する.

なお，複数の詳細調査結果がある場合には，経年と腐食劣化の関係から，今後の腐食劣化による板厚の減少等を予測し，余寿命計算を行うことも可能である．余寿命計算結果は，長期的な補修・取替計画の参考とされる.

経年した既存ゲートでは，設計基準が変更されてきたり，使用条件（荷重条件）が変化したりすることも考えられるため，各ゲートの状況に即した健全性診断が求められる．また，各設備管理者（電気事業者）によっても，健全性評価の基準は異なっている.

（g）水門扉の健全性診断に関する動向

現状の水門扉は，一般的に許容応力度法に基づいて設計され，維持管理が行われているが，今後，性能照査型設計法の導入も進められていくと考えられる．水門扉の維持管理においても，当該ゲートの状態を適正に判断し，合理的な維持管理を行うためには，性能照査の考え方は有効であると考えられる.

また，ダム洪水吐ゲートを対象として，維持管理におけるリスク評価やライフサイクルコスト評価も試みられており，従来からの力学的な健全性評価とあわせて，より合理的かつ信頼性の高い維持管理に活用されると期待される.

（５）鋼構造物の健全度評価（まとめ）

本項では，鋼構造物として（１）鋼道路橋，（２）鋼鉄道橋，（３）港湾鋼構造物，（４）水門扉を対象に，その健全度評価の概要を述べるとともに，評価の仕方について詳述した．その内容を要約すると，（１）～（４）の何れの鋼構造物でも，その健全度を評価する際，部材レベルの健全度と構造物（全体系）レベルの健全度は区別され，レイティング等の手法を用いて，前者から後者を推定する方法が採られていることを示した．この結果から，将来的には，鋼構造物として，健全度評価の方法を体系化することが可能となるのでは，と期待されるが，ここでは，以下に，その違いを明記し，体系化・統一化のための参考資料としたい．また，腐食損傷による残存耐荷性能の低下を反映した鋼構造物の健全度評価の在り方について２，３の提案を行いたい．

（ａ）健全度評価の比較

（１）鋼道路橋では，防食機能（塗膜など）の劣化と腐食の判定は区別されているが，部材評価及び構造物評価何れも５段階で評価され，事例として紹介されている国土交通省，東京都，横浜市の何れもケースでも，部材評価から構造物評価に至る過程にはレイティングの処理が施され，構造物全体系の健全度評価（健全性の判定）が行われている．

（２）鋼鉄道橋では，健全度評価は①損傷度，②健全性，③使用性に対して判断され，①の事例は，（１）鋼道路橋の健全度評価と基本的には類似したものとなっているが，②と③が（１）では検討されていない点が大きな違いである．また，②は（３）港湾鋼構造物や（４）水門扉でも検討される耐力・耐久性に係わる項目であり，③は鋼鉄道橋のみに関連する総攻勢・機能性に関する項目である．以上のように，（２）では，①～③を総合的に勘案して判定される．

（３）港湾鋼構造物では，防食工により維持管理の方法が異なり，また，健全度評価についても，電気防食による事例と塗覆装による事例では異なるが，ここでは，塗覆装についてのみ整理すると，劣化度が４段階で評価され，また，部分が構造物全体と対応するという解釈により健全度も４段階で評価される．さらに，鋼材の腐食に伴う耐力の低下を判断するために，残存板厚が測定に基づき換算され，耐力が評価されると同時に耐久性も判定される．

（４）水門扉の取扱いは，基本的には，（３）と同様であるが，水門扉が具備すべき基本条件を満足しているか否かで判定され，外観，使用状態，残存板厚，静応力，たわみ，振動及び動応力等がその基本条件となり，それらの損傷度に対する判定から３段階に分類される．ここで，塗装等の防食に対する健全度評価は，（３）と同様に４段階で評価される．また，残存板厚による耐力の算定が行われ，照査・判定される．損傷度に対する３段階の評価・判定が，水門扉特有の事例と言うことができる．

（ｂ）残存耐荷性能に基づく健全度評価の提案

鋼構造物の健全度は，それらを管理する人，利用する人にとって安全上重要な事項であり管理者として定量的な判断とすることが必要なため，鋼構造物全体や部材別の耐荷性能や耐久性などから工学的に判断すべきである．ところが，これまでの多くの事例や現況を調べると，まだまだこのような手法によって各種鋼構造物の健全度評価を行っている組織はなく，目視外観調査や非破壊試験などによって経験工学的に健全度を判断している場合がほとんどである．

本資料の発刊にあたって，現状における健全度評価について詳細に記述したが，加えて，防食機能（塗装，耐候性鋼，亜鉛めっき，金属溶射など）の物理的な性能評価，腐食程度の計測方法や判定法などについて新たな知見によって一定の方向づけを行っている．また，既存鋼構造物鋼構造物に関する防食機能の劣化，腐食，断面欠損，腐食に伴う亀裂，変形などを調査・分析し，それらを基本とした部材の耐荷力評価，構造物全体の耐荷力評価，補修・補強された部材に関する耐力及び詳細解析の手法と評価について述

べている.

いずれも，今後の鋼構造物の健全度評価を方向付ける重要な課題であり，本資料で提案された腐食計測技術や残存耐荷性能評価などを正しく理解し、実務に反映させることでより高度な健全度評価につながる結果となることから，より前向きに取り組むことを期待する.

【参考文献】

1) (財)海洋架橋・橋梁調査会：道路橋マネジメントの手引き＜橋梁定期点検要領(案)，国土交通省道路局国道・防災課＞，2004.
2) (財)道路保全技術センター：橋梁点検・補修の手引き［近畿地方整備局版］，2001.
3) 玉越隆史，大橋章，中谷昌一：道路橋の定期点検に関する参考資料－橋梁損傷事例写真集－，国土技術政策総合研究所資料 No. 196，2004.
4) 建設省土木研究所・構造橋梁部橋梁研究室，(社)日本橋梁建設協会：橋梁部材の腐食に対する健全度評価手法に関する共同研究報告書－腐食橋梁部材の耐荷力実験－，建設省土木研究所共同研究報告書，No. 149，1996.
5) 土木学会・鋼構造委員会・鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，丸善，1996.
6) (社)日本橋梁建設協会：鋼橋の損傷と点検・診断（点検・診断に関する調査報告書)，No. 83，2002.
7) 横浜市橋梁長期保全更新計画検討委員会：「よこはまの橋」長寿命化へ向けての実践～「横浜市橋梁長期保全更新計画 検討委員会」取りまとめ結果報告～
8) みらい社会環境フォーラム：21 世紀の社会資本マネジメント，
9) (財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.
10) (財)岐阜県建設研究センター：平成 17 年度「社会基盤施設の効率的な維持管理手法の検討」報告書，2006.
11) (財)エンジニアリング振興協会：産業基盤・社会基盤の維持管理高度化に関する調査研究報告書，ENAA2003－技 1，2004.
12) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版)，1997.
13) 運輸省港湾技術研究所編：港湾構造物の維持・補修マニュアル，(財)沿岸開発技術研究センター，沿岸開発技術ライブラリーNo. 6，1999.
14) (財)東京湾埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，2004.
15) (財)東京湾埠頭公社：桟橋劣化調査・補修マニュアル，2004.
16) 通商産業省資源エネルギー庁：鋼構造物の診断マニュアル（案)，2003.
17) (社)ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)（基準解説編・マニュアル編)，2004.
18) (社)ダム・堰施設技術協会：ゲート点検・整備要領(案)，2005.
19) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準・水門扉編－付解説－，2000.
20) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準・水門扉検査要領，2003.
21) 水資源機構：機械設備管理指針，2003.
22) 電気事業連合会：ダム管理調査要領，1987.
23) 「電力土木施設のライフタイムサポート技術の高度化」に関する共同研究グループ：ダム洪水吐ゲート扉体の性能照査型維持管理マニュアルの策定，水門鉄管，No. 227，pp. 3-8，2006.
24) 齋藤潔，朱牟田善治，山本広祐，近江英俊，和泉満：ダム洪水吐ゲートを対象とした定性的リスク評

価手法の構築，電力中央研究所報告，研究報告 N05038，2006.
25) 中島正人，山本広祐 : 経年化したダム洪水吐ゲートの構造信頼性評価方法の提案，電力中央研究所報告，研究報告 N05002，2006.
26) 朱牟田善治，齋藤潔，上村宏孝，安井正茂，柴田政則 : 水力土木構造物の保全履歴分析法の提案－ダム洪水吐ゲートの不具合発生確率評価－，電力中央研究所報告，研究報告 N05018，2006.

2.2.6 補修の優先度

補修の優先度を決定する方法については，国土交通省で運用が進められている後述のPONTISで導入されたBridge Health Index（BHI：橋梁健全度指数）を用いた方法を以下に詳述するが，関連する概念，考え方を踏まえて説明する．

(1) FHWAのアセットマネジメント

米国では，1980年代以降，ストックメンテナンスの観点から新しい管理手法である「アセットマネジメント」がいち早く導入され，マネジメントの高度化を実現するためのツールとなる各種のシステム（その一つがPONTISであるが）の開発が進められ，実用化されている．その中心となって活動した組織が米国連邦道路庁（FHWA）であり，FHWAでは，アセットマネジメントを「物理的な資産を費用効率的に維持管理，改修及び運用するための体系的なプロセスであり，工学的な原理と最善の実践手法及び経済学の理論（ミクロマネジメント，マクロマネジメント）を組み合わせたもので，意志決定のための体系的・理論的なアプローチを容易にする道具を提供するものである．したがって，それにより，短期的・長期的な計画の両方を取り扱う枠組みが提供される．」と定義している．

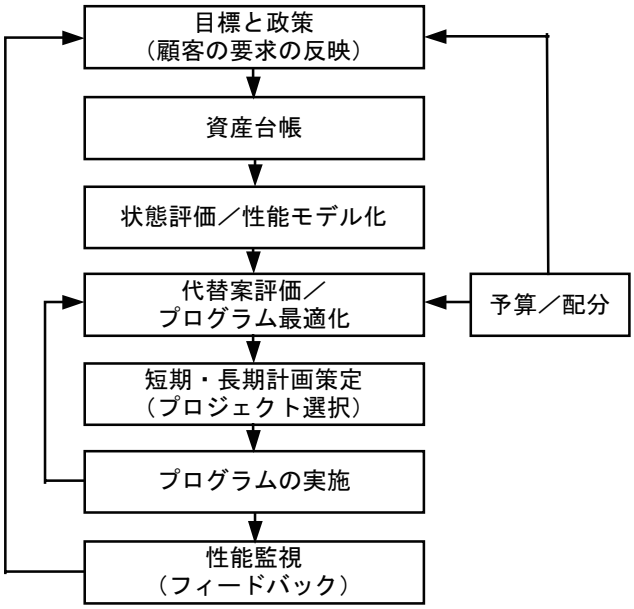


図2.2.6.1 FHWAにおけるアセットマネジメントの枠組み

FHWAにおけるアセットマネジメントの手引きでは，システムの構成要素として**図2.2.6.1**の枠組みが示されており，PDCA（計画立案，実施，監視，フィードバックによる再評価・改良）サイクルによるプロセスが明示されている．ここで，アセットマネジメントにおける資産価値の評価は，収得原価価額を基本とし，資産の減耗を認識する手法の考え方としては，減価償却法を基本としている．

(2) PONTIS

BMS（Bridge Management System：橋梁維持管理システム）は，橋梁の点検データや費用データを収集し，将来の状態を予測することにより，最適な補修や架け替えなどの維持管理の戦略を立てるとともに，補修工事等の事業の優先順位付けを行うシステムであり，1991年にFHWAにより開発され，機能の改良等が加えられてきたシステムがPONTISである．

PONTISは，長期的に費用を最小化する補修工法を選定するとともに，予算制約下で費用対効果の高い対

策を選定するものである．その作業フローを図2.2.6.2に示す．ここで，構造部材毎に損傷・劣化の状態（健全性）を点検データにより５段階で評価する．点検データは，NBI（National Bridge Inventory：全国橋梁台帳）に記録されたデータが使用される．また，構造部材毎の劣化予測モデルを用いて，将来の状態を予測し，補修工法の有効性を確認する．さらに，部材の状態に対して適用される補修工法の費用モデルから補修費用が設定される．以上の作業に基づき，長期の補修費用を最小化するように，維持管理計画の最適化が行われる．また，予算制約の下で，機能改良を含めて最も費用対効果の高い対策を計画立案するためのシミュレーションが実施される．

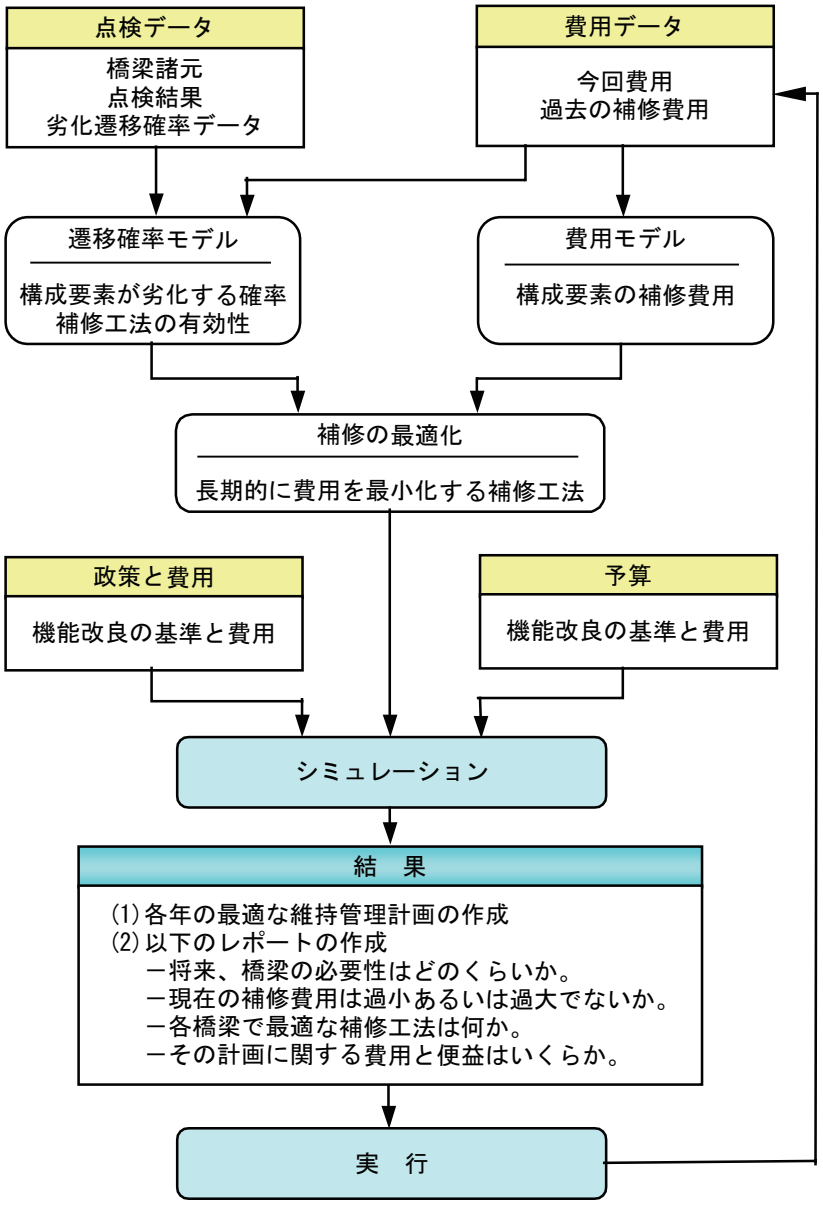


図2.2.6.2　PONTISの作業フロー

(3)　国土交通省の橋梁維持管理システム（BMS）

BMSの役割は，橋梁の維持管理における点検，評価，補修の三つの作業の内で，評価と補修計画の一部をコンピュータ化して効率的・合理的に作業が行えるように支援するものである．国土交通省により開発

されたBMSは，**図2.2.6.3**に示すように，「健全度評価モジュール」と「補修計画作成モジュール」より構成され，国土交通省所有のデータベース（DB）の点検データから健全度評価モジュールを通じて橋梁毎の評価が行われ，その結果を利用して補修計画作成モジュールを通じて管理する橋梁群の補修計画が立案され，橋梁の維持管理に役立てられる．

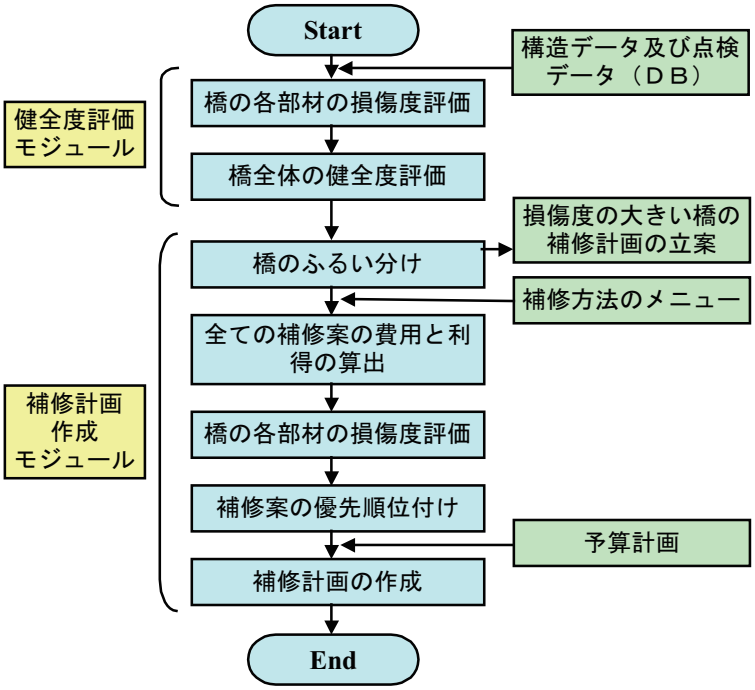


図2.2.6.3　橋梁維持管理システム（BMS）のフロー

(a)　健全度評価モジュールの概要

上記のBMSでは，物理的劣化を対象とし，機能劣化は考慮せず，DBに蓄積されている定期点検時における各部材の損傷パターンと損傷程度の調査結果を用いて，健全度が評価される．その評価方法は，全く損傷のない状態を100点満点とし，その部材の損傷度から求めた減点数を満点から引いた値を健全度する方法が採用されている．ここで，部材の損傷度から減点数を決定する方法は，損傷度に対して減点数を与えることとし，損傷の種類に関係なく，損傷度Ⅱ，Ⅲ，Ⅳのそれぞれに対する減点数を18，12，6としている．

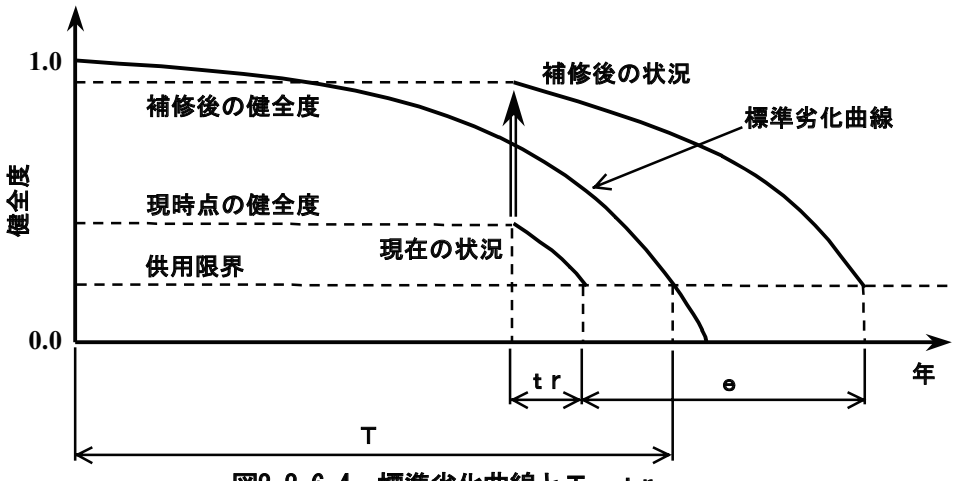


図2.2.6.4　標準劣化曲線とT，tr，e

(b) 補修計画作成モジュールの概要

補修の優先度は，補修によりどれだけのメリットがあるかという補修効率から判断される．この補修効率を算出する方法として，補修により，1)健全度がどの程度回復するかという回復度を使用する方法と，2)どれだけ現在価値が生じるかということを利用する方法，の２通りの方法が挙げられる．

回復度は，１つの橋梁について複数の補修案を検討し，各案による損傷の回復度より補修効率を定義しようとするものである．具体的な補修効率は，**図2.2.6.4**に示す現在の状況と補修後の状況における劣化曲線に囲まれる面積（供用限界上）により定義される．この面積に建設費を掛けたものが補修利得であり，これを補修費で割ったものが補修効率を与える．

次に，現在価値による方法は，管理者利得として補修により将来の支出の減額分を考えるものである．橋梁は，補修を実施しなければ，劣化・損傷して寿命を迎え，架け替えることになる．しかし，現時点で補修が実施されると，寿命が延び，架け替えまでの時間が長くなる．これにより，橋梁に投資される費用の現在価値が，補修なしの架け替えと比較し，低下する．ここで，現在価値は現在と将来に掛かる全ての費用を効率等について考慮して現在の価値に変換したものであり，この低下した分の現在価値を管理者利得とし，これを補修費で割ったものが補修効率である．

以上の２つの方法の中で，国土交通省では，補修の優先度を決定付ける方法として，現在価値による方法を採用した．その理由は，この方法が橋梁に係わる費用支出の全てを求め，それを現在価値に変換して比較するものであり，補修時期を含めて最適化が可能であること，複数の橋梁を対象とした最適化にも有効であること，最適化のアルゴリズムが比較的容易であることが挙げられる．

補修計画作成モジュールでは，健全度評価モジュールの出力を受け，対象とする損傷部材の代表的な補修方法を選定し，補修費を算出する．一方，補修に伴い減額される将来の補修費をこの補修の利得と考え，補修費及び利得を勘案することにより，補修の優先順位を決定する．この結果から，その年次における補修計画が立案される．以下に，その作成方法を要約する．

①それぞれの補修案の補修費と利得を算出する．ここで，利得Ｂは次式で計算される．

$$B = C_0 - C_1$$

ここに，C_0は今回補修をしないでｔr年（余寿命）後に架け替えを行い，その後Ｔ年（標準寿命；ライフスパン）毎に架け替えを繰り返す場合に掛かる全費用の現在価値である．C_1は今回補修を行い，その結果，ｅ（補修による延命基幹）年延命し，現時点からｔr＋ｅ年後に架け替えを行い，その後Ｔ年毎に架け替えていく場合に掛かる全費用の現在価値である．また，C_0とC_1は次式で与えられる．

$$C_0 = A\left[\frac{(1+i_e)^T}{(1+i_e)^T-1}\right]\left[\frac{1}{(1+i_e)^{tr}}\right]$$

$$C_1 = A\left[\frac{(1+i_e)^T}{(1+i_e)^T-1}\right]\left[\frac{1}{(1+i_e)^{tr+1}}\right]$$

ここで，Ａは１回当たりの架け替え費用でインフレーションは考慮されていない．i_eは物価上昇率（inf）を考慮した利率であり，次式で与えられる．なお，ｉは通常の利率である．

$$i_e = \frac{1+i}{1+inf} - 1$$

②同様に，それぞれの橋梁の全ての補修案に対して補修費と利益を計算する．

③**図2.2.6.5**に示すように，それぞれの橋梁毎に横軸に補修費Ｃ，縦軸に利得Ｂを設け，全ての補修

案を補修費の小さい順にプロットする．次に，プロット間を線で結び(a)，凹となる補修案を対象から除外(b)する．全ての橋梁毎にこの図を作成し，各補修案毎に限界効率（ΔB/ΔC）を計算する．そして，ΔB/ΔCの大きい順に，予算の制約の範囲まで，補修案を選択する．その結果，最も効率のよい補修計画が選定される．ここで，ΔB/ΔCは，補修効率のいい順に並んだ①，②，③ｎ１つ前の補修を行った時点で，次の補修を行うときの効率を与える．

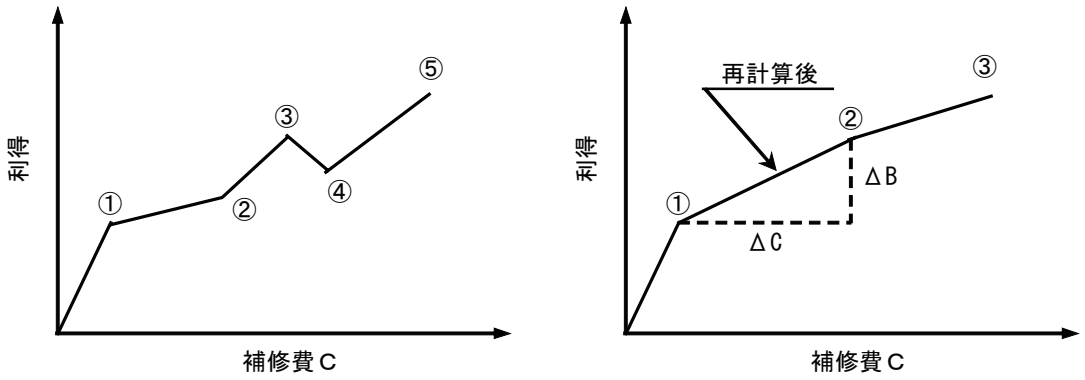


図2.2.6.5　補修案の優先順位の決定方法

橋梁の補修計画を作成・立案するに当たり，補修計画作成時点における健全度だけではなく，将来の健全度の低下．補修費用，架け替え費用などを勘案して，予算の制限内で最も効率的な補修計画を作成することが重要である．

(4)　BHIを用いた橋梁維持管理システム（BMS）

(独)北海道開発土木研究所と北見工業大学では，共同研究でBMSの開発を進めてきているが，このBMSが国土交通省のBMSとして採用されている．同システムは，PONTISのBMSを意識した構成となっており，橋梁の健全度評価にはBHIが活用されている．以下にその概要を述べる．

橋梁を効率的に管理するためには，対象となる橋梁の的確な現状評価が重要であり，国土交通省のBMS（以下，同BMSと呼ぶことにする）では，部材の損傷度の評価（EHI）と，それを元にした橋梁及び橋梁群の健全度（BHI）を用いた検討を行っている．表2.2.6.1に健全度評価の事例を示す．

表2.2.6.1　健全度評価例

損傷ランク	ＯＫ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	部材健全度	全数量	単位	部材単価	建設費	現在価値
重みWf	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	EHI(A)	(B)		(C)	(D)=(B×C)	(D×A/100)
床　版	75.0	0.0	0.0	16.7	8.3	79.2	330	m2	50	16,500	13,064
主　桁	0.0	66.7	8.3	25.0	0.0	60.4	60	t	500	30,000	18,128
舗　装	0.0	50.0	50.0	0.0	0.0	62.5	300	m2	4	1,200	750
伸縮装置	0.0	0.0	50.0	50.0	0.0	37.5	20	m	50	1,000	375
排水装置	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	10	m	20	200	200
支　承	0.0	50.0	50.0	0.0	0.0	62.5	8	個	1000	8,000	5,000
防護柵	0.0	80.0	20.0	0.0	0.0	70.0	60	m	30	1,800	1,260
橋　台	0.0	50.0	50.0	0.0	0.0	62.5	700	m3	60	42,000	26,250
橋　脚	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	m3	60	0	0
合　計										100,700	65,026

ここに，部材の損傷度を表すEHIは，個々の部材における補修の必要性を判断するものであり，部材のランク毎に決められた減少率Wfを用いて以下のように表している．

部材の損傷度の評価は，昭和63年度に出された点検要領案のランク評価を基準とし，平成16年度の新しい橋梁点検要領案を参考に，点検結果の評価の見直し等の検討が進められている．EHIは，

$$EHI=\sum_{i=OK}^{I}(\text{損傷ランクiの数量}\times Wf_i)$$

により与えられる．ここで，ｉはOK～Ｉ（昭和63年度点検要領案による損傷ランク）である．

一方，橋梁の健全度については，本来，耐荷性能などの評価値も考慮することが望まれるが，現状では，時系列的に蓄積され，劣化の評価に使用できるデータが点検結果のみであることから，個々の橋梁の健全度評価には，BHI（Bridge Health Index：橋梁健全度指数，社会資本としての資産価値を表す指標）が用いられている．

$$BHI=CEV/TEV$$

ここで，CEVは現有資産価値（＝部材健全度×部材数量×部材単価の総和）を表し，TEVは総資産価値（＝部材数量×部材単価の総和）を表している．

BHIの算出において，１次部材が２次部材よりも重要性が高いことに着目した場合，部材の重み係数が必要となる．橋梁では，部材の重み係数を設定することは容易でないが，部材の重要度と建設費には高い相関があると考え，部材の再調達価格を重み係数として同BMSでは取り扱っている．なお，個々の部材の再調達価格を重み係数として用いることにより，橋梁の規模を考慮した路線，地域などの橋梁群の健全度を算出することが可能となる．

$$BHI=\Sigma CEV/\Sigma TEV$$

ここに，ΣCEVは対象とする橋梁群の現在価値の総和（＝建設費×個々の橋の健全度BHI），ΣTEVは対象とする橋梁群の再調達価格の総和を表す．**表2.2.6.1**の事例では，

$$\text{健全度}=\frac{\Sigma CEV}{\Sigma TEV}=\frac{65,026}{100,700}=64.6\ (\%)$$

となる．

同BMSでは，以上の健全度評価手法と，マルコフの遷移確率理論に基づく劣化予想手法を用いて，事業シミュレーションが実施できるようになっている．例えば，限られた予算条件の下で，路線のBHIを平滑化するという目的を与えた場合，同BMSは，どの橋梁にいくらの予算を配分して補修すべきか，という最適解をシステムが導出し，事業の優先順位付けを与える（事例については省略する）．

(5)　残存耐荷性能を考慮した補修の優先順位付け

残存耐荷性能についてであるが，定量的でかつ論理的な明確な見解がないので，今後，残存耐荷性能の定義，残存耐荷性能測定結果や関係資料などが収集された時点で再検討する．

【参考文献】

1)　(社)土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，2005.

2)　土木学会中部支部：土木構造物のアセットマネジメント－維持管理時代の到来に向けて－，平成17年度第2回技術講習会，2005.

3)　建設省土木研究所・構造橋梁部橋梁研究室：橋梁マネージメントシステムの開発に関する調査研究報告書，土木研究所資料，No.3633，1999.

4)　大島俊之，三上修一，山崎智之，丹波郁恵：橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響因子の解析，土木学会論文集，No.675／Ｉ，pp.201-217，2001.

5)　大島俊之，三上修一，丹波郁恵，佐々木聡，池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の

解析，土木学会論文集，No. 703／Ⅰ，pp. 53−65，2002.
6） 渡邊一悟，石川博之，佐藤京：ＢＭＳの構築と運用における課題，北海道開発土木研究所月報，No. 625，pp. 35−39，2005.
7） 池田憲二，大島俊之，佐藤京，渡邊一悟：北海道における Bridge Management System（ＢＭＳ）の現状と今後，土木学会第 58 回年次学術講演会，Ⅰ−446，pp. 891−892，2003.

2.2.7　補修要領（腐食劣化に対する補修方法）

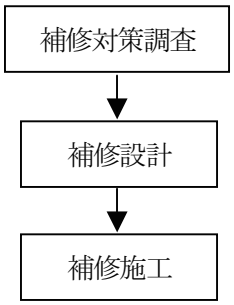
(1)　鋼構造物補修の目的と補修フロー

健全度の評価の結果，防食工あるいは鋼構造物が所定の健全度を有しないと判定されたばあいには，適切な補修を行うことが必要になってくる．補修にあたっては，それぞれの構造物の機能及び管理者の維持・管理規定に従い，実行することが求められるが，ここでは写真 2.2.7.1 に示すような腐食劣化した部材を持つ港湾鋼構造物と鋼橋構造物の腐食劣化部分の補修について述べる．



写真 2.2.7.1　港湾構造物における劣化した部材

港湾鋼構造物については，（財）沿岸開発技術センターの「港湾鋼構造物の防食・補修マニュアル」，また鋼橋については、(財) 道路保全技術センターの「橋梁点検トレーニングマニュアル(案)」日本橋梁建設境界の「鋼橋の補修・補強事例集」等が参考となる．
以下に補修フローを示す．



補修には，劣化速度を低減させるものや，補強を伴うものがあり，その目的に応じて適切なものを採用する．鋼構造物の補修では，所要の機能を回復するとともに，将来の防食機能を満足するような補修設計を行い，施工する．場合によっては，補強等によって機能向上を図ることも検討する．

(2)　補修対策工法の例

補修対策工法には，構造部材の劣化部分を直接補修する方法と，既存の構造系に新たな部材を追加することにより，外力に抵抗力を持たせる構造系補修工法がある．

(a)　部材補修工法

部材補修工法は，耐荷性能上特に問題がなく，かつ機能上に支障をきたさないような場合には，腐食の原因を除去し，再塗装するような防食補修対策で十分といえるが，断面の欠損が著しく，耐荷力不足が生じているような場合には，断面回復のための処置が必要になってくる場合に適用される．

次に，代表的な各種補修方法について事例をあげ，解説する．

鋼橋における腐食減厚部の断面回復の補修方法例

1）腐食部に当て板を添接する

腐食減厚相当分を当て板の添接により補おうとする方法である．当て板の接合方法としては，溶接接合とボルト接合が考えられる．疲労が問題となるような部材，部位での溶接接合に関しては，疲労に対する新たな弱点を設けることにつながることから，その使用に当たっては疲労強度上の十分な検討が必要となる．高力ボルト接合については，強度あるいは施工性の面から支圧接合より摩擦接合とするのが有利である．この場合，腐食による凹凸が著しいような面を摩擦面として利用した場合に，力の伝達がどの程度期待できるのかを検討することが必要である．また，凹凸部と当て板との間に生じる隙間部の防錆も必要である．

①腐食により床面交差部で破断したトラス橋斜材の補修例：

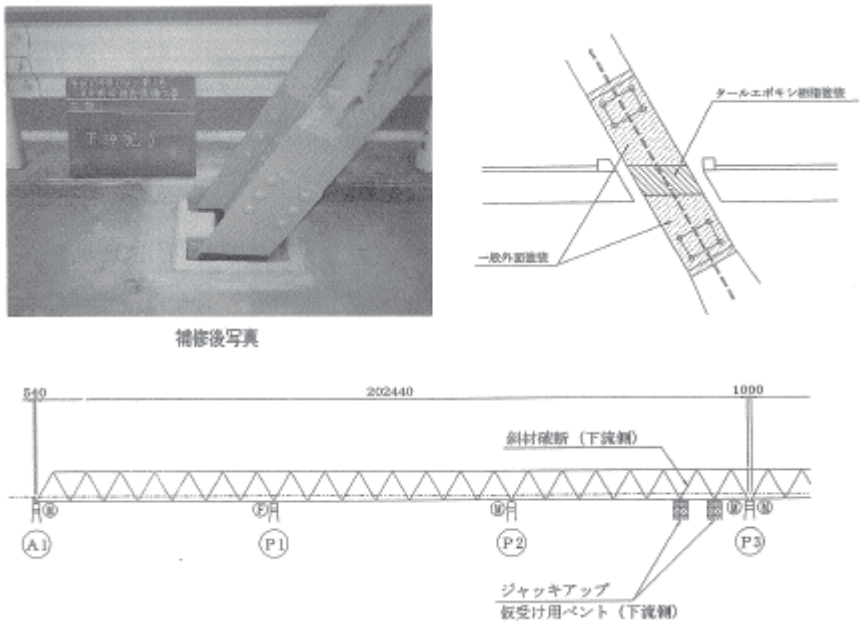


図 2.2.7.1　腐食により床面交差部で破断したトラス橋斜材の補修例

（切断部材の補修は破断斜材直下の下弦材をベントで受け、ジャッキアップ・ジャッキダウンにより軸力を導入して復旧させた）

②板桁下フランジの腐食による断面欠損部を添接板で補強した例



補強板取付け詳細図

図 2.2.7.2　断面欠損部を添接板で補強した例

③板桁ウエブの腐食による断面欠損部を添接板で補強した事例の補強作業フロー

錆落とし
- 腐食範囲の決定
- 切断位置の決定
- 添接板の寸法決定

↓

切断位置４隅の穴あけ
- ドリルによる孔明け
  （Φ24.5 ㎜）

↓

ガス切断
- 切断面をグラインダーで仕上げる

↓

高力ボルトによる添接板取り付け
- 高力ボルトの孔明け
- 中埋板の施工
- 肌すきの調整

↓（必要ならフィラープレートを挟む）
- 高力ボルトの締め付け

↓

塗装

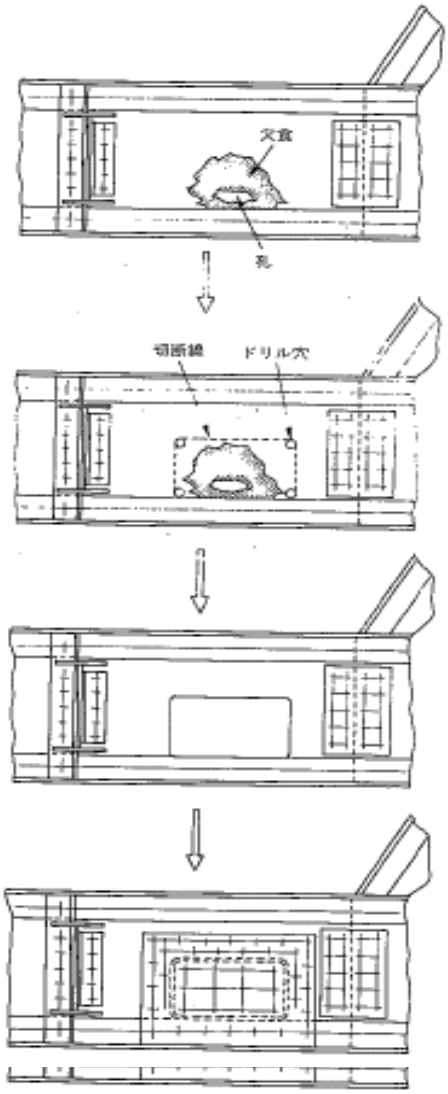


図 2.2.7.3　添接板で補強した事例の補強作業フロー

2)　腐食部分を切断撤去して同材，同厚の新機材を挿入

腐食部分を一時的に撤去することから，断面欠損時の耐荷性能上の問題が発生する．撤去時に部材の仮受けを実施することが可能であれば問題はないが，実際は困難な場合が多い．このような場合の対処方法として，一時的に荷重を伝達する部材（バイパス部材）を添加する方法が行われる．このような方法を用いる場合には，添加接合部の構造詳細に関し疲労強度からの十分な検討を行い，疲労に対する弱点を残さないようにすることが重要である．



(a)　(b)

写真 2.2.7.2　補修状況の事例

3)　腐食部材を新しい部材に交換

腐食の範囲が広範囲であり，かつ腐食の程度が著しく，局部的な補強対策で耐荷性能の十分な回復が望めない場合について実施する対策である．港湾構造物の補修例としては，

①鉄板溶接工法等による被覆補修工法

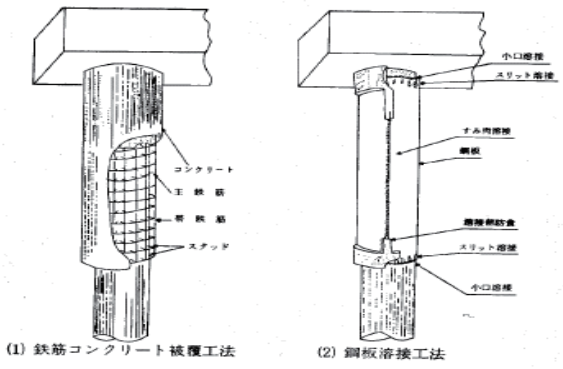


図 2.2.7.4　鉄板溶接工法等による被覆補修工法

②鋼管内に鉄筋コンクリートを充填し強度を増す充填補修工法

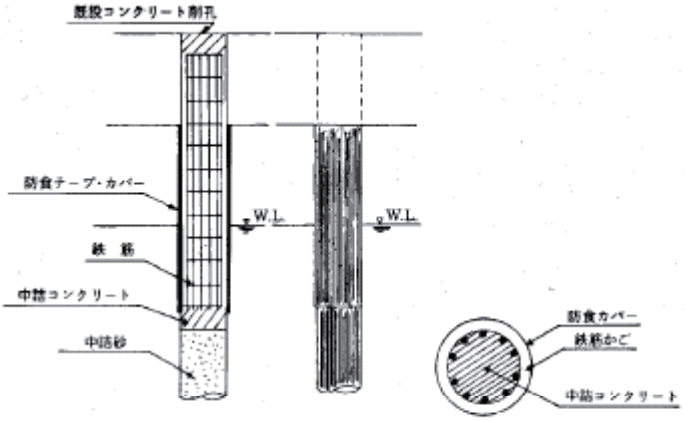


図 2.2.7.5　鉄筋コンクリートを充填し強度を増す充填補修工法

③劣化部を切断撤去し新たな部材を挿入取替えにより補強する部材交換補修工法がある.

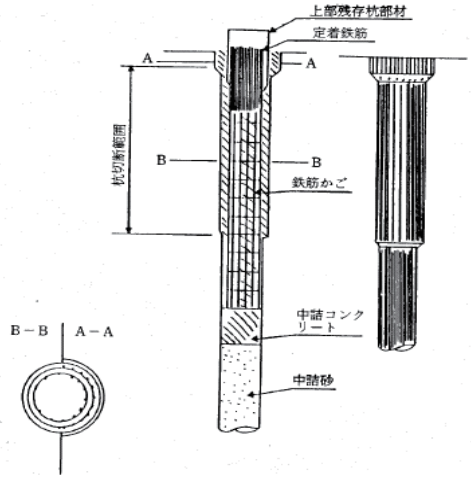


図 2.2.7.6　新たな部材を挿入取替えにより補強する部材交換補修工法

(b)　構造系補修工法

構造系補修工法は，構造系の中に新規に杭，梁，ブレーシングや補強ケーブルなどの構造を組み込み，耐力強化を図るものでさまざまな適用例がある．図 2.2.7.7 に港湾の補修事例を示す.

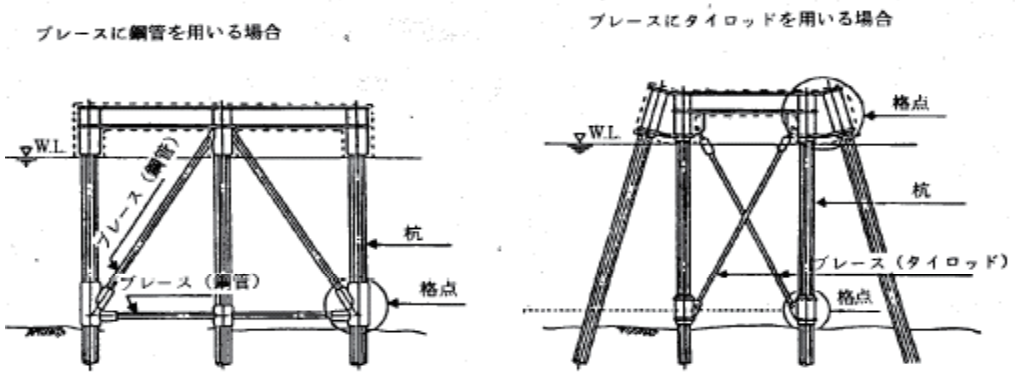


図 2.2.7.7　港湾の補修事例

また、図2.2.7.8に鋼橋の補修事例を示す.

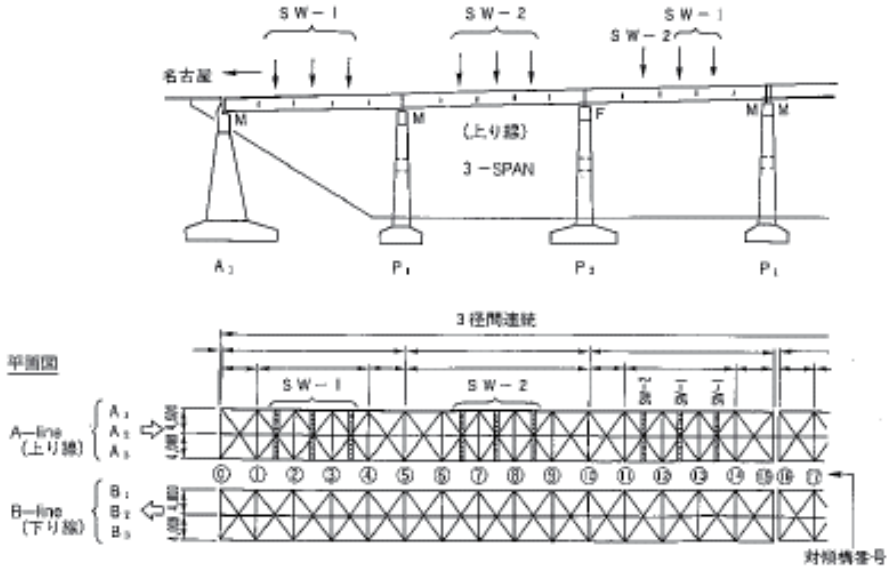


図2.2.7.8　対傾構の増設

【参考文献】

1) (財) 沿岸開発技術センター：港湾鋼構造物の防食・腐食マニュアル（改訂版), 1997

2) (社) 日本橋梁建設協会：橋梁の補修・補強事例集, 2002.

3) 日本道路公団試験研究所：橋梁の補修マニュアル－鋼橋編－, 1995

2.3　各種構造物における腐食損傷事例

2.3.1　腐食損傷マップ

(1)鋼道路橋

一般的な道路橋において，代表的な腐食位置を図2.3.1.1～図2.3.1.4に示す．地面や水面と橋体の間の空間が少ないと風通しが悪いため，湿気がこもりやすくなり腐食しやすい環境となる．支承部周辺は滞水や塵埃の堆積が生じやすいだけでなく，一般に通気性の悪い狭隘な空間となることから厳しい腐食環境となりやすい．特に，桁端部では橋台や支承部の構造から，湿気がこもりやすい閉塞した環境になりやすいことに加えて，伸縮装置からの漏水がさらに悪影響を及ぼす恐れがある．上フランジ上面は，床版のひび割れ部から浸入した水分等の影響により腐食しやすい環境となる場合が多い．

また，凍結防止剤が多く散布される寒冷地などの環境では，上下線に高低差がある並列橋の場合，通行車両により凍結防止剤を含んだ水が路面から頻繁に巻き上げられるため，隣接する桁の外面や桁下空間は腐食環境となりやすい．

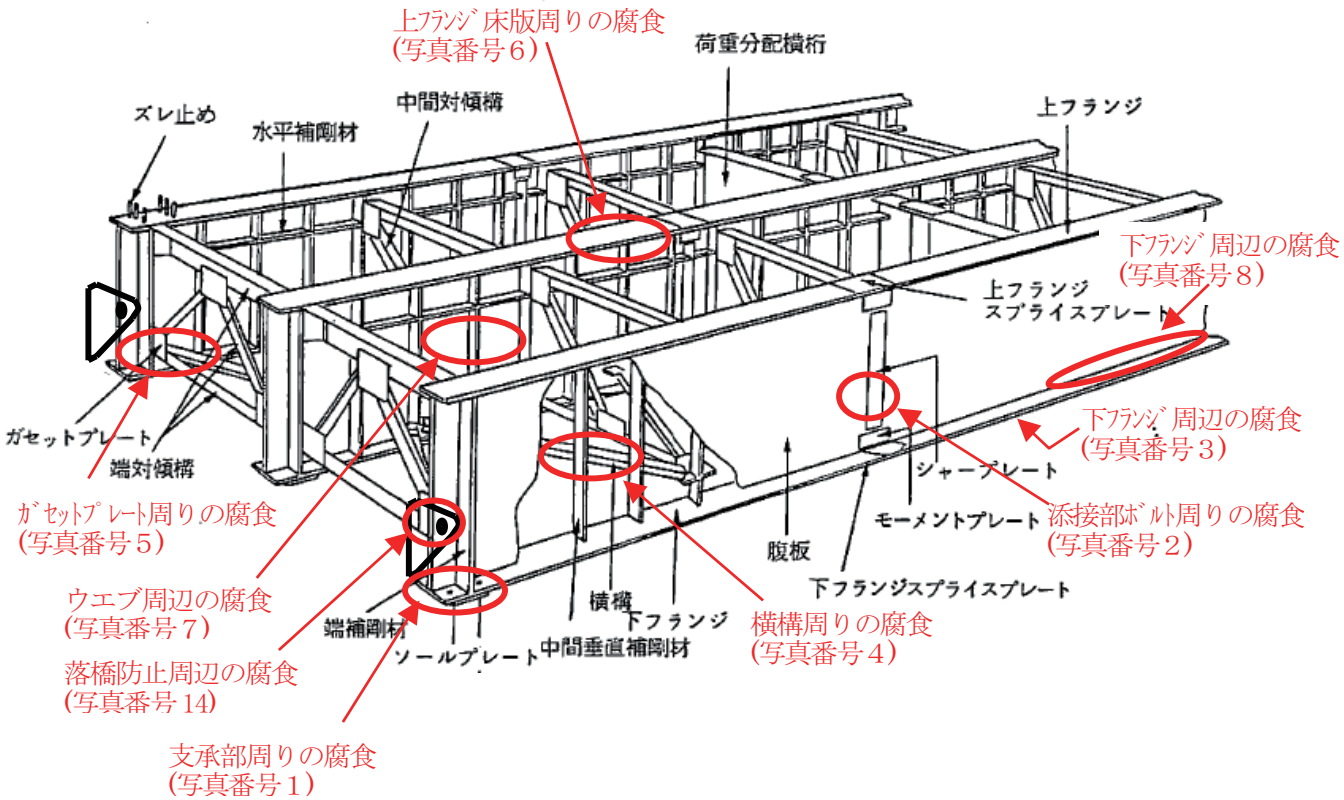


図2.3.1.1　鈑桁の腐食マップ

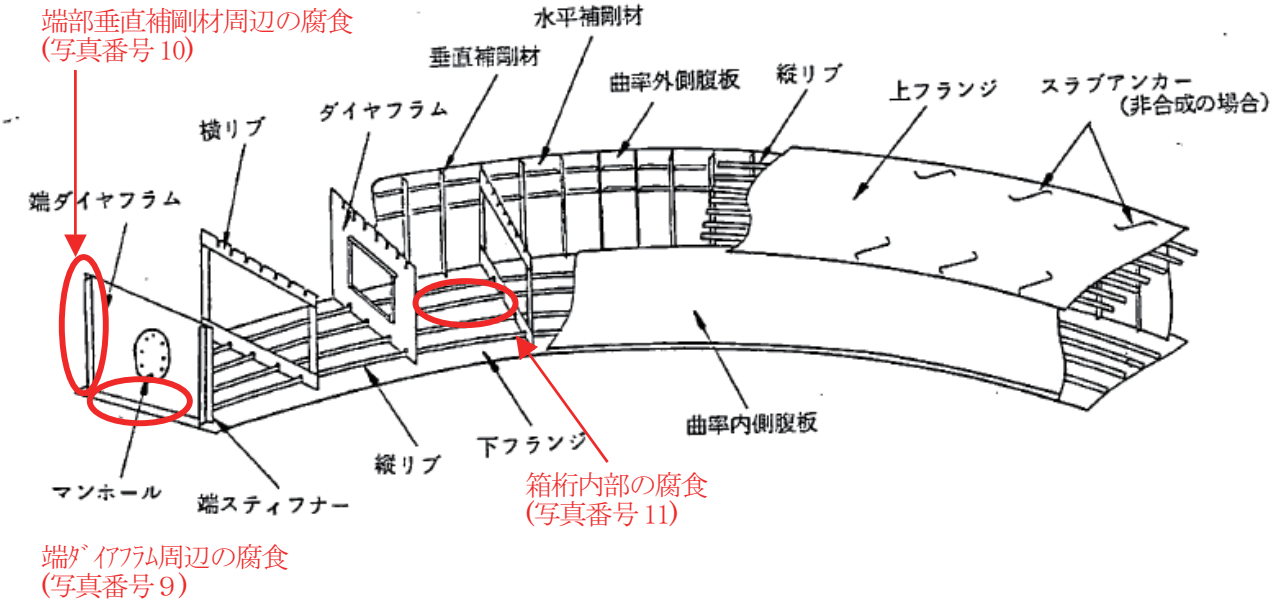


図 2.3.1.2　箱桁の腐食マップ

下路形式の橋梁の場合，高低差のある並列橋と同じように通行車両により凍結防止剤を含んだ水が路面から頻繁に巻き上げられ，垂直材や斜材にかかることになり腐食しやすい環境となりやすい．また，下路橋の垂直材や斜材が床版を貫通する構造は，貫通部に狭隘な空間ができやすく滞水や塵埃の堆積が生じやすく，露水や雨水が部材を伝うこともあり常時湿潤状態となりやすい．補剛桁や床組部材は，床版損傷部からの漏水により腐食環境となりやすい．

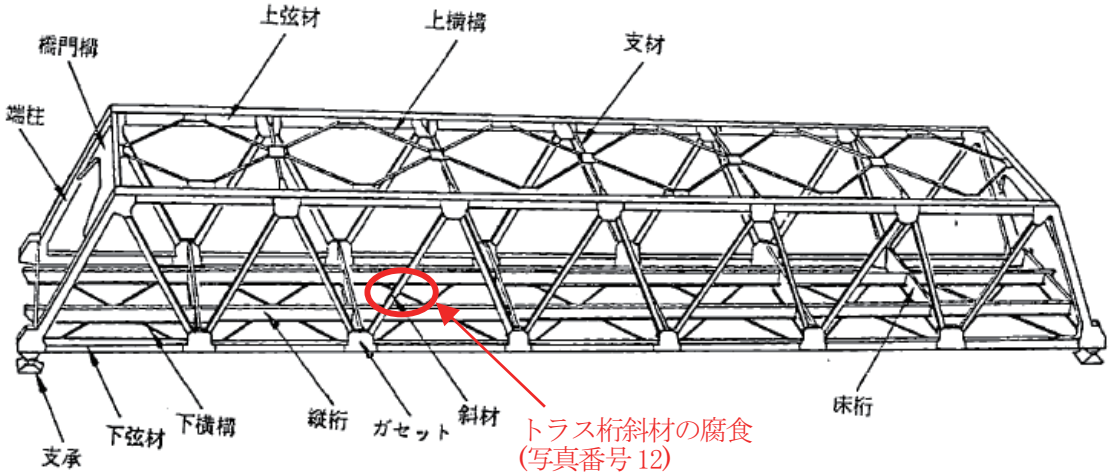


図 2.3.1.3　トラス桁の腐食マッ

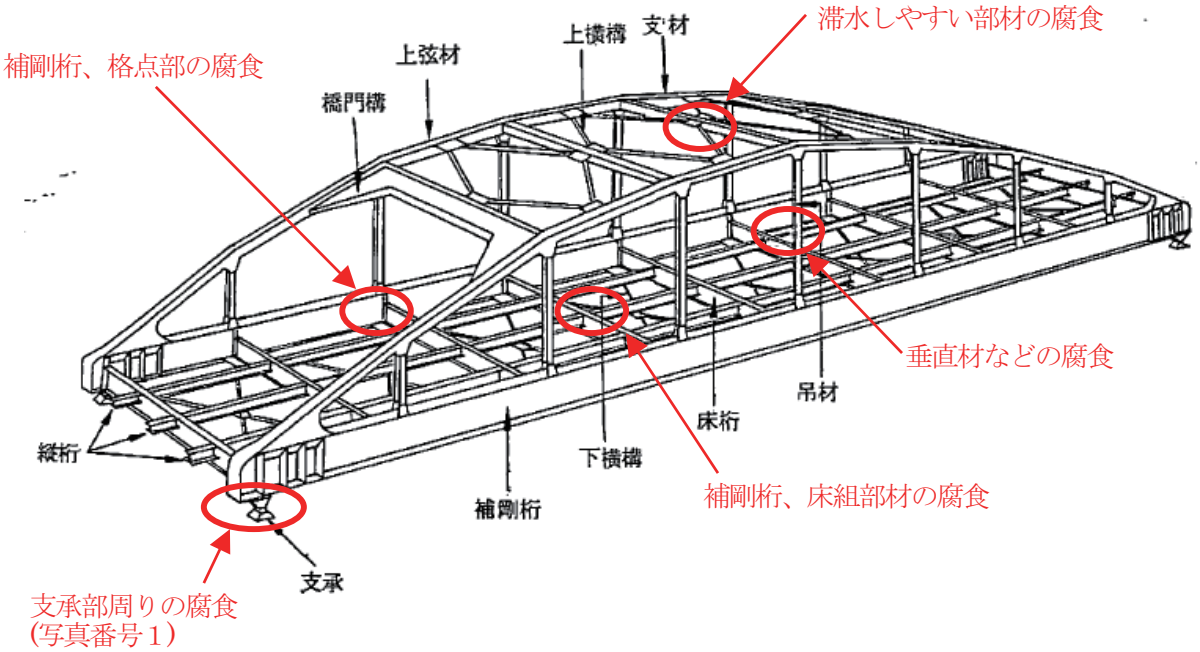


図 2.3.1.4　アーチ桁の腐食マップ

【参考文献】

1)　(社) 日本橋梁建設協会：鋼橋の概要、講習会テキストNo.1，1990.7.

2)　(社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，平成17年12月

(2)　鋼鉄道橋の腐食損傷マップ

鋼鉄道橋における，腐食が生じやすい箇所を桁形式別に示す．

図2.3.1.5に上路プレートガーダー（リベット桁）の腐食しやすい箇所を示す．リベット桁では桁端や支承部回りの腐食に加えて，まくらぎ下面の上フランジが腐食しやすい（部分拡大図）．

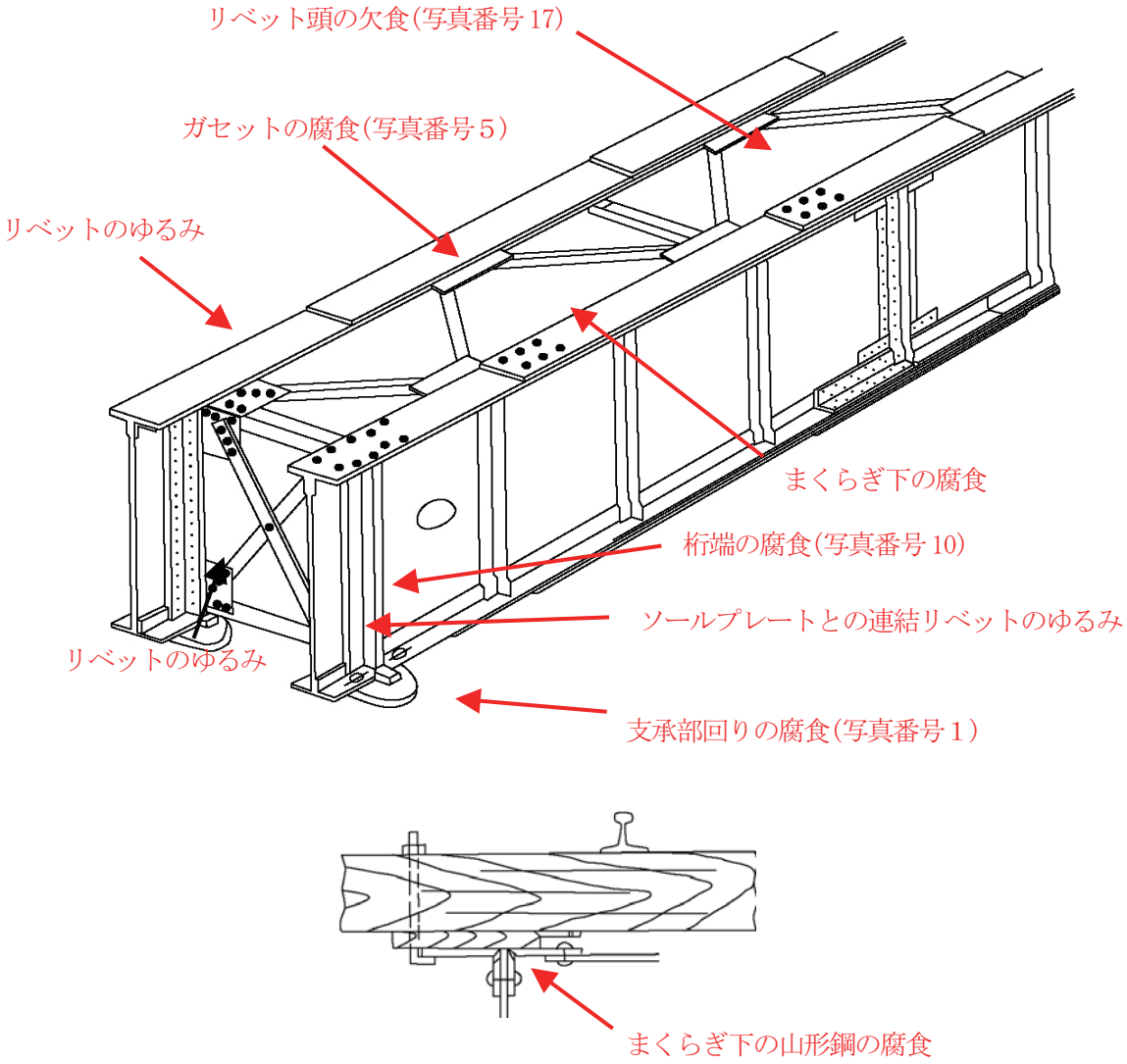


図 2.3.1.5　上路ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰの腐食マップ（リベット桁）

図2.3.1.6に上路プレートガーダー（溶接桁）の腐食しやすい箇所を示す．溶接桁においても桁端や支承部回りの腐食に加えて，開床式では上フランジのガセット回り等が腐食しやすい．箱桁形式では箱桁内部に水が溜まりやすい．このような箇所では水抜き孔を設けることとしている．

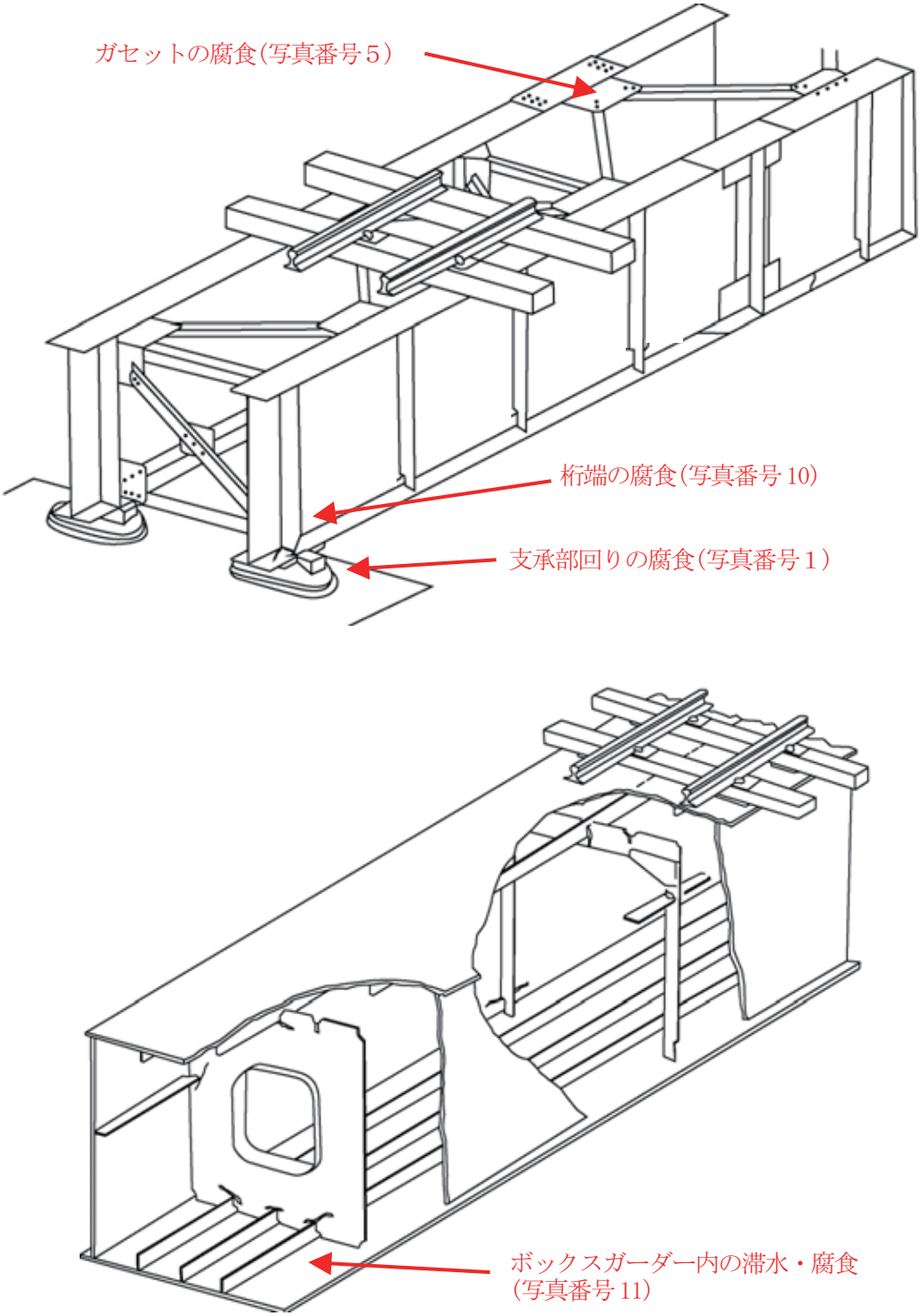


図 2.3.1.6　上路ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰの腐食マップ（溶接桁）

図2.3.1.7に下路プレートガーダーの腐食しやすい箇所を示す．下路プレートガーダーでは，上路プレートガーダーと同様に，桁端部，支承部回り以外にまくらぎ下面の縦桁上フランジや，リベットのゆるみ・欠食等が挙げられる．図2.3.1.7以外に閉床式の下路桁もあり，代表的なものとしてバックルプレート形式の下路桁がある．バックルプレート形式の下路桁では，バックルプレートの腐食が見られ，特に取りつけ部が腐食しやすい．

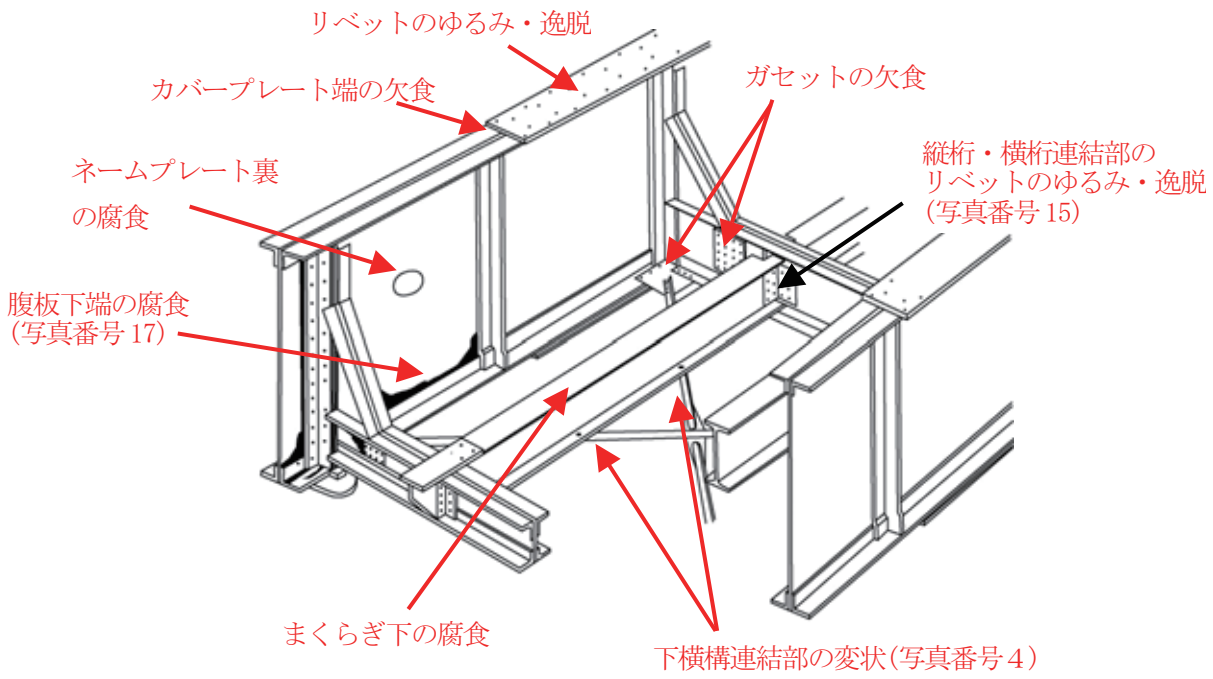


図 2.3.1.7　下路ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ（開床式）の腐食マップ

図2.3.1.8に下路トラスの腐食しやすい箇所を示す．下路トラスでは，プレートガーダーと同様に，桁端部，支承部回り以外にまくらぎ下面の縦桁上フランジや，リベットのゆるみ・欠食等が挙げられる．トラスでは各格点部回りを中心として，ガセット部やリベット頭が腐食，欠食しやすい．

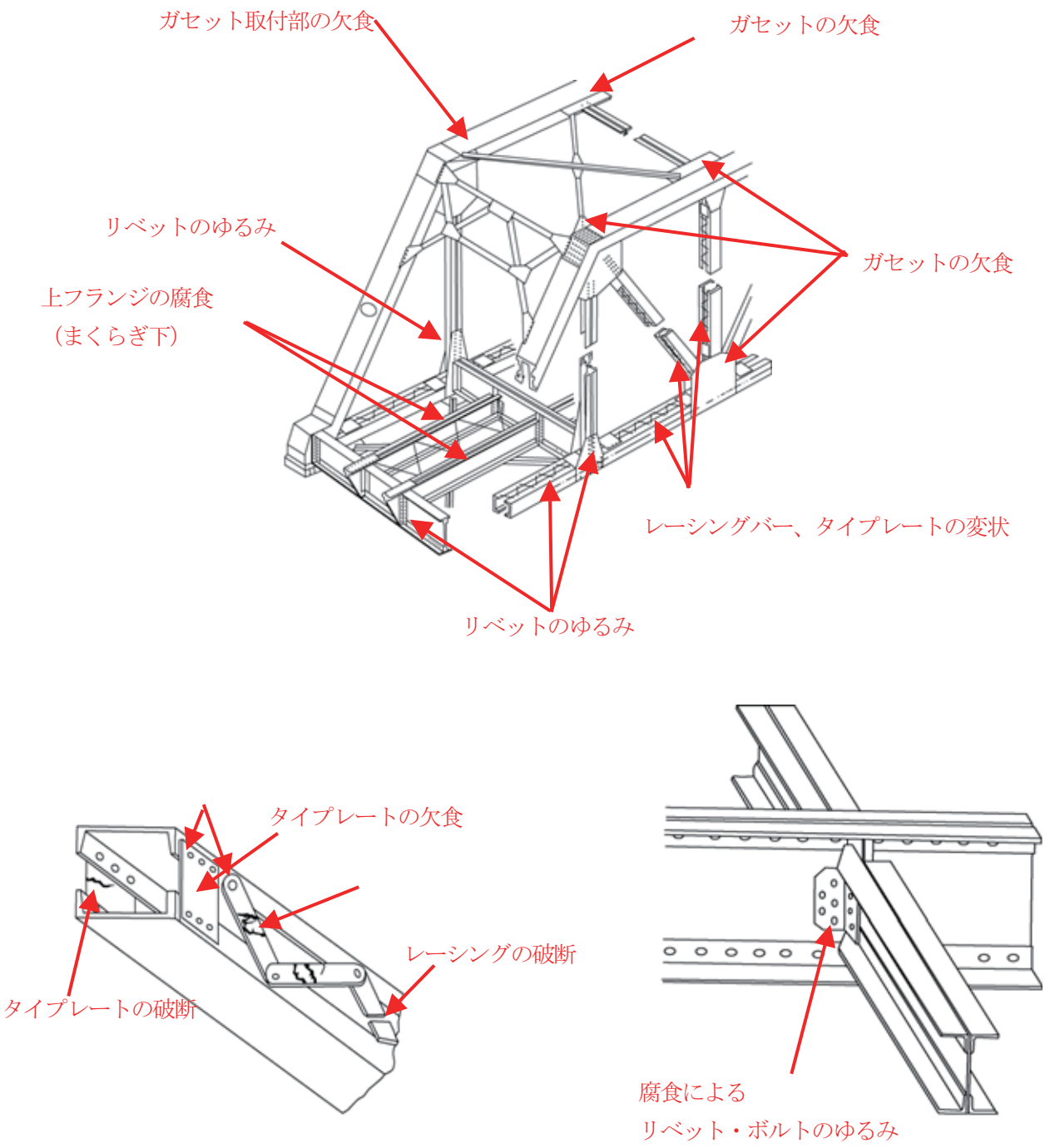


図2.3.1.8　トラスの腐食マップ

図2. 3. 1. 9には，下路トラスのうちピントラス構造のピンに関する腐食しやすい箇所を示す．ピントラスでは，アイバーの腐食・欠食が見られる．

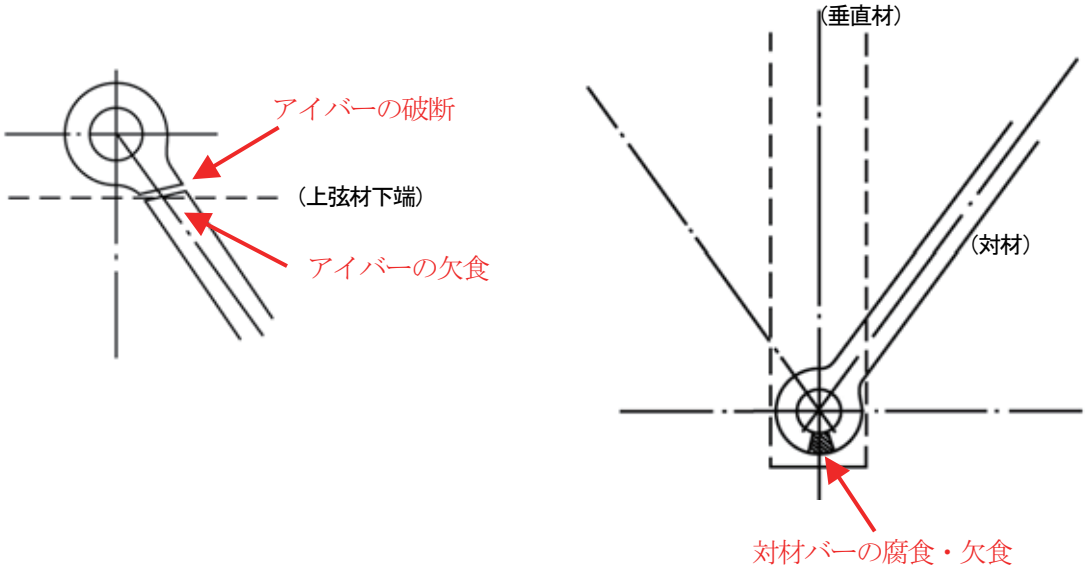


図 2. 3. 1. 9　ピントラスに対する腐食マップ

【参考文献】

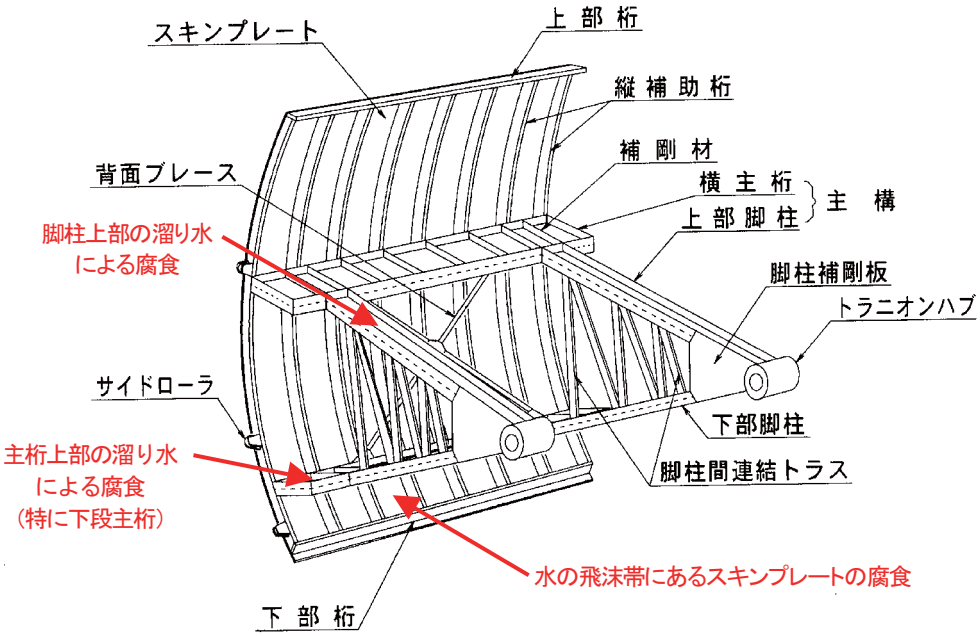
1)　（財）鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説　鋼構造物，1990.7.

2)　（財）鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.7.

(3) 水門扉の腐食損傷マップ

1) ラジアルゲート

ラジアルゲートの腐食が発生しやすい箇所を図 2.3.1.10 の腐食損傷マップに示した．ラジアルゲートでは，ゲート開閉時に水が飛散するゲート下部の水平部材上部に腐食が発生しやすい．これらの箇所で，水が溜まりやすい部材には水抜き孔が設けられているが，ゴミや土砂が堆積することで水抜き孔が塞がり，水が溜まることで，溜まり水による腐食が発生しやすくなる．



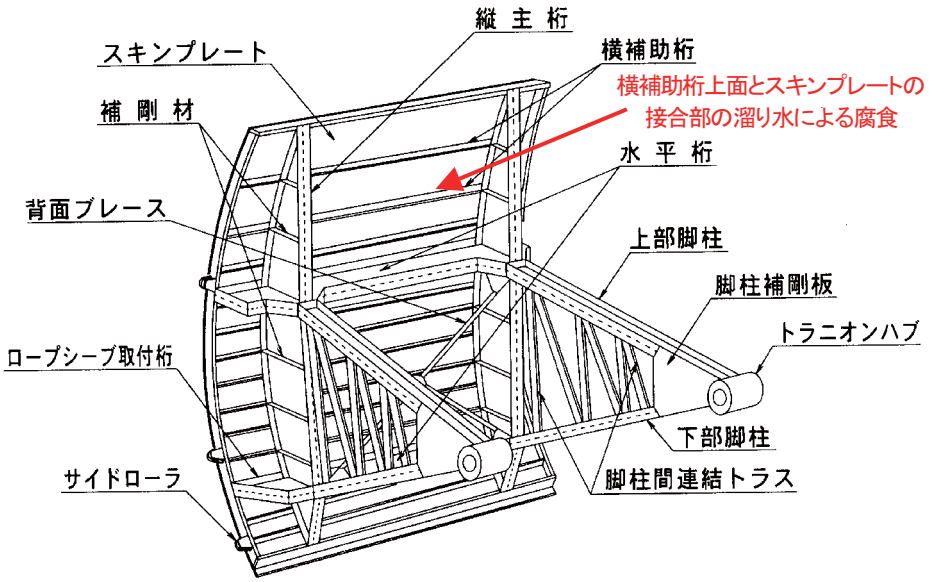


図 2.3.1.10　ラジアルゲートの腐食損傷マップ

2)　ローラーゲート

ローラーゲートの腐食が発生しやすい箇所を図 2.3.1.11 の腐食損傷マップに示した．ローラーゲートでも，ラジアルゲートと同様に，ゲート開閉時に水が飛散するゲート下部の水平部材上部に腐食が発生しやすい．これらの箇所で，水が溜まりやすい部材には水抜き孔が設けられているが，ゴミや土砂が堆積することで水抜き孔が塞がり，水が溜まることで，溜まり水による腐食が発生しやすくなる．

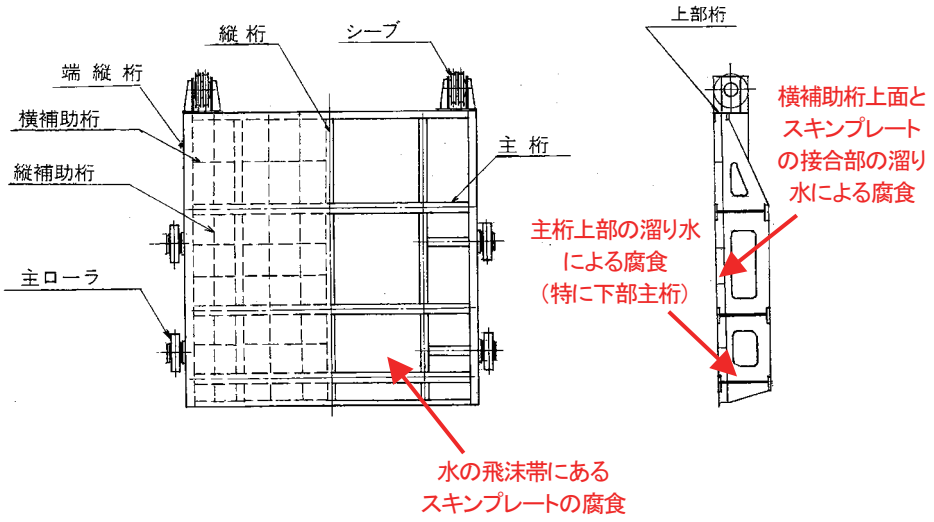


図 2.3.1.11　ローラーゲートの腐食損傷マップ

【参考文献】

1）水門鉄管協会：水門鉄管技術基準　水門扉編，1997.

2.3.2　損傷事例写真

（1）道路橋

写真番号	1	構造物	鋼橋	写真番号	2	構造物	鋼橋
							
写真番号	3	構造物	鋼橋	写真番号	4	構造物	鋼橋
							
写真番号	5	構造物	鋼橋	写真番号	6	構造物	鋼橋
							

写真番号	7	構造物	鋼橋
			

写真番号	8	構造物	鋼橋
			

写真番号	9	構造物	鋼橋
			

写真番号	10	構造物	鋼橋
			

写真番号	11	構造物	鋼橋
			

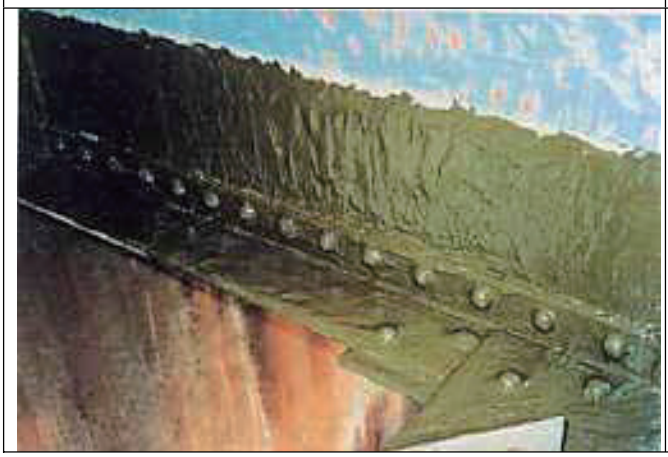
写真番号	12	構造物	鋼橋
			

写真番号	13	構造物	鋼橋	写真番号	14	構造物	鋼橋
							
写真番号	15	構造物	鋼橋	写真番号	16	構造物	鋼橋
							
写真番号	17	構造物	鋼橋	写真番号	18	構造物	鋼橋
							

【参考文献】

1)　玉越隆史，大橋　章，中谷昌一：道路橋の定期点検に関する参考資料－橋梁損傷事例写真集－，国総研資料第196号，平成16年12月

（2）鉄道橋

桁端下フランジの腐食	縦桁上フランジの腐食
	
ケレン作業	ケレン後の腐食状況
	
補修塗装例（超厚膜型エポキシ樹脂塗料の塗布）	
	

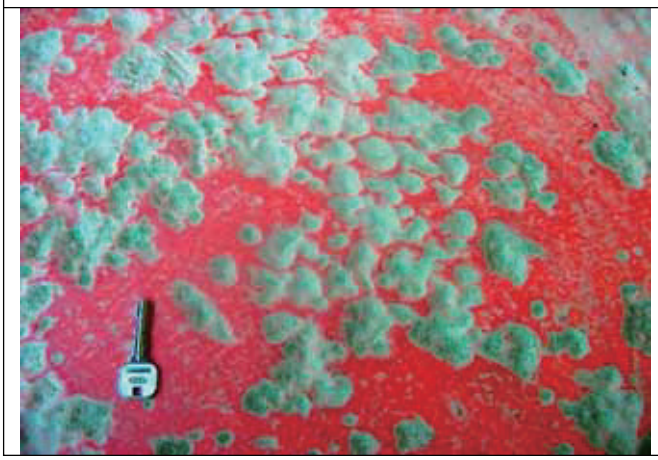
リベットの高力ボルトへの置き換え（仮設）	上フランジアングルの交換
	
シューの腐食（清掃後）	
	

【参考文献】

1)　（財）鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説　鋼構造物，1990.7.

2)　（財）鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.7.

（３）水門

水門扉の腐食	水門フランジの腐食
	
水門添接ボルト周辺の腐食（下面）	水門添接ボルト周辺の腐食（上面）
	
水門の腐食（近接目視）	
	

2.4 鋼構造物の健全度評価への提言

本章では鋼構造物の健全度評価に関して，健全度の定義，点検調査要領，健全度調査の目的，健全度の判定要領および補修・補強の優先度等に関して解説した．健全度とは供用年数を経て腐食劣化した構造物が保有している耐荷性能として定義できるが，健全度を評価する際用いられるデータは，管理者が実施している点検・調査結果に基づいた損傷ランクである場合が多く，これらは，基本的に部材毎の損傷度を表しているに過ぎないことに注意する必要がある．

本来，構造物の維持管理を合理的に行うには，構造物全体系の健全度を総合的に評価することが重要である．また，構造物全体の健全度を評価する際には，構造物各部位における損傷が構造物全体に及ぼす影響を考慮するだけでなく，耐荷性状に及ぼす影響を定量的かつ総合的に評価する必要がある．

ここで，現状の健全度評価を整理するために，以下に示す構造物の各レベルにおける損傷度評価，もしくは健全度評価を考える．

a) 部位毎の損傷度評価
b) 構造部材・要素の損傷度評価
c) 構造部材・要素の健全度評価
d) 構造物全体の健全度評価

現状では，腐食劣化した構造物の評価について，上記 a)，b) レベルの損傷度評価に関しては多くの研究や検討が行われており，多くの管理者が，点検・調査マニュアルに即して実施している段階にある．

しかしながら，構造部材の損傷度が構造物全体に与える影響の定量的な評価手法や，損傷度が構造物の耐荷性状に及ぼす影響に関しては，十分に評価されている状況にあるとは言い難い．本報告書では，4 章において腐食劣化した構造物の耐荷性状に関して現状をレビューしているが，部材毎の腐食損傷度から構造物全体の耐荷性状を定量的に評価する手法の確立が課題であるといえる．耐荷性状を評価する上で，今後より必要とされる技術に，補修・補強後の構造物の耐荷性状を評価する手法をあげることができる．現状，定性的には，補修・補強後の耐荷性状をある程度把握することが可能ではあるが，今後，この評価精度を向上させることが課題である．

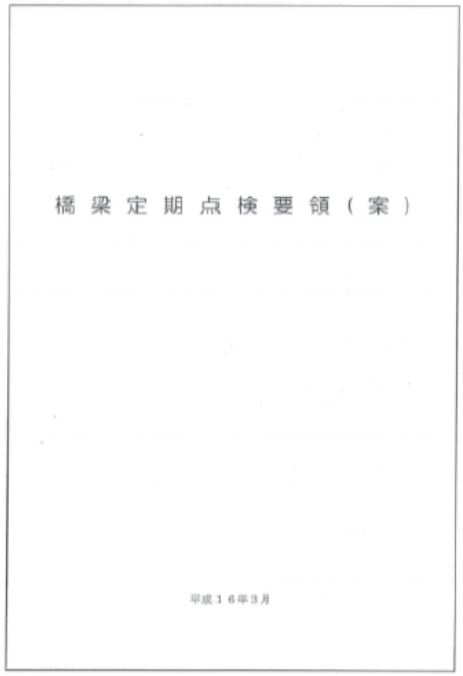
また，現状の部材毎の損傷度評価では，目視点検による定性的な評価に留まり，定量的な評価が困難な場合も多い．より適切な健全度評価に結びつけるためには，合理的で定量的評価が可能な計測・評価技術の確立も重要である．

健全度評価の目的を適切かつ合理的な補修・補強を行うための維持管理対策であると考えると，健全性評価は，点検・調査および補修・補強のインターバル，当該構造物のライフサイクルコスト，使用可能な予算，構造物の社会的影響度等，多目的かつトレードオフの関係にある最適化問題と考えられる．これらの要因間のバランスを考慮し，適切な対策を立案していくための手段となりうる健全度評価手法の検討が今後の課題と考えられる．

2.5　参考資料（各機関の基準を抜粋）

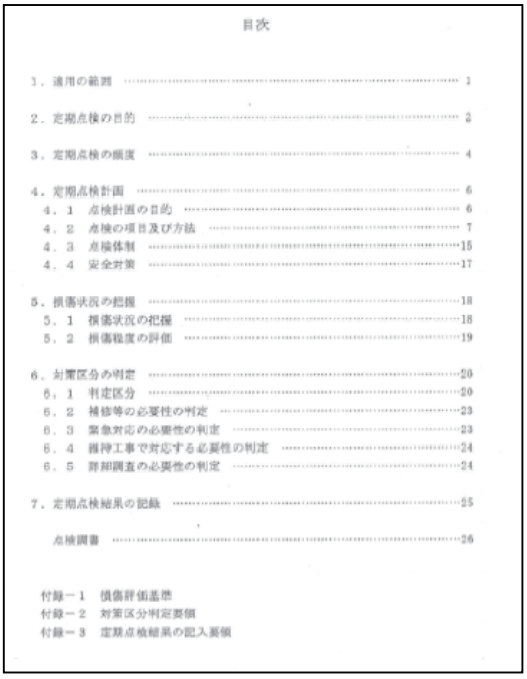
以下に、点検に関する各機関の基準を参考資料（抜粋）として示す。

2.5.1　国土交通省：「橋梁定期点検要領」



橋梁定期点検要領（案）

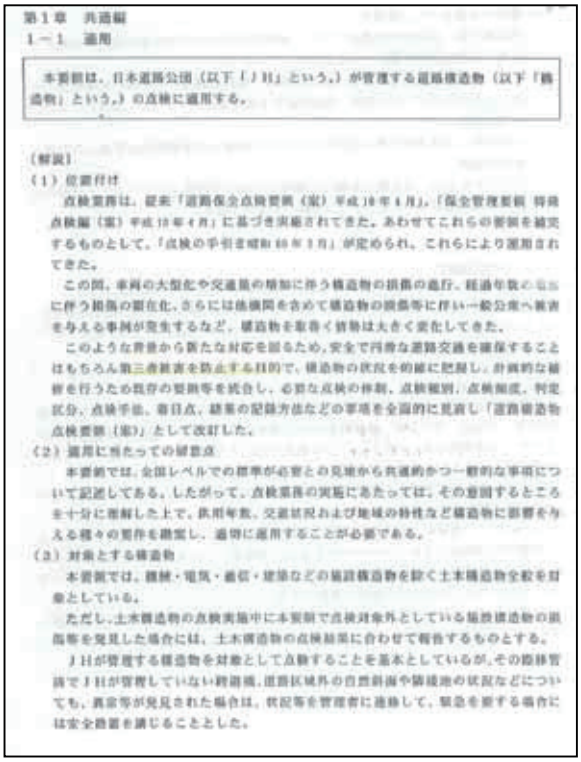
平成16年3月



目次

1．適用の範囲 …… 1
2．定期点検の目的 …… 2
3．定期点検の頻度 …… 4
4．定期点検計画 …… 6
4．1　点検計画の目的 …… 6
4．2　点検の項目及び方法 …… 7
4．3　点検体制 …… 15
4．4　安全対策 …… 17
5．損傷状況の把握 …… 18
5．1　損傷状況の把握 …… 18
5．2　損傷程度の評価 …… 19
6．対策区分の判定 …… 20
6．1　判定区分 …… 20
6．2　補修等の必要性の判定 …… 23
6．3　緊急対応の必要性の判定 …… 23
6．4　維持工事で対応する必要性の判定 …… 24
6．5　詳細調査の必要性の判定 …… 24
7．定期点検結果の記録 …… 25
点検調書 …… 26
付録－1　損傷評価基準
付録－2　対策区分判定要領
付録－3　定期点検結果の記入要領

2.5.2　旧日本道路公団：「道路構造物点検要領」



第1章　共通編

1－1　適用

本要領は、日本道路公団（以下「JH」という。）が管理する道路構造物（以下「構造物」という。）の点検に適用する。

（解説）

（1）位置付け

点検業務は、従来「道路保全点検要領（案）平成10年4月」、「保全管理要領 特殊点検編（案）平成13年4月」に基づき実施されてきた。あわせてこれらの要領を補完するものとして、「点検の手引き昭和60年3月」が定められ、これらにより運用されてきた。

この間、車両の大型化や交通量の増加に伴う構造物の損傷の進行、経過年数の増加に伴う損傷の顕在化、さらには他機関を含めて構造物の損傷等に伴い一般公衆へ被害を与える事例が発生するなど、構造物を取巻く情勢は大きく変化してきた。

このような背景から新たな対応を図るため、安全で円滑な道路交通を確保することはもちろん第三者被害を防止する目的で、構造物の状況を的確に把握し、計画的な補修を行うため既存の要領等を統合し、必要な点検の体制、点検種別、点検頻度、判定区分、点検手法、着目点、結果の記録方法などの事項を全面的に見直し「道路構造物点検要領（案）」として改訂した。

（2）適用に当たっての留意点

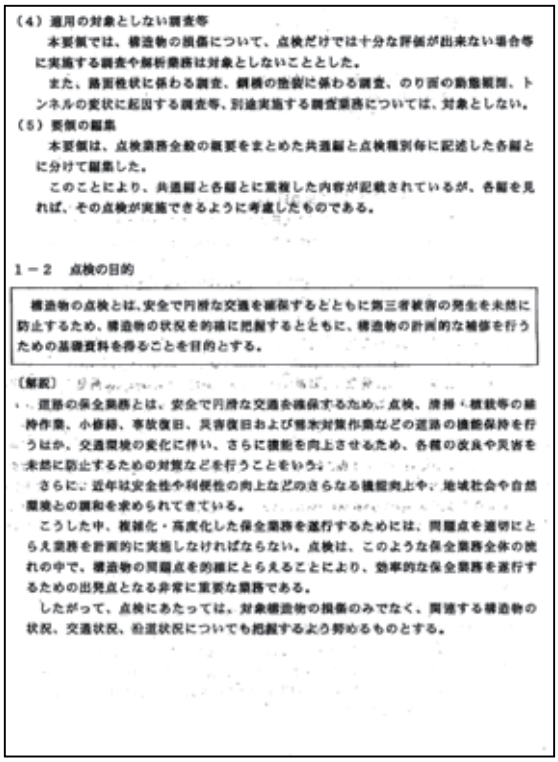
本要領では、全国レベルでの標準が必要との見地から共通的かつ一般的な事項について記述してある。したがって、点検業務の実施にあたっては、その意図するところを十分に理解した上で、供用年数、交通状況および地域の特性など構造物に影響を与える種々の要件を勘案し、適切に運用することが必要である。

（3）対象とする構造物

本要領では、機械・電気・通信・建築などの施設構造物を除く土木構造物全般を対象としている。

ただし、土木構造物の点検実施中に本要領で点検対象外としている施設構造物の損傷等を発見した場合には、土木構造物の点検結果に合わせて報告するものとする。

JHが管理する構造物を対象として点検することを基本としているが、その隣接管理でJHが管理していない跨道橋、道路区域外の自然斜面や隣接地の状況などについても、異常等が発見された場合は、状況等を管理者に連絡して、緊急を要する場合には安全措置を講じることとした。



（4）適用の対象としない調査等

本要領では、構造物の損傷について、点検だけでは十分な評価が出来ない場合等に実施する調査や解析業務は対象としないこととした。

また、路面性状に係わる調査、鋼橋の塗装に係わる調査、のり面の動態観測、トンネルの変状に起因する調査等、別途実施する調査業務については、対象としない。

（5）要領の編集

本要領は、点検業務全般の概要をまとめた共通編と点検種別毎に記述した各編とに分けて編集した。

このことにより、共通編と各編とに重複した内容が記載されているが、各編を見れば、その点検が実施できるように考慮したものである。

1－2　点検の目的

構造物の点検とは、安全で円滑な交通を確保するとともに第三者被害の発生を未然に防止するため、構造物の状況を的確に把握するとともに、構造物の計画的な補修を行うための基礎資料を得ることを目的とする。

（解説）

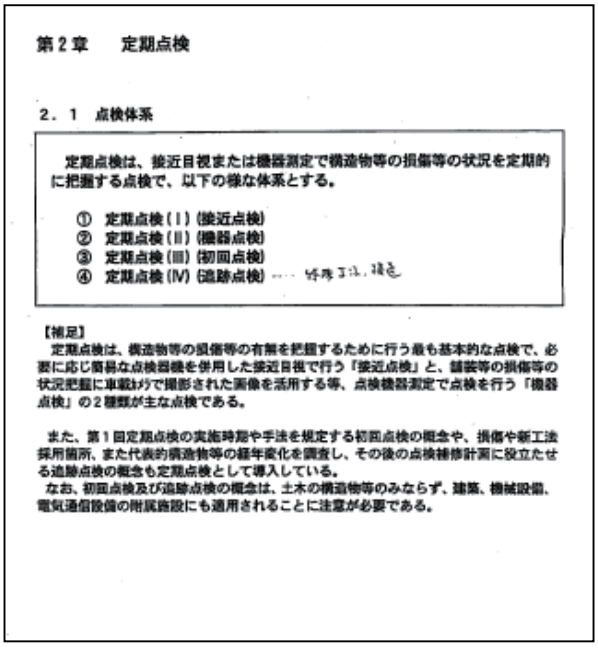
・道路の保全業務とは、安全で円滑な交通を確保するため、点検、清掃・植栽等の維持作業、小修繕、事故復旧、災害復旧および落下対策作業などの道路の機能保持を行うほか、交通環境の変化に伴い、さらに機能を向上させるため、各種の改良や災害を未然に防止するための対策などを行うことをいう。

さらに、近年は安全性や利便性の向上などのさらなる機能向上や、地域社会や自然環境との調和を求められてきている。

こうした中、複雑化・高度化した保全業務を遂行するためには、問題点を適切にとらえ業務を計画的に実施しなければならない。点検は、このような保全業務全体の流れの中で、構造物の問題点を的確にとらえることにより、効率的な保全業務を遂行するための出発点となる非常に重要な業務である。

したがって、点検にあたっては、対象構造物の損傷のみでなく、関連する構造物の状況、交通状況、沿道状況についても把握するよう努めるものとする。

2.5.3　首都高速道路（株）:「構造物等点検要領」



第２章　定期点検

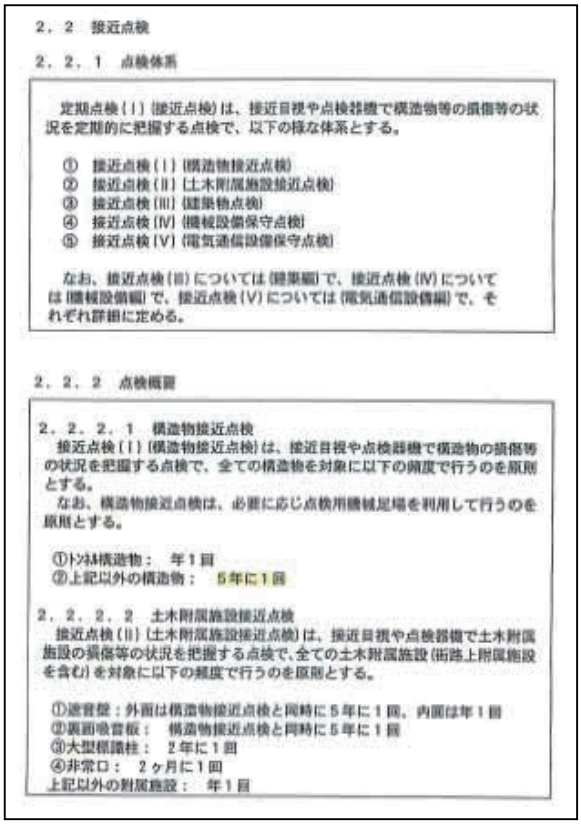
２．１　点検体系

定期点検は、接近目視または機器測定で構造物等の損傷等の状況を定期的に把握する点検で、以下の様な体系とする。

① 定期点検（Ⅰ）（接近点検）
② 定期点検（Ⅱ）（機器点検）
③ 定期点検（Ⅲ）（初回点検）
④ 定期点検（Ⅳ）（追跡点検）

【補足】
定期点検は、構造物等の損傷等の有無を把握するために行う最も基本的な点検で、必要に応じ簡易な点検器機を併用した接近目視で行う「接近点検」と、舗装等の損傷等の状況把握に車載ｶﾒﾗで撮影された画像を活用する等、点検機器測定で点検を行う「機器点検」の２種類が主な点検である。

また、第１回定期点検の実施時期や手法を規定する初回点検の概念や、損傷や新工法採用箇所、また代表的構造物等の経年変化を調査し、その後の点検補修計画に役立たせる追跡点検の概念も定期点検として導入している。
なお、初回点検及び追跡点検の概念は、土木の構造物等のみならず、建築、機械設備、電気通信設備の附属施設にも適用されることに注意が必要である。



２．２　接近点検

２．２．１　点検体系

定期点検（Ⅰ）（接近点検）は、接近目視や点検器機で構造物等の損傷等の状況を定期的に把握する点検で、以下の様な体系とする。

① 接近点検（Ⅰ）（構造物接近点検）
② 接近点検（Ⅱ）（土木附属施設接近点検）
③ 接近点検（Ⅲ）（建築物点検）
④ 接近点検（Ⅳ）（機械設備保守点検）
⑤ 接近点検（Ⅴ）（電気通信設備保守点検）

なお、接近点検（Ⅲ）については（建築編）で、接近点検（Ⅳ）については（機械設備編）で、接近点検（Ⅴ）については（電気通信設備編）で、それぞれ詳細に定める。

２．２．２　点検概要

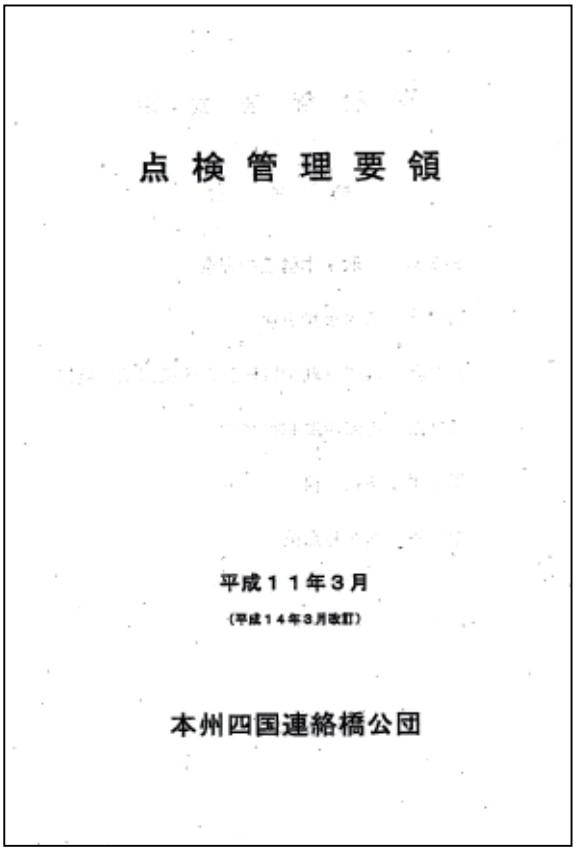
２．２．２．１　構造物接近点検
接近点検（Ⅰ）（構造物接近点検）は、接近目視や点検器機で構造物の損傷等の状況を把握する点検で、全ての構造物を対象に以下の頻度で行うのを原則とする。
なお、構造物接近点検は、必要に応じ点検用機械足場を利用して行うのを原則とする。

①ﾄﾝﾈﾙ構造物：　年１回
②上記以外の構造物：　５年に１回

２．２．２．２　土木附属施設接近点検
接近点検（Ⅱ）（土木附属施設接近点検）は、接近目視や点検器機で土木附属施設の損傷等の状況を把握する点検で、全ての土木附属施設（街路上附属施設を含む）を対象に以下の頻度で行うのを原則とする。

①遮音壁：外面は構造物接近点検と同時に５年に１回、内面は年１回
②裏面吸音板：　構造物接近点検と同時に５年に１回
③大型標識柱：　２年に１回
④非常口：　２ヶ月に１回
上記以外の附属施設：　年１回

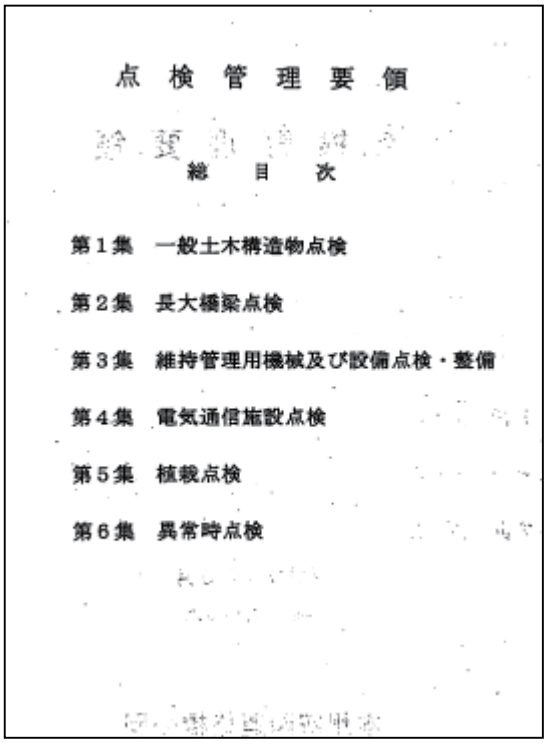
2.5.4　本州四国連絡高速道路（株）:「長大橋梁点検」



点検管理要領

平成１１年３月
（平成１４年３月改訂）

本州四国連絡橋公団



点検管理要領

総　目　次

第１集　一般土木構造物点検

第２集　長大橋梁点検

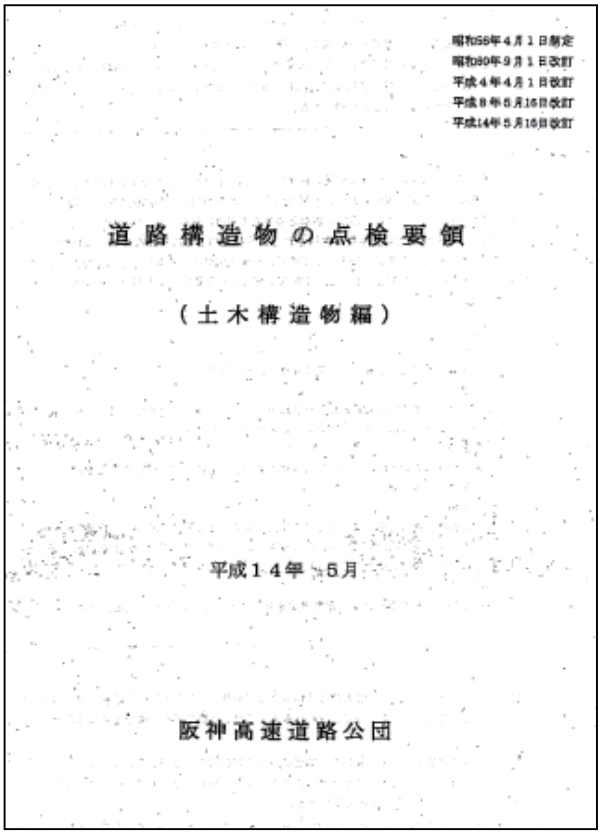
第３集　維持管理用機械及び設備点検・整備

第４集　電気通信施設点検

第５集　植栽点検

第６集　異常時点検

2.5.5　阪神高速道路（株）:「道路構造物の点検要領」



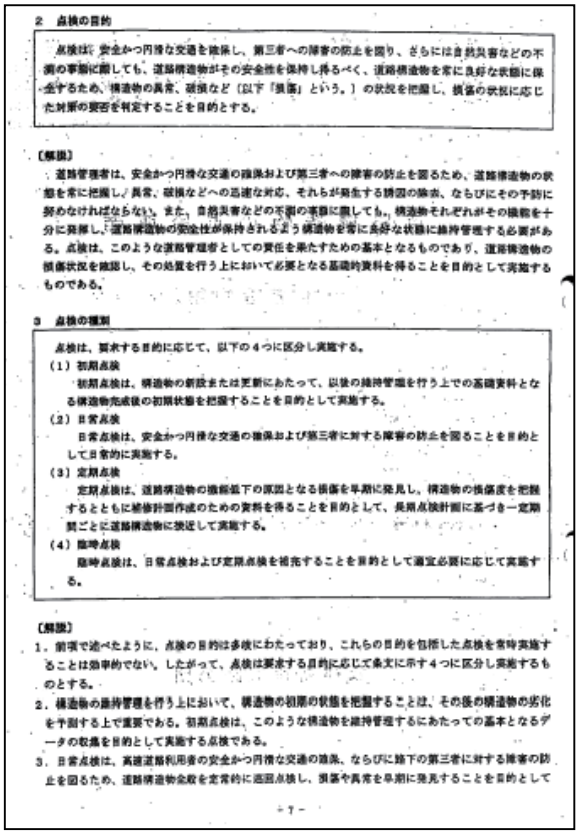
昭和59年4月1日制定
昭和60年9月1日改訂
平成4年4月1日改訂
平成8年5月16日改訂
平成14年5月16日改訂

道路構造物の点検要領

（土木構造物編）

平成14年5月

阪神高速道路公団



2　点検の目的

点検は、安全かつ円滑な交通を確保し、第三者への障害の防止を図り、さらには自然災害などの不測の事態に際しても、道路構造物がその安全性を保持し得るべく、道路構造物を常に良好な状態に保全するため、構造物の異常、破損など（以下「損傷」という。）の状況を把握し、損傷の状況に応じた対策の要否を判定することを目的とする。

【解説】

道路管理者は、安全かつ円滑な交通の確保および第三者への障害の防止を図るため、道路構造物の状態を常に把握し、異常、破損などへの迅速な対応、それらが発生する諸因の除去、ならびにその予防に努めなければならない。また、自然災害などの不測の事態に際しても、構造物それぞれがその機能を十分に発揮し、道路構造物の安全性が保持されるよう構造物を常に良好な状態に維持管理する必要がある。点検は、このような道路管理者としての責任を果たすための基本となるものであり、道路構造物の損傷状況を確認し、その処置を行う上において必要となる基礎的資料を得ることを目的として実施するものである。

3　点検の種別

点検は、要求する目的に応じて、以下の4つに区分し実施する。

（1）初期点検
　初期点検は、構造物の新設または更新にあたって、以後の維持管理を行う上での基礎資料となる構造物完成後の初期状態を把握することを目的として実施する。

（2）日常点検
　日常点検は、安全かつ円滑な交通の確保および第三者に対する障害の防止を図ることを目的として日常的に実施する。

（3）定期点検
　定期点検は、道路構造物の機能低下の原因となる損傷を早期に発見し、構造物の損傷度を把握するとともに補修計画作成のための資料を得ることを目的として、長期点検計画に基づき一定期間ごとに道路構造物に接近して実施する。

（4）臨時点検
　臨時点検は、日常点検および定期点検を補完することを目的として適宜必要に応じて実施する。

【解説】

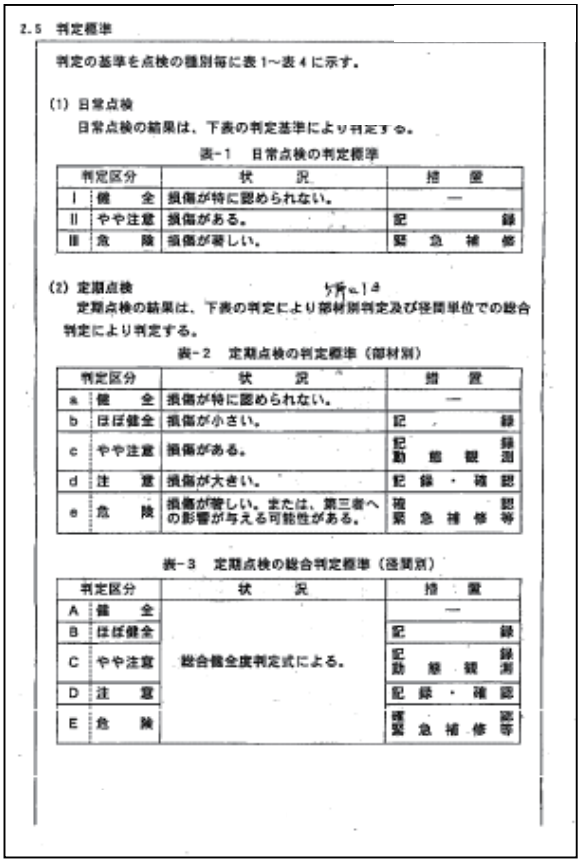
1．前項で述べたように、点検の目的は多岐にわたっており、これらの目的を包括した点検を常時実施することは効率的でない。したがって、点検は要求する目的に応じて条文に示す4つに区分し実施するものとする。

2．構造物の維持管理を行う上において、構造物の初期の状態を把握することは、その後の構造物の劣化を予測する上で重要である。初期点検は、このような構造物を維持管理するにあたっての基本となるデータの収集を目的として実施する点検である。

3．日常点検は、高速道路利用者の安全かつ円滑な交通の確保、ならびに路下の第三者に対する障害の防止を図るため、道路構造物全般を定常的に巡回点検し、損傷や異常を早期に発見することを目的として

－7－

2.5.6　東京都：「橋梁の点検要領」



2.5　判定標準

判定の基準を点検の種別毎に表1～表4に示す。

(1) 日常点検

日常点検の結果は、下表の判定基準により判定する。

表-1　日常点検の判定標準

判定区分	状況	措置
Ⅰ　健全	損傷が特に認められない。	—
Ⅱ　やや注意	損傷がある。	記録
Ⅲ　危険	損傷が著しい。	緊急補修

(2) 定期点検

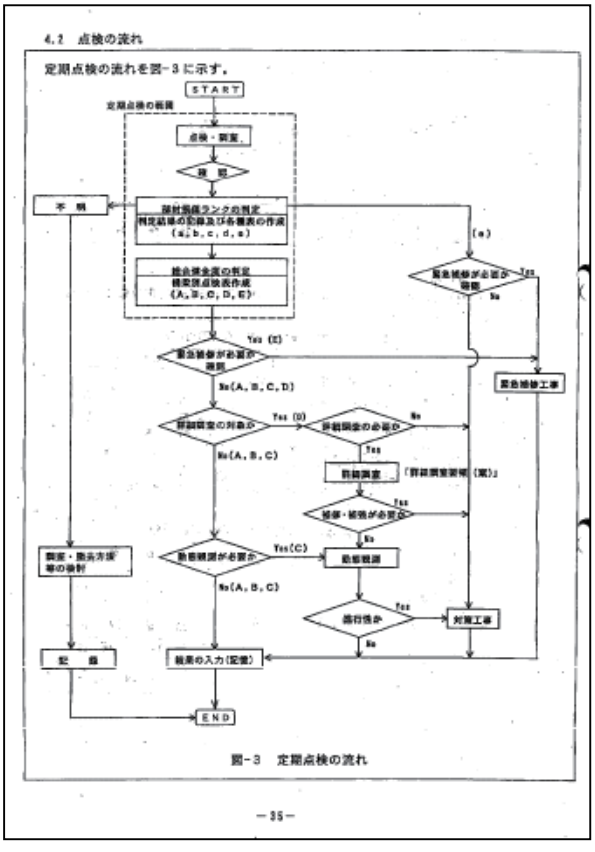
定期点検の結果は、下表の判定により部材別判定及び径間単位での総合判定により判定する。

表-2　定期点検の判定標準（部材別）

判定区分	状況	措置
a　健全	損傷が特に認められない。	—
b　ほぼ健全	損傷が小さい。	記録
c　やや注意	損傷がある。	記録 動態観測
d　注意	損傷が大きい。	記録・確認
e　危険	損傷が著しい。または、第三者への影響が与える可能性がある。	確認 緊急補修等

表-3　定期点検の総合判定標準（径間別）

判定区分	状況	措置
A　健全	総合健全度判定式による。	—
B　ほぼ健全		記録
C　やや注意		記録 動態観測
D　注意		記録・確認
E　危険		確認 緊急補修等



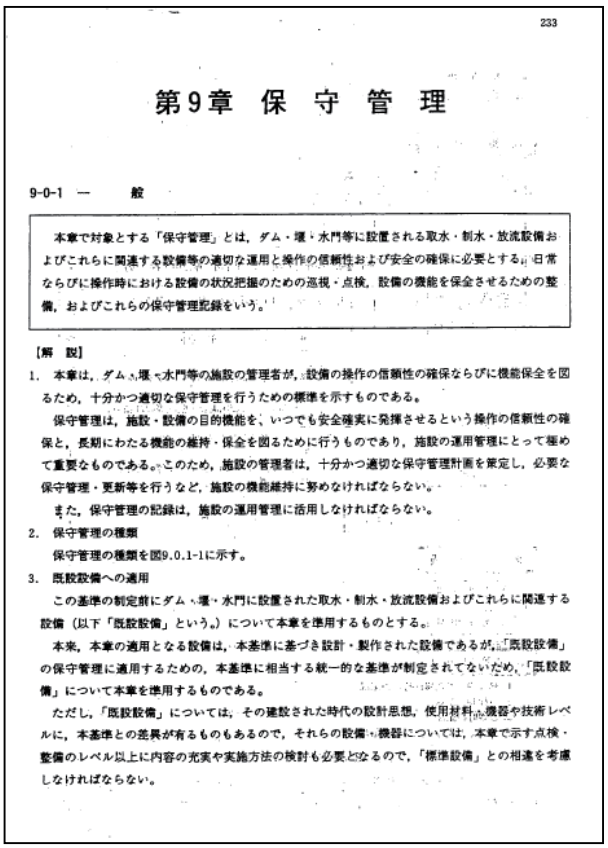
4.2　点検の流れ

定期点検の流れを図-3に示す。

図-3　定期点検の流れ

－35－

2.5.7 ダム、堰、水門施設管理者：「ダム、堰施設技術基準」



233

第9章 保 守 管 理

9-0-1 一 般

本章で対象とする「保守管理」とは，ダム・堰・水門等に設置される取水・制水・放流設備およびこれらに関連する設備等の適切な運用と操作の信頼性および安全の確保に必要とする，日常ならびに操作時における設備の状況把握のための巡視・点検，設備の機能を保全させるための整備，およびこれらの保守管理記録をいう。

【解 説】

1. 本章は，ダム・堰・水門等の施設の管理者が，設備の操作の信頼性の確保ならびに機能保全を図るため，十分かつ適切な保守管理を行うための標準を示すものである。

保守管理は，施設・設備の目的機能を，いつでも安全確実に発揮させるという操作の信頼性の確保と，長期にわたる機能の維持・保全を図るために行うものであり，施設の運用管理にとって極めて重要なものである。このため，施設の管理者は，十分かつ適切な保守管理計画を策定し，必要な保守管理・更新等を行うなど，施設の機能維持に努めなければならない。

また，保守管理の記録は，施設の運用管理に活用しなければならない。

2. 保守管理の種類

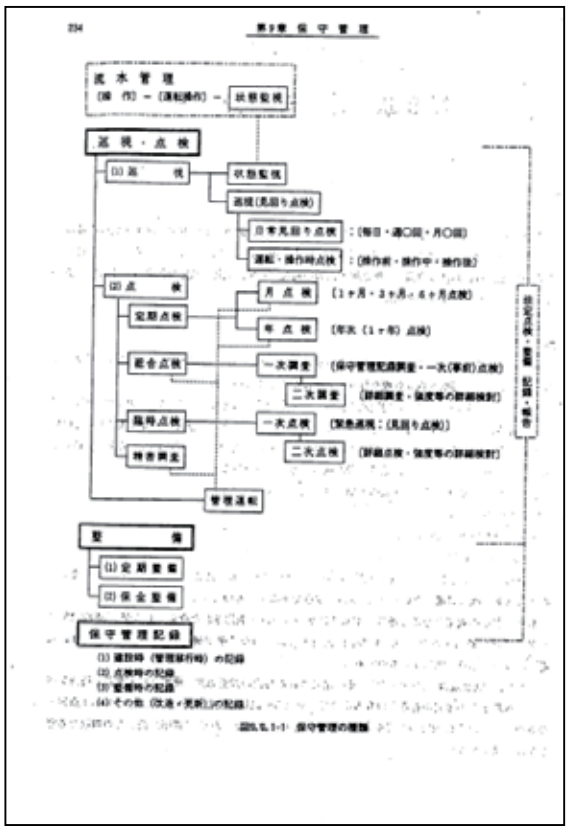
保守管理の種類を図9.0.1-1に示す。

3. 既設設備への適用

この基準の制定前にダム・堰・水門に設置された取水・制水・放流設備およびこれらに関連する設備（以下「既設設備」という。）について本章を準用するものとする。

本来，本章の適用となる設備は，本基準に基づき設計・製作された設備であるが，「既設設備」の保守管理に適用するための，本基準に相当する統一的な基準が制定されていないため，「既設設備」について本章を準用するものである。

ただし，「既設設備」については，その建設された時代の設計思想，使用材料，機器や技術レベルに，本基準との差異が有るものもあるので，それらの設備・機器については，本章で示す点検・整備のレベル以上に内容の充実や実施方法の検討も必要となるので，「標準設備」との相違を考慮しなければならない。



2.5.8 他の文献等における類義語の定義

健全性	構造物や部材全体の健全度を示す指標．耐力・耐久性など，構造物に共通する強度上の安全性に対する性能を対象とする．健全性は人間でいう体力に相当する．（鋼構造物補修・補強・改造の手引き H4/7）
健全度 soundness	構造物の機能（安全性，耐久性，使用性）および美観の保持度．直接破壊にかかわる耐荷力の保持面だけでなく，耐久性あるいは構造物としての機能面，美観上の問題を含めて総合的に評価する必要がある．（土木用語大辞典 H11/2）
構造健全性 structural integrity 構造ロバスト性 structural robustness	火災，爆発，衝撃，人的ミスの結果などによって，構造物がその本来の機能を損なうような被害を受けない能力．（ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則 H10/6）
信頼性 reliability	構造物または構造要素が所定の要求事項を満足できる能力であって，所定の要求事項には設計時に想定される供用期間も含まれる．（ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則 H10/6）

劣化 deterioration ／ degradation	鋼材，コンクリート等の材料の特性が時間とともに損なわれていく現象．劣化を引起す誘因には，化学物質，熱，光，水，荷重等があり，これらが重なり合って劣化が進む原因となる場合が多い．（土木用語大辞典 H11/2） 物理的，化学的，生物的要因により，建築物またはその部分の組織構造や特性に経時的な変化を生じ，性能が低下すること（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2） 構造物の性能と信頼性が時間経過とともに次の要因により低下する過程 －自然に起こる化学的・物理的・生物的作用 －疲労などを引き起こす繰り返し作用（荷重） －通常の，あるいは過酷な環境的影響 －使用による摩耗 －構造物の不適切な運用や維持管理の不備 （ISO13822 構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価 H13/12）
劣化度 degree of degradation	劣化による性能低下の程度（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
劣化要因 degradation agent	建築物またはその部分の劣化を生じさせる諸因子．（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
劣化原因 cause of degradation	劣化要因が作用し，建築物またはその部分に劣化現象をもたらした要因（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
損傷度	通常の経年劣化以上に急激に性能の低下する現象の度合い．変状の悪影響の度合い．主に構造物や部材の部分や局部に対する劣化の評価指標となるもの．損傷は人間でいう怪我に相当するもの．（鋼構造物補修・補強・改造の手引き H4/7）
健全度評価	
健全度診断 soundness diagnosis of structure	構造物に期待される本来の性能がどの程度保持されているかを確認すること．構造物の性能は年々変化し，これが構造物の劣化となって現れることが多い．この劣化の程度を先取りし，必要に応じて合理的な修繕措置を講じその性能を維持する．（土木用語大辞典 H11/2）
健全度判定 judgement for soundness	構造物の維持管理，補修のために行う点検から，構造物の耐久性，機能性あるいは美観上の問題も含めて行う判定．（土木用語大辞典 H11/2）
健全度判定区分 judgement classification for soundness	構造物の維持管理，補修のための点検により健全度を評価し，補修・補強の要否を判定するための損傷度に応じた区分．（土木用語大辞典 H11/2）
性能 performance	目的または要求に応じてものが発揮する能力．（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）

耐荷力 load-carrying capacity	構造物あるいは部材が実際に耐えることのできる強度で，荷重の大きさで表される．実際の部材が発揮する抵抗力には，各種の不整および材料の塑性化等の影響する断面抵抗能力だけでなく，変形能としての意味合いも兼ねる．（土木用語大辞典 H11/2）
耐荷力評価	
機能 function	目的または要求に応じてものが果たす役割．（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
機能性	
機能的寿命 functional life	構造物がその目的とする機能を果たせなくなった時点．またはそれに至る期間．その構造物に要求される機能が変化したことによって寿命と判断される場合もあり，交通量の増大による橋梁の架け替えなどがその例．（土木用語大辞典 H11/2）
耐用年数（耐用期間）	構造物または部材が供用できなくなるまでの期間．耐用年数には，機能的耐用年数，物理的耐用年数，経済的耐用年数，社会的耐用年数があり，これらのうち最小のものが施設の耐用年数となる．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 建築物またはその部分が，建築された後，劣化あるいは陳腐化により，要求性能に適合せず使用に耐えなくなるまでの年数．（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
機能的耐用年数 functional lifetime	年数が経過するうち構造物の機能が陳腐化し，まだ使用に耐えうる状態のなかで新規の機能に変更する場合の期間．社会環境の変化や技術の革新が原因となる．交通量の増大に伴う橋梁の架け替えなどがこれにあたる．（土木用語大辞典 H11/2）
残存供用期間 remaining working life	既存構造物を維持管理しながら運用することが想定されている期間．（ISO13822 構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価 H13/12）
構造性能 structural performance	安全性および使用性に関する構造物の挙動の定性的または定量的な表現（例えば，耐荷能力, 剛性, など）.（ISO13822 構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価 H13/12）
安全性 safety	想定した作用に対して構造物内外の人命の安全等を確保できる能力であり，終局限界状態と関連付けて定義される．（土木・建築にかかる設計の基本 H14/10）
安全性能	構造物が破壊して人命などが失われることのない性能．埠頭の場合には，桟橋上部工，桟橋下部工および鋼矢板岸壁・護岸で，荷役荷重を支持できる性能と言い換えることができる．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）
終局限界状態 ultimate limit state	部材の破壊，大変形や力の釣合いの喪失等により，その安定性が損なわれず構造物内外の人命に対する安全等を確保しうる限界の状態．（土木・建築にかかる設計の基本 H14/10）
使用性 serviceability	走行性，機能性．ある分野に対する特別な能力，特定の性能に対する使用性能を対象とするもの．特定性能に対する「適正」の度合いを評価するもの．（鋼構造物補修・補強・改造の手引き H4/7） 想定した作用に対して構造物が使用上の不都合を生ぜず，適切に機能できる能力であり，使用限界状態と関連付けて定義される．（土木・建築にかかる設計の基本 H14/10） 構造物あるいは構造要素が考えられるあらゆる作用のもとで，通常の使用に対して機能できる能力．（ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則 H10/6）

使用限界状態 serviceability limit state	構造物に要求される使用性を損なわず，目的とする機能が確保される限界の状態．（土木・建築にかかる設計の基本 H14/10）
使用性能	構造物の使用性および機能性に関する性能．埠頭の場合には桟橋上部工，鋼矢板岸壁・護岸，ヤードなど直接荷役車両や作業者が動く部分で，荷役作業がスムーズに行える性能と言い換えることができる．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社 H15/3）
耐用性	耐力と耐久性を総称したもの．（鋼構造物補修・補強・改造の手引き H4/7）
耐久性 durability	物質の保護，美装など，塗料の使用目的を達成するための，塗膜の性質の持続性．（鋼道路橋塗装・防食便覧塗装編 H17/7） 品質の経時劣化が小さく，所要の供用期間中に要求される性能を持続しうる能力．（土木用語大辞典 H11/2） 構造物の経時的な性能低下に対する抵抗性．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 全体建築物またはその部分の劣化に対する抵抗性（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
耐用性 durability	建築物またはその部分が，それに要求される機能を，劣化要因の影響を受けながら設計耐用年数を通じて果たす能力．耐久性能ともいう．建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
陳腐化 obsolescence	社会的，技術的情勢の変化により，建築物またはその部分の機能，性能などの相対的価値が低下すること（建築物の改修の考え方・同解説 H14/2）
耐久性能	構造物の要求性能を供用期間内に維持する性能．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）
耐久限界状態 durability limit state	環境作用の影響に伴う損傷で発生する限界状態．（土木・建築にかかる設計 H14/10）
耐候性 weather resistance	低合金鋼などが自然環境の大気中での腐食に耐える性質． 屋外における風雨，日照，温度変化，乾湿等の自然現象に対する長時間にわたる材料の抵抗性能．（土木用語大辞典 H11/2）
腐食 corrosion	金属がそれをとり囲む環境物質によって，化学的または電気化学的に侵食されるかもしくは材質的に劣化する現象．（JIS，鋼道路橋塗装・防食便覧共通編 H17/7） 通常は，鉄または鋼の表面にできる水酸化物または酸化物を主体とする化合物．広義では，金属が化学的または電気化学的に変化して表面にできる酸化化合物． （鋼道路橋塗装・防食便覧塗装編 H17/7） 地盤中に鋼材がおかれた場合，PH，塩類含有量，酸素濃度，最近の活動度等の因子により鋼材と土との間で電流が流れた結果，鋼が溶出する現象．（土木用語大辞典 H11/2）

腐食対策 protection method for corrosion	防食のために施す処置のこと．（土木用語大辞典 H11/2）
耐食性 corrosion resisitance	金属が腐食に耐える性質．（JIS） ある環境における腐食作用に耐える性質．（JIS）
防食 corrosion protection	金属が腐食するのを防止すること．（JIS） 金属が腐食するのを防止すること．さびの発生により母材の金属が侵食され，部材が損傷するのを防止すること．損傷として認めない範囲である程度のさびの発生を許容している．（鋼道路橋塗装・防食便覧共通編 H17/7） 構造物等がその供用期間中に重大な損傷を生じないように，腐食を防止あるいは抑制すること．自然環境中におかれた鋼材は，環境の作用により化学的または電気化学的反応で腐食する．（土木用語大辞典 H11/2） 防食とは，塗装，電気防食等により鋼構造物の腐食を防ぎ，設備の延命および機能確保を図ることをいう．（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
さび rust	鉄表面に生成する水酸化物または酸化物を主体とする化合物．広義には，金属表面にできる腐食生成物をいう．（鋼道路橋塗装・防食便覧共通編 H17/7）
腐食生成物 corrosion product	腐食によって生成した物質．通常は固体物質を指し，金属表面に付着するかまたは環境中に分散して存在する．（JIS）
防せい（錆）	金属にさびが発生するのを防止すること．（JIS, 鋼道路橋塗装・防食便覧共通編 H17/7） 鋼材のさびを防ぐこと．（土木用語大辞典 H11/2）
腐食度 corrosion rate	ある期間に生じた単位面積あたりの腐食量をその期間で除して求められる量．（JIS） 腐食減量を単位時間，単位面積あたりで表した値．（JIS）
腐食防食試験 corrosion test	
腐食減量 mass loss	腐食試験後，表面に付着した腐食生成物を取り除いた試験片の質量減，または単位面積あたりの質量減（JIS）

点検	構造物の現状を把握する行為の総称．本マニュアルでは，あらかじめ実施時期を設定した点検・すなわち初期点検，日常点検，定期点検および台風や地震時などで劣化や変状が予測されるときに行う臨時点検を一次点検としている．一次点検によって劣化が確認された場合には,その原因や対策を検討するために二次点検を行うことになる．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 点検とは，巡視（定期，不定期），目視，計器等による設備の異常・損傷の発見，機能の良否の判定，処置方法の立案およびその記録作成までの一連の作業をいう．（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11） 点検とは，機械設備の損傷ないし異常の発見，機能良否等の確認および記録をいい，それらについては目視，機器等による計測，作動テスト等により行い，点検記録作成までの一連の作業を言う．（ゲート点検・整備要領（案））H17/1） 構造物の現在の状況を確定するために現場で行われる非破壊検査．（ISO13822 構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価 H13/12）
一時点検	目視による変状の有無またはその程度の確認および劣化予測を行うための点検．目視による変状の有無またはその程度の確認は日常点検，定期点検および臨時点検において管理者が行い,劣化予測のためのデータ収集は定期点検において専門技術者が行う．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）
初期点検（初回の定期点検）	体系的な維持管理を始めるときの最初に行われる点検で,本マニュアルでは最初の定期点検と位置付けている．新設構造物では竣工時,供用中の構造物では体系的な維持管理を開始するとき,大規模補修された構造物では補修直後の'竣工検査において,当初予定していたものができていることの確認あるいは調査データを収集して劣化予測を行うことを目的に実施する点検である．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社 H15/3）'
日常点検（一時点検）	構造物の管理者がユーザーヒアリングや目視(巡回)によって行う点検．点検は定性的な範囲にとどまるが,頻繁に行えることから変状の発生を早期に把握することができる．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）
定期点検	近接目視または機器測定で構造物の損傷等の状況を定期的に把握する点検．（首都高速道路公団管理基準） 定期点検とは，設備の損傷ないし異常の発見，機能良否等の確認および記録を定期的に実施することをいい，原則として毎月１階実施するものを月点検，毎年１回実施するものを年点検という．（ゲート点検・整備要領（案））H17/1）
定期点検（一時点検）	劣化の進行予測に応じて,劣化の進行の有無を目視によって一定期間で確認する点検．維持管理の優先度が高い桟橋上部工,桟橋下部工,鋼矢板岸壁・護岸ではボートなどによって施設の変状の有無を確認するとともに,目視調査できない部分(コンクリート内部の劣化進行や海中部など)は,数回の定期点検に一回の割合で，試料採取や潜水士などによる詳細調査（一次）も実施する．泊地も目視による調査ができないので，深浅測量を行う．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）

二次点検	一次点検の結果として変状が確認された場合に,専門技術者によって劣化原因,劣化予測および対策の必要性を検討するための点検．桟橋上部工では足場の設置,下部工や鋼矢板岸壁・護岸では潜水作業が必要となる．ヤードでは埋設物などの損傷が原因となって発生した地表面の劣化に対して,その原因と対策を検討するたあの点検となる.（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）
臨時点検	日常点検における巡回目視またはユーザーヒヤリングから変状が推測される場合，または地震や台風または船舶の衝突など不測の事態が発生した場合に行う点検. 臨時点検の結果によって，二次点検の必要性の有無,補修の要否,維持浚渫の必要性を判断する．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 臨時点検とは，異常気象・地震・大洪水・その他の要因により機器等に異常が生じたと懸念される場合に速やかに実施する点検をいう.（ゲート点検･整備要領(案)）H17/1）
補修	修復と補強からなる.（道路橋補修便覧 S54/2） 公社が管理する施設では，部材や構造物の耐久性を回復もしくは向上させることであり，劣化速度を遅くする対策.（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 損傷の修正，機器の調整もしくは消耗品の交換といった正常な機能の維持を目的としたことをいう.（ゲート点検・整備要領（案））H17/1）
修復	既設橋に生じた破損を直し，もとの機能を回復させることを目的とする補修をいう.（道路橋補修便覧 S54/2）
整備	整備とは，設備の機能維持のために定期的に，または点検結果に基づき適宜実施する清掃，給油脂，調整，修理，部品取替およびその記録作成までの一連の作業をいう.（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11） 整備とは，機械設備の機能維持のために定期的または，点検結果に基づき実施する調整，給油，部品交換およびその整備記録作成までの一連の作業を言う.（ゲート点検・整備要領（案））H17/1）
修理	修理とは，劣化，破損した部材・部品等の機能・性能を実用上支障のない状態まで回復させることをいう.（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
修繕	修繕とは，機器の部品交換等といった機能回復を目的としたことをいう.（ゲート点検・整備要領（案））H17/1）
機能回復	機能回復とは，故障，破損等により機能低下した設備を整備，更新等により機能復旧させることをいう.（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
機能維持	機能維持とは，回復困難な故障を防止し，発錆による設備の劣化やグリス等の固着による事故を防ぐことにより，設備機能を維持することを言う.（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
補強	既存の補修にあたってもとの機能以上の機能向上を図るような場合，また，特に破損がなくても，積極的に既設橋の機能向上を図るべく，手を加える場合をいう.（道路橋補修便覧 S54/2） 部材，構造物の耐荷性や剛性などの力学的な性能を回復もしくは向上させることを目的とした対策.（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3）

更新	耐荷力や剛性等の性能低下が大きい部材や，構造物を撤去して新たな部材や構造物を作り直すことによって必要な性能を満足させる対策．（土木施設維持管理マニュアル；東京埠頭公社　H15/3） 更新とは，経年的な劣化，または破損した設備および機器等を新品に取替えることをいう．（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11） 更新とは，経年的な劣化または，破損した機器などを新品に取り替えることをいう．（ゲート点検・整備要領（案））H17/1）
取替	取替とは，経年的な劣化，または破損した部品等を取替えることをいう．（「交換」と同意語）．（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
改造	改造とは，設備，機器等を機能の追加，または改良を伴って更新することを言う．（機械設備管理指針；水資源機構 H15/11）
修復性 restorability	想定した作用に対して技術的に可能でかつ経済的に妥当な範囲の修繕で継続的な使用を可能とすることができる能力であり，修復限界状態と関連付けて定義される．（土木・建築にかかる設計の基本 H14/10）
修復限界状態 restorability limit state	損傷後，適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば，継続使用を可能とすることができる限界の状態．（土木・建築にかかる設計 H14/10）

【参考文献】

1)　（財）鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，平成 4 年 7 月
2)　（社）土木学会：土木用語大辞典，平成 11 年 2 月
3)　東京埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，平成 15 年 3 月
4)　日本工業規格
5)　（社）日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧共通編，平成 17 年 12 月
6)　（社）日本道路協会：道路橋補修便覧，昭和 54 年 2 月
7)　国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，平成 14 年 10 月
8)　（独）水資源機構：機械設備管理指針，平成 15 年 11 月
9)　（社）日本建築学会：建築物の改修の考え方・同解説，平成 14 年 2 月
10)　ISO2394：構造物の信頼性に関する一般原則，平成 10 年 6 月
11)　ISO13822：構造物の設計の基本－既存構造物の性能評価，平成 13 年 12 月

3　計測技術

3.1 腐食形状の一般的な傾向と分類

腐食した部材の腐食程度，残存板厚などを計測する技術には様々なものがあるが，計測の精度，適用性などを検討し適切な計測法を選択するためには，対象となる腐食形状の一般的な特性を知っておくことが有益である．そこで本節では，計測技術の解説に先立ち，腐食形状の一般的な傾向と分類についてとりまとめる．

3.1.1 一般

大気，土壌，海洋など，鋼構造物が建設される環境で生じる腐食現象は，ほとんどが水と酸素と電解質の下で生じる水溶液腐食（湿食）に区分される．水溶液腐食は，材料および環境の均一でありこれが長期に渡り保たれる場合には，均一腐食に分類される形態をとるが，その浸食は，必ずしも均一ではなく，様々な要因によって不均一な形状になる．不均一になる要因を大別すると，

1）材料に起因するもの
2）環境に起因するもの
3）上記，1)，2)が，それぞれ施工によって，形成されるもの

に分けられる．

材料に起因するものとは，２種以上の金属を接触させることにより材料に電池を形成するものである．このとき電池が一つの材料に内在する現象が，合金に見られる「脱成分腐食」や「ミクロセル腐食」である．一方，施工の際，異なる材料を接触させることによって電池を形成する現象が，「異種金属接触腐食」である．溶接部の腐食やマクロセルなどがこれにあたる．

環境に起因するものとは，環境（水溶液，土壌）側が不均一になることによって，電位差を生じるものである．土壌埋設管において，管が土質の異なる部分にまたがる場所や，海洋構造物において，干満帯と海中との間で通気性が異なる場所などで見られる現象が，酸素濃淡電池形成による「通気差腐食」である．このとき腐食は，通気性が悪い側，すなわち酸素の供給が遅い側で生じる．一方，ステンレスなどがすきま構造を形成する部位で，すきま内部の酸素が腐食により消費された結果，生じる腐食は，「すきま腐食」と呼ばれ，施工によって酸素の濃淡を生じる例である．

以上の腐食現象は，局所的，かつ施工後比較的早く生じるため，耐荷性能に大きな影響を及ぼしうる．それゆえ，すでに命名されていることからもわかるとおり，腐食機構が解明され，材料・設計の各種規格，あるいは防食工法に数多く反映されてきている．(海洋鋼構造物や，陸上鋼構造物の腐食形状の具体例は，後述の3.2.2，3.2.3を参照されたい．また防食工法については，本書「防食技術の現状と課題」の1．防食技術を参照されたい.)

ところが，実構造物では，上述したような腐食機構が働かない場合でも，軽度の環境の不均一さが，長期間後には不均一な腐食形状を生じさせてしまう場合がある．例えば，

・構造物の形状によって生じる部分的な環境の不均一さ

・雨がかり，日当たりなど気象条件の違いによって生じる環境の不均一さ
・防食被覆および，その劣化の不均一さ
・付着塩分（海塩，凍結防止剤）量の不均一さ

などである．

このような腐食の不均一さは，建設後の環境，使用方法の影響を大きく受けるため，当初から対策をとることは難しい．残存耐荷性能を評価するためには，建設後，物件に応じて点検時に，本章で紹介する手法などにより腐食状況を計測，定量化することが重要である．

3.1.2 橋　梁

(1) 腐食の分類

鋼道路橋の腐食については、「鋼道路橋塗装・防食便覧：平成 17 年 12 月，社団法人日本道路協会」では，図 3.1.1 のように分類している．

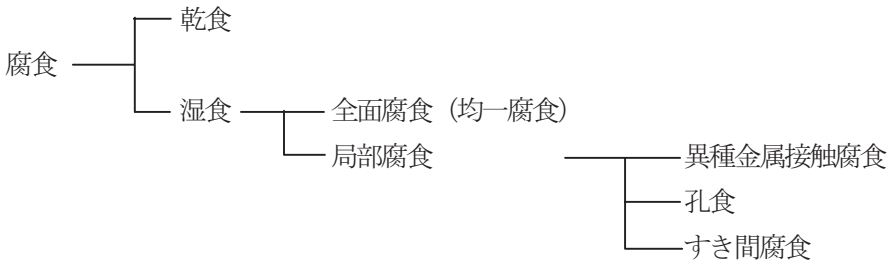


図 3.1.1 腐食の分類（鋼道路橋）

腐食の種類を「乾食」と「湿食」に大別している．「乾食」は高温状態で環境中の物質と反応して生じる腐食で，そのほとんどが酸化物生成反応である．乾食の代表的な例は，圧延時鋼材表面にミルスケールが生成する現象である．乾食は常温ではその進行速度は非常に遅い．供用中の鋼道路橋に発生する通常の腐食は，湿食である．湿食は常温状態において水と酸素の存在下で生じる腐食で，鉄がイオン化して水の中へ溶解する電気化学的反応である．

湿食の中で，全面腐食と局部腐食に分類している．全面腐食は，金属表面状態が均一で均質な環境にさらされている場合に生じ，全面が均一に腐食する現象である．鋼橋の事例としては，被覆防食における点さびやエッジ部の腐食などは，暴露されている部分の全面が腐食しており，全面腐食に分類される．なお，一般に全面腐食の進行速度は非常に遅く，腐食が生じ始めてから短期間で構造物に重大な悪影響を及ぼす状態となることは少ない．

局部腐食は，金属表面の状態の不均一あるいは環境の不均一により腐食が局部に集中して生じる現象であり，腐食される場所が固定されるため，腐食速度は全面腐食に比べて著しく増大する．一般に鋼道路橋での腐食による損傷が問題となるのは局部腐食である．局部腐食の代表的な例としては，異種金属接触腐食，孔食，すき間腐食がある．

異種金属接触腐食は，電位の異なる金属が接触し，そこに電解質溶液が存在すると金属間に腐食電池が形成され，卑な金属が酸化され腐食する現象である．代表的な例としては，普通鋼にステンレス鋼が接触し，そこに電解質を含んだ雨水等の水分があると，電位がより卑な金属である普通鋼は著しく腐食する場合などである．

孔食は，金属が表面から孔状に侵食される腐食現象である．ステンレス鋼などの不働態皮膜を形成した金

属に発生し易く，皮膜が塩化物イオンによって局所的に破壊され，そこがアノードとなり腐食が進行し，孔が形成される現象である．

すき間腐食は，金属どうしの接触部でのすき間部分の金属が腐食される現象である．すき間内部での酸素イオン濃度の減少により，すき間内外で濃淡電池が形成され，外部がカソード，酸素の少ない内部がアノードとなって腐食が生じ，進行するにつれて鉄イオンや水素イオンが蓄積して塩分濃度の増加と pH の低下が進むため腐食は一層加速される．

局部腐食には，上記以外に粒界腐食，応力腐食割れ，選択腐食，擦過腐食，微生物腐食，迷走電流腐食などがある．

(2) 腐食事例

鋼橋の腐食事例として，全面腐食と局部腐食を写真3.1.1に示す.

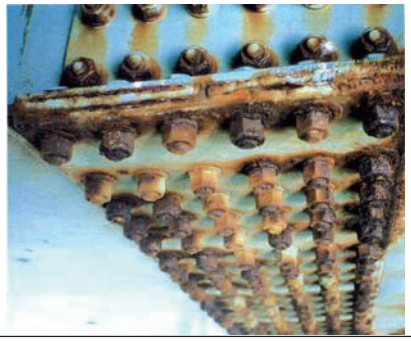
全面腐食		
	箱桁下フランジの腐食	支点近傍ウェブの腐食
		
	端対傾構の腐食	支承の腐食
局部腐食		
	横桁ウェブの腐食	箱桁桁端部の腐食
		
	支点部下フランジの腐食	ボルト添接部の腐食

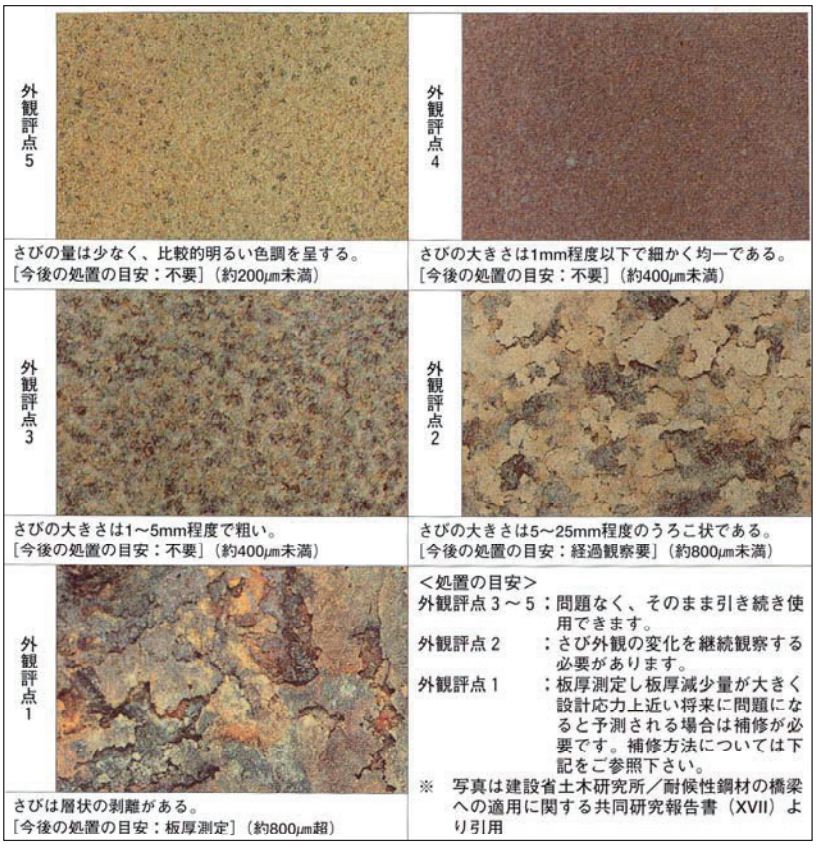
写真3.1.1　鋼橋の腐食事例

(3) 耐候性橋梁の腐食の分類

耐候性鋼材のさびの状態は腐食環境に依存して変化する．厳しい腐食環境条件においては，保護性さびが形成されず，腐食減耗が拡大する．耐候性鋼材を用いた橋梁では，その利便性からさび外観評点により分類している．表3.1.1にさび外観評点とさびの状態を示す．

表3.1.1　さび外観評点とさびの状態

評点	さびの状態（例） （表層さびの粒子の大きさと外観）
5	1) さび粒子は細かいが，均一性に欠ける。 2) さびの色は，明るい色相で，むらがある。 3) 若いさびの状態。環境が非常に良い場合では長期間にわたりこの状態が続く。 4)さび層の厚さは 200μm 程度未満である
4	1) さびの平均外観粒径は 1mm 程度で細かく均一である。 2) さびの色は，暗褐色でむらがない。 3) 腐食速度は微小の領域に達している。 4) さび層の厚さは 400μm 程度未満である
3	1) さびの平均外観粒径は 1～5mm 程度である。 2) さびの色は，褐色～暗褐色でむらは少ない。 3) 腐食速度は微小の領域に達している。 4) さび層の厚さは 400μm 程度未満である
2	1) さびの平均外観粒径は 5～25mm 程度のうろこ状である。 2) さびの色は，環境によって様々である。 3) さび層の厚さは 800μm 程度未満である
1	1) さびが層状で厚いか，はくりがある。 2) さびの色は，環境によって様々である。 3) さび層の厚さは 800μm 程度を超える



暴露９年目の試験片について，さび外観評点ごとの平均板厚減少量と腐食速度の関係を示したものが図3.1.2 である．平均板厚減少量は，暴露試験片のさびを除去して重量減少量を測定し，これから平均板厚に換算したものであり，腐食速度は回帰式から９年目の年間平均板厚減少量（mm／年）を求めたものである．なお，さび面には凹凸があり，最大板厚減少量はこれよりも大きい．

図3.1.2 より，９年目で外観評点１（層状はくりさび）の場合，板厚減少量が 0.5mm以上となるものが多く，外観評点３，４，５の場合、板厚減少量は，0.1mm程度である．外観評点２のうろこ状さびの場合，板厚減少量は最大でも 0.3mm程度である．

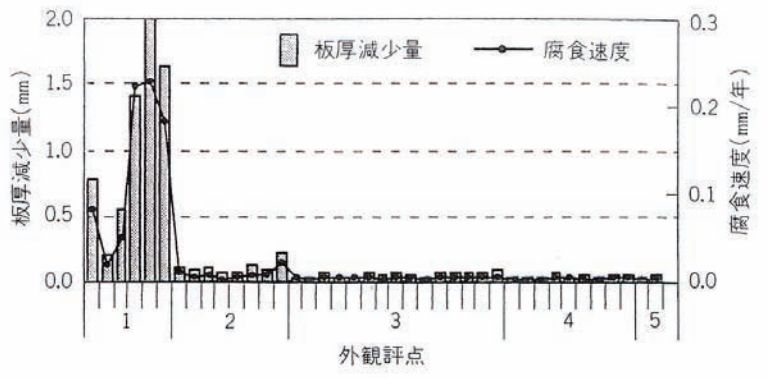


図3.1.2　さび外観評点と片面あたり平均板厚減少量・腐食速度の関係（暴露９年目）

耐候性橋梁の建設後の経過年数と片面当たり板厚減少予測値を図3.1.3 に示す。飛来塩分量が 0.05mdd 以下の場合、腐食速度は非常に小さく、100 年後で板厚減少量は 0.3㎜ 程度である。

暴露９年目の試験片について，飛来塩分量と板厚減少量の関係を図3.1.4 に示す。耐候性鋼材では飛来塩分量が多い場合、板厚減少量も大きく、層状剥離さびも生じ易いことがわかる。

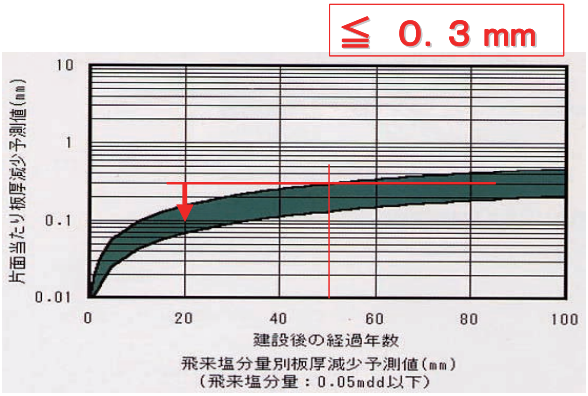
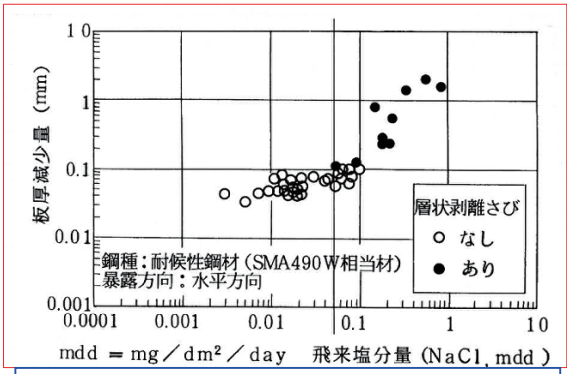


図3.1.3　耐候性鋼の板厚減少予測



- 暴露9年目
- 飛来塩分「0.05mdd（許容値）以下の場合
  - ①層状剥離さびは見られない
  - ②50年後の推定板厚減少量が概ね0.3mm以下
- 板厚減少量は片面（両面の平均値）

図3.1.4　板厚減少量と飛来塩分量

耐候性橋梁の腐食事例を写真 3.1.2 に示す.

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>桁内のさびの状態
・風通しが悪く、内面全体に層状剥離さびが発生している。定期的に塩分が流されない状況であり、塩分によるさびの助長作用が旺盛である。</td><td>桁端部のさびの状態
・層状さびが激しく、断面減少が見られる。
・補修を必要とする状態である。</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>箱桁下フランジのさびの状態
・さび安定化処理被膜が剥がれた箇所にふじつぼ状のさびが発生。</td><td>主桁下フランジ上面のさびの状態
・うろこさびが発生。</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>主桁下フランジ下面のさびの状態
・うろこさびが発生。</td><td>主桁ウェブの下フランジ近傍のさびの状態
・うろこさびが発生。</td></tr>
</table>

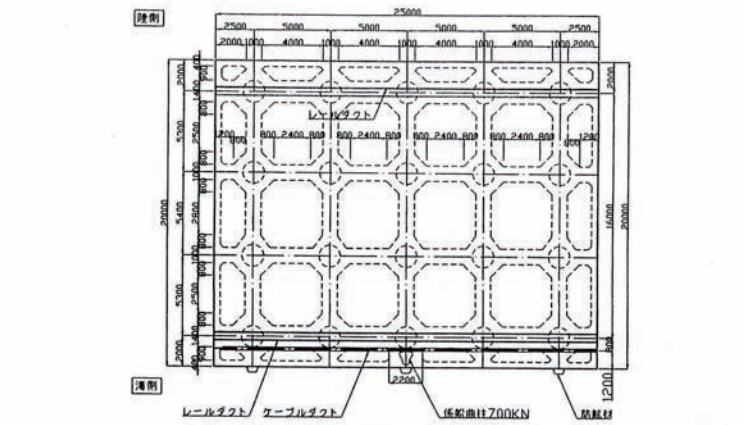
写真 3.1.2　耐候性橋梁の腐食事例

3.1.3　水中構造物

(1) 港湾鋼構造物の腐食環境区分とその特徴

海域を上方の大気中から垂直下方に向けて切断し，その断面を比較すると金属の腐食に対して全く違う影響を与える腐食環境が幾つも存在する．鋼管杭のように大気から海底土中まで連続する構造物の腐食傾向を見ると，海洋の腐食環境は上方から垂直下方に向って，海上大気部，飛沫部，干満部，海底土中部の５種類におおよそ区分される．海水が海域による変化の少ない腐食環境であるのに対し，海洋大気部や干満帯の腐食環境は極地と赤道付近の海域を比較すると，大きく異なっている．以下，海上大気部から海底土中央部まで５種類に区分される海洋腐食環境の特徴について簡単に説明する．

ここで，一般的な港湾構造物として港湾構造物設計例から図 3.1.5 に示す鋼管直杭式桟橋をとりあげ，環境区分と構造物部位の名称を示す．



海上大気部

飛沫帯・干満帯

水中部

土中部

図 3.1.5 港湾構造物の例

a) 海上大気部

海上大気にさらされた金属の腐食速度は，飛来する海塩粒子やミストの量により著しく変化する．金属

の表面に析出する海塩粒子の量は，波浪，風向，降雨，気温や湿度，日光の照射量また海面からの距離などの因子が複雑に影響することによって増減を生じる．例えば亜熱帯に属する沖縄県宮古島海岸の海塩粒子量は，千葉県銚子港の倍程度に達する．海塩粒子のなかでも，塩化マグネシウムや塩化カルシウムなどの潮解性の強い成分は金属の表面に付着すると，周囲から水分を吸収し，金属面に水膜を形成し易い．

b) 飛沫帯

飛沫帯は海水面の直上に当るので，構造物にぶつかり砕ける海水の飛沫を浴びる部位である．この環境に位置する金属の表面は，十分に酸素を含む薄い水膜に覆われ，常に濡れた環境にある．生物の付着は起こらないことのほうが多い．海洋構造物の腐食検討を行うに当っては，飛沫帯より上部を海上部，また干満帯より下部を海中部と呼ぶこともある．

c) 干満帯

干満帯では海水面の潮汐(干満)が規則的に生じる．海水の潮汐する範囲は特に海域により大きく変化する．海域により種類や生息密度は異なるが，海洋生物の付着量は多い．

塗装などの防食被覆にとっては，流木の衝突や船舶から流出した油の付着など予期せぬ劣化原因の多い環境である．

d) 海水中部

金属が海水に常に浸されている環境である．水深により温度や溶存酸素濃度，また塩分濃度などは変化する．海域によっては生物付着の状況が異なり，汚染物質が存在することもある．金属は鋼のように酸素消費型カソード支配の条件で腐食するか，チタンのように不動態化するかのいずれかである．

e) 海底土中部

海底土中部は抵抗率が大きければ，陸上部の土壌とほぼ同様の腐食環境と考えてよい．海底土中にバクテリアが繁殖していると，硫化水素，アンモニア，メタンなどが発生する．特に，嫌気性の硫酸塩還元バクテリアが存在すると，硫酸塩を還元して硫化水素を生じる．

(2) 海洋鋼構造物の腐食形態別環境区分と腐食速度

a) 港湾鋼構造物の腐食形態と腐食速度

海洋環境下で防食された鋼構造物の腐食形態は，陸上の橋梁等の鋼構造物とは，異なった形態を示す．様々な防食工法及び使用環境の違いにより，一般的な全体腐食に加えて，マクロセルによる局部腐食（孔食）や浮遊物の衝突による防食工のダメージやサンドエロージョンによる磨耗等が発生し，防食工の劣化および鋼構造部の板厚減少が見られる．

図3.1.6は，海洋の腐食環境にまたがる板厚減少のプロフィールとして，鋼材の腐食速度を模式的に示したものである．鋼管杭や鋼矢板を用いる護岸などの港湾構造物は，海上大気部から海底土中部まで連続体であり電気的に一体と見なすことができる．このような構造物の腐食速度は飛沫帯が最も大きく，ついで干満位置下付近，海水中，干満帯，海上大気部の順に減少する．

飛沫帯に位置する鋼材の腐食速度は海水の飛沫により形成される薄い水膜を通して酸素が十分に供給されるので，非常に大きな値を示す．これに対して，海水面の干満が生じる厳しい環境腐食にもかかわらず，干満帯に位置する鋼材の腐食速度は小さい傾向にある．この理由は，海水の表層部分（干満位置下部）と干満帯との間に形成される腐食電池の影響と考えられている．干満帯に位置する鋼材に供給される酸素量は，海水表層部に比較すると接している大気と海水との酸素分圧の違いを反映して，はるかに大きい．

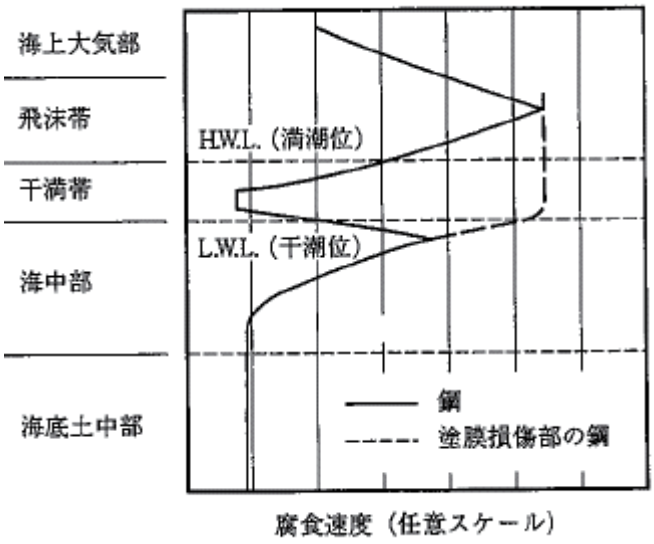


図 3.1.6　海洋環境に暴露した鋼材の腐食傾向

b）酸素濃淡電池による集中腐食

酸素供給量の大小により環境にまたがる腐食電池（酸素濃淡電池とも呼ぶ）が形成される．この腐食電池において，干満帯に位置する鋼材は，カソードとして作用する．その結果，干満帯に位置する鋼材は海水表層部の鋼材を犠牲陽極とする電気防食作用をうけているに等しい状態になるので，その腐食速度は抑制される．一方，海水表層部（干潮位直下部）に位置する鋼材は，アノードとして作用するので，その腐食速度は大きい．港湾関係では，後者の干潮位直下部に生じる局部腐食を「集中腐食」と呼ぶ．

図 3.1.7 は，裸の鋼管杭と塗装した鋼管杭とを実海域に５年間暴露して得られた鋼の腐食板厚プロフィールの測定例である．裸の鋼管は，図 3.1.6 に示した模式図とほぼ類似した板厚減少傾向を示す．ところが，塗装鋼管杭の塗装損傷部において，損傷により露出した鋼材の腐食速度は，干満帯部分では大きく，裸の鋼管と著しい対照を示す．

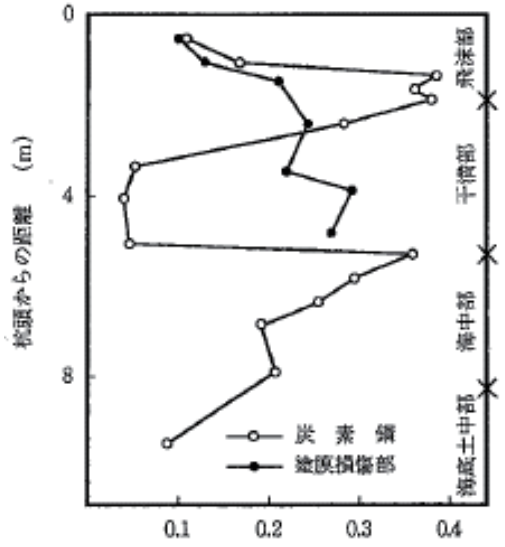


図 3.1.7 鋼管杭の腐食板厚減少速度

この理由としては，塗膜が電気の不良導体であることが挙げられる．干満帯の塗膜が損傷を受けて露出しても,海水表層部の塗膜が健全に残っておれば,これら二つの環境にまたがる腐食電池は形成しにくい．そのため，干満帯の塗装損傷部で露出した鋼材は，この環境にのみ暴露された小型のテストピースと同様に本来は厳しい干満帯の腐食特性に応じて腐食するので，大きな腐食速度を示す．表3.1.2は，港湾構造物を用いて測定された鋼材の腐食速度を海洋腐食環境別にまとめたものである．

表3.1.2 港湾構造物に用いた鋼材の腐食度

環境	試験材の形状	測定データ数	腐食速度 (mm/y)
海上大気部	腐食試験片	19	0.128
	平均	19	0.128
飛沫帯	鋼矢板	8	0.112
	鋼管杭	1	0.25
	H型鋼杭	2	0.198
	腐食試験片	16	0.363
	平均	27	0.272
干満帯	鋼矢板	35	0.044
	鋼管杭	4	0.070
	H型鋼杭	2	0.055
	腐食試験片	27	0.137
	平均	68	0.083
L．W．L	鋼矢板	42	0.047
	平均	42	0.047
海中部	鋼矢板	59	0.039
	鋼管杭	5	0.062
	H型鋼杭	3	0.049
	腐食試験片	61	0.143
	平均	128	0.090
海底土中部	H型鋼杭	2	0.033
	腐食試験片	3	0.103
	平均	5	0.075

(3) 海洋環境下の腐食形態の分類法（港湾維持管理基準，石油協会基準，道路公団基準；耐候性鋼材）

港湾鋼構造物に発生する腐食は，全面腐食と局部腐食に分けられる．使用される環境や条件または鋼の種類により鋼の腐食形態は異なるが，その分類基準や定量的表示法はまだ確立されていない．しかし，多種の金属材料や配管等の多用途で使われる石油プラント等と比べて，港湾鋼構造物の部位に利用されている鋼種は，普通鋼と低合金鋼がその大部分であり，発生する腐食のパターンや種類は，それほど多くはない．

港湾鋼構造物防食・補修マニュアルで参考にされている，A.Chanmpion が提案した金属の腐食の分類及び形態を表3.1.3，図3.1.8に示す．

表 3.1.3 鋼の腐食の分類

A	General Corrosion（全面腐食）	
	1）Even（腐食がほぼ平坦）	
	2）Uneven（腐食面が凸凹）	
B	Local Corrosion（局部腐食）	
	1）Even（限られた腐食面内平坦）	
	2）Uneven（限られた腐食面内が凸凹）	
	3）Pitting（孔食）	a. Wide（広がり/ 深さ≦6 ）
		b. Medium（広がり/ 深さ ≦1 ）
		c. Narrow（広がり/ 深さ≦1/4 ）
	4）Cracking（割れ）	

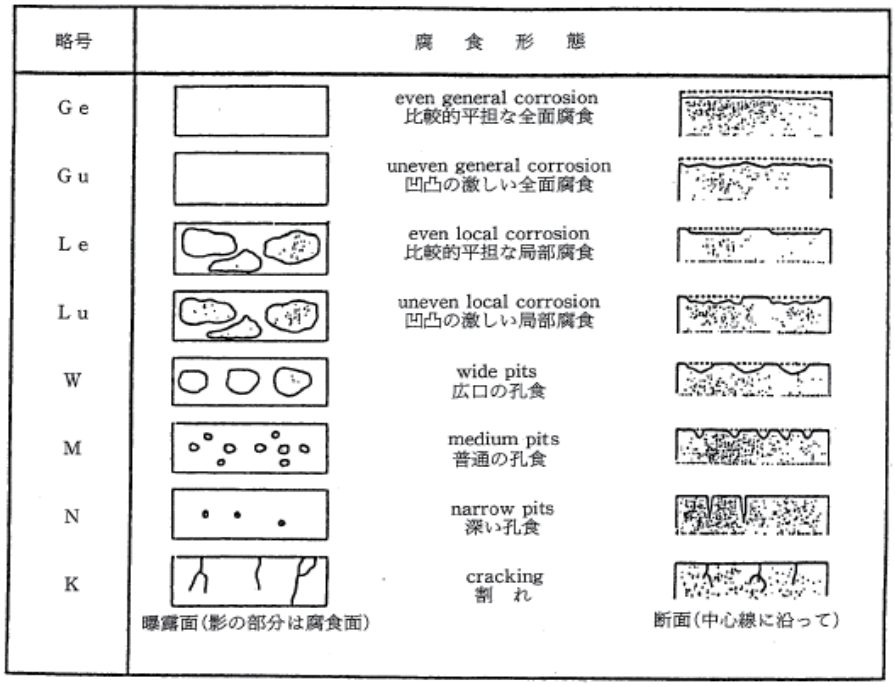


図 3.1.8 鋼の腐食形態

金属の腐食形態は，大きく全面腐食と局部腐食の２種類に分かれる．全面腐食は，腐食環境にさらされた鋼がほぼ均一に減肉する腐食であり，また局部腐食は腐食環境にある鋼の特定部位に深い侵食を発生させる腐食を意味する，この分類では腐食の形態のみを扱い，腐食の原因とは区別している．たとえば，Cracking（割れ）形態を示すに至る鋼の腐食原因には，各種の応力腐食割れ，腐食疲労，水素脆性などが考えられる．表では，Pitting（孔食）を３種類に分類しているが，港湾鋼構造物のばあいは（広がり）/（深さ）≦6 の範囲に入る皿状の形態が多く，孔食と呼ぶよりはむしろ表中の局部均等腐食または，局部凸凹腐食に分類しうる局部腐食に近い．

(4) 海洋・港湾構造物の腐食形態に関する研究

従来，港湾鋼構造物の腐食劣化の研究では，前項に記したような腐食環境区分別に，腐食形態の目視観察による分類や，超音波板厚計測器による残存板厚の計測および経年暴露試験体による残存板重量測定により，マクロ的な腐食速度および劣化形状観察を行ってきた．

一方，近年維持管理上の経済性や性能信頼性設計への取り組みが重要視されてきたなか，経年腐食劣化した部材の，最終強度に与える影響について着目し，腐食形状についてもミクロ的に調査し，積極的に残存強度を検討する研究がなされてきている．その中で，すでに学会等で紹介されている，海洋・港湾鋼構造物の腐食形態の研究資料のなかから，鋼材部材の腐食表面形状について報告されているものを整理した．

ここでは，環境区分全体にわたって調査したもの，及び環境区分ごとに分類した調査結果ついて，それぞれの腐食形態に対する特徴と，実際の港湾・海洋鋼構造物及び模擬試験体の腐食形状調査結果として記述する．

a) 環境区分による腐食形態の差を調査したもの

① 出典：山沢哲也，渡邊英一，野上邦栄，杉浦邦征，伊藤義人，藤井堅：19.5 年間海洋曝露した鋼材の腐食計測，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.59-60, 2005.

土木学会構造工学委員会「沿岸環境における鋼・複合構造物の防食および耐久性評価に関する研究小委員会」（(社) 鉄鋼連盟委託研究）での活動の一部であり，製鉄所岸壁港湾に 19 年間設置された鋼管杭の調査記録である．表 3.1.4 および写真 3.1.3 に示すような試験体（鋼管杭：外径 406.4㎜，板厚 9㎜，全長 10m）を調査した結果，曝露開始後の早期の腐食速度が大きく 10 年経過後はほぼ一定の腐食速度となったこと（図 3.1.9），腐食損傷の激しい部分は飛沫帯であり（図 3.1.10），その年平均腐食速度は 0.4㎜/ 年程度であること（図 3.1.11），次いで海中部、干満帯の順の腐食速度となっていること，などが報告されている．

表 3.1.4 試験体諸元

鋼種	試験体No.	採取位置 (mm)	
STK50	1	飛沫帯	DL +2700 ～ +3900
	2	干満帯	DL + 500 ～ +1700
	3	海中部	DL －1500 ～ －2700
	4		DL －3500 ～ －4700
STK41	5	飛沫帯	DL +2700 ～ +3900
	6	海中部	DL －3500 ～ －4700



写真 3.1.3 試験体全景



写真 3.1.4 鋼管桟橋

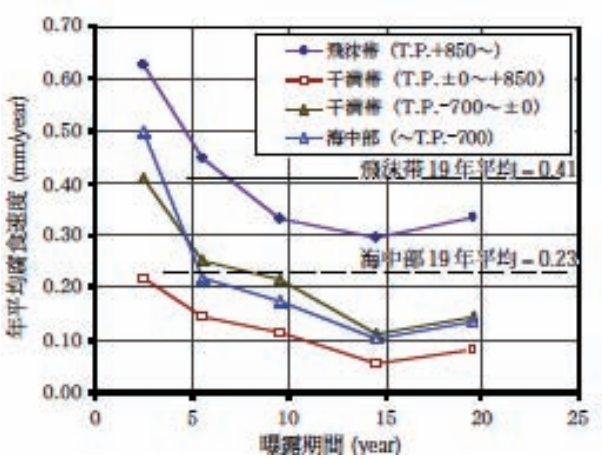


図 3.1.9 部位と暴露期間による年平均腐食速度の違い

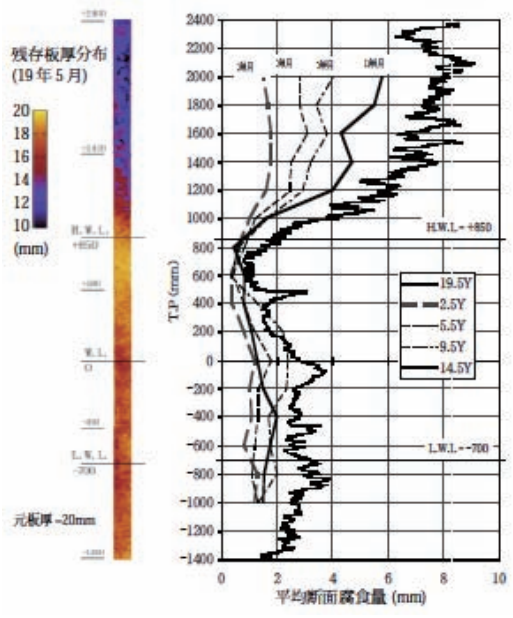


図 3.1.10 板厚分布と平均断面腐食量

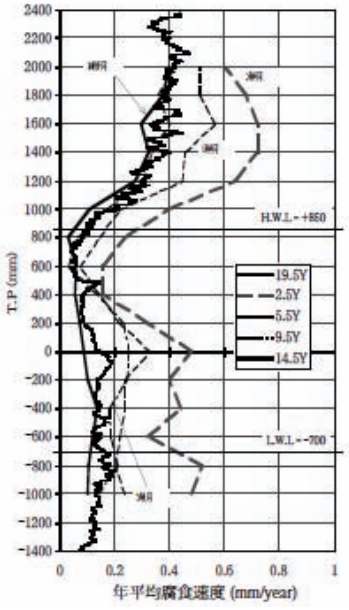


図 3.1.11 暴露期間と年平均腐食速度

② 出典：山本正弘，松岡和巳，今福健一郎：海洋鋼構造物用有機樹脂被覆防食工の長期耐久性の検討―防食工劣化部での鋼材腐食の検討―

有機樹脂防食工がなされた鋼材の南海域長期暴露試験体調査結果報告であり，沖縄石垣島の海域に設置された長期暴露試験体の腐食形態が報告されている．有機樹脂被覆防食工下の鋼材の海中部では，分布が平均的で腐食孔が深いものと浅いものが同じ程度存在しており，このことは海中部における塗膜劣化部が深い侵食を伴うものが多く，干満部や飛沫部では深く腐食するものが少ないことを意味するとしている．

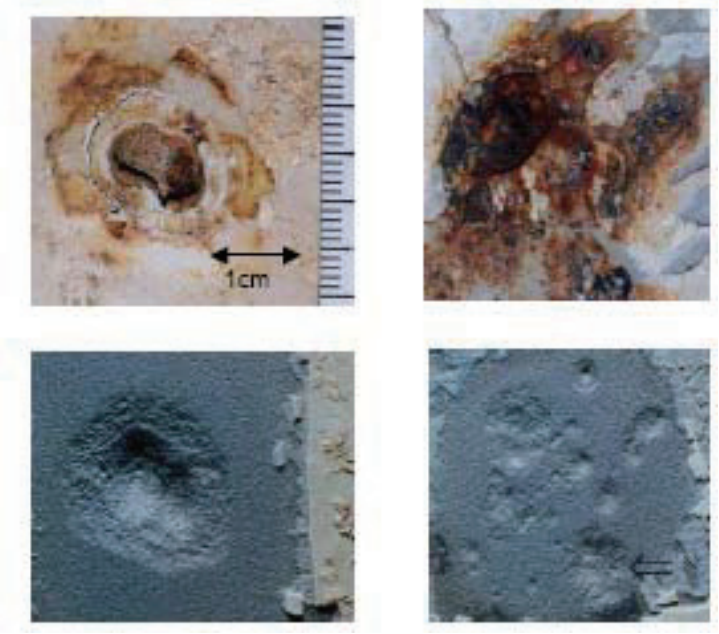


図 3.1.12 典型的な塗膜劣化部の鋼材腐食
左）海中部，右）干満部，上）暴露まま，下）ブラスト後

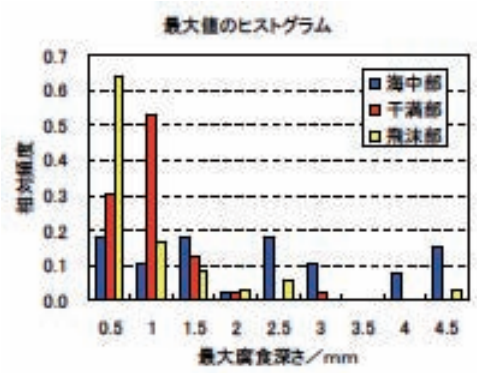


図 3.1.13　測定した最大腐食深さのヒストグム

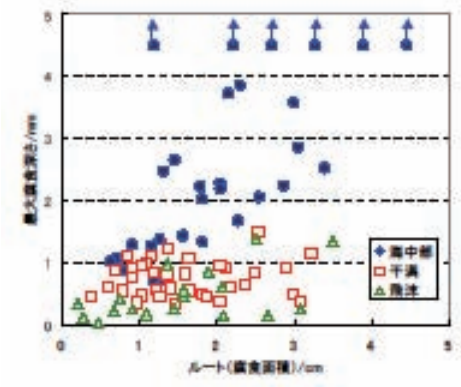


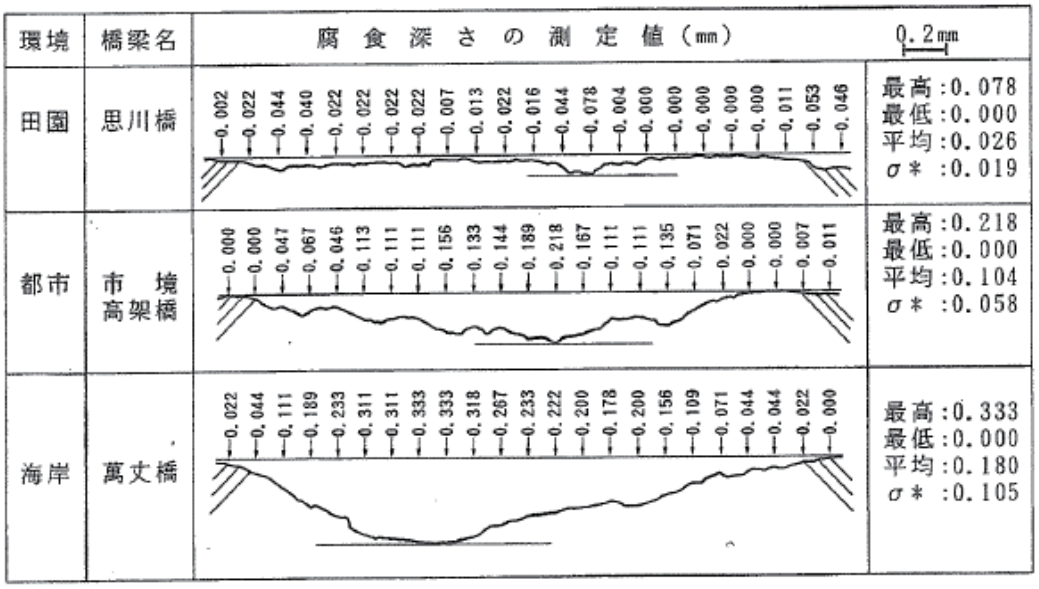
図 3.1.14 最大腐食深さと腐食面積の平方根の関係

b) 環境区分ごとに調査したもの

① 大気部の全面均等腐食

出典：藤原博，菅沼照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究，土木学会論文集，No.537/I-35，pp167-181，1996.4.

図3.1.15に橋梁の塗装塗膜下の鋼材腐食の調査結果を示す.陸上部では均一な全面腐食状態であるのに対し，海岸部では，全面腐食であるが，部分的に比較的大きな腐食速度で進行する腐食形態が見られる.したがって，海上・港湾岸壁部では塗膜下といえども，劣化して機能を充分に果たせなくなっている部分では，より深い腐食が進行していることが予測される.



（注）σ* ：標準偏差

図3.1.15 塗膜下腐食深さの測定結果（各環境別代表例）

② 大気部のコンクリート・鋼の境界部の腐食

出典：貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人：鋼板のコンクリート境界部における経時的な腐食特性に関する基礎的研究，土木学会論文集No.780,1-70,2005

鋼構造部材がコンクリートに埋め込まれる部分の境界部には，通気差系のマクロセル腐食が発生することが知られており，局部的に大きな腐食が発生する．通気差系のマクロセル腐食の主な発生要因として，コンクリート表面に滞水した塩水が表面張力によって，境界線から上方に若干吸い上げられる部分のカソード部，とその上方のコンクリート外部における鋼鈑のアノード部が明確に分離されて，鋼鈑部の溶存酸素濃度の差による通気差電池が形成される.

試験体による腐食深さを表3.1.5に示し，深さ形状の例を図3.1.16に示す.

表 3.1.5 腐食深さ

腐食深さ　$d_{(M)}$ (MM)		α
一般部	平均腐食深さ	1.0
境界部	平均腐食深さ	2.8
	全アノード領域の平均腐食深さ	4.9
	各アノード領域の平均腐食深さの最大値	6.6
	最大腐食深さ	9.5

一般部の平均腐食深さ d_g と各腐食深さの倍率を α とする

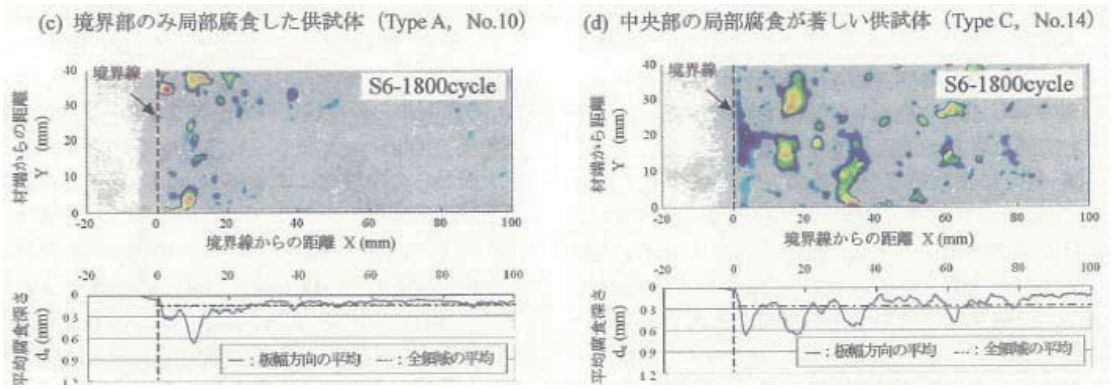


図 3.1.16　深さ形状例

③ 飛沫帯での全面均等腐食

出典：山根信，藤久保昌彦　他：海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 1 号，pp.367-370，2005.11

通常の港湾・海洋構造物で観察される全面均等腐食の例として，港湾に面した工場の岸壁に設置された長期暴露試験体の調査結果を示す．

試験体の設置場所は岸壁に近接しており，飛沫帯と見なすことができる．しかし，雨水で頻繁に塩分が洗い流されており，ジャケット，桟橋などのデッキ下にある部材が，塩分の付着・乾燥・付着を繰り返して過飽和にあることに比べると，水中・土中部の状態と同じく，塩分濃度の比較的低い環境にある．

表 3.1.6 に表面形状計測から得られた外径と板厚の統計量を示す．鋼管内部の腐食はないため，内径 D_i =130.8mm（一定値）に板厚平均値 $\bar{t}$ を加えて平均外径 $\bar{D}$ を求めた．各部材とも板厚の標準偏差は 0.2mm 程度と平均板厚に比べて小さい．また目視でも局所的に腐食が進んだ箇所は認められず，いずれの部材も腐食形態は，円筒全面に比較的小さな凹凸が均等に広がった全面均等腐食の状態である．

表 3.1.6　Cross-sectional geometries of tested pipes

No.	$\bar{D}$	$\bar{t}$	σ_t	t_{max}	t_{min}
CM1	138.48	3.84	0.152	4.21	3.26
CM2	138.54	3.87	0.174	4.49	3.37
CM3	138.44	3.82	0.156	4.30	3.31
CM4	138.70	3.95	0.194	4.42	3.23
CM5	138.60	3.90	0.130	4.36	3.50

$\bar{D} = D_i + 2\bar{t}$: Average outer diameter　(in mm)

D_i : Internal diameter (=130.8mm)　$\bar{t}$: Average thickness

σ_t : Standard deviation of thickness

t_{max} : Maximum thickness　t_{min} : Minimum thickness



写真 3.1.5　試験体の暴露状況

④ 塗膜損傷部の局部腐食

出典：伊藤義人，金仁泰，貝沼重信，門田佳久：素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究，土木学会論文集 No. 766/1-68, pp. 291-307, 2004. 7

塗膜の劣化曲線及び塗装不連続部の板厚減少のデータから塗装と素地露出部との境界下部には局部腐食が生じて全面腐食の無塗装裸鋼板に比べて，境界部近辺の平均板厚減少量が３倍以上になることがある．そのため，構造物に塗装の不連続部が存在する場合は，板厚減少による局部的な耐荷力や疲労強度の減少が発生する可能性があると思われると結論されている．下図の腐食促進試験体で，塗膜に損傷・劣化がある場合の局部腐食の形状を示す．

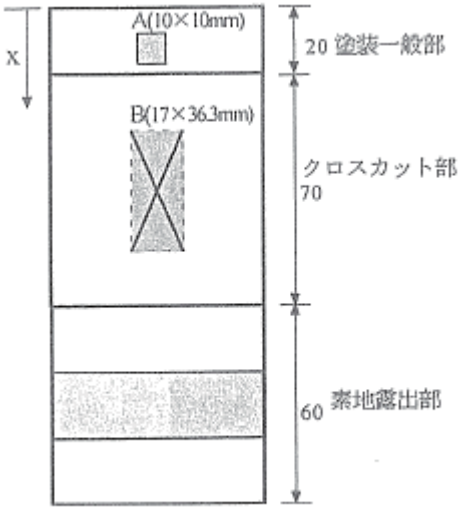


図 3.1.16 供試体表面の分類

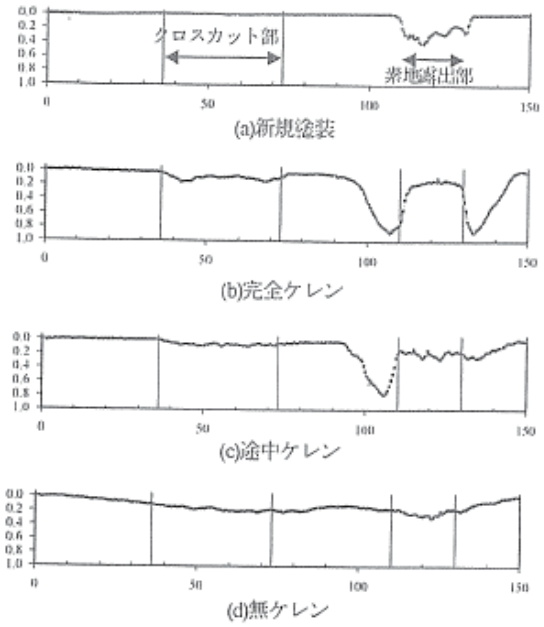


図 3.1.17 耐候性鋼の腐食ピット深さ(㎜)

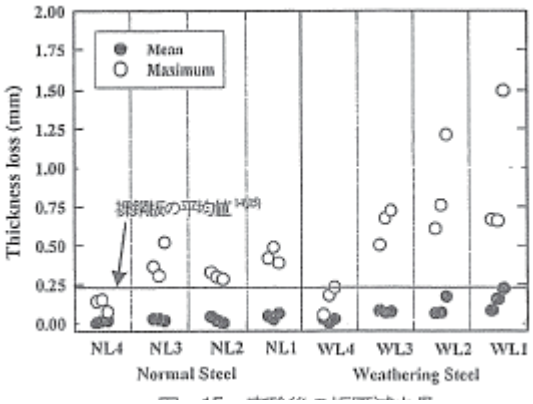


図 3. 1. 18 実験後の板厚減少量

図 3. 1. 18 は，前記の腐食促進試験体で，下地処理グレードを変えて塗装し，各試験片ごとの局部的な板厚減少量を測定して図にその深さをプロットしたものである．平均の板厚減少量と最大値を各試験体の部位ごとに測定しており，局所的なピットの深さと，ばらつきを示す．図中 N は普通鋼，W は耐候性鋼で，下地処理レベルを L1(無ケレン塗装)，L2(途中ケレン塗装)，L3（完全ケレン塗装），L4（新規塗装）である．

⑤ 飛沫帯，干満帯，海中部（ａ）①と同じサンプル)

出典：田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，杉浦邦征，岡扶樹，山本正弘；既設構造物の残存耐力評価と補強、第 9 回土木鋼構造研究シンポジウム, pp. 19-28，2005. 3.

a)①と同じ試験体から，環境部位ごとに試験体を切り取り腐食表面を計測した．以下の図の試験体番号は表 3. 1. 4 に示すものと同一である．デッキ面が低く飛沫帯の塩分が雨水等に洗われる機会が無い場合は，塩分が乾燥・湿潤を繰り返し，塩分濃度が過飽和状態で厳しい腐食環境にある．このような場合，鋼材の腐食は激しく，局部的に大きなピットを促進する場合がある．その周方向板厚分布と表面コンターを以下に示す．また，海中部においては，腐食形態は全面腐食であるが，比較的均一で浅いピット形状で　板厚の標準偏差も 0.2～0.33 と平均板厚 7.5mm に対して比較的小さく，飛沫帯・干満帯の半分以下である．

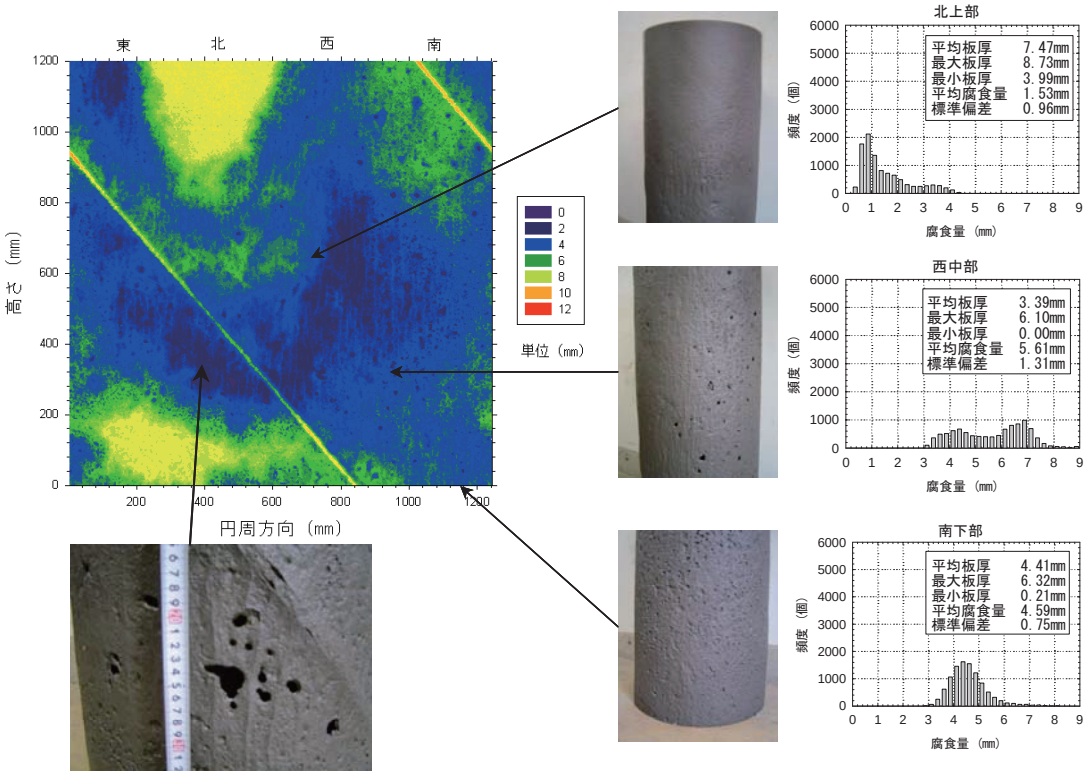


図3.1.19 飛沫帯（試験体５）

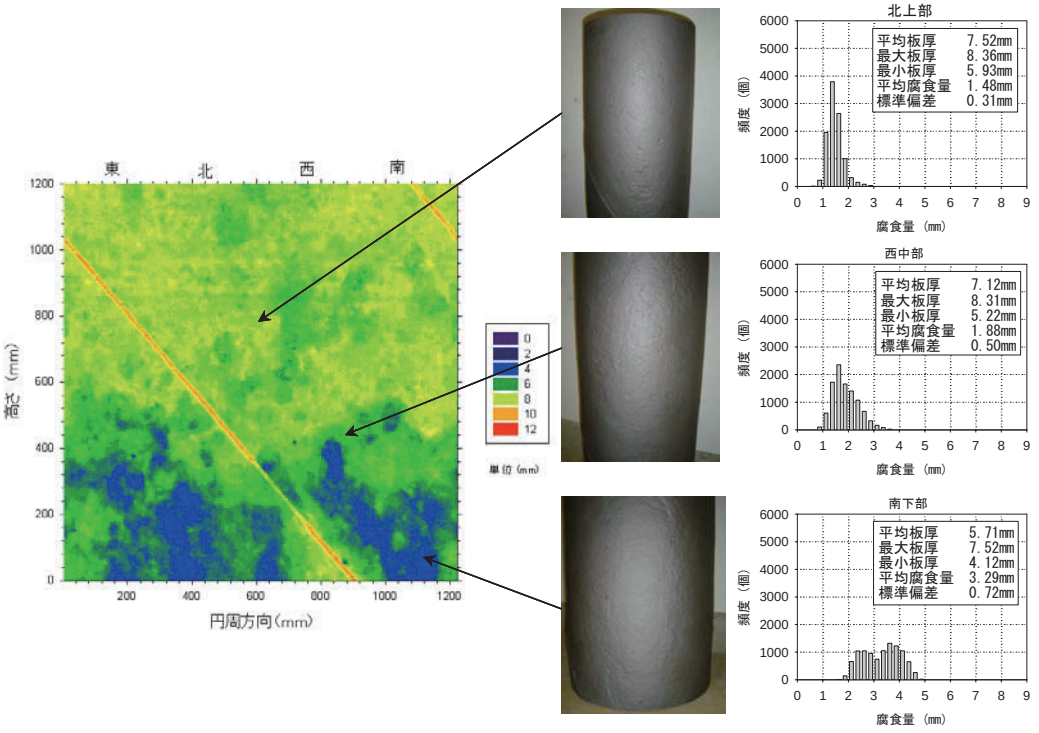


図3.1.20 干満帯（試験体２）

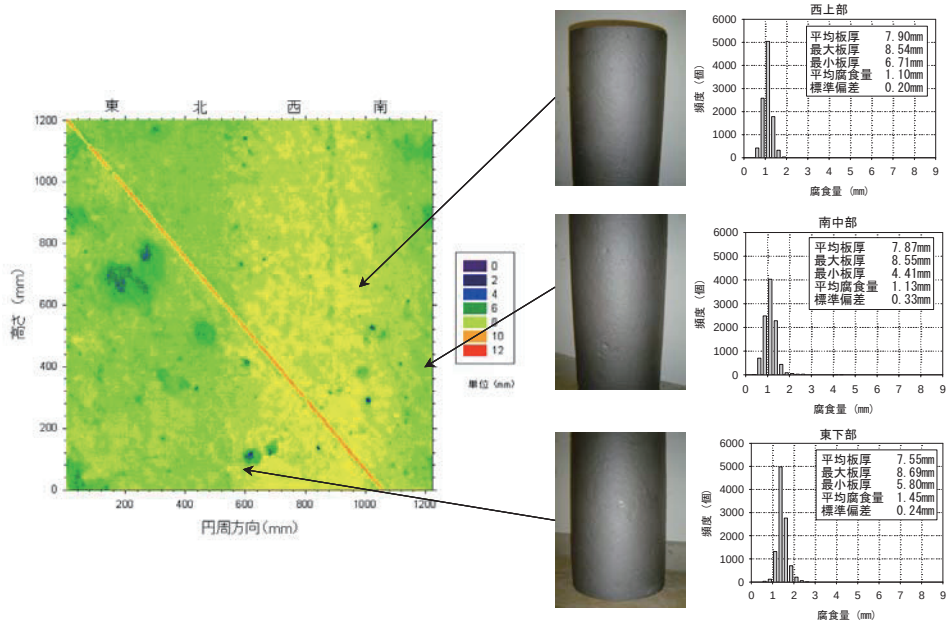
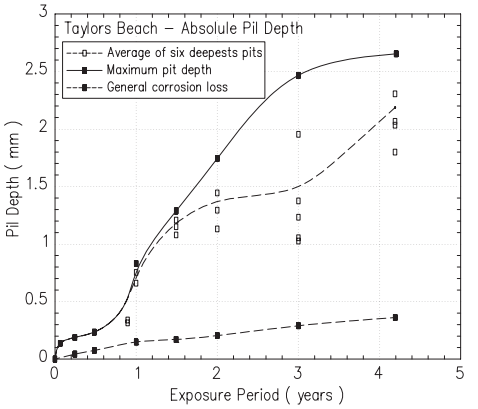


図3.1.21 海中部（試験体３）

⑥ 孔食

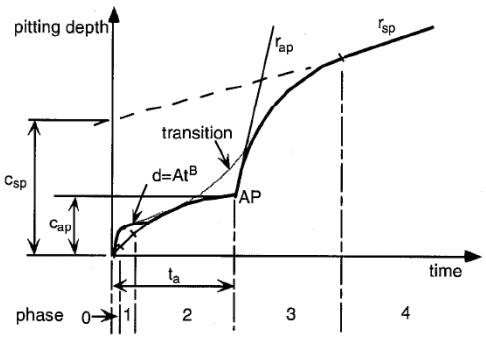
出典： R.E.Melchers: Pitting Corrosion of Mild Steel in Marine Immersion Environment – Part 1; Maximum Pit Depth, Corrosion (NACE International), Vol.60, No.9, 2004, pp.824-836.

海水中部の鋼材の環境下における局部腐食(pit corrosion)について，世界各地の港湾・海洋域で調査された結果が報告されている．ここではその中から，そのピット腐食深さを全体腐食（general corrosion）と比較し，腐食速度について分析した結果を紹介する．



Estimated absolute pit depth as a function of exposure period for coupons exposed at Taylors Beach, Australia, at 20° C mean seawater temperature.

図3.1.22 Pit 深さと暴露期間の関係



Model for maximum pit depth as a function of exposure period, showing corrosion phases

図3.1.23 Pit 深さと時間・腐食パターン

河口部の塩水・淡水が合流し，且つ嫌気性の硫酸塩還元バクテリアによる腐食が想定される海域で，全体腐食の平均腐食速度に対して７倍の最大深さのピット腐食速度が報告されているが，海域の清浄度，流れの存在等により異なるものの，通常は比較的均一なピット腐食が周期的に分散する形態の腐食状態と考

えられている.

鋼材表面での腐食速度のバラつきが表面の凹凸を形成しており，山本等の研究では，(コンピューターを用いた海洋構造物の腐食データ解析；材料学会，1995)海洋で暴露した鋼材は，アノード領域が，10 数 mm 離れたカソードを伴って腐食を起こし，腐食量が増大すると供に，統計的なバラツキを持ち，結果として凹凸が形成されていくという腐食機構が推定されている.

⑦ 付着生物による局部不均一腐食

出典：K.Zen: Degradation and Maintenance of Materials in a Marine Environment -General-, Zairyo-to-kankyo, 54, pp.470-474, 2005.

海中部の腐食速度は，普通 0.1mm/year であるが，海中部で腐食生成物と海洋生物が除去された部位は周囲に対してアノードとなり，この部位のマクロ腐食速度は更に促進される. また，付着生物については，海洋生物自身が鋼と反応することはないが，海洋生物が不均一に着生すると，鋼表面の酸素濃度に差が生じて酸素濃淡電池が生じ易く，海洋生物の着生状態によっては，隙間を作り，さらに局部腐食を増長させる. また，海洋生物が波浪等により脱落する場合に錆び層を一緒に剥がすと，その部分は鋼材表面が露出するので，周辺部にたいしてアノードとなり局部腐食が増大する. 既往の調査例でも，海洋生物の付着量が多いところでは孔食の数も多く，最大孔食部を腐食速度に換算すると 1.3mm/y と非常に大きい孔食が認められている.

鋼材面における腐食生成物及び海洋生物の除去因として，以下の事項が挙げられる.

- 平均干潮面 MLWL(Mean low water level)付近：ボートや漂流物（木材など），腐食調査（鋼材面の観察，肉厚測定），潮流，氷砕片（船と係船岸間に滞留する），プロペラによる高流速噴射海水，係船時の衝突，浮遊筏・係留索などによる磨耗
- 海水中：腐食調査，高流速噴射海水，潮流
- 海泥面：漂砂

⑧ 土中部

出典：K.Zen: Degradation and Maintenance of Materials in a Marine Environment -General-, Zairyo-to-kankyo, 54, pp.470-474, 2005.

海泥中の腐食速度は，0.1mm/year 以下と小さく，比較的均一な全面腐食形態である. 漂砂のある海域では，漂砂により腐食生成物が除去された部位の腐食速度は増大する. 調査結果では，漂砂のため海泥面の集中腐食速度が 0.7mm/year と大きく，この部位で鋼矢板が切断状態となった事例が紹介されている.

(5) 水門扉の腐食形態

ゲート構造物には，鋼橋について作成されているような，腐食形態を代表例で示す一般的な腐食マップは存在しない. しかし，図 3.1.24,25 のような代表的な形式のゲートの構成図に，腐食事例から点検時の注意箇所を記し，腐食マップとして活用できる. 尚，図 3.1.24,25 の構成図は，「(社) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準（案）（基準解説図・マニュアル編），H11.3」に掲載されているものである.

腐食形態は，気中部は鋼橋と同じく，形状的にごみの溜まりやすく，且つ湿潤状態になりやすい箇所は湿食で全面腐食と局部腐食が存在する. また，水中部及び乾湿の繰り返しを受ける箇所については，港湾・海洋構造物と同じ状態の腐食環境であるが，真水環境の場合は海水中と異なりマクロセル状態はできにくいため，腐食程度は非常に少ない全面腐食形態である.

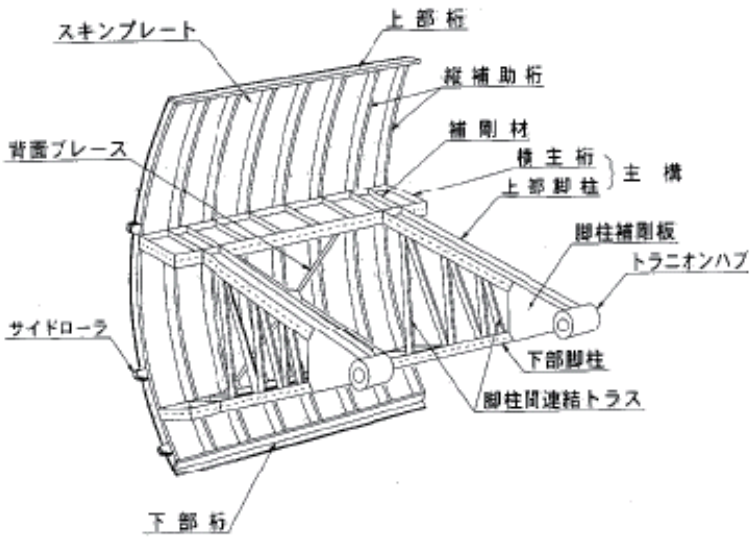


図3.1.24　縦補助桁横主桁方式ラジアルゲート

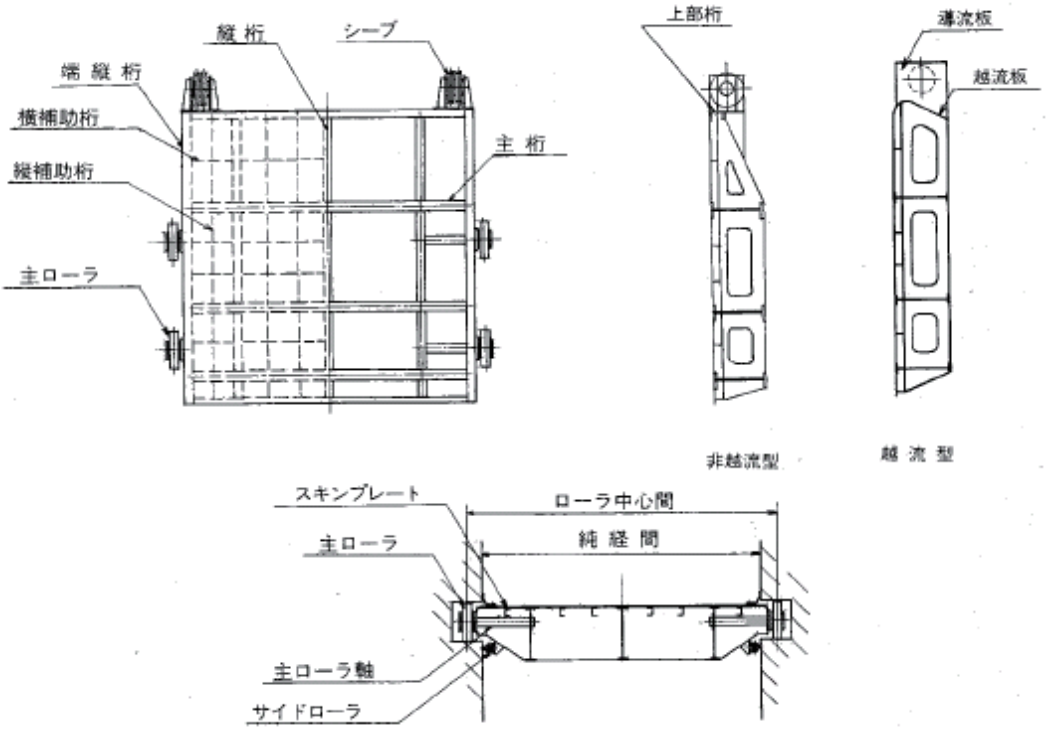


図3.1.25　プレートガータ式ローラーゲート

3.2 板厚計測法

本節では，腐食した部材の板厚を計測するにあたり，必要な前処理，板厚を計測する方法および装置の種類，計測要領や手順，腐食部材を計測する際の留意点などについてまとめる．

3.2.1 計測のための前処理

(1) 計測法と表面状態

腐食した鋼材の板厚を測定する手法として，主に超音波法，レーザー法および画像計測法に関して以降に記述されるが，ここでは，それらの手法を用いた場合の腐食表面の状況がどのような状態で計測可能であり，また，実構造物で板厚を測定する場合に，どのような表面状況の条件での計測となる場合が多いかなどについて記述する．なお，実構造としては，鋼橋を代表的な例とする．

鋼橋の維持管理を行う場合，通常，数年置きに定期点検を実施している．この際，足場を設けて行う詳細点検と，検査路，移動足場または点検車を用いた外観検査のみの簡易点検に分けられる．足場を用いる場合，通常，コストを考慮して塗装塗替え時に行う場合が多い．表 3.2.1 に点検時の状況の種類を示す．

表 3.2.1 点検時の状況

点検の種類	詳細点検		簡易点検
検査方法	近接目視 非破壊検査		距離を置いた目視
足場等の条件	全面足場（塗装塗替え用）		検査路，移動足場，検査車など
各部材との距離	近接目視 接触可能		距離を置いた目視 接触不可能
鋼材表面	塗装塗替え時	現表面，塗装除去面	現表面
	点検のみ	現表面	

板厚を測定する場合の条件として，超音波法の場合，部材に接触が可能である必要があり，全面または腐食範囲を包括した足場が必要である．鋼材表面については，腐食部および塗膜が残っていても，後述する超音波法は，計測可能である．

レーザー法および画像計測法は，部材と接触できる必要はないが，鋼材表面については，塗装橋梁の場合，塗膜が除去されている必要がある．耐侯性橋梁の場合は，鋼材表面を直接計測することが可能である．

以上より，塗装された橋梁については，現時点での各測定法は，塗装塗替え時に行う場合の条件が最も多いと予想され，以降に塗装塗替え時の塗膜の除去方法および鋼材表面の状態などについて記述する．

(2) 塗装塗替え時の表面状態

塗装塗替え時は，さびおよび塗膜を除去して新たに塗る塗装が安定するように素地調整が行われる．一般に，この素地調整をケレンと呼んでいる．塗膜の劣化程度と素地調整のグレードを表 3.2.2 に示

す．１種ケレンでは，金属光沢の露出状態となるので，ブラスト施工後の早い時期（その日の内に）に塗装しなければ，すぐにさびが発生する．また，３種ケレンでは，活膜であるかを「付着力テスト」で確認し，塗膜を残存したい部分と除去する部分に分けてケレン作業を行っている．

表 3.2.2 劣化内容と素地調整のグレード

旧塗膜の劣化程度	ケレンの種類	ケレン後の素地状態	使用工具
特に腐食の激しいもの	１種ケレン	旧塗膜，さびを完全に取り除く．光沢のある金属光沢面にする．	ブラスト法
塗膜の劣化もあり，腐食も著しいもの	２種ケレン	旧塗膜，さびを取り除き，さび部分は金属面まで研ぎ出す．	ディスクサンダー，手工具併用
活膜もあり，部分的に劣化やさびもあるもの	３種ケレン	劣化塗膜を除去．さび部分は金属面まで研ぎ出す．	ディスクサンダー，手工具併用
活膜であり，白亜化，変色のあるもの	４種ケレン	粉化物，汚れ，変色部分を除去．	手工具主体

「鋼道路橋塗装・防食便覧：平成 17 年 12 月，社団法人日本道路協会」では，素地調整程度と作業内容を表 3.2.3 に示すような分類としている．表内の素地調整程度の種類は，表 3.2.2 のケレンの種類と同じである．

表 3.2.3 素地調整程度と作業内容

素地調整程度	さび面積	塗膜異常面積	作業内容	作業方法
１種	—	—	さび，旧塗膜を完全に除去し鋼材面を露出させる．	ブラスト法
２種	３０%以上	—	旧塗膜，さびを除去し鋼材面を露出させる．ただし，さび面積３０%以下で旧塗膜がB，ｂ塗装系の場合はジンクリッチプライマーやジンクリッチペイントを残し，他の旧塗膜を全面除去する．	ディスクサンダー，ワイヤホイルなどの電動工具と手工具との併用，ブラスト法
３種Ａ	１５～３０%	３０%以上	活膜は残すが，それ以外の不良部（さび，割れ，ふくれ）は除去する．	同上
３種Ｂ	５～１５%	１５～３０%	同上	同上
３種Ｃ	５%以下	５～１５%	同上	同上
４種	—	５%以下	粉化物，汚れなどを除去する．	同上

素地調整程度１種は，ブラスト法によるもので素地調整の効果は最も優れている．ただし，周辺を汚すことのないように養生等を十分に行う必要がある．

素地調整程度２種は，動力工具で塗膜およびさびを全面除去して鋼材面を露出させるものであるが，さびが多少残存したり，作業に要する時間が長く費用も高くなるので実用的でない．

素地調整程度３種および４種は，いずれも動力工具と手工具を用いて行うものであるが，作業効率の良い動力工具が多用され，手工具は動力工具の適用が難しい箇所に用いられる．動力工具または手

工具では，くぼみ部分，狭隘部，ボルト，リベット部などの防錆および塗膜除去を完全に行うことはできない．また，ジンクリッチ塗膜を完全に除去することも難しい．素地調整程度３種および４種を行う場合は，腐食，発錆している部分のさびを除去するとともに，旧塗膜の活膜上の付着物なども除去する必要がある．

塗装塗替え時の素地調整後に腐食部の板厚測定を行う場合，１種ケレン（ブラスト処理）を行った直後に，レーザー法および画像計測法が適用可能である．後述する超音波法については，腐食部および塗膜が残っていても，計測可能であることから，塗装塗替え時のどの時点でも板厚測定が可能である．

(3) さびを除去する方法

前述した塗装塗替え時の塗膜およびさびの除去は，ブラスト，ディスクサンダーなどを用いた機械的方法によるさびの除去法であるが，塗膜に対しては塗膜はく離剤，さびに対しては薬品を用いる化学的方法，電解による方法がある．さびを除去する方法を表 3.2.4 に示す．

表 3.2.4 さびの除去方法

機械的方法	ブラスト，ディスクサンダー，ワイヤホイルなど			
化学的方法	薬品	時間	温度	備考
	塩酸(500ml) ヘキサメチレンテトラミン (3.5g) 蒸留水を加えて 1000ml にする.	10 分	20～25℃	場合によっては，より長時間行ってもよい.
	くえん酸ニアンモニウム(200g) 蒸留水を加えて 1000ml にする.	20 分	75～90℃	―
電解による方法	薬品	時間	温度	備考
	水酸化ナトリウム(75g) 硫酸ナトリウム(25g) 炭酸ナトリウム(75g) 蒸留水を加えて 1000ml にする.	20～30 分	20～25℃	電流密度 100～200 A/㎡で陰極処理をする．陽極には炭素，白金又はステンレス鋼を用いる.
	くえん酸ニアンモニウム(100g) 蒸留水を加えて 1000ml にする.	5 分	20～25℃	電流密度 100 A/㎡で陰極処理をする．陽極には炭素又は白金を用いる.

化学的および電解による方法は，JIS Z 2371「塩水噴霧試験方法」の腐食生成物除去方法に記述されている例である．耐侯性鋼材の暴露試験において，腐食減耗量（板厚減少量）の経年変化を調べる際に，塩酸とヘキサメチレンテトラミンを用いた化学的方法でさびを除去し，腐食減量を測定した事例がある．

化学的および電解による方法は，試験室レベルで腐食部材を溶液に浸すことにより，さびを除去する方法であり，実構造物に適用する場合，その施工方法および使用後の薬品の処理などを十分に検討する必要がある．また，化学的および電解によりさびを除去した表面での板厚測定は，後述する各板厚測定法で可能と考えられるが，今後，実際に測定して検証する必要がある．

(4) 港湾鋼構造物の板厚計測のための表面前処理

運輸省港湾技術研究所編「港湾構造物の維持・管理マニュアル」（財団法人沿岸開発技術センター，平成 11 年 6 月）に，港湾構造物を対象とした表面前処理について記載があるので，関連部分のみ抜粋する．ここで対象としているのは超音波厚み計による板厚計測である．

・肉厚測定点では，ほぼ 10 cm 四方をハンマーやスクレーパ等で付着物を除去し，金剛砥石やワイヤブラシ等で鋼材表面をこすり，鋼材の地肌を露出させる．この際，鋼材面地肌を過度に削り取らないように注意しなければならない．サンダーを用いる場合は特に注意が必要である．

・付着物の除去や超音波厚み計の探触子を鋼材に当てる要領などの作業要領をあらかじめ作業員に周知させておかねばならない．

・肉厚測定と同時に，肉厚測定点の鋼材表面の状態を写真撮影しておくことが望ましい．

3.2.2 板厚を直接計測する方法

腐食部材に測定子を直接接触させて板厚を測定する方法として，①マイクロメータやキャリパーゲージ等による機械式測定法，②超音波プローブによる超音波法などがある．その何れも，軽量・可搬性に優れる，安価であるという利点があり，これらの計測法の特徴および計測方法について記述する．

(1) ノギス, マイクロメータ, キャリパー

a) 計測方法と特徴

腐食による減厚状況を機械的に計測する方法は，板厚を直接計測する方法と腐食表面（凹部）を計測する方法に分類される．

測定機器の取り扱いが容易であり，簡易的に高精度な計測ができる方法である．測定精度は計測機器の選定や表面状態にもよるが，計測機器の性能誤差は何れもミクロンオーダである．

ただし，ポイントでの計測となるため，板面としての情報を得るためには非常に手間を要する．

表 3.2.5 板厚計測に利用される機械式計測機器

	種類	測定範囲(仕様)	性能精度	総合精度(*)
板厚計測	ノギス	板厚：50㎜以下 ～(900～1,000㎜)	±0.05㎜ ～±0.15㎜	±0.08 ㎜ ～±0.18㎜
	マイクロメータ	板厚：(0～25㎜) ～(475～500㎜)	±0.002㎜ ～±0.008㎜	±0.004 ㎜ ～±0.013㎜
	キャリパーゲージ	板厚： 0～150㎜	ダイヤルゲージ同様	アーム精度
表面計測	ダイヤルゲージ	深さ：1㎜以下 ～10㎜	±0.003㎜ ～±0.015㎜	スタンド精度
	デプスゲージ	深さ：50㎜以下 ～(200～300㎜)	±0.02㎜ ～±0.08㎜	±0.050㎜ ～±0.10㎜
	デプスマイクロメータ	深さ：(0～25㎜) ～(0～300㎜)	±0.004㎜ ～±0.010㎜	±0.007㎜ ～±0.015㎜

(*) 総合精度：標準状態にて金属又は同等材質の品物を測定した場合の総合誤差(JIS 参考値)



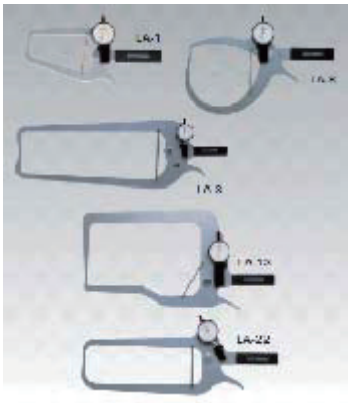
(1) キャリパーゲージ



(2) マイクロメータ



(3) キャリパーゲージ





(4) デプスマイクロメータ

（ミツトヨ, 尾崎製作所の製品HP, カタログより）

図 3.2.1　機械式計測に用いる計測機器

b) 板厚計測

板厚を計測する方法は，向い合せのヘッド測定子を板材表裏面に接触させることで，測定子先端間の距離を機械的に計測し，その値を読み取る．

① ノギス（JIS B 7507：1993）

測定面のあるジョウを一端にもつ本尺を基準に，それらの測定面と平行な測定面のあるジョウをもつスライドが滑り，各測定面間の距離を本尺目盛とバーニヤ目盛(荒い目盛と細かい目盛を組み合わせて測定精度を高めた目盛)またはダイヤル目盛によって読み取る．

板部材の計測範囲は板端部に限定され，また目盛の正面に目をもってこないと視差による誤差が出る．また，スライダの移動量を自動検出して測定値を表示するディジタル表示機能タイプもある．

② マイクロメータ（JIS B 7502：1994）

スピンドルの動き量に対応した目盛りを持つスリーブ及びシンブルによって，測定点の両面間の距離を読み取る．なお，測定値のディジタル表示機能タイプもある．

特に表裏面が腐食が著しい凹凸面上をピンポイントで計測したい場合には，測定子先端が細くなっているポイントマイクロメータを用いるのが良い．

鋼構造部材を計測できる範囲は板端部からゲージを差し込める（測定子が届く）距離に限られ，一般に市販されているものでは差込可能範囲は 20～50㎜ である．

③ キャリパーゲージ

はさみの構造によって，奥行きのある形状や狭い箇所，測定箇所の手前側の凸型をまたいでの板厚測定を目的とした計測機器であり，様々なアーム形状の種類がある．測定値の読み取りは主にダイヤルゲージによって行う．また測定範囲は狭いがディジタル式もある．

板部材の計測可能範囲については，現在市販されているもので，アームが長いタイプで最大差込深さ（板端部からの距離）が約 600㎜ である．

c）表面計測

腐食表面を計測する主な機器には，平滑部を基準面として凹部にヘッド部測定子を接触させて，その深さを計測する方法である．片面からのアクセスのみであるため非常に使いやすいのが特徴であるが，板厚を求めるためには平滑部の板厚から凹部深さの読取値を差し引くことが必要となるため，平滑部の板厚が予め判っている必要がある．

① ダイヤルゲージ（JIS B 7503：1997）

ダイヤルゲージはマグネットスタンドに取り付けて使うことが多く，複雑形状部などの測定には便利である．ダイヤルゲージは比較的安価に高分解能の測定器が作れるため，ダイヤルゲージを板面に平行移動させて平滑面と凹部の計測を行って腐食深さを計測する装置製作も可能であるが，その誤差はマグネットスタンドアームの使い勝手や剛性による．

② デプスゲージ（JIS B 7518：1993）

ベースの測定面に平行な測定面をもつ本尺が，ベース測定面と直角方向に滑り，本尺目盛とバーニヤ目盛またはダイヤル目盛によって読み取る．なお，ディジタル表示機能タイプもある．

計測値の信頼性や誤差は，周辺平滑部の平滑度にも依存することにも注意が必要である．

なお，デプスゲージには測定力(測定子を押さえる力)を一定にする装置がないため，腐食面を計測する際には，凹底部に測定子先端が適正に接触するように注意が必要である．

③ デプスマイクロメータ（JIS B 7544：1994）

測定基準となる平坦な面をもつベースとそれに直交する軸線方向に移動するスピンドル，その動きを示す目盛りをもつマイクロメータであり，腐食凹部の深さを高精度に計測する場合に有効である．なお測定子を押さえる測定力がかかっているため，測定子は凹部へ接触し易い．デプスゲージと同様に，ベースの安定性や平滑面が測定精度に影響を及ぼすことに注意が必要である．

d）前処理と計測方法

① 前処理

腐食面の錆び生成物があまり付着していない場合は，要求される測定精度によっては表面処理を行わなくても良い場合もあるが，一般的には錆びが付着している場合は，事前に除去する．特に，測定子の接触範囲が測定表面の凹凸よりも大きい場合や，塗装が残っている場合には，グラインダー等によって平滑にする必要がある．

② 計測機器の校正

計測機器は，ブロックゲージや，予め板厚が既知である標準の試験体を用いて，測定値の校正を行う．このとき用いる校正用試験体は，測定対象の板厚に近いものを選定する．

③ 計測と読み取り

・板厚計測では，被測定物の計測点表裏面に測定子を接触させてある程度の測定力をかけた時の，メータ指示値またはデジタル指示値を読み取る．
・表面計測では，左右に張り出しているベースの測定面を平滑面に密着させ，がたつきを生じさせないようにして測定する．
・腐食した凹凸面での測定では，測定面(健全時の平滑面)に対してヘッドが傾斜すると大きな誤差の要因となるため，平滑面に対して鉛直方向にヘッドが当たるように注意が必要である．
・電子式ディジタル表示のものでは，表示されている数値の末尾一桁のところでは数字一つ分は不確かになることを考慮しておく．また磁場，電界，湿度などの環境条件にも注意が必要である．

(2) 超音波板厚計

a) 計測方法と特徴

超音波による板厚計測法は，板部材の片面がアクセスできる状態であれば周囲の部材形状などに影響せずに測定できる事から，現地での定期点検での板厚計測手段として良く用いられる．また，測定面に塗膜などの層が付着している状態でも内部の有効板厚を測定する方式(詳細は 3.2.4 節を参照)もある．

超音波による板厚計測については，「超音波厚さ測定Ⅰ(非破壊検査シリーズ)[1)]」に測定装置や具体的な測定方法などの詳細が記述されており，本節での参考図書とした．

また，腐食部での板厚計測方法としては「JIS Z 2355:2005 超音波パルス反射法による厚さ測定方法腐食部の厚さ測定方法－付属書 2 腐食部の厚さ測定方法」がある．

b) 計測機器と計測原理(精度)

① 本体

厚さ計測器には，板厚を自動測定してディジタル表示する「ディジタル表示超音波厚さ計」と，エコー波形もディジタル表示する「表示器付き超音波厚さ計」がある．表示器付きでは，波形や数値をメモリでき，パーソナルコンピューターと接続することで記録ができる．

② 探触子

探触子には，振動子(圧電素子)が一つで送受信を兼用する一振動子垂直探触子と，送信側と受信側の振動子を分離している二振動子垂直探触子がある．一振動子垂直探触子では送信パルスの持続時間が長いため，薄い測定物を測定する場合に底面エコーと送信パルスが重なり測定不可となるが，二振動士垂直探触子では送受信を分割していることで受信エコーに送信パルスの影響を受けないことから，一般的な厚さ測定には二振動士垂直探触子が良く用いられる．

ただし，高分解能用として振動子の送信パルスを持続しないように工夫したものは二振動子垂直探触子よりも薄い測定物を測定できる．しかし音圧が低いため薄厚限定として適用される．

また，厚い測定物では波長が長く(音圧の強い)低周波数を用いるが，測定精度は下がる．

更に，裏面(底面)が腐食によって凹凸形状となっている場合には，反射エコーは散乱するために，レンズ効果を持たせたクサビを有した集束型の探触子もあるが適用できる板厚の範囲は細かく限られる．

このように探触子は，被測定物の仕様に合わせて十分な選定が必要である．

なお，振動子の材料はジルコン酸チタン酸鉛磁器(略称ジルナマ)，くさびの材質はアクリル樹脂が良く用いられる．

③ 探触子ケーブル

送信電気パルスを探触子に送り，また電気に変換された受信信号を本体に導くものであり，同軸ケーブルを使用している．普通の電源ケーブルに比して曲げなどに弱く，断線し易いので注意が必要である．

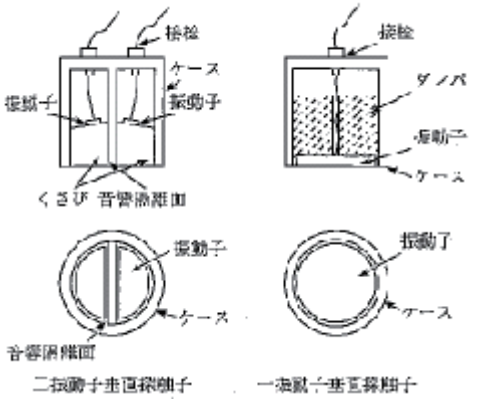
④ 厚さ計測原理

超音波計測では，探触子内部の圧電素子に電圧を与えて振動させることで超音波を発生させ，反射したエコー(振動波)を振動子で受信する．対象物に当てた探触子から発振される超音波パルスの底面反射エコーの伝播時間を計測し，既知の材料音速から，(3.2.1)式により板厚を求める．

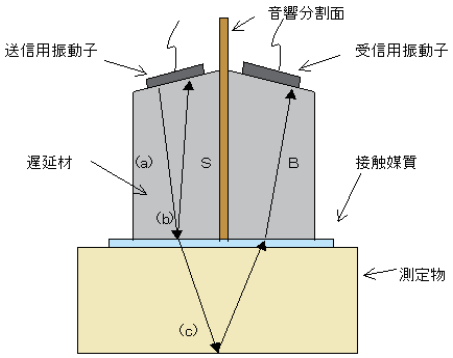
$$D = \frac{C \cdot t}{2} \quad (\text{mm}) \qquad (3.2.1)$$

D：板厚(mm)，C：音速（mm/s)， t：超音波が材料中を往復する時間（s)

厚さ計全体のブロック図(図 3.2.2)では，まず時間系を制御する同期部から送信部へ信号を送って送信電気パルスを作る．このパルスは，探触子ケーブルを経て探触子で超音波パルスを出す．



(1) 探触子の分類



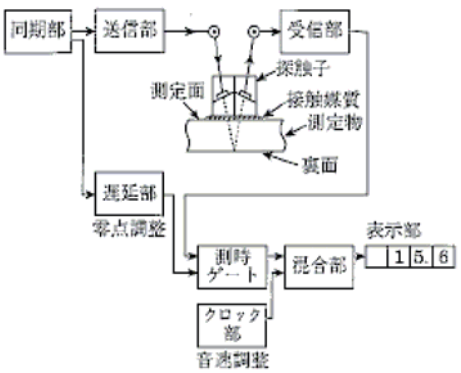
(2) 二振動子探触子での測定方法



(3) デジタル表示厚さ計



(4) 表示器付き厚さ計



(5) 厚さ計測ブロック図

図 3.2.2　超音波厚さ計測機器

一方，反射エコーは探触子ケーブルを経て受信部に入り，数千倍に増幅される．受信部には，このほかエコー波形を整流する検波部なども含まれる．

一方，同期部の他の出力は遅延部に入り，零点調整を行う．受信部のパルス化出力と，この遅延部出力にて，測時ゲート(測定面から裏面までの厚さに相当する時間幅)を作る．クロック部にて等しい時間間隔でパルスを発生し，これを混合部で測時ゲートの時間だけ加算して，表示部にて，厚さをディジタル表示している．

⑤ 音速調整

鋼中の超音波が透過する音速は，1 秒間に約 5,900m である．鋼の厚さ 1mm を往復する時間 t は，(3.2.2)式を用いて，0.339×10^{-6} 秒となる．この時間間隔のクロックパルスの周波数 f は 2.95(MHz)となる．ここで，クロックパルスの周波数を 10 倍の 29.5(MHz)とすれば，鋼 0.1mm 時の往復時間に対応する．最小表示単位 0.1mm のとき，クロックパルスの間隔を，厚さ計の最小表示単位(0.1mm)に合わせる．

$$t=\frac{2\times D}{c}=\frac{2\times1}{5.9\times10^{6}}=0.339\times10^{-6}\ (\text{秒}) \qquad (3.2.2)$$

⑥ 零点調整

二振動子垂直探触子では，超音波の電波経路が少し斜めに傾くため，測定物表面と直角方向に往復するよりも長めの時間を要する．この補正をするために，零点調整を行う．厚さの既知の試験片にて，表示値がその値になるように，同期部からの信号を遅延させて，測時ゲートの幅を補正する．

⑦ 測定範囲と計測精度

測定可能な板厚は，使用する探触子に依存し，二振動子垂直探触子(5MHz)を用いた場合には一般的な計測範囲は約 1mm～250mm である．但し，さらに薄板，厚板の測定を行いたい場合には，それぞれの特徴を持った探触子を使用して測定を行う．

計測精度は，使用する探触子や超音波厚さ計(処理)によっても異なるが，一般的には校正試験片を用いた性能試験により±0.1mm 以内である事を確認した上で測定され，表示単位も 0.1mm のものが多い．

薄板用として読み取り精度は 0.01mm,0.001mm のものもあるが，表裏面の粗さを平均化した厚さを示すため，測定厚さと見かけの厚さとの合致を求めて校正しても実測厚さとは微妙に異なる．JIS Z3255:2005 解説には，厚さ計の管理公差は 0.03mm，0.003mm とある．なお，0.001mm 表示で測定する場合，表面粗さのほか，温度環境も校正試験片と同一にする配慮が必要である．

c) 厚さ測定方式の種類

① (R-B_1)方式

既知の厚さによって補正した零点(R)を設定し，それと第 1 回底面エコー(B_1)との時間間隔から(3.2.1)式によって測定物の厚さを求める．最も一般的な測定方式である．

② (Bm～Bn)方式

表面に塗膜がある鋼板では，塗膜と鋼板境界面での反射エコーと，鋼板底面での反射エコーが現れ，図 3.2.3 のような波形となる．ここで，第 1 回底面エコー(B_1)と第 2 回底面エコー(B_2)を取

り出し，その差を求めることで，塗膜下鋼板の有効な板厚 D を測定できる．この場合，零点調整は不要である．

③(S～B_1)方式

被測定対象がノイズが多い材料の場合，測定周波数を低くし，DAC を使用(透過距離によりエコー振幅を増幅)して底面反射エコー(B)を取り出しやすくしており，その際，送信パルス(T)と表面エコー(S)を分離するため，探触子は遅延材を用いて(S～B_1)方式による測定を行う．

d) 測定方法の種類

JIS Z 2355 で規定されている測定方法は，表 3.2.7 に示すように被測定物の腐食程度により，1 回測定法，2 回測定法，連続測定法，多点測定法，精密測定法に分類された測定法を選定して測定する．

なお，各種の構造物によって腐食し易い部材や範囲，腐食の形態などが様々であることから，腐食減厚部に対する超音波厚さ測定方法として，一般的には各々の構造物毎での指針やマニュアル化された測定方法に則った方法を用いている．

e) 前処理と計測方法

① 測定面の前処理

測定面に錆びや異物の付着，塗装のはく離などがある場合には，ワイヤブラシ，はく離剤などによって除去し，砥石，サンドペーパーまたはグラインダー等によって表面粗さを 25a(100S)以下に仕上げる．前処理の具体的な方法については，3.2.1 節を参照されたい．

② 接触媒質の選定

探触子から被測定物へ効率的に音響伝達させるための接触媒質は，特に指定のない場合は，測定面の粗さに応じて，表 3.2.8 による．

③ 測定物の残存厚さの推定

適用する探触子などの適用性を確認するため，被測定物の元厚，前回測定値，使用年数，腐食の状況などから，予め残存厚さを推定しておく．

④ 校正

測定開始前に，校正用試験片を用い，超音波厚さ計の指示値が試験片の厚さを示すように調整する．校正用試験片がない場合は，同じ材質で厚さや形状がほぼ等しいものを用いる．ただし，音速による表示値の修正を行えば，他の試験片を用いても良い．

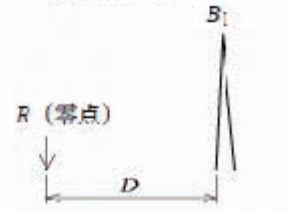
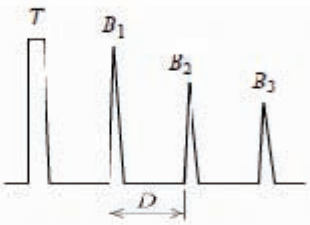
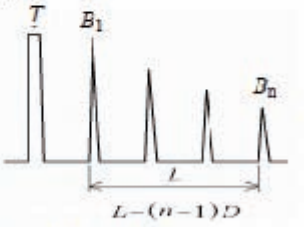
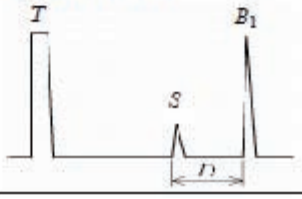
⑤ 測定方式，測定方法の選定

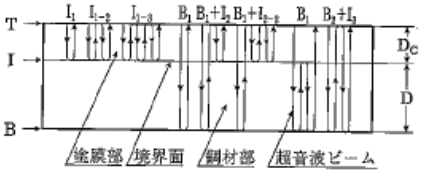
推定した残存厚さ，被測定物の腐食状況などから，測定方式(表 3.2.6)，測定方法(表 3.2.7)を選定する．

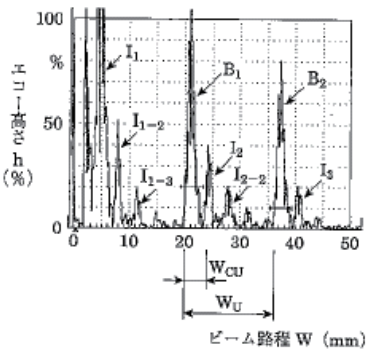
⑥ 探触子の接触と測定

被測定物に接触媒質(表 3.2.8)を塗布し，適切な圧力で探触子を接触し，安定な測定値が得られるようにする．表示された板厚測定値を記録する．

表 3.2.6　厚さ測定方式の種類（JIS Z 2355:2005）

測定方式の区分	エコー の種類	JIS Z 2344 の基本表示の図形
零点・第1回底面エコー方式 ($R-B_1$) 方式	既知の厚さによって零点を補正設定し，その零点と第1回底面エコー (B_1) との間隔から，測定物の厚さを求める。	$R-B_1$ 間の測定例 
多重エコー 方式 (B_1-B_n) 方式	多重エコー のうちの二つのエコー の間隔から，厚さを求める。二つのエコーは，通常 B_1 及び B_n (n は2以上)，B_1 が使用できない場合は B_2 及び B_n (n は3以上) とする。 B_1 及び B_n のとき： $D=\frac{L}{n-1}$ ここに，D：測定物の厚さ L：1回から n 回までの間隔 n：底面エコーの回数	(a) B_1 B_2 間の測定例  (b) B_1-B_n 間の測定例 
表面エコー・第1回底面エコー方式 ($S-B_1$) 方式	測定箇所の表面エコー (S) と第1回底面エコー (B_1) との間隔から，厚さを求める。	$S-B_1$ 間の測定例 





D　(mm)　；鋼材部の計測厚さ
D_C　(mm)　；塗膜部の計測厚さ
D_U　(mm)　；鋼材部の測定厚さ
D_{CU}　(mm)　；塗膜部の測定厚さ
T　；送信パルス
I_1～I_3　；境界面エコー
B_1 及び B_2　；第1回及び第2回底面エコー
W_{CU}　；第1回底面エコー B_1～第1回境界面エコー I_1 までのビーム路程 ($W_{CU}=D_C$)　(mm)
W_U　；第1回底面エコー B_1～第2回底面エコー B_2 までのビーム路程 ($W_U=D_U$)　(mm)

図 3.2.3　塗膜上からの鋼材の厚さ測定波形例

表 3.2.7　測定方法の種類（JIS Z 2355:2005）

	測定方法	適用範囲
a）1 回測定法	指定された測定点を 1 回測定する.	腐食が見られない，又は裏面の腐食の程度が小さい場合.
b）2 回測定法	二振動子探触子により，音響隔離面の向きを 0 度，90 度で各々測定し，小さい方の表示値を測定値とする.	裏面の腐食が見られる，又は推定される場合.
c）連続測定法	測定線上を，1 回測定法を用いて指定された測定間隔又は連続的に探触子を移動させて厚さを測定する．測定間隔の指定がない場合は 5㎜以下とし，二振動子垂直探触子を用いる場合は音響隔離面の向きを測定線と直角に保つ.	測定断面の厚さ変化から裏面の状況を推測したり，監視部位の厚さ変動をモニターする場合.
d）多点測定法	円状又は楕円状の測定範囲内を多点測定し，最小値を測定値とする．測定範囲に指定がない場合，直径 30㎜円内とする.	局部腐食に有効であり，多点測定の範囲を順次移動させつつ，最小値を求める.
e）精密測定法	指定範囲で測定点を増加させ，厚さの変化を推定する方法．測定範囲に指定がない場合，50㎜角の範囲を 10㎜間隔の格子状に分割し，各交点を測定する.	腐食が著しい時に，減厚の分布を把握する場合．半自動化によってマッピング図も得ることもできる.

表 3.2.8　表面粗さによる接触媒質の選定（JIS Z 2355:2005）

測定面の粗さ		
25μmRz(6.3a)未満	25～100μmRz(6.3～25a)	100μmRz(25a)を超えるもの
規定しない.	濃度 75%以上のグリセリン水溶液，合成グリセリン又はこれと同等以上の音響結合が得られることが確認されているもの.	測定面を 25a(100S)以下に仕上げ，上記と同じもの.

(*)何れも，測定技術者，測定物及び測定装置に有害でないものとする.

⑦ 校正値の確認

校正値は，測定中少なくとも 1 時間毎及び測定終了直後に行い，前回の校正値より所定の許容値を超えている場合は，その間の測定を再実施する．所定の許容値は，特に指示がない場合は，0.1㎜表示の厚さ計では 0.3㎜とする.

特に二振動子垂直探触子で薄板を測定する場合は，ビームの向きが鉛直方向からの傾きが大きくなり，校正が不十分であると大きな誤差が発生するので注意が必要である．

また，装置の作動に以上がある場合，装置の全部又は一部を交換した場合，技術者が交替した場合には，その都度校正を行う．

⑧ 表示器付き超音波厚さ計による測定

超音波エコーを表示できる厚さ計の場合には，第 1 回底面エコー高さを表示器上目盛の 80%以上 100%以下に，また時間軸の範囲は被測定物の推定残存厚さにより測定し易い範囲に調整する．

f) 塗膜上からの計測における留意点

測定方式は，図 3.2.3 で示すように塗膜と鋼材の境界面エコーも多数現れることから，(Bm～Bn)方式及び(S～B_1)方式のディジタル表示超音波厚さ計を用いる．また，塗膜面の平滑度や塗膜中の超音波ビームの減衰が大きい測定物では，表示器付き超音波厚さ計を用いる．なお，塗膜厚さが 0.3㎜ 未満の場合は(R-B_1)方式のディジタル表示超音波厚さ計を用いることができるが，一般的には塗膜部も含んだ厚さ測定となる．

使用するディジタル表示超音波厚さ計は，腐食検出器(鋼板の裏面から安定したエコーが得られない場合，異常値を表示しないよう信号処理しマーク等によって測定不可の状態を表示できる厚さ計)，腐食部厚さ測定器(腐食した鋼板の裏面の厚さを測定し，その測定値を表示できる厚さ計)を用いることができる．一般に厚さ測定が可能な塗膜厚さを，表 3.2.9 に示す．

表 3.2.9　塗膜上から厚さ測定可能なコーティング厚さ（JIS Z 2355:2005）

測定可能なコーティング材料	最大厚さ
FRP	3.0㎜
ガラスフレーク	1.0㎜
エポキシ	1.0㎜
タールエポキシ	0.7㎜

g) 裏面腐食の板厚計測における留意点

超音波計測では，超音波の入射に対して相対的に反射面が多い位置からの反射エコーを底面エコーとして評価して板厚として表示されるため，裏面が腐食して凹凸形状が著しい場合はその最小厚さを指示していない場合がある．特に，ピンホールや孔食の先端からのエコーは極めて微弱なため，これより遅れてくるエコーを検出し板厚値が大きく評価されてしまう．

また，探触子接触部の直下が腐食による傾斜面となっている場合は，探触子がごく少し移動しても表示値のばらつきが大きく，これも予想値を超えて検出されることがある．

この対策としては，表示器付き超音波厚さ計又は超音波探傷器を用いて，基本表示の図面を観察しながら腐食裏面の状況を推定する，また表示される板厚値や波形を安定(超音波の散乱を防止)させるために測定板厚に合わせて超音波を集束している探触子を選定する．また，裏面の錆びの付着の有無は測定結果へ影響を及ぼさないとの報告もある [2)]．ただし，腐食凹凸の程度によっては計測ができない場合もあり，必要により裏面の平滑処理を行わなくてはならない．

h) 表面腐食の板厚計測での課題

表面が腐食して凹凸形状が著しい場合には，一般的には超音波が鋼材中に垂直に入射できず散乱するため，測定が不可能である．また測定値や底面反射波が表示できたとしても，探触子と鋼材表面との間隙があるため，板厚を大きめに評価してしまう．

さらに，表面に錆びが付着している場合には浮き錆びの場合には鋼板との間に空隙が存在し，超音波の入射を阻害する．

腐食板材の計測試験の報告例[2)]においては，測定面が平滑または凹凸小の場合には裏面の腐食凹凸の大小に関わらず，1 サンプル当りの測定点数約 700 点中ほぼ全点の測定が可能であったが，測定面が凹凸大の場合には測定不可能な点数(特に板厚減少部)が極端に増加し，平均板厚評価では重量換算板厚よりも大きい値を与えている．

なお，近年ではこの課題への対策として，3.2.4 節に示す腐食・塗膜面からの有効板厚計の開発などの取り組みもなされている．

3.2.3 板の表面形状から板厚を計測する方法

(1) レーザ式変位計を用いた方法

a) はじめに

レーザ式変位計を用いた腐食表面の計測方法は，実験室レベルで腐食表面形状を精密に計測する手法として広く用いられるようになっている．腐食表面を精緻に計測することで，腐食環境や腐食機構の違いによる腐食面性状の違いを捉えたり，構造部材あるいはその一部分の残存板厚を，広範囲にわたって効率よく評価するために使用される．

レーザ式変位計は，古典的なノギスやマイクロメータのように対象物に触れずに，相対距離を計測することができる．このような非接触型の計測手法は，広範囲を対象とした計測について，物理的接触制御時間を必要としないので，効率がよい．

b) レーザ式変位計の種類

レーザ式変位計は，レーザ光を対象物に照射して相対距離を計測するが，現在入手可能なレーザ式変位計には，さまざまな測定範囲のものがある．レーザ式変位計の測定範囲は，基準距離から±○○㎜のように記述され，この範囲外では所要の精度をもって計測することができない．よって，計測対象物の大きさや面の凹凸に応じて適切なレーザ式変位計を選択することが必要である．一般的に，測定範囲が大きくなると変位計の大きさも大きくなり，分解能も大きくなる．基準距離が長くなると，レーザ光の出力レベルが強くなるため，レーザのスポット径が大きくなり，計測精度が低下することもある．そのため，計測の目的・測定対象物の形状や所要精度に応じて適切なレーザ式変位計を選択する必要がある．一部のレーザ式変位計では独自の技術で，レーザスポット径が大きくても反射光の強度分布から相対距離を補正して精度を向上させているものもある．また駆動方式にも定電圧式のもの，定電流式のものなどさまざまな種類がある．最近のレーザ式変位計には，増幅器が内蔵され本体のみで相対距離を表示できる小型のものも流通している．

c) レーザ式変位計を用いた腐食面の計測装置

① 卓上型：レーザ式変位計を用いた既存製品では，「表面粗さ計測器」として卓上型のものが普

及している．形式にもよるが，概ね10ないし30cm四方の範囲を計測可能である．レーザ式変位計が取り付けられた治具が，平面内を動くことで計測範囲内の任意の位置の相対距離を測る簡単なものから，リニアスケールと駆動装置によって自動的に任意の計測間隔で相対距離を計測する装置もある．

② 関節型座標計測装置：多関節型のアームの先に，レーザ式変位計を取り付け，立体対象物の任意の三次元座標を入力する装置（三次元デジタイザ）も，既存製品のひとつである．三次元デジタイザは，金型の製作や映像製作，形成外科や美容外科等の分野で使用されている．測定可能な空間の大きさは，一般的なもので1立方メートル程度である．レーザ式変位計タイプだけでなく，接触式のものやアームを持たないカメラ式のものが市販品として流通している．図3.2.4に装置の例を示す．



(a)アーム型レーザ式（RSI GmbH社）　(b)カメラ型レーザ式（コニカミノルタ）

図3.2.4　三次元デジタイザ

③ 独自の計測システム：既存製品では計測できない大きなもの，鋼管などの特殊な形状のものを計測するために，独自の計測システムを構築する場合もある．いずれもパルスモータとリニアスケールを組み合わせ，駆動装置によって所定の座標にレーザ式変位計が取り付けられた治具を移動して対象物との相対距離を計測する．

首都大学の例：図3.2.5に示す計測装置は，1000mm(X)_1000mm(Y)_30mm(Z)の立体空間の表面形状を計測可能である．表3.2.10に諸元を示す．X及びY方向の位置特定には10μm読みのリニアスケールを用い，計測範囲および移動間隔を指定することで，レーザ変位計ヘッドを自動的に移動し，その計測値を記録する．レーザ式変位計ヘッドは，Z方向（奥行き）だけでなくアタッチメントを取り替えることで，鉛直上向き・鉛直下向き方向の距離を計測することもできるようになっている．また，レーザ式変位計そのもの取り替えることも可能で，さまざまな基準距離あるいは計測範囲に応じた，変位計を選択することが可能である．計測の制御・データの収録には市販のパーソナルコンピュータを用いている．

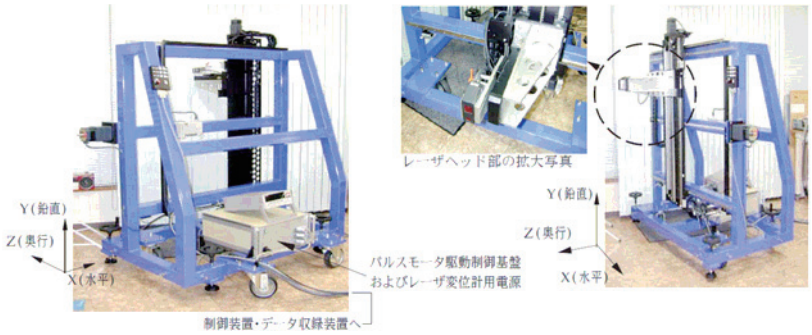


図3.2.5　レーザ式変位計を用いた計測システムの例

京都大学の例：図3.2.6に示す計測装置は，鋼管の肉厚および初期変形量（試験体に生じている全体的な曲がりあるいは反り）を計測するための装置の例である．支柱にの先にパルスモータとリニアスケールを取り付け，治具を上下させて，鋼管の内外の相対位置にレーザ式変位計を移動する．あわせて，計測台が回転することで周方向に移動し計測を行う．

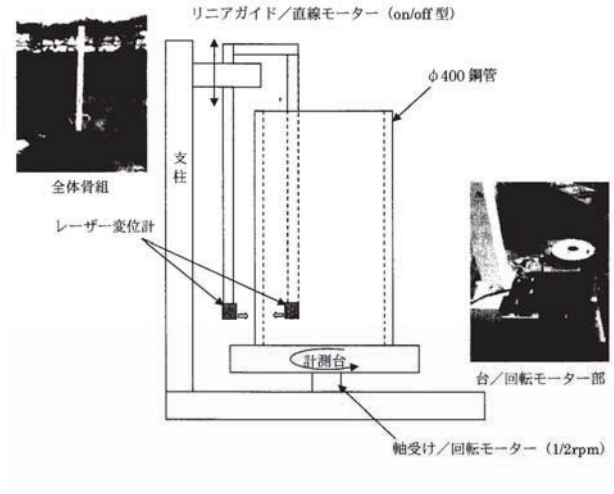


図3.2.6　レーザ式変位計を用いた鋼管の計測システム

表3.2.10　表面粗さ計測装置の諸元

計測範囲(X)	1000mm
計測範囲(Y)	1000mm
奥行方向ストローク	100mm
リニアスケール読み	10 μm
レーザ変位計	LK-080
基準距離	80mm
測定範囲	± 15mm
分解能	3 μm
計測速度(1mm 間隔)	200data/min
台枠	鋼製
動作電源	AC100V
移動装置および固定装置付き	

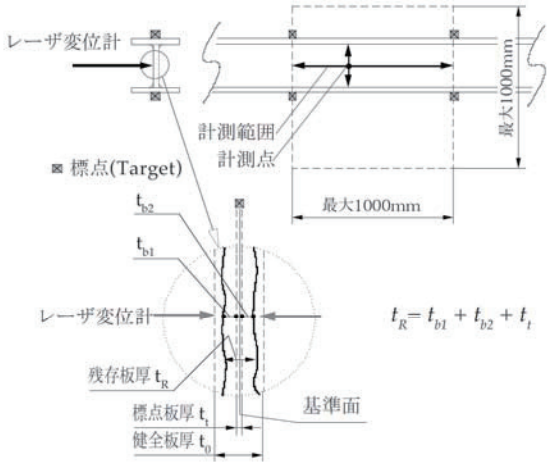


図3.2.7　板厚の算出方法

d) 必要な前処理

レーザ式変位計は，測定対象物までの物理距離を計測するものであるので，計測に先立って鋼板表面の塗膜を除去し．健全な鋼材表面が露出するようにする必要がある．ブラスト処理やケレンなどの機械的な方法によって塗膜を除去する方法のほかに，主に精緻な腐食形状を把握するために薬品処理を行なう場合もある．前処理の具体的な方法については3.2.1節を参照されたい．

e) 板厚の算出

図3.2.6の例のように，板の双方向からレーザ式変位計で同時に計測するような場合は，ノギスやマイクロメータと同じように板厚を直接測ることができる．しかし，片面からのみ，すなわち腐食表面形状のみを計測した場合は，これを板厚に換算するためには，工夫が必要である．

明らかに片面のみが腐食しているような場合は，レーザ式変位計で片面のみ計測し，健全部の板厚を別途マイクロメータなどで計測しておくことで，表面データを板厚に変換することが可能である．そうでない場合は，片面ずつ2度にわたって対象物を計測することになる．図3.2.7に示すように，両側から視準できる既知の厚さの測定点(標点)を設けることで，残存板厚tRを算出することができる．精度のよい計測を行なうためには，供試体および測定機器類の設置精度にも留意する必要がある．

f) 測定可能な範囲

レーザ式変位計の特性から，反射光が散乱してしまうような鋭利な測定点データは計測が困難な場合がある．また，ウエブ-フランジ接合部等の狭隘部の計測では，入射波だけでなく反射波の受光部までに障害となるような物体がないように，変位計の向きや角度の工夫が必要な場合もある．

g) 取扱いの留意点

レーザ光機器類の一般的留意点として，計測作業時には，レーザ光を直接見ることのないように注意する．長時間の計測の場合は，温度変化や測定環境の振動等にも留意が必要である．

(2) 画像計測による方法

a) はじめに

画像計測にはいろいろな手法があるが，ここでは，腐食面の形状測定に利用されている画像計測手法の一つとして，デジタル写真測量による 3 次元形状計測技術について紹介する．デジタル写真測量は被写体（腐食面）をデジタルカメラによって撮影し，撮像素子（CCD や CMOS）に投影された像と被写体との間の幾何学的関係から被写体の形状に関する情報を取得する技術である．

デジタル写真測量を用いた腐食面の形状計測の利点は，

- 市販のデジタルカメラなど，必要な装置が安価かつ簡便である．
- 形状の評価は撮影画像を用いた後処理によって行うことができ，現場での作業は写真を撮影するのみでよい．
- 非接触で計測を行うことができる．
- 一度に比較的広範囲の計測を行うことができる．

などを挙げることができる．一方，欠点としては

- 浮き錆などがある場合には，それを除去した上で計測を行う必要がある（ただしこれは他の計

測手法でも同様）．

- 計測精度を一義的に定めることが困難である．
- 手法によっては腐食面に明確な色のパターン（後述の図 3.2.12 参照）が残っている必要があり，例えばブラスト後の鋼材表面への適用は困難である．

ここではデジタル写真測量に用いられる理論[3)]を概説するとともに，腐食面の形状測定にそれを適用する場合の工夫や注意点について述べる．

b）標準ステレオカメラモデル

1 台のカメラで撮影した写真から被写体の奥行きを含む 3 次元情報を得ることは，特殊な条件を与えない限り不可能である．そこで，異なる 2 箇所以上の位置から撮影した写真からステレオモデルを構成し，被写体を観測することによって 3 次元情報を求める．ここでは異なる 2 箇所で撮影された 2 枚の画像を用いる場合について解説する．

ステレオ視の最もシンプルな構成は，図 3.2.8 に示すように，焦点距離が等しい 2 台のカメラが，光軸が平行で，かつ各々の画像面が同一平面上にのるように配置される場合である．これは標準ステレオカメラモデルと呼ばれる．

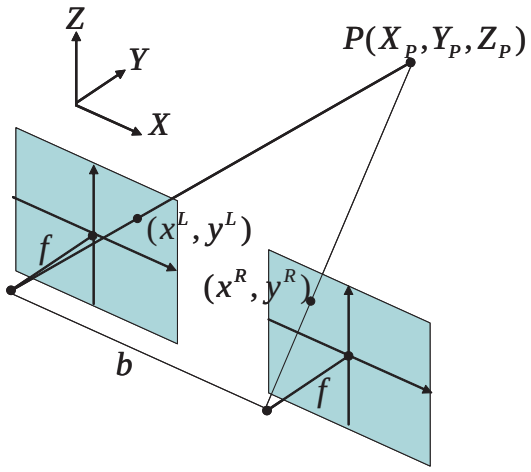


図 3.2.8 標準ステレオカメラモデル

図に示すようにワールド座標系 (X,Y,Z) と，それぞれの画像における写真座標系（撮像画像の面内にとった $x-y$ 座標系）を定めたとき，空間中のある点 $P(X_P,Y_P,Z_P)$ が，左右の画像上にそれぞれ写真座標系で (x^L,y^L)，(x^R,y^R) に投影されたとすれば，幾何学的関係により次式が成立する．

$$X_P = \frac{b(x^L + x^R)}{2d} \tag{3.2.3}$$

$$Y_P = \frac{b(y^L + y^R)}{2d} \tag{3.2.4}$$

$$Z_P = \frac{bf}{d} \tag{3.2.5}$$

ここに f は焦点距離，b は両カメラの主点間の距離で基線長と呼ばれる．d は両画像の投影点の写真座標上での位置の差，すなわち

$$d = x_L - x_R \tag{3.2.6}$$

であり，視差と呼ばれる．したがって f，b，d が既知のもとで，左右の画像上の投影座標から，もとの 3 次元位置 $P(X_P, Y_P, Z_P)$ が決定される．上記は図 3.2.8 のように正確にカメラを配置し，かつ正確な f，b が既知の場合の話であるが，実際にはこれを実現するのは難しい．

c）単写真の幾何学

図 3.2.9 に示すように，空間に任意に設定されたワールド座標において $P(X_P, Y_P, Z_P)$ で表される点を撮影したところ，写真座標系において (x, y) の位置に投影されたとする．写真座標 (x, y) で示される位置をワールド座標系で表したものを (X, Y, Z) とすれば，両者には次の関係がある．

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \tag{3.2.7}$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.2.8}$$

ここに，

(X, Y, Z)：写真座標 (x, y) で示される投影点の位置をワールド座標系で表したもの

(X_0, Y_0, Z_0)：カメラの主点位置

$(\omega, \varphi, \kappa)$：$X$，$Y$，$Z$ 軸まわりの回転角

f：焦点距離

である．

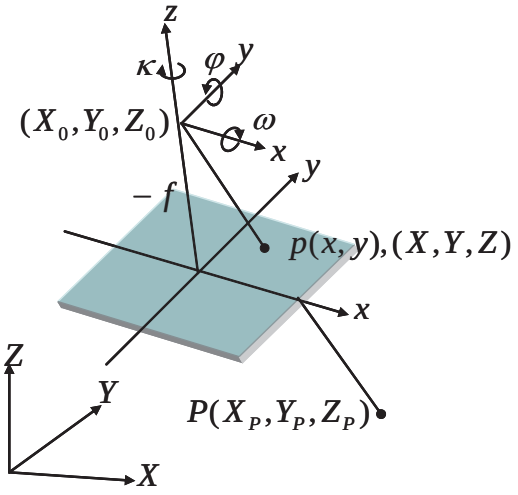


図 3.2.9　単写真の座標系

(X_0, Y_0, Z_0)，$(\omega, \varphi, \kappa)$はカメラの位置と傾きに関するパラメータであり，外部標定要素と呼ばれる．a_{ij}は直交マトリクスとなるので，式(3.2.7)は次のようにも書ける．

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \tag{3.2.9}$$

ここで，対象点$P(X_P, Y_P, Z_P)$，カメラ主点(X_0, Y_0, Z_0)および点Pの投影点(X, Y, Z)の３点が１本の直線上になければならないという条件（共線条件），

$$\begin{pmatrix} X_P - X_0 \\ Y_P - Y_0 \\ Z_P - Z_0 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{3.2.10}$$

を用いると，次式が得られる．

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11}(X_P - X_0) + a_{12}(Y_P - Y_0) + a_{13}(Z_P - Z_0)}{a_{31}(X_P - X_0) + a_{32}(Y_P - Y_0) + a_{33}(Z_P - Z_0)} \\ y &= -f \frac{a_{21}(X_P - X_0) + a_{22}(Y_P - Y_0) + a_{23}(Z_P - Z_0)}{a_{31}(X_P - X_0) + a_{32}(Y_P - Y_0) + a_{33}(Z_P - Z_0)} \end{aligned} \tag{3.2.11}$$

あるいはこれを逆に解くと

$$\begin{aligned} X_P - X_0 &= \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f}(Z_P - Z_0) \\ Y_P - Y_0 &= \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f}(Z_P - Z_0) \end{aligned} \tag{3.2.12}$$

以上が対象点の写真座標とワールド座標とを関連づける基本式となる．

d）標定要素の決定

一般にカメラの位置や傾きをあらかじめ正確に知ることは困難であるので，外部標定要素は計測に先だって何らかの方法で求めておく必要がある．そのための最も単純な方法は，座標が既知の点を撮影し，それによって外部標定要素（未知数）を求めるものである．一般には座標が既知の点（基準点）を数点配置したキャリブレーション用基準体を用意し，それを撮影し，基準点の写真座標を求める．得られた基準点の写真座標と，既知の地上座標により，式(3.2.12)によって標定要素を計算する．この手法を単写真標定という．

実際の撮影作業において，座標が既知の基準点を設けることは煩雑である．そこで，そのような基準点を設けることなく，同じ点を投影した 2 枚の画像の情報から標定要素を求めることもできる．これは相互標定といわれるプロセスの一部であり，その概要は次の通りである．

異なる２箇所から同一の点Ｐを撮影し，その際の左右カメラの標定要素をそれぞれ

$(X_0^L, Y_0^L, Z_0^L, \omega^L, \varphi^L, \kappa^L)$，$(X_0^R, Y_0^R, Z_0^R, \omega^R, \varphi^R, \kappa^R)$

とする．また，ある点Pの左右画像上での写真座標がそれぞれ(x^L, y^L)，(x^R, y^R)であったとする．相互標定では，左右カメラの主点位置と，点Pの左右画面上での投影点の計 4 点が同じ平面上

になければならないという条件（共面条件）を用いる（図 3.2.10）．

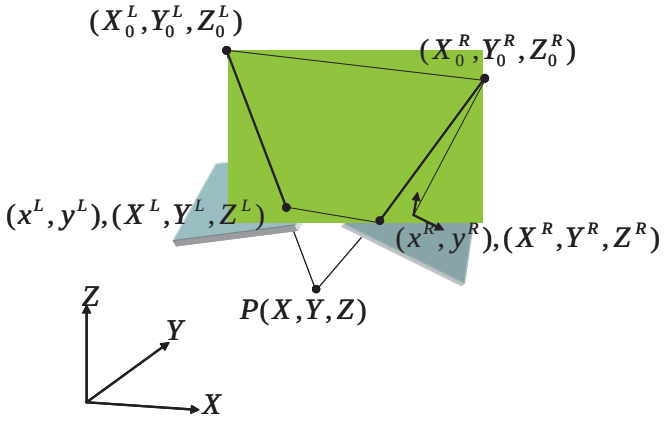


図 3.2.10 共面条件

左右画像の投影点を(x^L, y^L)，(x^R, y^R)をワールド座標系で表したものをそれぞれ(X^L, Y^L, Z^L)，(X^R, Y^R, Z^R)とすると，共面条件は次式で表される．

$$\begin{vmatrix} X_0^R & Y_0^R & Z_0^R & 1 \\ X_0^L & Y_0^L & Z_0^L & 1 \\ X^R & Y^R & Z^R & 1 \\ X^L & Y^L & Z^L & 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{3.2.13}$$

ワールド座標系は任意に設定できるので，それを左カメラの写真座標系に合わせたとする．このとき，$X_0^L = Y_0^L = Z_0^L = \omega^L = \varphi^L = \kappa^L = 0$である．写真座標とワールド座標との関係は式(3.2.11)で表されるので，これを左カメラに対して使えば

$$\begin{pmatrix} x^L \\ y^L \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}^L & a_{12}^L & a_{13}^L \\ a_{21}^L & a_{22}^L & a_{23}^L \\ a_{31}^L & a_{32}^L & a_{33}^L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^L - X_0^L \\ Y^L - Y_0^L \\ Z^L - Z_0^L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^L - 0 \\ Y^L - 0 \\ Z^L - 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^L \\ Y^L \\ Z^L \end{pmatrix} \tag{3.2.14}$$

これらを式(3.2.13)の共面条件に入れると

$$\begin{vmatrix} X_0^L & Y_0^L & Z_0^L & 1 \\ X_0^R & Y_0^R & Z_0^R & 1 \\ X^L & Y^L & Z^L & 1 \\ X^R & Y^R & Z^R & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ X_0^R & Y_0^R & Z_0^R & 1 \\ x^L & y^L & -f & 1 \\ X^R & Y^R & Z^R & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x^L & y^L & -f \\ X_0^R & Y_0^R & Z_0^R \\ X^R & Y^R & Z^R \end{vmatrix} = 0 \tag{3.2.15}$$

さらに，右カメラの主点位置のX座標X_0^Rを単位長さにとり，

$$\begin{aligned} Y_0^R / X_0^R &= b_Y^R \\ Z_0^R / X_0^R &= b_Z^R \end{aligned} \tag{3.2.16}$$

とおけば，式(3.2.15)は

$$\begin{vmatrix} x^L & y^L & -f \\ 1 & b_Y^R & b_Z^R \\ X^R & Y^R & Z^R \end{vmatrix} = 0 \qquad (3.2.17)$$

となる．以上より，標定要素（未知変量）は右カメラに関するもののみであり，

$(b_Y^R, b_Z^R, \omega^R, \varphi^R, \kappa^R)$

の 5 つとなる．式(3.2.17)を観測方程式として最小自乗法を適用すれば，すべての未知変量を求めることができる．この手法はキャリブレーション基準体を必要としないことから，現場での適用性を考えれば非常に大きな利点がある．その一方で，求められる点の座標は，左右カメラの主点間距離を単位長さとした相対的な座標であることから，それを絶対的な寸法に直す（絶対標定）には，たとえば画像内に大きさのわかっている物体を写し込むなどの工夫が必要となる．また，一般に，この手法で求めた標定要素の精度は，単写真標定と比較すると劣るといわれている．

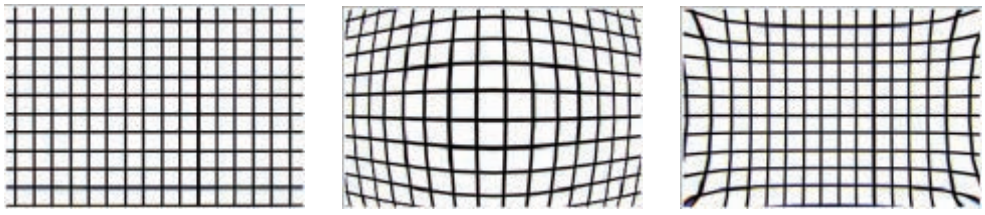
e）内部標定

デジタル写真測量の精度劣化要因は，撮像素子の平面性，レンズディストーション，機械誤差などが考えられる．このうちレンズディストーションは光の直進性を妨げる要因として最も大きいといわれている．特に一般のカメラ用レンズは計測用カメラレンズに比べ，結合位置が撮像素子の周辺にいくほど大きいため，レンズディストーションについて考慮する必要がある．レンズディストーションの例を図 3.2.11 に示す．

レンズディストーションを表現するモデルにはいくつかあるが，最も一般的に用いられるのはラディアルディストーションモデルである．これは画面中心からの距離が遠くなるほどゆがみが大きくなることを表現したものであり，例えば次の式で写真座標の補正を行う．

$$\begin{aligned} x' &= x - x(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y' &= y - y(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r^2 &= x^2 + y^2 \end{aligned} \qquad (3.2.18)$$

この場合，新たにk_1，k_2が未知変量として加わることになる．この未知変量はカメラレンズに特有のものであり，内部標定要素と呼ばれる．また，式(3.2.7)などで示した焦点距離fについても，一般のカメラではその値が不正確であるため，内部標定要素として取り扱なければならない場合がある．



(a) 収差なし　　(b)　樽型収差　　(c)　糸巻型収差

図3.2.11　レンズディストーションの例

f）対応付け手法

デジタルステレオグラフィーでは，物体上のある点が複数画像上においてそれぞれどの位置に投影されているかを決定する，いわゆる対応付けが必要となる．すなわち，ある点が一方の画像上の点(x^L, y^L)に投影されているとき，それと同じ点が他方の画像上のどこに投影されているかを判別し，その座標(x^R, y^R)を求める必要がある．このような対応付けを実施するために，マッチングをはじめとした様々なデジタル画像処理手法が提案されているが，それらは主に特徴ベース法と領域ベース法の2種類に大別できる．特徴ベース法は，両画像から特徴的な部分を抽出し，それらの部分どうしで対応付けを行う手法である．特徴的な部分としては，物体の輪郭（エッジ）などがよく用いられる．一方，領域ベース法は，画像上のある小領域間の相関をとることにより，両画像の対応領域を求める手法である．腐食表面においては，一般に特徴的な物体の輪郭は存在せず，全面にわたってコントラストの低い画像になることから，特徴ベース法を適用することは難しく，領域ベース法を用いるのが適切であると考えられる．ここでは領域ベース法による対応付け手法の一例[5]について解説する．

領域ベース法とは，2 つの異なる小領域間の相関の強さをもとにして対応付けを行う手法である．領域間の相関をとるためにはデジタル相互相関法を用いるのが簡単である．デジタル相互相関法は画像間の類似性を相関の強さにより数値化し，相関が最大となる箇所を対応点とする手法であり，次式に示される相関値により相関の度合いを評価するものである．

$$C = \frac{\sigma_{LR}}{\sqrt{\sigma_L \sigma_R}} \tag{3.2.19}$$

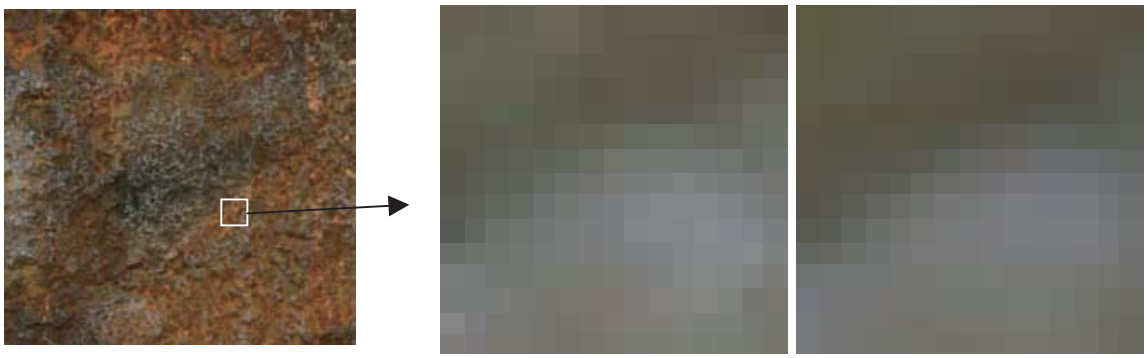
ここに，

C ：相関値

σ_L, σ_R ：左右領域内の濃淡値の分散

σ_{LR} ：左右領域内の濃淡値の共分散

具体的には左右の画像内に同じ大きさの小領域を設け，その領域内の画素データから相関値を計算し，それが最も高くなる領域どうしを見つけ対応点とする．実際の腐食面を撮影した２枚の画像から 15×15 ピクセルの小領域を取り出し，最も高い相関値をとった組合せの例を図 3.2.12 に示す．



(a)　元の画像（左画像のみを示す）　　(b)　元画像中の小領域の色のパターン（左画像と右画像）

図 3.2.12 対応づけられた小領域の例

ここに示すように，全体的にはコントラストが低い腐食面においても，15×15 ピクセル程度の領域をとれば，その領域内に特徴的な色のパターンが認められる．より大きな領域をとれば，色の情報が増えるのでマッチングは行いやすくなるが，空間分解能は低下する．逆に，極端に小さな領域，例えば図 3.2.12 の左上の 2×2 ピクセルの領域などを考えた場合には，特徴的な色のパターンは認められず，対応付けが不可能となることは容易に想像できるであろう．よって，どの程度の大きさの領域をとればよいかについては注意深く検討する必要がある．

なお，探索を行う場合に，常に対象画像全体を探索するのは効率的ではない．対応点が“ありそうな”領域をあらかじめ特定できれば，その領域のみを探索すればよいので効率的である．探索領域を絞り込むためには，次に述べるエピポーラ幾何を使うことができる．

ステレオグラフィーにおいては，左右の画像上の幾何学的関係により，エピポーラ幾何と呼ばれる関係が成立しており，これを使うと探索領域を大幅に減らすことができる．任意の点と両者の画像上での投影点，および両カメラの主点位置には図 3.2.13 に示すような関係がある．

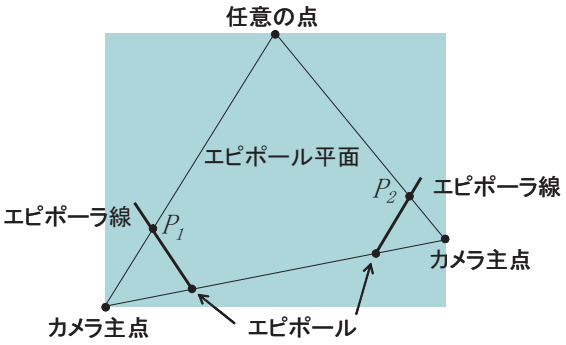


図 3.2.13 エピポール幾何

ここで，任意点と両カメラの主点とで定まる平面をエピポーラ平面といい，エピポーラ平面と両画像との交線をエピポーラ線という．３次元空間中の注目点が移動すると，それに伴って両画像中のエピポーラ線も変化するが，そうした画像中のすべてのエピポーラ線は１点で交わり，その点をエピポールという．左画像の中の点を P_1 とすると，その画像中でのエピポーラ線が 1 本定まり，そのエピポーラ線と対応する右画像上でのエピポーラ線が計算できる．点 P_1 と対応する右画像上の点 P_2 は，計算されたエピポーラ線上に存在するはずであり（これをエピポーラ拘束と呼ぶ），右画像ではその線に沿って探索を行えばよいことになる．

対応付けを簡易に行う手法として，藤井らはカメラの一方をプロジェクタに置き換え，それによって等間隔で配置された標点を対象物に投影し，他方のカメラでそれを撮影するという新たな手法の提案を行っている [4]．これは 2 台のカメラのうち一方で撮影される画像を，等間隔で配置した標点群の画像として置き換えることに相当している．すなわち，片方のカメラにおける標点の写真座標を既知として取り扱うことができる．他方のカメラで被写体に投影された標点群を撮影し，その写真座標を特定する．プロジェクタによって投影される標点は規則的に配置されているので，被写体に投影された標点の並びなどを考え，それとの対応付けを行うことは容易である．

g）撮影に関する留意点

・デジタルカメラの解像度

当然のことながら，高い解像度を有するカメラの方が高精度で計測を行うことができる．デジタルカメラの解像度は，撮像素子の画素数，画素配置，色フィルタ配置や，レンズ性能，画像信号処理など，複合的要素によって定まる．CIPA（カメラ映像機器工業界）では ISO2233 にある「視覚解像度」を標準測定法としている．これは指定チャートを画面一杯になるように撮影し，撮影したチャートの中央部を拡大して，どこまで一つ一つの線が認識できるかによって解像度を示す指標とするものである．

実際には撮影される画像の画素数を，解像度を示すための参考値として用いることも多い．撮像素子の感光面の大きさはカタログに記載されているため，それを記録画像の画素数で除せば，１画素の大きさを計算することができる．撮像素子の 1 辺をb，その辺に対応する画素数がpであれば，撮像素子の大きさμ_{CCD}は

$$\mu_{CCD} = \frac{b}{p} \tag{3.2.20}$$

で表される．

・画像フォーマット

一般に，最終保存に使われる JPEG フォーマットは不可逆圧縮であり，元データと比較すると原理的に画質劣化が避けられない．よって画素レベルでの色情報によってマッチングを行おうとする目的には適していない．

多くのデジタルカメラで採用されている撮像素子では各画素が単色の色情報しか持たない．このためその周辺画素から足りない色情報を集め与えることで色情報を補完し，フルカラー画像を作り出すデモザイク処理を行っている．このデモザイク処理方法はメーカーによってまちまちであり，その方法が完成画像の画質に大きな影響を及ぼす．最近ではデモザイク前の生データをそのままファイル保存する機能を持つものが増え始めた．この画像を RAW 画像と呼ぶ．腐食面の形状計測には，RAW 画像を用いるか，圧縮を行わない TIFF，BMP などの画像フォーマットを用いるのが望ましい．

・写真測量の精度

撮影した写真の平面方向の位置の精度は，撮像素子の分解能と撮影縮尺による．

撮影縮尺とは図 3.2.14 に示す撮像素子の大きさlと，実際に撮影する被写体面の長さLとの比であり，レンズの焦点距離と被写体までの距離の比に等しい．すなわち，

$$\text{撮影縮尺} = \frac{l}{L} = \frac{f}{d} \tag{3.2.21}$$

1 画素の大きさを撮影縮尺で除せば，1 画素の大きさに相当する被写体の大きさ（1 画素が被写体のどの程度の範囲を写しているか）を求めることができ，これが精度を考える上での参考値となる．1 画素に対応する被写体の大きさをμ_{XY}とすれば

$$\mu_{XY} = \frac{d}{f}\mu_{CCD} = \frac{d}{f}\frac{b}{p} \tag{3.2.22}$$

で表される．

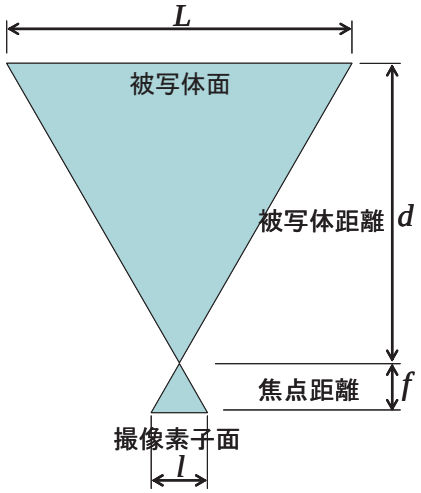
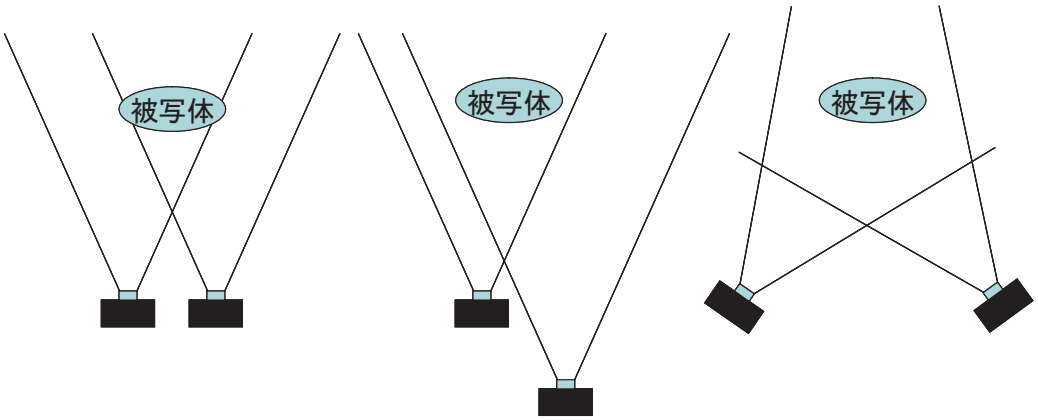


図 3.2.14 被写体との関係

μ_{XY} が小さいほど 1 画素が受け持つ被写体の大きさが小さくなるので，空間分解能が高いことを示している．そのためには，撮影距離を短くする（d を小さくする）か，焦点距離を長くする（f を大きくする）ことが有効であるが，それに伴って撮影領域（計測領域）は狭くなる．画像の画素数を大きくする（p を大きくする．例えば standard の画質を fine の画質に変える）ことも有効であり，この場合は計測領域の減少もない．文献 5)には，限られたケースであるが，μ_{XY} と測定誤差の関係が示されており，一つの目安になる．



(a) 平行撮影　　(b) 偏角撮影　　(c) 収斂撮影

図 3.2.15 撮影方法

奥行き方向の精度は撮影位置どうしの距離（基線長）にも関係する．図 3.2.15 は 2 つの撮影位置の関係を示したものである（2 つのカメラを同時に図示しているが，相互標定によるキャリブレーションでは 1 台のカメラを移動させて図のように撮影してもよい）．基線長と被写体距離の比を基線比といい，奥行き方向の精度は基線比が大きいほど向上する．良好な計測結果を得るためには基線比を 1/2～1/20 程度にとるのがよいとされている [3)]．しかし図 3.2.15(a)からわかるように，基線

長を長く撮ると左右画像のオーバーラップ領域が小さくなり，計測可能領域が減少する．オーバーラップ部分を増すために，カメラの位置や傾きを変化させて撮影を行うことも可能である．偏角撮影では被写体距離が異なるため，２つの画像の分解能が異なるといった問題や，対応付けを行う際の領域の大きさを左右画像で変えなければならないといった煩雑さを伴う．また，収斂撮影の場合には，同じ画像内でも被写体距離が大きく異なることから，画像の分解能にばらつきが生じることや，対応付けを行う際のウィンドウの形状そのものを変えなければならないこと，あまり角度をつけすぎると被写界深度からはずれる（焦点の合わない）箇所が生じる可能性などがある．それぞれの撮影方法の得失を理解して，適切に使い分けることが大切である．

g）その他

デジタルカメラの高性能化，低廉化が進んでいる現在，画像を用いた計測技術は今後も益々普及するものと期待される．なお，本節で説明した内容を含む画像計測ソフトが市販されており（例えば倉敷紡績（株）http://www.kurabo.co.jp/el/index.html）その利用も可能である．

(3) レプリカ法

a）計測方法と特徴

レプリカ法は，非破壊的に表面状態を計測する手段として利用されている便利な方法である．簡易に表面形状を面として複写でき，その型取り剤を計測することで表面形状を定量的に扱える．

b）型取り剤の種類

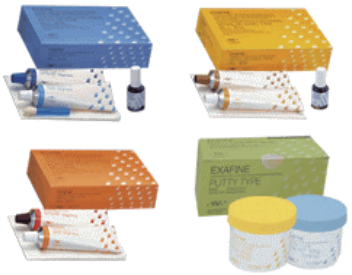
型取り剤には工業用，歯科用などの区別があり素材も様々である．腐食面の型取りに使用するものとしては表 3.2.11 に示すように主に 4 種類に分類される．パテタイプやペーストタイプは粘土のように取り扱いが容易，スラリータイプは液状の型取り剤を該当部へ流し込むため型取り精度が良い，板状タイプは安価であるなど製品によって特徴があり，それらの長所や使いどころ等から選別する．

表 3.2.11　主な型取り剤の種類

種類	商品名	複写精度	取扱性	価格	硬化時間
パテタイプ	エクザファインパテタイプ(ジーシーデンタルプロダクツ) コルトフラックス(スイス コルテン社)	○	○	○	5 分
ペーストタイプ	エクザファインハード，レギュラー，インジェクションタイプ(ジーシー)	○	○	○	5 分
スラリータイプ	テクノビット(ドイツ クルツアー社)	◎	△	△	10 分
板状タイプ	モデリングコンパウンド(ジーシー)	△	△	◎	5 分



(1) パテタイプ(コルトフラックス)



(2) ペーストタイプ, パテタイプ(ジーシー)



(3) スラリータイプ(テクノビット)



(4) 板状タイプ(モデリングコンパウンド)

図 3.2.16　型取り剤

c) 前処理と型取り，計測方法

① 必要な前処理

対象部表面のごみ・錆び・油等を除去しておく必要がある．また，作業環境(暑・寒・狭・暗・放射線等)によっては型取り剤の硬化ができない場合もあるため，作業環境を確認しておく．

② 型取り

各種の型取り剤に応じた方法を以下に示す．なお転写精度の低い板状タイプは省略する．

i) パテタイプによる型取り方法

・ベースパテとキャタリストパテを適した比率で，練り合わせる．ＧＣパテでは等量づつ，コルトフラックスではベース多量×キャタリスト少量とする(キャタリストが多くなると早く・硬く，硬化する)．

・型取り剤の練り合わせ時には付属のプラスチックグローブ等を使うと良いが，ゴム手袋や汚れた素手で扱うと硬化しないことがあるので注意する．

・型取り剤の色具合に注意して均一に混ざり合うように，ひきちぎったり折りたたんだりするように手先を動かし，かつ気泡の混入を少なくする．

・対象部表面と型取り剤との間に気泡が出来ないように注意して型取り剤を押付ける．

・対象部にしっかりと押付けたら，次に厚みを持たすように指先で形を整える．

ii) ペーストタイプによる型取り方法

・型取り剤を押し出すカートリッジディスペンサーⅡを組み立てる．

・ミキシングチップ先端から使いはじめに出てくる練和された型取り剤は練和不十分なことが多いため，長さ 10 ㎜ぐらいを紙ウエスに押し出して除去する．

・型取り対象部にミキシングチップ先端を十分に近づけてから型取り剤を押し出す．このとき，気泡を巻き込まないように丁寧に操作する．

・次に，台板を型取り剤の上にのせてゆっくりと押し込んで行く．
・台板が対象部表面に接触しないように注意しながら型取り剤厚みが 3〜5 ㎜残るまで押し込む．

ⅲ）スラリータイプによる型取り方法
・型取り対象部をポリエチレンモールドや粘土枠などで囲う．
・枠の大きさは，直径 50 ㎜程度を最大として考慮する(型取り品厚さ 10〜15 ㎜)．
・スラリータイプの型取り剤は，あまり一気に注入すると発熱過剰になり，気孔が発生し易くなる．発熱気孔を減少させるために，容器を水に入れる，強制空冷するなどが有効である．
・型取り剤は重量比で粉末２に対して液体１の割合で紙コップに入れて撹拌する．
・撹拌作業 30 秒，静かに放置 30 秒(ガスが抜ける)を経て型枠に注入する．
・注入後は型枠から型取り剤が漏れていないか点検して放置する．

ⅳ）アセチによる型取り方法
・容器に粉末アセチルセルロースと酢酸メチルを適用入れ，気泡がなくなるまで 1〜2 日放置して，気泡のない水あめ状のアセチ溶液を作る．
・型取り対象部に容器の先端からアセチ溶液を押し出して，水玉状の形にしておく．
・その上から固形アセチルセルロース(固形アセチ)をゆっくり押し込んでいく．
・固形アセチの押付けを途中で止めると気泡が多く発生するので，出来るだけ表面に届くように強く押付けるのが良い．

③ 型取り剤の取り外し
・硬化後，レプリカ剤取り外しの前に対象部の符号，位置，角度等をマーキングする．
・パテタイプ，ペーストタイプ，アセチ，板状タイプは約 5 分，スラリータイプは約 10 分間の放置で，ほぼ硬化する．
・パテタイプでの注意点：夏場では５〜６分ぐらいで取り外し出来るが，冬場では時間がかかる．特に冬場の屋外ではドライヤーで対象部を温めておく必要がある．
・スラリータイプでの注意点：約 10 分間の放置では熱いので，十分に冷却するまで約 20 分間置く方が良い．
・ペーストタイプでの注意点：特に冬場の屋外ではドライヤーで対象部を温めておく必要がある．
・型取り剤の一部を指で押さえてみて，硬化状態を確認したら，型取り品を対象部から丁寧に取り外す．型取り品は端のほうからはがすようにすると型取り部を損ねることなく取り外しが出来る．なお，スラリータイプは対象部にしっかり密着しているので，木ハンマーなどで注意深くたたいて取外す．

④ 型取り剤の検査と保管
・型取り品を専用ケース・ポリ袋などに入れる．
・ごみが付着しないように素早く収納し，変形・変質させないように注意して取り扱う．なお，パテ・ペーストタイプは型取り品同士を接触させないように注意する．

⑤ 型取り剤の計測

・型取り品の表面形状は，スケールやデプスゲージ，デプスマイクロメータ等の機械式計測や，レーザ計測，画像計測などの，表面形状を計測する方法によって計測する．

・各計測の具体的な方法については，3.2.2 (1) および，3.2.3 (1),(2)を参照されたい．

3.2.4 その他の方法

(1) 渦電流による残存断面積の計測方法

従来から用いられている渦電流探傷（ECT：Eddy Current Testing）方法は，鋼材等の金属材料の表面に発生したき裂を検出するために用いられてきた．すなわち，図 3.2.17 に模式的に示す(図中の従来技術の領域)ように，微少なき裂を精度良く検出するために，被検物に渦電流センサーを近接させて磁界強度を上げて探傷が行われるのが通例である．

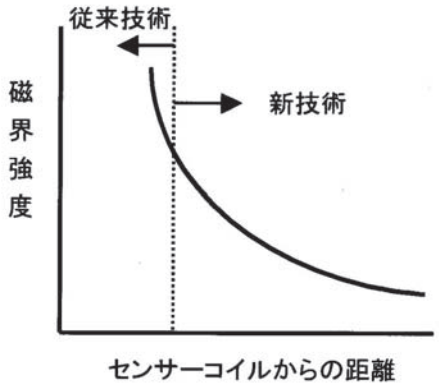


図 3.2.17 渦電流計測条件（従来法と新技術）

最近，これら従来の方法とは全く逆の計測方法，すなわち，図 3.2.17 中の新技術領域に示すように，渦電流センサーと被検物との間の距離を確保して磁界強度を下げた探傷により，鋼製ワイヤーや棒状の鋼材の残存断面積を非破壊で定量的に計測しうることが明らかとなっている [6]．現在は研究段階であり，具体的な適用事例としてはこれからであるが，土木分野においては長大鋼橋の吊ワイヤーの腐食劣化診断等への適用が検討されつつある．

この渦電流計測方法は，ワイヤーや棒状の形状に対して有効であるが，鋼製材料に限らず，非鉄金属等，種々の金属材質について適用できる．図 3.2.18 は，この渦電流計測方法の原理を適用して，外径数 ㎜～十数 ㎜ 前後の細経のワイヤー用途に試作されたポータブルな測定計器の例 [6]を示す．また，図 3.2.19 に腐食劣化により減肉してゆくワイヤーに対する測定例 [6]を示す．計測で得られた渦電流信号により，ワイヤーの経時変化が捉えられているのがわかる．渦電流信号と残存断面積との相関関係を別途把握しておくことにより，残存断面積の値が求まるとともに，腐食速度を別途求めておくことにより，余寿命の算定や更新時期の推定が可能となる．

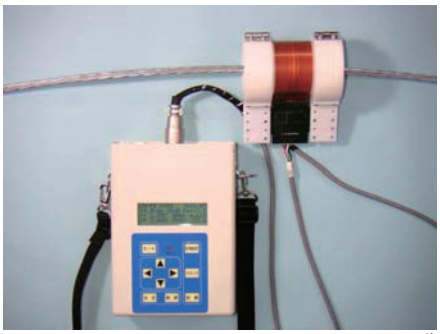


図 3.2.18　試作された渦電流測定計器 [6]
（市販の渦電流センサー [7] を接続）

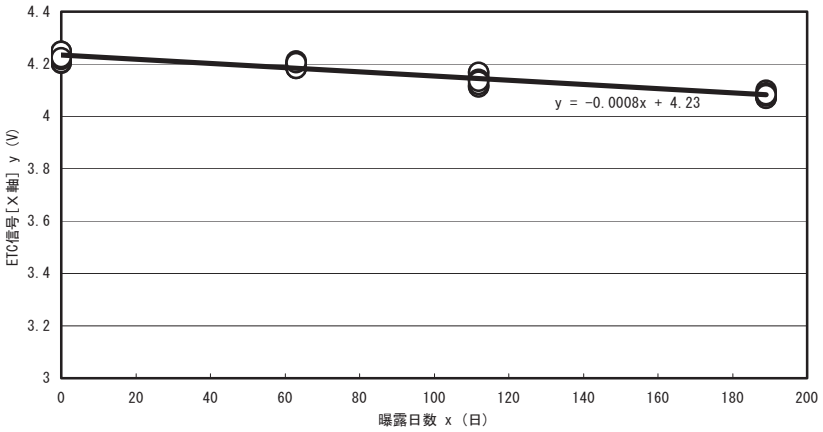


図 3.2.19　渦電流(ECT)信号の経時変化の例（海中浸漬に伴う鋼線残存断面積減少）[6]

(2) 超音波による腐食・塗膜面からの板厚計測方法

鋼構造物部材の板厚を，腐食凹凸面の状態のまま片面のみから測定することを目的に，超音波を用いた測定方法の検討や板厚測定装置の開発がなされており，従来必要とされていた計測前の錆び，塗膜除去作業や計測後のタッチアップ作業を不要とできる特徴がある．腐食凹凸面からの超音波厚さ測定法に関しては，集束探触子を用いた方法 [8)9)]，ソフト探触子による方法 [10)]，小型探触子や遅延材探触子を用いた方法 [11)]，電磁超音波による方法 [12)] が検討されている．

ここでは，集束探触子による有効板厚測定技術ならびにこの技術を応用して開発された板厚計(NETIS 登録 No. TH-040001)を紹介する．

図 3.2.20 に従来の超音波計測原理を，図 3.2.21 に開発された集束探触子を示す．超音波法では，計測対象の測定表面に探触子を十分密着させる必要がある．腐食により凹凸となった面や塗膜面から超音波を効率的に入射させるために，超音波をある深さ位置に集束する受信素子を用いており，腐食による凹部になじんで接触させるために，先端を細くした専用のホルダーにより局部的に水を溜める探触子である．

図 3.2.22 に計測概念を模式的に示す [13)]．計測波形画面には，①表面反射エコーS，②第一底面エコーB_1，③第二底面エコーB_2 が現れ，B_1 エコーと B_2 エコーの差により測定表面の錆び層や塗膜層の厚さ

を除いた有効板厚を計測する原理となっている.

図 3.2.23 に開発されたポータブル板厚計を示す[14]. 本法は従来の超音波計測原理に改良を加えて計測結果が自動計測され，視覚化された結果が得られるようソフト面の開発もなされており，主に鋼板厚さ 3～40mmの計測実験による検証がなされている.

なお，本測定装置を用いた余寿命診断の例として「水門扉の腐食寿命診断システム CLAS-G」[15)16)] が報告されている.

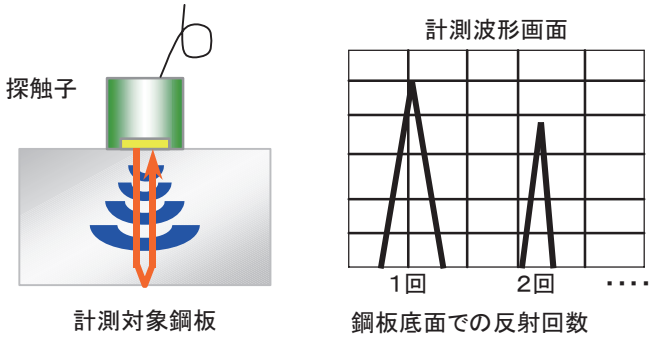


図 3.2.20　従来の超音波計測原理

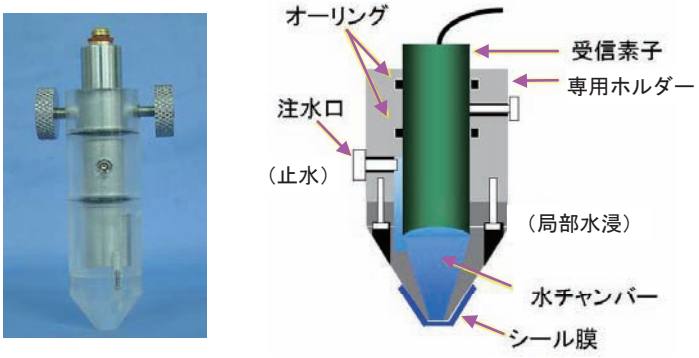
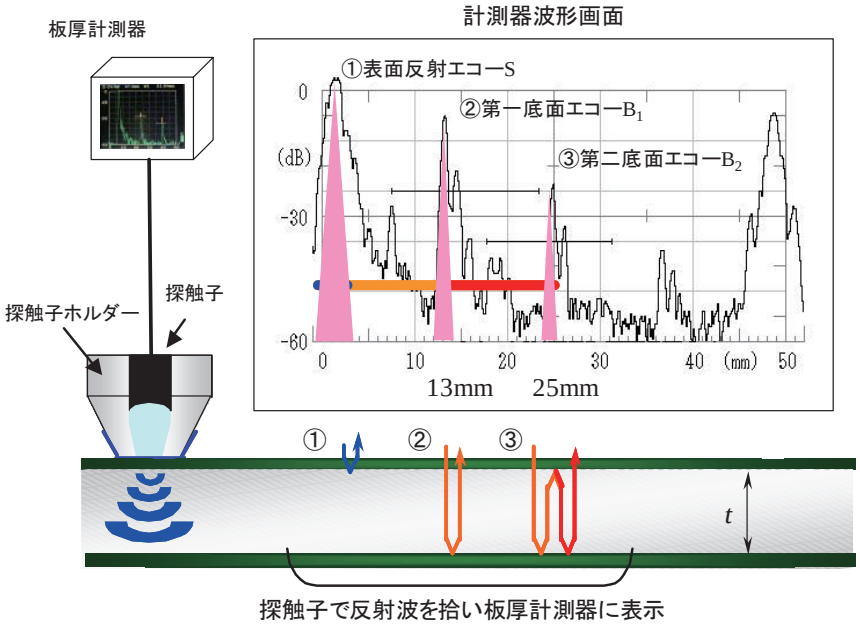


図 3.2.21　超音波有効板厚計の開発探触子



計測対象鋼板の有効板厚　$t = B_2 - B_1 = 25 - 13 = 12\ mm$

図 3.2.22　超音波有効板厚計の計測概念



図 3.2.23　開発されたポータブル測定計器

3.3　板厚計測法の適用事例

この節では，3.2 節で取り上げた板厚計測法についてそれぞれの特性を把握するために，同一の試験体に対して行った表面計測・板厚計測の結果を示す.

3.3.1　試験体

計測の対象とした試験体を表3.3.1に示す．腐食形態に示した略号は，「港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル」の腐食形態の分類に基づくものであり，Geは比較的平坦な全面腐食を，Luは凹凸の激しい局部腐食を，Wは広口の孔食を示す．腐食試験体の選定にあたっては，主として鋼橋の代表的腐食性状を対象とし，両面とも一様腐食である比較的軽度の腐食試験体から，両面とも著しい局部腐食を生じているような試験体について，合計5体を選定した.

今回はこれらの試験体を，I.超音波法，II.レーザー法，III.画像計測法の3種類の計測手法によって計測し，その計測精度や特性について比較・検討を行った.

表3.3.1　試験体

試験体名	採取部分	大きさ・健全板厚 [mm]	腐食形態	腐食状況
(1)C橋腐食試験体	上横構の①フランジ及②ウエブの一部	①250x50x9	Lu	
		②250x150x9	A面：Lu, B面：W	
(2)T水門扉		250x250x9	A面：Lu B面：W	表面：腐食の激しい面 裏面：比較的腐食が少ない面
(3)K橋試験体		300x150x22	Ge	板材の中央にリブ、総じて軽度の一様腐食
(4)R橋試験体	主桁フランジの一部(リベット接合)	200x200	フランジ表面：Ge	リベットの頭の丸みがなくなっている



図3.3.1　(1) C橋試験体①

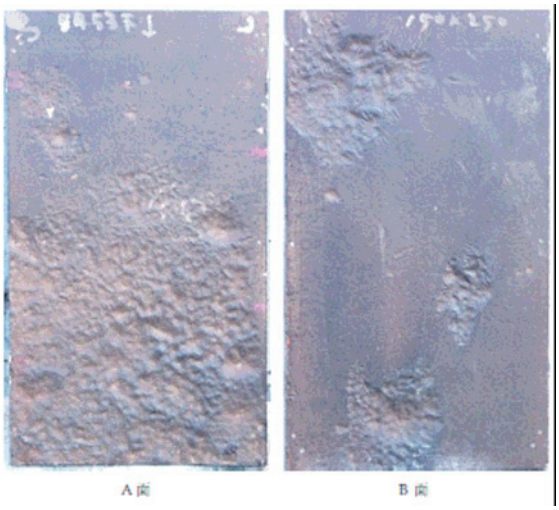
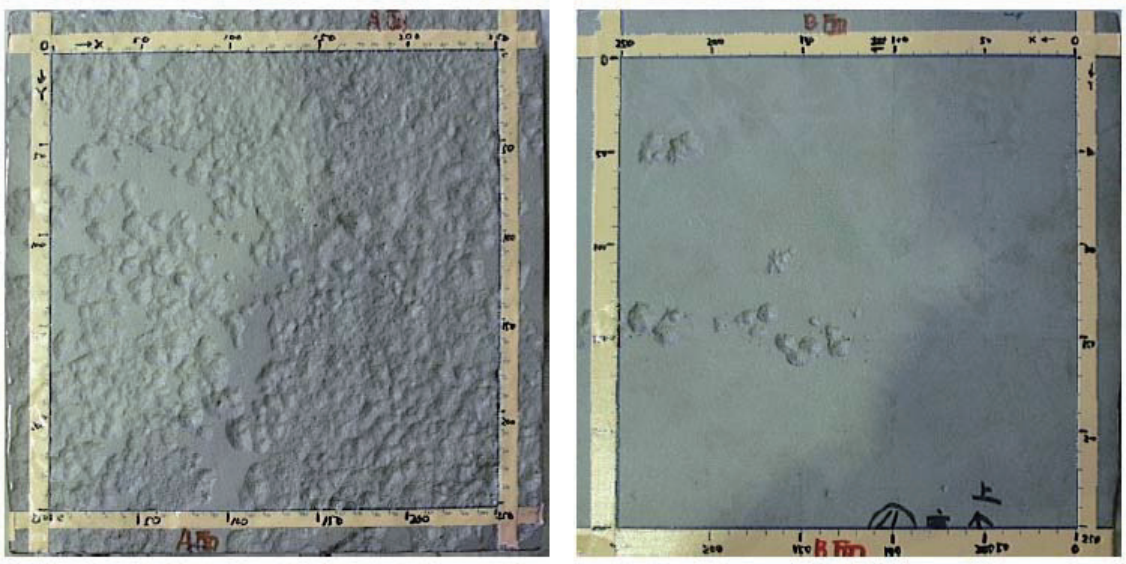


図3.3.2　(2) C橋試験体②



A面　　B面

図3.3.3　(3) T水門試験体



A面　　B面

図3.3.4　(4) K橋試験体



図3.3.5　(5) R橋試験体

(1) C橋腐食試験体

C橋腐食試験体は，下横構の溶接I型部材のフランジおよびウエブを切り出したものである．①・②の試験体ともに表面は全面に局部腐食を有している一方，反対面は一部の領域に広口の孔食が分布しており，表面とは異なった腐食性状を示している（図3.3.1及び図3.3.2）．

健全部の板厚は，マイクロメータによる計測によれば約9.2㎜であった．

(2) T水門扉試験体

T水門扉に使用されていた腐食鋼板の写真を図3.3.3に示す．(1)の試験体と同じく，表面は凹凸の激しい局部腐食性状を，反対面は一部に広口の腐食が分布している．

(3) K橋試験体

K橋試験体は，切欠きの桁端部を受けるブラケット部を切り出した試験体である．図3.3.4に示すように，この試験体は比較的腐食量は小さく，全面に板厚減少している．

(4) R橋試験体

R橋試験体は，リベット接合の鉄道桁を切り出した試験体で，まくら木下のリベットが著しく腐食している．計測対象領域は，図3.3.5に示すように，腐食リベットを含む200x200㎜の範囲とした．

3.3.2　超音波法

(1) 計測機器の仕様

計測機器は，腐食・塗膜面からの超音波有効板厚計[8)13)]を適用した．本装置は，測定面がある程度の凹凸や錆び層，塗膜層があってもそれらを除いた有効板厚を計測するために探触子に工夫がなされ，表示器付き超音波厚さ計で板厚を測定するように開発されたものである．

探触子の選定および設定は，各サンプルの公称板厚や腐食状況に合わせて表3.3.2とした．

測定方式は，B1-B2(第1回-第2回底面エコー)方式によって有効板厚を計測した．

表3.3.2　計測対象別の探触子の仕様選定

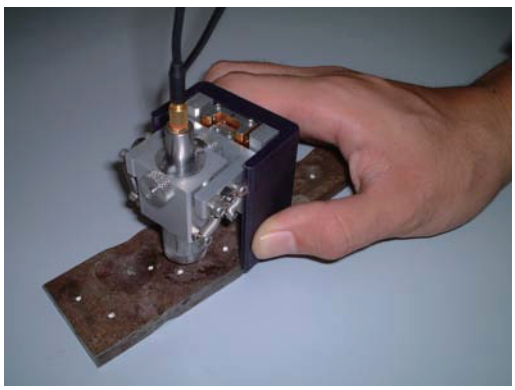
被測定物	健全部の板厚	腐食部の想定板厚	探触子の仕様			
			公称周波数	探触子直径	フォーカス位置(素子先端より)	水浸距離
C橋	9mm	4～6mm	10MHz	φ6.3mm	25mm	12mm
T水門	8mm	3～5mm	15MHz	φ3.2mm	25mm	10mm
K橋	22mm	20～22mm	5MHz	φ6.3mm	38mm	25mm
T橋	12mm	6～8mm	10MHz	φ6.3mm	25mm	12mm

(2) 計測方法

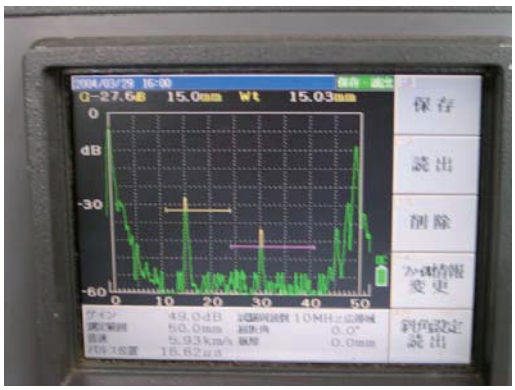
探傷感度は，腐食状況に合わせて底面エコーの立ち上がりが明確に判定できる感度に設定した．

また被測定物と同程度の厚さを持った校正用試験片及び，被測定物の健全部の板厚を用いて，B1エコーでのパルス位置の調整及び，B1-B2間距離による音速補正を行った．

腐食による凹凸表面は浮き錆びを除去するために，ワイヤブラシで軽くブラッシングした状態とした(グラインダ等による測定表面の平滑処理は行わない)．測定表面にグリセリン水溶液を塗布後，探触子を接触させて，B1エコー，B2エコーを検出して板厚を測定した．



(1) 腐食面からの探触子の接触状況



(2) B1-B2方式による探傷波形

図3.3.6　腐食・塗膜面からの超音波有効板厚計による測定状況

(3) 計測位置

計測位置は，腐食の状況を把握するために縦横50㎜ピッチに引いた罫線の交点，および腐食面での最小値を測定するために測定面にて凹形状となっている底部での板厚を測定した．なお，測定面は，A面およびB面の

両面とした.

(4) 計測結果

全試験体での超音波板厚測定結果，超音波計測とマイクロメータ計測との比較が可能な箇所における比較精度，および測定精度の標準偏差を用いた統計的精度などを表3.3.3に纏める.

マイクロメータ値との比較対象箇所は，マイクロメータで計測可能な板端近傍(格子状，腐食凹部)の測定箇所とした.

a) C橋試験体

図3.3.7,8にC橋試験体の測定結果を示す．格子状計測では測定面の傾斜により測定不可の位置があったが，腐食凹部での計測では何れも計測可能であり，最小測定値はマイクロメータとの比較精度はほぼ±0.5㎜以内であった.

b) T水門扉試験体

図3.3.9にT水門扉試験体の測定結果を示す．C橋試験体と同様に，格子状計測では測定面の傾斜により測定不可の位置があったが，腐食凹部での計測では何れも計測可能であり，マイクロメータとの比較精度は全てほぼ±0.5㎜以内に収まっていた.

c) K橋試験体

図3.3.10にK橋試験体の測定結果を示す．健全部の板厚22㎜に対して腐食は殆ど見られず，マイクロメータとの測定比較精度は±0.2㎜以内であった.

d) R橋試験体

図3.3.11にR橋試験体の測定結果を示す．本試験体はリベット継手部(鋼板重ね合わせ部)であったためB面からの計測ができず，マイクロメータによる測定も不可であった事から比較評価は行っていない.

超音波測定による最大板厚は12.05㎜，最小板厚は格子状計測：8.32㎜，凹部計測：6.58㎜であった.

e) 測定精度の評価と考察

腐食・塗膜面からの超音波有効板厚計[8),13)]を適用することで，各種の腐食試験体にて腐食減厚により凹形状となっている底部での板厚測定は可能であった．また，50㎜ピッチ格子状での測定においても，極端な傾斜部を除いてその殆どが測定可能であった.

マイクロメータ測定値と比較した結果，その測定精度はほぼ0.5㎜以内であった.

本測定方法での測定誤差の要因としては，主に，① 探触子と腐食凹面間の空隙(接触媒質の充填)，② 腐食凹凸面での探触子接触時の傾斜(板面に対する底面反射エコーの垂直度)，③ 裏面凹凸形状による超音波波形の不安定性，④ 表面付着錆びによる超音波散乱や微小空隙，⑤ 乱反射エコー(横波，縦波)の読み違い等が考えられる.

表3.3.3　超音波測定試験結果まとめ

	C橋試験体①		C橋試験体②		T水門試験体		K橋試験体	
	A面	B面	A面	B面	A面	B面	A面	B面
(1) 格子状測定データ数	6×3	6×3	6×4	6×4	6×6	6×6	4×6	4×6
(2) 格子状測定の平均値	7.66 mm	7.75 mm	7.68 mm	7.70 mm	6.97 mm	7.03 mm	21.98mm	21.98mm
(3) 凹形状部の測定箇所数	10 点	4 点	15 点	9 点	30 点	8 点	なし	なし
(4) 凹形状部の最小測定値	4.23 mm	4.30 mm	3.97 mm	2.85 mm	4.62 mm	4.50 mm	なし	なし
(5) マイクロメータ測定数 (精度比較対象数)	格子: 14 凹部: 10	格子: 14 凹部: 4	格子: 16 凹部: 6	格子: 16 凹部: 0	格子: 20 凹部: 6	格子: 20 凹部: 1	格子: 16 凹部: 0	格子: 16 凹部: 0
(6) 最大誤差 (＋側)	0.49	0.46	0.54	0.29	0.14	0.23	0.20	0.10
(7) 最大誤差 (－側)	-0.66	-0.58	-0.57	-0.31	-0.28	-0.36	-0.20	-0.20
(8) 平均誤差	-0.06	-0.07	0.01	-0.03	-0.05	-0.03	-0.01	-0.02
(9) 標準偏差	0.29	0.29	0.25	0.16	0.12	0.16	0.10	0.08
(10) 95%信頼精度 (＋側)	+0.51	+0.50	+0.50	+0.29	+0.19	+0.28	+0.18	+0.14
(11) 95%信頼精度 (－側)	-0.63	-0.63	-0.48	-0.35	-0.29	-0.34	-0.20	-0.18

(注) (1) 格子状測定データ数：縦横50㎜ピッチに引いた罫線の交点での超音波測定データ数

(2) 格子状測定の平均値：(1)での超音波測定データの板厚平均値

(3) 凹形状部の測定箇所数：測定表面(A, B面)で凹形状となった底部の超音波測定データ数

(4) 凹形状部の最小測定値：(3)での超音波測定データの最小値

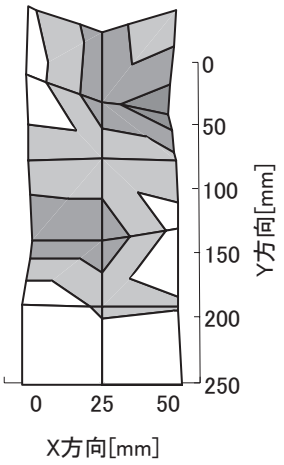
(5) マイクロメータ測定数：超音波の測定精度を評価するためにマイクロメータで測定したデータ数(マイクロメータが届く範囲のみを選定)

(6), (7) 最大誤差：(5)にてマイクロメータ測定値を基準とした場合の超音波測定値の最大誤差

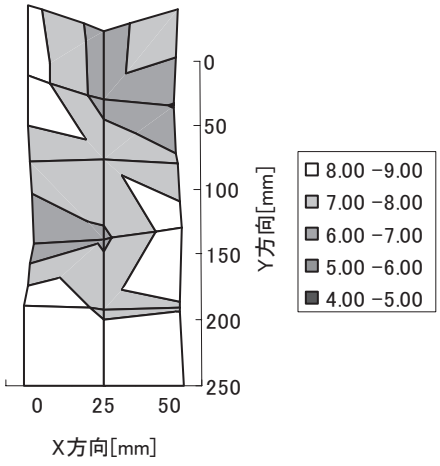
(8) 平均誤差：(5)にてマイクロメータ測定値に対する超音波測定値の誤差データの平均(e_m)

(9) 標準偏差：(5)にてマイクロメータ測定値に対する超音波測定値の誤差データの標準偏差(σ_e)

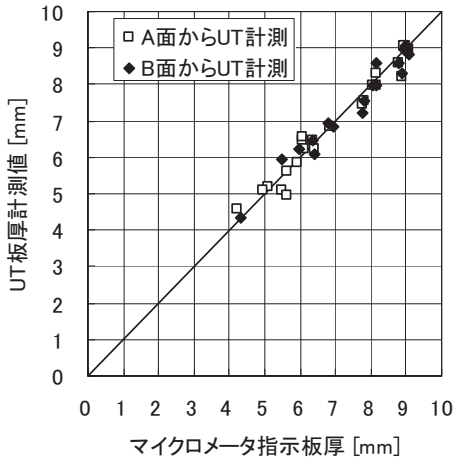
(10), (11) 95%信頼精度：平均誤差e_m±(1.96×標準偏差σ_e)



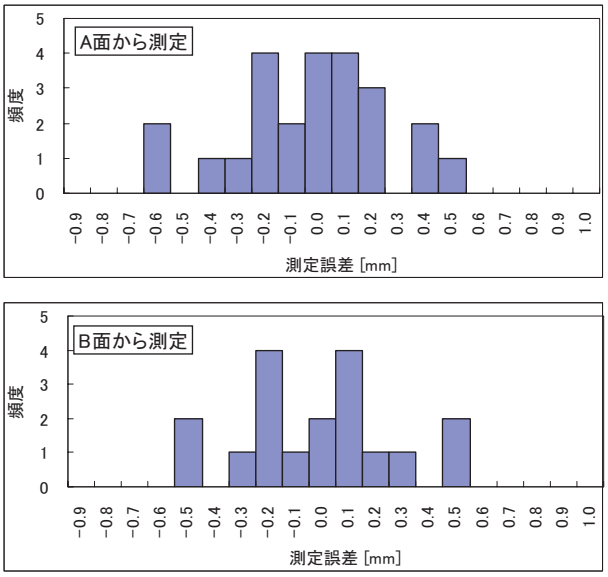
(1) A面格子状測定結果



(2) B面格子状測定結果

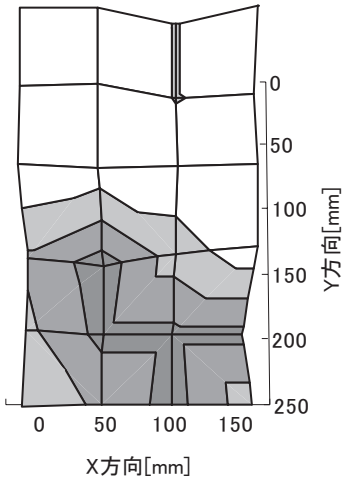


(3) マイクロメータ測定結果との比較

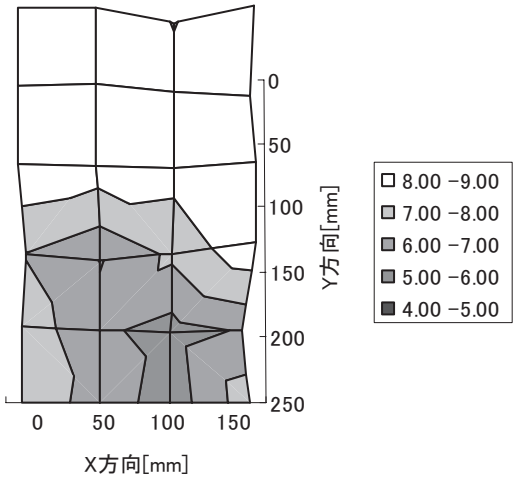


(4) マイクロメータその測定誤差分布

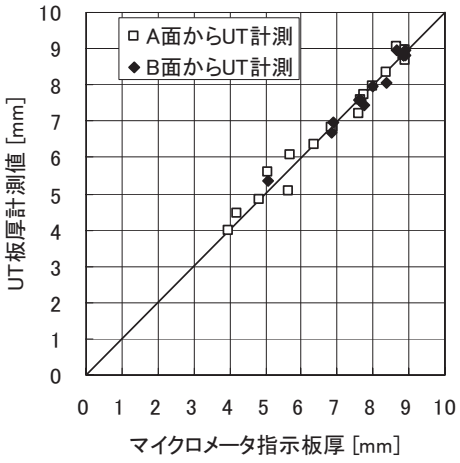
図3.3.7　C橋試験体①の超音波有効板厚計による測定結果



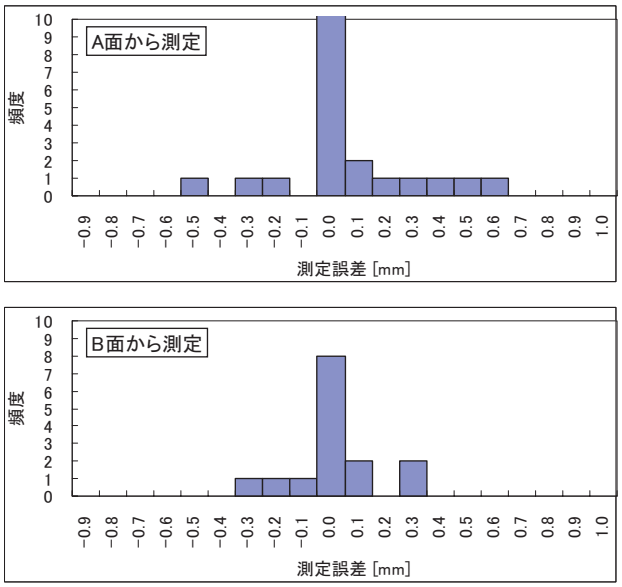
(1) A面格子状測定結果



(2) B面格子状測定結果

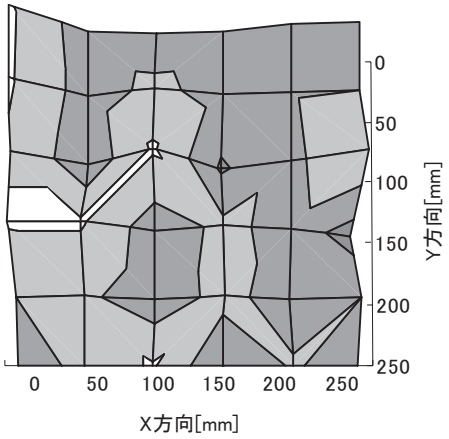


(3) マイクロメータ測定結果との比較

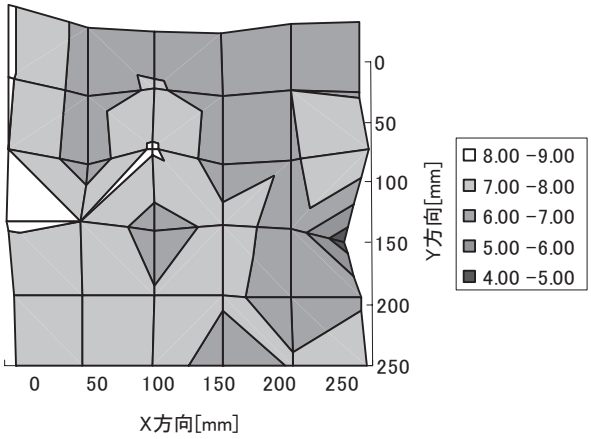


(4) マイクロメータその測定誤差分布

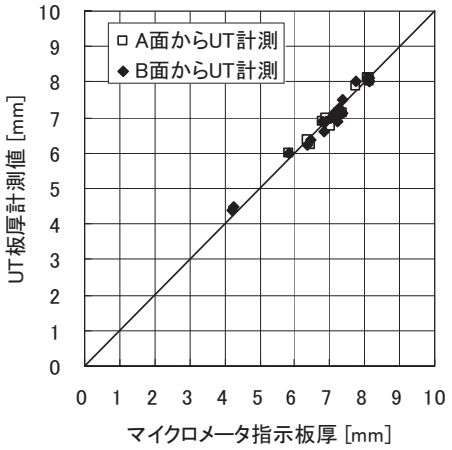
図3.3.8　C橋試験体②の超音波有効板厚計による測定結果



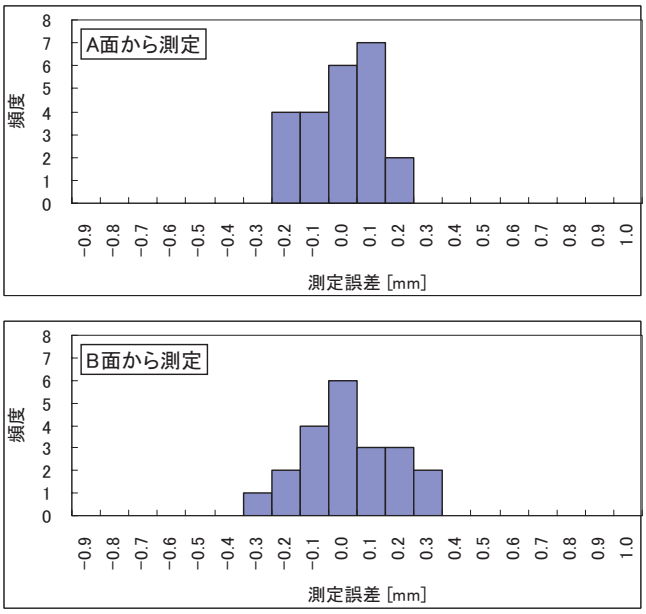
(1) A面格子状測定結果



(2) B面格子状測定結果

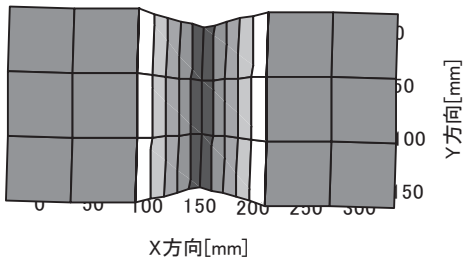


(3) マイクロメータ測定結果との比較

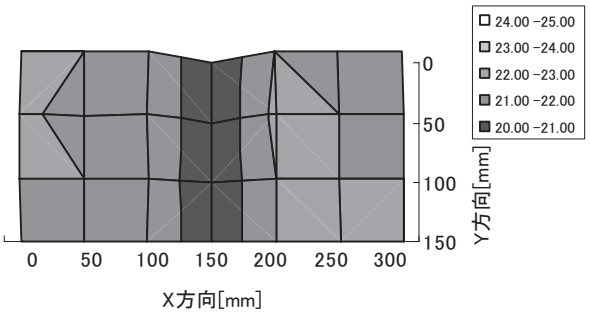


(4) マイクロメータその測定誤差分布

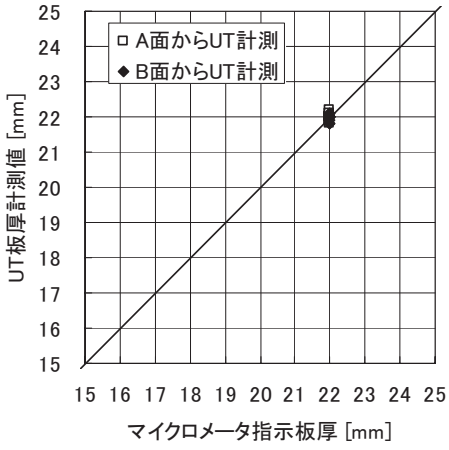
図3.3.9　T水門扉試験体の超音波有効板厚計による測定結果



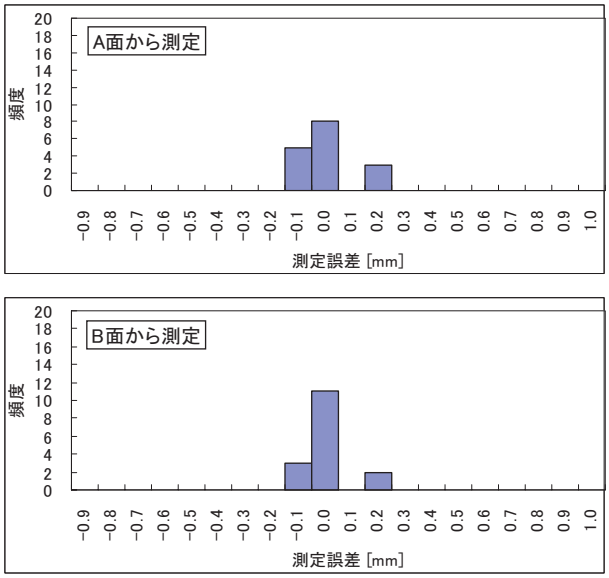
(1) A面格子状測定結果



(2) B面格子状測定結果



(3) マイクロメータ測定結果との比較



(4) マイクロメータその測定誤差分布

図3.3.10　K橋試験体の超音波有効板厚計による測定結果

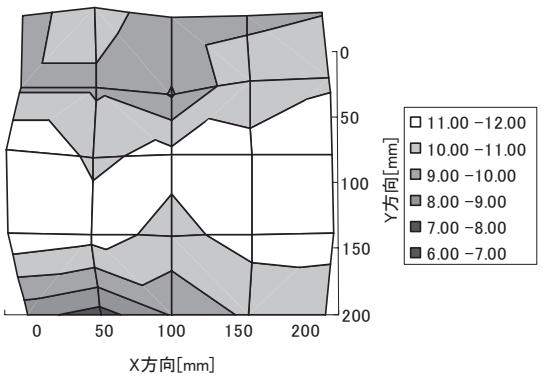


図3.3.11　R橋試験体の超音波有効板厚計による測定結果

3.3.3 レーザー法

ここではレーザー式変位計を用いた場合の計測結果について示す.

(1) C 橋試験体

C 橋試験体は, 上横構の①フランジおよび②ウエブの一部の2 つの試験体について計測を行なった. ①フランジ試験体の計測結果を図3.3.12に示す. 図3.3.12は, 健全板厚の中心面を基準とした腐食表面深さを示しており, 数値が小さいほど大きい腐食であることを示している. このコンター図と3.3.1で示した試験体の写真を見比べると, 腐食表面形状をよく再現していることがわかる. 表面腐食深さのヒストグラムに, 2つのピーク値を示している. これは, ひとつは腐食がほとんど生じていない部分を, もうひとつは, 腐食領域では腐食深さが正規確率密度に応じた分布を示すためである.

図3.3.13に②ウエブ試験体の計測結果を示す. この試験体も, 3.3.1 で示した試験体の写真に対して, 腐食表面形状をよく再現していることがわかる. ただし, B 面下部にみられるように, 健全板厚よりも一部の領域が厚く評価されている部分がある. これは, 板自体の初期曲がりの影響を受けたものである. 小片では, このような初期の板の変形はほとんど無視できるが, 長尺ものや大型の試験体の場合は, 表面形状にこれらのモードも含まれることに注意する必要がある. 別途, これらの問題については3.4.1 で取扱う.

尚, 両面の計測結果から板厚に変換する場合は, これらのモードは自動的に除去される. ただし, 部材の残存耐荷力を評価する場合には, これらの初期変形が, 耐力に影響を及ぼす荷重作用状態があることにも注意が必要である.

(2) T 水門扉試験体

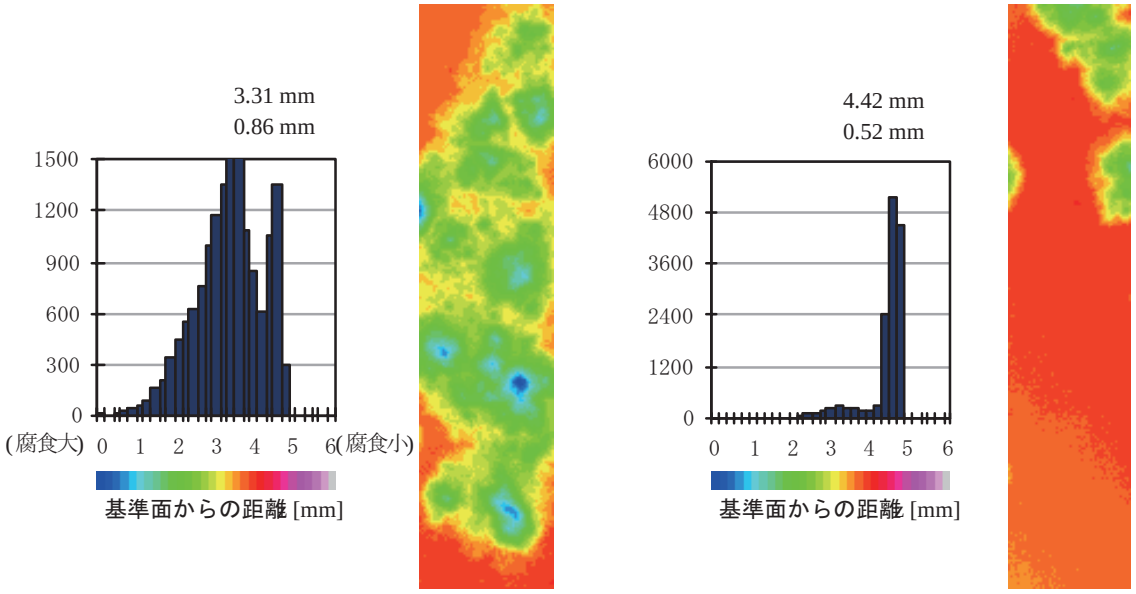
T 水門試験体は, A 面とB 面とで異なる腐食性状となっている. 図3.3.14に示すように, レーザー法によって計測された表面腐食深さ形状は, 3.3.1 で示した腐食試験体をよく再現している.

(3) K 橋試験体

図3.3.15にK 橋試験体の表面腐食深さ図を示す. B 面の未描画領域はリブ部分に相当する. このリブの溶接のために, 板がリブの取付け面と反対側に, 1㎜程度反っていることがわかる. 腐食表面として評価する場合は, (1)②と同様に, このような初期曲がりモードも, 除去する必要がある.

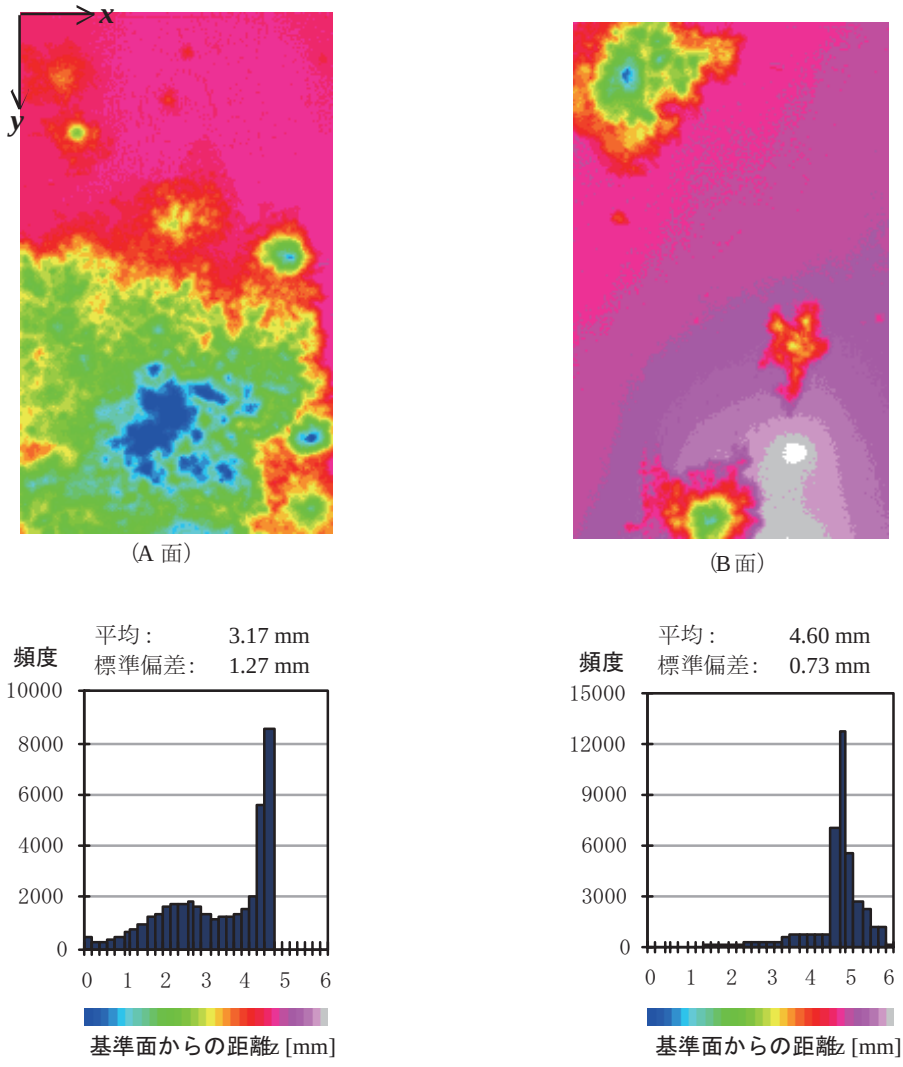
(4) R 橋試験体

図3.3.16にR 橋試験体の表面腐食深さ図を示す. この試験体はリベット接合のため, レーザー法では裏面からの計測は行なっていない. x=0, y=25㎜付近にある極値は, リベット頭が腐食で欠損している部分である.



(A 面)　　(B 面)

図3. 3. 12　(1) C橋試験体① 表面腐食深さ



(A 面)　　(B 面)

図3. 3. 13　(1) C橋試験体② 表面腐食深さ

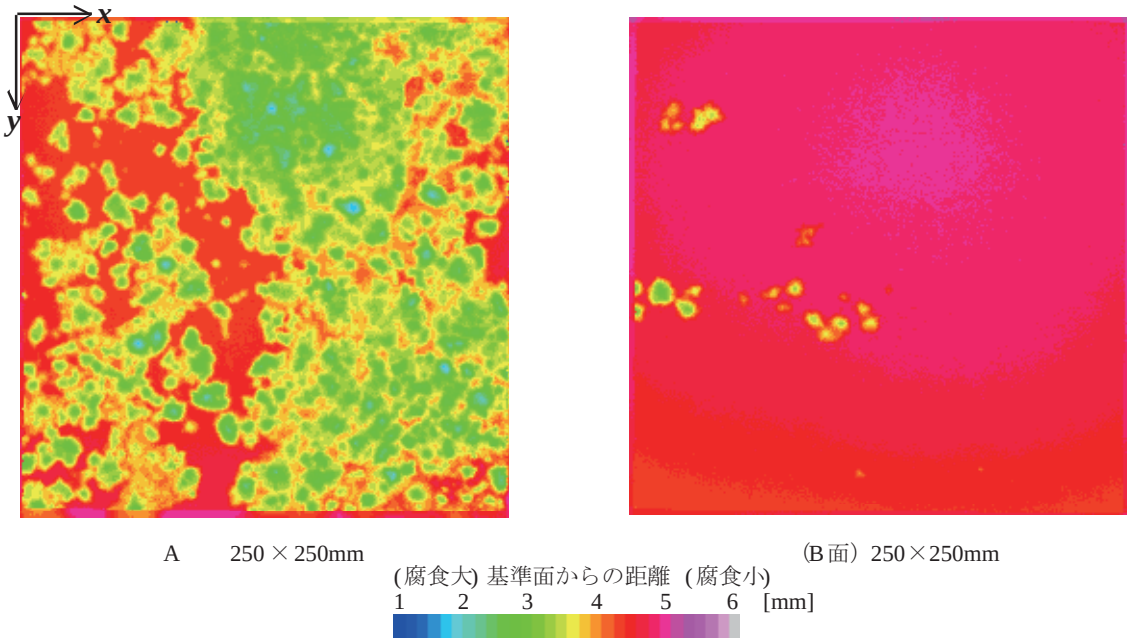


図3.3.14　T 水門試験体 表面腐食深さ

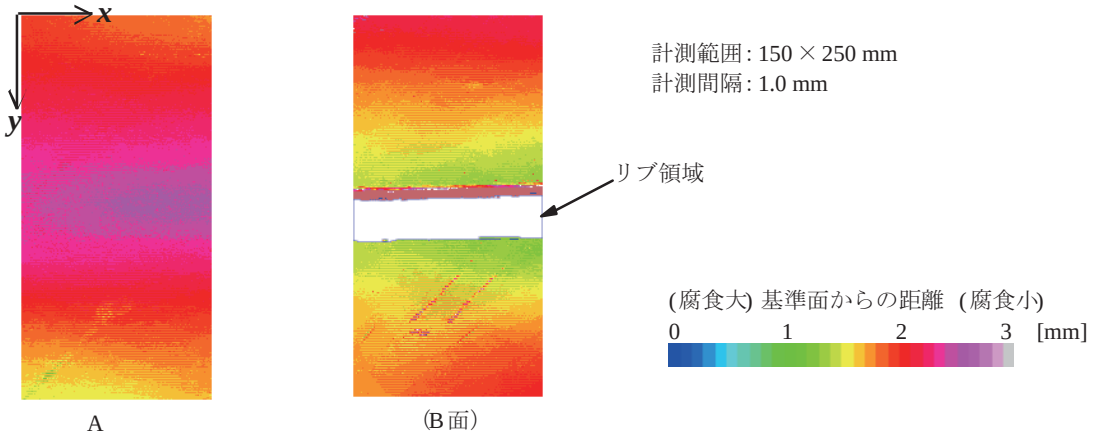


図3.3.15　K 橋試験体 表面腐食深さ

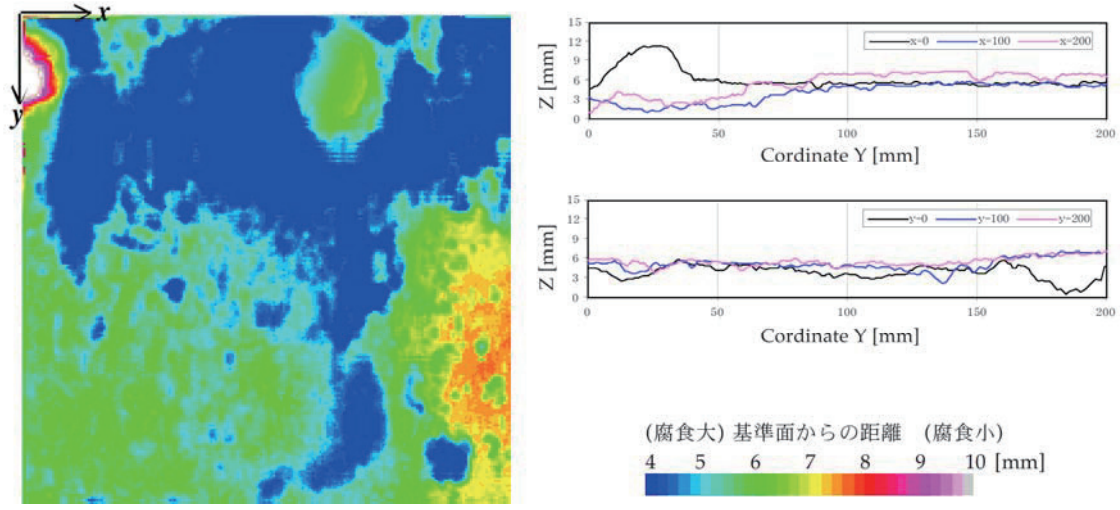


図3.3.16　R 橋試験体 表面腐食深さ

3.3.4　画像計測法

(1) 計測方法

図3.3.17に示すように試験体を床上におき，三脚にカメラを固定して，室内光のもとで撮影を行った．使用したカメラの仕様は表3.3.4に示すとおりである．

表3.3.4 使用したカメラの仕様

機種	Canon EOS Kiss digital
画像フォーマット	3072×2048
画素数	約630万
レンズ	SIGMA 50mm F2.8 EX DG MACRO



図3.3.17 撮影状況

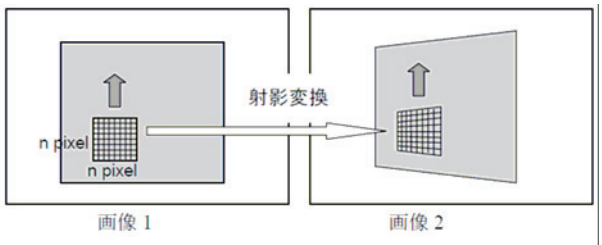


図3.3.18 ウィンドウの設定

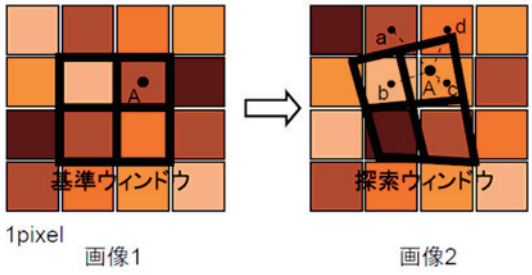


図3.3.19 カラーデータの補間

標定要素は相互標定によって求めた．相互標定においては対応点を数点，手作業で指定する必要があるが，ここでは10点前後の対応点を指定した．試験体とカメラとの距離は約50cm，基線長は15cm程度とした．

複数画像の対応付けは次のようにして行った[14]．まず一方の画像上に基準となるウィンドウ（以後，基準ウィンドウ）を設定し，もう一方の画像から対応するウィンドウ（以後，探索ウィンドウ）を探索する．基準ウィンドウは15×15 pixelの正方形とする．探索ウィンドウは，腐食面を平面であると仮定し，基準ウィンドウを二次射影変換したものを設定する（図3.3.18）．二次射影変換の係数は，事前に指定した対応点を用い，この射影変換が画像中のどの位置でも成り立つと仮定する．探索ウィンドウのカラーデータについては，図3.3.19に示すように，ある画素Aを射影変換したものをA’としたとき，このA’を取り囲む４つの画素（図中のa, b, c, d）のカラーデータを用いて線形補間したものを用いた．

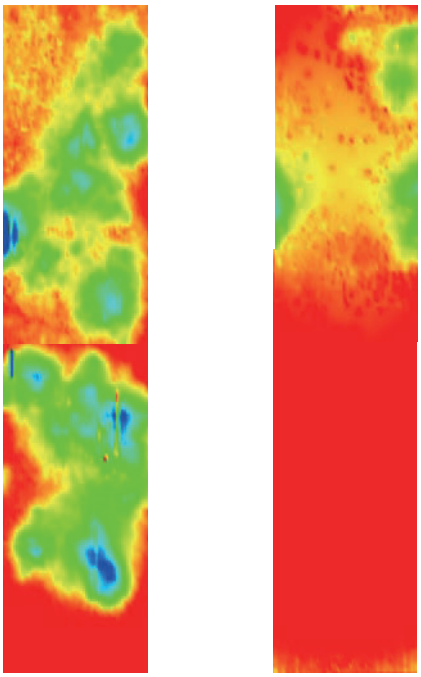
今回の計測では相互標定による標定を行った．相互標定を行うために必要な作業は複数の位置から写真を撮影するのみであり，今回の撮影作業についても極めて短時間に終了した．その後の写真の処理には独自に開発したプログラムを使用し，一つの試験体に費やした処理時間は最長でも１日ほどであった．

(2) 計測結果

C 橋試験体は，上横構の①フランジについて計測を行った．計測結果を図3.3.20に示す．表面形状の表現

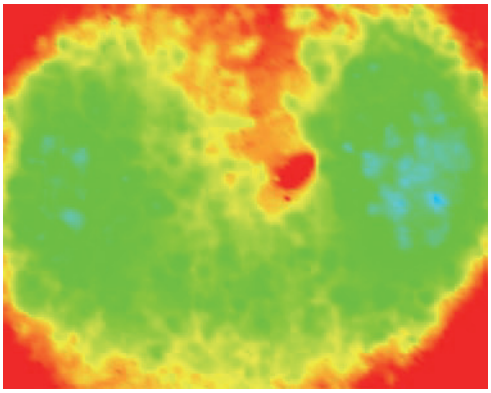
方法として，すべての座標から求めた平均面からの相対的な距離で示しているため，先のレーザー変位計による計測結果とは異なった表現方法となっている．色分けについても先の結果とは一致していない．また，細長い試験体を上下２つの部分に分けて計測を行なった．このコンター図と3.3.1で示した試験体の写真および図3.3.12で示したレーザー変位計による計測結果を見比べると，腐食表面形状が概ね再現できていることがわかる．図3.3.21にＴ水門試験体のA面に対して行った計測結果を示す．3.3.1で示した試験体の写真および図3.3.14と見比べてみても，画像計測による計測結果は実物を再現できておらず，計測は失敗に終わっていることがわかる．図3.3.3をみるとわかる通り，この試験体のA面には腐食による減肉が明らかに存在するが，錆を落とした後，防錆のためにプライマーを塗布しており，表面に錆による色のパターンが存在しない．そのため，画像計測における対応付けの精度が確保できず，このような結果になったものと考えられる．図3.3.22にR 橋試験体の表面腐食深さ図を示す．コンターの色分けが異なっているが，試験体の写真および図3.3.16と比較して，表面形状がよく再現できていることがわかる．

R橋試験体についてある断面をとり，レーザー変位計での計測結果と画像計測による結果とを比較したものを図3.3.23に示す．画像計測でも大まかな表面形状は精度よく計測できているが，細かい凹凸には追従していない箇所も見受けられる．よって，平均板厚などを求めるには画像計測でも十分であるが，最小断面などを精度よく求めようとした場合には必ずしも十分な計測精度が得られない可能性があり，その適用にあたっては注意が必要である．ただし，図に示したのは一例であり，相互標定による標定を行なった点，対応付けの際のウィンドウを15×15pixelにした点，630万画素クラスのカメラを使用している点などの固有の計測条件のもとでの結果である．画像計測にはまだ精度を向上させる余地が十分にあるといえ，計測作業の簡便さを考えると，その適用性の向上を探っていくことには大きな意味があるものといえる．



A面　　B面

図3.3.20　(1) C橋試験体① 表面腐食深さ



A面

図3.3.21　T 水門試験体 表面腐食深さ

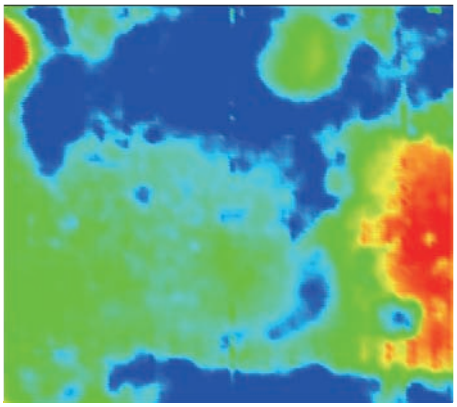
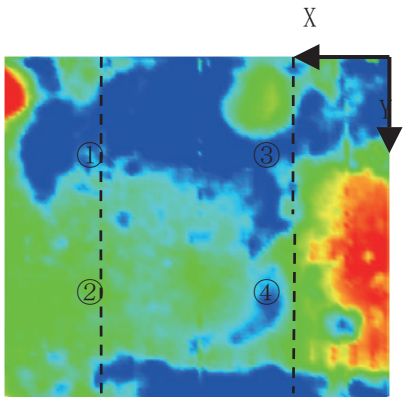
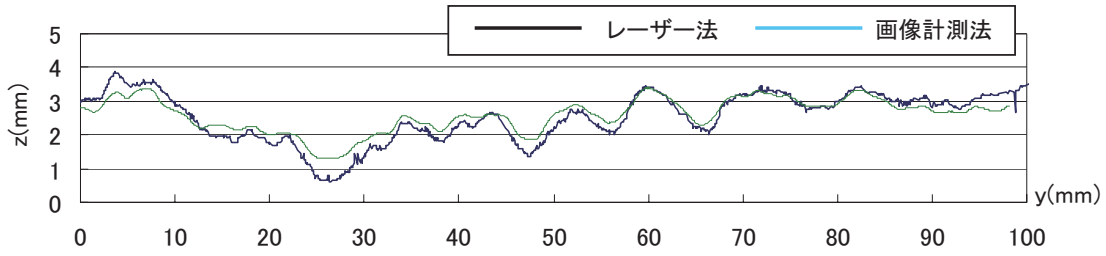


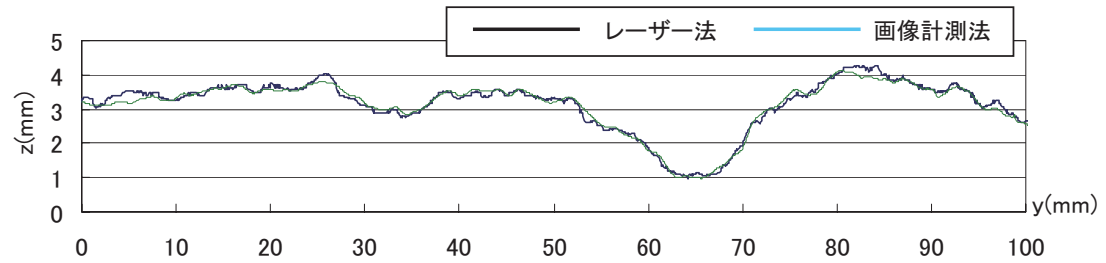
図3.3.22　R 橋試験体 表面腐食深さ



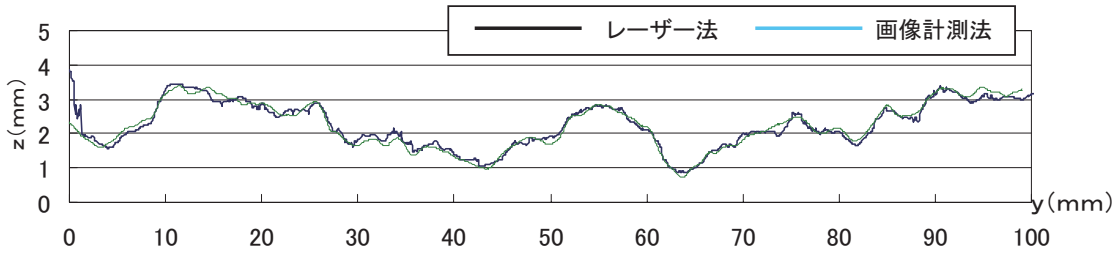
①x=150，y=0～100



②x=150，y=100～200



③x=50，y=0～100



④x=50，y=100～200

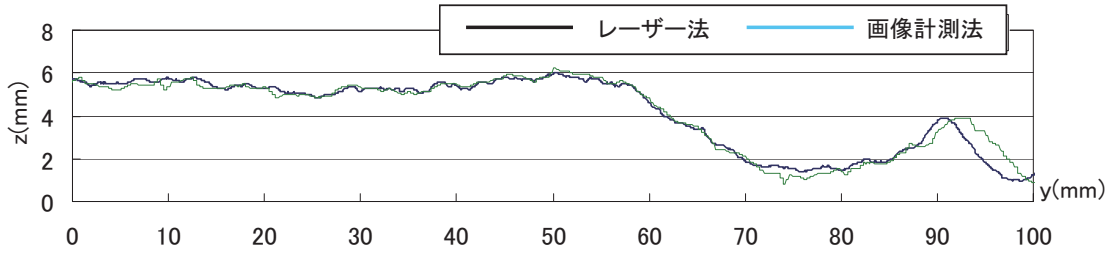


図3. 3. 23 レーザー法と画像計測法との計測結果の比較

3.3.5　板厚への変換事例

ここでは，3.3.1 で示した腐食試験体に対し，3.3.3で示したレーザー変位計による表面腐食形状の計測結果から，3.2.3(4)に示したような座標変換手法を用いて，腐食試験体の残存板厚への変換を行なった結果について示す.

(1) C 橋試験体

図3.3.24 に，C橋試験体①フランジ試験体の残存板厚分布を示す．マイクロメータによる計測結果と，レーザー法による結果を比較したグラフをみると，概ね0.3～0.4㎜程度の誤差範囲で，よい一致をしていることがわかる．両者の計測板厚差は，x=0，y=90 (㎜)の計測点で最大の1.9㎜ であったが，これは凹部かつ板厚が急変している点での測定点である．ポイントマイクロメータのヘッド部の構造から，凹部や板厚急変点での測定値に誤差が含まれやすいと考えられる．また，レーザー法による測定においても5レーザスポット径やレーザー光の拡散の影響で誤差が生じやすい．最小板厚は，x=38，y=163 (㎜)の計測点で4.31㎜ であった.

②ウエブ試験体の残存板厚分布を図3.3.25 に示す．マイクロメータによる計測結果との差は，概ね0.2㎜以内となっている．最小板厚は，x=61，y=250 (㎜)の計測点で3.17㎜ であった.

いずれの試験体とも板厚分布ヒストグラムは，健全板厚に相当する値と局部腐食領域の平均板厚との2 つの極大値をもつ形状となっている.

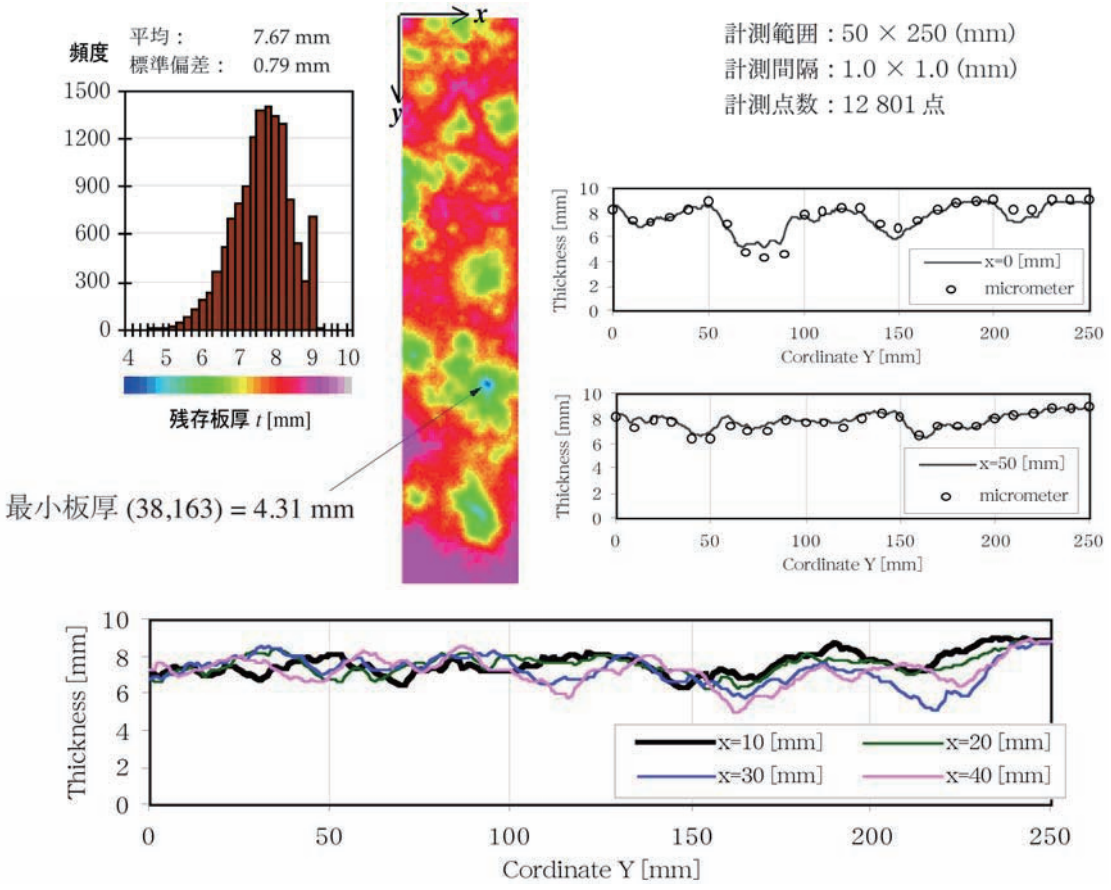


図3.3.24　(1) C橋試験体① 板厚分布

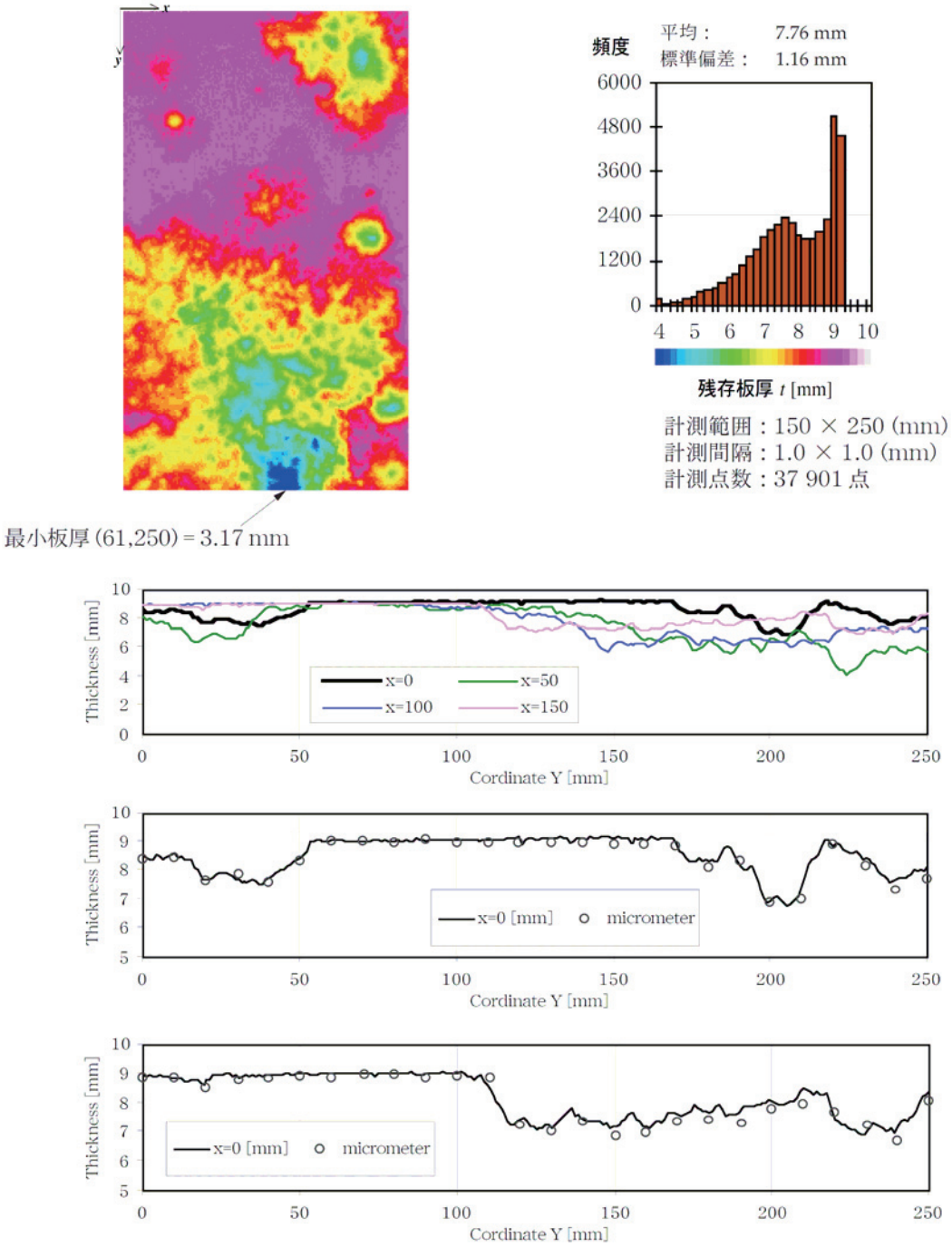


図3.3.25　(1) C橋試験体② 板厚分布

(2) T 水門扉試験体

図3.3.26 にT 水門試験体の残存板厚分布を示す．板厚分布ヒストグラムには2 つのピーク値が存在しているが，ひとつはほとんど腐食がなく元板厚の8.0㎜，もうひとつは，局部腐食領域の平均板厚である約7.0㎜ 付近である．

表3.3.5および表3.3.6に示すように，レーザー法による板厚算出結果とポイントマイクロメータによる計測結果とは，ほとんど一致しており，誤差は概ね0.2㎜ 以下である．

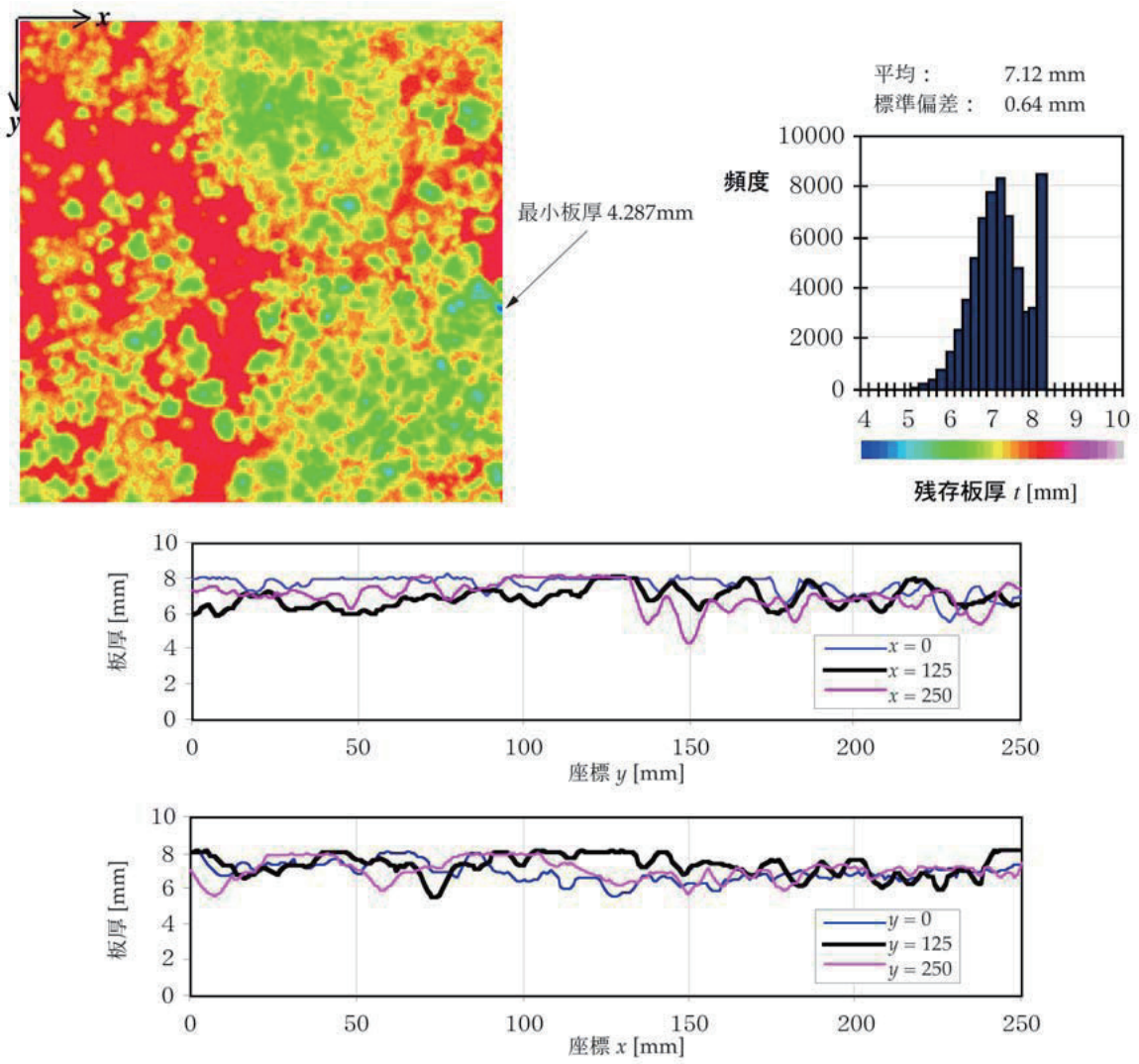


図3.3.26 T 水門試験体 残存板厚分布

表 3.3.5 T 水門試験体 レーザー法による残存板厚計測結果

y 方向 [mm] \ x 方向 [mm]	0	50	100	150	200	250
0	8.08	6.86	6.48	6.31	6.79	7.47
50	8.04	7.17	7.36	6.24	6.75	7.05
100	7.68	6.55	8.07	6.98	7.12	8.19
150	8.11	8.08	6.79	7.64	6.57	4.29
200	7.07	7.38	6.80	7.08	6.43	6.88
250	7.04	7.07	7.97	5.82	7.20	7.57

表 3.3.6 T 水門試験体 マイクロメータによる残存板厚計測結果

y 方向 [mm] \ x 方向 [mm]	0	50	100	150	200	250
0	8.09	6.85	6.47	6.38	6.78	7.17
50	8.12					7.23
100	7.77					8.12
150	8.09					4.22
200	7.14					6.91
250	6.53	7.26	8.13	5.86	7.38	7.39

(3) K 橋試験体

図3.3.27にK橋試験体の残存板厚分布を示す．中央部はリブの取付け位置である．残存板厚は，21.7～21.9㎜ に分布しており，板全面にわたって一様な腐食形態となっていた．

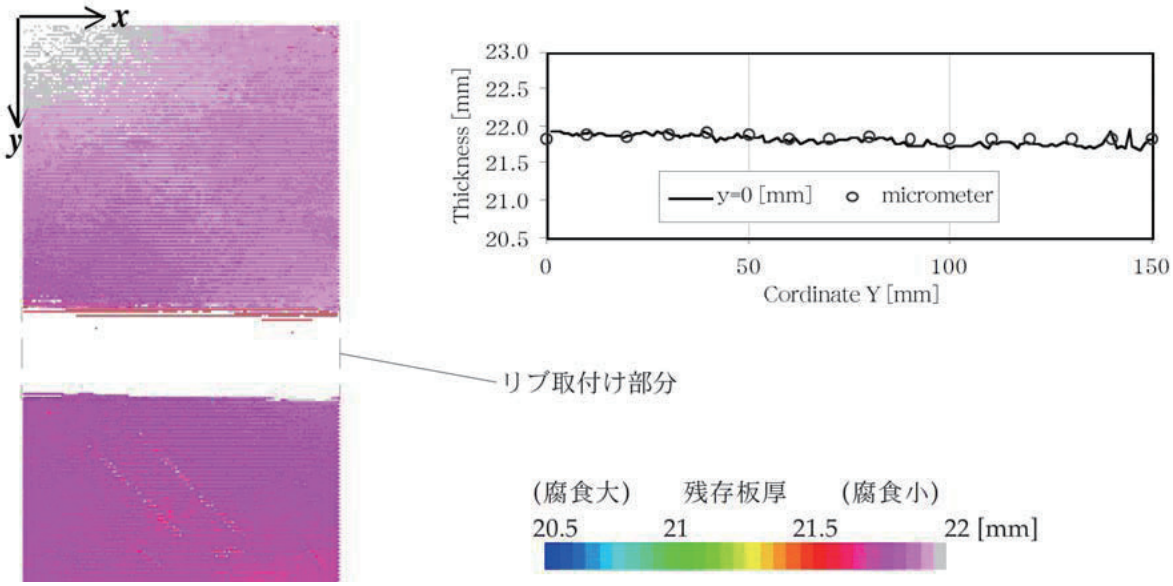


図3.3.27　K 橋試験体 板厚分布

3.3.6 まとめ

様々な腐食程度を有する試験体に対し，超音波法，レーザー法，画像計測法によって計測を行った．超音波法の板厚計測結果はマイクロメータによる計測値と比較することでその精度を検証した．レーザー法については表裏の表面形状を計測し，それを合成することで板厚を算出してマイクロメータによる計測結果との比較を行った．画像計測については板厚への変換までは行わなかったが，表面形状計測結果をレーザー法のそれと比較することで精度の検証を行った．なお，ここではマイクロメータによる計測結果を真値とみなして検証に用いたが，マイクロメータにおいても，板への計器の当て方などによって計測値には多少のばらつきがあることは当然である．

各方法を相互に比較し，その得失についてまとめると以下の通りである．

超音波法は板厚を直接知ることができること，また，簡単な作業により結果が即座に得られるという大きな特徴がある．今回の計測においては，腐食減厚により凹形状となっている底部での板厚測定もほとんどの箇所で可能であり，マイクロメータ測定値と比較した結果，その測定精度はほぼ0.5㎜以内であった．ただし，わずかではあるが，孔食部の側面など極端な傾斜部においては測定できない箇所も存在した．

レーザー変位計を用いた方法では，片面の表面形状を計測し，表裏のそれを合成することで板厚を求めるという手順が必要になることから，プロセスが複雑になり，誤差が混入する余地も高くなるといえる．しかし，レーザー法による板厚算出結果とポイントマイクロメータによる計測結果とはほとんど一致しており，誤差は概ね0.2㎜ 以下であった．レーザー変位計そのものの計測精度は非常に高いことから，課題は変位計を走査するための架台の精度確保と，表面の計測結果を板厚に変換する際の精度の確保であると考えられ，それをクリアすれば，非常に高い精度で，かつ細かな計測ピッチで計測が行えることが示された．

画像計測を用いた板の表面形状計測結果は，大まかな表面形状は精度よく計測できているが，細かい凹凸には追従していない箇所も見受けられた．よって，板の平均板厚などを求めるためには十分であるといえるが，最小断面積を精度よく求めようとした場合などには要求される精度が得られない可能性がある．また，今回の試験体に特有の事情ではあるが，板表面にプライマーを塗布して腐食の色のパターンを消した場合には計測がうまく行えなかった．このように，画像計測法はレーザー変位計に比較すると精度が十分とはいいがたいが，平均板厚などの計測は十分に可能であること，極めて簡易な作業で計測が行えることなどから，その特性を理解した上で使用する限りにおいては十分に実用的な手法であるといえる．また，今後も期待されるデジタル機器の高性能化，高分解能化を考えると，精度はさらに向上できる可能性が高く，その適用性については注意深く検討していく必要がある．

3.4 計測作業および計測結果の取扱いに関する考察

3.4.1 統計処理の基本的な考え方

(1) はじめに

鋼構造物（特に，鋼道路橋，鋼鉄道橋，海洋・港湾構造物，堰・水門等）の腐食耐久性の向上を図り，適切な維持管理・保全を実施するためには，鋼部材の腐食の状態や腐食の速度を調査・把握し，それに基づいてメンテナンスの計画を立て，余寿命等の評価を行う必要がある．

鋼構造物は，機器設備等に比べ，非常に大型であり，鋼構造物の腐食をすべての部位について測定することは極めて困難であるため，部分的な計測を実施して，全体を推定する方法が採られている[18]．腐食が均一（全面腐食）であれば，一部の測定結果を用いて，全体の腐食とほぼ等価であると評価して差し支えないが，通常は不均一な腐食（局部腐食）であるため，部分的な測定結果のみでは，全体の腐食状態を判断することはできない．

上記の問題を解決する一つの道具として，小部分のみの測定値を用い，全体の推定を行う極値統計理論に基づく推定法（腐食量の評価や余寿命算定の手法）が提案され，機器やプラント等の分野で実用化されている[19]．また，損傷に対する情報量が極めて少ない場合に，その少ない情報量から健全性等を評価する手法として，ベイズ理論に基づく評価法が提案されている[20]．さらに，腐食の進展をシミュレーションする方法として，スペクトル解析法に基づく手法[21]が提案され，その定量的評価の妥当性が検証されている．同様に，フラクタル理論に基づく進展理論が提案され，腐食の進行と表面の凹凸特性について検討されている[22]．

以上のような腐食の状態を把握する上で，統計的な処理が不可欠であることは言うまでもないが，その計測法についても統計的な処理に基づき，その精度等を事前に把握することが肝要である．計測機器のキャリブレーションを実施し，例えば，繰り返し精度，再帰精度，光学系の計測法では収差等を評価する必要がある[23]．また，基準となる計測機器との精度の比較を通して，トレーサビリティ[24]（不確かさが全て表記された，切れ目のない比較の連鎖を通じて，通常は国家標準又は国際標準である決められた標準に関連付けられ得る測定結果又は標準の性質，と定義されている）の確認・検証を行う必要がある．

つぎに，周知のように，腐食の表面性状を JIS-B0601-2001[25]に基づき，計測・整理し，その特性が調べられる．輪郭曲線方式に対して表面性状パラメータが設定されており，表面粗さの種々の特性を算定することができる．このような表面形状の特性を調べる方法として，上記のスペクトル解析法[21]，フラクタル理論に基づく方法[26]や最近では前者に対してウェーブレット変換に基づく方法[27]が使用される事例も増えている．また，腐食の形態を分類する上で，表面性状を把握することは不可欠であるが，残存耐荷性能との関係を調べる上では，部材等の残存板厚等を把握することが必要となる[28]．この場合，通常，表裏面の相対する３点以上の代表点から作られる構面を用いて，座標変換等により残存板厚が求められる（但し，相対点の板厚は，別途，マイクロメータ等を用いて実測される）．

本項では，以上の事柄について，統計理論の基礎を簡便に説明するものであり，腐食の表面性状の計測，残存板厚の計測，腐食の状態量の処理等に統計的な取り扱いを実施する上での要点を述べるものであり，以下，1)計測手法とトレーサビリティ，2)腐食の表面性状の統計処理，3)腐食データの確率統計処理（極値統計理論）の順に述べる．また，2)では，腐食の表面形状の比較的新しい解析法の一つとなっている上記の FFT を用いたスペクトル解析法，フラクタル幾何学の手法を採り入れた方法やウェーブレット変換に基づく方法についても言及し，新たな展開の可能性

を紹介する．

(2) 計測手法とトレーサビリティ

計測のトレーサビリティとは，「不確かさが全て表記された，切れ目のない比較の連鎖を通じて，通常は国家標準又は国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の性質」であるとVIM（国際計量基本用語集・1993，JIS Z 8103「計測用語」）に定義されている[24]．換言すれば，トレーサビリティとは，計測器の精度が，国家標準に明瞭な経路で繋がっている，より高位の標準によって校正されていることを意味する[29]．

腐食した部材の表面粗さ，板厚等を計測する場合，基準となる測定器は必ずしも明確にされている訳ではないが，厚さを測定する場合の基準として，一部，直接計測することが可能なマイクロメータが用いられる場合が多い．ここでは，例えば，マイクロメータを基準として，腐食部材の板厚計測システム（例えば，レーザ変位計を用いた計測システム，ＣＣＤカメラを用いた画像処理手法に基づく計測システムなど）の測定精度について，誤差伝播則[30]を用いた評価法について言及する．

任意の計測システムによる板厚の計測法（Ａ法と呼ぶことにする）とマイクロメータにより計測された板厚の差が下記の相対差の許容値以下となった場合，Ａ法による測定精度とマイクロメータの測定精度は同等であると評価することができる[31]．

いま，Ａ法による測定値とマイクロメータによる測定値の差（相対差）ΔＴは次式で表される．

$$\Delta T = Ts - Tm \qquad (3.4.1)$$

ここに，Ts はＡ法による測定値，Ｔm はマイクロメータによる測定値を表す．

誤差伝播則により（互いに独立であるから），相対差の最大誤差ΔTmax は

$$\Delta Tmax = \pm \{(\partial \Delta T / \partial Ts)^2 \cdot \Delta Ts^2 + (\partial \Delta T / \partial Tm)^2 \cdot \Delta Tm^2\}^{1/2}$$
$$= \pm (\Delta Ts^2 + \Delta Tm^2)^{1/2} \qquad (3.4.2)$$

となる．

ここで，ΔＴs，ΔTm はそれぞれＡ法およびマイクロメータによる測定値の最大誤差であり，機器の性能，分解能，精度などを総合的に勘案したものである（例えば，ＣＣＤカメラ[32]を用いた計測システムでは画素数，カメラの収差，画像処理における２値化の閾値，マッピングの分解能等，レーザを用いた計測システム[33]では，繰り返し精度，スポット径の大きさ，分解能，反射率等，共通する誤差として再帰性，原点復帰，設置精度，反転精度，温度の影響等が含まれる）．

式(3.4.1)，(3.4.2)を用いた精度検証の事例として，板厚計測の事例ではないが，仮組立検査における部材計測の事例を取り上げる[31]．精密トータルステーションを用いた３次元形状計測システムをＡ法とし，鋼巻尺による測定値を基準とする．測長をＬ（m）とし，上記のＴに代わりＬを用いるものとする．ここで，

① Ａ法による測定値の最大誤差

ΔＬs＝±1.0mm　（Ｌ≦10m）　，　ΔLs＝±（Ｌ／10）mm　　（L＞10m）

② 鋼巻尺による測定値の最大誤差（JIS１級の製造誤差程度）

ΔＬm＝±（0.1･L＋0.2）

とすると，相対差の許容値は，表 3.4.1 のように整理することができる．

表 3.4.1　A法と鋼巻尺による測定寸法の相対差の許容値（単位 mm）

	計測項目	相対差の許容値
1	腹板高	$\{(0.1\cdot L+0.2)^2+1\}^{1/2}$　（L≦10m）
2	部材長	$\{(0.1\cdot L+0.2)^2+(L/10)^2\}^{1/2}$　（L＞10m）
3	フランジ幅	L：腹板高，部材長，フランジ幅（m）

表 3.4.2　部材計測の結果（単位 mm）

測定項目	測定個所		規定値	部材計測	鋼巻尺	相対差	相対差の許容値
				①	②	|①-②|	
腹板高	左側	H3	2900.0	2900.0	2900.0	0.0	1.1
		H4	2900.0	2899.0	2899.5	0.5	1.1
	右側	H1	2900.0	2901.2	2901.0	0.2	1.1
		H2	2900.0	2898.2	2898.5	0.3	1.1
部材長	上フランジ	L1	11115.1	11113.1	11113.5	0.4	1.7
		L2	11115.1	11113.7	11114.0	0.3	1.7
	下フランジ	L3	11115.2	11112.5	11113.0	0.5	1.7
		L4	11115.2	11113.8	11114.0	0.2	1.7
フランジ幅	左側	W3	2390.1	2390.4	2390.0	0.4	1.1
		W4	2390.1	2389.7	2390.0	0.3	1.1
	右側	W1	2390.0	2389.9	2390.5	0.6	1.1
		W2	2390.0	2390.4	2390.0	0.4	1.1
備考	数値計測　：部材計測システムによる測定値 鋼巻尺　：鋼巻尺による測定値						

計測精度の検証データとして，実橋の上部工工事で実施・計測した，A法による部材計測値と鋼巻尺による測定値を使用することとした．測定の対象は，主桁部材（箱桁）であり，その腹板高(H1～H4)，部材長(L1～L4)，上下フランジ幅(W1～W2)をA法と鋼巻尺により計測し，それらの値を比較することによって計測精度の確認を行った．その結果を表 3.4.2 に示す（同表には，部材長の規定値，部材計測①と鋼巻尺の測定値，相対差及び相対差の許容値が示されている）．

A法による測定値と鋼巻尺の測定値の相対差（｜①-②｜）は最大 0.6mm であり，相対差の許容値（1.1mm あるいは 1.7mm）よりも十分小さい値である．したがって，A法の測定精度は，鋼巻尺の測定精度と同等であると認めることができる．

板厚の測定精度も同様に考えることができるが，基準値として，マイクロメータではなく，レーザ変位計による計測システムを取り上げ，ＣＣＤカメラによる手法を比較・検証することも可能であり，上記の手順により検証できる．但し，相対差の許容値を設定するに当たっては十分な検討が必要である．また，表面性状のような値については，この方法を直接適用することはできない．表面形状をパラメータとする手法については，次項で詳細に説明する．

(3) 腐食の表面性状の統計処理（JIS 規格）

腐食損傷した鋼構造部材を３次元測定器等で計測すると，表面粗さの他に初期たわみが含まれるので，その表面性状から腐食の形態を把握・分析するためには，計測データから初期たわみを

除去する必要がある．日本工業規格では，従来（JIS B 0601-1994），粗さ曲線及び粗さパラメータに関する規定のみ取り扱われていたが，その大幅な改訂（JIS B 0601-2001）[25]により，製品の幾何特性仕様に基づく，輪郭曲線方式による表面性状（粗さ曲線，うねり曲線及び断面曲線）のパラメータ等に関する規定が設けられ，断面曲線から粗さ曲線，うねり曲線を分離して表面性状を取り扱う方法が詳細に記載されている（上記の初期たわみは，うねり曲線に相当する）．

JIS B 0601-2001[25]では，輪郭曲線を長波長成分と短波長成分に分離するフィルタが図3.4.1に示すように定義されている．ここに，λsは粗さ成分とそれより短い波長成分との境界を定義する輪郭曲線フィルタであり，λcとλfはそれぞれ粗さ成分とうねり成分との境界を，うねり成分とそれより長い波長成分との境界を定義する輪郭曲線フィルタである．

断面曲線は，測定断面曲線にカットオフ値λsの低域フィルタを適用して得られる曲線であり，粗さ曲線は，カットオフ値λcの高域フィルタを適用して断面曲線から遮断して得られる輪郭曲線であり，うねり曲線は断面曲線にカットオフ値λf及びλcの輪郭曲線フィルタを順次掛けることによって得られる輪郭曲線である[25]．

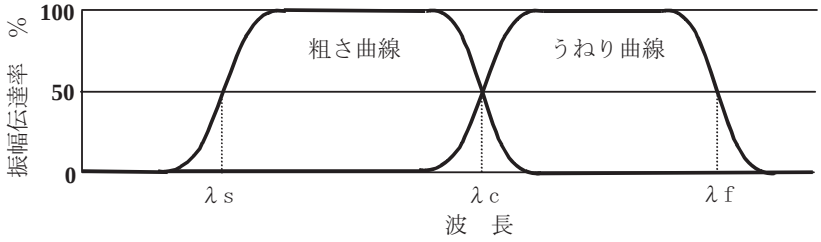


図3.4.1　粗さ曲線及びうねり曲線の伝達特性[28]

以上の輪郭曲線方式による表面性状パラメータを以下に列挙する（輪郭曲線パラメータの定義）．

a）高さ方向の山・谷のパラメータ

① 最大山高さ（Pp，Rp，Wp）

最大山高さ（Zp：Pp，Rp，Wp）は，基準長さ（輪郭曲線の特性を求めるために用いられる輪郭曲線のX軸方向・断面方向の長さを表し，粗さ曲線用基準長さιrおよびうねり曲線用基準長さιwは，それぞれλcおよびλfに等しい．また，断面曲線用の基準長さιpは評価長さιnに等しい．）における輪郭曲線の中で，最も高い山の高さを表したものである．また，Ppは断面曲線の最大山高さ，Rpは粗さ曲線の最大山高さ，Wpはうねり曲線の最大山高さを表す．なお，山とは，平均線より上にある部分を指す[34]（図-3.4.2参照）．

$$Zp = \max(Zn) \tag{3.4.3}$$

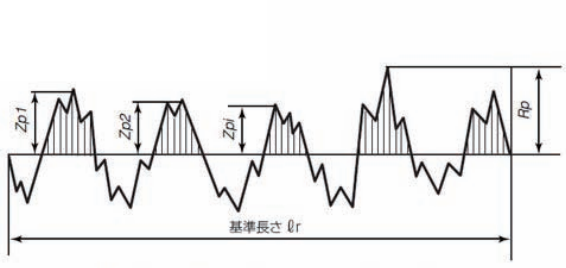


図 3.4.2　輪郭曲線の最大山高さ（粗さ曲線の例）[34]

② 最大谷深さ（Pv，Rv，Wv）

最大谷深さ（Zv：Pv，Rv，Wv）は，基準長さにおける輪郭曲線の中で，最も深い谷の深さ

を表したものである．なお，谷とは，平均線より下にある部分を指す（図3.4.3参照）．

$$Zv = |\min(Zn)| \tag{3.4.4}$$

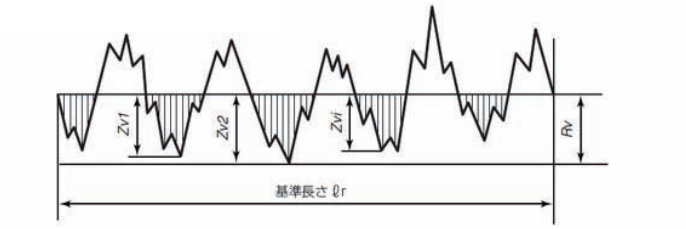


図 3.4.3　輪郭曲線の最大谷深さ（粗さ曲線の例）[34)]

③ 最大高さ（Pz，Rz，Wz）

最大高さ（Zz：Pz，Rz，Wz）は，基準長さにおける輪郭曲線の中で，最も高い山の高さ（Zp）と最も深い谷の深さ（Zv）の和を求め，表したものである．輪郭曲線が粗さ曲線の場合，Ｒｚを「最大高さ粗さ」と呼び，輪郭曲線がうねり曲線の場合，Wzを「最大高さうねり」と呼ぶ（図3.4.4参照）．なお，旧JISでは，Rzは「十点平均粗さ」を指示するために使用されていた．

$$Zz = Zp + Zv \tag{3.4.5}$$

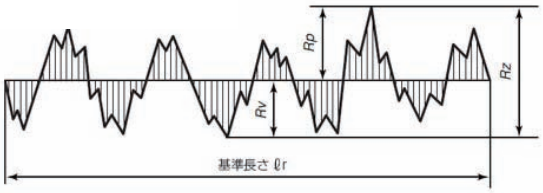


図 3.4.4　輪郭曲線の最大高さ（粗さ曲線の例）[34)]

④ 平均高さ（Pc，Rc，Wc）

平均高さ（Zc：Pc，Rc，Wc）は，基準長さにおける輪郭曲線要素の高さ（Zti）の平均値を表したものである．ここで，輪郭曲線要素とは，隣り合う山と谷からなる曲線部分であり，輪郭曲線要素を構成する山（谷）には，最小高さと最小長さの規定がある．すなわち，高さ（深さ）が最大高さPz，Rz，Wzの10%以下，もしくは，長さが基準長さの1%以下であるものは，ノイズとみなされ，前後に続く谷（山）の一部と認識・処理される（図3.4.5参照）．

$$Zc = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Zti \tag{3.4.6}$$

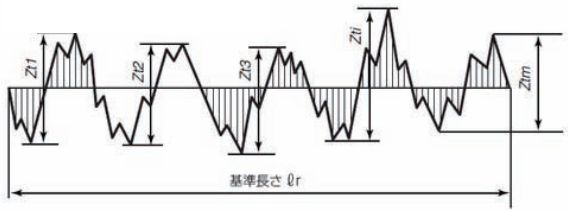


図 3.4.5　輪郭曲線要素の平均高さ（粗さ曲線の例）[34)]

⑤ 最大断面高さ（Pt，Rt，Wt）

最大断面高さ（Zt：Pt，Rt，Wt）は，評価長さ ι nにおける輪郭曲線の山高さ（Zp）の最大値と谷深さ（Zv）の最大値との和で与えられる（図3.4.6参照）.

$$Zt = \max(Zpi) + \max(Zvi) \tag{3.4.7}$$

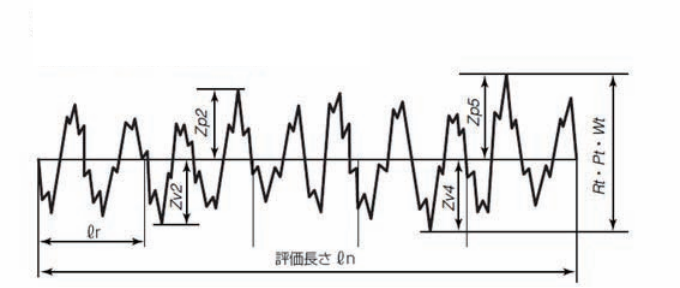


図 3.4.6　輪郭曲線要素の平均高さ（粗さ曲線の例）[34)]

b）高さ方向の振幅平均パラメータ

① 算術平均粗さ（Pa，Ra，Wa）

算術平均粗さ（Za：Pa，Ra，Wa）は，基準長さにおけるZ（x）絶対値の平均を表したものであり，輪郭曲線が粗さ曲線の場合，Raを従来からの用語である「算術平均粗さ」と呼び，輪郭曲線がうねり曲線の場合，Waを「算術平均うねり」と呼ぶ（図3.4.7参照）.

$$Za = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} |Zn| \tag{3.4.8}$$

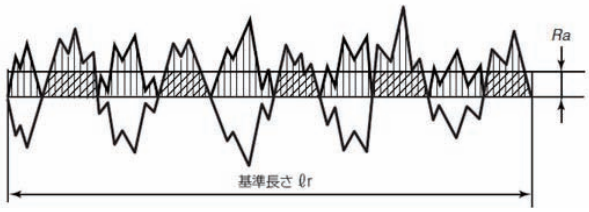


図 3.4.7　輪郭曲線の算術平均粗さ（粗さ曲線の例）[34)]

② 二乗平均平方根高さ（Pq，Rq，Wq）

二乗平均平方根高さ（Zq：Pq，Rq，Wq）は，基準長さにおける二乗平均平方根を表したものであり，表面粗さの標準偏差を意味する．輪郭曲線が粗さ曲線の場合，Rqを「二乗平均平方根粗さ」と呼び，輪郭曲線がうねり曲線の場合，Wqを「二乗平均平方根うねり」と呼ぶ（図3.4.8参照）.

$$Zq = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} Zn^2} \tag{3.4.9}$$

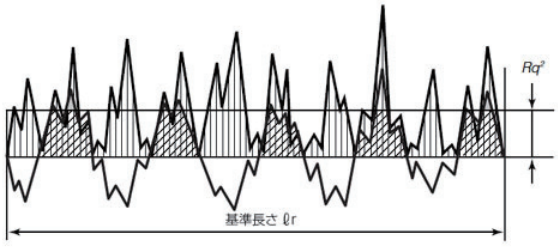


図 3.4.8　輪郭曲線の二乗平均平方根高さ（粗さ曲線の例）[34)]

c）高さ方向の特徴平均パラメータ

① スキューネス（Psk，Rsk，Wsk）

スキューネス（Zsk：Psk，Rsk，Wsk）は，二乗平均平方根高さ（Zq）の三乗によって無次元化した基準長さにおけるZ（x）の三乗平均を表したものであり，トライボロジー（摩擦）と関係が深いパラメータである．ひずみ度または偏り度（高さ方向の確率密度関数の非対称性の尺度）を表しており，突出した山または谷の影響を強く受ける．正規分布なら0，磨耗面ならマイナスになる（図3.4.9参照）．

$$Zsk = \frac{1}{Zq^3}\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} Zn^3\right] \qquad (3.4.10)$$

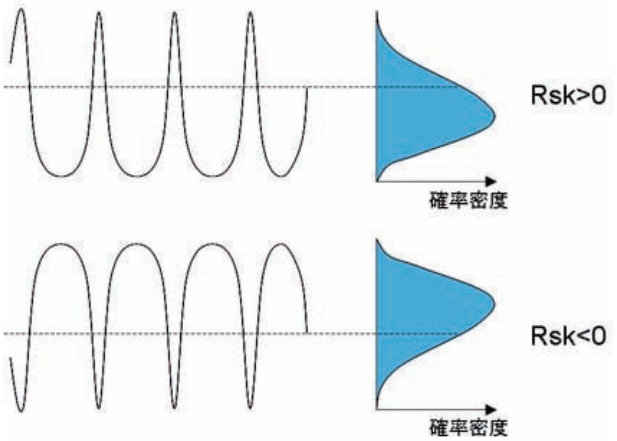


図 3.4.9　輪郭曲線のスキューネス（粗さ曲線の例）[34)]

② クルトシス（Pku，Rku，Wku）

クルトシス（Zku：Pku，Rku，Wku）は，二乗平均平方根高さ（Zq）の四乗によって無次元した基準長さにおけるZ（x）の四乗平均を表したものである．クルトシスもトライボロジー（摩擦）と関係が深いパラメータである．とが（尖）り度（確率密度関数の高さ方向の鋭さの尺度）を表しており，正規分布では3となる（図3.4.10参照）．

$$Zku = \frac{1}{Zq^4}\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} Zn^4\right] \qquad (3.4.11)$$

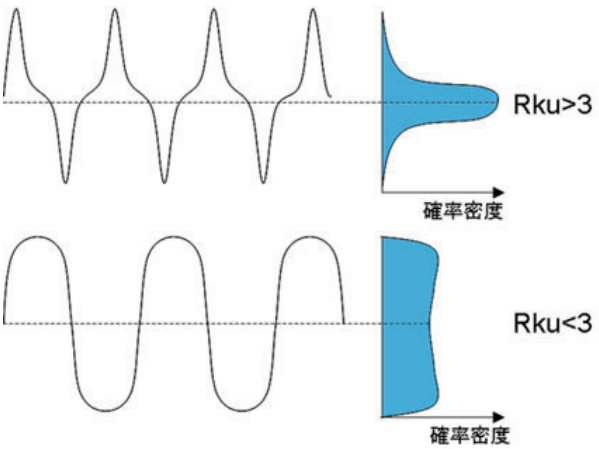


図 3.4.10　輪郭曲線のクルトシス（粗さ曲線の例）[34)]

d）横方向のパラメータ

① 要素の平均長さ（PSm，RSm，WSm）

要素の平均長さ（ZSm：PSm，RSm，WSm）は，基準長さにおける輪郭曲線要素の長さXsの平均を表したものである．Xsiは，一つの輪郭曲線要素に対応する長さを表す．ここで，輪郭曲線要素を構成する山（谷）には，最小高さと最小長さの規定があり，高さ（深さ）が最大高さの10%以下，もしくは，長さが計算区間の長さの1%以下であるものは，ノイズとみなされて，前後に続く谷（山）の一部と認識される（図3.4.11参照）．

$$ZSm = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Xsi \tag{3.4.12}$$

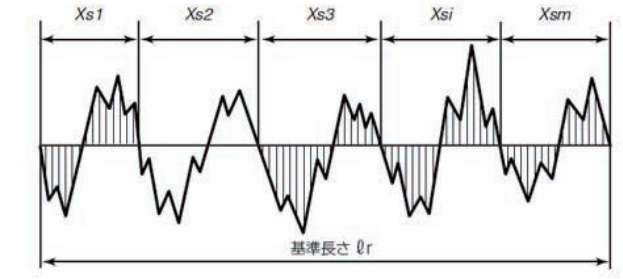


図 3.4.11　輪郭曲線要素の長さ（粗さ曲線の例）[34)]

e）複合パラメータ

① 二乗平均平方根傾斜（PΔq，RΔq，WΔq）

二乗平均平方根傾斜（ZΔq：PΔq，RΔq，WΔq）は，基準長さにおける局部傾斜dZ/dXの二乗平均平方根を表したものである．なお，局部傾斜は，Z（x）を微分したものであり，微分は，基本的に以下の7点公式が用いられる（曲線の両端から3点以内ではデータが足りないため，3点公式，5点公式が用いられる）．

$$Z\Delta q = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{dZn}{dXn}\right)^2} \tag{3.4.13}$$

$$\frac{dZi}{dXi} = \frac{(Z_{i+3} - 9Z_{i+2} + 45Z_{i+1} - 45Z_{i-1} + 9Z_{i-2} - Z_{i-3})}{60\Delta X} \tag{3.4.14}$$

f）負荷曲線・確率密度関数のパラメータ

負荷曲線及び確率密度関数とそれらに関連するパラメータは，安定した結果を得るために，基準長さ ι rではなく，評価長さ ι nによって規定される．

① 負荷長さ率（Pmr（c），Rmr(c)，Wmr（c））

負荷長さ率（Zmr(c)：Pmr（c），Rmr(c)，Wmr（c））は，切断レベルc（高さ%またはμm）における輪郭曲線要素の負荷長さM ι (c)の評価長さ ι nに対する比率を表したものであり，切断レベルcの値を指定することにより決定される（図3.4.12(a)参照）．

$$Zmr(c) = \frac{M\iota(c)}{\iota n} \tag{3.4.15}$$

② 負荷曲線（アボットの負荷曲線BAC）

負荷曲線は，切断レベルcの関数として定義された負荷長さ率の曲線を表したものであり，評価長さ ι nにおける高さZ(x)の確率を与える．負荷長さ率は，曲線データが切断レベルc以上になる部分（M ι (c)）の長さを合計した値を，全体の長さ（ ι n）で割った割合（%）を表す（図3.4.12(b)参照）．

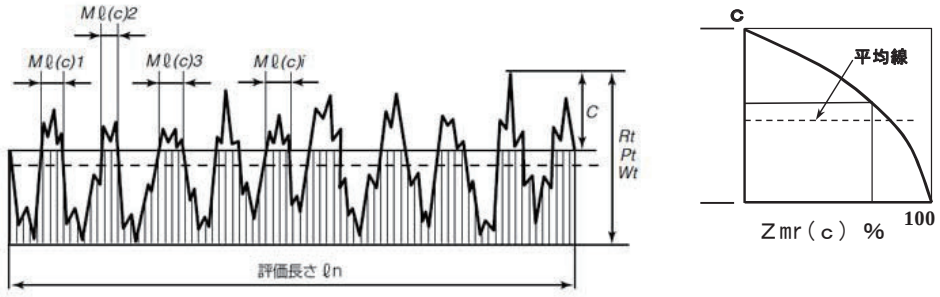


図 3.4.12　輪郭曲線要素の負荷長さ率と負荷曲線 [34)]

$$M\iota(c) = M\iota(c)1 + M\iota(c)2 + \cdots + M\iota(c)i \qquad (3.4.16)$$

③ 輪郭曲線の切断レベル差（Pδc，Rδc，Wδc）

輪郭曲線の切断レベル差（Zδc：Pδc，Rδc，Wδc）は，与えられた二つの負荷長さ率に一致する高さ方向の切断レベルcの差を表したものである．2点の負荷長さ率Zmr1，Zmr2（負荷%）を指定することにより決定される（図3.4.12，図3.4.13参照）．

$$Z\delta c = c(Zmr1) - c(Zmr2) \quad : \quad Zmr1 < Zmr2 \qquad (3.4.17)$$

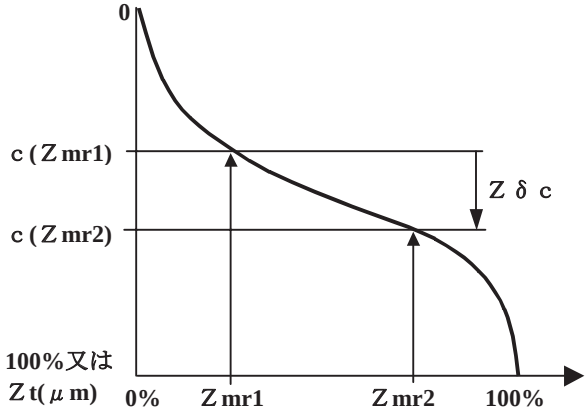


図 3.4.13　輪郭曲線の負荷曲線

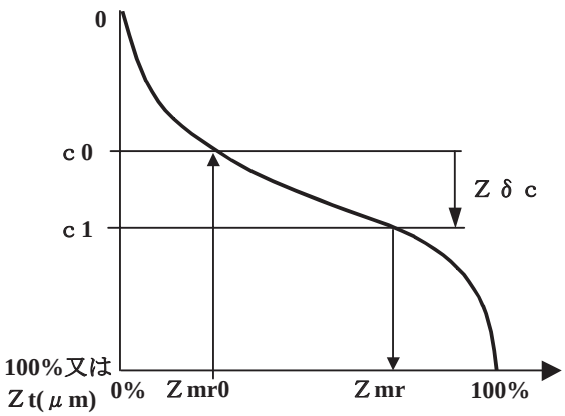


図 3.4.14　輪郭曲線における異なった切断レベル

④ 相対負荷長さ率（Pmr，Rmr，Wmr）

相対負荷長さ率（Zmr：Pmr，Rmr，Wmr）は，基準とする負荷長さ率（Zmr0）と，それに対応する切断レベルからの切断レベル差（Zδc）によって決まる負荷長さ率を表したものである．基準負荷長さ率Zmr0（負荷%）と，切断レベル差Zδc（高さ%または μ m）を指定する

必要がある（図3.4.14参照）.

$$Zmr = Zmr(c1)$$
$$c1 = c0 - Z\delta c \quad , \quad c0 = c(Zmr0) \tag{3.4.18}$$

⑤ 確率密度関数

輪郭曲線の確率密度関数は，評価長さ ι nにわたって得られる高さZ（x）の確率密度を与える（図3.4.15参照）．確率密度関数は負荷曲線のデータを微分して求められる．

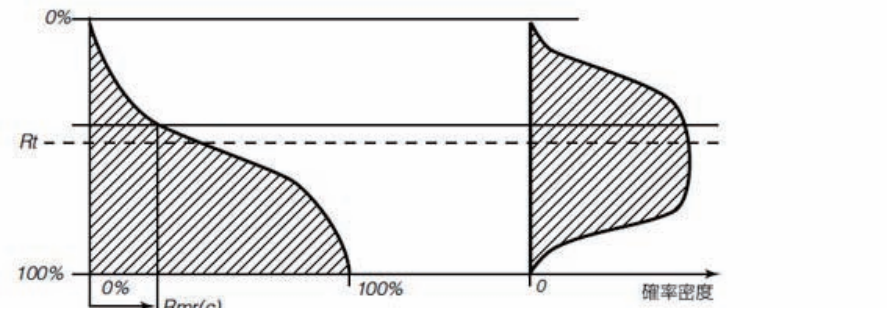


図 3.4.15　負荷曲線と確率密度関数の関係 [34)]

g）FFT による腐食形態の解析

腐食の表面形状の測定値には，腐食により形成された凹凸以外に対象とする部材の反り（初期たわみ等）や板の傾きの情報も含まれており，腐食本来の形態がこれらに隠されて抽出することが容易でない．部材の反りや板の傾きの情報を除去する方法の一つに FFT（高速フーリエ変換）を用いて解析する方法がある [21)35)].

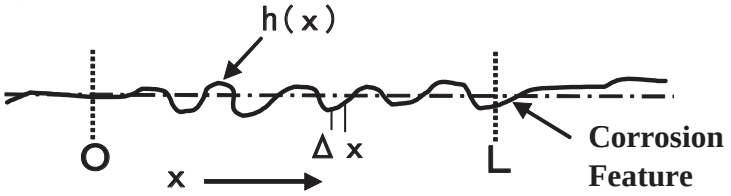


図 3.4.16　腐食損傷部材の表面形状の模式図

図 3.4.16 に示すように，腐食により形成された凹凸をOからLの区間でΔｘの間隔（ピッチ）でN個測定し，その値をｈ(ｘ)とする．このｈ(ｘ)は有限フーリエ近似により次式で表すことができる．

$$h(x) = \sum_{K=0}^{N-1} C_k \cdot e^{-ikx} \tag{3.4.19}$$

ここに，ｋは波数（ｋ＝2nπ/Ｌ，ｎ＝１，２･･･Ｎ）である．C_kは複素フーリエ級数で，ｋの関数であり，Δｘを小さく，すなわち，Ｎを大きくすると，Ｈ(ｋ)と表現でき，かつ，Σを積分に置き換え，規格化（正規化）を行うと，次式のようになる．

$$h(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(k)\, e^{-ikx} dk \tag{3.4.20}$$

ここで，ｈ(ｘ)と Ｈ(ｋ)はフーリエ変換対をなし，Ｈ(ｋ)はｈ(ｘ)のフーリエ変換により求まる．

$$H(k) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x)\, e^{ikx} dx \tag{3.4.21}$$

h(x)を２のべき乗個測定すると，FFT のアルゴリズムにより，H(k)を比較的容易に求めることができる．求められた H(k)は複素関数であり，これを平方した 1/L･|H(k)|²は，パワースペクトルになる．すなわち，

$$G(k)=\frac{1}{L}\,|\,H(k)\,|^{2} \tag{3.4.22}$$

ここで，L＝N･Δx であり，測定長となる．

部材の反りや板の傾きの成分は，低波数側に集まることが指摘されたおり，この領域を解析の対象から除外することにより，測定データの中から部材の反りや板の傾きを取り除いた凹凸のみのデータを抽出することができる．

このようにして部材の反りや板の傾きを除外して求めたパワースペクトルは，それぞれの波数毎の波の強度，すなわち，腐食により形成された凹凸の波数成分を表しているので，腐食形態の新たな指標として用いることができる．例えば，パワースペクトルの周波数依存性を調べることにより，腐食形態の特徴付けも可能となる．

また，パワースペクトル G(k)のもう一つの特徴は，そのフーリエ変換が自己相関係数 R(τ)になることである．ここで，τは長さの次元をもつ値であり，腐食の表面形状の相関距離を表すものと考えて差し支えない．この自己相関係数を求めることで，凹凸が繰り返される距離を解析することができる．還元すれば，凸部と凸部，凹部と凹部，それぞれの平均距離を知ることができる．

$$R(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} G(k)\,e^{ik\tau}\,dk \tag{3.4.23}$$

h）フラクタル次元を用いた腐食形態の解析

自然界に存在する物の形状は，大まかに分類すると２種類，すなわち，特徴的な長さを持つ形状と特徴的な長さを持たない形状に分けられることが可能と考えられている．特徴的な長さとは，対象とする物の形状を語る上でその物が持つ大きさの中で代表的な長さ（例えば，球であれば，直径や半径）のことである．特徴的な長さを持つ形状とは，一般的に，幾何学的に単純な形状を用いて近似することにより，その形状を構成することが可能な形状を指す．一方，特徴的な長さを持たない形状とは，幾何学的に単純な形状を用いて近似することが非常に困難な形状の物であり，具体的には雲，山，樹木や海岸線等が挙げられる [36]．

フラクタルとは，特徴的な長さを持たない形状，構造や現象の総称である．フラクタルという言葉は，B.B.Mandelbrot[37]によってラテン語の fractus（壊れた）という言葉から作られた造語である．また，特徴的な長さを持たない図形の重要な性質は，自己相似性である．自己相似性とは，特徴としている図形の一部が全体と同じような形となっている図形のことであり，自己相似性を有する形状の特徴は，縮尺に関わらず，同様の図形が観察されること，連続であるにも関わらず，あらゆる位置で微分不可能の曲線のことである．

ところで，腐食は，以上のようなフラクタル性を有していることが指摘されており，フラクタル解析は軽微な腐食の進行過程を評価できる有効な手段と考えられている [38]．最近では，金属材料の表面腐食の進行過程をデジタル画像処理によるフラクタル解析により，腐食形態や腐食進行における様相の評価手法の確立を計る研究が多く見られるようになっている．以下では，フラクタルを用いた金属材料腐食損傷部の腐食形態の解析法について言及する．

フラクタル性を有する図形の複雑さ（正確には数学上の距離空間を埋める密度）を示す値として，Hausdorff 次元が定義されている（数学的な詳細は文献 39）に譲る）．この Hausdorff 次元を

算出するためには，縮小写像の縮小率を求める必要があるが，統計的にばらつきのある図形に対して数学的に厳密な縮小率を求めることは困難である．そこで，Hausdorff 次元を次元解析により近似的に求める方法が提案されている．その方法により求められた値をフラクタル次元と呼び，通常，フラクタル解析に使用される次元は，このフラクタル次元である[40]．ここでは，フラクタル次元を算出する方法として多用されている正方形要素を用いた Box-counting 法と呼ばれる方法について記述し，事例を示す．

直線と正方形を１辺の長さｄの正方形で分割すると，分割して得られる図形の数Ｎ(ｄ)は，直線ならばd^{1}，正方形ならばd^{2}に反比例する．すなわち，分割して得られる図形の数は，辺の長さｄのべき乗に反比例し，直線は１次元，正方形は２次元という結果が得られる．この考えを延長して，次元解析の対象となる図形を長さｄの正方形で分割して，その図形が該当する箇所の正方形要素の数Ｎ(ｄ)を数え，ｄのべき乗に反比例すると仮定すれば，

$$N(d) = a \cdot d^{-k} \qquad (a：比例定数，\ k：指数) \qquad (3.4.24)$$

となる．両辺に対し，対数をとれば，

$$\log(N(d)) = -k \cdot \log(d) + b \qquad (b：定数) \qquad (3.4.25)$$

と整理することができる[40]．上式を利用して，正方形の辺の長さｄをパラメータとしてＮ(ｄ)を数え（カウントし），両対数グラフに表示した後，最小二乗法のよりｋとｂの値を算出すると，その図形のフラクタル次元ｋが求められる．

Box-counting 法の適用事例として，図 3.4.17 の四万十川の事例を紹介する[39)40)]．図 3.4.18 が正方形で分割した一例である．ｄを 2.0，1.6，1.2，0.8，0.4 としたとき，Ｎ(ｄ)は 51，71，104，177，389 となり，最小二乗法でｋを算出すると，ｋ＝1.26 となった．すなわち，四万十川のフラクタル次元は 1.26 である．



図 3.4.17　四万十川

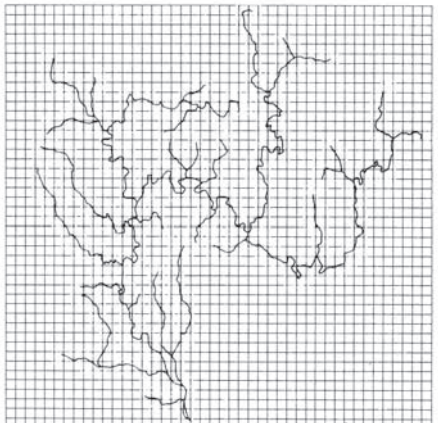


図 3.4.18　四万十川を正方形で覆う

次に，球状黒鉛鋳鉄および耐食合金球状黒鉛鋳鉄を試験材料として，腐食試験溶液に濃度 0.1%の硝酸，硫酸及び塩酸水溶液と水道水の４種類が用いられ，金属表面の腐食現象の評価が試みられた事例を紹介する[41)]．表面腐食の解析は，画像処理装置にデジタル画像として取り込み，画像を２値化，画面間演算などの様々な処理を通して実施され，フラクタル次元が求められた．

図 3.4.19 は，硝酸水溶液中で浸食試験した試験片を光の三原色(輝度値)に分光したときの経時変化を輝度値の百分率で表したものである．この輝度百分率により，時間の経過と共に輝度が増減変化する現象が確認された．また，初期の変化は材料表面に変色皮膜が形成されたことを，次の変化は初期に形成された変色皮膜とは異なる新たな変色皮膜が形成されたことを表している．

図 3.4.20 は，球状黒鉛鋳鉄の腐食を経時変化とフラクタル次元で示したものである．初期の変色皮膜の形成は，論理和画像(OR)処理が有効であることが，また，硝酸腐食の場合，論理和画像は 3.84ks でフラクタル次元が２次元に達し，論理積画像(AND)では 7.68ks 以降に低下することが確認された．すなわち，この解析により，論理積画像は新たな変色皮膜の形成される時間を捉えるための有効な手段となり得ることが確認された．一方，輝度値が低下する部分を抽出した論理和画像(Dark OR)では，論理積画像のフラクタル次元が降下し始める時間から画像を Dark OR で処理することにより，新たな変色皮膜の形成過程を捉えられることが判明した．

以上の研究により，鋳鉄表面の腐食状態や腐食形成の過程をフラクタル次元解析により明瞭にできることが明らかになった．

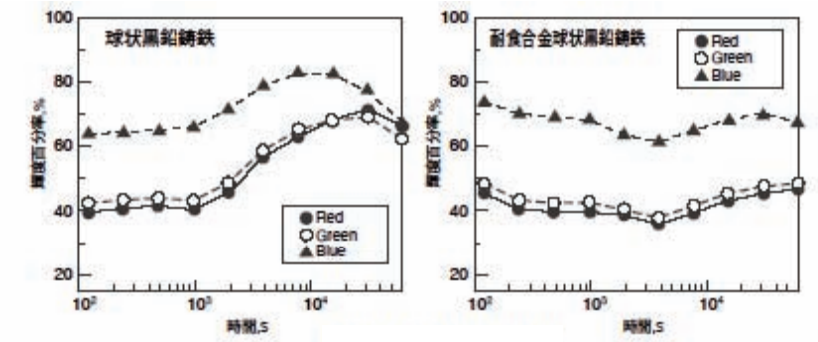


図 3.4.19　輝度の経時変化（硝酸腐食）

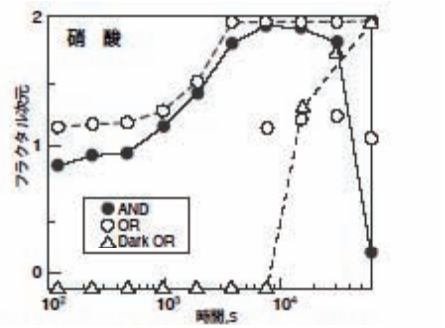


図 3.4.20　フラクタル次元

i） ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は，時間と周波数分解能が一定であるフーリエ変換に対して，信号の周波数成分に応じて時間分解能を変えることができるため，最適な時間－周波数分解能により信号を解析することができる [42)43)].

① 連続ウェーブレット

関数Ψ(x)に対し，次式のように置く．

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\Psi}(\xi)|^2 / |\xi| \, d\xi \qquad (3.4.26)$$

このとき，関数Ψ（x）と $\tilde{\Psi}(\xi)$（Ψ（t）のフーリエ変換）は窓関数であり，かつ，Ψ（x）が次の条件を満たすとき，この関数Ψをアナライジングウェーブレット（解析のためのウェーブレット，あるいは，単にウェーブレット）と呼び，その条件をアドミッシブルの条件と呼ぶ．

$$C_\Psi < \infty \qquad (3.4.27)$$

関数Ψがアナライジングウェーブレットのとき，関数 f（x）$\in L^2(R)$ と a，b$\in$R，a＞0に対し，次の積分

$$(W_\Psi f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \qquad (3.4.28)$$

をウェーブレット係数と呼び，f（x）から（W_Ψ f）（b，a）への対応をウェーブレット変換という．ここで，a≠0，bはともに実数であり，それぞれスケール変換とシフト変換を表すパラメータである．一般に，アナライジングウェーブレットとして，Daubechies，Meyer，Mexican-hat，Gabor 関数が用いられる [42)]．（$1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数である．）

② 離散ウェーブレット

連続ウェーブレット変換は，時間空間と周波数空間に局在した基底による関数の展開を行い，扱えるすべての可能なスケールでウェーブレット係数を計算するため，かなり大きな計算量が必要となる（換言すれば，信号処理のために，ａとｂによる無限積分が必要となり，現実的でない）．そこで，スケールや位置について，ある組み合わせだけを選択して計算する手法が離散ウェーブレット変換であり，計算の効率化を図ることができる．以下では，連続ウェーブレットを２進分割して得られる離散ウェーブレットと，それを用いた変換について説明する．

マザーウェーブレット関数のスケールａおよび平行移動量（シフト）ｂを離散化すると，次のようになる．

$$a=2^{-j}\ ,\quad b=k2^{-j} \tag{3.4.29}$$

ここで，ｊ，ｋはスケール，シフトを表し，j=0，±1，±2，･･･と離散化する場合，ウェーブレット関数の横幅を半分，さらにその半分，あるいは，倍，さらにその倍といったように伸縮することに相当する．

連続ウェーブレット変換で用いたマザーウェーブレット関数は，式(3.4.29)により，次のように，書き表すことができる．

$$\Psi_{j,k}=\frac{1}{\sqrt{2^{-j}}}\Psi\left(\frac{t-k2^{-j}}{2^{-j}}\right) \tag{3.4.30}$$

上式を用いたウェーブレット変換が離散ウェーブレット変換である．一般的には，$\Psi_{j,k}$ はスケール変換を２のべき乗（二進）にとり，次の関係が成立する．

$$\Psi_{j,k}(t)=2^{j/2}\Psi(2^{j}t-k) \tag{3.4.31}$$

また，式(3.4.28)に対する離散ウェーブレット変換の式は，次のように書き示すことができる[27]．

$$W(j,k)=\int_0^{\infty} f(t)\,\Psi_{j,k}(t)\,dt \tag{3.4.32}$$

ここで，ｆ(ｔ)は解析対象の信号である．

次に，離散ウェーブレット変換の実際の適用例について紹介する[44]．

粗さ曲線は，カットオフ値λｃの高域フィルタとして位相補償型のガウシアンフィルタを用いることとJISには規定されているが，信号処理技術の最近の進歩は目覚ましく，ウェーブレット変換によれば，不連続信号の抽出あるいは除去も可能であり，このウェーブレットフィルタを表面粗さの計測に適用することが試みられた[44]．粗さ曲線とうねり曲線は，どちらかが推定されれば，断面曲線からこれを除去することにより他方が求まる関係にある．この関係を利用し，断面曲線からうねり曲線を除去し，粗さ曲線を求める手法として，ガウシアンフィルタ，ドベッシー（Daubechies）

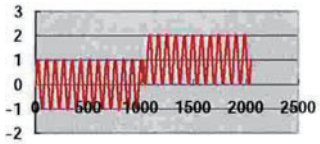


図 3.4.21　仮想断面曲線

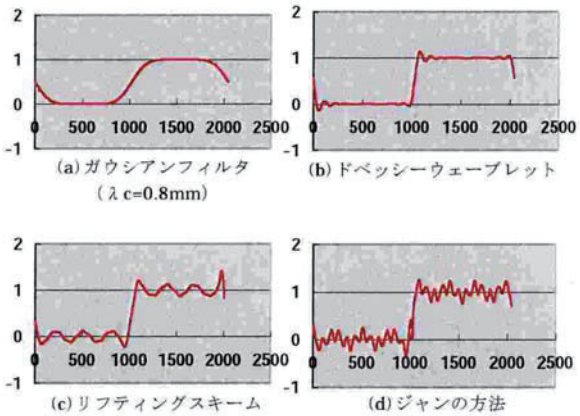


図 3.4.22　推定うねり曲線

ウェーブレット [42]，リフティングスキーム，ジャンの４つの方法が比較・検討された．うねり曲線として，評価長さ 2.56mm，サンプリング点数 2048 で，その中央箇所において，高さ１の段差を持つ離散的なステップ曲線が用いられた．また，粗さ曲線として，振幅１，山数 25 の正弦波を想定し，両者を加算した図 3.4.21 に示すような断面曲線が用いられた．なお，ウェーブレット変換の場合には，先ず多重解像度解析を用いた方法で粗さ曲線を推定し，これを断面曲線から除去することによって，うねり曲線が求められた．

各種手法で求められた推定うねり曲線が図 3.4.22 である．ドベッシーウェーブレットの結果が最もシャープな段差を示し，ハンチングも少なく，段差などの不連続成分を抽出する性能において優れていることが判明した．

(4) 腐食データの確率統計処理

以下では，「腐食・防食ハンドブック　第Ⅵ編　腐食試験法」[45]に記述されている一節を引用して腐食現象で観察されている確率分布について説明する．

腐食データの統計的性質を知るには，まずデータの示すヒストグラムを調べ，これがどのような確率分布に対応しているか検討する必要がある．確率分布には離散型と連続型があり，様々な分布に対応している．連続型分布を例として，確率密度関数 (probability density function，PDF) を記述する．図 3.4.23 に示すように，実測値から得られるヒストグラムは，測定値の数を増やすことによって滑らかな曲線によって表される確率密度関数 f(x)へ漸近する．f(x)で囲まれた面積が，累積分布関数（確率分布関数，cumulative distribution function，CDF）F(x)

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)\,dx \qquad (3.4.33)$$

を与える．

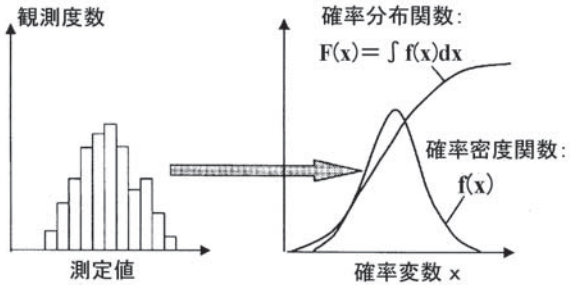


図 3.4.23　ヒストグラムと確率密度関数 PDF および確率分布関数 CDF の関係

表 3.4.3 に，腐食現象で観測される確率分布の例を示す．これらの分布のうち，腐食データ解析において重要な正規分布，ポアソン分布及び極値分布の性質と解析方法を，図式解析を中心に，実例を用いて以下に説明する．

表 3.4.3　腐食現象で観測される確率分布

確率分布	腐食における実例
正規分布	孔食電位，すきま腐食電位，孔食数の電位依存性，腐食量
対数正規分布	応力腐食割れ破断寿命，すきま腐食開始時間
ポアソン分布	孔食数や塗膜ブリスターの二次元分布
指数分布	孔食発生誘導時間，水素割れ破断寿命，実地応力腐食割れ寿命
極値(ガンベル)分布	孔食最大深さ，析出物最大径，き裂最大深さ
ワイブル分布	応力腐食割れ寿命，破断最小寿命

① 正規分布（腐食試験結果のばらつきの評価）

種々の分野で多用される確率分布は正規分布である．正規分布は連続型分布であり，図 3.4.23 の右図に示すように，平均値を中心として左右対称の釣り鐘形の確率密度関数 f(x)を示す．

$$f(x)=(1/\sqrt{2\pi}\,\sigma)\exp\{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)\} \qquad (3.4.34)$$

ここで，μと σ^2（σ：標準偏差）はそれぞれ平均値と分散であり，分布の形状を決定し，分布の母数（パラメータ）と呼ばれている．

正規分布の累積分布関数 F(x)は

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)\,dx=\int_{-\infty}^{x}(1/\sqrt{2\pi}\,\sigma)\exp\{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)\}dx \qquad (3.4.35)$$

であり，この関数の値は，通常，正規分布表を用いて算出される．

腐食データを含む工学データの解析には，目で見て全体を把握することができる確率紙を用いた図式解析が多用されている．ここで，正規分布の解析には正規確率紙が用いられるが，この確率紙の縦軸は，式(3.4.35)の F(x)が x に対して直線となるように目盛が設定されている．また，確率紙にプロットする場合の F(x)の値は，平均ランク法によって

$$F(x) = i/(1 + N) \qquad (3.4.36)$$

から求められる．

表 3.4.4 は，正規確率紙にプロットするためのワークシートである．表中には 3.5%NaCl 溶液中において繰り返し測定された SUS 304 ステンレス鋼の孔食電位の測定値 x_i(12 個)と，それに対応した $F(x_i)$の値が示されている．

表 3.4.4　正規分布プロットのためのワークシート

順位 I	孔食電位 測定値 x_i(V)	プロット位置 $F(x_i)=i/(1+N)$
1	0.250	0.0769
2	0.261	0.154
3	0.263	0.231
4	0.264	0.308
5	0.274	0.385
6	0.275	0.462
7	0.281	0.538
8	0.285	0.615
9	0.286	0.692
10	0.293	0.769
11	0.294	0.846
12	0.295	0.923

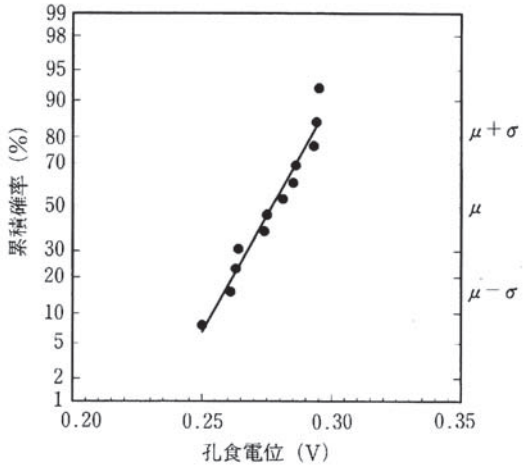


図 3.4.24 孔食電位分布の正規確率紙へのプロット

データ（xi，F(xi)）の組を正規確率紙にプロットした例が図 3.4.24 である．ほぼ直線関係が認められるので，孔食電位の測定値の分布は正規確率分布に従う．図中の直線で累積確率 F(x)=0.5 のときの x は平均値μを与える．また，直線の傾きは，標準偏差σの逆数に比例し，F(x)=0.5 と F(x)=0.823 のときの x の値の差から標準偏差σが求められる．元の分布がどのような分布であっても，中心極限定理により，標本数が増えると平均値の分布は正規分布に従うので，測定値のばらつきとその平均値に着目する場合には，正規分布が重要な指標となる．

② ポアソン分布（孔食数の二次元分布）

ポアソン分布は，離散型分布の一つであり，稀に起こる現象（希有現象）を記述する指標として多用されている．また，ランダムに起こる現象の観測にも用いられている．起こりうる場合の数は多いが，その生起確率が小さな場合に観測され，腐食では孔食発生の二次元分布や塗膜劣化のブリスター分布などで観測されている．

ポアソン分布は，平均値をμとして，x なる値の現れる確率 P(x)は

$$P(x)=\frac{\mu^{x}}{x!}\exp(-\mu) \tag{3.4.37}$$

で与えられる．

例として，ステンレス鋼表面に発生したミクロピットの分布の解析例を示す．まず，ピットの発生した表面の写真の視野を小区画に分け，各区画中のピットの数を数えて，区画中のピット数の度数を求め，得られたデータをプロットしたものが図 3.4.25 である．白丸は式(3.4.37)を用いて求めた計算値であり，黒丸の測定値とよく一致していることから，ミクロピットの分布がランダムな分布を特徴付ける（記述する）ポアソン分布に従っていることが理解される．

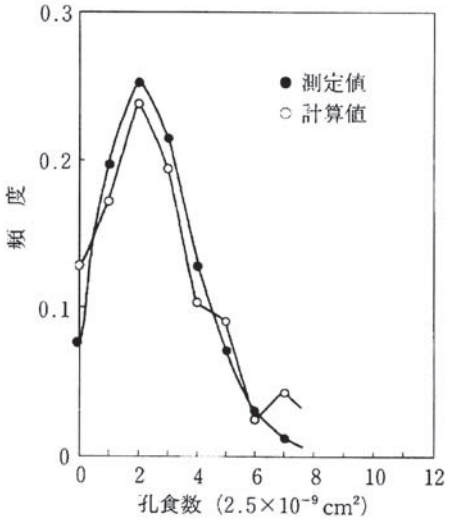


図 3.4.25 観測されたピット分布理論，ポアソン分布との比較

ところで，塗装鋼板等の外観劣化の評価に用いられる評点（RN：rating number）は，腐食面積率に対応した数値であり，実用的な観点から多用されているが，RN とが同じでも見た感じの異なる場合がある．すなわち，腐食面積率は同じであるが，発錆点の分布の様相が異なる場合がある．同じ RN であっても，分布形状で見た感じが大きく異なることは従来から指摘されている．図 3.4.26 は同じ RN の発錆点分布であって，(c)，(d)はランダムだが，(a)や(i)は規則正しい分布を示している．ここで，(a)のような金属格子のように規則的な分布を regular，(i)のように集まった分布を singular と呼んで，これらの分布の特徴が，均一度関数 H によって表されることが示されている．

$$H=-\Sigma\,(q_j/q_T)\ln(q_j/q_T) \tag{3.4.38}$$

ここに，q_j は j 番目の面積における数密度であり，q_T は全面積についての発錆点の数である．この関数は，区画全体に発錆点が均一に分布すると最大値を示し，特定の箇所に発錆点が集まると最小値を示す性質がある．また，完全にランダム，すなわち，ポアソン分布に従うときの H 関数の値を H_0 として，それとの差

$$D = H - H_0 \tag{3.4.39}$$

によって，ランダムからの偏りを表すことができる．

次に，ポアソン分布では，分布の平均値μも分散 σ^2 もλに等しいので，$\sigma^2/\mu = 1$ のとき，ポアソン分布に従っていると判断され，このとき完全にランダムな分布を示すことになる．一方，$\sigma^2/\mu > 1$ 及び $\sigma^2/\mu < 1$ に応じて，ポアソン分布からの偏り，すなわち，ランダムから規則性へと変化するので，分布の規則性（regular），ランダム性，集合性（clustered）を

$$\sigma^2/\mu > 1,\quad \sigma^2/\mu = 1,\quad \sigma^2/\mu \tag{3.4.40}$$

によって判定することができる．

③ 極値（ガンベル）分布（孔食深さの最大値の推定）

パイプに生じた孔食によってリークが発生するとき，着目しなければならないのは，孔食深さの平均値ではなく，最大深さの値である．最大深さは，表面積が大きくなるとともに増大することが古くから知られており，この最大深さの面積依存性を合理的に推定するために，極値（ガンベル）分布を用いる手法，すなわち，極値解析法が用いられている．実際の適用例として，石油タンク底板に生じる孔食深さの最大値を，小面積試験片の少数個のサンプリングによって推定する事例，また，熱交換器のパイプに生じた最大孔食深さを，少数本のパイプの検査によって推定する事例などが取り上げられ，紹介されている．

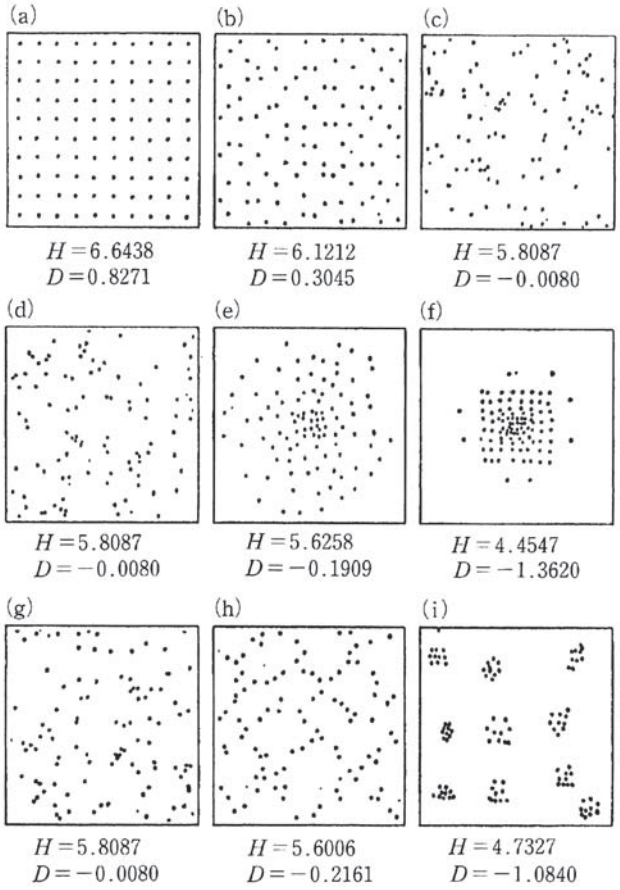


図 3.4.26　同一の RN を持つ，異なったピット分布のモデルパターン

極値分布の累積分布関数 F(x)は

$$F(x) = \exp[-\exp\{-(x-\lambda)/\alpha\}] \qquad (3.4.41)$$

によって表される．ここで x は孔食深さ，λ及びαはそれぞれ位置パラメータ，尺度パラメータと呼ばれる分布の母数である．

式(3.4.41)の両辺について 2 回対数をとり，基準化変数 y

$$y = (x-\lambda)/\alpha \qquad (3.4.42)$$

を導入すると，次式を得る．

$$y = -\ln[-\ln\{F(y)\}] = (x-\lambda)/\alpha \qquad (3.4.43)$$

ここで，検査対象とする面積を S として，その中から小面積 s の試験片を採取するとき，

$$T = S/s \qquad (3.4.44)$$

は再帰期間と呼ばれ，面積効果を示す指標となる．また，Tは

$$T = 1/[1 - F(y)] \tag{3.4.45}$$

と定義されるが，T >18 において

$$y = -\ln[-\ln\{F(y)\}] = -\ln[-\ln(1-1/T)] = \ln T \tag{3.4.46}$$

で近似できる．極値確率紙は，横軸の x に対して，縦軸には$-\ln[-\ln\{F(y)\}]$及び対応する y や ln T を目盛り，極値分布に従うデータが直線となるように作成された確率紙である．図 3.4.27 は，石油タンク底板に生じた孔食深さの分布を，極値確率紙を用いて解析した例である．表 3.4.5 は，極値プロットのためのワークシートである．この例では，1040m² の面積の石油タンク底板から 10 か所からランダムに 1.85m² の小試験片を採取して，それぞれの試験片から最大深さを 9 個得た（1 個は腐食していなかったためデータが得られなかった）．ワークシートの第 2 列は大きい順序に並べた測定値 xi であり，第 1 列はその順序 i である．第 7 列は，確率紙にプロットする場合の F(xi)の推定値を与えるプロット位置

$$F(xi) = 1 - i/(1 + N) \tag{3.4.47}$$

を表す．ここで N はデータの総数で，この例では N = 10 である．

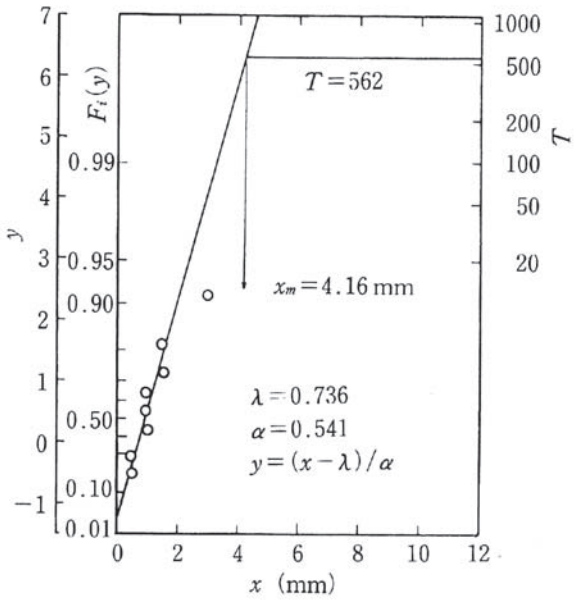


図 3.4.27　最大孔食深さの極値プロット

表 3.4.5　極値解析のためのワークシート

順位 i	孔食最大深さ x_i	MVLUE係数 $a_i(N,n)$	MVLUE係数 $b_i(N,n)$	計算 a_ix_i	計算 b_ix_i	プロット位置 $F(x_i)=1-i/(1+N)$
1	3.0	0.01785	0.09525	0.05355	0.28575	0.91
2	1.5	0.03080	0.10055	0.04329	0.15083	0.82
3	1.5	0.04459	0.09776	0.06689	0.14664	0.73
4	1.0	0.05957	0.08860	0.05957	0.08860	0.64
5	1.0	0.07634	0.07275	0.07634	0.07275	0.55
6	1.0	0.09568	0.04861	0.09568	0.04861	0.45
7	0.5	0.11884	0.01286	0.05942	0.00643	0.36
8	0.5	0.14814	−0.04152	0.07407	−0.02076	0.27
9	0.5	0.40816	−0.47486	0.20498	−0.23743	0.18
10	—	—	—	—	—	0.09
			計	0.73589	0.54142	

図 3.4.27 の確率紙には，データ（ xi，F(xi)）の組をプロットした例が示されている．直線に従うことから測定された孔食深さの分布は極値分布に従うことがわかる．直線の傾きからαが得られ，y = 0 のときの x の値からλが得られる．

小試験片の面積の T 倍の面積をもつ石油タンク底板で生じると推定される最大孔食深さは，T =1040／1.85 = 562 と直線の交点から得られて，x_m = 4.16mm と推定される．以上の方法は極値確率紙を用いた推定法であるが，より正確には最小分散線型不偏推定子（MVLUE）法が用いられる．MVLUE 法によると，α及びλは，それぞれ

$$\alpha = \Sigma\, bi(N, n)\cdot xi$$
$$\lambda = \Sigma\, ai(N, n)\cdot xi \qquad (3.4.48)$$

によって推定される．ここで，ai(N, n)および bi(N, n)は，MVLUE 係数であって，別途表に与えられている．表 3.4.5 中の第 3 列と第 4 列は N = 10，n = 9 の場合の係数の値を MVLUE 係数表から転記したものであり，これらの値と xi との積が第 5 列および第 6 列に記入されている．第 5 列および第 6 列のそれぞれの総和が最下段に示されてあるが，これらの値が式(3.4.48)によるλとαの推定値である．これによって，T = 562 の石油タンク底板の最大孔食深さの推定値 x_m は

$$x_m = \lambda + \alpha \log T = 0.736 + 0.541 \ln 562 = 4.16$$

となり，確率紙を用いた図式解法での推定値とよく一致している．また，d＝11mm の厚さの底板が貫通する確率 P は

$$P = 1 - \exp[-\exp\{-(d-(\lambda + \alpha \log T)/\alpha)\}] = 0.0359$$

となる．

④ ワイブル分布（応力腐食割れ寿命分布解析）

極値分布でもう一つよく観測される分布として，ワイブル分布がある．ワイブル分布は，信頼性工学の分野で寿命分布を解析する上で，物体の体積と強度との関係を定量的に記述するための確率分布として用いられている．一般には，鎖を引っ張る場合において，最も弱い輪が破壊することにより鎖全体が破壊したとするモデル（最弱リンクモデル）として利用されている．腐食の場合には，応力腐食割れ破断寿命や孔食発生寿命，あるいは，塗膜劣化寿命などの寿命分布で観測されている．

ワイブル分布の累積分布関数 F(t)は，

$$F(t) = 1 - \exp[-\{(t-g)/h\}^m] \qquad (3.4.49)$$

で表される．t は寿命，m，g，h はそれぞれ形状，位置，尺度パラメータと呼ばれる分布の母数である．特に，形状パラメータ m は，次に示す確率密度関数の形状や故障率λを決定するので重要である．

確率密度関数 f(t)は，

$$f(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \qquad (3.4.50)$$

であって，m の値によって様々な形状をとる．

故障率λは，

$$\lambda = (m/h)\,[(x-g)/h]^{m-1} \qquad (3.4.51)$$

である．したがって，故障率は，m < 1，m = 1，m > 1 に応じて，時間的に減少，一定及び増加する．これらをそれぞれ初期故障型（m < 1），偶発故障型（m = 1），磨耗故障型（m > 1）

という．

ワイブル分布の解析には，ワイブル確率紙が用いられる．式(3.4.49)の両辺について 2 回対数をとり，整理すると，

$$\ln[-\ln\{1-F(t)\}] = m\,[\ln(t-g) - \ln h] \qquad (3.4.52)$$

となる．したがって，ワイブル確率紙では，図の縦軸に $\ln[-\ln\{1-F(t)\}]$をとり，横軸を対数軸とすることによって，ワイブル分布に従うデータが直線となるように取られている．分布を表す直線の傾きから形状パラメータが得られる．

図 3.4.28 はステンレス鋼の $MgCl_2$ 溶液中における破断寿命分布をワイブル確率紙にプロットした例である．荷重の低下とともに寿命が伸び，同時に分布の傾きが小さくなっていく様子が示されている．すなわち，荷重の大きいときには $m > 1$ であって磨耗故障型分布を示すが，荷重が低いときには $m = 1$ の偶発故障型分布をとる．実地寿命分布の多くは偶発故障型分布を示すが，腐食条件が厳しいときには磨耗故障型分布をとる．

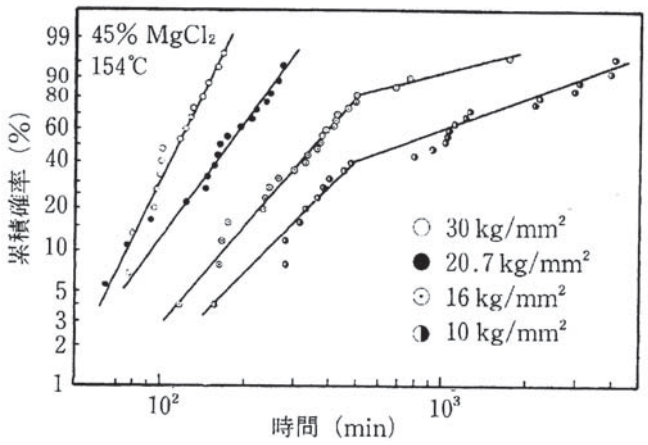


図 3.4.28　ワイブル分布に従うステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命

3.4.2 計測点の設定方法

3.3 に示したように，現在用いることのできる腐食鋼板に対する計測技術は限られており，いずれの手法を用いても，計測は離散的にしか行うことができない．また，土木鋼構造物の場合，一般に腐食が生じる領域は比較的広範囲に及ぶことが多いが，領域全てにわたって効率よく計測が行えるような手法はないといってよい．そのため，限られた領域を対象にした離散的な計測データ，すなわち腐食部材の一部から取り出した情報によってその力学性能を評価せざるを得ないのが現状である．

限られた計測値から，その腐食部材が有する代表値（例えば最小板厚や平均板厚など）を推定するには，前項に示した統計的な取り扱いが参考になる．しかし，腐食した部材のどの箇所から，どの程度の計測ピッチで計測を行えばよいかといった，計測作業に先立って定めなければならない事項に対して明確に答えられるような体系的な経験則，理論などは未だ確立されていない．計測点を設定する際には，求めたい代表値の種類，統計学的な要求，対象とする腐食の形態（全面腐食なのか孔食なのかなど），使用できる計測方法などを考慮して，適切に計測点を定めなければならない．例えば全面腐食した部材の平均板厚を求めたい場合であれば，比較的少ない点数で，また，比較的あらいピッチで計測を行えばよいであろう．しかし，全面腐食を呈しているように見えても，詳細にみると場所によって腐食の仕方に差があり，“均一”腐食とはいえないような場

合もある．また，そのような結果は，計測を行った後にしか知ることができないという問題もある．

文献 46)では，腐食鋼板の引張強度の評価には最小板厚が重要であり，それを計測するための計測ピッチとして 0.3㎜ 以下という数字が示されている．この事例のように，求めたい代表値や腐食形態の種類と，計測点の設定方法とを関連づけ，それを蓄積していくことによって，事前に計測作業を計画することができるようになるものと期待される．本委員会の活動の範囲ではそれを提案するまでには至らなかったが，今後とも腐食事例の収集とその分析結果の蓄積が重要である．

【参考文献】

1) 超音波厚さ測定(非破壊検査シリーズ)，日本非破壊検査協会，2003.
2) 大野崇，名取暢，稲田育朗：腐食部材の健全度評価に関する研究概要，横河ブリッジグループ技報，No.27，pp.82-94，1998.
3) 日本写真測量学会編：写真による三次元測定:応用写真測量，共立出版，1983.
4) 浅海敬次，松下陽三，中村秀治，藤井堅：標点投影による画像計測法とその維持管理への適用性検討，土木学会第 60 回年次学術講演会，I-605, 2005
5) 舘石和雄，柴田憲吾，判治剛：デジタルステレオグラフィーによる腐食鋼材表面形状の簡易計測手法，鋼構造論文集, Vol.12, No.46, pp.27-34, 2005
6) 小﨑明郎 : 渦電流による亜鉛被覆鋼線の腐食劣化診断方法，第 53 回材料と環境討論会予稿集, (社) 腐食防食協会, C-302, pp.347-350, 2006.9.
7) 安部健，篠澤康彦，水口茂，梶浦敦裕，鳥井康司，道下孝一：渦流探傷センサー，特願 2003－130470, 2003.
8) 上林正和，川上善道，安永元則 : 錆，塗膜付き状態での超音波有効板厚計測器の開発，第 55 回年次学術講演会予稿集, (社) 土木学会, □-125, 2000.9.
9) 上林正和，川上善道，安永元則：超音波探触子、超音波測定器、及び、超音波厚み測定方法：特許第 3524841 号, 2004.
10) 島田道男，成瀬健，高橋修：ソフト探触子による腐食部材の厚さ測定，非破壊検査，(社) 日本非破壊検査協会, Vol.56, No.4, pp.198-204, 2007.4.
11) 成瀬健，島田道男， 吉井徳治:腐食凹凸面における超音波厚さ測定の補正法，非破壊検査, (社) 日本非破壊検査協会, Vol.53, No.5, pp.294-300, 2004.
12) 島田道男，成瀬健，吉井徳治：腐食部材劣化度の非破壊評価技術に関する基礎的研究，船舶技術研究所報告, Vol.37, No.1, pp.1-17, 2000.
13) 三菱重工パンフレット（公開資料）：超音波式有効板厚計測器基本原理.
14) 三菱重工パンフレット（公開資料）：超音波式有効板厚計測器.
15) 三菱重工パンフレット（公開資料）：鋼構造物寿命診断システム　CLAS-G.
16) 上林正和，土生川真二：水門扉の腐食寿命診断システム CLAS-G の開発，検査技術，pp.28-34, 2005.3.
17) 黒田紗代，舘石和雄：ステレオグラフィーを用いた腐食鋼板の三次元形状計測とその精度の検証，土木学会第62回年次学術講演会,2007
18) 例えば，中井達郎，松下久雄，山本規雄，荒井宏範：バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度，日本海事協会会誌，No.262，pp.27-34，2003.

19) 例えば，世利修美：金属材料の腐食と防食の基礎，成山堂書店，2006.
20) 板垣浩，伊藤誠一，山本規雄，朝田洋雄：ベイズの方法による大型既存構造物の耐損傷性評価法，構造物の安全性および信頼性，Vol.4，pp.409-412，2000.
21) 辻恒平，久田俊明，北川英夫：腐食表面の三次元的不規則性のスペクトル解析による評価，日本機械学会論文集(A編)，Vol.49，No.439，pp.331-340，1983.
22) 的場正明，山本規雄，渡辺富雄，海野昌俊：船体の腐食・防食とその強度への影響に関する研究，日本造船学会論文集，No.175，pp.271-280，1994.
23) 高増潔ほか：形状計測における不確かさの見積り（第２報），精密工学会誌，Vol.65，No.5，pp.693-697，2003.
24) 例えば、日本工業標準調査会：http://www.jisc.go.jp/intellectual/cap_effort03.html
25) 日本規格協会：JIS B 0601 製品の幾何特性仕様（GPS），pp.17-30，2001.
26) 例えば，高安秀樹：フラクタル科学，朝倉書店，1987.
27) 吉田彰，大上祐司，岡野隆男，玉置昌弘：ウェーブレット変換を用いたローラ表面損傷診断に関する考察（ピッチングとスポーリング損傷に起因する動的挙動の観察），日本機械学会論文集(C 編)，Vol.65，No.630，pp.738-744，1999.
28) 松本勝，白井義郎，中村幾雄，白石成人：腐食鋼材の有効板厚評価法の一提案，橋梁と基礎，Vol.23，No.12，pp.19-25，1989.
29) 例えば，産業技術総合研究所：http://www.nmij.jp/chishiki/trace.html
30) 例えば，田島稔，小牧和雄：最小自乗法の理論とその応用（改訂版），東洋書店，pp.85-95，1996.
31) 新技術情報検索システム・NETIS 登録 No. CB-000021：数値仮組立の橋梁部材計測システム，2000.
32) 小桜義隆：鋼橋の完成検査システムに関する開発研究，長岡技術科学大学・学位論文，1987.
33) 例えば，三菱総合研究所：光関係研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査報告書，平成 15 年度経済産業省委託調査，2005.
34) http://www.keyence.co.jp/index.jsp：表面粗さ・形状測定入門－表面粗さのパラメータ（JIS B 0601-2001）
35) 山本正弘，広沢規行，吉田耕太郎，加藤忠一，羽田隆司：海洋で暴露した鋼材の腐食形態の解析，Zairyo-to-Kankyo，No.41，pp.803-808，1992.
36) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1986.
37) Benoit B. Mandelbrot, Dann E. Passoja and Alvin J. Paullay：Fractal character of fracture surfaces of metals, NATURE, Vol.38，pp.721-722, 1984.
38) 山際謙太：フラクタル解析を用いた金属破断面の特性化と金属破壊機構解明への応用，東大修士論文，2000.
39) 石村貞夫，石村園子：フラクタル数学，東京図書，1990.
40) 日本建築学会編：複雑系と建築・都市・社会，pp.97-104，2005.
41) 青山正治：鋳鉄表面のフラクタル次元解析による腐食評価，大同工業大学産学連携共同研究センター，CRC ニュース 15 号，2001.
42) 中野宏毅，山本鎮男，吉田靖夫：ウェーブレットによる信号処理と画像処理，共立出版，1999.
43) 橘鷹伴幸：ウェーブレット変換による金属破断面の特性化と金属破壊機構解明への応用，東京大学修士論文，2001.

44) 伊藤俊治，水野和康，松崎洋：新しい信号処理を用いた粗さ曲線の決定法，愛知県産業技術研究所研究報告，No.2，pp.48-51，2003.
45) 腐食防食協会編：腐食・防食ハンドブック（CD-ROM 版・第２版），丸善，2005.
46) 杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿，岡扶樹：腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察，構造工学論文集，Vol.52A, pp.679-688, 2006.3.

4　残存耐荷性能評価

4.1　残存耐力評価の現状

社会基盤の成熟化につれて，維持管理手法の構築が急務となっている[1)]．鋼構造物の二大劣化要因である腐食と疲労現象は，併せて自動車交通量の増大や大型化などの構造物をとりまく社会環境の変化とともに，問題が顕著化し[2)]，このような土木構造物の維持管理手法・補修技術方法の研究[3)]がすすめられてきた．

土木構造物の効率よい維持管理のためには，精度のよい残存耐荷力の評価・劣化予測が重要である．鋼橋においては，一般的に塗装の塗り替えに際して定期的に大規模な点検調査が実施されていることもあり，これまでに腐食場所，腐食の進行程度など基礎的な資料は，精力的な永年の調査[4),5)]によって蓄積されている．あるいは曝露試験体によって腐食性状を把握しようとする試み[6),7)]も行なわれてきた．

鋼部材が腐食減肉すると，部材としての強度や剛性が低下し構造物の保有性能が低下する．腐食した構造物が健全であるかを判断するためには，その保有性能が要求性能を上回っているかどうかを評価する必要がある．そこで，腐食した構造物あるいは部材の保有性能を精度よく推定するために，現在数々の研究が行なわれている．

例えば数値解析分野では，板材[8),9),10),11)]・柱部材あるいは梁部材[12),13)]にさまざまな形態の腐食が生じた場合，種々の荷重条件・境界条件について，残存耐荷力の検討が行われている．これらの詳細については，4.2節以降でそれぞれ取扱う．

モデルの構築にあたっては，実際の腐食形状を基に特性値を導入する方法や[12)]，数理モデルによって腐食面を生成し強度評価を行う方法[11),19)]がある．腐食部材を有限要素モデル化するためのいくつかの手法や留意点については，4.4節で詳細に取り上げる．

一方で，腐食した部材を用いて実験的に耐荷力を把握しようとする研究も近年行なわれている．例えば腐食の生じたプレートガーダー橋やI型断面部材に着目し，引張強度[21)]，曲げ強度[15),18)]，圧縮強度[19),20)]や支点部耐荷力[16)]を実験的に把握している．また，腐食した鋼管の圧縮耐力[17)]や，模擬腐食を生じさせた鋼桁[14)]の剪断耐荷力についても実験的な検討がなされており，いくつかの残存耐荷力評価式が提案されている．これらの詳細についても4.2節以降で取扱う．

このように，これまでの研究は，部材レベルでの腐食による残存耐荷力の把握が中心的であるが，まだ十分な量であるとは言い難い状況である．構造物が有する残存耐荷力評価を精度よく行なうためには，まず部材レベルでの評価精度の向上が望まれる．

また，構造物の保有性能を総合的に評価するためには，所要の要求性能に対して，それぞれの部材がどの程度構造物全体の強度に寄与するのかについても留意する必要がある．構造物を適切な費用で維持管理を行なうためには，保有性能の低下や需要の変化に応じて戦略的に部材の補修や補強を計画したり，

あるいは構造物を撤去し更新を検討しなければならない．もちろん新設当初における設計段階においても，維持管理を念頭においた設計や，信頼性確保のための設計手法の導入が今後望まれている．これらの設計概念・思想についての研究を踏まえ，実務への適用などの将来課題については4.5節で述べる．

【参考文献】

1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：既設橋の架替実態に関する調査，土木技術資料，No.40-4，pp.38-43，1998.

2) 名取暢：鋼橋の腐食事例とその対策，第1回鋼構造の維持管理に関するシンポジウム資料集， 1997.

3) 社団法人日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），JSSC，No.51，2002.

4) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，99.299-311，2001.1.

5) 松本勝，白石成人，三宅広昭：鋼橋の腐食劣化の評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1097-1102，1992.

6) 中村秀治，藤井堅，石川智巳，海田辰将：経年水力鋼構造物の腐食面形状の統計的性質について，構造工学論文集，Vol.49A，pp.687-696，2003.3.

7) 山本正弘，広沢規行，吉田耕太郎，加藤忠一，羽田隆司：海洋で暴露した鋼材の腐食形態の解析，材料と環境， No.41，pp.803-808，1992

8) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼鈑の表面形状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998.

9) 中沢正利：腐食鋼板の圧縮耐荷力特性，土木学会年次学術講演会講演概要集，第55回，CS-86，2000.

10) 竹内正一，西村佳大，西村宣男：腐食損傷を有する鋼板の極限強度特性に関する研究，鋼構造シンポジウム，2005.

11) 海田辰将，藤井堅，中村秀治：腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法．土木学会論文集，No.766/I-68，pp.59-71，2004.7.

12) 野上邦栄，山沢哲也，小栗友紀，加藤美幸：腐食減厚に伴う合成I桁及びI断面柱の残存耐力に関する一考察，構造工学論文集，Vol.47A，pp.93-102，2001.

13) 森猛，渡辺一，正井資之：腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐荷力，構造工学論文集，Vol.49A，pp.675-686，2003.

14) Vo Thanh Hung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1099-1105，2002.3

15) Vo Thanh Hung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-151，2002.7

16) 海田辰将，藤井堅，宮下雅史，上野谷実，中村秀治：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.51A，pp.139-148，2005.3.

17) 藤井堅，近藤恒樹，田村功，渡邊英一，伊藤義人，杉浦征邦，野上邦栄，永田和寿：海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力，構造工学論文集 Vo.52A，pp.721-730，2006.3.

18) 山沢哲也，野上邦栄，森猛，塚田祥久：腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐荷力実験，構造工学論文集 Vo.52A，pp.711-720，2006.3.

19) 海田辰将，藤井堅，中村秀治：腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法，土木学会論文集 No.766／

I-68, pp. 59-71, 2004. 7.
20) 中野克俊, 野上邦栄, 山沢哲也, 射越潤一, 笹嶋純司, 三浦敬久：腐食した鋼部材の圧縮耐荷力実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第61回, 2006. 9.
21) 橘敦志, 森猛, 野上邦栄, 山沢哲也：腐食鋼板の降伏耐力評価法の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第59回, I-110, 2004. 9.

4.2　部材の耐荷力評価

本章では，構造物を構成する部材単位での耐力評価法とそのための評価指標を紹介する。なお，評価対象は引張部材，柱・梁柱，はり，板，シェル（円形鋼管）である。

4.2.1　部材の耐荷力評価のための指標

腐食した部材単位での耐荷力を評価するための指標について、各種の論文等で検討公表されている代表例を表4.2.1.1に纏める。

腐食板材に引張荷重を与えた各種の実験結果では，破断位置は局所的な凹部というよりも引張荷重の直角方向の平均断面積が最小の位置が破断要因となり，その平均板厚を有効板厚として扱う報告が多数されており，残存引張強度，降伏荷重を推定するために，主にその有効板厚を評価指標とした実験式が実用的である。

また，圧縮（座屈）耐力は，腐食による表面性状の変化（凹凸の発生，中立軸の移動）に強く影響され，これまでに様々な解析や実験検証による評価法の提案がなされている。例えば，腐食板厚の標準偏差を用いて代表板厚を算出して幅厚比パラメータを求める方法や，断面欠損率から平滑材の座屈耐荷力曲線を補正する方法などがある。

疲労強度では，腐食凹凸による変動係数から推定する理論的な応力集中係数を用いて，従来のS-Nカーブを補正する方法が提案されている。

このように腐食部材に対する残存耐荷力の評価方法は，腐食板材の有効板厚または表面性状（標準偏差，変動係数）を用いて定量的な評価指標として扱い，従来の強度評価式をベースとして残存耐力を推定する。

【参考文献】

1) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白石成人：腐食鋼材の有効板厚評価法の提案，橋梁と基礎，89-12.
2) 村中昭典，階田理，藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998.
3) 藤井堅：腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法，第一回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集，1999.
4) 中沢正利：腐食を受けた鋼板の圧縮耐荷力特性，土木学会年次学術講演概要集，第55回，CS-86，2000.
5) 野上邦栄，山沢哲也，小栗友紀，加藤美幸：腐食減厚に伴う曲げ及び圧縮部材の残存耐力評価に関する一考察，構造工学論文集，Vol.47A，2001.
6) 海田辰将，藤井堅，中村秀治：腐食した圧縮フランジの圧縮強度評価，土木学会論文集，No.766，Ⅰ-68，pp.58-71，2004.
7) 原考志：腐食による鋼部材強度の経年劣化，広島大学修士論文
8) 海田辰将，藤井堅，原考志，中村秀治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，2004.
9) 近藤恒樹，田村功，藤井堅，渡邊英一，伊藤義人，杉浦邦征：腐食円形鋼管の残存圧縮耐力，第57回土木学会中国大会発表概要集.

表4.2.1.1 耐荷力評価のための指標

評価耐荷力	評価式と評価指標	文献	取出した部材	備考
引張強度	$P_u = t_e \cdot b \cdot \sigma_b$ 有効板厚： $t_e' = t_{lm} - \alpha \cdot S$	(1)	水力発電所ゲート	実験（最小板厚，もしくは局所的な最小平均板厚を含む断面近傍で破断）
降伏荷重	$P_y = A_e \cdot \sigma_y$ ， $A_e = t_e \cdot B$ 有効板厚： $t_e = t_{avg} - 0.7 \cdot \sigma$	(2)	フェリー渡橋（デッキ），ダム洪水吐ゲート（スキンプレート，横桁腹板）	実験（ほぼ最大腐食位置で破断，平均断面積は最小の位置）
引張伸び	（塑性変形能力） $\delta / \delta_y = 1/(0.03 + 0.7 \cdot V)$	(2)	フェリー渡橋（デッキ），ダム洪水吐ゲート（スキンプレート，横桁腹板）	実験
曲げ耐力	（全腐食モデルの曲げ耐力比） $M_{\max} / M_{\max 0} = 1 - 0.468 \cdot \alpha$ （局部腐食モデルの曲げ耐力比） $M_{\max} / M_{\max 0} = 1 - 0.468 \cdot \alpha_c$	(5)	合成Ｉ桁	解析（腐食形態を5モデルに分類）
疲労強度	腐食鋼板S-N関係： $K_t \times S_{mr} - N_c$ 理論弾性応力集中係数 ： $K_t = 2.919 + 0.379 \cdot \ln(V)$	(2)	フェリー渡橋 （デッキプレート）	実験（き裂は板厚変動係数の高い領域で発生，優先的に進展）
圧縮強度	（座屈耐荷力曲線） $\sigma_u / \sigma_y = (0.628/\lambda)^{1.04} - 0.083$ 有効板厚： $t_e = t_{avg} - \sigma$	(3)	可動橋横桁 （ウェブ，下フランジ，鋼床版縦リブ）	実験（著しい局部腐食（$\sigma \geqq 0.7$）→局部座屈，一様腐食（$\sigma \leqq 0.7$）→全体座屈）
	（幅厚比パラメータ） $R = \frac{b}{t_R} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1-\nu^2)}{\pi^2 \cdot k}}$ 代表板厚： $t_R = t_{avg} + 2 \cdot \sigma_t$	(6)	板（圧縮フランジ想定）	解析（空間自己相関モデルにより腐食模擬）
	代表板厚： $t_R = t_{avg} + \sigma_t$	(7)	板（圧縮フランジ想定）	解析（経時変化モデルにより腐食模擬）
	等価板厚： $t_{eq} = t_{avg}$	(4)	板（SS400想定）	解析（二重sin級数波，正規分布乱数により腐食模擬）
圧縮耐力	（全面均一腐食モデル） $P_{cr} / P_y = 0.966 - 0.805 \cdot \alpha_{\min}$ $P_{cr} / P_{cr0} = 1 - 0.833 \cdot \alpha_{\min}$ $\alpha_{\min}$ ：最小断面欠損率 （耐荷力曲線） $P_{cr0} / P_y = (0.186 \cdot \lambda^3 - 0.657 \cdot \lambda^2 + 0.179 \cdot \lambda + 1)$	(5)	柱	解析（腐食形態を5モデルに分類）
軸圧縮強度	（座屈強度曲線　径厚比パラメータ） $R = 1.65 \times (2R/t_R) \cdot (\sigma_y / E)$ $t_R = t_{ave}^* - 0.6 \cdot s^*$ （t_{ave}^* ：最小断面平均板厚） $t_R = t_{ave}^{**} - 0.8 \cdot s^{**}$ （t_{ave}^{**} ：座屈波形幅$3\sqrt{Rt}$ 区間平均板厚）	(9)	鋼管	実験，解析
せん断耐力	（せん断座屈強度曲線 幅厚比パラメータ） $R = \frac{h}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1-\nu^2)}{\pi^2 \cdot k}}$ 代表板厚： $t = t_{avg}$	(8)	プレートガーダー橋	実験，解析

4.2.2 引張部材

(1) 概要

腐食損傷を受けた鋼部材が引張力を受ける場合，断面の塑性化に起因する引張破壊，あるいは繰り返し作用による疲労破壊が問題となる．

耐荷性能の観点からは，応力集中によって局所的に早期に降伏するが，他の弾性領域が荷重を分担し抵抗することから，破断や全断面降伏などの現象に対しては残存断面積の影響が大きい．一方，疲労破壊の観点からは，断面の平均応力度よりも腐食面の凹凸による応力集中の影響が大きくなるため，腐食面の曲率に注意する必要がある．

一般に腐食損傷を受けた場合，板厚の減少に比べて板幅の減少は極めて小さく無視できる．このため，残存断面積を評価する場合，残存板厚に着目して検討することが一般的である．既往の研究においても，腐食損傷を受けた鋼材の材料特性値を評価するための板厚についていくつか提案されている．

- 平均板厚・・・・対象部材全体の板厚測定値を単純に算術平均した値を板厚とする．
- 最小板厚・・・・対象部材全体の板厚測定値の最小値を板厚とする．
- 最小平均板厚・・対象部材の幅方向測線ごとの平均板厚の最小値を板厚とする．

本節では，腐食した鋼板から引張試験を行った既往の研究成果[1),2)]を2例，引用して紹介する．

(2) 腐食鋼板の有効板厚評価法に関する検討[1)]

a) 対象部材と試験片

腐食により取り替えられた水力発電所のゲート残材（スキンプレート，主横桁）から腐食鋼材を取り出し，引張試験片を作成した．試験片は表 4.2.2.1 に示すように腐食鋼材 33 片，両面平滑材 11 片の合計 44 片である．試験片の大きさは JIS 1 号 A 試験片で幅約 40㎜，平均厚さ 7～17.5㎜ である．ここに，試験片厚さは超音波板厚計により，幅方向に 7 測線（横測線），長手方向に 45 測線（縦測線）の合計 7×45=315 点を計測した．計測に当たっては，塗膜除去剤（リムーバ）で試験片表面の塗膜を除去して実施した．

表 4.2.2.1 試験片の数

ゲート	経過年数	腐食鋼材	両面平滑材
A	約 30 年	9	3
B	約 33 年	12	4
C	約 39 年	9	3
D	約 43 年	3	1
計		33	11

b) 引張試験結果と有効板厚

引張試験結果から，腐食鋼材の有効板厚 t_e を次式で定義する．

$$t_e = \frac{\text{破断荷重}}{\text{試験片幅} \times \text{両面平滑材の引張強さ}} \qquad (4.2.2.1)$$

ここに，両面平滑材とは両面を平滑に仕上げた試験片であり，腐食鋼材と同じ箇所から採取したものである．表 4.2.2.2 に試験片の板厚測定結果の一部を示す．表中，式(4.2.2.1)で定義した有効板厚の値も記している．縦測線の最小平均板厚とは，長手方向の 45 測線毎に幅方向の計測点 7 点から平均値を求め，求め

た 45 の平均値の中の最小値のことである．表 4.2.2.2 より，腐食鋼材の有効板厚は平均板厚よりも若干小さな値となる試験片の多いことがわかる．

表 4.2.2.2　試験片板厚計測結果（単位：mm）

		平均板厚	標準偏差	最大板厚	最小板厚	縦測線の最小平均板厚	有効板厚
A ゲート	A-Ⅰ-1	8.63	0.28	9.1	7.0	8.27	8.4
	A-Ⅰ-2	7.37	0.20	7.7	6.6	6.96	7.3
	A-Ⅱ-1	8.40	0.41	8.8	7.0	7.70	8.4
	A-Ⅱ-2	9.04	0.36	9.9	7.5	8.64	8.8
	A-Ⅱ-3	7.07	0.15	7.3	6.5	6.91	6.9
	A-Ⅲ-1	10.58	0.58	11.5	8.8	10.00	10.1
	A-Ⅲ-2	10.19	0.67	11.1	9.3	9.37	10.1
	A-Ⅲ-3	9.37	0.42	10.4	8.0	8.71	9.4
	A-Ⅲ-4	8.79	0.30	9.3	7.9	8.39	8.6
B ゲート	B-Ⅰ-1	11.92	0.71	13.6	10.2	11.16	11.4
	B-Ⅰ-2	11.33	0.71	13.2	9.5	10.47	11.1
	B-Ⅱ-1	11.98	0.57	13.6	10.6	11.49	12.0
	B-Ⅱ-3	11.92	0.60	14.5	10.6	11.09	11.9
	B-Ⅲ-1	17.29	0.46	18.2	15.5	16.84	16.8
	B-Ⅲ-2	17.48	0.34	18.2	16.4	17.04	17.4
	B-Ⅲ-3	17.39	0.43	18.1	16.0	16.94	17.4
	B-Ⅲ-4	17.22	0.52	18.2	15.4	16.17	17.0
	B-Ⅲ-5	17.26	0.50	18.1	15.8	16.47	17.2
	B-Ⅲ-6	17.33	0.47	18.1	15.5	16.69	16.9
	B-Ⅳ-1	16.55	0.70	18.0	14.8	15.79	16.4
	B-Ⅳ-2	16.76	0.55	18.2	15.4	16.13	16.6

c)　有効板厚推定法

実構造物では，有効板厚を引張試験から求めることは現実的ではなく，板厚測定結果から有効板厚を推定することになる．そのため，試験片の有効板厚と測定板厚の関係を検討した．図 4.2.2.1～図 4.2.2.3 に，有効板厚と，平均板厚，最小板厚および局所的な最小平均板厚の関係を示す．

ここに，平均板厚：試験片の全測点 315 点の板厚計測結果の平均値，
最小板厚：試験片の全測点 315 点の板厚計測結果の最小値，
局所的な最小平均板厚：前述の縦測線の最小平均板厚．

図 4.2.2.1～図 4.2.2.3 より，平均板厚，最小板厚および局所的な最小平均板厚ともに，有効板厚とほぼ直線的な関係にあり，相関係数も 0.986～0.996 と大きな値をとり相関性の強いことがわかる．ここで，試験片がどの箇所で破断したかを示すと，

- 最小板厚を含む断面近傍で破断した試験片……11 片
- 局所的な最小平均板厚を含む断面近傍で破断した試験片……19 片

である．ただし，最小板厚を含む断面近傍で破断した試験片はすべて最小板厚箇所と局所的な最小平均板厚箇所が一致していた．これらは，断面積が最小となる箇所では発生応力が最大となるため，あるいは，局部的に腐食の激しい箇所では応力集中が発生するために破断することを示していると考えられる．したがって，有効板厚を規定する因子としては，物理的には平均的な腐食状態を表す平均板厚よりも，最小平均板厚や局

所的な最小平均板厚の方が妥当であるといえる．ここでは，局所的な最小平均板厚を用いて有効板厚を評価する手法を考えることにする．

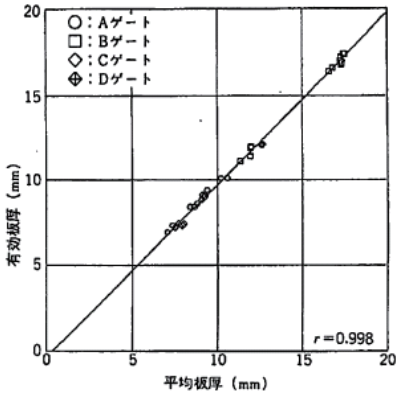


図 4.2.2.1　平均板厚と有効板厚

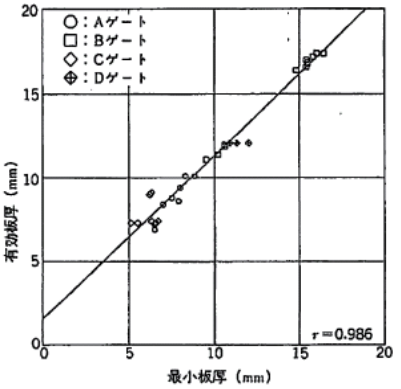


図 4.2.2.2　最小板厚と有効板厚

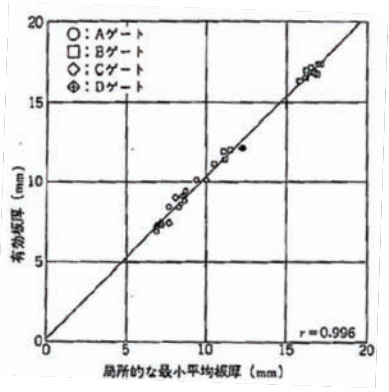


図 4.2.2.3　最小平均板厚と有効板厚

実構造物を考慮すると，多数の計測点において板厚計測を行うことは困難と考えられる．そこで，計測点数の大小により，局所的な最小平均板厚から有効板厚を推定する際の誤差について考察する．表 4.2.2.3 のような割合でデータの抜き取りを行った．

表 4.2.2.3　データの抜き取り法

抜取り率　K(%)	1 試験片からの抜取りパターン	1 パターンのデータ数
100	1	315
49	2	154
33	3	105
24	4	77
20	5	63
16	6	49
13	7	42
11	9	35
9	11	28
7	15	21
4	22	14

データの抜取り率 K=49%と K=4%の際の相関関係を，図 4.2.2.4，図 4.2.2.5 に示す．図中，点線で示したように K が小さくなるほどデータのばらつき幅は大きくなっているものの，K=4%の場合でも相関係数は 0.994～0.997 とかなり強い相関性が認められる．

ここで，板厚測定値から推定される有効板厚を $t_e{}'$ として，有効板厚 t_e との誤差率 E を次式で定義する．

$$E=\sqrt{\frac{1}{N}\sum^{N}\frac{(t_e-t_e{}')^2}{t_e}}\times 100 \quad (\%) \tag{4.2.2.2}$$

ここに，N:データ数.

局所的な最小平均板厚 t_{lm} から，$t_e{}'=t_{lm}$ で有効板厚を推定する場合，データ抜取り率と誤差率の関係は

図 4.2.2.6 に示すように抜取り率にほとんど関係なく 3～4%程度となることがわかる．つぎに，推定有効板厚t_e'が有効板厚t_eよりも大きく危険側に推定される割合を危険率 D と定義する．危険率 D と抜取り率 K の関係は図 4.2.2.7 に示すとおり，Kが大きくなると Dは 20%程度であるが，Kが小さくなると 50%以上となってしまうことがわかる．以上から，局所的な最小平均板厚をそのまま有効板厚とした場合，抜取り率 Kに関係なく誤差率 E は 3～4%程度であり推定精度は高いといえるが，危険率 D は 20～50%程度となり抜取り率 K によっては工学上問題があると思われる．

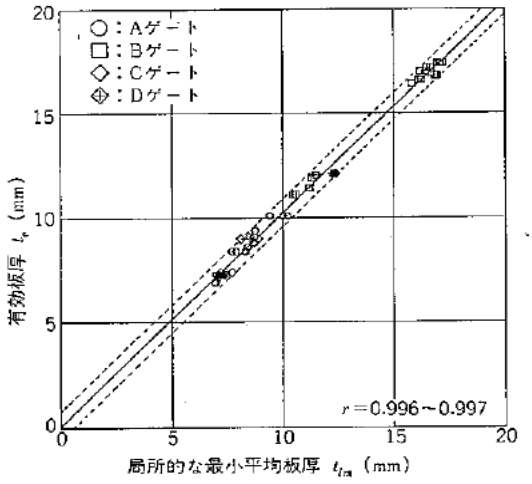


図 4.2.2.4　K=49%の場合

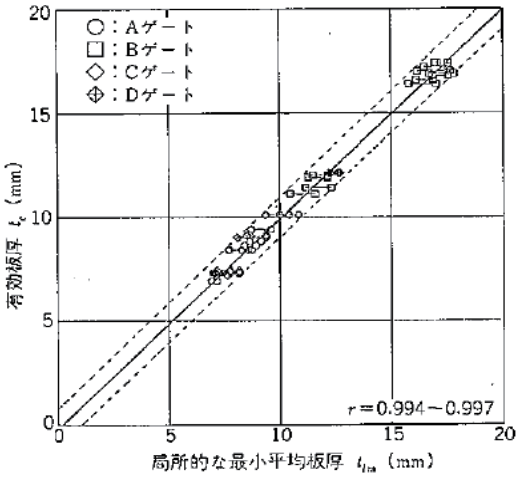


図 4.2.2.5　K=4%の場合

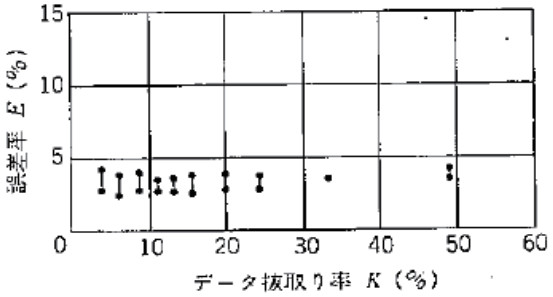


図 4.2.2.6　Kと Eの関係

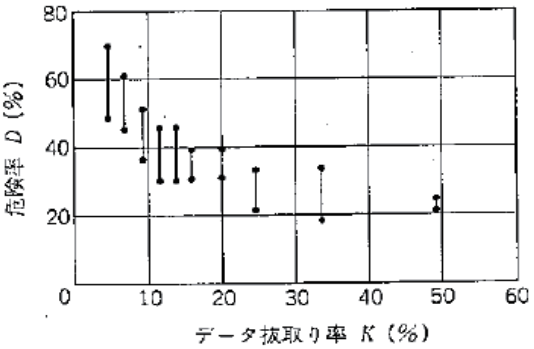


図 4.2.2.7　Kと Dの関係

したがって，危険率 Dを小さくするため次式で有効板厚を推定するものとする．

$$t_e' = t_{lm} - \alpha \cdot S \qquad (4.2.2.3)$$

ここに，S:測定板厚の標準偏差，α：係数.

抜取り率 K, 危険率 D, 誤差率 E, および係数 α の間には表 4.2.2.4 の関係がある．表 4.2.2.4 より，係数 α が大きくなると推定有効板厚が小さく評価されるため誤差率 Eは大きくなり，逆に危険率 Dは小さくなる傾向がわかる．実構造物の適用にあたっては，危険率 Dおよび誤差率 Eともに小さいことが理想ではあるが，重要度等を勘案し許容されうる危険率 D と誤差率 E を判断し，抜取り率 K と係数 α を決定し式(4.2.2.3)で有効板厚を推定することが現実的と思われる．また，有効板厚を式(4.2.2.3)で評価した後，式

(4.2.2.4)で引張強さP_uを求めることとなる.

$$P_u = t_e^{'} \cdot b \cdot \sigma_b \qquad (4.2.2.4)$$

ここに, P_u：引張強度, $t_e^{'}$：推定有効板厚, b：試験片板幅, σ_b：両面平滑材の引張強さ.

表4.2.2.4 K, E, Dとαの関係

K(%)	D(%)	α	E(%)	K(%)	D(%)	α	E(%)
5	10	2.8	12.4	15	10	2.7	15.0
	20	2.2	12.7		20	1.5	9.6
	30	1.4	9.2		30	0.8	6.8
	40	0.9	7.2		40	0.4	5.2
	50	0.5	5.5		50	0.0	4.4
10	10	2.1	12.3	20	10	1.7	10.6
	20	1.1	8.0		20	1.4	9.2
	30	0.5	5.5		30	0.3	4.8
	40	0.1	4.4		40	0.0	4.4
	50	0.0	4.4		50	0.0	4.4

(3) 腐食鋼板の残存耐荷力[2)]

a) 対象部材と試験片

15年間供用後撤去されたフェリー渡橋, および40年間供用後撤去されたダム洪水吐ゲート（ラジアルゲート）から腐食鋼板を採取した. 採取した鋼板の塗装を塗装剥離剤により除去した. さらに, 腐食層の厚い鋼板は, 10%塩酸水溶液に数日間浸漬後, ワイヤーブラシでさびを除去した. ここで用いた腐食鋼板はすべて片面腐食の状態である.

腐食鋼板からJIS1号引張試験片を作成し, フェリー渡橋から採取した試験片では4㎜間隔で引いた9本の横測線と51本の縦測線の交点459点の板厚を, 洪水吐ゲートより採取した試験片では2㎜間隔で引いた19本の横測線と101本の縦測線の交点1919点の板厚をマイクロメータで測定した. 試験片は合計33片である.

b) 引張試験結果と有効板厚

図4.2.2.8に有効板厚と最小板厚の関係を, 図4.2.2.9に有効板厚と平均板厚の関係を示す. これらの図から, 有効板厚は, 最小板厚よりも平均板厚と相関性が強いといえる.

c) 静的強度および伸び特性

前節より, 平均板厚を用いて有効板厚を評価する方が適当と考えられるため, 式(4.2.2.6)で有効板厚を評価し, 式(4.2.2.5)で降伏強度を求めるとよいと考えられる. ここで, 有効板厚を評価する際に0.7σを減じるのは, 図4.2.2.9の●で示したとおり, この程度の板厚を考えれば安全側の評価になると判断できるためである.

$$P_y = t_e \cdot b \cdot \sigma_y \qquad (4.2.2.5)$$

$$t_e = t_{avg} - 0.7\sigma \qquad (4.2.2.6)$$

ここに, P_y：降伏強度, t_e：有効板厚, b：試験片板幅, σ_y：両面平滑材の降伏点,
t_{avg}：荷重軸直角方向の平均板厚, S：荷重軸直角方向の板厚標準偏差.

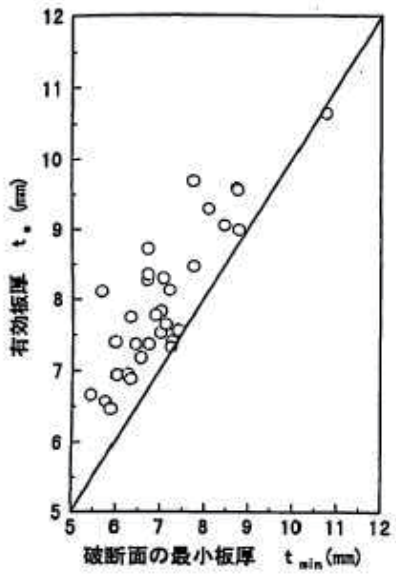


図 4.2.2.8　最小板厚と有効板厚

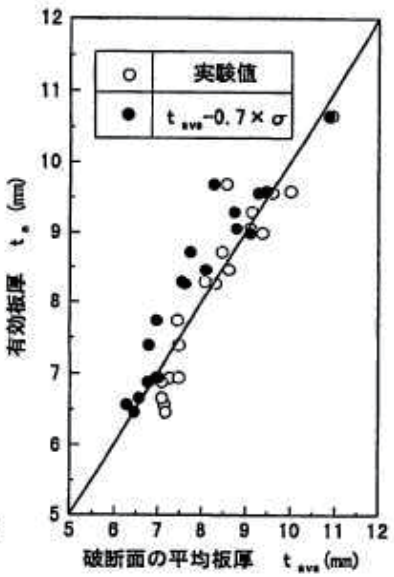


図 4.2.2.9　平均板厚と有効板厚

つぎに，図 4.2.2.10 に伸びと板厚変動係数の関係を示す．ただし，ここでの伸びは平均的な伸びであり，試験片全体に一様な伸びを示さないことに注意が必要である．また，板厚変動係数は標点間距離内の全測点に対する値を用いている．図 4.2.2.10 より，板厚変動係数が約 5%以上になると JIS 規格（伸び≧18%）を大きく下回る．すなわち，鋼構造物の終局限界状態を考えるうえで腐食の進行が無視できないことを示しているといえる．そこで，図 4.2.2.11 に最大荷重時の標点間の伸び δ と両面平滑剤の降伏荷重時の標点間の伸び δ_y との比を塑性変形能力と定義し，板厚変動係数との関係を図 4.2.2.11 に示す．この図から，塑性変形能力と変動係数の関係は，式(4.2.2.7)で近似しうると考えられる．

$$\delta/\delta_y = 1/(0.03+0.7V) \qquad (4.2.2.7)$$

ここに，δ ：最大荷重時での標点間の伸び，δ_y ：両面平滑材の降伏荷重時の標点間の伸び，

V ：板厚変動係数.

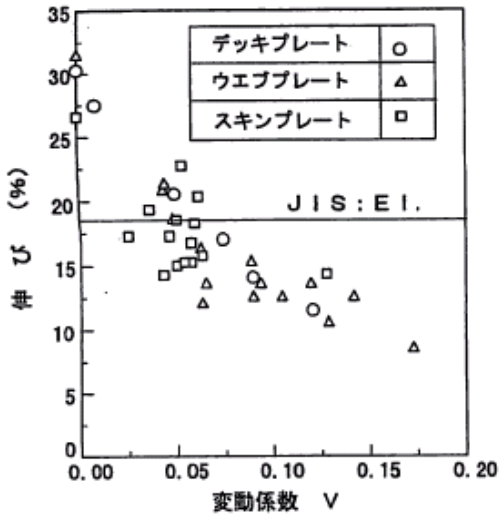


図 4.2.2.10　伸びと変動係数

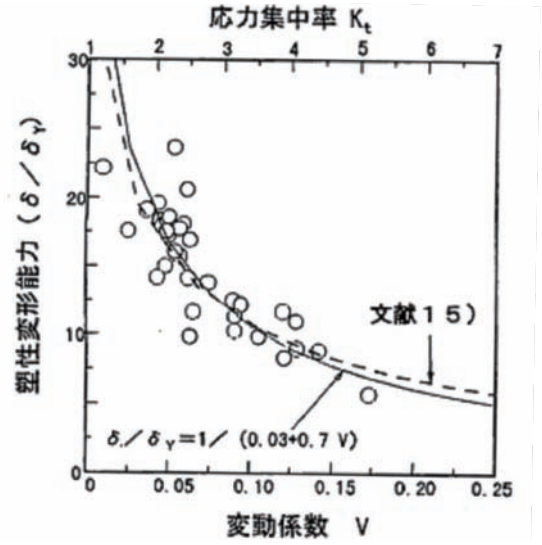


図 4.2.2.11　塑性変形能力と変動係数

d) 疲労試験

腐食した試験片の疲労試験から得られた結果として，図 4.2.2.12 に，板厚変動係数と理論弾性応力集中係数（形状係数）K_t の関係を示す．この図から，理論弾性応力集中係数 K_t は式(4.2.2.8)で評価できるといえる．

$$K_t = 2.919 + 0.379 \cdot \ln V \qquad (4.2.2.8)$$

ここに，K_t ：理論弾性応力集中係数，V ：板厚変動係数，N_c ：繰り返し回数．

つぎに，荷重の繰り返し回数 N_c と，図 4.2.2.12 に示した $K_t - V$ 関係で補正した応力範囲の関係を図 4.2.2.13 に示す．この図より，疲労寿命は鋼板の板厚変動係数，すなわち，腐食鋼板の表面形状の凸凹状態に依存していることがわかる．図 4.2.2.13 を用いて腐食鋼板の疲労寿命を推定することが可能と考えられる．

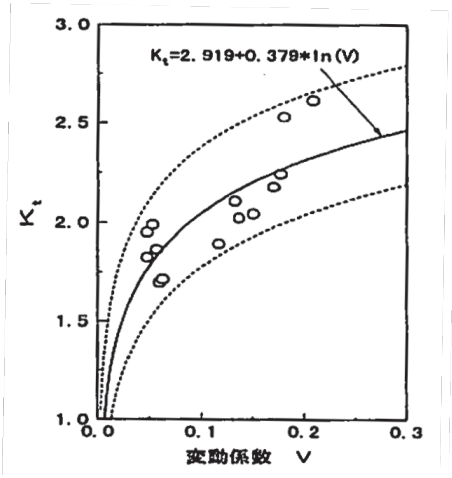


図 4.2.2.12 V と K_t の関係

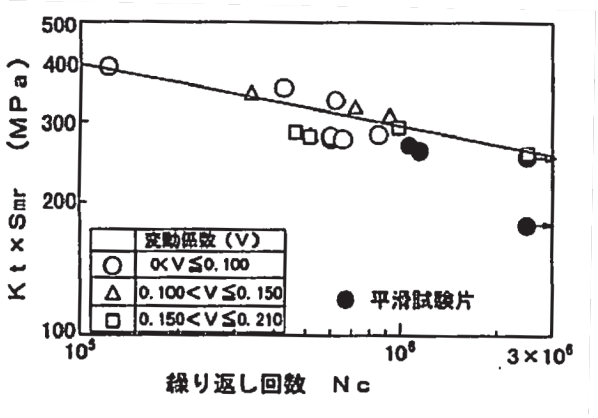


図 4.2.2.13 K_t*Smr と N_c の関係

(4) 現状の問題点と課題

(2)，(3)では，文献1)および文献2)を引用して，引張を受ける腐食鋼板の降伏強度，引張強度，塑性変形能力，および疲労寿命等の評価手法と，その際に用いるべき板厚との関係を概観した．以下に現状での問題点と今後の課題をまとめる．

- 現状，試験片レベルでの検討に留まっており，実部材，実構造物へ適用可能性に注意する必要がある．
- 引張強度等の検討は，ある部材の中で純引張状態にある部分に相当すると考えられる．実部材や実構造物では，組み合わせ応力状態と考えられるため，組み合わせ応力状態での適用方法を検討する必要がある．
- 腐食計測ピッチの影響等を受けると考えられるため，本節で示した評価式や係数等を実構造物の残存耐荷力評価への適用可能性を検討する必要がある．また，残存耐荷力評価を行う際の，最適な，もしくは適切な計測ピッチの検討が必要である．

【参考文献】

1) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白石成人：腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案，橋梁と基礎，Vol.23, No.12, pp.19-25, 1989.

2) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998.
3) 五十嵐昇，上生川真二，上林正和：水門扉の腐食寿命診断システム CALS-G の研究開発，水門鉄管，No.218
4) A. Kariya, K. Tagaya, T. Kaita and K. Fujii : Mechanical properties of corroded steel plate under tensile force, Collabpration and Harmonization in Creative Systems, Talor % Francis, pp.105-110, 2005.

4.2.3　柱部材

腐食した圧縮部材の耐荷性能は，座屈強度の面からの評価が必要である[1)~3)]．この場合，断面減少に伴う耐荷性能の低下と幾何形状(細長比，幅厚比)の変化に伴う座屈耐荷力の低下の双方から検討する必要がある[4)]．ここでは，最近実験的および解析的に研究された腐食した鋼 H 型部材および鋼管部材の圧縮残存耐荷性能について述べる．

(1) 鋼 H 型部材[5)]

対象とする腐食した柱部材は,44 年経過した連続トラス橋から撤去した上横構･横支材である．これらの供試体の断面形状は，図 4.2.3.1 に示す通り，フランジ・腹板の板厚はともに 9.2mm，フランジ幅 180mm，外法高さ 200mm の H 型溶接断面であり，それぞれ 2400mm の長さ(細長比 57.6)を有する部材である．なお，健全部材の N 部材の板厚は 9mm である．また，腐食部材の材質は SM400 相当(σ_y=274N/mm^2)である．

供試体は，塗装上から目視で腐食の程度によって，塗装上からでもフランジに波状の著しい腐食がみられる「ランク A」2 体(A5152u, A55sd)および，ほとんど腐食が見られない「ランク C」2 体(C1719u、C5655d)の供試体に分類した．

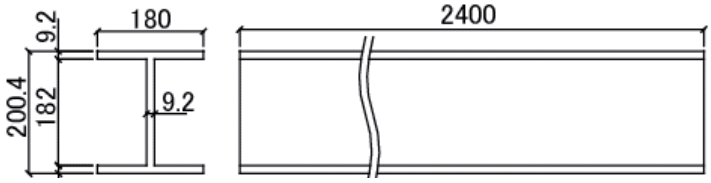


図 4.2.3.1　供試体寸法

いま､A55sd の中央 800mm の上フランジの表裏面の腐食形状およびレーザー変位計により 1mm 間隔で自動計測して算出した腐食形状および残存板厚分布を各々写真 4.2.3.1 および図 4.2.3.2 に示す．



写真 4.2.3.1　A55sd の上フランジ中央 800㎜ の腐食形状

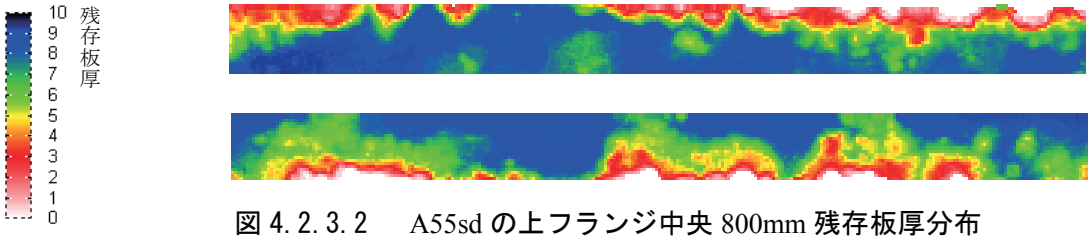


図 4.2.3.2　　A55sd の上フランジ中央 800mm 残存板厚分布

4 供試体に対する断面の平均残存板厚 $\bar{t}_a$ は式 (4.2.3.1) で与えられる．この式は，上下フランジ，ウエブの 3 領域についてそれぞれ平均腐食量 $t_{a(i)}$ を算出し，各領域の健全部材断面積 $A_{(i)}$ により重

み付けしている．

$$\bar{t}_a = \frac{\sum A_{(i)}\, t_{a(i)}}{\sum A_{(i)}}$$

i ：上フランジ，ウエブ，下フランジ（=1，2，3） (4.2.3.1)

また，上下フランジ，腹板の各平均残存板厚 $t_{a(i)}$ と標準偏差 $s_{(i)}$ の関係から与えられる各有効板厚 $t_{e(i)}$ および断面全体の平均残存板厚 $\bar{t}_e$ は，式(4.2.3.2)より算出される．式中の補正係数 β には 2.0 を用いた．表 4.2.3.1 に有効板厚 $t_{e(i)}$、平均残存板厚 $\bar{t}_e$ および最小断面積を示す．さらに，部材の最小断面位置の断面積 A_{min} による最大断面欠損率 R_A は，式(4.2.3.3)で与えられる。

$$t_e = t_a - \beta s \qquad (4.2.3.2)$$

$$\bar{t}_e = \bar{t}_a - \beta \bar{s}$$

$$R_A = \frac{A - A_{min}}{A} \qquad (4.2.3.3)$$

表 4.2.3.1　有効板厚と最小断面積

供試体	上フランジ	下フランジ	腹板	全体	最小断面積
	t_e （β=2） mm			$\bar{t}_e$ mm	A_{min} mm^2
A5152u	2.581	0.811	7.966	2.510	3186
A55sd	1.758	1.878	6.753	2.996	3291
C1718u	8.532	7.785	7.471	7.831	4398
C5655d	7.498	7.482	8.513	7.254	4268
N	9.000	9.000	9.000	9.000	4878

実験は，図 4.2.3.3 および写真 4.2.3.2 に示すような両端単純支持の圧縮実験であり，変位制御にて漸増載荷を行った．

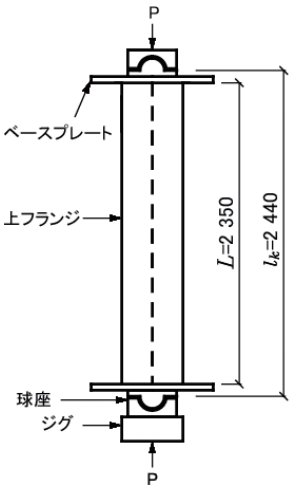


図 4.2.3.3　単純支持された圧縮部材

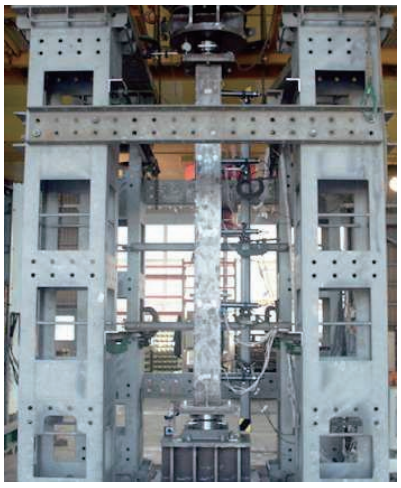


写真 4.2.3.2　部材の設置状況

圧縮残存耐荷力実験の荷重－鉛直変位関係および荷重－面外変位関係をまとめたのが図 4.2.3.4 および図 4.2.3.5 である．また，A5152u および C5655d 部材の崩壊モードを示したのが図 4.2.3.6，図 4.2.3.7 である．最後に，実験により得られた残存耐荷力，最大面外変位および終局状態をまとめたのが表 4.2.3.2 である．

腐食減厚した柱部材の腐食計測および残存耐荷力実験結果に基づき，柱部材の残存耐荷力は，式(4.2.3.3)の最大断面欠損率を用いて表示すると，図4.2.3.8のようになる．残存耐荷力と欠損

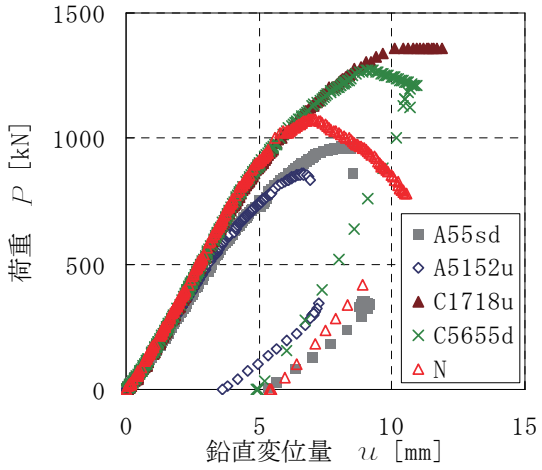


図 4.2.3.4　荷重－鉛直変位関係

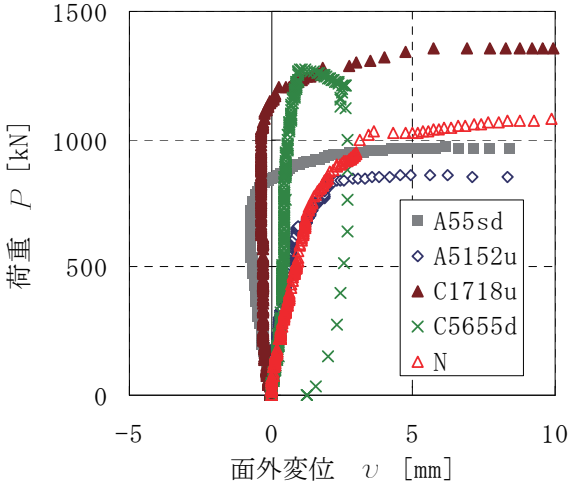


図 4.2.3.5　荷重－面外変位関係

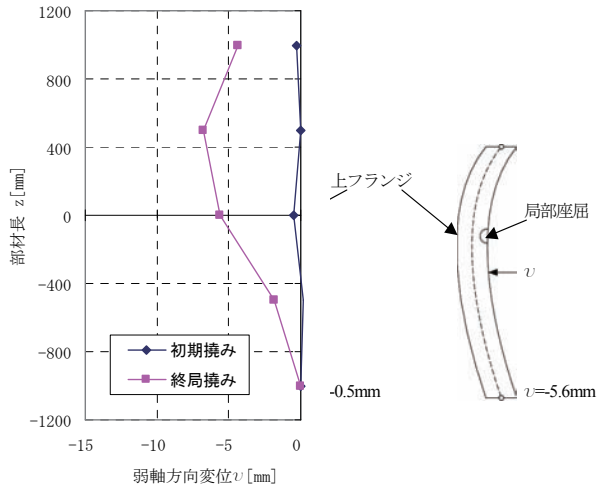


図 4.2.3.6 変形形状（A5152u）

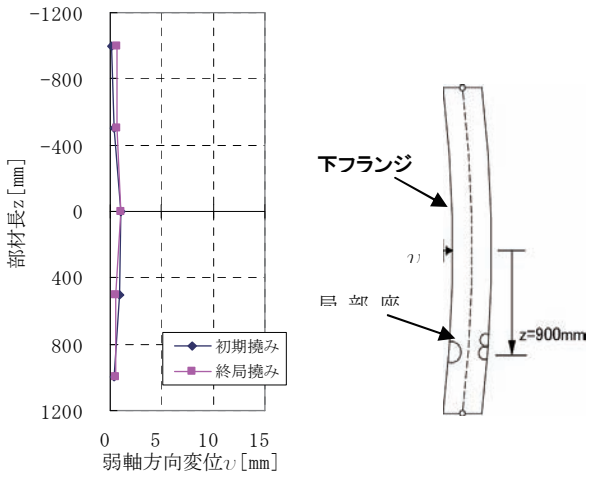


図 4.2.3.7 変形形状（C5655d）

表 4.2.3.2　圧縮耐荷力実験結果

供試体	残存耐荷力 P_u (kN)	最大変位 v (mm)	終局変形状態
A5152u	858	5.60	局部座屈と全体座屈連成
A55sd	967	6.15	全体座屈
C1718u	1358	9.56	局部座屈と全体座屈連成
C5655d	1271	1.10	局部座屈
N	1079	10.56	全体座屈

率には線形関係があり，最大断面欠損率は残存耐荷力と相関性が高いことがわかる．

したがって、鋼I型柱部材の残存耐荷力は，次の線形式により表すことができる．

$$\frac{P_u}{P_{cr}} = 1.545 - 1.831R_A \qquad (4.2.3.4)$$

ここに，P_uは柱の残存耐荷力，P_{cr}は健全柱の終局耐荷力およびR_A は最大断面欠損率である．これは，腐食した柱部材の残存耐力は健全部材の終局耐荷力が既知であれば，その耐荷力P_{cr}に最大断

面欠損率による式(4.2.3.4)の低減係数を乗ずることにより評価できることを意味している.

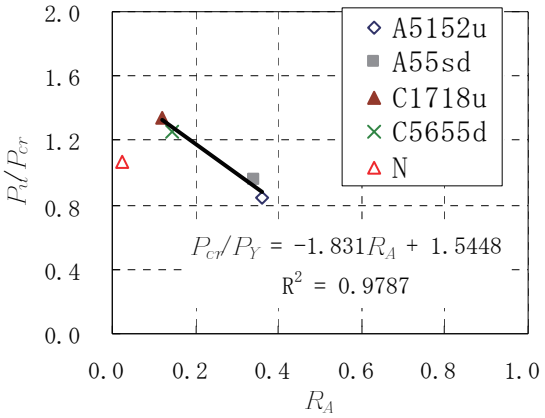


図 4.2.3.8　残存耐荷力と最大断面欠損率の関係

(2) 円筒鋼管柱

以下では，腐食した円筒鋼管柱の残存強度に関する研究成果を紹介する．

高橋ら[6]は，桟橋に使われていた鋼管杭を引き上げて，その腐食程度を調査するとともに，圧縮および曲げ機械試験を行い，強度を API の強度評価式と比較し，その適用性を検討している．

鋼管の局部座屈荷重は，式 (4.2.3.5)で与えられる．

$$P=\sigma_{cr}\cdot A \tag{4.2.3.5}$$

ここに，P ; 局部座屈荷重，σ_{cr} : 局部座屈応力度，A : 鋼管の断面積，D : 鋼管の直径，t ; 肉厚

式(4.2.3.5)の局部座屈応力度 σ_{cr} は弾性理論により直径 D および肉厚 t の関数として与えられるが，理論解は実際の値よりも一般に相当大きい．実験式も種々提案されているが，ここでは API に掲載されている次式(4.2.3.6)を用いることとする．

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y}=1.64-0.23\left(\frac{D}{t}\right)^{0.25} \tag{4.2.3.6}$$

ここで，σ_y : 鋼材の降伏応力度

図 4.2.3.9 の（●）は，圧縮試験の結果をプロットしたものである．すなわち実測降伏応力度，実測座屈荷重，及び座屈位置の平均肉厚を用いている．ここでは，凹凸形状が原因として，補正のためにパラメータとして測定値の標準偏差を用いて肉厚を式(4.2.3.7)のように補正し，有効板厚 t_e と定義している．

$$t_e=\bar{t}-\alpha\cdot S_d \tag{4.2.3.7}$$

ここで，$\bar{t}$: 平均板厚，α : 定数，S_d : 肉厚の標準偏差

前述の補正係数 α=1.0, 1.5 として式(4.2.3.7)で与えられる有効板厚を用いて計算した結果を, API の強度評価式の元となった実験結果と強度算定曲線と本研究の圧縮試験結果をプロットしたものが図 4.2.3.9 a), b) である．この図からわかるように，α=1～1.5 とした時に API データとよく合っている．

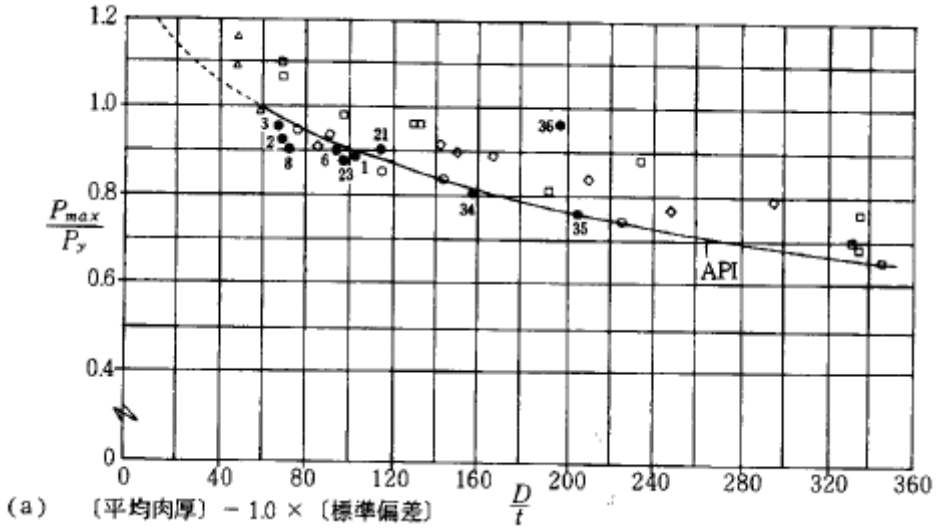


図 4.2.3.9a) 有効板厚 t_{ee} を用いた検討 (α =1.0)

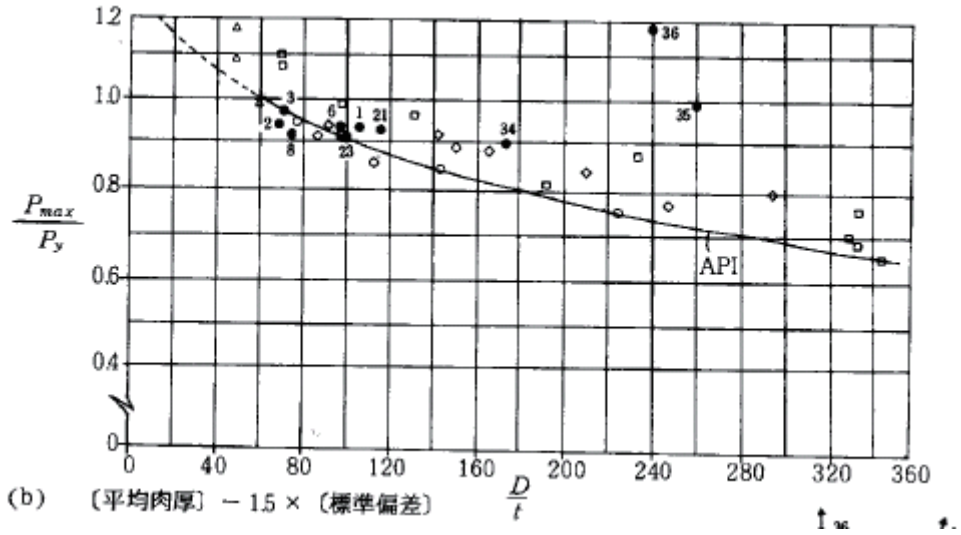


図 4.2.3.9b) 有効板厚 t_{ee} を用いた検討(α = 1.5)

ただし，上記肉厚の補正が必要なものは，肉厚の標準偏差 / 平均板厚が 0.1 程度，すなわち 10%以上の時すればよいと考えられている．

山根ら [7]は，岸壁飛沫帯に約 20 年間暴露された外径 139.8mm，板厚 4.5mm の電縫鋼管から切り出した試験体を使い，錆による腐食表面形状計測および強度試験を行った．

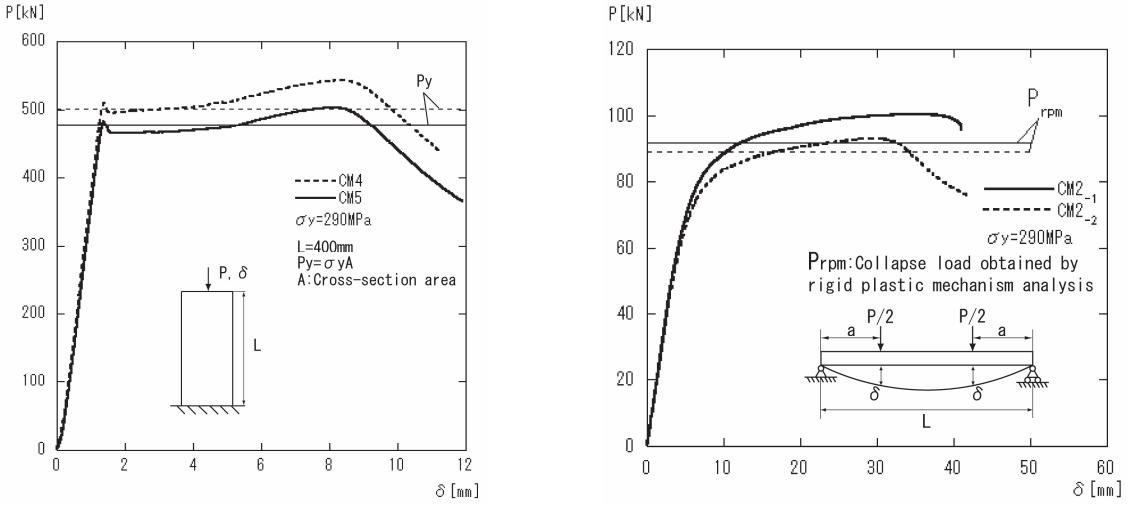
表 4.2.3.3 に表面形状計測から得られた外径と板厚の統計量を示す．

表 4.2.3.3　供試体の断面諸元

No.	$\bar{D}$	$\bar{t}$	σ_t	$t_{\max}$	$t_{\min}$
CM1	138.48	3.84	0.152	4.21	3.26
CM2	138.54	3.87	0.174	4.49	3.37
CM3	138.44	3.82	0.156	4.30	3.31
CM4	138.70	3.95	0.194	4.42	3.23
CM5	138.60	3.90	0.130	4.36	3.50

$\bar{D} = D_i + 2\bar{t}$: Average outer diameter (mm)
D_i : Internal diameter (=130.8mm)
$\bar{t}$: Average thickness　　σ_t : Standard deviation of thickness
$t_{\max}$: Maximum thickness　　$t_{\min}$: Minimum thickness

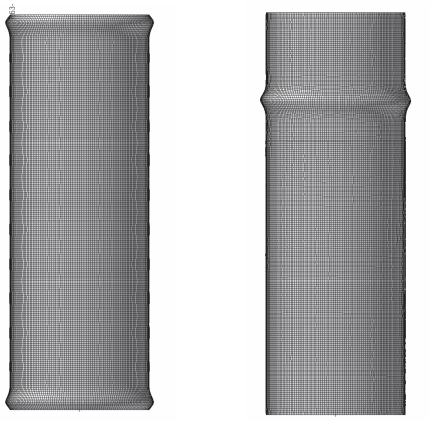
これらの腐食鋼管を対象に圧縮試験および 4 点曲げ試験を実施した．図 4.2.3.10 に圧縮試験および曲げ試験で得られた荷重～変位関係を示す．同図 b)の CM2-1 および CM2-2 は，同じ供試材 CM2 から切り出した 2 体の試験体を表す．結果として，圧縮強度，曲げ強度とも，試験体の最終強度は平均板厚から求めた全断面塑性強度で推定できることがわかる．



a)圧縮　　b)曲げ

図 4.2.3.10　荷重載荷位置の荷重-変位曲線

一方，元板厚がここで取り上げた 4.5mm よりも薄く，同一性状の腐食を有している場合には，腐食による表面の凹凸が同じでも最終強度に対する腐食の影響は増加すると考えられる．そこで内径 D_i が同じで元厚 t_0 が異なる鋼管（外径 $D_0 = D_i + 2t_0$）を想定し，これに供試体と同じ表面の凹凸量を与えた場合について有限要素解析を行って，全面腐食が部材の断面強度に及ぼす影響を調べる．



(a) CASE1　　(b)CASE2

図 4.2.3.10　FEM 解析結果 (D_0/t_0=60)

圧縮試験の解析において，試験体端面では圧縮板との摩擦により横断面内の並進変位が拘束されると仮定した．曲げ試験では，崩壊の生じる中央の 450mm をシェル要素でモデル化し，その外側は等価な梁要素に置換して両端支持および荷重載荷を行った．

解析結果として，図 4.2.3.11 に平均外径/平均板厚比 $\bar{D}/\bar{t}=80.8$（元厚に関する外径/板厚比 $D_0/t_0=60$）の腐食鋼管モデルの圧縮崩壊モードを示す．Case 1 は，平均板厚に等しい一様板厚の鋼管を仮定した場合，Case 2 は腐食表面形状をモデル化した場合である．Case 2 では相対的に板厚の薄い断面に面外変形が集中しているが, Case 1 では端部に面外変形が集中する．図 4.2.3.12 に $\bar{D}/\bar{t}=35.5, 55.6, 80.8, 111.9$（$D_0/t_0=31, 45, 60, 75$）の各ケースについて得られた鋼管モデルの圧縮荷重～圧縮変位曲線を Case 1 および 2 で比較して示す．また図 4.2.3.13 に，それぞれの場合の最終強度を $\bar{D}/\bar{t}$ に対してプロットした結果を示す．平均板厚 $\bar{t}$ に対する凹凸の標準偏差 σ_t の割合は，$\bar{D}/\bar{t}=112$ で 10%，$\bar{D}/\bar{t}=36$ で 3%である．$\bar{D}/\bar{t}$ が大きいほど，板厚に対する凹凸量の割合が大きいが，Case 1 と Case 2 で最終強度に有意な差はなく，圧縮最終強度は平均板厚に基づいて概ね評価できることを示している．表面の凹凸は局部的な応力集中を生じさせるが，凹凸による偏心は隣接部位で複雑に変化し互いにキャンセルする作用があることから [9]，全面腐食の場合，ここで考慮した凹凸の標準偏差／平均板厚比程度であれば，平均板厚で最終強度を評価可能と判断できる．

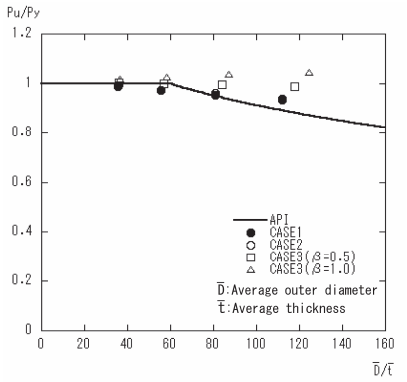


図 4.2.3.12　圧縮荷重-縮量曲線(FEM 解析結果)

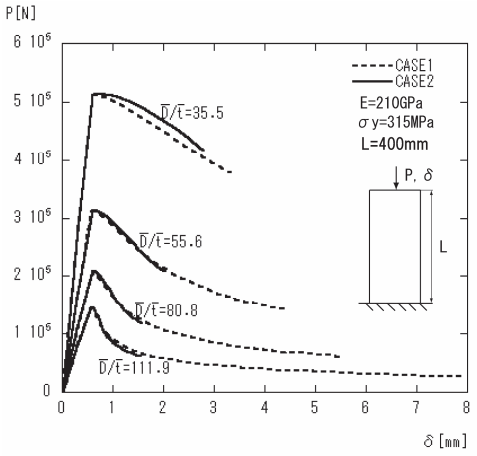


図 4.2.3.13 API 曲線と解析結果の比較

ところで,図 4.2.3.13 の実線はアメリカ石油協会 (API) 規格の圧縮座屈強度曲線であり，API 曲線と比較的良い相関を示していると考えられる．以下では，実用強度算式の例として API 曲線を取り上げ，腐食材の FEM 解析結果と対比する．図 4.2.3.13 によると，腐食材の有限要素解析結果(Case 2)は，API 強度曲線に近接しており，平均板厚を用いて API 強度曲線を適用すれば，最終強度を良好な精度で推定できることがわかる．

ところで，腐食鋼管の座屈強度の推定では，式(4.2.3.8)のように平均板厚$\bar{t}$から凹凸量の標準偏差σ_tの定数倍を減じた値を有効板厚とする取扱いが従来から用いられている．

$$t_e = \bar{t} - \beta\sigma_t \tag{4.2.3.8}$$

ここで，t_eは有効板厚，βは定数である．式(4.2.3.8)でβ=0.5 および 1.0 とした場合のt_eと，それより求めたP_yおよびD_e/t_e($\because D_e = D_i + 2t_e$)に対して有限要素解析結果をプロットした結果を図 4.2.3.12 に Case 3 として示す．本試験体のように板厚に対する凹凸量の標準偏差値比率が小さい場合は，定数値βによる安全代を考慮しない方がより正確な予測を与えることを示している．

このことより，従来，杭長の大きな範囲で腐食深さのばらつきの大きい試験体・計測結果を評価し，その範囲の平均板厚と一律にβを考慮して残留強度を決定する方法に対して，強度上クリティカルな範囲を限定し，孔食深さの標準偏差値の少ないより狭い範囲で残留板厚計測を行い，強度の算定を行って評価する方がより正確な値を与えると考える．

次に，図 4.2.3.14 に曲げモーメントと中央径間 450mm の範囲の両端断面の相対回転角の関係を，また図 4.2.3.15 に曲げ強度に関する API 強度曲線と有限要素解析結果の比較を示す．

ここで解析モデルでは，腐食による凹凸形状において，最も薄肉の箇所を曲げ圧縮側に置いている．図 4.2.3.14 および図 4.2.3.15 より曲げ強度の場合，Case2 は平均板厚モデル

Case 1 よりかなり低く，その違いは板厚に対する凹凸量の割合が相対的に大きい薄板ほど大きい． このことから曲げ強度は局所的な凹凸の影響をより大きく受けることがわかる．なお，図 4.2.3.15 では平均板厚により整理しており，局所板厚との関係を整理するため，図 4.2.3.16 のように座屈部位の最小板厚に対する $\bar{D}/t_{\min}$ について最終強度をプロットすると，薄板側も API 強度曲線上に乗ってくる．

以上の結果より，水中部・地中部で見られる全面腐食を有する鋼管の強度は，圧縮強度は平均板厚を用いて，また曲げ強度については座屈部位の最小板厚で API 曲線を用いることにより良好な精度で推定できることを示した．

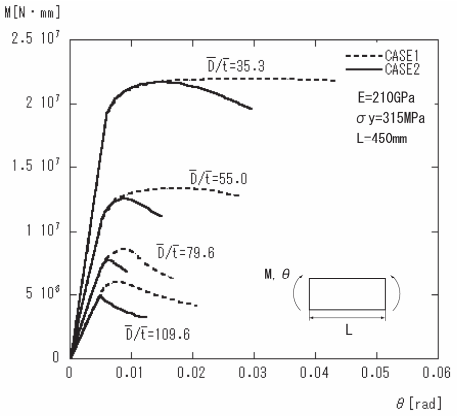


図 4.2.3.14 曲げモーメント-回転角曲線

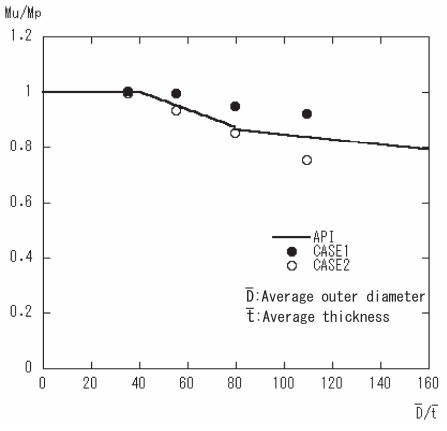


図 4.2.3.15 平均板厚に対する曲げ強度の比較

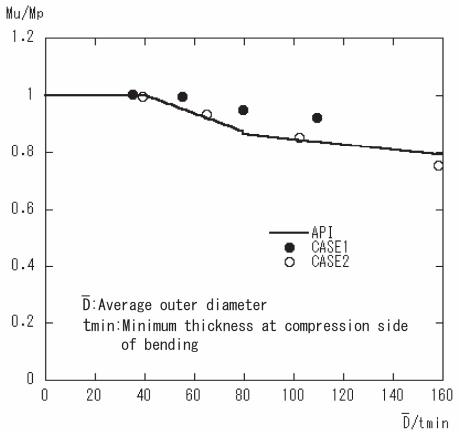


図 4.2.3.16 最小板厚に対する曲げ強度の比較

藤井ら [8]は，19 年間海洋環境において暴露された鋼管杭から切り出した腐食鋼管供試体から，詳細な表面形状計測及び板厚を測定するとともに，軸圧縮試験を行い腐食鋼管の耐荷性上を調べた．また，計測で得られた表面形状を模したモデルによる FEM 解析を行い，試験結果と比較し，モデルの有効性を実証した．次に試験体の測定結果と試験・解析結果を以下に示す．

表 4.2.3.4 計測結果

鋼種	暴露環境	試験体	広島大学の結果 平均板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	最小断面平均板厚 (mm)	平均断面積 (mm²)	最小断面積 (mm²)	最小断面積の高さ位置 (mm)	京都大学の結果 平均板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	最小断面平均板厚 (mm)
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	3.96	6874	4429	155	5.28	3.72	1.84	3.72
	干満帯	NO.2	7.35	1.70	1.39	5.99	9101	7180	36	6.79	2.21	1.03	5.49
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	7.31	9538	9026	1139	7.63	1.37	0.50	7.33
	海中部	NO.4	7.99	1.06	0.94	7.86	9785	9569	68	7.76	1.24	0.53	7.45
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	1.69	3.59	6207	4017	455	4.78	4.22	1.68	3.12
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	7.75	9578	9097	797	7.73	1.27	0.43	7.49

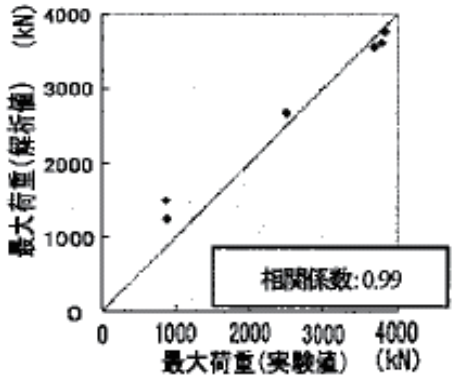


図 4.2.3.17
腐食円形鋼管の圧縮強度

表 4.2.3.5 実験結果と計測結果の比較

試験体	最大荷重 (KN) 実験値	最大荷重 (KN) 解析結果	公称寸法で無次元化 実験値	公称寸法で無次元化 解析結果	最大荷重時の変位 (mm) 実験値	最大荷重時の変位 (mm) 解析結果
NO.1(飛沫帯)	868	1493	0.20	0.34	3.18	2.45
NO.2(干満帯)	2489	2670	0.56	0.60	4.62	2.66
NO.3(海中部)	3690	3551	0.83	0.80	6.44	3.90
NO.4(海中部)	3829	3756	0.86	0.85	8.53	4.73
NO.5(飛沫帯)	883	1251	0.20	0.29	3.04	2.46
NO.6(海中部)	3790	3602	0.88	0.84	8.39	3.90
腐食前モデル (STK50)	——	4363	——	0.98	——	4.20
腐食前モデル (STK41)	——	4218	——	0.98	——	4.20

腐食円形鋼管の圧縮強度を，測定された腐食表面形状やそれに基づく板厚などの統計指標を用いて，腐食の無い鋼管の圧縮強度評価式に適用することで得られる簡易評価式を提案する．

軸圧縮力を受ける腐食の無い鋼管の座屈強度評価式として，現在の道路橋示方書にも採用されている Plantema の式を用い，製造管における圧縮座屈強度と降伏応力の比が与えられ，以下で表す．

Plantema(1946)

σ_u/σ_y　1.0　　：$\alpha \geq 8$ に対して

　　$0.75+0.031\alpha$　：$2.5 \leqq \alpha < 8$ に対して

　　0.33α　　：$\alpha < 2.5$ に対して

ここで　α ：無次元化局部座屈パラメータ

$$\alpha = (E/\sigma_y)/(2R/t) \tag{4.2.3.9}$$

ここで，　E:ヤング率，σ_y ：降伏応力，t:板厚　R:鋼管の板厚中心までの半径

座屈強度曲線の横軸は径厚比パラメータで

$$R_t = (2R/t) * scrt\left(3 * \left(1-\nu^l\right)\right) \tag{4.2.3.10}$$

ν が 0.3 の時 R_t は　$R_t = 1.65 * (\sigma_y/E) * (2R/t_R)$ (4.2.3.11)

ここで，t_R は径厚比パラメータを求めるための代表板厚

縦軸は圧縮強度比 σ_u/σ_y で，以下式(4.2.3.12)で表される．ここに，P_u は圧縮強度，A は断面積である．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y}=\frac{P_u}{A\sigma_y}=\frac{P_u}{2\pi Rt_R}*\frac{1}{\sigma_y} \qquad (4.2.3.12)$$

また，腐食板厚の統計指標として，以下のような指標を考える．

（１） 供試体全体の平均板厚 t_{ave} およびその標準偏差 σ

（２） 供試体の最小断面における断面積から求めた平均板厚 t^*_{ave} およびその標準偏差 S^*

（３） 鋼管の最小断面を中心として軸方向に $3\sqrt{Rt^*_{ave}}$ の長さの領域の平均板厚 t^{**}_{ave} およびこの区間の板厚の標準偏差 S^{**}

圧縮強度評価

径厚比パラメータ式及び圧縮強度式において，代表板厚に種々の統計指標を適用して実験結果を示せば，図 4.2.3.18, 4.2.3.19 のようになる．これらの図は前述の Plantema の座屈強度も合わせて示している．

図 4.2.3.18 は，代表板厚 t_R を供試体全体の平均板厚 t_{ave} およびその標準偏差 S を用いて表した場合であり，図 4.2.3.19 は，最小断面の平均板厚の t^*_{ave} とその標準偏差 S^* を用いて t_R とした場合，図 4.2.3.20 は，$3\sqrt{Rt^*_{ave}}$ の区間の平均板厚 t^{**}_{ave} とその標準偏差 S^{**} によって代表板厚 t_R を表した場合である．

図 4.2.3.18 に示すように，供試体全体の統計指標を用いた場合は，ばらつきが大きく Plantema の式との相関がよくない．一方，図 4.2.3.19 あるいは図 4.2.3.20 に示すように，t^*_{ave}，S^* や t^{**}_{ave}，S^{**} を用いた場合には Plantema の式に近くなり，図 4.2.3.21 に示すように代表板厚を $t_R=t^*_{ave}-0.6s^*$ とした場合の相関係数は 0.91，$t_R=t^{**}_{ave}-0.8s^{**}$ の場合では 0.93 と両者とも良い相関が得られていることがわかる．

以上から，t^*_{ave}，S^* や t^{**}_{ave}，S^{**} を用いることにより，腐食した円形鋼管の圧縮強度を評価推定できることを示した．腐食した円形鋼管の残存強度を推定するには，まず最も腐食の激しい断面を探し，その断面上の板厚を測定して平均板厚と標準偏差を求め，図 4. 2. 3. 19 から残存強度を求めるのが，現在の計測機による板厚測定という作業性の面からは有利と考えられる．しかし，測定作業が容易に行える場合には，座屈長 $3\sqrt{Rt^*_{ave}}$ の領域の平均板厚と標準偏差を用いて図 4. 2. 3. 20 から残存強度を求める方がより高い精度が期待できよう．

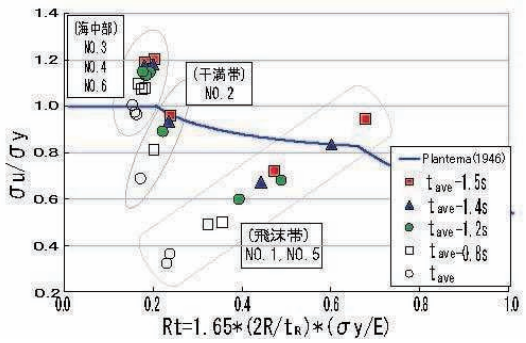


図 4.2.3.18 t_{ave}, s を用いた代表板厚 t_R の場合

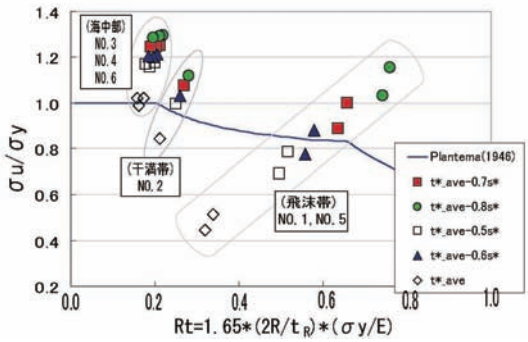


図 4.2.3.19 t^*_{ave}, s^* を用いた代表板厚 t_R の場合

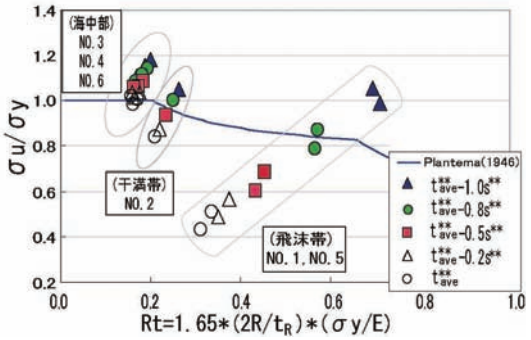
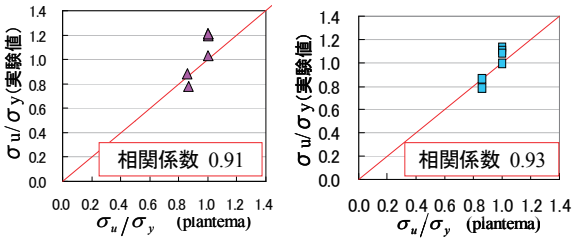


図 4.2.3.20 t^{**}_{ave}, s^{**} を用いた代表板厚 t_R の場合



(a) $t_R = t^{**}_{ave} - 0.6\,s^*$　　(b) $t_R = t^{**}_{ave} - 0.8\,s^{**}$

図 4.2.3.21 $t^{**}_{ave} - 0.6\,s^*$, $t^{**}_{ave} - 0.8\,s^{**}$ を用いた代表板厚 t_R の場合

西村ら[9]は，人工的に単一孔や，より実際的な断面欠損状態を模擬した複数孔，減厚および減厚と開孔の組み合わせによる模擬材を用いた強度実験と，薄肉シェル構造物の弾塑性有限変位解析のためのプログラム(NASHELL)を用いて解析を行っている．

研究の結果，以下のことを明らかにしている．

１）断面欠損を有する鋼管部材の座屈耐荷力は，数値シミュレーションにより，評価できる．

２）弾性座屈領域では，5%程度以下の断面欠損率であれば全体座屈の影響が大きく，断面欠損の影響による極限強度の低下はあまり見られない．しかし，15%程度の断面欠損率の場合，開孔が部材端部にあれば全体座屈の影響が大きく，開孔が部材中央に近づくに従い，全体座屈の中に孔周辺の局部変形の影響が出てくる．また，25%程度以上の断面欠損率の場合，孔周辺の局部変形の影響で座屈する．

３）弾塑性座屈領域では，開孔位置が同じ場合，断面欠損率と極限強度は比例関係にある．また，開孔位置の影響については，断面欠損率が 5%程度の場合，開孔が部材端部にあれば全体座屈の影響が大きいが，開孔位置が部材中央部に近づくに従い，孔周辺の局部変形の影響が大きくなる．また，10%程度以上の場合，孔周辺の局部変形の影響で座屈する．

４）内面減厚と外面減厚では，変形状態は異なるが，対象とした電縫鋼管の極限強度の差は 2%程度であり大きな差はない．

５）断面欠損率が同じ場合，減厚→〔孔＋減厚〕→孔の順で座屈耐力は低下する．

６）軸方向に２つの孔を有した鋼管部材の極限強度は，それぞれの１つの孔部材強度の低い方で評価できる．

７）周方向に２つの孔を有する鋼管部材は，開孔距離(d)/周長(S)が 0.4 以上の領域Ⅰでは，開孔の距離に関係なく極限速度は一定であり，*d/s* が約 0.2 以下の開孔が近接する領域Ⅲでは，2 つ孔の連成効果によって極限強度は急激に低下する．また，中間領域Ⅱの範囲では，開孔の距離に比例して極限強度が上昇する．

西村ら[10]は，既に弾塑性有限変位解析により断面欠損部材の残存耐荷力を求める方法を確立し，座屈実験によりその妥当性を確認している．それらの結果を実際の断面欠損に適用する場合，その断面形状と位置は多岐にわたるためパターン化が必要となる．本報告では，実際に生じた損害と断面欠損率を前提に，断面欠損の形状と位置についてパターン化を行い残存耐荷力の算定法を提示した．座屈カーブは，前節で紹介した文献 9)で妥当性を検証した解析プログラムにより作成され，鋼管部材の細長比及び孔位置をパラメータとし，健全部材との強度低下の比率を示した．

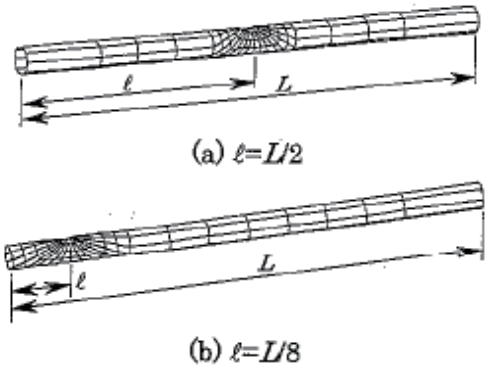


図 4.2.3.22　解析モデル　概略図

孔明き鋼管の座屈強度低下式は，孔位置(l / L)と座屈強度低下係数(β_h)の関係を基に，細長比(λ)および断面欠損率(α')の影響も考慮して対数近似により以下のように求めた．

$$\beta_h = \beta_{hs} Ln(l/L) + \beta_{hc} \tag{4.2.3.13}$$

ここで，β_{hs} と β_{hc} の値はλによって変わる．

よって，孔明き鋼管の座屈応力度(σは，以下の式で求められる．

$$\sigma_h = \beta_h \sigma \tag{4.2.3.14}$$

ここで，

σ_h：孔明き鋼管の座屈応力度

σ ：ECCS（Eurocode 3 ： Common Unified Code of Practice for Steel Structures）や JEC(電気学会：送電用支持物設計標準 JEC-127)等の座屈応力度

L ： 部材長　　l ： 開孔位置　　r ： 断面 2 次半径　　α'_h ：開口部の断面欠損率

つまり，孔明き鋼管の座屈強度は，ECCS や JEC 等の座屈強度式より求めた座屈強度に，座屈強度低下係数を乗じて求める．

図 4.2.3.23 に孔明き鋼管の座屈強度低下式から求めた孔位置(l / L)が 1/2 の座屈強度と解

析から求めた座屈強度の比較図を示す.

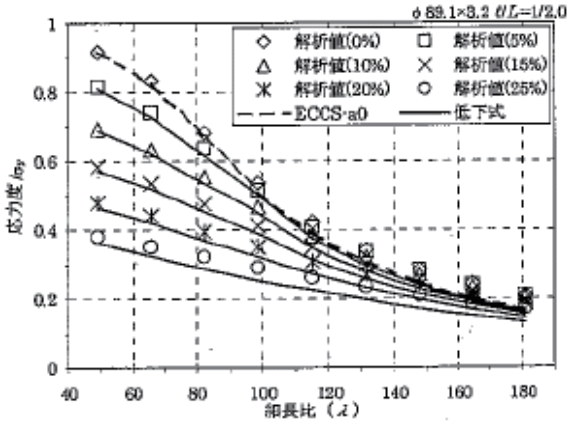
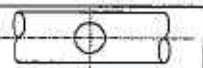
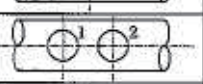
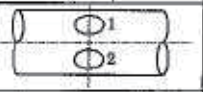
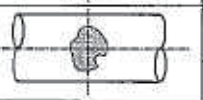
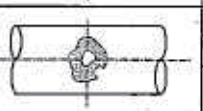


図 4.2.3.23　座屈強度低下式と解析結果　(ℓ/L=1/2)

また,実際の断面欠損部材に対して開孔付き鋼管の座屈カーブをどのように適用するかを各パターン別に以下の表 4.2.3.6 にまとめた．ここでは,1 つ孔の座屈強度低下式を基にして，減厚の形状と断面欠損状態に応じて補正係数を乗じることにより，複数孔，減厚のみ，孔＋減厚等いずれの場合でも座屈強度が算出できるようにした.

表 4.2.3.6　断面欠損状態のパターン化の種類と座屈強度算出の概要

No.	減厚形状の種類と状態		要因	強度補正係数	座屈強度
	健全				σ
①	1つ孔		開孔部断面欠損率 α'	座屈強度低下率 β_h	$\beta_h\sigma$
②	軸方向 2つ孔		各々の開孔部断面欠損率 α'_1, α'_2	各々の座屈強度低下率 β_{h1}, β_{h2}	$\beta_{h1}\sigma$ $\beta_{h2}\sigma$
③	周方向 2つ孔		2つ孔を加算した断面欠損率 α'	座屈強度低下率 β_h	$\beta_h\sigma$
④	減厚のみ		減厚部断面欠損率 α'	座屈強度低下率 β_h (同一欠損率の開孔)	$\beta_t\beta_h\sigma$
			減厚部長／断面の周長	座屈補正係数 β_t	
⑤	孔+減厚		開孔部断面欠損率 α'_h	座屈強度低下率 β_h	$\beta_e\beta'_t\beta_h\sigma$
			(開孔＋減厚部)断面欠損率 α' と α'_h	孔＋減厚の座屈強度補正係数 β_t	
			減厚部長／断面の周長 と減厚部断面欠損率 α'_t	減厚部の座屈補正係数 β'_t	

ここで，表内④の内面減厚のみの場合，減厚部長(S_t)/鋼管の周長(S)と座屈強度補正係数(β_t)の関係を近似式で表現し，これらの近似式を最大断面欠損率(α’)と L/r の関係から求めており，解析モデルとしてφ89.1mm×板厚 t3.2mm×部材長Ｌ1500mm の部材の中央部(L/2)荷減厚部がある場合の，座屈強度補正係数の計算結果図を以下図 4.2.3.23 に示す．減厚のみの座屈強度補正係数(β_t)は，次式となる.

$$\beta_t = \beta_{tS}(S_t / S) + \beta_{tc} \qquad (4.2.3.15)$$

よって，減厚のみを有する鋼管の座屈強度（σ_t）は，次式により求められる．

<1 の時 $\sigma_t = \beta_t \beta_h \sigma$ (4.2.3.16 a))

$\geqq 1$ の時 $\sigma_t = \sigma$ (4.2.3.16 b))

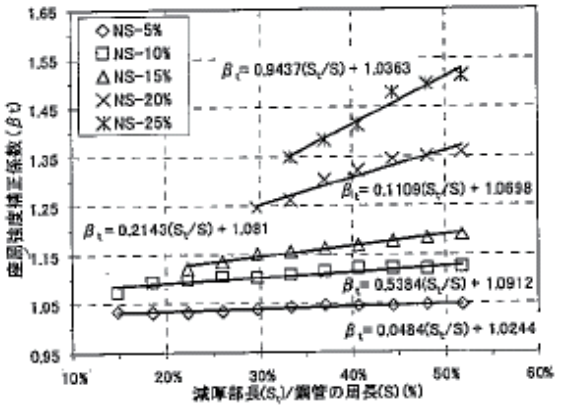


図 4.2.3.23　減厚部長と補正係数の関係 （NS）

また，孔＋減厚の場合は，開口部を含めた最大断面欠損率（α’）と座屈強度補正係数（β_c）は比例関係にあり，次式で近似できる．

$$\beta_c = \beta_{cs}\alpha' + \beta_{cc} \qquad (4.2.3.17)$$

ここでβ_{cs}とβ_{cc}の値は細長比λによって変わり，開口部の断面欠損率（α'_h）より求める．

次に，減厚部の断面欠損率と減厚部の長さの関係を補正するために，減厚部のみの場合の座屈強度補正式を用いて減厚部の強度補正係数（β'_t）を次式で求める．

$$\beta'_t = \frac{\beta'_{ts}\left(S_t / S\right) + \beta'_{tc}}{\beta'_{ts}(0.52 - \alpha'_h) + \beta'_{tc}} \qquad (4.2.3.18)$$

ここで，β'_{ts} と β'_{tc} の値は細長比λによって変わり，減厚部の断面欠損率（α'_t）より求める．

減厚飲みの場合と同じ解析モデルで，座屈強度補正係数の計算結果を図 426.20 に示す．

よって，孔＋減厚鋼管の座屈強度（σ_c）は，次式により求められる．

$\beta_c \beta'_t \beta_h < 1$ の時　$\sigma_t = \beta_c \beta'_t \beta_h \sigma$ (4.2.3.19 a))

$\beta_c \beta'_t \beta_h \geqq 1$ の時　$\sigma_t = \sigma$ (4.2.3.19 b))

更に，本研究で得られた座屈強度評価法による座屈強度算出の実施例を具体的に示し，

それらの強度は，図 4.2.3.25 に示すように数値解析値との差が 10%程度であり，実験結果との差が 16%程度であった．

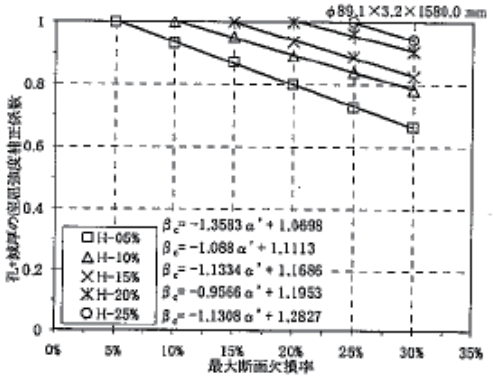


図 4.2.3.24 最大断面欠損率と座屈強度係数

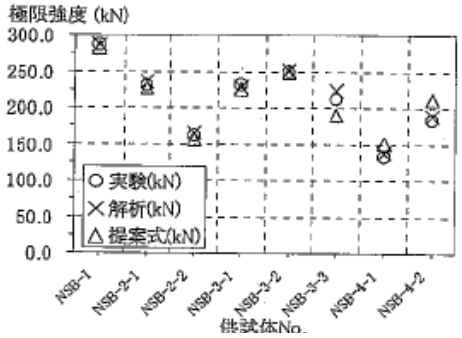


図 4.2.3.25 実験・解析結果と計算結果の比較

【参考文献】

1) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，鋼構造シリーズ 7，1996.

2) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），JSSC，No.51，2002.

3) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術(第 7 章損傷部材の評価)，鋼構造土木診断士講習会テキスト，2005.

4) 野上邦栄，山沢哲也，小栗友紀，加藤美幸：腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残存耐力に関する一考察，構造工学論文集，Vol.47A，pp.93-102，2001.

5) 中野克俊、野上邦栄，山沢哲也，射越潤一，笹島純司，三浦敬：腐食した鋼部材の圧縮耐荷力実験、土木学会年次講演会概要集，CD-ROM，2006

6) 高橋宏直、船橋香、横田弘：腐食した鋼管杭の力学的特性試験、国土技術政策総合研究所資料 NO.44 付属資料 2 (2002))

7) 山根信，田中王治，松田漠，藤久保昌彦，柳原大輔，岩尾直樹：海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について，第 1 回 日本船舶海洋工学会講演会，平成 17 年 11 月

8) 海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力，土木学会．構造工学論文集 V01.52A ，2006 年 3 月

9) 西村宣男，竹内修治，村上茂之，田淵敦彦，伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残存強度の評価法，鋼構造年次論文報告集，Vol.9，pp.489-496，2001.3

10) 西村宣男、竹内修治、村上茂之，竹下主義、軸屋一美、伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性、鋼構造年次論文報告集，Vol.6，pp.55-66，2001.3

4.2.4 曲げ部材 [1)]

対象とする腐食した曲げ部材は，図 4.2.3-1 であり，波状の著しい腐食がみられる「ランク A」2 体(A5051d, A51sd)から，中庸の腐食が認められる「ランク B」2 体(B5453d, B5554d)，ほとんど腐食が見られない「ランク C」1 体(C1516u)の 3 段階の供試体である．

レーザ変位計により算出した上下フランジ，ウエブの各板厚より，断面の平均板厚は式(4.2.3.1)により算出できるので、板厚減少率 R_t は次式で与えられる．

$$R_t = \frac{t_0 - \bar{t}_a}{t_0} \qquad (4.2.4.1)$$

ここに，t_0 は健全部の板厚である．計測結果は，概ねランク A 部材の板厚減少率は，0.3 前後，B 部材は約 0.13，C 部材は 0.05 となった．

曲げ耐荷力実験は，800mm の等曲げ区間を有する四点曲げ実験を行った．載荷装置には，載荷容量 1000kN，ストローク 400mm の油圧サーボ式ジャッキを用い，変位制御にて漸増載荷を行った．図 4.2.4.1 は，5 供試体の載荷荷重と支間中央部の鉛直変位関係を示している．

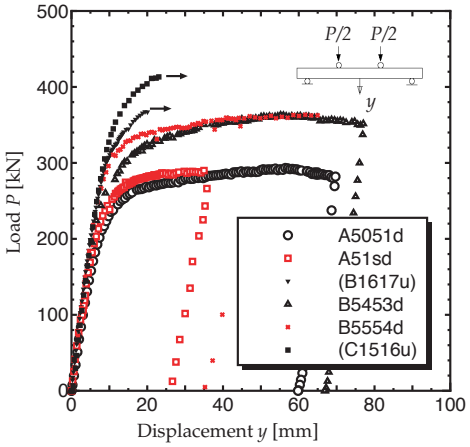


図 4.2.4.1 腐食部材の荷重—変位挙動

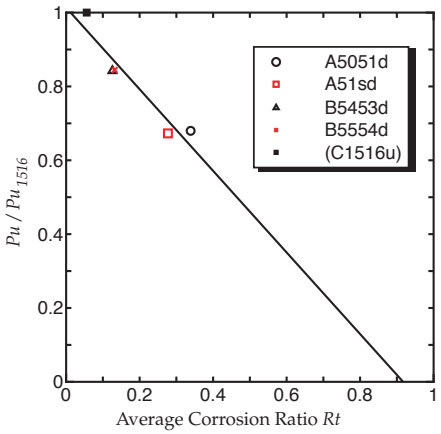


図 4.2.4.2 曲げ残存耐荷力と板厚減少率

いま，C1516u 供試体の最大載荷荷重 P_{u1516} を基準とし，板厚減少率 R_t と，各供試体の最大載荷荷重との関係を調べてみると，結果として図 4.2.4.2 に示すような線形近似関係を得ることができた．これを式で表すと，

$$P_u / P_{u1516} = -1.105\, R_t + 1.013 \qquad (4.2.4.2)$$

のようになる．個々の供試体の曲げに対する終局挙動は，腐食形状に依存した局部座屈・横座屈・亀裂の発生等によって支配されるが，その座屈進展・亀裂進展が急激に進行しなければ，中途の応力分配によって全断面塑性に近い状態で終局状態を迎えるため，平均腐食率 R_t で十分に終局耐力を表現できるものと考える．

一方で，これまでの既往の解析的および実験的検討において，曲げ部材の残存耐荷力を評価するパラメータとして式(4.2.3.4)の他に式(4.2.3.3)の最大断面欠損率および修正最大断面欠損率[2),9)]などが提案されている．これらのパラメータによる残存耐荷力は，健全な曲げ部材の耐力との間に次式のような線形関係で与えられる．

$$M_u = k_b M_{u0}$$
$$k_b = 1 - c_b R_A \qquad (4.2.4.3)$$

ここに，M_uは残存曲げ耐力，M_{u0}は健全な曲げ部材の終局曲げ耐力，k_bは曲げ部材の低減係数，c_bは任意定数，R_Aは最大断面欠損率あるいは修正最大断面欠損率である．健全な曲げ部材の終局耐力には，例えば道路橋示方書の基準曲げ耐荷力曲線が有効である．任意の定数cについては，圧縮部材と同様に現在までのところ任意の腐食形態に対する統一的な数値は提示されていない．

【参考文献】

1) 山沢哲也，野上邦栄，森猛，塚田祥久：腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐荷力実験，構造工学論文集，Vol.52A，pp.139-148，2006.3

4.2.5 板

(1) 概要

構造物は一般に，板を用いて柱部材や桁などの部材を構成し，さらにそれらが組み合わされて橋梁は橋脚などの構造物として成り立っているのが普通である．したがって，構造物の終局強度（耐荷力）は，部材を構成する板要素の強度，更にそれらが組み合わされた部材としての強度に依存することになる．

ここで，腐食を受けた鋼板の平均板厚 t_{avg} に対して，強度的に等価な等厚板の板厚を等価板厚 t_{eq} とし，

$$t_{eq} = t_{avg} - \beta \times \sigma \qquad (4.2.5.1)$$

σ ：標準偏差，β ：未知のパラメータ

のような式で腐食鋼板の耐荷力が精度良く評価出来るような等価板厚を定義することができれば，既知の等厚板で構成された部材の強度評価法を用いて腐食部材の残存強度が推定することができると考えられるため実務の上で非常に有用である．

構造物の構成要素としての板は，引張，圧縮，曲げ，せん断といった断面力が作用しており，引張強度は 4.2.2 節で述べたように局所的な最小平均板厚と材料強度で決まることが実験結果等から明らかにされているが，圧縮，曲げ，せん断強度については強度を決定する要因は明らかではない．

本節では，主として純圧縮を受ける板要素について既往の研究成果から腐食状況を表すパラメータと残存耐荷力の関係について整理をし，腐食フランジの簡易的な強度評価法を引用して紹介する．

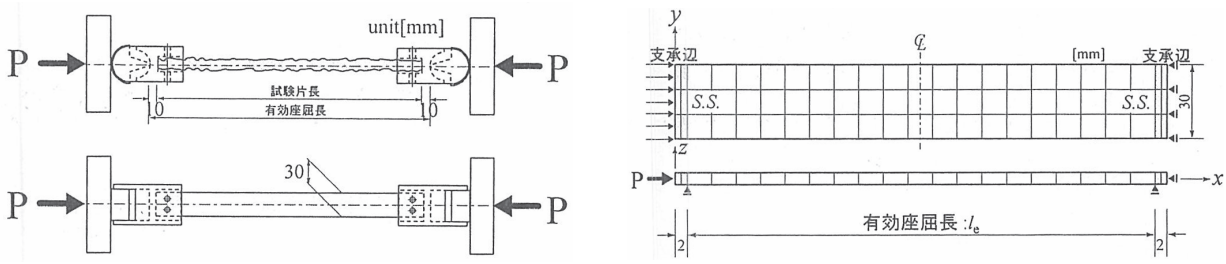
(2) 鋼板の腐食状況を表す統計量を用いた簡易的な圧縮強度評価法に関する検討[1)]

a) 着目する腐食統計量

腐食鋼板の圧縮強度に影響する因子として平均板厚，板厚の標準偏差および中立軸からの偏心量に着目して，空間的自己相関モデルにより腐食表面を作成して強度解析をおこない，腐食鋼板から切り出した試験片の座屈試験結果との比較を実施した．**図 4.2.5.1** に座屈試験および強度解析に用いたモデルを示す．

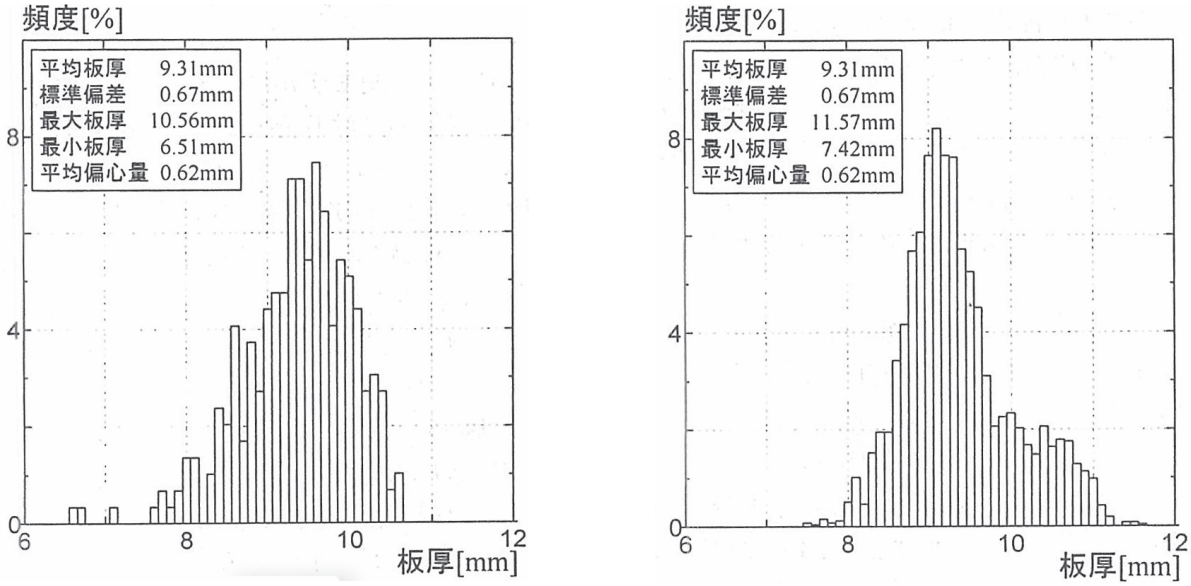
解析に用いた腐食表面のモデル化は，実測した板厚および偏心量をそのままモデル化したもの(CASE-1)と，平均板厚，標準偏差，平均偏心量の３つの統計量が実測値と等しくなるように空間的自己相関モデルにより人工的に作成したもの(CASE-2)の２つを作成し解析結果の比較を行った．

図 4.2.5.2 に実際の試験片と空間的自己相関モデルによる板厚ヒストグラムの一例を示す．両者のヒストグラムを比較すると，同じ平均板厚と標準偏差を有していてもヒストグラムの形状が幾らか異なっていることがわかる．また，試験体の板厚の実測値と空間的自己相関モデルの板厚等高線図を**図 4.2.5.3** に示す．図中の横軸は残存板厚 t を腐食前の板厚 t_0 の比を表している．解析モデルの表面形状は実試験片の形状と比べて幾分異なる形状ではあるが，似た形状となっている．



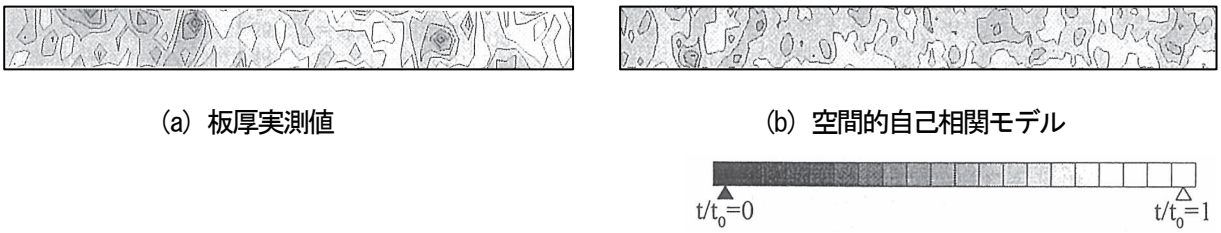
(a) 座屈試験概略　　(b) 座屈試験片の解析モデル

図 4.2.5.1　座屈試験および強度解析



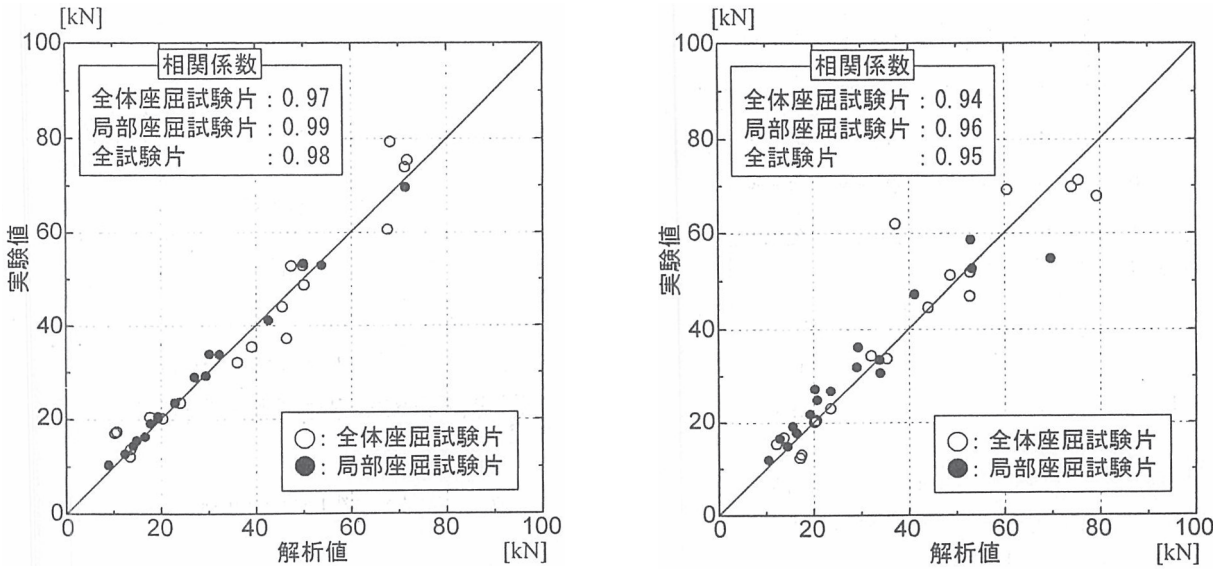
(a) 板厚実測値　　(b) 空間的自己相関モデル

図 4.2.5.2 板厚ヒストグラム



(a) 板厚実測値　　(b) 空間的自己相関モデル

図 4.2.5.3 板厚等高線図



(a) CASE-1　　(b) CASE-2

図 4.2.5.4 実験結果と解析結果における最高荷重の相関

全 35 体の試験片の実験結果と解析結果を**図 4.2.5.4** に示す．試験片の腐食状況は，表面全体が腐食した全体腐食と，局部的に激しく腐食した局部腐食に大別された．座屈強度試験では全体腐食した試験片は，概ねsin 半波の全体座屈モードが発生して崩壊し，局部腐食の場合は腐食の激しい箇所で，くの字に折れ曲がるような局部座屈モードが発生して崩壊した．解析値との比較において腐食形態を忠実に再現した CASE-1 では解析結果は実験結果と若干ばらつきはあるものの良く対応しており，相関係数は 0.98 であった．空間的自己相関モデルを用いた CASE-2 においても，CASE-1 より若干ばらつきは大きくなる(相関係数は 0.95)ものの実験値とよく対応しており，平均板厚，板厚の標準偏差，平均偏心量が同じであれば腐食表面形状が若干異なっていても圧縮強度はほぼ等しくなることが示された，このことは，上記の３つの統計量を用いて腐食鋼板の圧縮強度を評価できる可能性を示している．

b) 圧縮フランジの終局強度解析

a)においては，腐食表面の統計量に着目するため短冊状の試験片を用いて実験結果と解析結果の比較を行った．実構造物において圧縮力を受ける板の支持条件は実験のような両辺固定ではなく周辺部も拘束されている場合が多い．圧縮板の挙動を更に詳しく調べるために**図 4.2.5.5** に示す３辺単純支持１辺自由（プレートガーダーの圧縮フランジの座屈解析のモデル化として良く用いられており，以下これをフランジと呼ぶことにする）の腐食鋼板の弾塑性有限変位解析を行った．

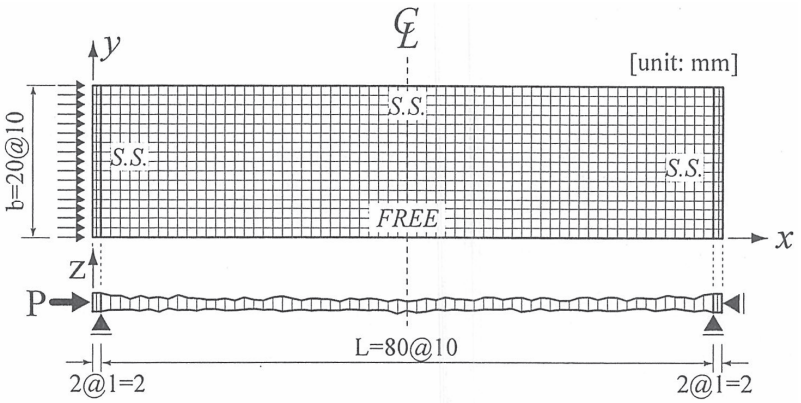
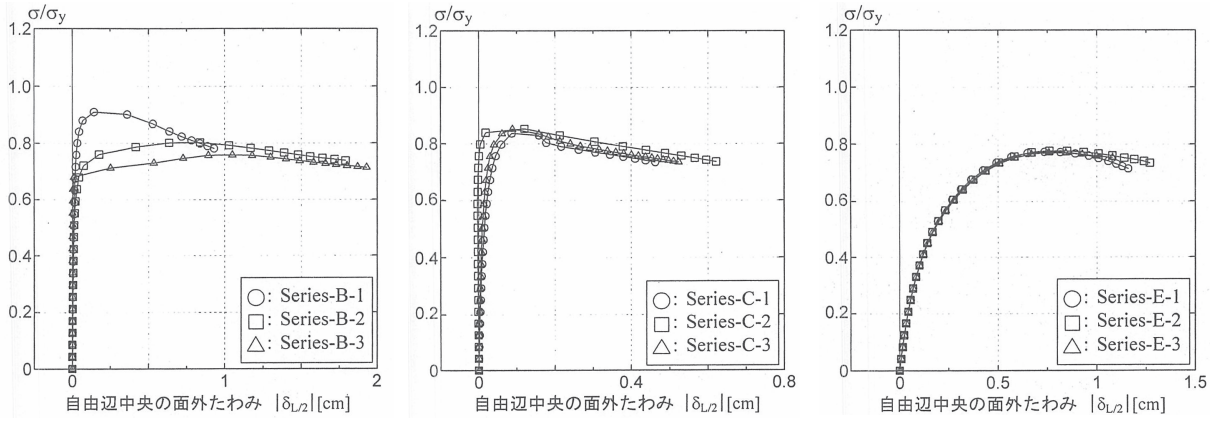


図 4.2.5.5 腐食したフランジの解析モデルおよび要素分割

表 4.2.5.1 解析モデルの詳細

解析モデル		t_0[mm]	t_{avg}[mm]	σ_t[mm]	t_{max}[mm]	t_{min}[mm]	e_{avg}[mm]	σ_u/σ_y	解析目的と解析モデルの説明
Series-A	1	12.00	12.00	0.00	12.00	12.00	0.00	0.99	t_{avg}の等しい腐食フランジと腐食の無いフランジの強度および終局挙動を比較する
	2	9.00	9.00	0.00	9.00	9.00	0.00	0.73	
	3	12.00	9.00	1.12	12.00	4.19	0.00	0.92	1,2は腐食の無いフランジで板厚が異なる
	4	12.00	9.00	1.12	12.00	4.19	0.90	0.82	3,4は腐食フランジで偏心の有無が異なる
Series-B	1	11.00	9.00	1.01	11.00	4.26	0.00	0.91	腐食表面の凹凸の大きさ(σ_t)が強度に与える影響を調べる
	2	11.00	9.00	0.56	11.00	5.62	0.00	0.80	
	3	11.00	9.00	0.34	11.00	7.64	0.00	0.75	t_{avg}およびe_{avg}が等しく，σ_tが異なる
Series-C	1	11.00	8.00	1.10	11.00	2.62	0.00	0.84	偏心が無いフランジについて，腐食表面の凹凸形状が強度に与える影響を調べる
	2	11.00	8.00	1.09	11.00	2.97	0.00	0.85	
	3	11.00	8.00	1.11	11.00	3.09	0.00	0.85	t_{avg}, σ_t, e_{avg}が等しい(e_{avg}=0mm)
Series-D	1	12.00	10.00	1.10	12.00	4.89	0.00	0.95	腐食前の板厚(t_0)が異なるフランジの強度を比較する
	2	13.00	10.00	1.08	13.00	4.91	0.00	0.95	
	3	14.00	10.00	1.12	14.00	4.01	0.00	0.95	t_{avg}, σ_t, e_{avg}が等しく，t_0が異なる
Series-E	1	12.00	10.00	0.56	12.00	6.62	1.00	0.77	偏心を有するフランジについて強度を比較し，t_{avg}, σ_t, e_{avg}の適用性を検討する．
	2	12.00	10.00	0.55	12.00	7.40	1.00	0.78	
	3	12.00	10.00	0.56	12.00	6.62	1.00	0.77	t_{avg}, σ_t, e_{avg}が等しい



(a) Series-B　　(b) Series-C　　(c) Series-E

図 4.2.5.6 荷重ーたわみ関係

解析結果から**図 4.2.5.2** に Series-B, C, E の荷重ーたわみ関係を示し各統計量による終局挙動の違いについて述べる．まず Series-B の結果から，平均板厚が同じであれば標準偏差が大きいほど圧縮強度が大きくなっていることがわかる．これは，腐食深さのばらつきが大きくなると各節点での偏心が大きくなるため局部的な面外曲げ応力が発生し，板要素全体の変形を拘束するからと考えられる．Series-C においては，平均偏心量が 0 の場合，平均板厚と標準偏差が等しければ最大腐食位置や最小腐食位置が異なっていてもフランジの圧縮強度は変わらないことが示されている．Series-E は偏心のある腐食フランジの強度特性を示している．偏心のない Series-B, C と異なりフランジ全体に偏心による曲げモーメントが付加されるため初期段階から荷重ーたわみ曲線の傾きは若干小さくなり，圧縮強度も低下していることがわかる．しかしながら同じ偏心量を持つモデルで比較した場合，平均板厚，板厚の標準偏差が同じであれば圧縮強度はほぼ同じであることから，腐食フランジの圧縮強度は平均板厚，板厚の標準偏差および平均偏心量の３つの統計量を用いて表現できることが確認された．

c) 腐食した圧縮フランジの強度評価

圧縮フランジの解析結果から得られた圧縮強度を**図 4.2.5.7** に示す．ここで縦軸は圧縮強度 σ_u/σ_y，横軸は幅厚比パラメータ R である．

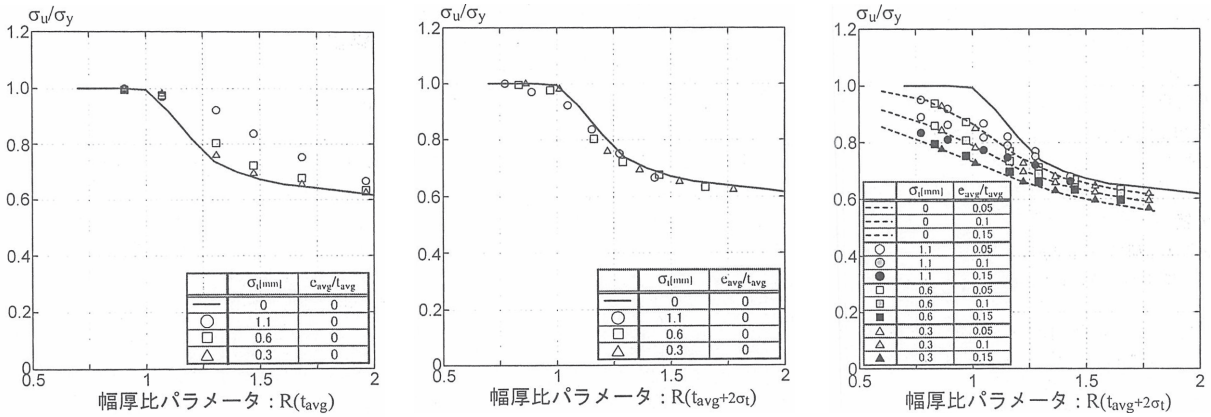
$$R = \frac{b}{t_R}\sqrt{\frac{12\left(1-\nu^2\right)\sigma_y}{\pi^2 k}} \qquad (4.2.5.2)$$

ここで，

b：フランジの幅，tR：幅厚比パラメータを求めるための有効板厚，σy：降伏応力，E：弾性係数，

ν：ポアソン比，k：座屈係数(=0.425)である．

図の(a)と(b)は同じ解析結果をそれぞれ有効板厚を $t_R = t_{avg}$，$t_R = t_{avg} + 2\sigma$ として求めた幅厚比パラメータで整理したものである．平均板厚を用いて幅厚比パラメータを求めると腐食フランジの圧縮強度は，腐食のないフランジの座屈強度曲線よりも大きくなっていることがわかる．一方，有効板厚を $t_R = t_{avg} + 2\sigma$ とした場合各腐食フランジの圧縮強度は，腐食のないフランジの座屈強度曲線とほぼ一致する．図の(c)は腐食フランジの偏心の大きさを，平均腐食量と平均板厚の比 e_{avg}/t_{avg} を用いて表したパラメトリックな解析結果を示したもので，破線は腐食の無いフランジに偏心を与えて解析した結果を示す．図から腐食フランジの解析結果は偏心を考慮した腐食の無いフランジの座屈強度曲線によく一致することがわかる．



(a) $t_R = t_{avg}$　　(b) $t_R = t_{avg} + 2\sigma$　　(c) $t_R = t_{avg} + 2\sigma$ (偏心あり)

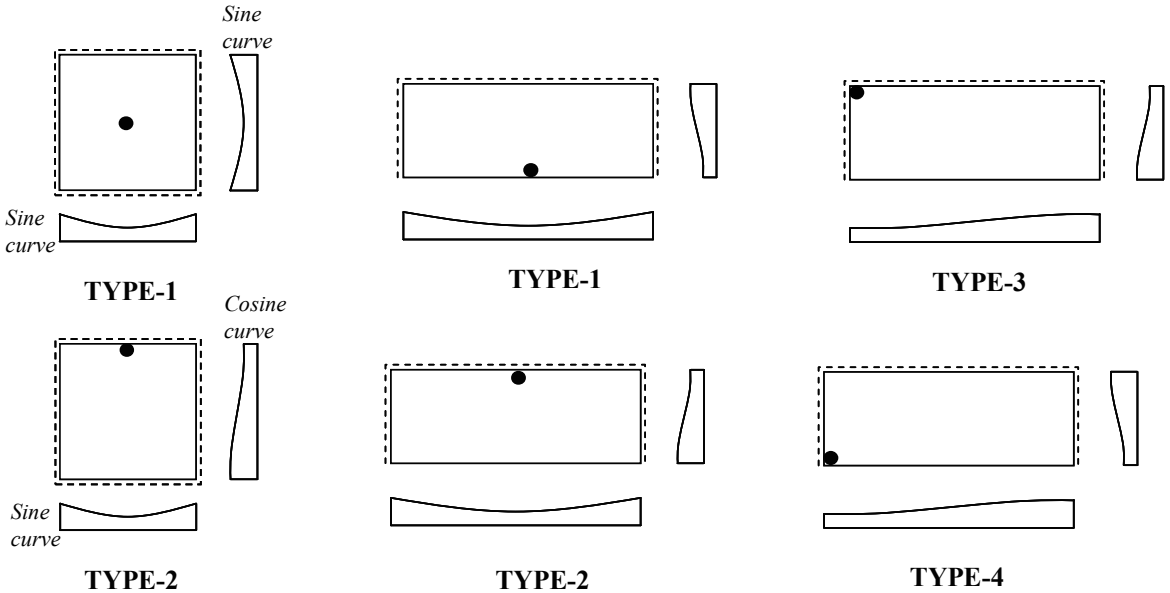
図 4.2.5.7 有効板厚 t_R と座屈強度曲線の適合性

(3) 腐食鋼板の残存耐荷力に影響を及ぼすその他の因子[2)]

a) 解析モデル

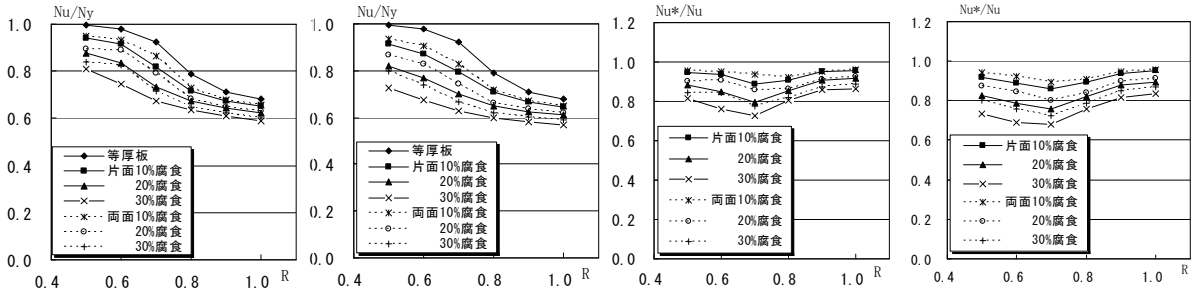
(2)では，実際の腐食鋼板の計測統計量より人工的に作成した腐食表面を用いて解析した結果より，平均板厚，板厚の標準偏差の３つの統計量を用いて腐食のないフランジの強度曲線から腐食フランジの強度を算出できる可能性があることを示した．しかしながら，腐食形態は腐食を生じさせる環境により多様であることから，全ての腐食形態において前記の手法が適用可能であるかは明確ではない．本節では，典型的な板厚減少を考慮して腐食鋼板の圧縮強度特性を解析し，最大腐食量，腐食形態，その他のパラメータが残存強度特性に与える影響について検討を行っている．

考慮した腐食形態を**図 4.2.5.8** に示す．箱形，Ｉ形断面部材のフランジを模した 4 辺単純支持，3 辺単純支持 1 辺自由の腐食鋼板に対し，最大腐食の位置を変化させて 6 つのモデルを作成した．それぞれのモデルについて幅厚比パラメータを 0.5～1.0，腐食量を最大腐食量と元の板厚の比で 10%～30%にパラメトリックに変化させて解析を行った．



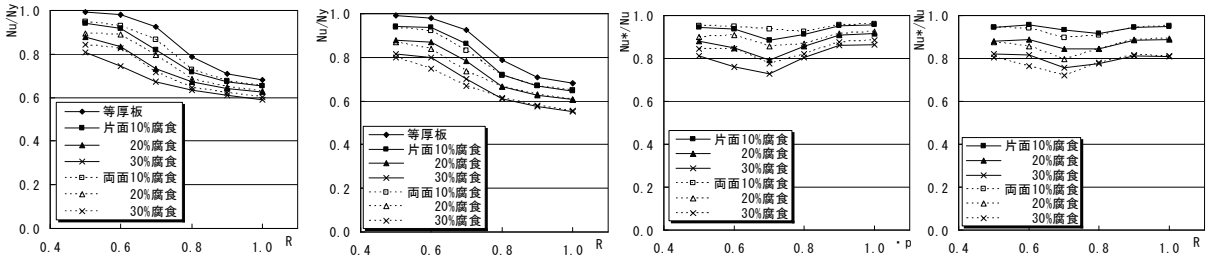
(a) 4 辺単純支持板　　(b) 3 辺単純支持 1 辺自由板

図 4.2.5.8 考慮した腐食形態



(a) 圧縮強度曲線 TYPE-1　(b) 圧縮強度曲線 TYPE-2　(c) 圧縮強度比 TYPE-1　(d) 圧縮強度比 TYPE-2

図 4.2.5.9 解析結果（4 辺単純支持板）



(a) 圧縮強度曲線 TYPE-1　(b) 圧縮強度曲線 TYPE-2　(c) 圧縮強度比 TYPE-1　(d) 圧縮強度比 TYPE-2

図 4.2.5.10 解析結果（3 辺単純支持 1 辺自由板）

b) 解析結果

解析結果の１例を**図 4.2.5.9** および**図 4.2.5.10** に示す．横軸は腐食前の板厚を用いて算出した幅厚比パラメータ R を，縦軸には無次元化強度 Nu/Ny および腐食前の強度に対する腐食後の強度の比 Nu*/Nu を示している．最大腐食の位置により強度の低下の度合いは異なり，側辺部に最大腐食位置があるモデルの方が中央部や自由辺部に最大腐食位置があるモデルに対して強度の低下が大きい．これは，座屈後の側辺部での応力分担の割合が多く，その部位での板厚減少が終局強度に与える影響が大きいためである．また，幅厚比パラメータが大きくなるにしたがって終局強度の変動量が大きくなるが，幅厚比パラメータが 0.7 付近を越えると変動量は小さくなり，特に中央部は自由辺部に最大腐食位置があるモデルについてその傾向が顕著である．これは，幅厚比パラメータが十分に小さいモデルでは板の座屈の影響が小さいため断面積の欠損量にほぼ比例して強度が低下するのに対して，幅厚比パラメータが大きくなると断面積の欠損による影響と座屈による負担応力の減少の影響により極限強度が大きく低下する．さらに幅厚比パラメータが大きくなると腐食前においても板の弾性座屈により負担できる応力が小さいため，板厚減少の影響が小さくなると考えられる．

なお，解析モデルでは，腐食面は片面の場合と両面に均等に生じている場合を考慮している．多くのケースでは両面腐食より片面腐食の方が強度低下が大きいが，3 辺単純支持 1 辺固定板の TYPE2 においては逆に両面腐食の方が強度低下が大きい．これは，解析モデルに与えた初期たわみと腐食形状の相互関係により変化するものと考えられる．

以上の結果より，腐食形状，最大腐食の生じる位置および腐食前の幅厚比パラメータが腐食による極限強度の低下に影響を及ぼすことが明らかになった．これらの解析モデルでは，鋼板の座屈波形と一致するような腐食波形を考慮しているため，実際の腐食形状に対して安全側の評価がされていると考えられるが，腐食形状の変動の幅が小さい全面腐食と見なせるようなケースに対しては，過度に安全側の評価となる可能性があり，実際に起こりうる腐食形状を想定した場合には，板厚の変動やばらつきを考慮して補正することが必要となる．

(4) 腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法 [3)]

a) 解析モデルと結果

腐食鋼板の実用的な性能評価法の構築のために，応力伝達軸方向および直交方向の板厚分布性状が圧縮強度に与える影響を調べた．応力伝達軸方向のみに板厚が変化するケース(縦波モデル)，直交方向のみに板厚が変化するケース(横波モデル)および，その双方ともに変化するもの(縦横波モデル)を考慮し，それぞれ板厚変動の波数を 1/2，1，2，5，10 波と変動させ，幅厚比パラメータは 0.5，1.0，1.5 となるように平均板厚を設定し，最大，最小板厚が平均板厚から±10%，±30%，±50%，±80%となるように板厚変化率を変動させて解析モデルケースを設定した．

解析の結果，縦波モデルにおいては，板厚の変化率が大きくなるにしたがって断面積の減少により最大耐力が低下するが，板厚変動の波長が短くなるにつれて耐荷力の低下量が減少することがわかった．横波モデルにおいては，板の側辺部が厚い場合は圧縮耐力は上昇し，薄い場合は減少し，(3)で述べた解析結果の傾向と一致する．しかし，波数が多くなるほど大きな差異が無くなることがわかった．

b) 簡易評価法

縦波モデルの耐荷力の低下は断面積の減少によって起こると考えられる．そこで，応力伝達軸方向に対しては最小断面における平均板厚で評価することとする．横波モデルに対しては，**図 4.2.5.11** に示すように板を側辺部と中央部分に分割してそれぞれの平均板厚に対して重み付けをして有効板厚の評価を補正することとする．両側辺からそれぞれ 1/2αb を側辺部分，それ以外を中央部分と定義し，側辺部分の平均板厚を t_1，中央部分の平均板厚を t_2 とする．t_1，t_2 のそれぞれに対して重み β_1，β_2 を乗じて有効板厚 t_{est} を次式で表す．

$$t_{est} = \alpha \cdot \beta_1 \cdot t_1 + (1-\alpha) \cdot \beta_2 \cdot t_2 \qquad (4.2.5.3)$$

α を 0.3～0.7，β_1 を 1.0～2.0 まで 0.1 間隔で変化させて，横波モデルの解析結果を整理した結果 α=0.6，β_1=1.4，β_2=0.4 のときに平板の解析結果と比較的一致する結果となった．更に，実腐食形状を用いて解析を行った結果からは，平均板厚で評価すると平板の耐荷力曲線に対してばらつきが大きく，ほぼ危険側の結果となることがわかった．**図 4.2.5.12** に最小断面の平均板厚，および式(4.5.3)により補正した後の結果を示す．最小断面の平均板厚で評価した結果でも安全側に比較的よく推定できており，補正をおこなった結果は若干ばらつきを小さく評価できていることから，評価法の有効性が伺える結果となっている．

(5) 現状の問題点と課題

圧縮強度等の評価法として，平均板厚，板厚の標準偏差，平均偏心量を用いる方法と軸方向および直角方向の板厚分布を考慮した圧縮強度の推定法を紹介した．それぞれの推定した腐食形状に対して評価法の有効性は確認されたが，実際の構造物の腐食形状は多様であり，精度良く強度を推定するためには実構造物の腐食形状のデータの蓄積と板厚変動が鋼板の力学的挙動に与える影響を詳細に調査する必要がある．

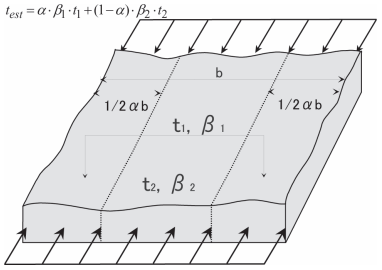
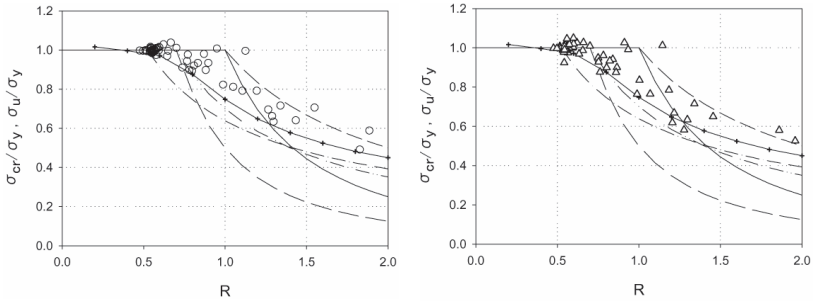


図 4.2.5.11 強度推定法の概念図



(a) 最小断面平均板厚で評価　　(b) 板厚分布を考慮して補正

図 4.2.5.12 腐食を有する鋼板の強度推定結果

【参考文献】

1) 海田辰将，藤井堅，中村秀治：腐食したフランジの簡易的な圧縮強度評価法，土木学会論文集，No.766/Ⅰ-68，pp.59-71，2004.
2) 西村佳大，竹内正一，村上茂之，西村宣男：腐食損傷を有する圧縮板の極限強度解析法，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.123-128，2004.
3) 杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿：腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討，土木学会論文集A，Vol.63，No.1，pp.43-55，2007.1.

4.3 鋼構造物の耐荷力評価

4.3.1 鋼橋

(1) 概要

鋼橋における代表的な腐食部位のうち，最も腐食しやすい部位は桁端部と主桁下フランジおよびその近傍の腹板や垂直補剛材である．桁端部については風通しの悪く湿気のこもり易い部位であり，伸縮継手からの漏水などの原因もあって腐食が生じやすい．端部以外の一般部での下フランジ部については，床版からの漏水などで腐食の生じた事例が多い．また，床版と接する上フランジに腐食の発生が確認される事例もある．これを模式的に示すと**図4.3.1.1**のようになる．

このように腐食が進行した桁の耐荷力を検討する場合，一般には下記の観点での検討が必要と考えられる．

- 桁の曲げ耐力
- 桁端に近い腹板のせん断座屈耐力
- 中間支点に近い断面の曲げ・せん断座屈耐力
- 桁端部における支点上の座屈耐力

本節では，プレートガーダーに着目して桁の曲げ耐力，せん断耐力，および支点部の耐荷力の算定方法について紹介することとする．

(2) 曲げ耐荷力[1)]

a) 曲げ耐荷力実験の概要

腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度については，引張フランジの断面欠損による強度低下の他，圧縮フランジの局部的な腐食による横ねじれ座屈（局部座屈）に起因した桁の崩壊が懸念される．約100年間供用後，腐食により撤去された鋼プレートガーダーから供試体を2体作成して曲げ実験を行い．とくに圧縮フランジに顕著な腐食損傷が認められる場合の終局曲げ挙動について調査した．2 体の供試体は桁端(供試体A)および支間中央(供試体B)から切り出したもので，圧縮側の座屈に起因する崩壊形式となるよう引張側のフランジは新規部材に交換する等の加工を施している．供試体は加工後，錆を除去し，下フランジおよびウェブの腐食形状を測定している．測定は非接触式の3次元座標計測器を用いて行い，腐食表面の座標データは2㎜メッシュの等間隔データに修正した．

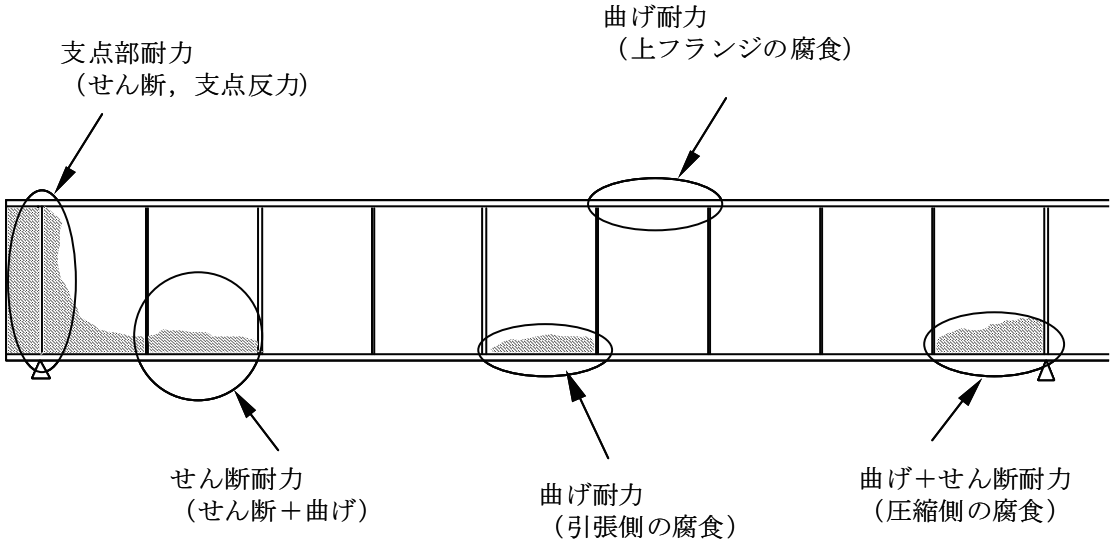


図4.3.1.1 腐食の発生部位と耐力

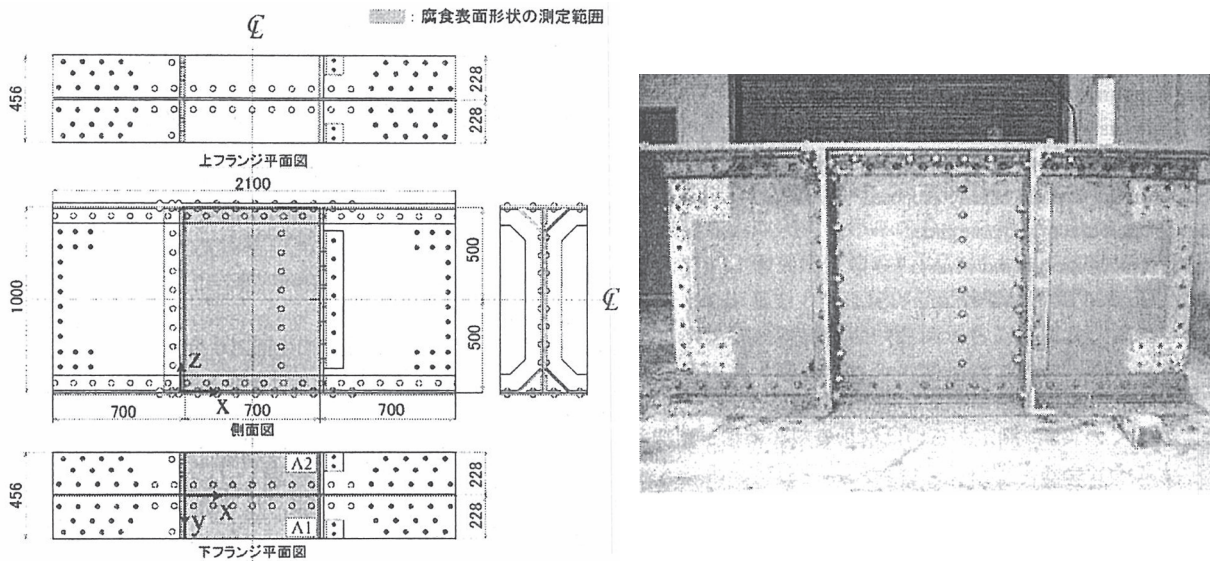


図 4.3.1.2 供試体の寸法と外観

表 4.3.1.1 板厚測定結果

		健全時板厚 t_{max}(mm)	平均板厚 t_{avg}(mm)	平均腐食量 Z_{avg}(mm)	最小板厚 t_{min}(mm)	標準偏差 σ_t(mm)
供試体A	ウェブ	10.50	9.89	0.61	8.47	0.16
	フランジA1	10.50	8.52	1.98	0.00	1.73
	フランジA2	10.50	8.60	1.90	2.48	0.96
供試体B	ウェブ	10.50	9.75	0.76	8.39	0.16
	フランジB1	10.00	8.81	1.19	6.10	0.28
	フランジB2	10.00	8.12	1.88	3.43	0.68

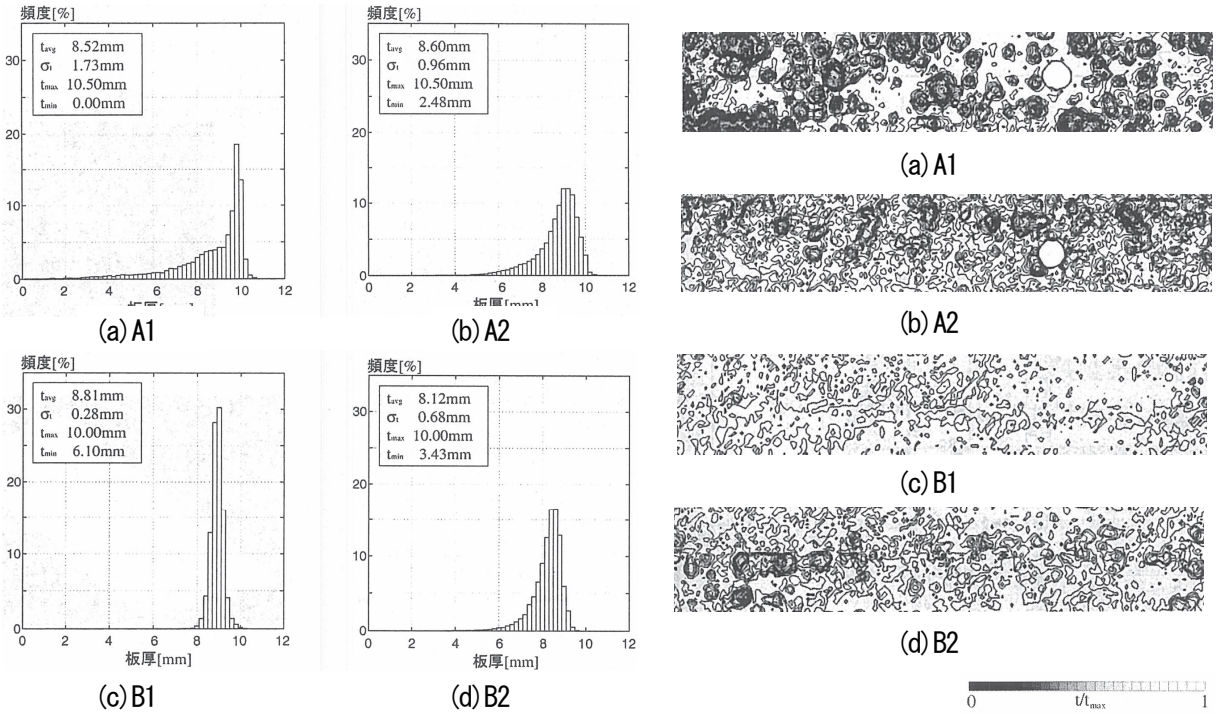


図 4.3.1.3 フランジの板厚等高線図とヒストグラム

表 4.3.1.1 に板厚の測定結果を，**図 4.3.1.3** に供試体フランジの板厚等高線図とヒストグラムを示す．測定結果から，フランジの方がウェブよりも平均腐食量，標準偏差の値ともに大きいことがわかる．また，供試体 A と供試体 B のフランジを比較すると，供試体 A の方が B よりも腐食が進んでおり，標準偏差が大きい，これは供試体 A が桁端に近い場所にあり，支間中央部よりも腐食が進行しやすい環境にあったためと考えられる．また，フランジ A2, B1, B2 ではほぼ同程度の腐食がフランジの全面に分布している状況が確認されたが，フランジ A1 はとくに腐食が進行しており多数の孔食が生じている状態であることがわかる．

b) 実験結果

図 4.3.1.4 に荷重ーたわみ関係を示す．縦軸はジャッキ 2 基の荷重値の平均，横軸は桁の鉛直変位を示す．供試体 A，B ともに荷重 800kN 付近でたわみが急増し，桁の剛性が低下していることがわかる．この時，ウェブに貼り付けたひずみゲージの値からはウェブの縁応力は降伏値に達していないことが確認でき，圧縮フランジの座屈により桁の剛性が低下したと考えられる．その後供試体 A，B ともにほぼ同じ傾きで荷重は増加し，終局状態では，**写真 4.3.1.1** に示すような圧縮フランジのねじれ座屈が確認された．

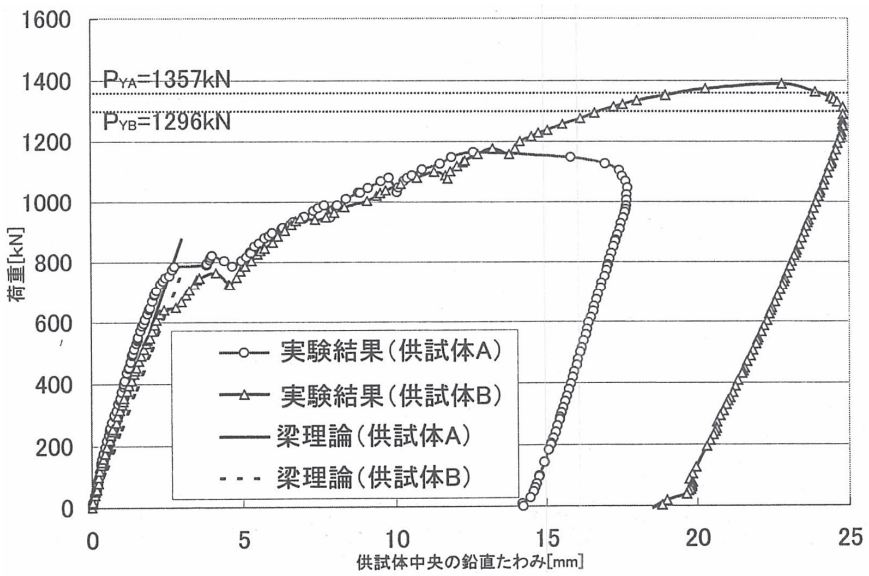


図 4.3.1.4 荷重ーたわみ関係

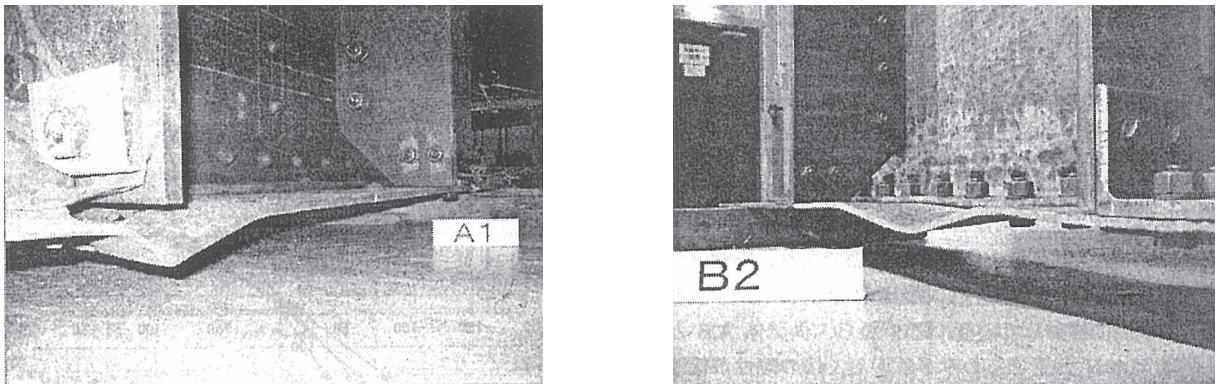


写真 4.3.1.1 フランジの座屈崩壊性状

c) 腐食したプレートガーダーの曲げ強度評価

圧縮フランジのねじれ座屈強度を本報告書の「4.2.5 板」の項にて提案した方法で推定し，その結果を用いて梁理論より腐食したプレートガーダーの曲げ強度を評価する．強度評価法の概要を以下に示す．

① 圧縮フランジの A1, A2, B1, B2 における平均板厚，標準偏差，および平均偏心量を求める．

② 有効板厚 $t_R = t_{avg} + 2\sigma$ を用いて幅厚比パラメータ R を計算し，腐食のない鋼板の座屈強度より鋼板の座屈強度曲線からそれぞれの圧縮強度 σ_u/σ_y を求める．

③ 各供試体フランジの圧縮強度 σ_u/σ_y を用いて梁理論から終局曲げモーメント M_u を次式で算定する．

$$\sigma_u = \frac{M_u}{I} y \qquad (4.3.1.1)$$

ここで，y：中立軸からフランジまでの距離，I：断面 2 次モーメントであり，断面諸量や中立軸の位置の計算にはフランジおよびウェブの平均板厚を用いる．

上記の方法により各供試体の終局曲げモーメントを推定した結果を**表 4.3.1.2** にまとめて示す．表からは本評価法による終局曲げモーメントの推定結果は実験結果よりも低い結果になった．これは，実験に使用した供試体がリベット橋でありフランジとウェブの接合辺が山形鋼にて固定されているため，フランジの回転を拘束していることに起因すると考えられる．フランジのねじれ座屈を求める際，3 辺単純支持 1 辺自由の境界条件を想定しているため，山形鋼による回転変形の拘束効果を考慮すると，本評価法ではフランジのねじれ座屈強度を低めに推定してしまっていると推定できる．

表 4.3.1.2 強度推定結果

フランジ	有効板厚 (mm)	e_{avg}/t_{avg}	幅厚比パラメータ R	σ_u/σ_y	M_u(推定値) (kN・m)	M_u(実験値) (kN・m)
A1	11.98	2.08	1.19	0.80	2157	2392
A2	10.52	1.17	1.36	0.70	1887	
B1	9.37	0.06	1.53	0.67	1948	2855
B2	9.46	0.40	1.52	0.67	1948	

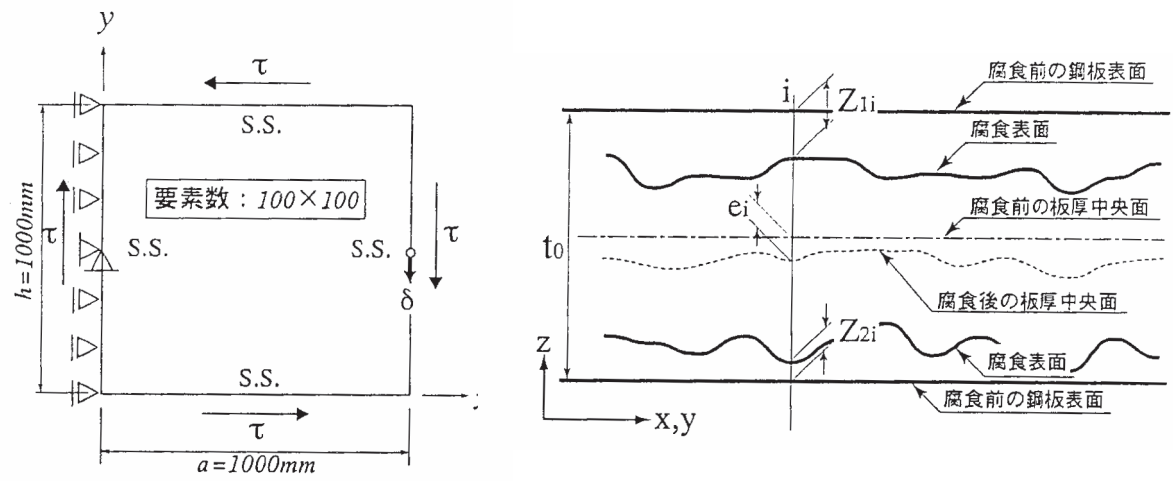


図 4.3.1.5 腐食鋼板のせん断強度解析モデル

(3) せん断耐荷力[2)]

プレートガーダーの腐食で最も多い損傷箇所は，せん断力の卓越する支承部付近であることを考えると，腐食鋼板のせん断強度評価法を確立することは工学的に重要な課題である．有限要素法によるせん断強度解析と102年供用後，著しい腐食のため撤去されたプレートガーダーを用いてせん断強度試験を行った結果よりせん断強度評価法を検討する．

a) 腐食鋼板のせん断強度解析

図4.3.1.5に解析モデルを示す．境界条件は面内方向変位については，辺x=0でx方向変位を拘束し，点(x, y)=(0, a/2)でy方向変位を拘束した．面外方向変位は周辺単純支持とし，荷重条件はモデルの周辺にせん断応力τを作用させた．

腐食鋼板のせん断強度評価に用いる統計量を検討するために，**表4.3.1.3**に示すモデルの解析をおこなった．表中B1は板厚8mmの腐食のないモデルであり，C1～C3については平均板厚のみが8mmで等しく，標準偏差や平均偏心量などの他の統計量はそれぞれ異なっている．解析結果としては，C1～C3のモデルの極限強度はτ_u/τ_y=0.74であり，3ケースともほぼ一致している．また，これらの平均板厚と同じ板厚を有する腐食のないモデルB1の強度とも一致しており，これは腐食表面の凹凸状況に関係なく平均板厚だけて強度が決まる，すなわち腐食の無い鋼板のせん断強度を用いて腐食鋼板のせん断強度を推定できる可能性を示している．

なお，モデルC1～C3のそれぞれの平均偏心量e_{avg}の大きさが異なっていることから，圧縮を受ける場合と異なり，せん断を受ける鋼板の場合は腐食にともなう板厚中心面の変化が強度に与える影響は小さいと判断できる．

表4.3.1.3 解析モデルの各統計量

解析モデル	t_0(mm)	t_{ave}(mm)	σ_t(mm)	e_{avg}(mm)	t_{max}(mm)	t_{min}(mm)	τ_u/τ_y
B1	8.00	8.00	0.00	0.00	8.00	8.00	0.74
C1	10.00	8.00	1.00	1.00	10.00	1.85	0.75
C2	9.00	8.00	0.50	0.50	9.00	4.10	0.74
C3	10.00	8.00	0.29	0.00	8.74	6.19	0.74

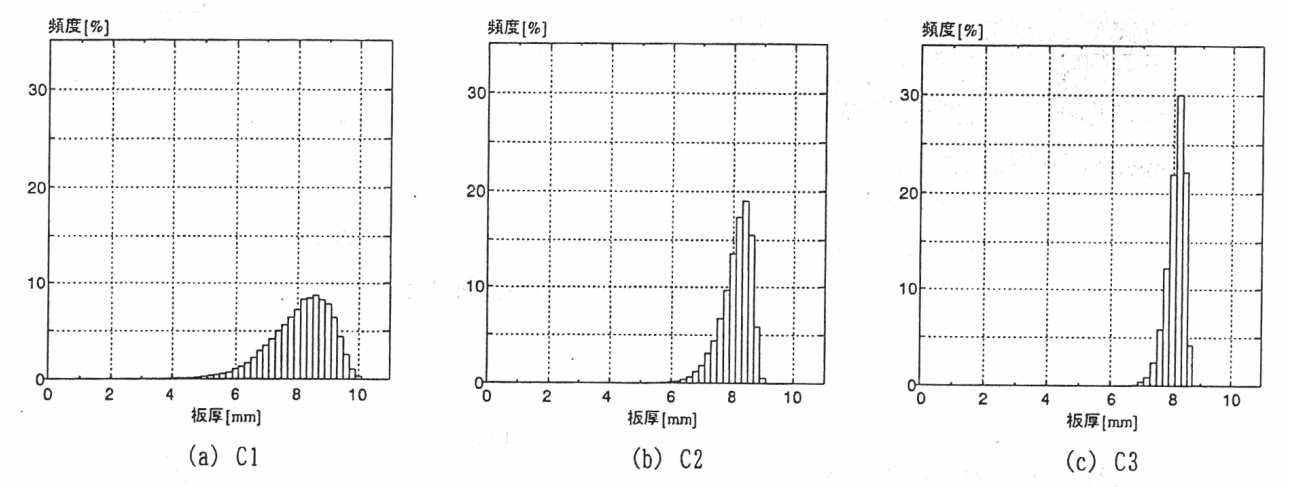


図4.3.1.6 解析モデルC1～C3の板厚ヒストグラム

b) 腐食したプレートガーダーのせん断強度実験

せん断強度試験は，著しい腐食のために撤去された6径間単純支持プレートガーダー橋(総リベット桁)の主桁の一部を供試体として使用した．**図4.3.1.7**にせん断強度試験の概略および測定機器の配置を示す．

載荷は，2940kN 油圧ジャッキを用いて行い，着目ウェブに作用する曲げの影響をできるだけ抑えるため，図に示すように支点Aの近傍の垂直補剛材上で1点集中荷重載荷とした．

せん断強度試験の結果，**図 4.3.1.8** に示すように荷重 2000kN 付近より急激に変位が増大し，最高荷重2289kN で着目ウェブのせん断座屈により桁が崩壊した．(**写真 4.3.1.2**) ウェブの面外たわみは最高荷重に達する直前に急増しており，ウェブに取り付けたひずみゲージの値も，多くが最高荷重時に塑性ひずみに達していた．これらのことから，ウェブは塑性せん断座屈により崩壊したと判断できる．

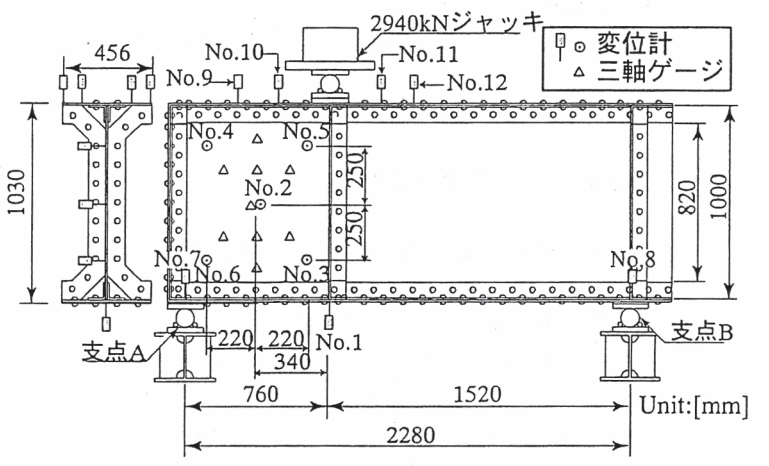


図4.3.1.7 せん断強度試験の概略および測定機器の配置

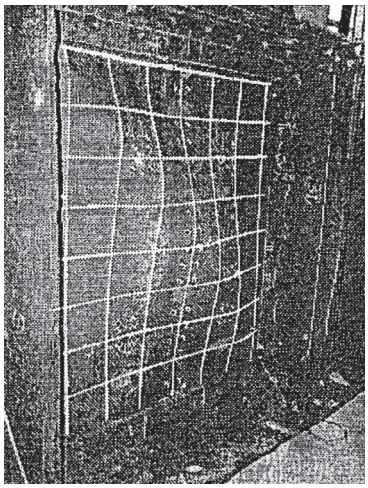


写真4.3.1.2 崩壊性状

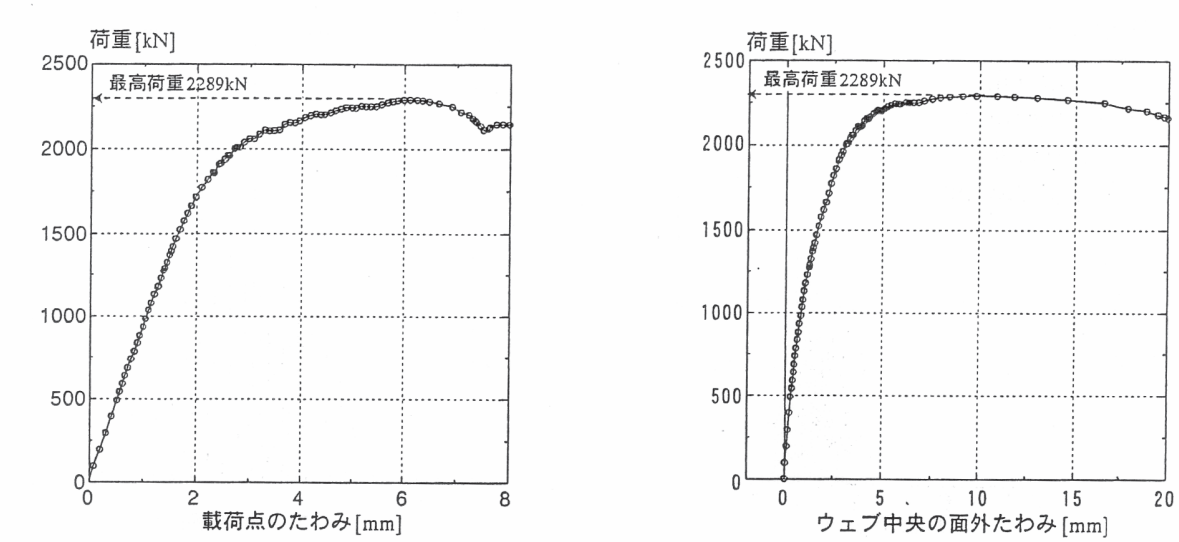


図4.3.1.8 荷重-たわみ関係

c) 腐食したプレートガーダーのせん断強度評価法

腐食鋼板の残存強度評価法としては，簡単で高精度のものが望ましいため，腐食のない鋼板の座屈強度曲線を用いた腐食鋼板のせん断強度評価法を検討する．**図 4.3.1.9** には，腐食鋼板の解析結果，実験結果を示す．図の縦軸は極限せん断強度 τ_u/τ_y を，横軸は幅厚比パラメータ R を示している．

$$R = \frac{b}{t_R}\sqrt{\frac{12\left(1-\nu^2\right)\sigma_y}{\pi^2 k}} \qquad (4.3.1.1)$$

ここで，

b：フランジの幅，t_R：幅厚比パラメータを求めるための有効板厚，σ_y：降伏応力，E：弾性係数，

ν：ポアソン比，k：アスペクト比αから求められる座屈係数である．

図 4.3.1.9 にプロットした腐食鋼板の解析結果および実験結果は τ_u/τ_y および式(4.3.1.1)の板厚 t_R に，それぞれ平均板厚 t_{ave} を適用したものである．図からは平均板厚を用いて幅厚比パラメータを求めると，腐食鋼板の解析結果および実験結果は，腐食の無い鋼板の座屈強度曲線によく一致していることがわかる．

また，本節で紹介した解析および実験例については，ウェブ全面に腐食による減厚が生じた事例を前提にしているが，実橋の腐食事例においては支点付近に局部的に減厚が生じている事例が多く見られる [3]．このような事例については，ウェブの下側 1/3 を切削することにより腐食を模擬した模型桁を製作し，載荷実験と弾塑性有限変位解析により検討を行った事例 [4]や，典型的な腐食パターンを与えたプレートガーダーのパネルを模したモデルに，せん断力が作用する場合の極限強度を断塑性有限変位解析によって求め，腐食パターンが極限強度に与える影響について検討を行った事例 [5]がある．これらの結果からは終局時に斜張力場となる領域に腐食による減厚がある場合にせん断強度の低下が大きく，最大荷重は斜張力場における局所的な平均板厚にほぼ比例することが明らかにされている．

以上の結果より，腐食したプレートガーダーのせん断強度はウェブの平均板厚を求めることにより腐食のない鋼板の座屈強度曲線を使って推定することが可能であると考えられる．ウェブに局部的な腐食による減厚がある場合については，**図 4.3.1.10** に示す斜張力場が生じる領域の平均板厚を求めれば良い．

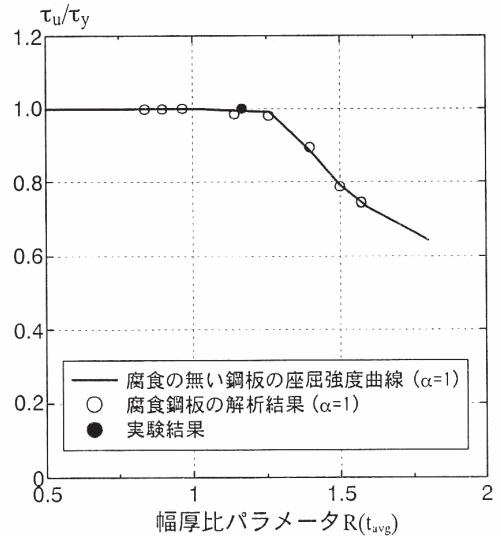


図 4.3.1.9 平均板厚を用いた座屈強度曲線

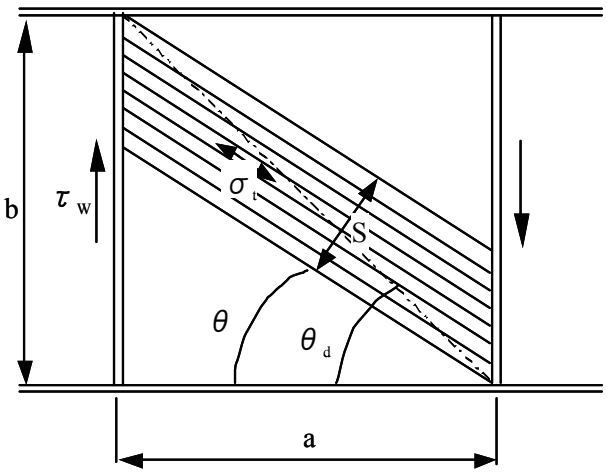


図 4.3.1.10 終局耐力時の斜張力場

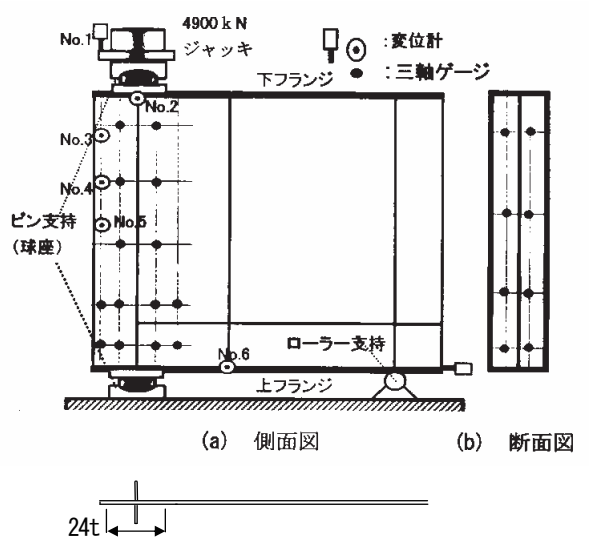


図 4.3.1.11 支点部の耐荷力実験供試体

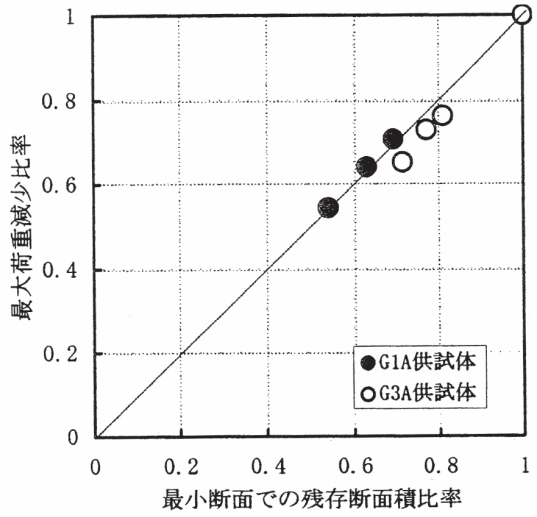


図 4.3.1.12 荷重減少比率と残存断面積比率

(4) 支点部の耐荷力[6)]

支点部の圧縮に関しては，腐食が原因で架替えとなった実鋼橋の支点部を切り出して供試体とした載荷実験(**図 4.3.1.11**)および解析した結果によれば，支点部の終局状態は桁端部の局部座屈として生じる．

桁端部の圧縮耐力は端補剛材断面およびウェブのうち端補剛材取付部からウェブ板厚の 24 倍を有効断面積として柱として支持するものと考える．この柱部分における腐食した断面積と元の断面積の比が腐食により減少した断面の圧縮耐力と元の断面の圧縮耐力の比に近いことから，最小腐食断面積を求めれば腐食した桁端部の圧縮耐力を推定することが可能となる．

(5) プレートガーダーの耐荷力評価法の課題

本節では，プレートガーダーの曲げ強度、せん断強度および桁端部の圧縮耐荷力の算出方法について現時点での研究成果を紹介している。それぞれの作用する断面力において強度の低下の要因となる統計量が明らかにされつつあり，簡易的な強度評価手法が提案されている．

腐食の形態は多種多様であり，これまでそれぞれの腐食形態について充分な検討がなされてこなかったことから，部材の耐荷性能に及ぼす腐食の影響を適切に評価する手法としての，計算応力度を算出するための断面性能の評価手法や不均一な板厚や局所的な凹凸を有する板，部材の強度評価手法について，現時点では充分に整理されているとは言い難い．

腐食部材の強度評価については，部材を構成する板要素の腐食による強度低下が部材全体の挙動に与える影響について系統立てて整理することが今後の重要な検討課題と考えられる．

また，鋼橋は種々の部材が立体的に組み合わされた 3 次元の構造物であることから，一部の部材の腐食が生じた場合には，一般的に隣接する健全な部材が腐食部材を補うように各部材間で内力の再分配が行われ直ちに危険な状態になるとはいえない，このような橋梁全体システムとしての評価に関してもまだ充分な検討がなされておらず今後の検討課題と考えられる．

【参考文献】

1) 海田辰将，藤井堅，宮下雅史，上野谷実，中村秀治：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.139-148．2005.3.

2) 海田辰将，藤井堅，原孝志，中村秀治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，pp.121-130，2004.3.

3) 中山太士，木村元哉，石川敏之，松井繁之：ウェブ孔食を持つ鋼桁のせん断耐荷力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.49-56，2006.3.

4) Vo Thanh Hung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析，構造工学論文集，Vol.48A，2002.3.

5) 竹内正一，西村佳大，西村宣男：腐食損傷を有する鋼板の極限強度特性に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.129-134，2004.11.

6) Vo Thanh Hung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/Ⅰ-60、pp.141-151，2002.7.

4.3.2 港湾施設(海洋構造物)

(1) 港湾鋼構造物の腐食と耐荷力評価

海洋環境下における鋼構造物の腐食形態は、陸上の橋梁等の鋼構造物とは異なった形態を示す。様々な防食工法及び使用環境の違いにより、一般的な全体腐食に加えてマクロセルによる局部腐食（孔食）や浮遊物の衝突による防食工のダメージやサンドエロージョンによる磨耗等が発生し、防食工の劣化および鋼構造部の板厚減少・鉄筋の断面損傷が見られる.

図 4.3.2.1 は、海洋鋼構造物で一般形式として用いられている直杭式桟橋の概要と腐食劣化に対する耐荷力評価の項目を示したものである。

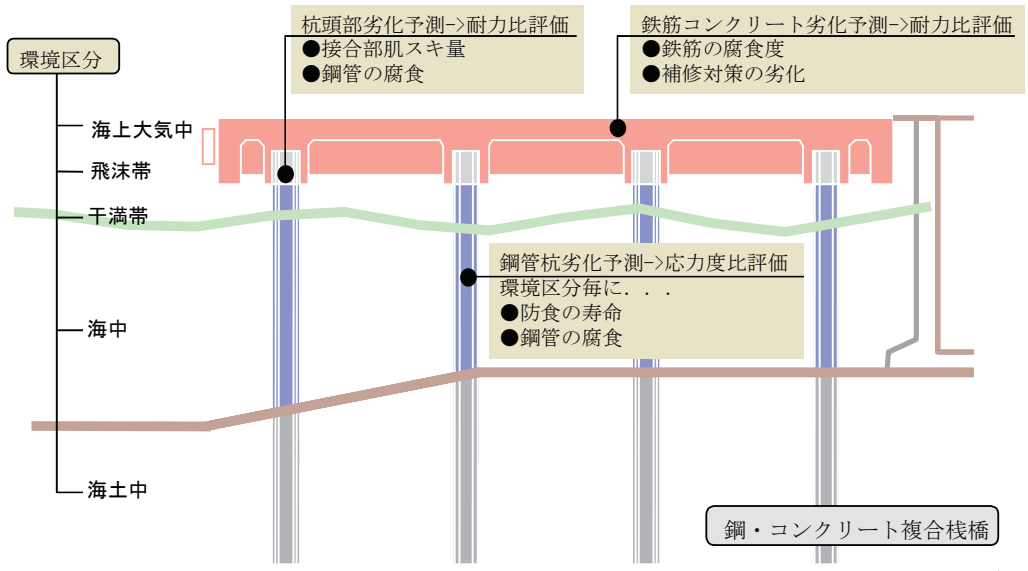


図 4.3.2.1 直杭式桟橋の劣化耐荷力評価項目

写真 4.3.2.1 に港湾鋼構造物の腐食代表例として、鋼管式構造物（鋼管桟橋）・鋼矢板式構造物（シートパイル岸壁）の腐食例[1),2)]を示す。図 4.3.2.2 および図 4.3.2.3 に示す模式図のように、平均海水面直下の腐食が進行することで、鋼管式構造物では構造物の陥没、鋼矢板式構造物では裏込め土砂の流失が起こる.



（全面腐食）



（局部腐食，集中腐食）

写真 4.3.2.1　桟橋鋼管杭の腐食

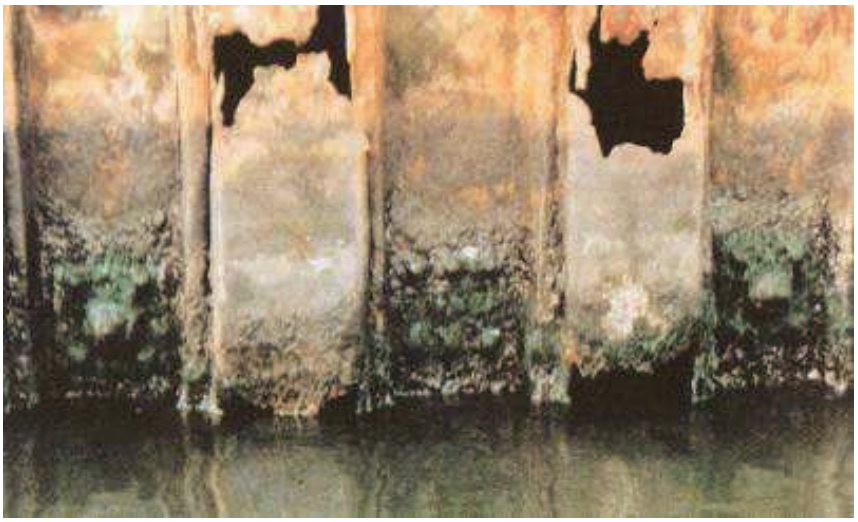


写真 4.3.2.2　岸壁シートパイルの腐食

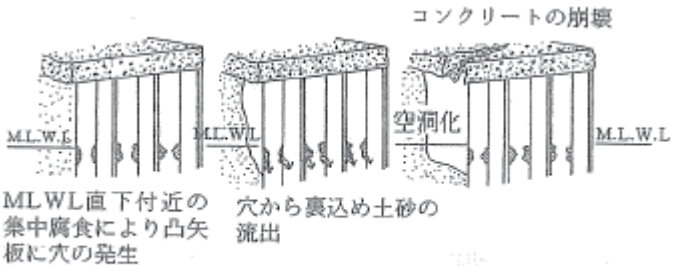


図 4.3.2.2　鋼矢板式構造物の集中腐食による被害

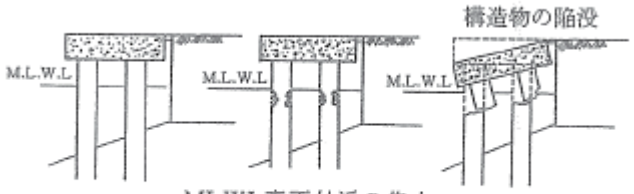


図 4.3.2.3　鋼管杭式構造物の集中腐食による被害

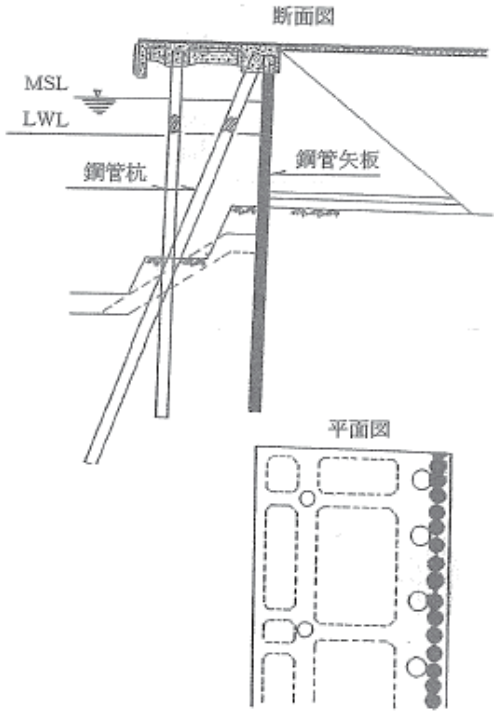


図 4.3.2.4　構造形式による集中腐食発生部位について

(2) 港湾構造物強度評価

a) 現行の経年劣化港湾鋼構造物の強度評価

現行の港湾構造物は、許容応力度法と安全率を用いて設計されており、経年劣化した構造物についても、残存強度を残存鋼鈑板厚や鉄筋量に部材諸元を置き換え構造物の強度を解析し、部材別に許容応力に対する強度低下率または安全率の低下率を計算して評価している。

（財）沿岸開発技術センター発行の港湾構造物の維持補修マニュアル [2] には、腐食した港湾鋼構造物の強度評価は、構造形式，腐食範囲，腐食程度(肉厚)等に応じて構造物に要求される耐力等の機能が保持されるかどうか、適切な方法により以下のように確認することが要求されている。

・腐食した鋼構造物の強度評価は、腐食範囲が部分的であるか全体的に広がっているかに応じて適切な方法を用いる。部分的に腐食が発生し局部的に肉厚が減少している場合、平均応力的に問題がなくても、その箇所での応力集中や疲労破壊の危険性が増すので注意が必要である。測定された肉厚に基づいて腐食パターンをモデル化し、そのモデルに従って変断面構造としての構造計算をおこなう。

・杭式構造物の耐荷力評価は、杭の腐食調査結果に基づいて、腐食量及び杭の鉛直方向腐食プロフィール，杭断面の腐食プロフィール，桟橋法線直角方向における鉛直方向の腐食プロフィールの変化をモデル化して解析する。

杭の鉛直方向の腐食プロフィールは、図 4.3.2.5，図 4.3.2.6 に示すモデル化例 [2] のように分類される。

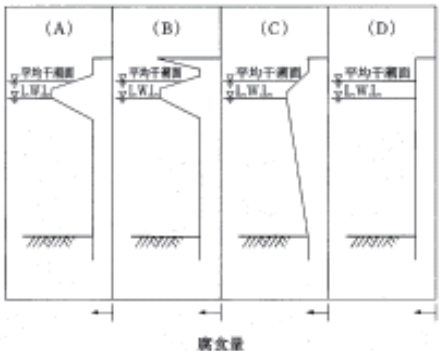


図 4.3.2.5 鋼管杭の鉛直方向プロフィルの分類

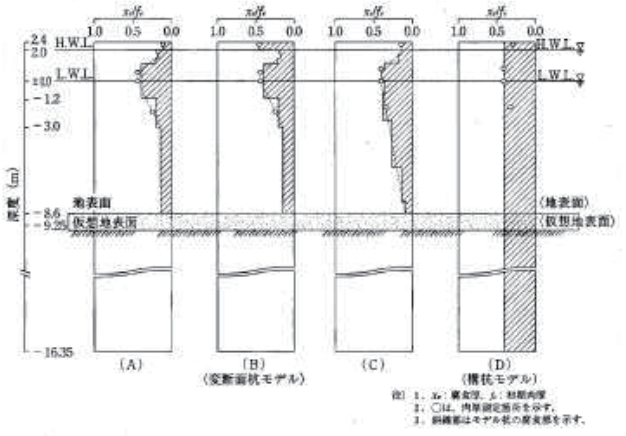


図 4.3.2.6 鋼管杭の鉛直方向プロフィールのモデル化例

・矢板式構造物の強度評価も、杭式と同じく腐食による減少板厚差に大きく影響されるため、海水中の測定箇所は、矢板の最大曲げモーメント発生点と、その上方 0.5m～1.0m の腐食残存板厚の測定を精度良く行い、矢板の鉛直方向腐食プロフィール，矢板の断面の腐食プロフィール，構造物の法線直角方向における矢板鉛直方向の腐食プロフィールの変化を

モデル化して解析する。

一方、研究ベースでは、長期間使用された桟橋の腐食劣化鋼管杭の強度試験と腐食形態を模擬した FEM モデルで腐食鋼管杭の最終強度を評価している。残存平均板厚を腐食凹凸の無い一様板厚の鋼管でモデル化した部材との強度比較を行い、鋼管杭の最終強度は、残存平均板厚から、残存板厚の標準偏差の整数倍を減じた有効板厚で、評価する断面の全断面降伏による塑性崩壊によって決定するとされてきた[3)]。また、局部座屈が発生する場合でも、塑性崩壊強度と局部座屈発生強度は大差がないといった扱いがなされている。

b) 桟橋構造物の経年劣化強度評価例

港湾鋼構造物の代表例として(財)沿岸開発技術センター発行の港湾構造物設計事例集[4)]に示されている直杭式横桟橋構造をモデルとし、腐食劣化時の最終強度解析例[5)]を紹介する。

この例での杭は、D/t も大きく、且つ腐食による減厚が発生して、塑性崩壊強度に至る前の局部座屈の発生による、最終強度の低下を考慮すべきケースを想定した。座屈発生予想箇所をシェル要素で、その他の部位をビーム要素で定義した図 4.3.2.7 に示す杭を設定する。上載荷重を加えた後、杭頭水平変位を単調に増加させたときの、杭頭水平荷重 H と水平変位の関係を梁モデルと梁・シェル混合モデルで対比して示す。結果として、曲げモーメントは杭頭で最大となっている。

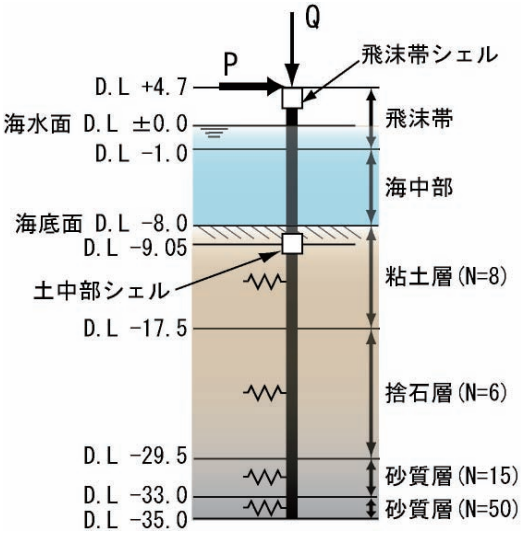


図 4.3.2.7 梁・シェル混合単杭モデ..

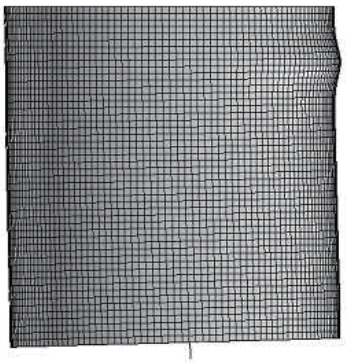


図 4.3.2.8 筒壁の局部座屈

梁・シェル混合モデルでは、杭頭が降伏後、その曲げ圧縮側に図 4.2.8 に示すような筒壁の局部座屈が発生すると、ほぼ直後に耐荷力が低下し始める。水平変位の増加と共に地中部にも塑性ヒンジが形成するが、局部座屈による耐力低下を補うだけの余剰強度はなく、杭頭の局部座屈と共に杭全体としての最終強度に達する。4.3.2.9 に示すように最終強度

は局部座屈を考慮しない梁モデルに比べてかなり低下している。このことは、鋼管杭の外径・板厚比が比較的大きい場合、腐食なしの状態でも、最終強度に対する筒壁の局部座屈の影響を無視できないことを示している。

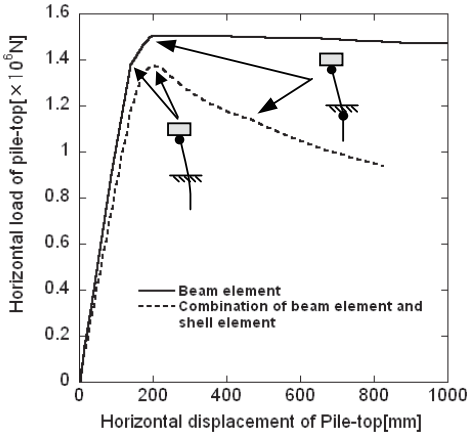


図 4.3.2.9 杭上端水平変位と、杭上端に与えた水平荷重との関係

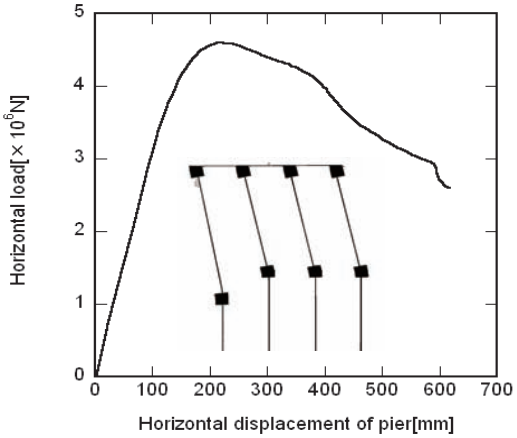


図 4.3.2.10 桟橋水平荷重と水平変位の関係

次に、上記桟橋構造のすべての鋼管杭を梁・シェル混合モデルでモデル化して全体構造のプッシュオーバー解析を行った。図 4.3.2.10 に水平荷重と水平変位の関係を示す。

４つの杭は、上載荷重、断面寸法、有効杭長は個々に異なるが、水平荷重の作用下では、ほぼ同じ水平変位の時点で、各杭の杭頭に局部座屈を生じて最終強度に達し、同時に構造全体としての最終強度に達した。最終強度時点では、地中部の降伏はわずかであるが、その後水平変位の増加と共に地中部にも降伏が広がり、次いで局部座屈が発生して耐力が更に低下する。一方、最終強度時の鋼管杭先端の圧縮軸力は地盤耐力で設定した極限圧縮支持力より小さく、引き抜き力の発生はない。すなわち鋼管杭の沈下・引き抜きは生じない。

これらの結果から、対象桟橋構造物は、鋼管杭の崩壊によって全体崩壊に至ること、また各鋼管杭は杭頭に降伏および局部座屈が生じた時点で最終強度に達すること、さらに全体構造の最終強度は各鋼管杭の最終強度の和で近似的に推定できることが判明した。

したがって、各杭において同様の腐食が進行すれば、最も破壊確率の低い１本の崩壊が生じた時点で全体崩壊が起こると判断できる。したがって、腐食劣化した構造物の破壊確率は、同じく腐食劣化した各杭ごとに算出した破壊確率の上限値とみなすことができる。

C) 海外の海洋鋼構造物の強度評価および耐荷重

米国のメキシカンガルフ、ヨーロッパの北海、アラビア沖で使用されてきた、海底資源掘削用海洋プラットフォーム構造物については、耐用年数以上に使用されてきた物や、経年劣化及び事故により途中ダメージを受けたり，荷重条件が設計状態と異なって使用され

る等、その継続使用に当たって残存強度の評価を要求されることが多くなっている。

米国では、海洋構造物の設計・技術基準として使われている API(アメリカ石油協会　基準)に、第２０次設計基準以前の基準で設計された古いプラットフォーム構造物に対して、残存強度及び安全性の評価を行う要領が API RP2A- WSD（アメリカ石油協会の Offshore Structure 設計基準）に規定されている。

同基準には、構造物の重要性や人的被害リスクの程度等でリスクレベルを階層化し、強度評価フローや構造物に負荷する１００年超過確率荷重に対する作用力割合を設定する等の具体的な解析方法と、補修や補強の必要程度を規定している。

また、構造物の残存強度の評価では、腐食劣化部材は、劣化減少した計測平均板厚に置き換え、衝突や落下によるダメージで凹み部を持つ部材は、断面強度を一定割合で減じて部材力を評価し、構造物全体のプッシュオーバー解析で汎用の構造解析ソフト(INTRA, USFOS 等)を活用して最終強度や破壊確率を評価することが一般的に行われている。

次に、その汎用プログラムの一例として、ノルウェーで開発され北海で使用されている非線形有限要素構造解析プログラム USFOS を使用して、北海の６基の既存海洋ジャケットの強度評価を行った資料[7]より、強度解析方法の基本的な考え方を紹介する。

本プログラムは、構造物への過荷重に対して、鋼管骨組構造物に部材の座屈および降伏を生じさせ、逐次的に崩壊する挙動を追うことができ、構造に杭を含めた一体化解析が可能である。特に、海洋ジャケット構造物の最終強度解析に多くの使用実績を有する。

USFOS の特長は、一般の有限要素解析と同様に骨組構造を梁有限要素でモデル化する。ただし高次の変位関数を使用することにより、ジャケットのブレースであれば１部材について１要素と非常に少ない要素数でモデル化できる。断面の降伏の判定には軸力・曲げモーメントなどの断面力表示の塑性条件を使用する。座屈および大たわみに起因する幾何剛性を考慮可能である。杭については、杭専用の要素が用意されており、地盤の非線形特性もＮ値等を与えることにより容易に考慮できる。

従来の設計・再評価のやり方は、構成要素レベルのチェックに重点が置かれている。しかし、沖合いの暴風波浪等の非常に厳しい環境に建設されるジャケット式海洋プラットフォームの場合、簡易な構造部材の補修が困難なため、過大な変形または全崩壊に対する抵抗などのような構造全体としての強度評価が、構造物の安全性（妥当性）を判断する手法となる。

長年使われている既存の構造物には、元設計時の設計意図から更に追加・変更等の要求がなされることが多い。たとえば、生産用のライザー管やプロセス・モジュールが追加されたり、長期の使用にあたり構造物が多少の損傷を受けることがある。

さらに、新しい構造物に対する設計手法は、既存の古い構造物には当てはまらず、特に現在１５年以上経っている多くのプラットフォームは、最新の設計基準を満足しないケースが考えられる。既存の構造物の再評価では、従来の構成要素設計を最新の設計基準に照合するチェックは行われていないことが多く、必要に応じて構造を補強したり、機能上や環境上の荷重を低減するとかで、生命や深刻な汚染のリスクをもたらす破壊を

防ぐなどの修復作業が必要になる。

また、システム強度解析から得られる１つの強度の評価数値は、プッシュオーバー解析から得られるが、これは構造物が単独の大きな波およびそれに伴う風や潮流の影響からの力を受ける場合の耐力になる。激しい暴風では、いくつかの大きな波が発生し、これにより構造物にシステム強度の劣化につながる被害が蓄積されることがあり、システムの周期的な荷重耐力を評価することが必要になる。

図 4.3.2.11 にジャケットに対する構造物崩壊の状態を、構造物が機能しないような全体的な過剰変形を示すまでの限界状態までの過程で表す。全体のシステム崩壊に対応するシステム強度として、２つの強度値が決められる。

第１は、静的プッシュオーバー強度で、大きな波により発生する環境荷重が構造崩壊を起こす強度である。

第２は、サイクル強度で、環境荷重が繰返し加えられる場合を考慮する。後者の場合、限界状態がさまざまな影響により数サイクル後に発生する。

これらの概念を図 4.2.11 の３つの構造物デッキ変位ケースで示す。それぞれの構造物は、一定振幅の周期的荷重を受ける。

ケース（a）では、サイクル荷重が２つの部材を靭性疲労により破壊させ構造破壊につながる。これが全体の不安定性の引き金になり、構造物はこの荷重レベルで耐えられない。

ケース（b）の場合、部材は結合したままであるが、構造物の変形はサイクルごとに増し、ついに許容できなくなり崩壊する。これを漸増崩壊という。

ケース（c）の場合、各サイクルの変形は減少し、最後には構造物は弾性のように挙動する。これをシェイクダウンという。ここで、構造物が弾性状態までシェイクダウンする最大荷重強度を周期的耐力と定

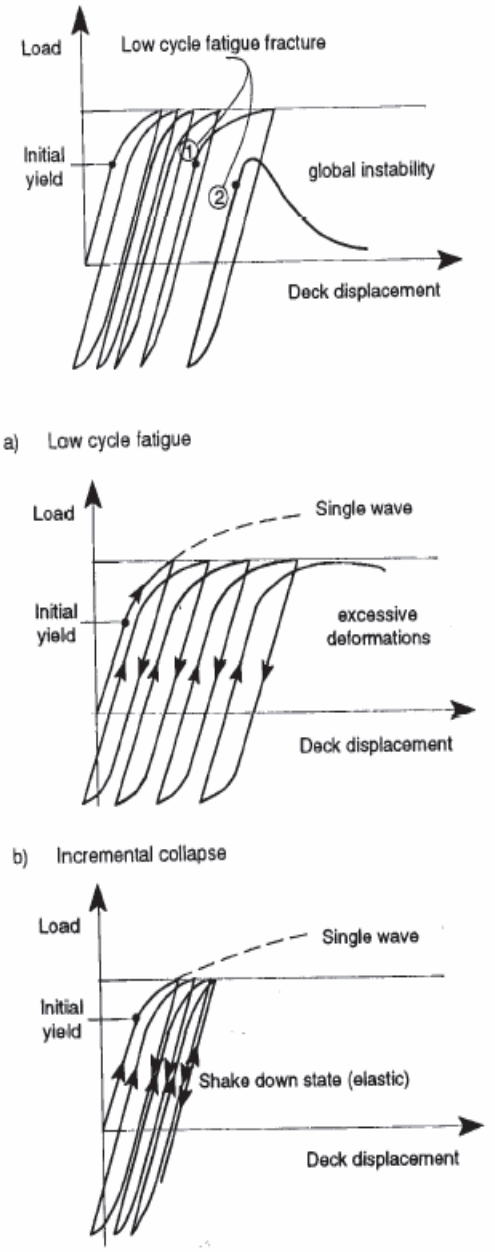


図 4.3.2.11 周期的荷重下のデッキ変位

義する。

USFOS の基本は梁－柱モデルによる解析方法で、部材の一次降伏後も機能させて構造全体の最終強度を求めるソフトである。このプログラムは、1 つの有限要素が初めに構造物の部材ごとに設定される荒い要素メッシュを使う。部材単位の有限要素モデルは、荷重により部材の降伏応力に達すると、図 4.3.2.12 に示すように、中央に降伏ヒンジを導入し、それ以上の応力を負担せず他部材への荷重の再配分を行い、モデル変更をしないで要素合成応力に作用し、部材断面力とモーメントとして評価される。降伏ヒンジは、材料の非線形性をモデル化するのに使われる。ヒンジが中間スパンに検出されると、要素の細分化が自動的に行われる。

以上の過程で計算を行い、多くの部材と様々な境界条件を持つジャケット構造の、非線形有限要素解析での部材の降伏・変形状態からさらに構造物の全体崩壊までの耐力・変位を計算することができる。

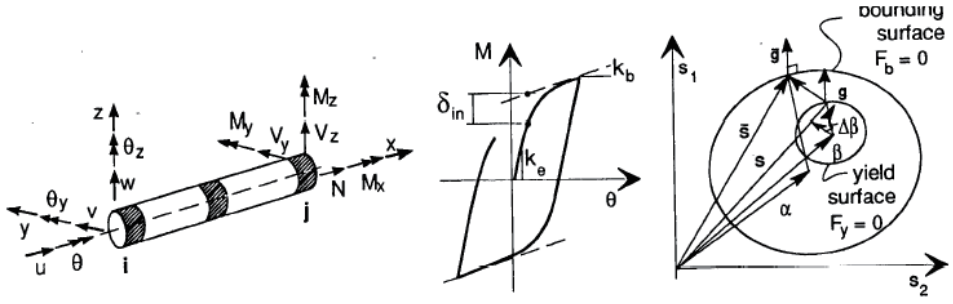


図 4.3.2.12 部材応力と中間ヒンジ

次に、表 4.2.1 に示す北海の既存ジャケットの USFOS による強度評価結果[7]を示す。

表 4.3.2.1 北海既存ジャケットの諸元

Platform	A0	A1	A2	B1	B2	B3
Type	Wellhead	Field terminal	Production & Quarter	Wellhead	Hotel	Compr. station
Water depth	110 m	70 m	108 m	73 m	71 m	34 m
No. of legs	8	8	8	4	4	8
Long. brac.	Diagonal	Diagonal & X	Double X & diagonal	X without horizontal	K	Diagonal
Transv. brac.	K & double X	K	Double X	X without horizontal	K	Diagonal & K
Foundation	4 legs Skirt piles	Internal piles, grouted	4 legs Skirt piles	Internal piles, grouted	Internal piles, grouted	Internal piles, not grouted

どのジャケットも、最初の部材破壊（座屈）を超える構造強度の余裕は小さく、1～13%

の範囲にある。これらの結果は、部材の最初の座屈がまず海面に近い箇所で起こるが、この部材破壊はそのまま全体の構造崩壊にはつながらないことを示している。

一般に、X ブレース構造物（図 4.3.2.13）は、保存余裕強度と部材破壊後の形状保持に対して冗長性があり、最大荷重に達成後の更なる変位に対する耐力の低下は小さく、K および対角ブレース構造物（図 4.3.2.14）に比べて大きな変形に対して高い荷重レベルを維持できることを示している。

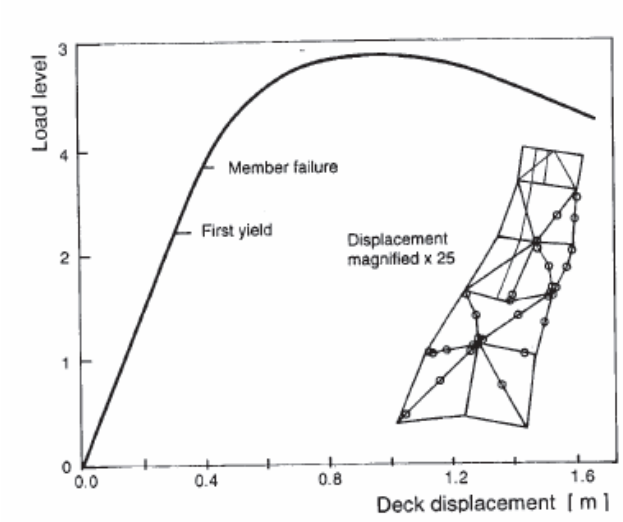


図 4.3.2.13　プラットフォーム A2 に対するプッシュオーバー解析からの荷重対横変位

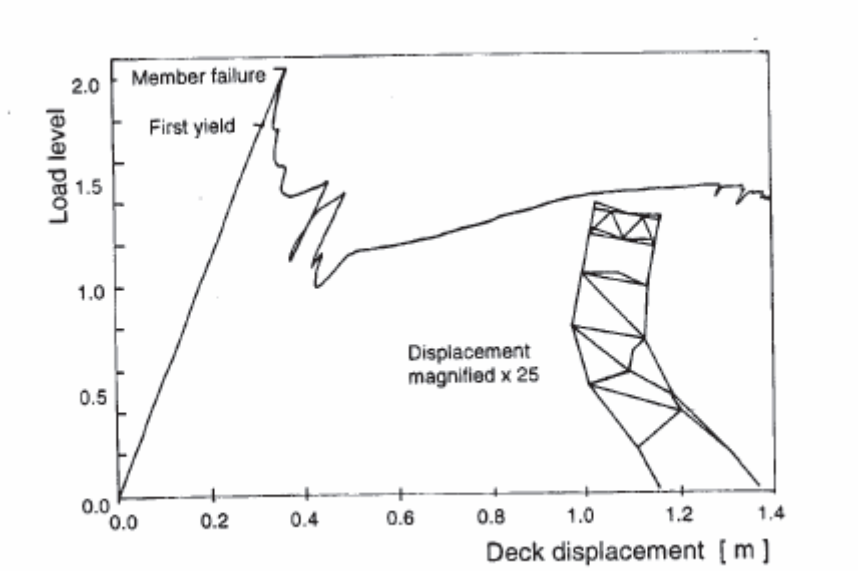


図 4.3.2.14 プラットフォーム B3 に対するプッシュオーバー解析からの荷重対横変位

【参考文献】

1) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)

2) 運輸省港湾技術研究所　編著：港湾構造物の維持補修マニュアル、平成 11 年 6 月、財団法人　沿岸開発技術研究センター

3) 高橋宏直、船橋香、横田弘：腐食した鋼管杭の力学的特性試験、国土技術政策総合研究所資料 NO.44 付属資料 2 (2002)

4) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集　(上巻)第 1 編 係留施設, 1999

5) 山根信，田中王治，松田漠，藤久保昌彦，柳原大輔，岩尾直樹：海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について，日本船舶海洋工学会論文集，2006

6) API: Recommended Practice 2A-WSD Twenty-First Edition, December 2000.

7) G.Stewart, T.Moan, J.Amdahl, O.Eide ： OMAE-Volume Ⅰ, Offshore Technology, ASME 1993

4.3.3　水門の耐荷力評価

⑴　２次元での梁・柱理論による耐荷力評価

本評価方法は，２次元での梁・柱理論により，架構や部材の耐荷力評価を行う方法であり，ゲートの設計計算[1]にも用いられている．本方法を，典型的な形式の水門であるラジアルゲート（図 4.3.3.1）を例に説明する．ラジアルゲートは，トラニオンピンを中心に回転して開閉するゲートである．

ラジアルゲートの耐荷力評価は，架構，スキンプレート，補助部材等でそれぞれ行われる．ここで考慮される荷重は，主に，扉体重量・静水圧荷重・浮力・上下方向水理力・開閉力・地震時動水圧荷重・地震時慣性力・風荷重・雪荷重・温度荷重等である．

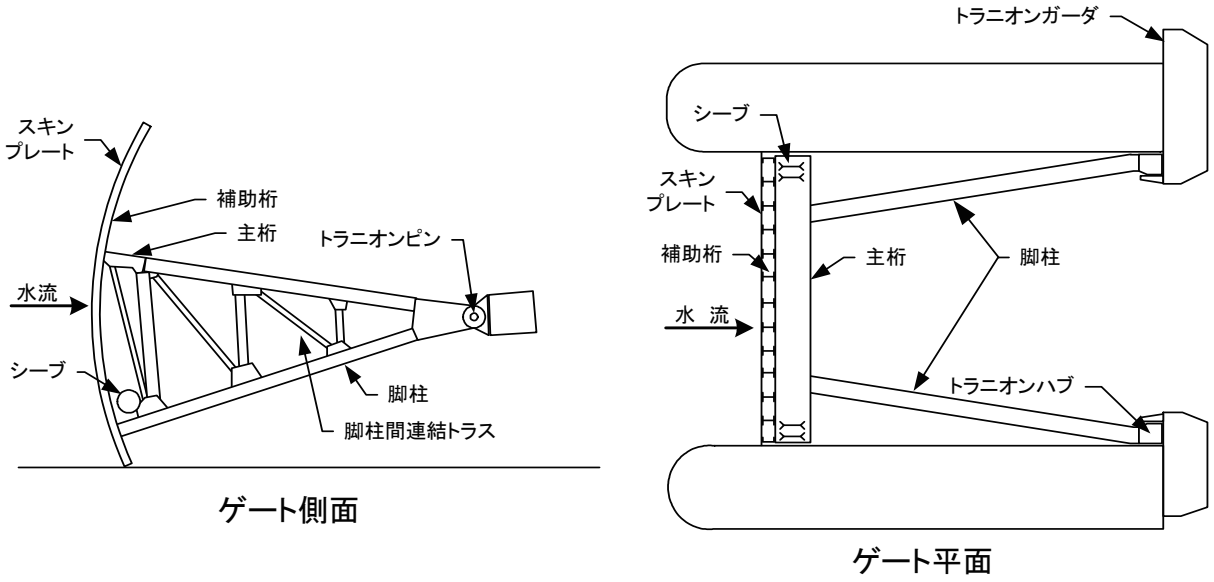


図 4.3.3.1　ラジアルゲートの基本図

a)　架構の耐荷力評価

架構は，主桁・脚柱・脚柱連結部材で構成される．水平面内では，トラニオン部を固定し，脚柱・主桁の中立線を結んだラーメン構造として評価する．一方，鉛直面内では，上下脚柱・脚柱連結部材によるトラス構造として評価する．図 4.3.3.2 に水平面内での部材配置を示し，図 4.3.3.3 に上部の脚柱・主桁で構成されるラーメン構造としての解析用基本図を示す．水平面内では，主桁・脚柱の中立軸を架構の基本寸法とする。

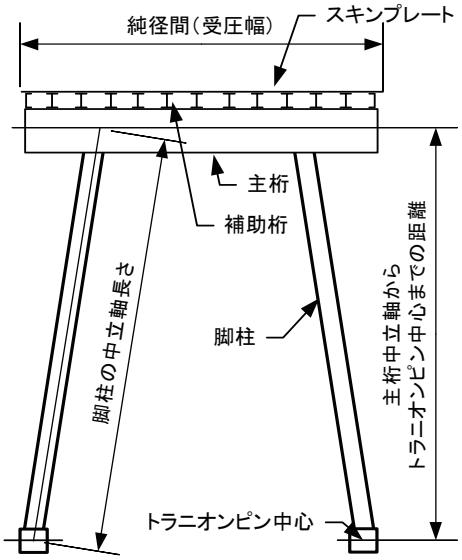


図 4.3.3.2　水平面内での部材の配置

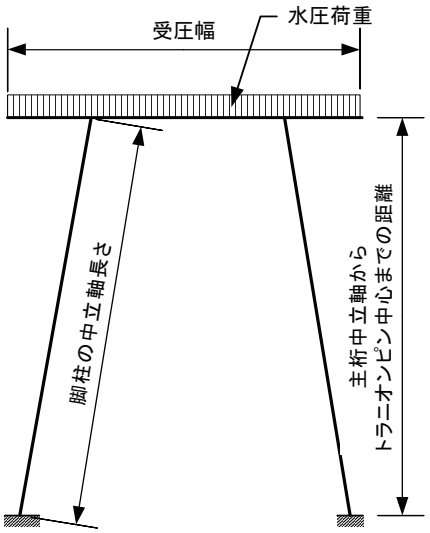


図 4.3.3.3　上部水平架構基本図

ここで，主桁および脚柱の断面寸法をゲートでの板厚計測結果を反映して決められれば，主として水圧荷重や巻上げ荷重（下部主桁）による水平面内での断面力・反力を算定することができる．水平架構に生じる曲げモーメント，およびせん断力の典型的な分布形状を図 4.3.3.4 に示す。

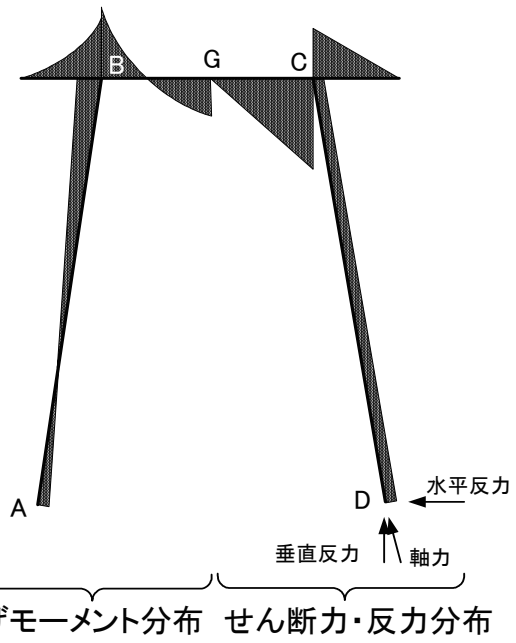


図 4.3.3.4　水平面内（上部架構）での断面力・反力分布の例

また，垂直面内では，水圧等による軸力や，ゲート巻上げ時にトラニオンピンの摩擦による曲げモーメントが脚柱に生じる。脚柱に生じる曲げモーメントの典型的な分布を図 4.3.3.5 に示す.

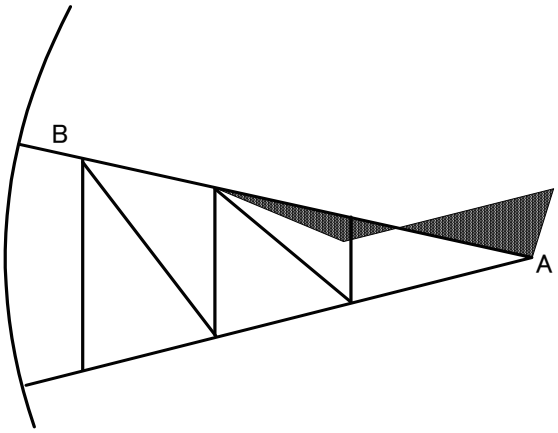


図 4.3.3.5　垂直面内（上部架構）のゲート巻き上げ時に発生する曲げモーメント分布の例

主桁では，水平面内での断面力から曲げ・軸圧縮応力を算定し，発生応力が大きくなる主桁と脚柱の接合部（図 4.3.3.4 の C 点）や主桁の中央部（図 4.3.3.4 の G 点）で，許容応力等の基準値と比較する．脚柱では，主桁との接合部（図 4.3.3.5 の B 点），トラニオンピンに近い箇所（図 4.3.3.5 の A 点）等で，曲げ・軸圧縮応力を算定し，許容応力等の基準値と比較する．なお，腐食による板厚の変化は，部材単位で考慮する．

b)　スキンプレート，補助部材の耐荷力評価

スキンプレートや，縦補助桁・横補助桁等の補助部材は，部材単位で発生応力を算定し，許容応力等の基準値と比較する．これらの部材でも，腐食による板厚の変化は，部材単位で考慮する．

(2)　簡易３次元 FEM モデルを用いた耐荷力評価

電力中央研究所が開発し運用している，電力会社の発電用ダムゲート・水圧鉄管を対象とした「水力鋼構造物・健全性診断システム」[2)]では，ゲート各部の寸法，荷重，腐食量を入力することにより，図 4.3.3.6 のような簡易３次元 FEM モデルを自動作成し，ゲート全体の応力解析，固有振動解析，およびラジアルゲート脚柱の座屈固有値解析を行うことができる．解析モデルには，シェル要素と梁要素等が用いられている．

図 4.3.3.6 の３次元 FEM モデルを使用することにより，特にラジアルゲートのように立体的な構造のゲートについては，架構や部材毎に評価するよりも，ゲート全体としての実際に近い挙動を評価することが可能となる．本システムでは，部材の板厚は，主桁や脚柱のような部材単位で与えるが，応力は要素単位で評価することができる．

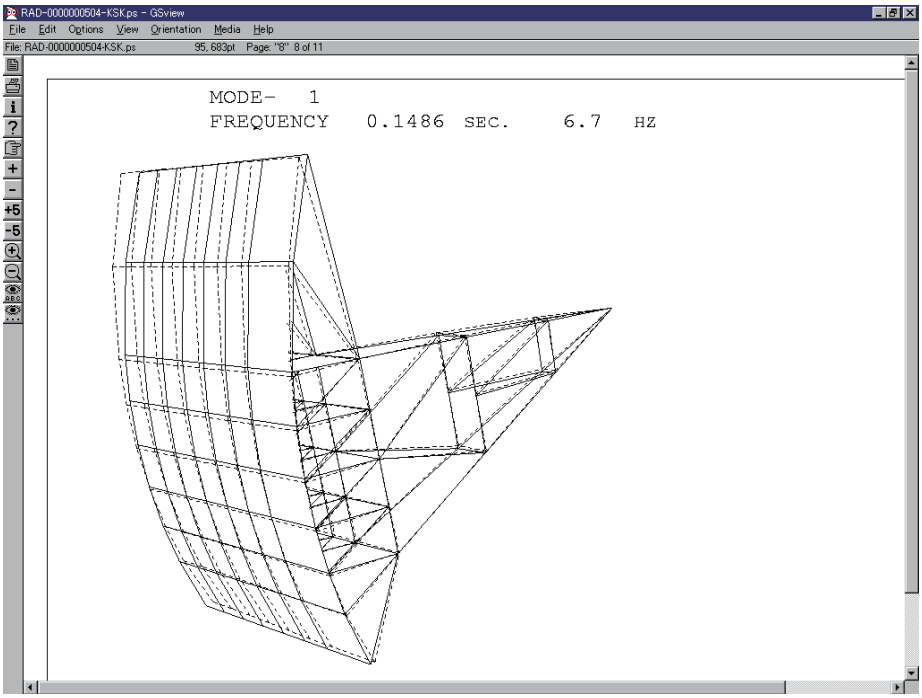
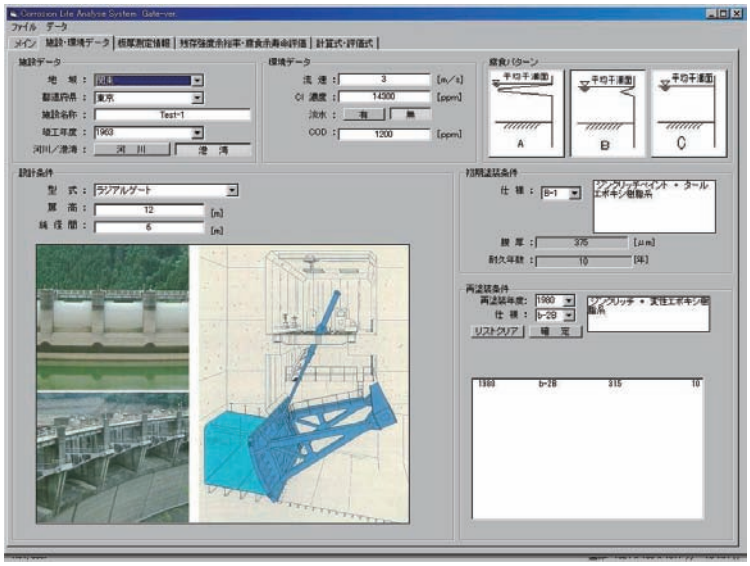


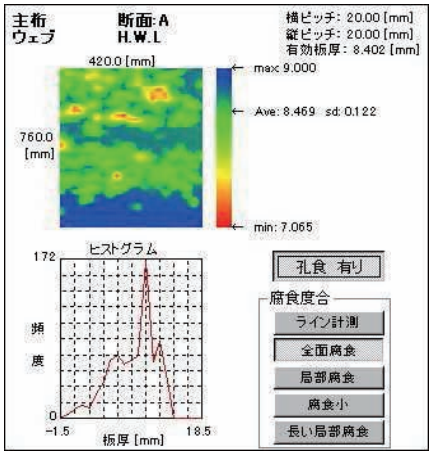
図 4.3.3.6　簡易３次元 FEM モデルによる固有周波数解析結果例

(3)　水門扉の腐食余寿命診断システム（CLAS-G）による診断例

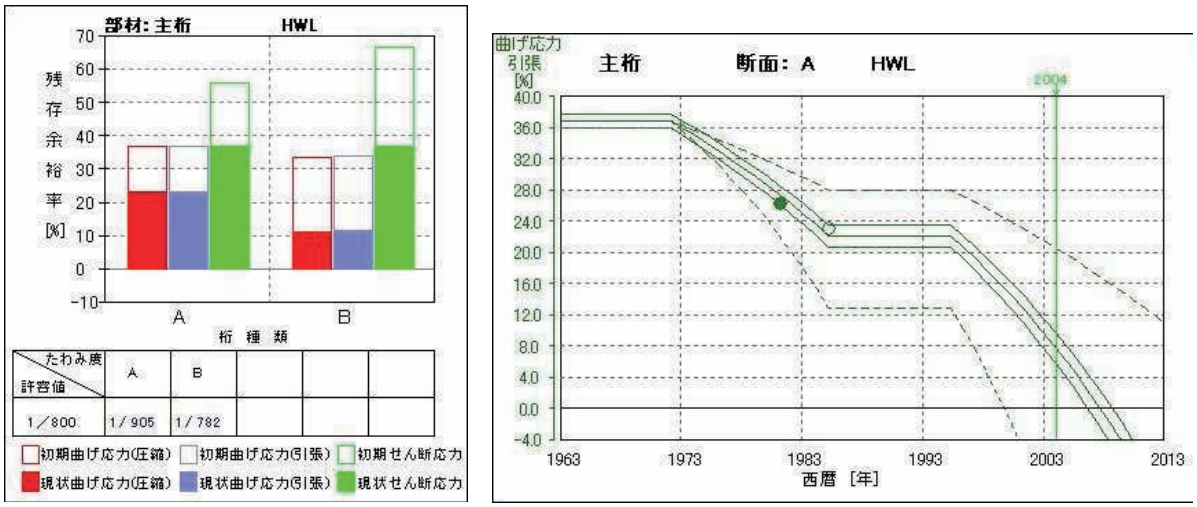
三菱重工業が開発した，ダム／河川／港湾ゲート向けの腐食余寿命診断システム[3)]では，下記のように板厚測定結果により有効板厚を推定し，慣用計算を用いた現有の残存強度の評価および，腐食速度による腐食部材の寿命評価が行える。



（ゲート情報の入力画面）



（腐食板厚分布表示と有効板厚推定）



（有効板厚による残存強度評価）　　（腐食速度を用いた寿命診断）

図 4.3.3.7　CLAS-G(水門扉の腐食余寿命診断システム)を用いた構成部材の残存強度・寿命診断例

(4)　詳細な３次元 FEM モデルを用いた耐荷力評価

様々な条件を考慮した詳細な解析を必要とする場合には，図 4.3.3.8 に示すような詳細なモデルを用いた FEM 解析を実施することも可能である. このモデルでは, 主要部材をシェル要素で詳細にモデル化し, 主桁間のトラス材は簡略化のために梁要素でモデル化した．このような詳細モデルを用いる場合には，個別のゲート毎にモデルを作成するため，時間と手間をかければ極めて詳細なモデルも作成可能であるが，現実的には，ゲート全体の挙動を把握するために図 4.3.3.8 に示す程度の要素分割で行うことが多い.

また，部材の板厚は，要素毎に定義することも可能である．しかし，実際のゲートでは，要素毎に定義する程度に詳細な板厚の計測が行われていない．具体的には，主桁・脚柱ではそれぞれ両端部と中央部の３箇所程度，スキンプレートでは上・中・下段の左右・中央の９箇所程度，それ以外の部材では比較的腐食が顕著な１箇所程度で，板厚が計測されることが多い．したがって，解析モデルにも，板厚の計測箇所の周囲に，その計測された板厚を均一に与えることとなる.

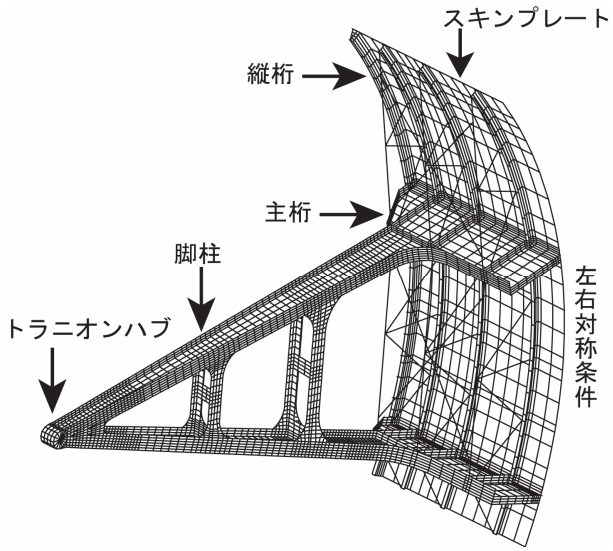


図 4.3.3.8　詳細 FEM 解析による解析モデル

(5) ゲートの耐荷力評価における板厚の設定

既存のゲートでの板厚計測は，主桁の中央部・端部・脚柱取付部や，脚柱の主桁取付部・トラニオン付近等，比較的大きな応力が発生する箇所を中心に行われる．また，板厚計測結果をもとにした耐荷力評価には，平均板厚，最小平均板厚や有効板厚等が使用されている．板厚の設定方法によっては，安全側の耐荷力評価となる可能性もあり，板厚の設定方法の選択は，ゲート設備管理者の維持管理方針とも関係する．

ゲートの耐荷力評価における，板厚の設定方法については，有効板厚の検討[3]や，既存ゲートから切り出した材料試験片による検討[4]等が行われている．今後，ゲートで実施される板厚計測やゲートの耐荷力評価手法に適用しやすい，腐食鋼材の板厚設定手法の確立が望まれる．

【参考文献】

1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準　水門扉設計参考例，1986.
2) 山本広祐，中村秀治，松井正一：水力鋼構造物・健全性診断システムの高度化ー電中研テクノウェッブシステムへの移行と機能拡充ー，電力中央研究所報告，研究報告 U99072，2000.
3) 五十嵐昇，上生川真二，上林正和：水門扉の腐食寿命診断システム CLAS-G の研究開発，水門鉄管，No.218，pp.64-69，2004.
4) 北本真，神藤謙一，氏家禎男：鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響に関する研究，電力土木，No.273，pp.14-19，1998.

4.4 FEM 解析による残存耐荷力評価とその精度

4.4.1 作用外力と有限要素の選定

コンピュータ能力のめざましい向上にともない，最近では，有限要素法による強度解析が普通に行われるようになっており，実務設計でも有力なツールとして使用されつつある．腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価においても，とくに腐食状態を考慮する場合には，有限要素法は有力な手段である．この場合，板厚などの限られた測定結果に基づいて強度解析を行うことになるが，解析に必要な諸量の与え方や要素分割については十分には検討されていないのが現状である．従来，腐食構造物の強度評価については，腐食の激しい箇所を選択して板厚計測を行い，部材あるいは部材を構成する板要素全域が測定結果の最小値等まで減肉したものと仮定して断面諸量を求め，それを用いてはり要素や板・シェル要素を適用して残存耐荷力を求めるなどの評価がなされてきたようである．しかし，精度のよい残存耐荷力を得るためには，腐食状態を詳しく測定し腐食表面の凹凸形状を解析にできるだけ正確に反映することが望ましい．とくに，最高荷重後の座屈モードや変形の局所化，変形能については，腐食表面形状を正確に解析に反映することが要求される．さらに，残存耐荷力を精度よく推定・把握するためには，部材や板要素の作用応力状態をふまえるとともに，使用する要素の特性を理解し，腐食形態のモデル化，要素分割や境界条件を適切に与えることが重要である[1)]．本節では，有限要素法解析により腐食した鋼構造物の残存強度を評価する場合の，解析上の留意点を述べる．

腐食鋼構造物に外力が作用する場合，外力にともなう構造物の応力状態によって破壊あるいは崩壊形態は異なるから，外力に対応する崩壊形式を表現できる有限要素を用いなくてはならない．さらに，腐食形態の残存耐荷力におよぼす影響が，解析において実用上十分な精度で表現可能な要素分割とする必要がある．また，腐食形態を各要素においてどのように表現するかというモデル化も大きな問題である．たとえば，静的な引張強さを求める場合には，塑性後の応力再配分があるので，適当な板厚を要素に仮定すれば幾分粗い分割でもかなりの精度で評価できる．そしてこの場合には，平面要素や板要素，シェル要素などを使用できる．ところが，疲労を問題とする場合には，疲労強度は応力集中に依存するので腐食表面の凹凸形状に支配されることになる．この場合には，板やシェル要素などを使うことはできず，立体要素を用いることになるが，要素分割は凹凸を表現するために極めて細かい要素が必要となる．一方，圧縮が作用する場合には，座屈崩壊が問題となるから，腐食した状態での剛性を精度よく表現するとともに，腐食にともなう偏心を考慮する必要がある．座屈崩壊については，ほとんどの場合，板要素やシェル要素が使用できる．

プレートガーダーの腐食は，水仕舞の悪い桁端（支承部）などが局所的に腐食する損傷例が多い．このような局部的な損傷がある構造物の残存強度を評価するためには，構造物の一部を取り出して，サブストラクチャー法による解析，あるいは，腐食部分を含む領域を板・シェル要素で構成し，ほかの部分にはり要素を適用した解析，などが考えられる．後者の場合，板・シェル要素部とはり部との接合部分での変位の適合性を確保する必要があるが，局部的な腐食を有する構造物全体を細かいシェル要素で構成して多大な労力を注いで解析するよりも，合理的と考えられる．

上述のように，腐食鋼構造物の残存耐荷力を求める場合には，解析目的を満たす適切な要素を適用することが重要であるが，さらに，材料学的および幾何学的非線形性をともなう複雑な複合非線形解析を行うことになるので，境界条件の設定には注意する必要がある．とくに幾何学的非線形性をともなう座屈あるいは大たわみなどの問題では，境界条件の設定によっては，得られる耐荷力が実構造物の耐荷力と大きく異なる場合がある．このことは腐食していない構造物でも同様である．

4.4.2　板および板で構成される構造部材の圧縮残存耐荷力解析

板やシェルで構成される構造部材が腐食し，その座屈耐荷力を有限要素法によって解析する場合，より正確に残存耐荷力を評価するためには，以下の入力データの与え方について検討しておく必要がある．

1)　要素節点の座標値

2)　要素の板厚，大きさ（メッシュ分割）

3)　腐食後の偏心（腐食前の中央面と腐食後の中央面までの距離）

板で構成される構造物部材が腐食すると，その表面の凹凸によって板の板厚のみならず中央面が変化し，中央面はもはや平面にはならないので，板厚変化を考慮できるアイソパラメトリックシェル要素などを適用した残存耐荷力解析がよい．通常の腐食表面の場合，表面の凹凸の波長は数ミリメートル以下であるが，表面凹凸形状の影響を受けるような場合には，平面保持を仮定するシェル要素の使用は適切ではなく，立体要素を用いるべきであろう．

以下では，102 年間供用後に撤去されたプレートガーダー，15 年程度の供用期間で著しく腐食したために補修された渡橋の残材，19 年間海洋環境に曝された鋼管について，腐食表面を詳細に計測し，アイソパラメトリックシェル要素を用いた有限要素法による残存圧縮強度解析例を示す．

（1）腐食したフランジプレートの残存圧縮解析[2,3)]

橋梁は，1899 年，太平洋の汀線から約 200m の距離に鉄道橋として架設，供用され，昭和 52 年には，床版を追加架設して歩道橋として利用されていたが，橋脚の劣化や上部工の腐食が著しいため撤去されたものである．その橋の下フランジプレートから図 4.4.2.1 に示すような板要素を取り出してその表面座標を測定し，その結果から，板厚と中央面の座標を 2mm 間隔で求めた．

表 4.4.2.1 に測定結果をまとめて示し，図 4.4.2.1 に板厚等高線図を示す．

フランジ A は桁の支承部付近のもので，平均腐食量 Z_{avg}=1.98mm，板厚標準偏差 s_t=1.78mm と，かなり腐食している．直径 10～30mm の半球状の腐食箇所が多数点在しており，フランジ左端の断面欠損が目立つ．なお，図中の○は，リベット孔である．一方，フランジ B はスパン中央部から採取したもので，平均腐食量 Z_{avg} はフランジ A と同程度であるが，板厚標準偏差は s_t=0.68mm とフランジ A よりもかなり小さく，板のほぼ全面に緩やかな凹凸が形成されている．

解析は，座標更新法および増分理論による複合非線形解析である．応力－ひずみ関係は完全弾塑性とし，Mises の降伏条件を用いた．

材料特性については，腐食部材の両表面を平滑仕上げした引張試験片を作成し，引張り試験の結果，降伏応力 σ_y=294MPa，ヤング率 E=196GPa，ポアソン比 ν=0.278 であった．

表 4.4.2.1　解析モデルの板厚測定結果

Flange	t_{max}[mm]	t_{avg}[mm]	Z_{avg}[mm]	t_{min}[mm]	σ_t[mm]
A	10.50	8.52	1.98	0.00	1.73
B	10.00	8.12	1.88	3.43	0.68

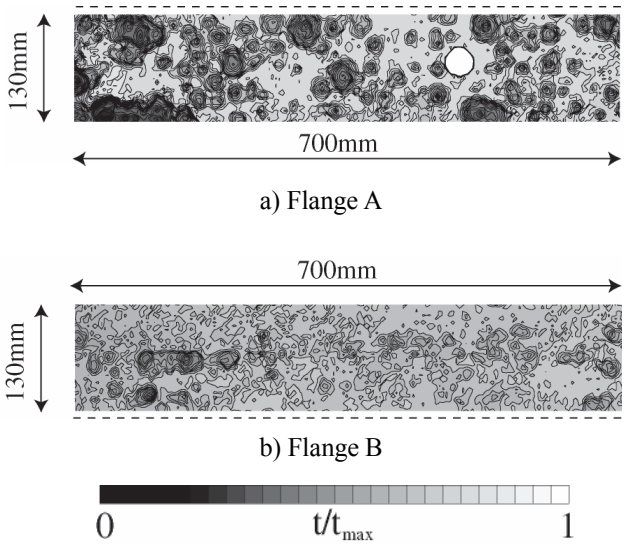


図 4.4.2.1　板厚の等高線

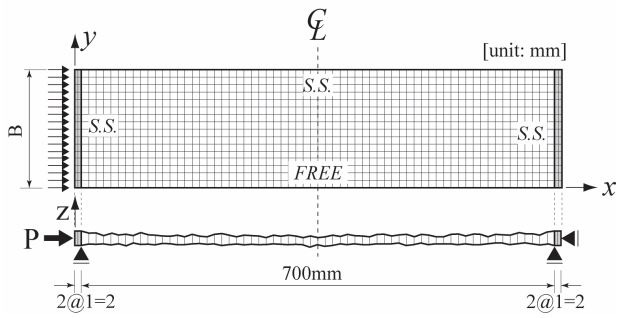


図 4.4.2.2　解析モデル

表 4.4.2.2　要素幅を変化させた残存圧縮強度解析結果

Series		Flange	δ_s[mm]	δ_e[mm]	σ_u/σ_y
E	1	A	2	7	0.647
	2		2	10	0.623
	3		2	14	0.629
	4		2	20	0.668
	5		2	28	0.702
	6		2	35	0.676
	7		2	70	0.777
	1	B	2	7	0.819
	2		2	10	0.837
	3		2	14	0.835
	4		2	20	0.834
	5		2	28	0.831
	6		2	35	0.833
	7		2	70	0.833

: Key parameter δe

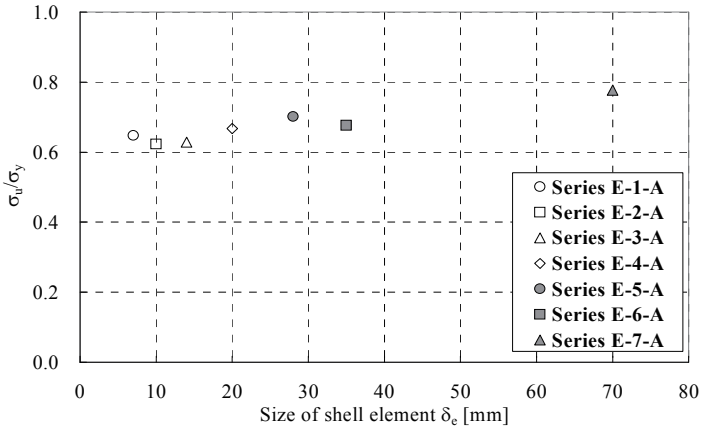


図 4.4.2.3　要素分割(要素幅)による残存強度の変化

図 4.4.2.2 にフランジの解析モデルを示す．境界条件は，3 辺単純支持 1 辺自由である．荷重は，フランジの左辺に等分布強制変位を与えた．要素はほぼ正方形になるように分割し，要素の大きさを変えて残存耐力解析を実施した．このとき，要素節点の板厚および中央面の座標は，2㎜ メッシュ間隔の腐食表面形状計測結果を用いて次のように与えた．まず，要素節点座標は，板の両表面の座標から中央面座標を求め，その座標値を節点に与えた．これにより板厚直交方向の初期たわみを考慮できる．また，同時に荷重作用線の偏心の影響も考慮できる．次に要素節点の板厚は，その節点の周りの板厚測定点における平均板厚を与えた．なお，板厚データの与え方としては，節点座標に対応する位置の計測された板厚をそのまま節点の板厚として与える方法も考えられるが，細かく表面座標を計測できている場合には，平均操作を行うと若干精度が高いようである．

圧縮を受けるフランジ A および B について，解析に使用したシェル要素の幅 δ_e をそれぞれ 7㎜～70㎜ まで変化させた場合の残存強度解析結果を表 4.4.2.2 に示す．表中 δ_s は，腐食表面座標計測のサンプリング間隔で，ここでは，2㎜ 間隔で測定している．

図 4.4.2.3 に，表 4.4.2.2 の残存強度と要素幅の関係を示す．図 4.4.2.3 から，要素幅 $\delta_e \leqq 20$㎜ では，終局強度 σ_u/σ_y の違いは無いといえる．しかし，$\delta_e > 20$㎜ になると差が大きくなり，要素幅が大きくなると圧縮強度が増加する傾向が認められる．この解析結果では，最大 16%程度の差が終局強度において確認できる．

以上のことから，要素幅が概ね 20㎜ 以下の要素分割であれば，精度のよい残存圧縮耐荷力解析が可能であると考えられる．しかし，要素幅は，腐食表面の凹凸状態（腐食表面の波長）や座屈崩壊モードに依存するのは明らかであり，一般には，座屈モードよりも腐食表面凹凸の波長が短いと考えられるから，残存強度を評価するため

に必要な要素幅は腐食形状によってきまると考えられる．図 4.4.2.1 に示す腐食表面形状の場合の座屈解析は，1 辺 10㎜程度の要素幅で分割すれば十分と思われる．

（２）腐食した棒(板)の残存曲げ座屈解析 [4)]

供用後約 15 年を経過し，腐食損傷が理由で一部を撤去されたフェリー渡橋の一部から切り出した，幅 30㎜ の短冊状試験片の座屈試験を行い，それと対応して 4 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて耐荷力解析を実施した結果を示す．試験片は撤去された部位（鋼床版のデッキプレート，縦リブおよび横桁フランジおよびウェブの比較的腐食の激しい部分から切り出して，短冊状の矩形板 35 本を作成した．鋼種は SS400 で，長さを 100㎜～450㎜ の間で変化させた(表 4.4.2.3 中供試体名の 2 番目の数字が長さを示す)．図 4.4.2.4 に，撤去部材の腐食状況，および図 4.4.2.5 に作成した試験片の形状と解析における要素分割を示す．要素は， 図 4.4.2.5 に示すように， 1 辺 5㎜ の正方形である．



図 4.4.2.4　撤去されたフェリー渡橋の腐食状態

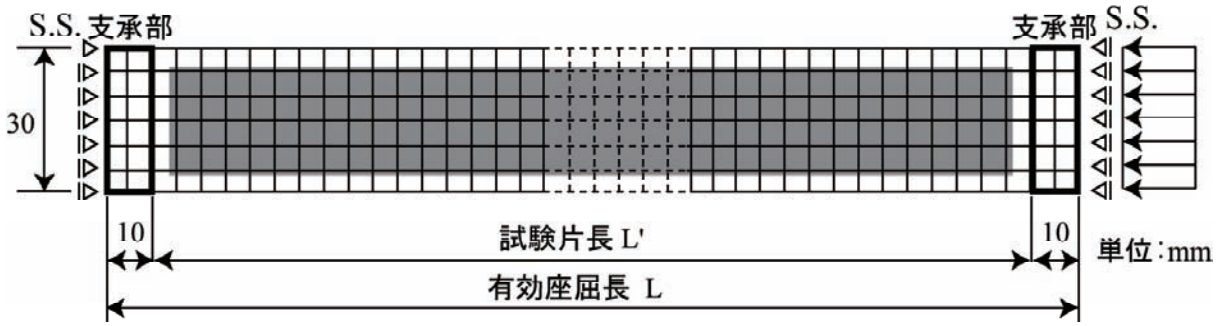
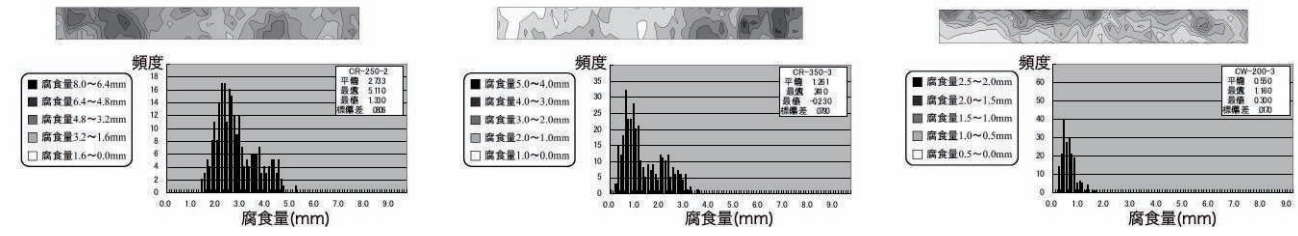


図 4.4.2.5　要素分割解析条件



a) CR-250-2　　b) CR-350-3　　c) CW-200-3

図 4.4.2.6　供試体の腐食量等高線と腐食量の頻度分布

表 4.4.2.3　a)腐食量の測定結果(リブ)

供試体名	平均腐食量(mm)	標準偏差(mm)	最大腐食量(mm)	最小腐食量(mm)
CR-450-1	2.25	0.57	4.15	0.43
CR-450-2	1.03	0.72	3.36	0.11
CR-450-3	1.14	0.42	2.42	0.19
CR-350-1	1.66	0.55	3.43	0.53
CR-350-2	1.31	0.52	2.85	0.20
CR-350-3	1.26	0.79	3.41	0.00
CR-250-1	2.45	0.69	4.14	1.11
CR-250-2	2.73	0.81	5.11	1.33
CR-250-3	0.38	0.14	0.88	0.17
CR-250-4	2.13	0.76	4.61	0.88
CR-150-1	3.40	0.80	5.18	1.49
CR-150-2	0.45	0.19	1.15	0.18
CR-150-3	1.50	0.67	3.93	0.61

表 4.4.2.3　b)腐食量の測定結果(ウェブ)

供試体名	平均腐食量(mm)	標準偏差(mm)	最大腐食量(mm)	最小腐食量(mm)
CW-450-1	1.27	0.58	3.09	0.21
CW-450-2	1.37	0.54	3.00	0.39
CW-450-3	0.48	0.27	1.57	0.10
CW-350-1	1.37	0.54	3.19	0.26
CW-350-2	0.29	0.21	1.35	0.05
CW-350-3	1.64	0.63	3.50	0.39
CW-200-1	0.34	0.10	0.67	0.20
CW-200-2	0.30	0.06	0.52	0.06
CW-200-3	0.55	0.17	1.16	0.30
CW-200-4	0.51	0.37	1.66	0.19
CW-200-5	0.53	0.27	1.58	0.13
CW-100-1	0.27	0.01	0.31	0.26
CW-100-2	0.27	0.01	0.30	0.25
CW-100-3	0.19	0.04	0.40	0.14

表 4.4.2.3　c)腐食量の測定結果(フランジ)

供試体名	平均腐食量(mm)	標準偏差(mm)	最大腐食量(mm)	最小腐食量(mm)
CF-450-1	2.76	0.66	5.14	1.31
CF-450-2	3.66	0.74	5.97	1.94
CF-300-1	2.69	0.67	5.49	1.44
CF-300-2	3.54	0.72	5.73	1.77
CF-300-3	3.28	0.50	4.71	2.02
CF-300-4	2.92	0.51	4.29	1.62
CF-150-1	2.38	0.78	5.19	1.30
CF-150-2	3.81	0.83	6.37	2.20

表 4.4.2.3 に，各試験片の腐食減量，平均板厚，板厚の標準偏差を示し，板厚等高線の代表例を図 4.4.2.6 に示す．また，解析結果と実験結果を比較して図 4.4.2.7 に示す．図 4.4.2.6 のような腐食表面形状は，ごく一般的な表面と考えられるが，このような腐食形態においては，図 4.4.2.7 に示すように，1 辺 5㎜ 程度の要素分割で十分な精度が得られることがわかる．なお，本実験で用いた短冊供試体の板厚は 5㎜ メッシュ幅で計測したが，

この程度の測定幅でも座屈強度解析においては十分であると推察される．

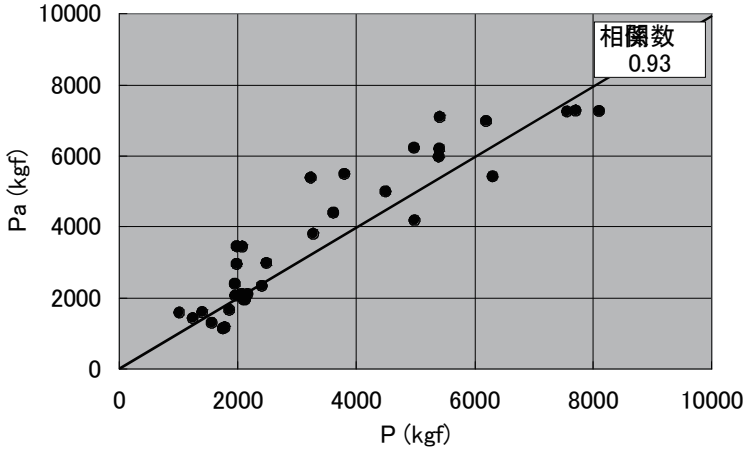


図 4.4.2.7　実験値と解析値の比較

（３）腐食した円筒鋼管柱の残存圧縮耐荷力解析 [5-7)]

19 年間海洋環境において曝露された鋼管杭から切り出した腐食鋼管供試体に対して，まず詳細な腐食表面形状及び板厚を測定し，つぎに圧縮試験を行うことにより鋼管の残存耐荷力を求め，さらに腐食鋼管に対する弾塑性有限変位解析を行った結果を示す [5)]．なお，この研究は，(社)日本鉄鋼連盟の委託を受け，土木学会構造工学委員会　沿岸環境における鋼・複合構造物の防食及び耐久性能評価に関する研究小委員会(委員長：渡邊英一教授)活動の一部として実施されたものである．

a)腐食鋼管供試体と腐食表面計測

供試体は，新日本製鐵光製鉄所構内の海洋環境において１９ 年間曝露された鋼管杭（スパイラル鋼管，公称寸法：直径 406.4ｍｍ×板厚 9ｍｍ×全長約 10m）から切り出しもので，鋼種は STK50 と STK41 の二種類（新規格では STK490 と STK400 に対応する）である．鋼管を引き上げて，サンドブラストによる除錆処理を施した後，飛沫帯，干満帯および海中部に位置していたそれぞれの部位から供試体をガス切断により切り出した．供試体の端面は，載荷実験で荷重を均等に載荷できるように，また両端面が平行および各面が平面となるよう機械仕上げした．なお，供試体の板厚は新日鐵において予備計測を行い，続いて京都大学において詳しい板厚計測および残存耐力解析するとともに，腐食鋼管から板状試験体を切り出し，その表面腐食形状を高精度に計測して，板状の引張試験片としてその断面性状と引張耐力，破断性状などと関連付け，性能

表 4.4.2.4　供試体鋼管採取位置

鋼種	試験体	採取位置(mm)	
STK50	NO.1	飛沫帯	DL+2700～+3900
	NO.2	干満帯	DL +500～+1700
	NO.3	海中部	DL-1500～-2700
	NO.4		DL-3500～-4700
STK41	NO.5	飛沫帯	DL+2700～+3900
	NO.6	海中部	DL-3500～-4700

表 4.4.2.5　STK50 および STK41（平滑材）の材料試験結果

試験片	ヤング係数 (KN/mm²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
50A0-1	205.6	0.304	402.5	532.8**
50A0-2	220.2*	0.312	392.6	515.0
50A0-3	203.8	0.301	389.9	510.7
平均	204.7	0.303	395.0	519.5

*値が大きく外れているので平均値に含めない
＊＊値は他の値と少し離れているが平均値に含める

試験片	ヤング係数 (KN/mm²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
41A0-1	207.4	0.300	379.3	493.7
41A0-2	208.3	0.305	389.5	501.7
41A0-3	205.7	0.295	382.4	492.3
平均	207.1	0.300	383.7	495.9

評価のための板厚計測方法（計測間隔）について検討している．

各供試体の採取位置，鋼種などを表 4.4.2.4 に，腐食鋼管から平滑仕上げした JIS12 号試験片を 6 本作成し，引張試験により得られた材料特性を表 4.4.2.5 に示す．

腐食状況の特徴は以下のようであった．

1) 腐食は，飛沫帯が最も大きく，次いで干満帯，海中部の順に小さくなる．
2) 鋼管外面では局部的に腐食が進行しており，腐食量，凹凸ともに激しいが，鋼管内面の腐食はわずかで凹凸も小さい．
3) 鋼管の設置位置にともなって，例えば東西と南北方向の面によって腐食量が異なる．これは波浪などの方向によると推察される．
4) 飛沫帯，干満帯，海中部ともに所々に直径 10~30mm 程度の深い凹み（孔食）があった．この種の孔食は，付着性生物によると推察されるが，河川などにおける真水中の腐食とは異なって，海中での腐食の特徴と考えられる．

腐食表面形状計測については，多関節式 3 次元座標測定器（スピンアーム）による表面計測が採用されている．スピンアームは，図 4.4.8 に示すように，3 本の腕と 3 つの関節から構成されており，その先端に非接触式レーザー変位計を取り付けたものである．プローブによる測定原理は，レーザー光の反射によって表面の座標値を取得するもので，約 5cm の幅でスキャニングでき，測点間隔はレーザーライン方向に約 0.1mm間隔，データライン間隔は約 0.5～1mm である．これを動かすことによって高密度で腐食面の座標を計測できる．本計測器は，任意に設定した 3 次元座標系に基づいて広範囲の腐食表面の座標値を直接計測でき，また，比較的手軽で携帯可能でもあるので，今回のような海中での計測は不可能であるが，現場での計測にある程度対応できる．なお，スピンアームにより測定した 3 次元座標値自体が有する誤差は±0.1mm以下である [4),5)]．測定された表面の座標データを用いて，鋼管表面で 1mm間隔のメッシュ点上の座標値を求めた．また，鋼管各点の残存板厚は鋼管裏表の座標データを差し引いて求めた．なお，上記の方法により求めた残存板厚は，最大で 0.3mm 程度の誤差であった [3),4)]．



図 4.4.2.8　表面形状測定状

板厚測定結果を表 4.4.2.6 に示す．表中，広島大学の計測では，平均板厚や平均腐食量の算出の際，スパイラル溶接部（シーム部）も測定結果に含めた．ただし公称板厚が 9mmであるので板厚 9mmを超えるものについてはその腐食量は 0mmとした．京都大学の計測では公称板厚 9mmから平均板厚を引くことで平均腐食量としている．腐食表面の特徴についての詳細は，文献 5, 6)を参照されたい．

表 4.4.2.6　計測結果

			広島大学の結果							京都大学の結果			
鋼種	曝露環境	試験体	平均板厚（mm）	平均腐食量（mm）	標準偏差（mm）	最小断面平均板厚（mm）	平均断面積（㎟）	最小断面積（㎟）	最小断面積の高さ位置(mm)	平均板厚（mm）	平均腐食量（mm）	標準偏差（mm）	最小断面平均板厚（mm）
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	3.96	6874	4429	155	5.28	3.72	1.84	3.72
	干満帯	NO.2	7.35	1.70	1.39	5.99	9101	7180	36	6.79	2.21	1.03	5.49
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	7.31	9538	9026	1139	7.63	1.37	0.50	7.33
	海中部	NO.4	7.99	1.06	0.94	7.86	9785	9569	68	7.76	1.24	0.53	7.45
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	1.69	3.59	6207	4017	455	4.78	4.22	1.68	3.12
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	7.75	9578	9097	797	7.73	1.27	0.43	7.49

b)腐食鋼管の圧縮載荷試験

軸圧縮試験の様子を図 4.4.2.9 に示し，試験結果を表 4.4.4.7 にまとめて示す.

載荷は荷重制御である．本試験機の載荷板はかなり大きいので，等変位圧縮状態（平押し状態）に近い境界条件となることを期待していたが，NO.1,5 供試体は，座屈の発生後局所的な面外変位の増加につれて，載荷板が傾き，端部で回転変位が生じた．後述するが，これにともなってシミュレーション解析結果と実験結果の差となって現れたようである．なお，これ以外の供試体では，平押しの境界条件に近い状態となった.



図 4.4.2.9　載荷試験状況

圧縮試験から得られた荷重-圧縮量(縮み)関係を図-4.4.2.10 に示す.

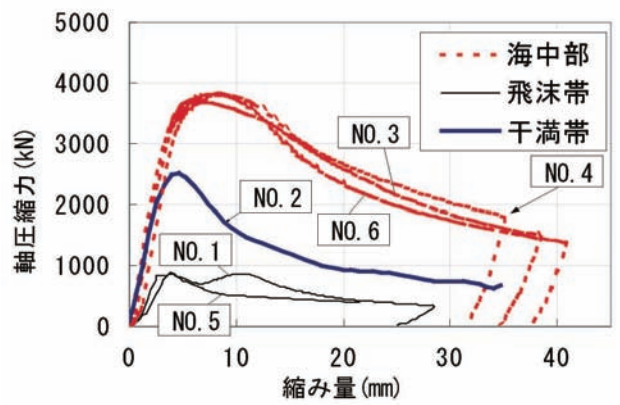


図 4.4.2.10 荷重―変位曲線

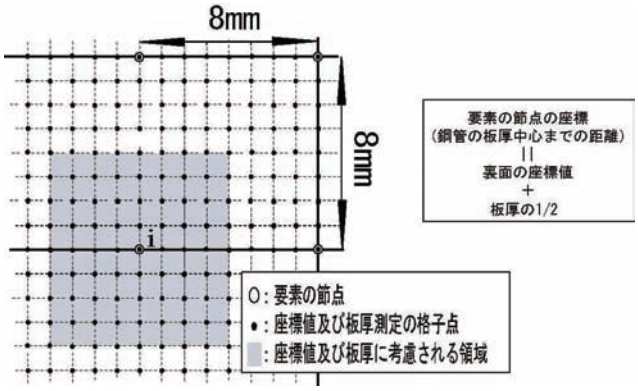


図 4.4.2.11 要素の節点と座標値及び板厚の格子点モデル

表 4.4.2.7　圧縮試験結果

鋼種	曝露環境	試験体	平均板厚（mm）	平均腐食量（mm）	標準偏差（mm）	平均断面積（mm²）	最小断面積（mm²）	最小断面平均板厚（mm）	最小断面の高さ位置(mm)	最大荷重(KN)	公称寸法で無次元化	最小断面で無次元化	最大荷重時の縮み量（mm）
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	6874	4429	3.96	155	868	0.20	0.50	3.18
	干満帯	NO.2	7.35	1.70	1.39	9101	7180	5.99	36	2489	0.56	0.88	4.62
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	9538	9026	7.31	1139	3680	0.83	1.03	6.44
		NO.4	7.99	1.06	0.94	9785	9569	7.86	68	3829	0.86	1.01	8.53
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	1.69	6207	4017	3.59	455	883	0.20	0.57	3.04
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	9578	9097	7.75	797	3790	0.88	1.09	8.39

c）有限要素法による圧縮強度解析

腐食鋼管の圧縮強度解析には，汎用構造解析コード ABAQUS を用いた．解析モデルの要素数は 23,550 要素（周方向 157 分割×長手方向 150 分割）で，1 要素の大きさが約 8mm×8mm の要素内で板厚変化を考慮できる 4 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いた.

応力-ひずみ関係は材料試験結果の平均をとって公称応力－公称ひずみ曲線とし，最後の勾配を直線的にのばし，引張強度に達したところを終点とし，これを真応力－真ひずみに換算して解析に用いた．非弾性挙動に関しては，ミーゼスの降伏条件及び等方硬化則を採用した.

境界条件は実験での境界条件と対応させて端面が回転しない平押しモデルとした．

また，平押し鋼管の公称寸法は，直径 406.4mm，長さ 1,200mm，板厚 9mm である．解析では腐食していない鋼管（以下，腐食前モデルという）の耐荷力もあわせて求めた．腐食前の鋼管モデルでは，鋼管の中央で板厚の 20%の最大値を持つ樽形の初期たわみを与えた．

ところで，耐荷力解析における腐食の影響は次のように考慮した．腐食表面の座標値は 1mm間隔の格子点で求められているので，耐荷力解析における要素の節点 i の座標および板厚は，図 4.4.2.11 に示すように，節点 i の周りの影付き領域内に含まれる腐食表面座標格子点の，それぞれ中央面（鋼管の表面座標と裏面座標の平均）の平均値および板厚（鋼管表面座標から鋼管裏面座標を引いたもの）の平均値として与えた．

d）解析結果

図 4.4.2.12 および表 4.4.2.8 に，実験結果と解析結果を比較して示す．また，図 4.4.2.13～4.4.2.18 には，載荷終了後の変形図および荷重-変位曲線を，実験結果と解析結果を比較して示す．これらの図で，a)は，実験終了後の供試体鋼管の外観写真と解析から得た変形図(各鋼管について特徴的な方角について)を比較したものであるが，図には，供試体の断面積の分布もあわせて示している．また，図の b)は，荷重-変位曲線であるが，これらの図には，腐食前モデルの解析結果もあわせて示す．これらの図表から，実験結果と解析結果の残存耐荷力はよい相関があることがわかる．このことから，要素幅が 8㎜ 程度のシェル要素を用いれば，実用上十分な精度で解析できると考えられる．また，後述するように，解析結果は座屈変形モードも表現できているといえる．ただし，腐食状態によっては，とくに一様に減肉しているような形態の場合には，座屈発生箇所を特定できにくいことがわかった．

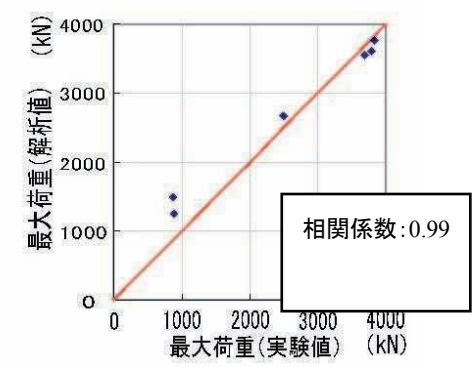


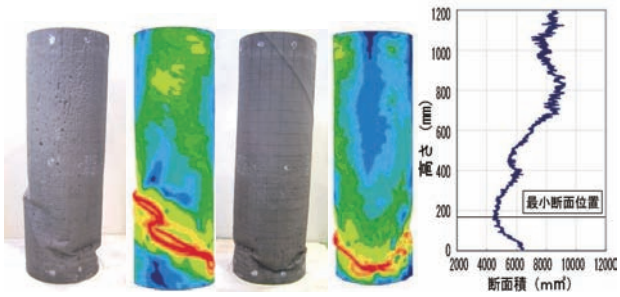
図 4.4.2.12 解析値と実験値の比較

表 4.4.2.8 実験結果・解析結果比較

試験体	最大荷重 (KN)		公称寸法で無次元化		最大荷重時の変位 (mm)	
	実験値	解析結果	実験値	解析結果	実験値	解析結果
NO.1(飛沫帯)	868	1493	0.20	0.34	3.18	2.45
NO.2(干満帯)	2489	2670	0.56	0.60	4.62	2.66
NO.3(海中部)	3680	3551	0.83	0.80	6.44	3.90
NO.4(海中部)	3829	3756	0.86	0.85	8.53	4.73
NO.5(飛沫帯)	883	1251	0.20	0.29	3.04	2.46
NO.6(海中部)	3790	3602	0.88	0.84	8.39	3.90
腐食前モデル (STK50)	——	4363	——	0.98	——	4.20
腐食前モデル (STK41)	——	4218	——	0.98	——	4.20

図 4.4.2.13a)から，飛沫帯の鋼管 NO.1 では，実験結果と解析結果から得られた変形図はよく類似していることがわかる．また，実験，解析ともに断面積が最小となる位置で座屈していることが確認できる．図 4.4.2.13b)から，実験結果の残存耐荷力は，解析結果よりも 600kN 程度低い．これは解析では，平押しモデルとしたため，鋼管が変形しても端面が回転しないと仮定しているのに対して，実験では腐食の著しい部分が座屈して試験機の載荷板が回転したために，両者の境界条件が終局付近で異なったことためと考えられる．

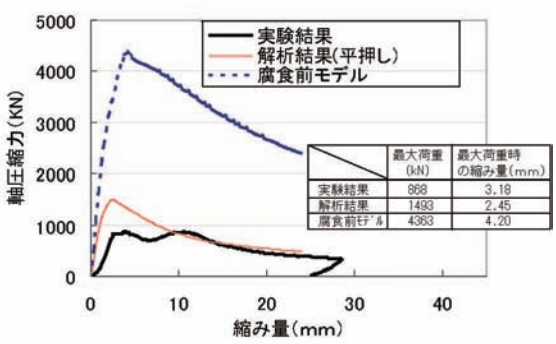
干満帯である鋼管 NO.2 では，図 4.4.2.14a)に示すように，板厚の薄い鋼管の下部で，ダイアモンド形の座屈形態がみられ，解析結果においても西下部で類似した結果が得られた．図 4.4.2.14b)から，荷重-変位曲線から実験結果と解析結果の耐荷力は，ほぼ同じであるのがわかる．前章でも述べたが鋼管 NO.2 は，NO.3 や NO.4 と比較すると残存耐荷力が低い．これは，鋼管 NO.2 の下部で局部的に腐食が著しいことに起因する．このように局部的に弱い部分が存在する場合には，鋼管の耐荷力はこの部分に大きく影響される．



（実験）　（解析）　（実験）

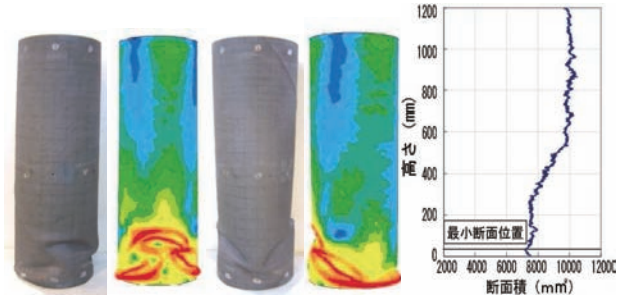
東　　南

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

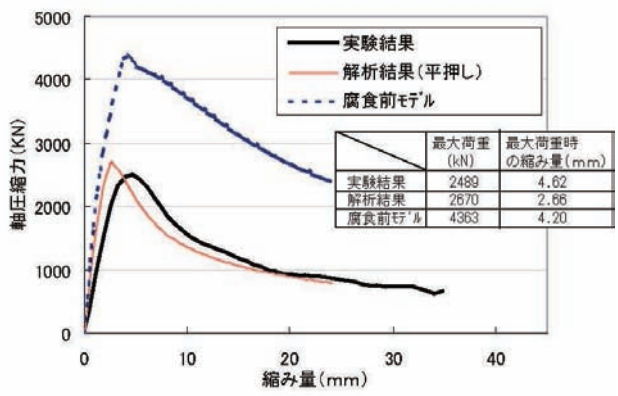
図 4.4.2.13　飛沫帯 NO.1 供試体



（実験）　（解析）　（実験）　（解析）

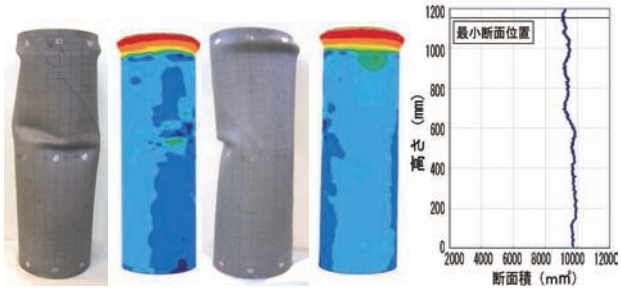
西　　南

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

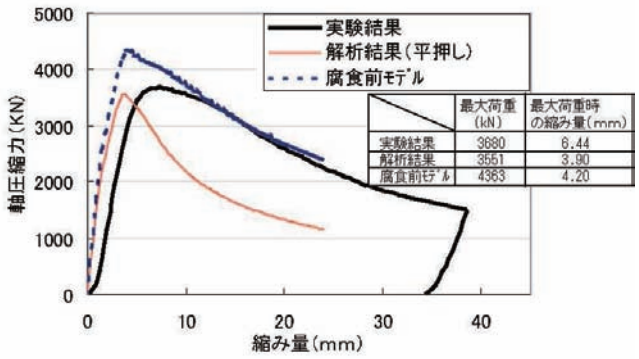
図 4.4.2.14　干満体 NO.2 供試体



（実験）　（解析）　（実験）　（解析）

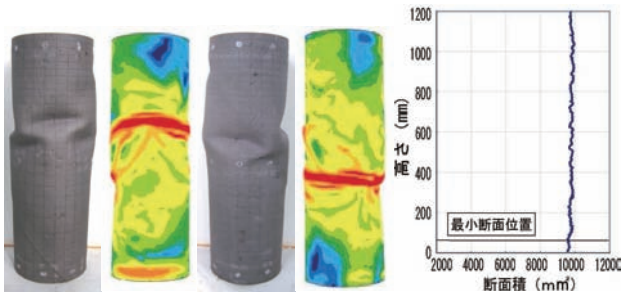
東　　北

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

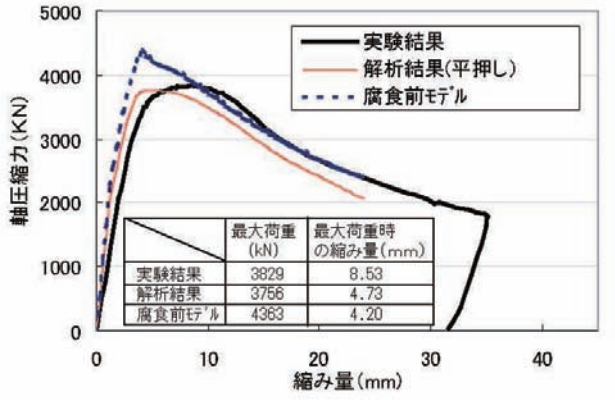
図 4.4.2.15　海中部 NO.3 供試体



（実験）　（解析）　（実験）　（解析）

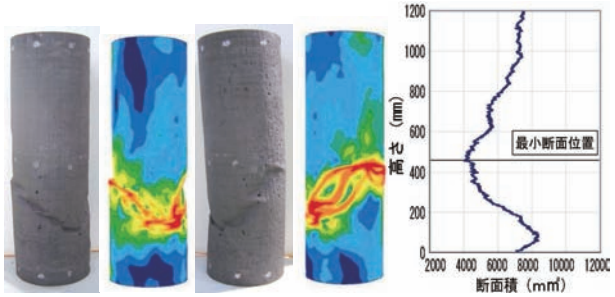
北　　南

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

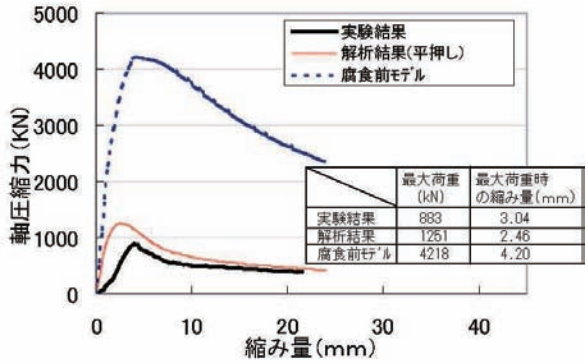
図 4.4.2.16　海中部 NO.4 供試体



（実験）　（解析）　（実験）　（解析）

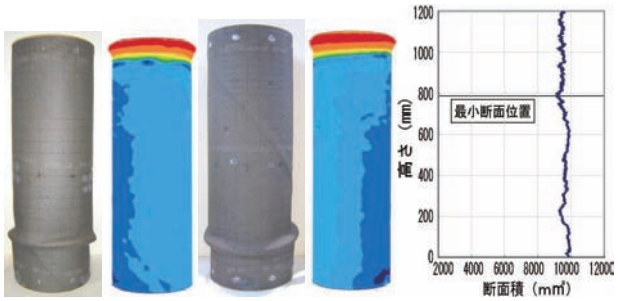
北　　西

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

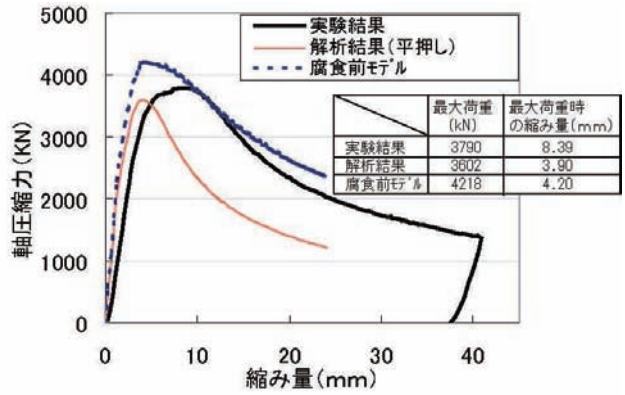
図 4.4.2.17　飛沫体 NO.5 供試体



（実験）　（解析）　（実験）　（解析）

東　　西

a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

図 4.4.2.18　海中部 NO.6 供試体

海中部である鋼管 NO.3 について残存耐荷力は，図 4.4.2.15b)に示すように，解析結果の耐荷力とほぼ一致した．図 4.4.2.15a）に示すように，変形図をみると NO.3 では軸方向の断面積がほぼ一様であるため，象脚形の座屈形態になったと考えられるが，このような場合は座屈発生位置を特定するのは難しく NO.3 では上部で発生した．

海中部の鋼管 NO.4 についても残存耐荷力は解析とほぼ一致し，降伏後の荷重変位曲線についても解析とも一致しているのがわかる．鋼管 NO.4 では，中央付近に直径約 30mmおよび 20mmの孔食があるが，これによる応力集中は，耐荷力や変形能にあまり影響しないと考えられる．

図 4.4.2.17 に示す飛沫帯の鋼管 NO.5 では，実験結果と解析結果は，最高荷重で 400kN 程度の差がみられた．本供試体も，NO.1 と同様に腐食が最も著しい部分で座屈しており，最高荷重の差は実験では曲げ変形にともなって載荷板が回転したためと考えられる．

海中部である鋼管 NO.6 については，図 4.4.2.18b）に示すように，耐荷力は解析結果とほぼ一致した．図 4.4.2.18a)から，変形図をみると象脚形の座屈が認められるが，軸方向の断面積がほぼ一様であるため，NO.3 と同様に座屈発生位置は実験と解析とは異なっている．

（4）まとめ

以上，腐食表面形状を考慮した残存圧縮強度解析例を紹介した．有限要素法により腐食鋼板および板で構成される部材の残存圧縮強度を評価する場合，腐食表面凹凸形状についてはまだ限られた基礎資料しかないものの，一般の腐食表面では，要素幅は概ね 1cm 以下，要素の板厚はその要素の領域の平均板厚を用いれば，十分な精度で評価できそうである．また，最高荷重後の座屈変形様式についても実験結果とほぼ一致した終局挙動を推定することが可能である．これに関連して，板厚や表面の凹凸などの計測においても，むやみに小さい間隔で測定することもないようで，要素に与える板厚や中央面の偏心などの要素の平均値を把握できる程度の計測で，一定の評価は可能と思われる．

4.4.3　初期不整（初期撓み，残留応力）が腐食による耐荷力減少に与える影響

(1)　腐食にともなう残留応力の変化解析

板が腐食すると，板厚減少にともなって腐食する前の残留応力状態から，減肉後自己釣り合い状態を満しながら変化する．

腐食前の構造物の残留応力をσ_0とすると，仮想仕事の原理を用いて，平衡状態は次式のように表すことができる．

$$\int_{\Omega}\{\delta\varepsilon\}^{T}\{\sigma_0\}dV=0 \tag{4.4.3.1}$$

あるいは

$$\int_{\Omega}[B]^{T}\{\sigma_0\}dV=\{0\} \tag{4.4.3.2}$$

ここに，Ωは構造物全領域を示し，$\{\delta\varepsilon\}$は仮想ひずみ，$\{\mathbf{B}\}$は変位-ひずみ関係を示すマトリクスで，ひずみを$\{\varepsilon\}$とすると，

$$\{\varepsilon\}=[\mathbf{B}]\{u_i\} \tag{4.4.3.3}$$

で，変位関数$[\mathbf{N}]$を適当に微分して得られる．

いま，元の領域Ωを，腐食した領域Ω_1と腐食していない領域Ω_2に分けて，式(4.4.3.1)を示すと，

$$\int_{\Omega_1}[B]^{T}\{\sigma_0\}dV+\int_{\Omega_2}[B]^{T}\{\sigma_0\}dV=\{0\} \tag{4.4.3.4}$$

となる．一方，腐食していない領域の残留応力が，$\{\sigma_0\}$から$\{\sigma_0+\Delta\sigma\}$に変化したと仮定すると，自己釣り合い状態から，

$$\int_{\Omega_2}[B]^{T}\{\sigma_0+\Delta\sigma\}dV=\{0\} \tag{4.4.3.5}$$

と表すことができ，式(4.5.4)と(4.5.5)を比較すると，残留応力の変化量$\{\Delta\sigma\}$は，次式を解くことによって求めることができる．

$$\int_{\Omega_2}[B]^{T}\{\Delta\sigma\}dV=-\int_{\Omega_1}[B]^{T}\{\sigma_0\}dV \tag{4.4.3.6}$$

したがって，式(4.4.3.6)に基づき，残留応力変化$\{\Delta\sigma\}$を求め，腐食前の残留応力$\{\sigma_0\}$に加えれば，腐食後の残留応力が求まる．しかし，式(4.4.3.4)において，左辺第1項が腐食によって消滅すると考えれば，腐食していない領域を対象として，式(4.4.3.5)を満たす応力$\{\sigma_0+\Delta\sigma\}$を求めれば，腐食後の残留応力を直接求めることができる．式(4.4.3.5)あるいは(4.4.3.6)を応力について解こうとすると，反復収束計算を用いることになるが，実際には数回の反復で実用的な解を得ることができる．

以下では，上記の残留応力の変化解析例として，モデル化された腐食形態について板の残留応力分布の変化例を示す．

図4.4.3.19のような溶接型の残留応力があるフランジ板(図は対称性を考慮し，フランジ半幅を示している．なお，溶接線は板幅方向距離=0の位置である)が，図4.4.3.20a)～c)に示すような3つの腐食パターンに対する残留応力の変化解析結果を図4.4.3.21a)～c)に示す．これらの図で，dは腐食深を示す．図からわかるように，溶接線を挟んで対称に腐食した場合には，残留応力の分布形状はほとんど同じ形状を保ったまま，減肉部の応力側に平行移動するような変化することがわかる（パターン１では，フランジ端の圧縮応力が開放されるので圧縮側に,逆にパターン2では溶接近傍の引張応力が開放されるので引張側にシフトする)．

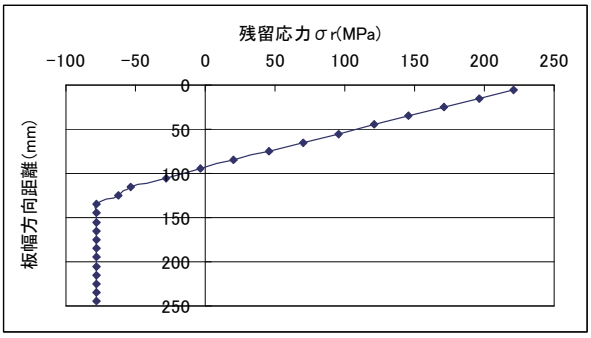
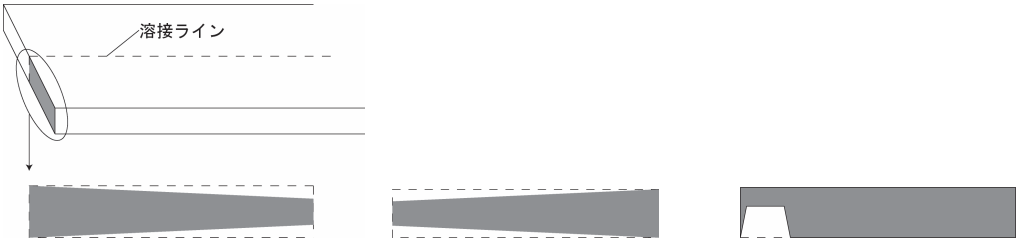
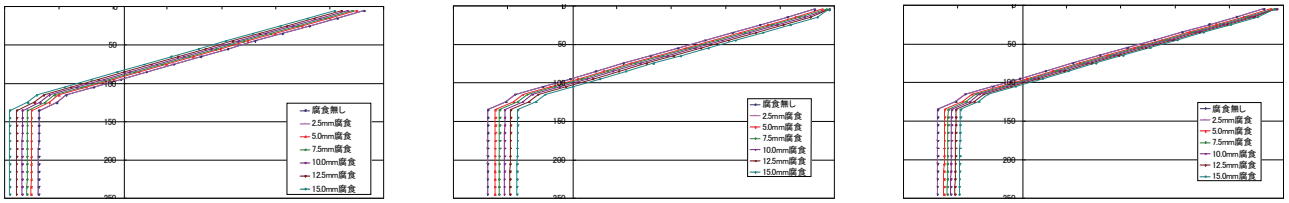


図 4.4.3.19　仮定した腐食前の溶接型残留応力



a)パターン１(先細り)　　b)パターン２(元細り)　　c)パターン３(溝状)

図 4.4.3.20　モデル化された腐食パターン



a)先細りパターン　　b)元細りパターン　　c)溝状パターン

図 4.4.3.21　減肉による残留応力の変化

なお，溶接による残留応力は，実際には板厚方向に一様ではないが，多くの耐荷力解析で仮定されているように残留応力は板厚方向に一定と仮定すると，腐食減肉が一様（どの位置でも同じ残存板厚）な場合には，残留応力は変化しない．

図 4.4.3.22 に示すように，50㎜ 以上のような極厚板では，圧延過程において冷却速度の違いにより板厚方向に分布する残留応力が発生する．実際には，通常の厚板でもこの残留応力が発生していることが確かめられている．この残留応力は，構造物の強度にはあまり影響しないと思われるが，腐食形態によっては残存強度に影響することも予想される．図 4.4.3.23 は，板の片面が一様に減肉した場合の残留応力分布の変化を示したものであるが，図からわかるように，残留応力の分布形状は保持したまま，残留応力の値が小さくなっていく様子がわかる．

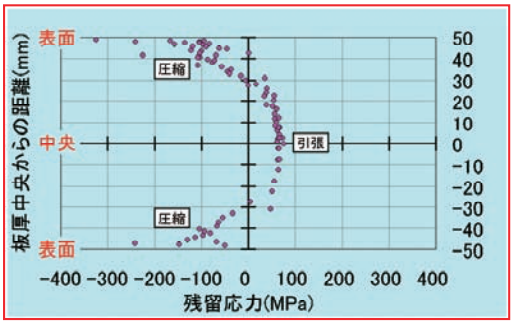


図 4.4.3.22　圧延過程で発生する
板厚方向に分布する残留応力

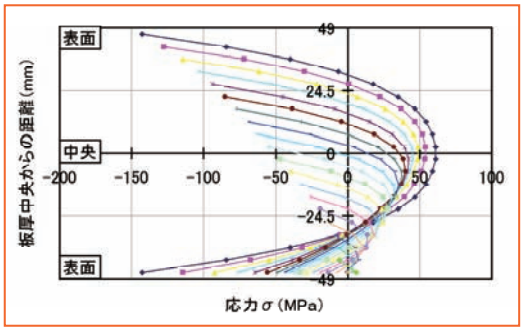


図 4.4.3.23　片面一様腐食した場合の
板厚方向残留応力分布

(2)　残留応力変化が耐荷力におよぼす影響

図 4.4.3.24 に示すプレートガーダーの圧縮フランジ，腐食して図 4.4.3.21 に示すような残留応力分布に変化したと仮定して，曲げ耐荷力解析を行った曲げ耐荷力の低下の様子を，表 4.4.3.9 に，また，先細りパターンについて図 4.4.3.25 に示す.実際にはプレートガーダー断面全体の残留応力が自己釣り合い状態となるように応力が変化するが，ここでは，フランジだけの自己釣り合いを満たせばよいとしている.

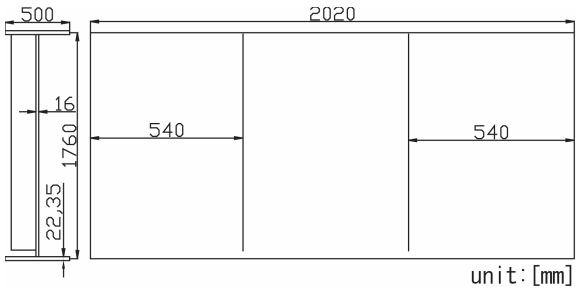


図 4.4.3.24　解析モデル

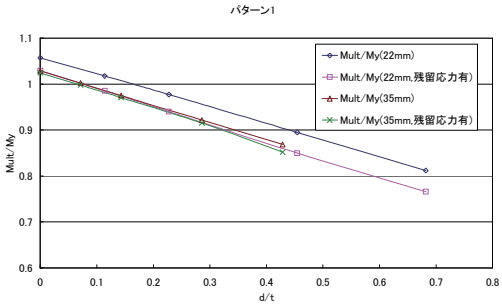


図 4.4.3.25　腐食に伴う曲げ耐力の低下

表 4.4.3.9　腐食に伴う残存曲げ耐力の低下

パターン1(残留応力無)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	1.000	1.000
2.5	0.963	0.974
5.0	0.924	0.948
10.0	0.846	0.896
15.0	0.768	0.844

パターン1(残留応力有)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	0.973	0.996
2.5	0.932	0.970
5.0	0.889	0.943
10.0	0.804	0.890
15.0	0.724	0.828

パターン2(残留応力無)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	1.000	1.000
2.5	0.959	0.974
5.0	0.922	0.947
10.0	0.841	0.895
15.0	0.757	0.842

パターン2(残留応力有)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	0.973	0.996
2.5	0.927	0.968
5.0	0.883	0.941
10.0	0.793	0.888
15.0	0.707	0.833

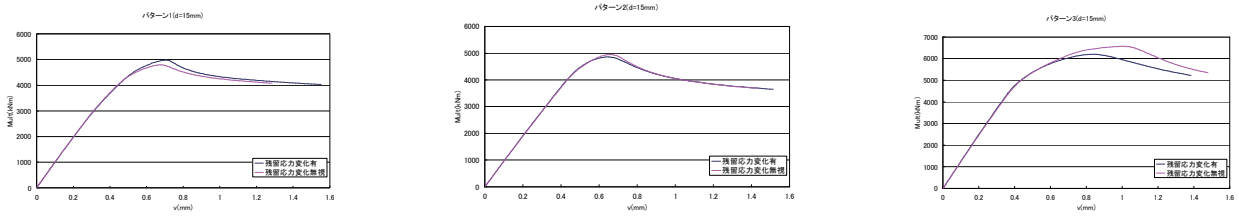
パターン3(残留応力無)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	1.000	1.000
2.5	0.991	0.994
5.0	0.983	0.989
10.0	0.966	0.980
15.0	0.947	0.973

パターン3(残留応力有)		
d(mm)	板厚(mm)	
	22	35
0.0	0.973	0.996
2.5	0.961	0.987
5.0	0.949	0.977
10.0	0.927	0.952
15.0	0.902	0.920

表 4.4.3.9 および図 4.4.3.25 に示すように,腐食深 **d** の増加につれて曲げ耐力がほぼ直線的に低下してい

る．残留応力がある場合とない場合を比較すると，残留応力がある場合は曲げ耐力が低い．

図 4.4.3.26 に，腐食していない場合の残留応力分布を適用した曲げ耐荷力解析結果と，腐食にともなって変化した残留応力分布を適用した結果を比較して示す．また，表 4.4.3.10 に，初期残留応力を考慮した耐荷力と腐食による残留応力変化を考慮した曲げ耐力を比較して示す．これらの結果からは，腐食に伴う残留応力の変化が残存曲げ耐荷力におよぼす影響は小さく，腐食減肉と初期の残留応力を考慮した解析でも一応の残存曲げ耐荷力評価は可能と思われる．ただし，初期の残留応力分布を適用する場合には，腐食減肉した後には，もはや自己釣り合い状態にはないことに注意しておく必要がある．



a)パターン 1　　b)パターン 2　　c)パターン 3

図 4.4.3.26　残存耐荷性能におよぼす残留応力の変化の影響

表 4.4.3.10　腐食に伴う残留応力変化が曲げ耐力に及ぼす影響

	パターン1	パターン2	パターン3
残留応力変化有	4976	4857	6197
残留応力変化無視	4792	4949	6563
差	184	-91	-366

4.4.4　腐食と補修履歴を考慮した力学性能評価

(1)　現状と問題点

既存構造物の健全度を評価するより直接的な方法として現場計測や載荷実験等があり，近年，各種の計測手法が開発されている．しかしながら，ライフサイクルコストを考慮した今後の性能照査型設計においては構造物の長期間にわたる力学性能の変化を定量的に予測するためには，何らかの解析的な手法を開発する必要がある．

腐食した構造物の性能評価の一環として各種構成部材の腐食形状を測定しその部材耐力に与える影響について検討した研究は近年数多く見られる[1),2)]．これらの検討では腐食による体積減少分を考慮した初期形状を与え[3),4)]通常の耐荷力解析により評価しうることが報告されている．単独の部材については静定構造であるため，このような手法で十分な耐力評価が可能となる．しかしながら，部材を集成して成り立っている不静定構造物では，部材間の腐食や補修の履歴が相互に影響し，構造系が変化するため上記のような耐荷力の評価手法では十分な精度で耐力の評価ができない場合があると考えられる[1)]．

図 4.4.4.1 には鋼橋の力学性能の１つである耐荷力を例として，供用開始時から腐食進行時，補強時の耐荷力の変化を図示している．供用開始時から常に死荷重が載荷された状態において，時間の経過とともに腐食による部材体積減少が進行し，その耐荷力が徐々に低化していく．供用開始時の耐荷力を F_I とし，腐食進行時の耐荷力を F_C とすると，$F_I > F_C$ となる．この腐食による劣化が進行し，通常の使用時において安全性に問題が生じると判断される時に腐食箇所に対する補修が施される．補修後の構造物の耐力には，それまで構造物が受けた腐食や荷重の履歴により構造物内に生じた初期状態と異なる残留応力や残留変形が影響する．すなわち，死荷重の載荷状態で腐食が進行し，補修作業が行われため，腐食による損傷形態や補修時の支持方法によって補修後の構造系に内在する残留応力や残留変形の状況は建設当初に比べ大きく異なる可能性がある．以上より，部材断面を幾何学的に建設当初の状態に復元しても補修後の耐荷力 F_U が建設当初の状態 F_I に復元しているか否かは必ずしも明らかではない．したがって，構造物が現在保有している力学性能を正確に把握するためには，過去の腐食や荷重履歴さらに補修履歴を，時系列的に考慮し，現在構造物に内在している残留応力や残留変形を正しく算定し構造物の力学性能の評価に反映させる必要がある．しか

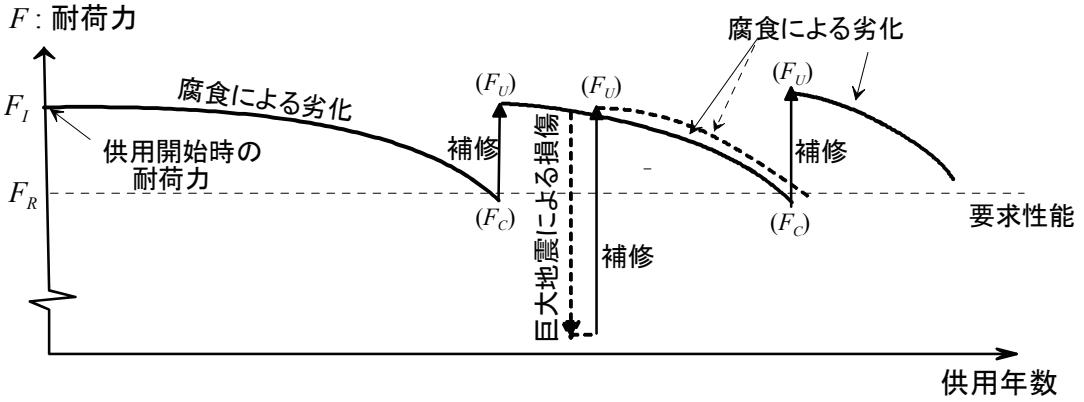


図 4.4.4.1　腐食の進行と補修による耐荷力の変化

しながら，現状の力学性能の評価法においては以下のような問題点を有している．

① 腐食進行時の耐荷力 F_Cの評価においては，単に，腐食による体積減少分を考慮した初期形状を与え供用開始時の耐荷力 F_I の評価と同様に，通常の荷重増分法や変位増分法などの耐荷力解析により評価されている．実際には死荷重が存在した状態で部材体積が減少していくので，荷重履歴が異なっている．

② 腐食や大きな外乱等に起因した過去の履歴により補修時，構造物中には初期状態と異なった残留応力や残留変形が存在しているが，これらが補修後の力学性能に与える影響は無視されている．

③ 死荷重が載荷した状態でジャッキアップせずに構造物を補修した場合には，初期状態と異なり，補修部分の材料に関しては補修後における応力は零で，その他の部分には死荷重による応力および変形が発生しているが，これらが補修後の構造物の力学性能に与える影響は無視されている．

④ 過去に腐食や地震などにより損傷した構造物をジャッキアップして補修しても，残留応力は初期状態には戻らず，新たな塑性履歴を与えることになるが，これらが補修後の構造物に与える影響は無視されている．

(2) 腐食や補修の履歴を考慮しうる統合化解析法の提案

(1)で述べたように，現在の実務において腐食や補修した鋼橋の残存強度を推定する一般的な手法では，これらの構造部材を単に幾何学的に体積減少や体積増加させた要素で表現することで解析している．この結果，現行の手法では鋼材の腐食や過去に受けた補修の履歴により構造物内に生じた残留応力や残留変形が無視されることになる．したがって，腐食や補修の履歴によって生じた残留応力や残留変形が構造物の残存耐力に与える影響が明らかにされていない現状では，現行の残存耐力の評価法が妥当であるか必ずしも明らかでない．

鋼構造物の劣化の要因として重要な腐食による耐力低下の過程および補修による耐力復元の過程等の履歴を正確に考慮し，建設の初期状態から将来に至るまで構造物の力学性能の変化を時系列的に追跡しうる解析手法として矛盾のないものであるためには，制御パラメータとして従来の構造解析で用いられている荷重や変位の他に腐食や補強による部材体積の変化量を新たなパラメータとして導入する必要がある．この解析手法によると，直接的に腐食や補修による鋼構造物の力学性能変化の履歴を時系列的に把握できるのみならず，構造物の供用期間における地震などの大きな外乱による損傷や補修などの履歴も正確に考慮できる．これらの機能により，腐食などの日常的な劣化とともに，まれな事象である大地震や補修などの履歴も考慮した鋼構造物の全供用期間における統一的な力学性能の評価が可能となる．

荷重や変位のような従来までの制御変数に加えて新たな制御変数を追加し腐食や補修による構造部材の体積変化を考慮した新しい解析方法について説明する[5)-7)]．

更新ラグランジェ手法によると，物体の $Q^{(N)}$ 状態において更新 Lagrange 座標 $(X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)})$ は，初期状態における物

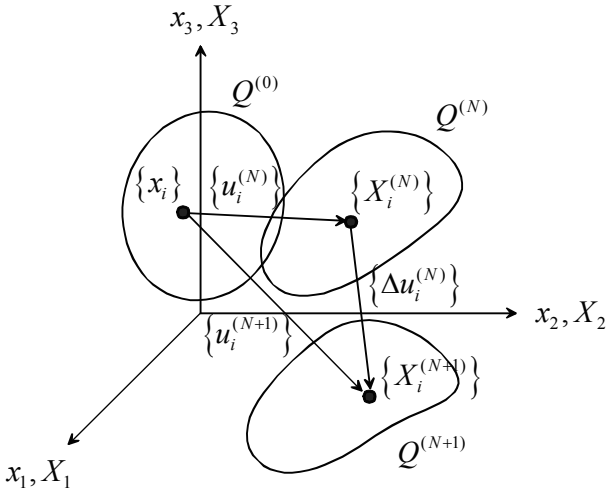


図 4.4.4.2 座標系の定義

体中の位置(x_1, x_2, x_3)の$Q^{(N)}$状態での位置として次のように定義される（**図 4.4.4.2**）.

$$X_i^{(N)} = x_i + u_i^{(N)}$$

(4.4.4.1)

ここで(x_1, x_2, x_3)は直交デカルト座標であり，$u_i^{(N)}$は$Q^{(N)}$状態での材料点の並進変位のx_i座標方向成分を表す.

物体は$Q^{(N)}$状態において，物体の体積，外力および変位の変化により$Q^{(N+1)}$状態に到達したと考える. $Q^{(N)}$状態，$Q^{(N+1)}$状態について，更新 Lagrange 座標$(X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)})$を用いて仮想仕事の原理を表すとそれぞれ次のようになる.

$$\int_{V^{(N)}} \rho^{(N)} \frac{\partial^2 u_i^{(N)}}{\partial t^2} \delta u_i^{(N)} dV + \int_{V^{(N)}} \sigma_{ji}^{(N)} \frac{\partial \delta u_i^{(N)}}{\partial X_j^{(N)}} dV$$
$$= \int_{S^{(N)}} \overline{t}_i^{(N)} \delta u_i^{(N)} dS + \int_{V^{(N)}} \overline{b}_i^{(N)} \delta u_i^{(N)} dV \tag{4.4.4.2}$$

$$\int_{V^{(N+1)}} \rho^{(N+1)} \frac{\partial^2 u_i^{(N+1)}}{\partial t^2} \delta u_i^{(N+1)} dV + \int_{V^{(N+1)}} \sigma_{ji}^{*(N+1)} \frac{\partial \delta u_i^{(N+1)}}{\partial X_j^{(N)}} dV$$
$$= \int_{S_\sigma^{(N+1)}} \overline{t}_i^{(N+1)} \delta u_i^{(N+1)} dS + \int_{V^{(N+1)}} \overline{b}_i^{(N+1)} \delta u_i^{(N+1)} dV \tag{4.4.4.3}$$

$Q^{(N)}$状態の仮想仕事の式において，$\sigma_{ji}^{(N)}$はコーシーの応力，$\rho^{(N)}$，$V^{(N)}$，$S_\sigma{}^{(N)}$は物体の密度，体積，表面積，$\overline{b}_i^{(N)}$，$\overline{t}_i^{(N)}$,体積力，表面力のx_i座標方向成分である．$Q^{(N+1)}$状態の仮想仕事の式においては$\sigma_{ji}^{*(N+1)}$は更新 Lagrange 座標$(X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)})$で定義される$Q^{(N+1)}$状態での更新 Kirchhoff 応力である. $Q^{(N)}$状態から$Q^{(N+1)}$状態への変化が微小であるとき，$Q^{(N+1)}$状態での$u_i^{(N+1)}$，$\sigma_{ji}^{*(N+1)}$，$\rho^{(N+1)}$，$V^{(N+1)}$，$S^{(N+1)}$は，$Q^{(N)}$状態の対応する物理量を用いて次のように表すことができる.

$$\begin{aligned}
u_i^{(N+1)} &= u_i^{(N)} + \Delta u_i^{(N)} \\
\sigma_{ji}^{*(N+1)} &= \sigma_{ji}^{(N)} + \Delta \Pi_{ji}^{(N)} \\
\rho^{(N+1)} &= \rho^{(N)} + \Delta \rho^{(N)} \\
V^{(N+1)} &= V^{(N)} + \Delta V^{(N)} \\
S_\sigma{}^{(N+1)} &= S_\sigma{}^{(N)} + \Delta S_\sigma{}^{(N)}
\end{aligned} \tag{4.4.4.4}$$

ここに，$\Delta \Pi_{ji}^{(N)}$は更新 Lagrange 座標$(X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)})$で定義される公称応力である．また，$S_\sigma^{(N)}$の下添え字$\sigma$は外力による力学境界を示す．なお，物体表面積の変化は体積変化により不可避的に生じる.

式(4.4.4.4)の関係を式(4.4.4.3)に代入すれば,

$$\int_{V^{(N)}+\Delta V^{(N)}}(\rho^{(N)}+\Delta\rho^{(N)})\frac{\partial^2(u_i^{(N)}+\Delta u_i^{(N)})}{\partial t^2}\delta\Delta u_i^{(N)}dV+\int_{V^{(N)}+\Delta V^{(N)}}\left(\sigma_{ji}^{(N)}+\Delta\Pi_{ji}^{(N)}\right)\frac{\partial\delta\Delta u_i^{(N)}}{\partial X_j^{(N)}}dV$$
$$=\int_{S_\sigma^{(N)}+\Delta S_\sigma^{(N)}}(\overline{t}_i^{(N)}+\Delta\overline{t}_i^{(N)})\delta\Delta u_i^{(N)}dS+\int_{V^{(N)}+\Delta V^{(N)}}(\overline{b}_i^{(N)}+\Delta\overline{b}_i^{(N)})\delta\Delta u_i^{(N)}dV \qquad (4.4.4.5)$$

左辺第１項，２項よりそれぞれ質量マトリックス，２項より接線剛性マトリックスまた右辺第１項，２項よりそれぞれ，節点力ベクトルおよび荷重ベクトルが求まる．3 次元の固体要素の場合は式(4.4.4.5)より，20 節点のアイソパラメトリック 6 面体要素を用いて増分型の剛性方程式を誘導する． はり要素の場合は文献[後藤ほか 2001]に示されている手続きにより，２節点のベルヌーイ・オイラー梁要素を用いての増分型の離散化式を誘導する．これら２種類の体積の増減を考慮しうる要素は汎用構造解析プログラム[8]のユーザーエレメントとして導入する.

式(4.4.4.5)は時間の影響も考慮に入れた厳密な式であるが，腐食や補修による体積変化の速度は地震時などの，動的外力および変位の変化の速度に較べると無視できるほどゆっくりしたものであるので，腐食や補修などによる体積変化のみを考慮する場合には左辺第１項は無視できる．このように，左辺第１項を無視した式は[5),7)]に示されている.

(3)　死荷重下での腐食の進展が構造物の耐荷力低下に与える影響

ここでは(2)で提示した手法を用い，腐食や補修の影響により橋梁の挙動がどのように変化するかについて検討する[7].

基本的な解析ケースを表 4.4.4.1 に示す.

Case0：死荷重載荷状態で極限状態まで腐食を進行させ，その挙動を追跡する.

Case1：死荷重載荷状態で腐食による部材断面の減少過程の計算を行い，その後，B 活荷重のみを漸増載荷していく．これは，腐食過程を正確に考慮した橋の残存耐力を算定法である.

表 4.4.4.1　基本的な解析ケース

Case	step1	step2	step3	備考
0	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 \rightarrow (1-\beta)A_0$ (腐食)		腐食に関する終局挙動の解析
1	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 \rightarrow (1-\beta)A_0$ (腐食)	死荷重 ＋ 活荷重 $(1-\beta)A_0$	腐食のある場合の残存耐力の計算
2	死荷重 $(1-\beta)A_0$	死荷重 ＋ 活荷重 $(1-\beta)A_0$		従来の手法による腐食のある場合の残存耐力の近似計算

注１）A_0：腐食前の断面

注２）β ：断面減少率，$\beta = \dfrac{\text{腐食により減少した部材断面積}(\sum\Delta A)}{\text{初期の部材断面積}(A_0)}$

Case2：腐食時の残存耐力を推定する場合に，Case1 の代わりに従来用いられた近似的な方法である．すなわち，初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え，その後死荷重を載荷した上で B 活荷重を漸増していく．

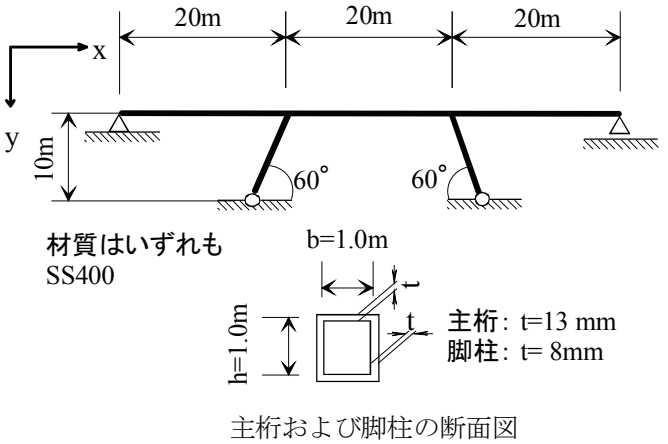
なお，腐食過程の解析では各部材断面における腐食進行パターンを予測する必要があるが，現在まだ十分な実測データが不足しているため，ここでは適当な仮定をすることでこれに対応する．

a) 解析モデル

解析対象としたΠ型ラーメン橋の寸法諸元を図 4.4.4.3 に示す．

図 4.4.4.3 のΠ型ラーメン橋は，外的に４次不静定の構造物である．主桁および柱部材とも箱型断面とし，材料はいずれも SS400 である．このときの降伏応力 σ_y は 235(MPa)，ヤング係数 E は 206000(MPa)とする．載荷荷重のうち，主桁に載荷する死荷重はその載荷強度を 0.035(MN/m)とし，脚柱にはこれを考慮しない．活荷重は B 活荷重とし， p_1 を脚柱と主桁の左側接合部直上に集中荷重として載荷し， p_2 は主桁に満載する．また，幾何学的な初期不整として，図 4.4.4.4 に示すように，脚柱に最大で部材長比 1/1000 となる正弦波の初期たわみを構造に対して非対称となるように与える．このような初期たわみは，Π型ラーメン橋が横移動型の座屈で終局状態に到達することを考慮して与える．初期残留応力に関しては考慮しない．材料構成則としては，いずれも Bi-Linear 移動硬化則とし，2 次弾塑性勾配は弾性係数 E の 1/100 として解析を行う．なお，ここでは部材構成板要素の局部座屈に関しては考慮していない．

計算にあたっての断面分割は，柱部材を均等に 10 分割，主桁の１スパンあたり均等に 14 分割とし，断面の分割は主桁および柱とも 12 分割とする．本解析法では一様に腐食しない場合も扱えるが，



主桁および脚柱の断面図

図 4.4.4.3　Π型ラーメン橋の寸法諸元



図 4.4.4.4　Π型ラーメン橋の幾何学的初期不整

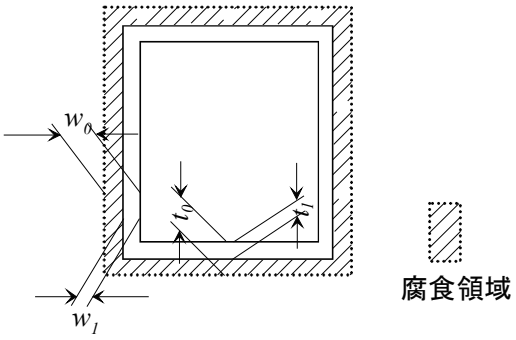


図 4.4.4.5　Π型ラーメン橋の部材断面の腐食パターン

今回は簡単のため，各部材の腐食パターンは図 4.4.4.5 のような断面全体が一様に腐食する場合を扱う．

b)　腐食による構造物の崩壊過程（Case0）

死荷重載荷条件下において，腐食が進行して構造物が崩壊する表 4.4.4.1 の Case0 の過程を解析する．このような構造物の挙動は従来の解析法では全く解析できない．

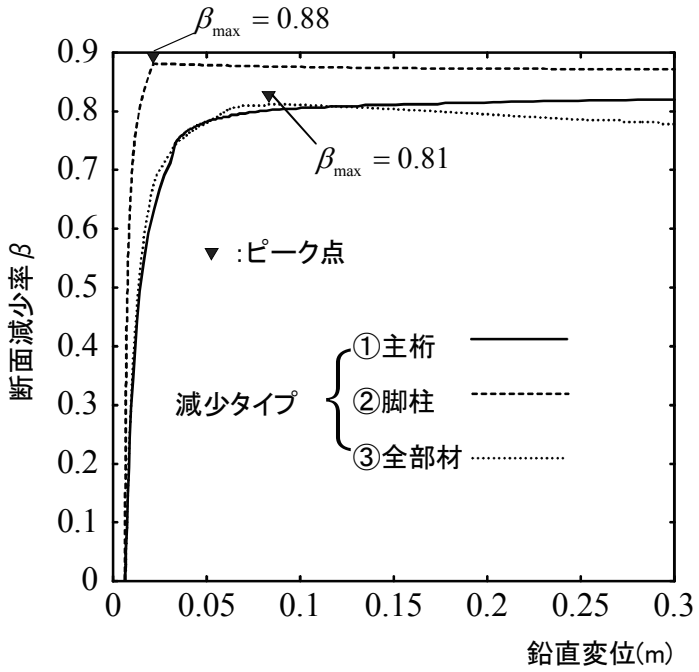


図 4.4.4.6 Π型ラーメン橋の断面減少率ー鉛直変位曲線

Π型ラーメン橋について，①主桁全域の断面，②脚柱全域の断面，③全部材の断面がそれぞれ均一に腐食により減少する３種類のパターンについてその終局挙動を解析する．解析結果として，各部材断面減少パターンに対応して，縦軸に断面減少率 β（腐食により減少した部材断面積/初期の部材断面積），横軸に主桁スパン中央の鉛直変位の関係を図 4.4.4.6 に示す．ここでは，腐食により，構造物が崩壊する場合の断面減少率を求めるため断面増分パラメータと増分変位ベクトルを用いた弧長法によっており，断面減少率ー鉛直変位関係においてピーク以降の解が得られる．この領域の挙動は，物理的な意味を特別にもっているわけではないが，構造物が崩壊時の断面減少率 β に対応するピーク点での値を正確に求めるためには，必然的にこのようなピーク点以降の領域までの解析が必要となる．図 4.4.4.6 より，①主桁断面のみが減少するパターンでは，この図の範囲において明瞭なピーク点は認められず，断面減少により徐々に変位が増加して崩壊に至る．③全部材の断面が減少するパターンでは，①主桁断面が減少するパターンと β＝0.5 程度まではその経路は類似している．しかし，断面減少率 β が 0.8 を少し越えたところで断面減少率のピークを迎えている．これ以上断面が減少すると，構造物は圧縮部材である脚柱の不安定挙動で崩壊に至る．②脚柱断面が腐食するパターンでは，減少率 β が約 0.87 付近まで構造物は安定であり，剛性の低下は少ない．しかしながら，変形が増加する前に③の場合の 40%程度の変位でピーク点に到達している．これは，圧縮部材である脚柱の断面積の減少で，分岐型の座屈による急激な不安定挙動が生じたことによると考えられる．これらの結果から，腐食による断面減少が主桁のみに生ずる場合には不安定挙動は生じにくいが，脚柱に腐食が及ぶと，このΠ型ラーメン橋は大きな変形が生ずる前に急激な不安定崩壊に至る可能性のあることが分かる．

以上から，不安定現象の発生しにくい曲げ材や引張り材が腐食する場合には崩壊に至るまでの変形や剛性の低下が顕著であり，現場計測による経時変化データに基づき，その構造物の危険性を予測することが可能であろう．一方，圧縮材が腐食し，分岐型の座屈により構造物が崩壊する場合，崩壊までの変形の増加や剛性の低下が明確に現れないため，現場計測により崩壊を予測することはかなり難しいと考えられる．

c)　腐食した構造物の残存耐荷力の評価（Case1）

腐食した構造物の残存耐荷力の評価法として，死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後，B 活荷重を漸増して残存耐荷力を計算する方法（Case1）と，初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え，その後死荷重を載荷した上で B 活荷重を漸増し耐荷力を計算する近似的な方法（Case2）を用いる．

まず，Π型ラーメン橋について(2)で検討したのと同じく，①主桁全域の断面，②脚柱全域の断面，③全部材の断面がそれぞれ均一に腐食により減少する３種類の断面減少パターンを対象とする．残存耐荷力を計算した腐食による断面減少率 β はいずれの場合も 0.5 と 0.75 の２種類である．各腐食パターンに対する解析結果を荷重－変位曲線として図 4.4.4.7～9 に示す．これらの荷重変位曲線において，縦軸は死荷重と活荷重の合計値であり，横軸は支間中央の鉛直たわみを示している．Case1 の解析では死荷重載荷までは断面減少がなく死荷重が満載後，断面を減少させているこのため荷重－変位曲線は一定の死荷重下で変位のみが増加している．ただし，圧縮材である脚柱の断面のみが減少する場合は変位の増加が小さい．一方 Case2 では初期形状として腐食により減少した断面の構造を無応力状態で与え，その後死荷重を漸増しているので死荷重満載までの荷重－変位曲線が Case1 と異なっている．しかしながら，断面減少後の死荷重満載時においては，いずれの腐食パターン，断面減少率においても Case1 と Case2 のつり合い点は一致している．その後の荷重－変位曲線も一致しており，得られる残存耐荷力も同一である．さらに，図 4.4.4.10 には，③全部材の断面に断面減少率 0.75 の腐食を考慮した場合の Case1 と Case2 における断面減少後の死荷重満載状態での部材の塑性化と変形の状態を示す．この図からも Case1 と Case2 の応力状態や変形状態に差は認められない．

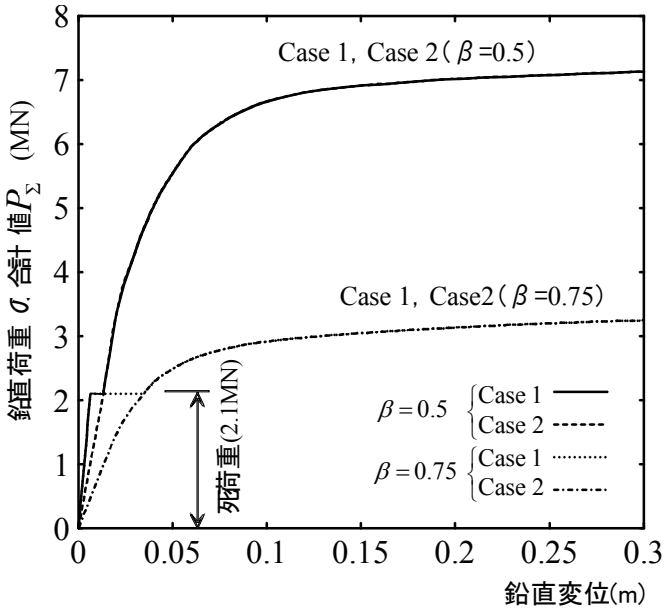


図 4.4.4.7 Π型ラーメン橋の荷重－変位曲線
（①主桁の腐食）

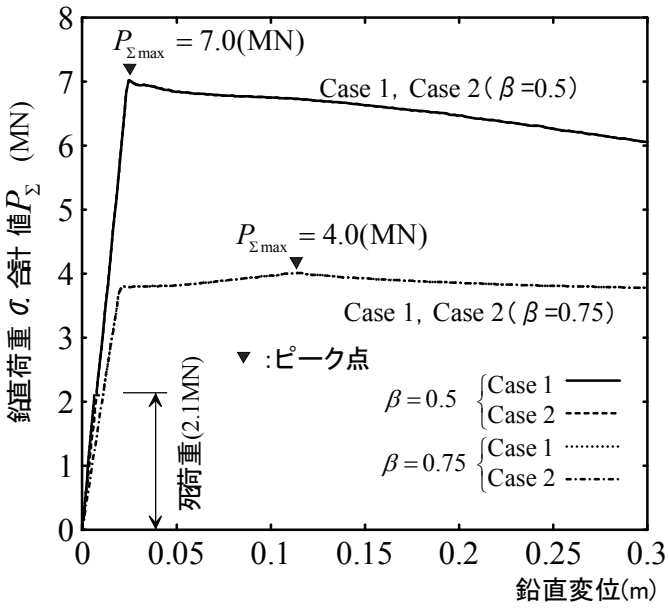


図 4.4.4.8 Π型ラーメン橋の荷重－変位曲線
（②脚柱の腐食）

以上の解析より，死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後，活荷重を漸増して残存耐荷力を計

算する厳密な方法（Case1）と，初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え，その後死荷重を載荷した上で活荷重を漸増し耐荷力を計算するという従来から用いられてきた近似的な方法（Case2）とは少なくとも数値上は等価な結果を与えることが判明した．なお，この事実は他の構造でも確認している[7]．

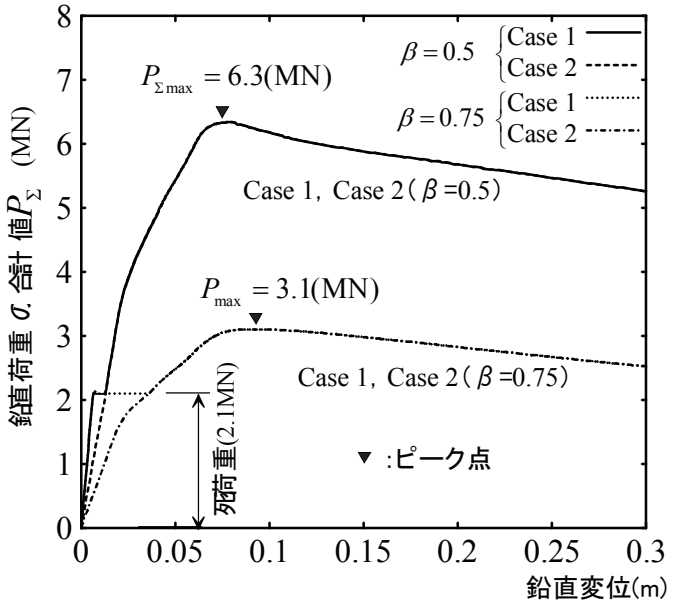


図 4.4.4.9 Π型ラーメン橋の荷重－変位曲線
（③全部材の腐食）

(4)　補修方法が構造物の耐荷力，耐震性能に与える影響

a)　既存ワーレントラス橋の腐食と補修

対象とする構造物は図 4.4.4.11 に示す 1950 年代に架設されたワーレントラス橋は橋である．部材断面や材料の降伏応力を**表 4.4.4.2** にまとめる．これらの部材はトラス格点において剛結されている．引張斜材はH型断面であり，x-y 平面に平行にフランジが配置されている．部材の腐食による欠損は**図 4.4.4.12** に示すようにコンクリート床版に埋め込まれた斜材の場所で生じている．H 断面の引張斜材の腐食は箱形断面の圧縮斜材に比べて特に進行している．そこで，補修においては，引張り斜材の腐食部位の断面積増加を目的として２枚の添接板が斜材のウェブを挟み込む形でボルト接合されたが，引張り斜材の曲げモーメントの作用が微小との考えから腐食したフランジは補修されていない．なお，補修は死荷重の載荷状態で行われた．このトラス橋

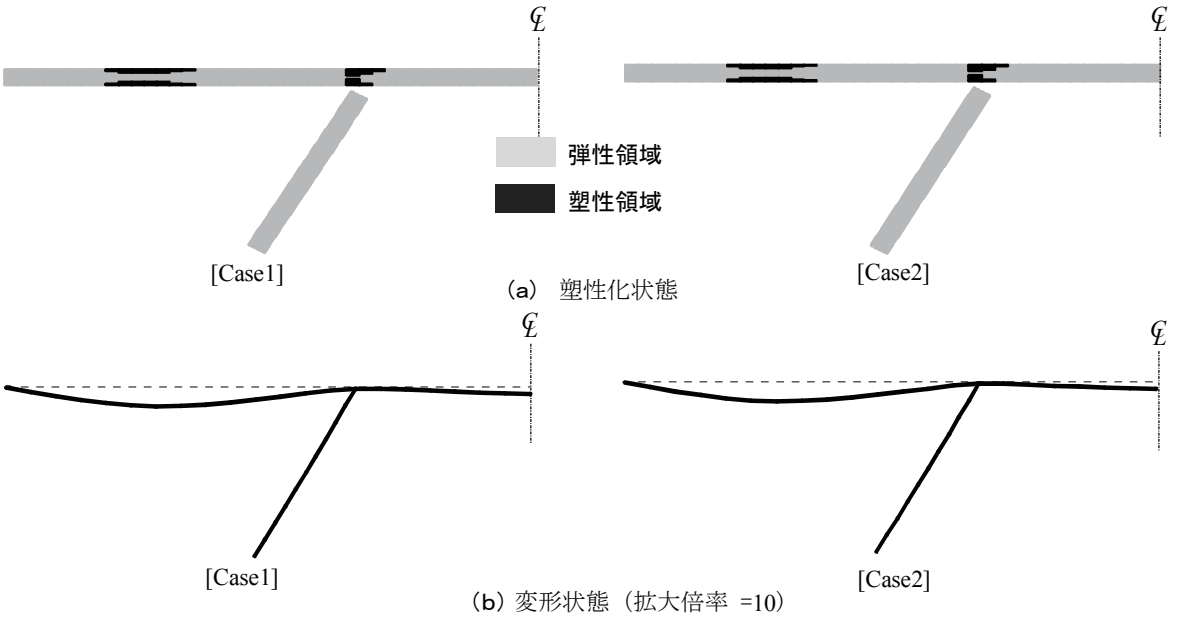


図 4.4.4.10　死荷重満載状態でのΠ型ラーメン橋の Case1 と Case2 での塑性化状態と変形状態
（③全部材腐食　β=0.75）

をモデルとし，上記以外の補修法も視野に入れ，腐食・補修履歴を時系列的に正確に解析し，補修方法の差がその力学性能に与える影響について検討する．

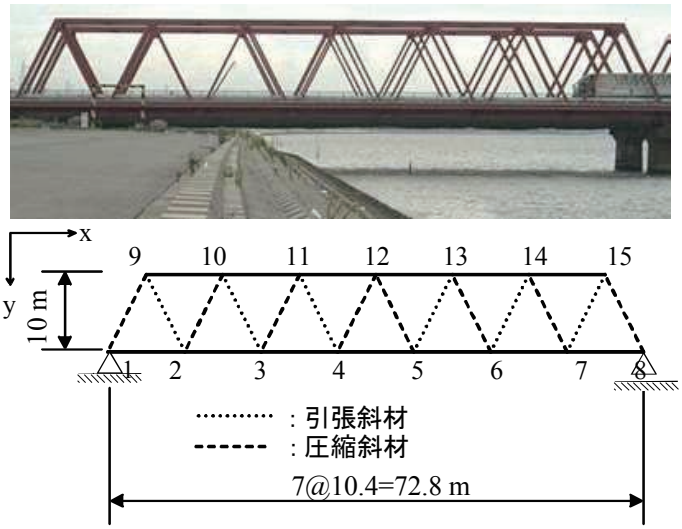


図4.4.4.11　数値計算モデル（ワーレントラス橋）

b)　数値解析モデル

a)で述べた腐食したワーレントラス橋を解析モデルとする．腐食したトラス橋のモデルとしては実構造の腐食パターンを簡易化したものを用いる．すなわち，図 4.4.4.13 に示すように，コンクリート床版に埋め込まれた引張り斜材の下部が下弦材との格点から上方へ 1m の範囲で一様に腐食した場合を考える．材料構成則は移動硬化則によっており，降伏後の塑性剛性は一定で，弾性剛性（$E=2.06\times10^{5}(Mpa)$）の 1%とする．死荷重強度は 0.0358MN/m で橋軸方向に沿って分布しており，これを下弦材の格点部に集中して載荷する．それぞれの部材の初期たわみは最大たわみを部材長の 0.1%とした sin 半波形状とする．建設当初において橋に存在する残留応力は無視する．材料構成則としては，いずれも Bi-Linear 移動硬化則とし，2 次弾塑性勾配は弾性係数 E の 1/100 として解析を行う．なお，ここでは部材構成板要素の局部座屈に関しては考慮していない．各々のトラス部材は解の収束性を考慮して 30 分割している．

表4.4.4.2　ワーレントラス橋の部材寸法と降伏応力

部材番号	断面	ウェブ	上フランジ	下フランジ	σy
1 - 9	BOX	400×15	450×14	360×13	317
2 - 9	H	326×9	360×12	360×12	317
2 - 10	BOX	360×13	332×13	332×13	235
3 - 10	H	300×13	360×12	360×12	235
3 - 11	BOX	340×12	300×9	300×9	235
4 - 11	H	330×9	250×11	250×11	235
4 - 12	BOX	230×9	340×9	340×9	235
1 - 2	BOX	360×9	360×11	450×9	235
2 - 3	BOX	360×9	360×11	450×9	317
3 - 4	BOX	360×12	360×14	450×11	317
4 - 5	BOX	360×14	360×14	450×11	317
9 - 10	BOX	400×12	450×13	360×12	235
10 - 11	BOX	400×16	450×18	360×17	317
11 - 12	BOX	400×19	450×22	360×22	317
		(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)

c)　解析内容

(2)の解析法により建設当初から腐食過程，補修過程を時系列的に解析し，腐食や補修の履歴により構造物内に内在する残留応力分布や残留変形を正確に評価し，既存構造物の力学性能評価に反映する．

i)　腐食過程の解析

はじめに死荷重作用下における腐食の進行過程の解析を行う．今回の解析においては，一定の死荷重作用下において，引張り斜材の腐食部位の腐食欠損率を $\beta=0$ から最終の欠損率 β_f まで一様増加させる．ここ

ではβ_f =0.9 とする．この腐食により引張斜材のすべての腐食領域において塑性化が生じる．

ii)　補修過程の解析

腐食欠損率が$\beta = \beta_f$ のときに，引張斜材の腐食部位に補修が施される．補修は部材を元の幾何学形状に完全に修復するのが理想的であると一般には考えられる．ここではこの補修方法を “完全補修法”と呼ぶ．しかしながら，このような補修は現実には難しい．腐食部材が引張り斜材の場合，a)で取り上げた実橋でも採用されたように，図 4.4.4.12 に示すごとく H 断面の腐食による全欠損断面積に等しい面積を持つ添接板をウェブ部分のみに追加し，斜材の引張り剛性と引張り強度のみを復元する処置がよく行われる．この補修方法をここでは“部分補修法”と呼ぶこととする．引張り斜材の断面が上記の２つの方法により補修された状態を図 4.4.4.14 に示す．極大地震などの大きな振幅を持つ地震波が入力した場合，引張り斜材であっても圧縮力が作用する可能性があることにより引張り斜材の曲げ剛性の復元が十分でない“部分補修法”では，その地震時の強度が建設当初の構造に較べ低下する可能性もある．ここでは上記の２つの断面補修方法の妥当性について調べる．

腐食による橋のたわみが顕著にならない場合，通常ベントなどによりジャッキアップせずに死荷重作用下において腐食部材に対する補修が施される．このような補修法では，材料の腐食欠損により生じたたわみは補修された橋において残留する．さらに，補修しても，引張り斜材の腐食区間の残存部分には大きな応力が



(a) 腐食したフランジ



(b) 添接板により補修されたウェブ

図 4.4.4.12　引張斜材の腐食および補修状況

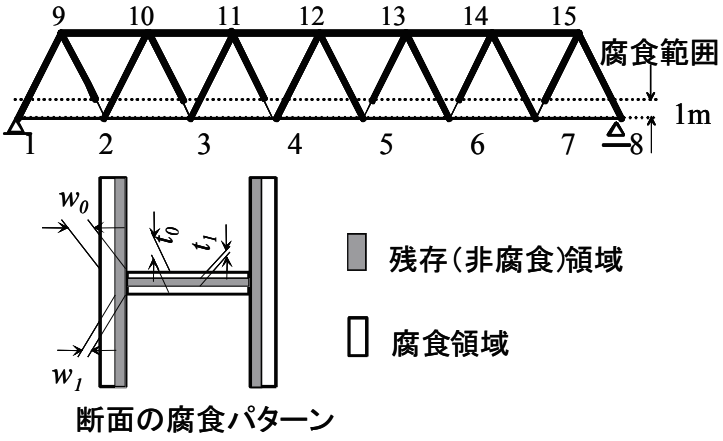


図 4.4.4.13　ワーレントラス橋の腐食パターン

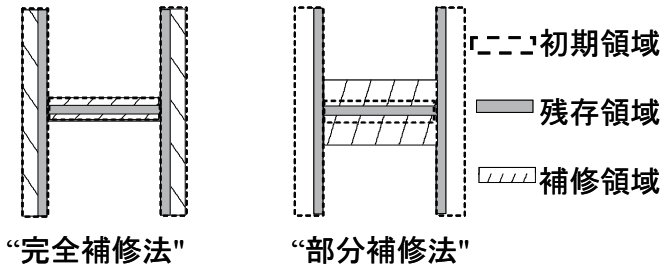


図 4.4.4.14　引張斜材の補修方法

作用し，一方，補修部分には活荷重や地震荷重が作用しない限り応力は発生しない．この補修方法をここでは“ジャッキアップなし”の補修と呼ぶ．

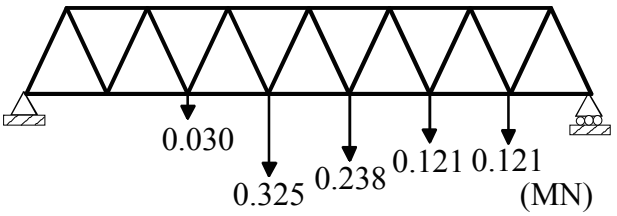


図 4.4.4.15　活荷重の載荷パターン

腐食によるたわみを除去するには補修する前に橋をジャッキアップしなければならない．ここではジャッキアップする方法として２つの方法を考える．“方法Ⅰ”は図に示す下弦材のすべての格点 2～7 に載荷されている死荷重を除去するためにジャッキアップする方法である．この方法では，弾性変形により生じているたわみは除去できるが，塑性変形によるたわみは除去できない．“方法Ⅱ”は，死荷重作用下において支間中央付近の２つの格点 4,5 のたわみを腐食していない初期状態のたわみとするように，これらの格点をジャッキアップする方法である．

iii)　補修した橋梁の極限挙動の解析

前節において，トラス橋のいくつかの可能な補修方法を説明した．ここではこのトラス橋について建設当初と補修後についてその極限挙動を比較し，補修方法が極限挙動に与える影響について調べる．極限挙動を検討するときに考慮する荷重として，ここでは常時の設計で用いられる静的な活荷重と動的な地震荷重の２つの荷重タイプを用いる．

静的な活荷重の載荷パターンは図 4.4.4.15 に示すが，これは部材 4-11 がクリティカルになるように決定している．解析では死荷重を一定値に固定し活荷重係数 λ_f を増加させる．活荷重係数がピーク近傍に到達すると弧長制御により解析を行う．なお，活荷重パラメータ λ_f は図 4.4.4.15 における活荷重パターンと載荷した活荷重との比によって定義されている．

地震荷重としては兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の加速度波形記録（JMA）の N-S 成分を 2 倍したものを入力水平加速度とする．このように加速度を拡大する理由としてはトラス橋に明確な損傷を生じさせるためである．動的応答解析は一定死荷重下において実行する．鋼材の密度は 7850 kg/m^3 である．床版の質量は単位長さ当たり 2410kg/m とし，下弦材の格点部に集中させる．時間に関する数値積分は Newmark の β 法（β =0.25）による．数値積分における最大時間増分は 0.01(Sec.)である．この時間増分は収束が悪い場合には小さくしている．

d)　引張斜材腐食部分の補修方法の影響

引張斜材の腐食部分の補修方法としてここでは先に説明した図 4.4.4.14 の“完全補修法”と“部分補修法”を検討対象とする．なお，補修はトラス橋をジャッキアップせず，死荷重の作用下で補修されるものとする．このため，腐食により生じたトラス橋のたわみは残留するとともに，死荷重作用下において補修後のトラス橋内の応力分布も初期状態とは異なったものになる．

活荷重を静的に載荷した時の荷重係数 λ_f と支間中央の鉛直変位の関係について補修を行ったトラス橋と腐食していない建設当初の橋に関して図 4.4.4.16 に示す．図中で u_d は初期状態での死荷重によるたわみ，u_c は腐食によるたわみを示している．この図より補修したトラス橋の極限挙動は斜材の“完全補修法”と“部分補修法”の差に関係なくほぼ一致する．しかしながら，補修した橋梁の最大荷重は建設当初の橋よりも小さくなる．これは主として補修した橋の腐食により生じた残留初期たわみに起因するものである．

地震荷重下における補修後の橋梁の動的解析結果として，図 4.4.4.17 に支間中央の鉛直変位の時刻歴応

答を建設当初の橋の時刻歴応答と比較することにより示す．図 4.4.4.17 より，補修した橋梁の動的挙動は建設当初のものとやや異なっている．補修した橋梁の最大応答変位$u_{\max}$は腐食のない建設当初の橋とほとんど同じであるが，補修した橋梁では残留変位u_rがより大きくなっている．とくに“部分補修法”により補修された橋では残留変位が最も大きくなっている．この残留変位は引張斜材の補修部分に生じる曲げ変形に起因して生じている．このことは，静的荷重下において曲げ変形が有意とならない引張斜材について，引張り剛性と引張り強度のみを復元し，曲げ剛性を復元しない“部分補修法”の考え方が地震などの動的荷重下の性能復元には必ずしも十分でない場合が有ることを示唆している．

e)　補修時のジャッキアップ方法の影響

腐食によるたわみが大きい場合，これを除去するため腐食した部材を補修する前にジャッキアップがなされる．ここで考えるジャッキアップの方法は c)ii)に示した“方法Ⅰ”，“方法Ⅱ”とする．この２つの方法によるジャッキアップで補修を行う場合のトラス橋支間中央の鉛直変位と橋に作用する鉛直死荷重の合計値の関係を図 4.4.4.18 に示す．ここで①は建設当初の橋に死荷重が作用した状態であり，①−②は死荷重作用下での腐食過程に対応する．②−③は“方法Ⅰ”で腐食した橋梁の死荷重が除かれるように下弦材の全節点をジャッキアップする過程である．一方，②−③’は“方法Ⅱ”で 支間

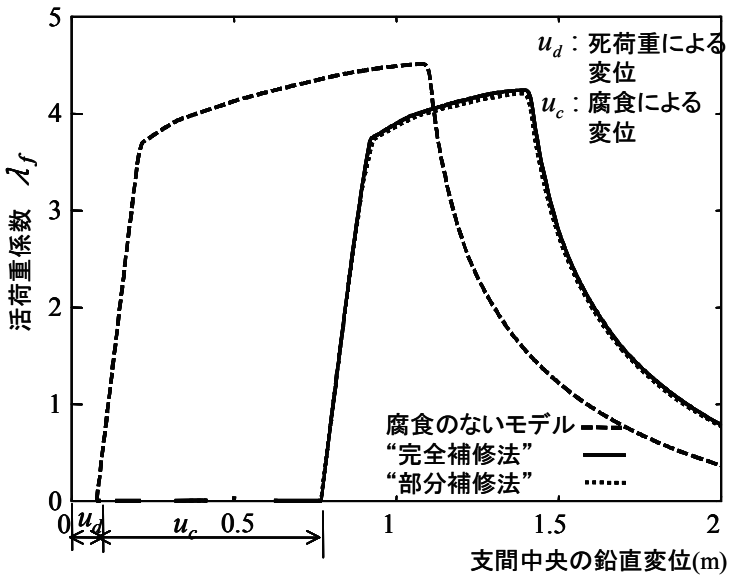


図 4.4.4.16　引張斜材に各種の断面補修を施した場合の荷重－変位曲線

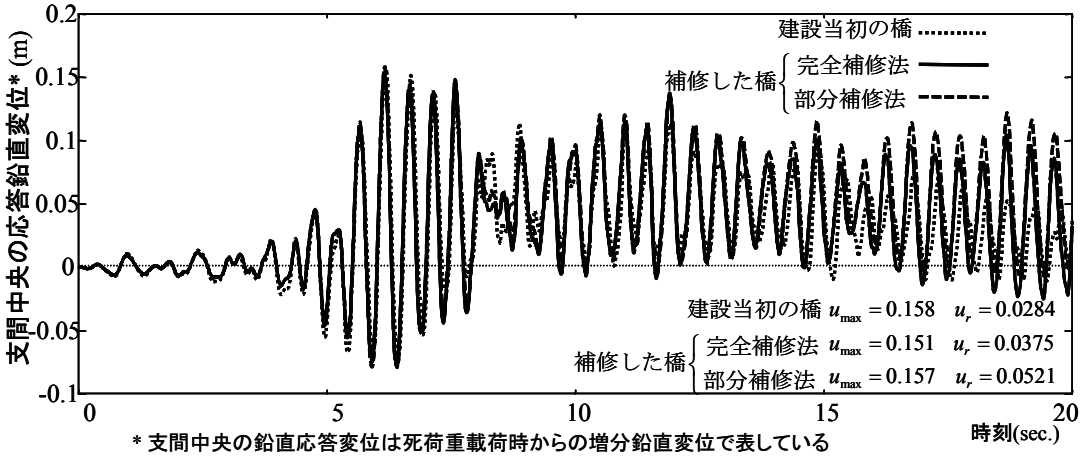


図 4.4.4.17　引張斜材の各種の断面補修を施した場合の地震時応答鉛直変位

中央付近の格点 4,5 の変位が零となるまでこれらの格点をジャッキアップする過程である． それぞれ，③，③’ において腐食した引張り斜材の補修が行われる．すべての腐食部材は「完全補修法」により幾何学的に元の形状に補修されるものとする．最後に③−④，③−④’でジャッキダウンして補修が全て終了する．図 4.4.4.19 からわかるように“方法Ⅰ”では鉛直死荷重は完全に取り除かれるが，死荷重下の腐食により生じた塑性変形に起因するたわみの部分は除去できない．支間中央付近の２つの格点の節点変位を取り除くようにジャッキアップする“方法Ⅱ”では図 4.4.4.19 に示すように，部材 3-11 および 4-11 の引張斜材の下部に局部的な塑性曲げ変形が生じる．

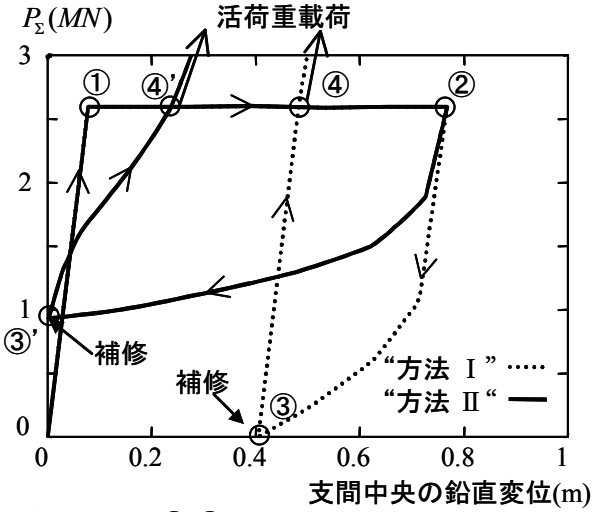


図 4.4.4.18 ジャッキアップおよびジャッキダウン過程におけるつり合い曲線

はじめに，２種類のジャッキアップ方法により補修を行ったトラス橋に活荷重を静的に載荷した時の極限挙動を荷重係数 λ_f と支間中央の鉛直変位の関係として図 4.4.4.20 に示す．またこの図には，ジャッキアップせず死荷重作用下で補修された橋ならびに建設当初の橋の極限挙動も比較のため記入している．図 4.4.4.20 より，“方法Ⅰ”により補修された橋の最大荷重はジャッキアップされていないものよりも若干高くなるが，建設当初の橋よりも若干低くなる．一方，“方法Ⅱ”により補修された橋の最大荷重はジャッキアップを行ったにもかかわらず，ジャッキアップしていないものと比較して増加していない．逆に，剛性は低下している．これは，“方法Ⅱ”により補修された橋では図 4.4.4.19 に示すように，部材 3-11 および 4-11 の引張斜材の下部に局部的な塑性曲げ変形が生じているためであると考えられる．

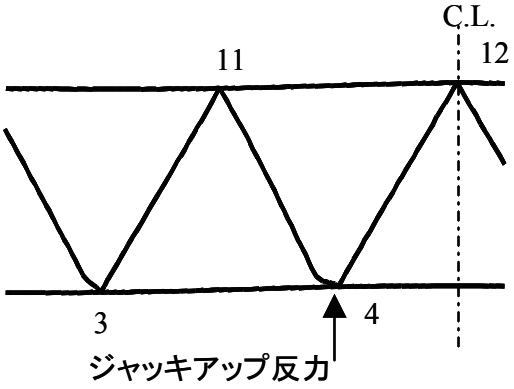


図 4.4.4.19 ”方法Ⅱ”によるジャッキアップ完了後に生じる局部曲げ変形

つぎに，地震荷重下における補修後の橋梁の動的解析結果として，図 4.4.4.21 に支間中央の鉛直変位の時刻歴応答を建設当初の橋の時刻歴応答と比較することにより示す．図 4.4.4.21 および図 4.4.4.18 より，“方法Ⅰ”により補修された橋の動的挙動は当初の状態の橋およびジャッキアップせずに補修した橋のそれとほぼ類似している．一方，“方法Ⅱ”により補修された橋は最大応答変位および残留変位が著しく大きくなっている．これはジャッキアップ過程において発生する塑性局部曲げ変形により引張斜材の座屈強度が大きく低下することによると考えられる．すなわち，腐食により生じたたわみを除く“方法Ⅱ” のジャッキアップ方法では補修した橋の動的挙動にかえって悪影響を及ぼすことがわかる．以上より，橋の腐食過程に

よるたわみが使用性の観点から許容されるものであれば，ジャッキアップせずに補修する方法が力学的および経済的な面から最も適当であるといえよう．

⑸　まとめ

ここでは，鋼構造物の劣化の要因として重要な腐食による耐力低下の過程および補修による耐力復元の過程等の履歴を正確に考慮し，建設の初期状態から将来に至るまで構造物の力学性能の変化を時系列的に追跡しうる汎用的で正確な解析手法を提示した．すなわち，制御パラメータに従来の解析で用いられている荷重や変位の他に腐食や補強による部材体積の変化量を新たなパラメータとして導入した．この解析手法によると，直接的に腐食や補修による鋼構造物の力学性能変化の履歴を時系列的に把握できるのみならず，構造物の供用期間における地震などの大きな外乱による損傷や補修などの履歴も正確に考慮できる．これらの機能により，腐食などの日常的な劣化とともに，まれな事象である大地震や補修などの履歴も考慮した鋼構造物の全供用期間における統一的な力学性能の評価が可能となる．

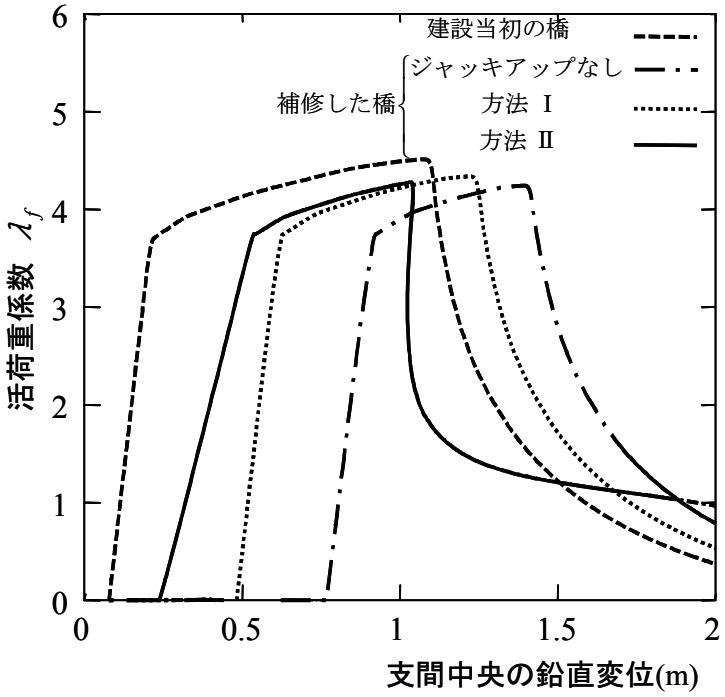


図 4.4.4.20　各種のジャッキアップ方法により補修を施した場合の荷重－変位曲線

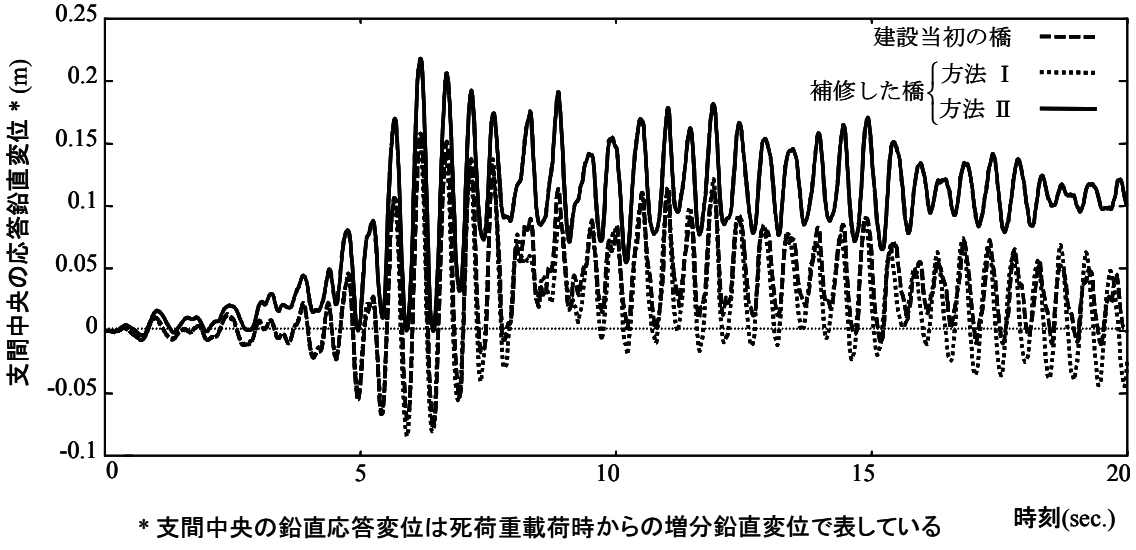


図 4.4.4.21　各種のジャッキアップ方法により補修を施した場合の地震時応答鉛直変位

本解析法の適用例として，まず，ラーメン橋を対象に腐食による崩壊過程の特性ならびに腐食履歴を無視した現行の残存耐力評価法の妥当性の検討を行った．つぎに，ワーレントラス橋を対象に補修方法や補修履歴による静的な終局特性，地震荷重下の動的な終局特性がどの様に変化するかについて検討した．得られた結果をまとめると以下のようになる．

(1) 不安定現象の発生しにくい曲げ材や引張り材が腐食する場合には崩壊に至るまでの変形や剛性の低下が顕著であり，現場計測による経時変化データに基づき，その構造物の危険性を予測することが可能であろう．一方，圧縮材が腐食し，分岐型の座屈により構造物が崩壊する場合，崩壊までの変形の増加や剛性の低下が明確に現れないため，現場計測により崩壊を予測することはかなり難しいと考えられる．

(2) 死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後，活荷重を漸増して残存耐荷力を計算する厳密な方法と，初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え，その後死荷重を載荷した上で活荷重を漸増し耐荷力を計算するという従来から用いられてきた近似的な方法とは少なくとも数値上は等価な結果を与える．

(3) 死荷重作用下で腐食欠損部材を幾何学的に元の断面と等しくなるように補修した場合でも，腐食によるたわみが大きいと，その耐力は建設当初の耐力まで回復しない．

(4) トラスにおいて腐食欠損したH型断面の引張り斜材を補修する場合，断面の腐食による全欠損断面積に等しい面積を持つ添接板をウェブ部分のみに追加し，斜材の引張り剛性と引張り強度のみを復元する処置がよく行われる．この手法と断面形状を幾何学的に元の状態に復元する場合と比較すると，静的な荷重下では両者はほぼ等価な終局挙動特性を示す．一方，動的な極大地震などの大きな振幅を持つ地震波が入力した場合，引張り斜材であっても圧縮力が作用することにより，補修された斜材の曲げ剛性の復元が十分でないと，トラス橋の地震時の性能は建設当初に較べ低下する可能性がある．

(5) 腐食により生じたたわみを取り除くためにジャッキアップし補修する場合，部材に局所的な曲げ変形が生じ，構造全体の力学性能が低下する可能性がある．この影響はとくに地震などの動的荷重下で顕著である．

4.4.5 溝状腐食による残留応力の変化と残存耐荷力

(1) 概要

コンクリート床版に埋め込まれたワーレントラス橋圧縮斜材の埋め込み部位に局部腐食が生じた場合（図4.4.5.1）を想定して，鋼溶接箱形断面の短柱供試体に腐食による局部的な体積欠損を模擬した溝を機械切削により人工的に加工する．このときの体積欠損による残留応力および残留たわみの変化を実測し，提示した解析手法に基づく計算値と比較することで解析手法の妥当性を検証する．なお，実験で体積欠損を再現するため機械切削された溝は化学反応である腐食による溝と異なり溝表面には切削による塑性ひずみが生じる．この塑性ひずみが体積欠損による溶接残留応力の変化に与える影響についてはX線応力測定と数値解析を用いて検討する．

(2)　実験供試体

鋼溶接箱形断面短柱供試体の中央部(z=0)に軸線直角方向に１周する溝を機械切削することで，腐食による体積欠損が生じた状態を再現する．溝加工は，フライス盤に取り付けられた両刃付ドリルカッターを回転および並行運動させることにより，実際の腐食と同様に溝の深さが周方向全体にわたり漸増するように行う．切削時の回転数は 800rpm，並行移動速度は 150mm/min であり，荒引き，中仕上げ，仕上げの三工程に分けて切削する．

供試体の寸法諸元を図 4.4.5.2 に示す．使用鋼材は板厚 9mm の SM400 材であり，単調一軸引張試験による公称応力・工学ひずみ関係を図 4.4.5.3 に示す．ここで，初期降伏応力 σ_y は 275MPa，引張強度 σ_u は 445MPa である．



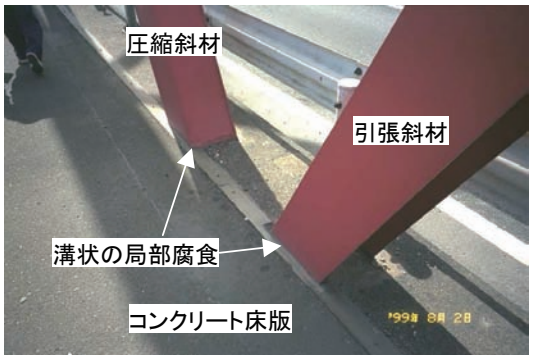


図 4.4.5.1　腐食したワーレントラス橋の斜材

供試体は計３体用意する．１体は溝の切削をしていないもので腐食のない初期状態での残留応力・残留たわみの測定用である．他の２体は，図 4.4.5.4 に示すように部材軸直角方向に深さ 3mm および 6mm の溝が部材を１周するように切削してあり，体積欠損した場合の残留応力・残留たわみを測定するためのものである．ここでは体積欠損の程度を表すために溝の深さ Δt を初期の板厚 $t_0 = 9(\mathrm{mm})$ で無次元化した下記の欠損率 β_f を用いる．

$$\beta_f = \Delta t / t_0 \qquad (4.4.5.1)$$

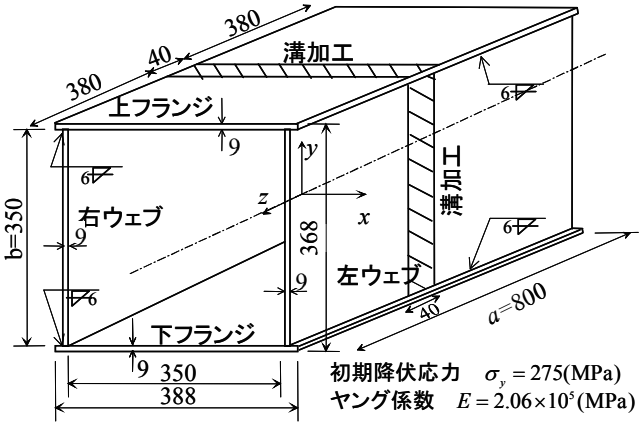


図 4.4.5.2　実験供試体

なお，$\beta_f = 0$ は体積欠損のない初期状態に相当し，$\beta_f = 0.33, 0.67$ は溝深さ Δt がそれぞれ 3mm と 6mm の場合に相当する．一つの供試体の長さは 800mm であるが，製作する３体の供試体に対して製作過程により生ずる初期不整の不均一性をできるだけ排除するため，はじめに長さ 3300mm の１本の部材として製作を行い，この部材の両端を除き中央部から 800mm の供試体を３体切り出す．箱断面の四隅の溶接は脚長 6mm の隅肉溶接であり，CO_2 の半自動溶接により行う．このときの溶接条件は電流 230～240(A)，電圧 35～36(V)，溶接速度 35(cm/min.)，入熱量は 13800～14800 (J/cm)であり，溶材は MX-Z210 (φ1.2)である．

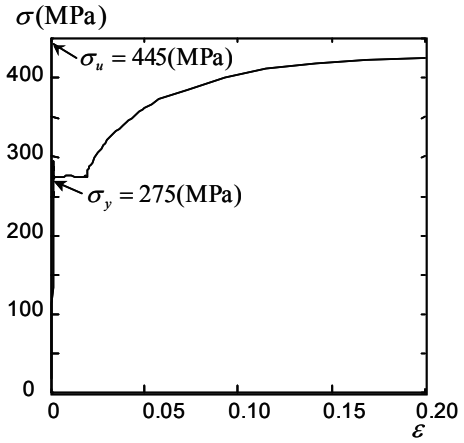


図 4.4.5.3　公称応力－工学ひずみ関係

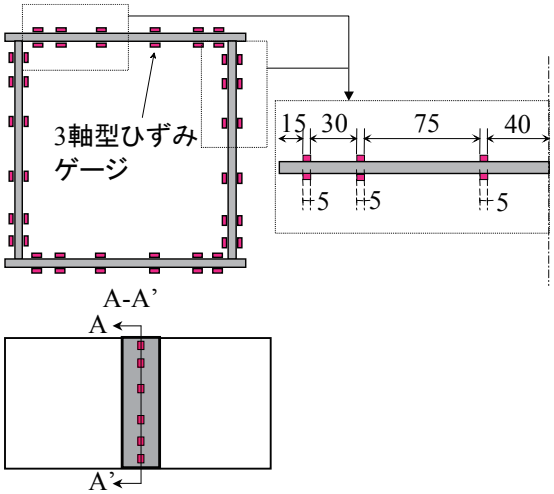
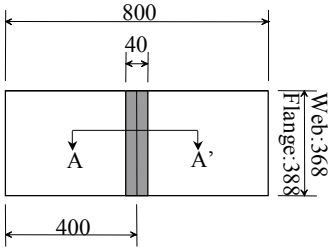
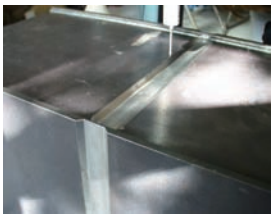


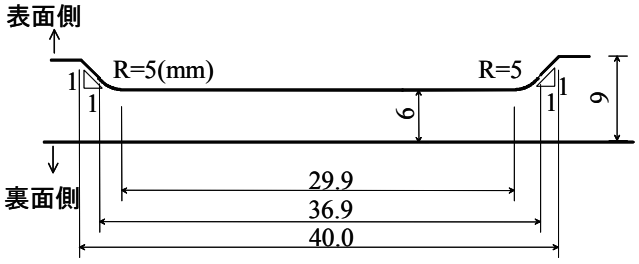
図 4.4.5.5　ひずみゲージの貼り付け位置



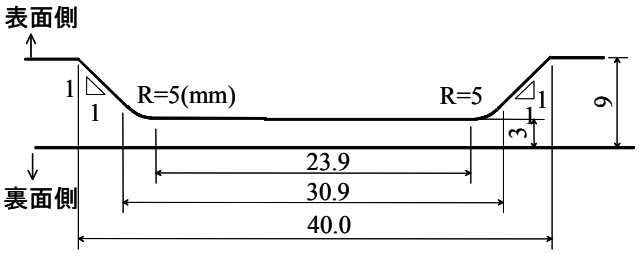
(a) 溝の位置



(b)　溝の様子



(c)　A–A’溝断面形状($\beta_f = 0.33$)



(d)　A–A’溝断面形状($\beta_f = 0.67$)

図 4.4.5.4　切削溝の形状詳細

(3)　残留応力と残留たわみの計測方法

残留応力の計測は面内３成分を対象とするので３軸型ひずみゲージ（ゲージ長さ 1㎜）を用いた切断法により行う．すなわち，３種類の供試体について図 4.4.5.4 に示すようにひずみゲージをパネル中央の切削溝底中央とその裏面に貼り付け，その後，ひずみゲージを含む図 4.4.5.5 のような約 30×30㎜ で厚さは板厚の直方体小片を供試体より切り出し，このときの残留弾性ひずみの解放量を計測する．残留応力の成分は計測値をもとにロゼット解析 [9]により算定する．溝切削による残留応力・残留たわみの変化量は $\beta_f = 0$ の供試体の値と $\beta_f = 0.33, 0.67$ の供試体の値を比較することで評価する．本来は同じ供試体について溝深さを順次増加させ残留応力の変化を計測すべきであるが，切断法を使用するので異なった供試体を使用せざるを得ない．このため，少量ではあるが溝切削前の初期状態での供試体による残留応力のばらつきが溝切削後の変化した残留応力に影響を与える．

残留たわみについては３次元形状計測装置（図 4.4.5.6）を用い，同一供試体に対して溝切削前後の板外面の凹凸形状を計測することで残留たわみ量の変化を評価する．

(4)　解析手順

(2)で述べた腐食による体積欠損過程を考慮した解析手法の妥当性を検証するため，ここでは実験条件をできるだけ忠実に再現した解析を実施する．まず，溝を切削する前の供試体を対象とした離散解析モデルを設定する．この解析モデルには計測された残留応力と残留たわみが導入されている．つぎに，提案した有限要素解析で切削部分をその切削履歴通りに有限要素体積を減少させ，目標の溝形状に到達させる．この状態での解析モデルの応力分布と幾何形状から溝を切削した供試体の残留応力と残留たわみが求められる．

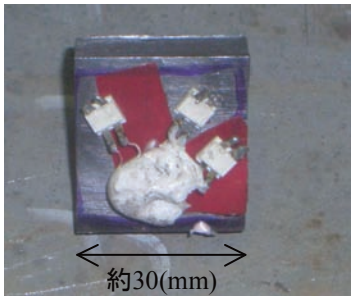


図 4.4.5.6　切断後のひずみゲージ



図 4.4.5.7　3 次元計測装置

(5)　解析モデル

解析モデルの要素分割を図 4.4.5.7 に，溶接部のモデル化の詳細を図 4.4.5.8 に示す．腐食前の供試体($\beta_f = 0$)において体積欠損し溝を生成する中央部とその周囲は体積変化過程と溝部の残留応力分布の局部的な変化を考慮するためにここで開発した体積変化を考慮しうる８節点固体要素（ユーザーエレメント）を用い，その他の体積欠損しない部分は４節点の厚肉シェル要素（S4R）を用いる．また，脚長 6㎜ の隅肉溶接ビードは３角柱固体要素（C3D6）を用いて表している．溶接ビードの要素分割は図 4.4.5.8 のように簡易であり，溶接部の応力に関しては正確に考慮できないが，溶接ビードの断面積は全断面積に比して小さく，着目しているフランジやウェブの残留応力分布に及ぼす影響も小さいので問題はない．なお，モデルは z 軸方向に関する対称性を考慮して 1／2 モデルとし，腐食欠損部に用いる８節点線形固体要素の板厚方向の要素分割数は４分割とする．鋼材の構成則としては一軸引張試験での公称応力－工学ひずみ関係（図 4.4.5.2）を真応力－対数ひずみに変換し，多直線近似したものを用いる．

(6)　残留応力・残留たわみの導入方法

腐食欠損のない初期状態 $\beta_f = 0$ の供試体において，実験で観測された残留応力と残留たわみを対応する解析モデルに２段階の手続きにより導入する．

１段階として，残留たわみおよび腐食欠損のないモデルに初期応力を利用して残留応力を導入する．このとき導入する初期応力分布は腐食欠損のない供試体で観測された残留応力の値と極力一致するように決定する．残留応力は初期応力に対し構造解析を行いその結果として決定される応力分布であり初期応力と残留応力とは必ずしも一致しない[10]．実験では計 48 枚の３軸型ひずみゲージにより供試体のパネル中央部(z=0)の残留ひずみが切断法により計測されているので，計 144 成分の残留応力の計測値を参照点にして，著者らが文献 10)に示した最小二乗法による手法に準じ，最適な初期応力分布を決定する．

２段階として，１段階で決定した初期応力を導入したときに残留応力とともに生じるたわみ形状と，実験

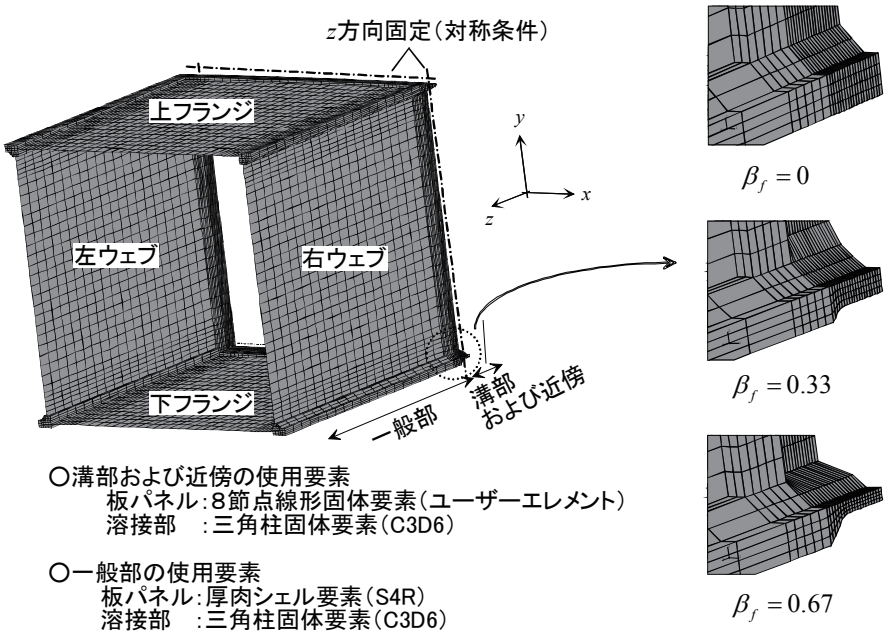
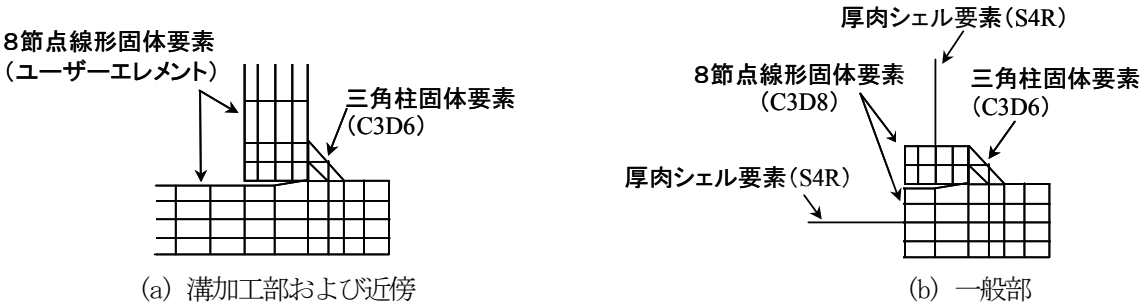


図 4.4.5.8 要素分割および境界条件



(a) 溝加工部および近傍　　(b) 一般部

図 4.4.5.9 溶接ビードおよびフランジとウェブの交差部のモデル化

において観測された残留たわみ形状との差を解析モデルの節点座標の初期たわみ量（ここで，初期たわみは初期応力を導入して構造解析を行う前のたわみ量で構造解析結果として得られる残留たわみと区別している．）として与えることで，残留たわみ形状を再現する．ここではフランジおよびウェブに導入する初期たわみの分布形状$(\Delta y, \Delta x)$ を次のような三角関数で近似する．

$$\text{フランジ}: \ \Delta y = C_y \cos\frac{x}{b}\cos\frac{z}{a} \tag{4.4.5.2}$$

$$\text{ウェブ}: \ \Delta x = C_x \cos\frac{y}{b}\cos\frac{z}{a} \tag{4.4.5.3}$$

(C_x, C_y) はパネルの縦横の中央部の残留たわみの実測結果を参照点として，次のように決定する．

$$C_y = \begin{cases} -0.7\,(\text{mm}) & (\text{上フランジ}) \\ 0.8\,(\text{mm}) & (\text{下フランジ}) \end{cases} \tag{4.4.4.4a,b}$$

$$C_x = \begin{cases} 0.6\,(\text{mm}) & (\text{左ウェブ}) \\ -0.4\,(\text{mm}) & (\text{右ウェブ}) \end{cases} \tag{4.4.4.5a,b}$$

なお，実測による残留たわみはもともと小さいので，このような三角関数で初期たわみを近似することが残留応力の解析に与えるの影響は十分小さい.

第２段階で初期たわみを導入した構造に第１段階で求めた初期応力を導入することで初期状態での供試体の不整を再現する．このような残留応力と残留たわみの導入方法は文献 10)の手法に比べ近似的な手法であり，１段階で導入した残留応力の値は２段階により若干変化するが，このときの応力の変化量は最大でも約 0.5MPa であり，十分小さく無視できる.

上記の手順により導入した残留応力と残留たわみを有する初期状態のモデルに対して，溝切削による体積欠損過程を再現するため，溝部の有限要素体積を単調に減じる解析を行う．この解析結果から得られる残留応力および残留たわみの変化量を実験結果と比較することにより提案した解析手法の妥当性について検証する.

(7)　実験結果と解析結果の比較

a)　体積欠損による残留応力の変化

溝切削による体積欠損の程度と残留応力の再配分の状況について実験結果を図 4.4.5.10 に解析結果を図 4.4.5.11 に比較して示す．これらの図の(a)，(b)にはそれぞれパネル中央（z=0）におけるフランジおよびウェブの z 軸方向の残留直応力成分（σ_{zz}^{R}）の分布を溝底面中央とその裏面に分けて示している．残留応力の符号は箱断面の内側を圧縮，外側を引張りとして，またその大きさは四隅に描かれた矢線の長さを降伏応力σ_y として表現している.

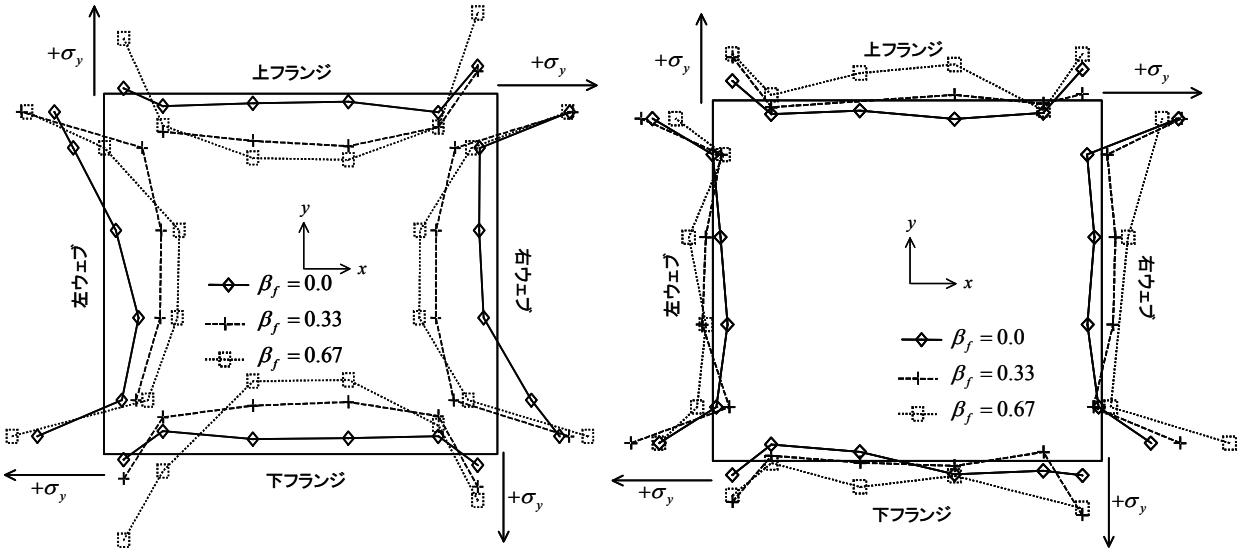
溝のない初期状態の実験供試体（$\beta_f = 0$）において計測された残留応力σ_{zz}^{R} は，図 4.4.5.10（a），(b)より，上下フランジおよび左右ウェブの溝底面とその裏面のどちらにおいてもパネル中央部の広い範囲において圧縮，溶接位置に近いパネル端部において大きな引張りの値を示す．この初期状態の残留応力分布はいままでに同種の構造について報告されている分布傾向 [11] と一致する．これらの残留応力と残留たわみの計測結果を，(6)で述べた体積欠損のない初期状態の解析モデルに対する残留応力・残留たわみの導入目標値とする．図 4.4.5.11（a），(b)より，体積欠損のない初期状態$\beta_f = 0$ に対応する解析モデルに導入された残留応力分布は，実験結果と比較すると若干の誤差は認められるがほぼ実験値と合致している．このような誤差の原因としては導入目標値となる残留応力と残留たわみの実測値に計測誤差が含まれるので整合性のある関係となっていないこと，さらに，たとえ計測値に誤差がない場合も鋼部材を有限要素近似したことによる離散誤差のために有限要素モデルでの残留応力と残留たわみの整合性が崩れることが考えられる.

鋼箱形断面短柱供試体に溝状の体積欠損が生じたことによる残留応力の変化を溝深さの異なる２種類の供試体$\beta_f = 0.33, 0.67$ に関する実測残留応力σ_{zz}^{R} の分布を初期状態$\beta_f = 0$ の分布と比較することにより検討する．腐食欠損率β_f の増加にともない，溝底面の残留応力σ_{zz}^{R} は顕著に変化しており，初期状態$\beta_f = 0$ で圧縮および引張り状態にあった残留応力はどちらも増加している．特にフランジおよびウェブパネル中央部における圧縮の残留応力は大きく変化している．また，溶接部付近の引張残留応力の一部には降伏応力を超えている箇所があり，塑性化が生じている.

一方，図 4.4.5.10(b)における溝底の裏面における残留応力の変化量は溝底面のそれに比べ全体的に小さく，腐食欠損率β_f の増加にともない，パネル全域において引張側に残留応力が変化しているといえる．これは短柱供試体中央断面全体に関する自己つり合いの条件から分かるように，溝底面の圧縮残留応力の増加

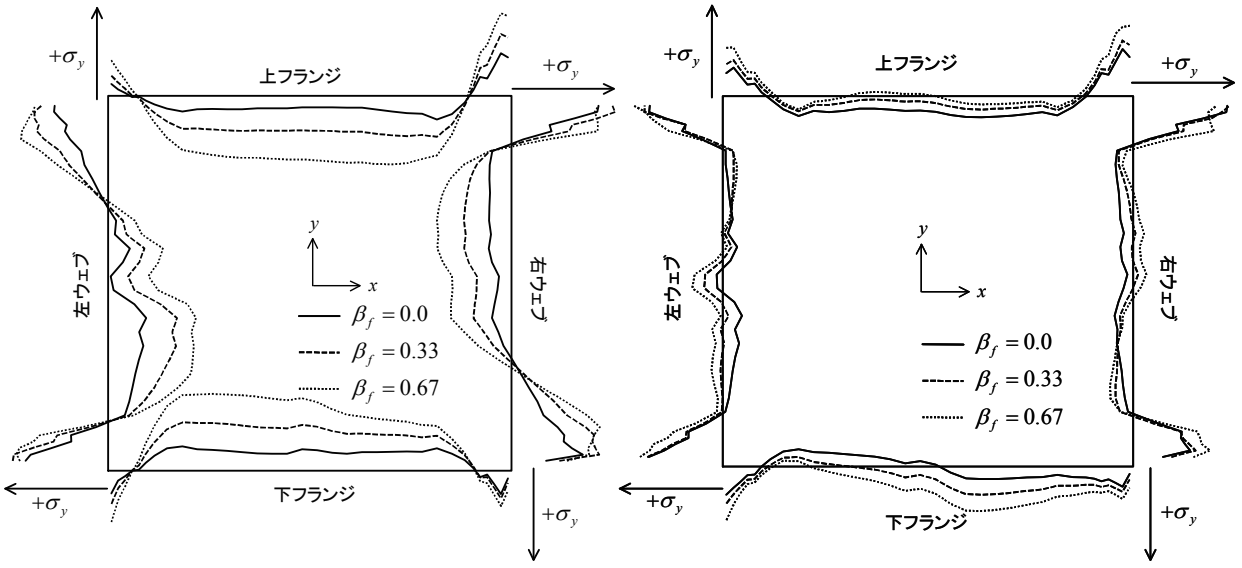
分を裏側全体で受け持つためと考えられる．

図 4.4.5.10 に示す溝状体積欠損の進展に伴う残留応力測定値の変化を，図 4.4.5.11 の解析結果と比較する．なお，解析結果における残留応力の値は１要素の８積分点のうち，溝底面またはその裏面上の４積分点の平均値を表している．提案した解析手法により予測される残留応力の変化量は，実験で測定された値とほぼ一致している．実験で用いた３種類の供試体は溝切削前の初期状態において，できるだけ残留応力が等しくなるように製作したが局部的な溶接条件に大きく影響を受ける残留応力の性質上ある程度のばらつきは避けられない．この供試体の初期状態における残留応力のばらつきは溝切削後の残留応力にも影響するので，実験における測定値と解析値との差が図 4.4.5.10 と図 4.4.5.11 程度であれば定性的および定量的にもよく一致しているといえよう．すなわち，提案した計算手法の精度が確認されたものと判断してよいと考える．



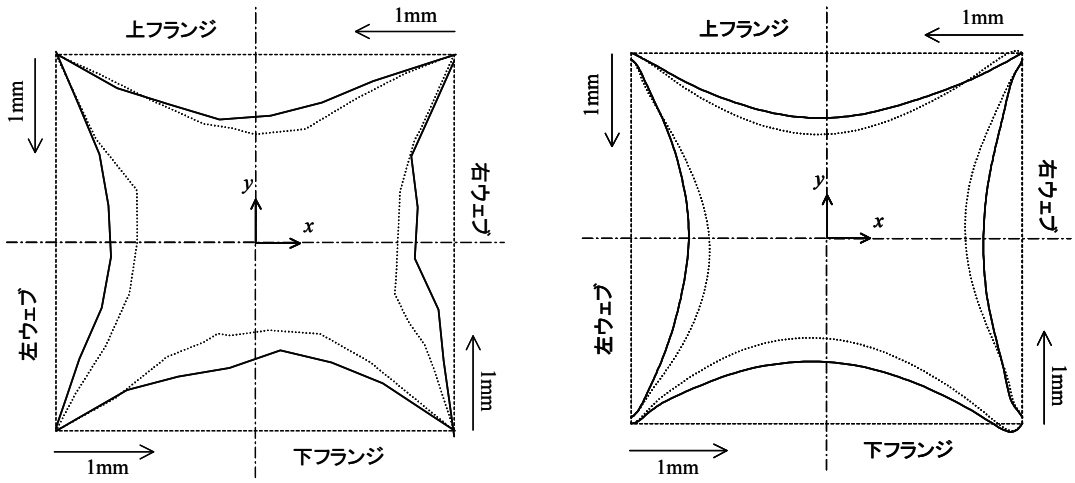
(a) 溝底面中央　　(b) 溝底面の裏面

図 4.4.4.31　実験による溝位置(z=0)における z 軸方向残留応力 σ_{zz}^R の分布



(a) 溝底面中央　　(b) 溝底面の裏面

図 4.4.5.11　解析による溝位置(z=0)における z 軸方向残留応力 σ_{zz}^R の分布



(a) 実験結果　　(b) 解析結果

図 4.4.5.12　溝位置(z=0)における残留たわみ形状

b)　体積欠損による残留たわみの変化

同じ供試体について溝切削の前後二度にわたって残留たわみの形状計測を行い，溝切削による残留たわみの変化を調べる．図 4.4.5.12 (a)には$\beta_f = 0.67$の供試体のパネル中央(z=0)における残留たわみ形状の計測結果を示す．この結果より，切削前の初期状態における残留たわみの絶対値は最大でも下フランジの中央部（x=0）付近で約 0.8㎜ であり，一般的な製作基準 [14]（<b/150＝2.53㎜）に比べ十分に小さいといえる．また，残留たわみにより箱断面は内側に少し凹んだ状態となっている．このような供試体に溝切削による体積欠損が生じると，断面全体の残留たわみは増加する．とくに下フランジの最大たわみは約 1.0㎜ となり，20%程度残留たわみが増加している．なお，変化した残留たわみも製作基準と比較して小さいため，体積欠損による残留たわみの変化が短柱供試体の耐荷力特性に及ぼす影響は小さいものと予想される．図 4.4.5.12 (b)には解析による数値計算結果を示す．これらの結果より，溝切削による体積欠損後の残留たわみ形状は実験結果とよく一致しており，残留たわみの変化予測についても提示した解析手法の妥当性が確認される．

以上より，腐食による体積欠損量と腐食前の初期状態での残留応力・残留たわみが既知であれば提示した手法により体積欠損時の残留応力や残留たわみの変化量を予測することが可能であることが判明した．一般に腐食前の初期不整量については計測例も多く，代表的な構造要素については残留応力や残留たわみの分布モデルも示されているので [11]，これを利用し本手法を用いると体積欠損量のみの測定によって初期不整量の変化の影響を力学性能評価に反映しうる．

(8)　機械切削による溝加工が残留応力に与える影響

強制的に鋼材の体積欠損状況を作り出す機械切削は，化学変化により徐々に体積欠損していく鋼材の腐食現象とは同一条件にはならない．すなわち，溝の機械切削過程では切削面境界近傍における塑性変形の影響

により残留応力が新たに導入される．しかし，機械切削により生じる塑性領域は，文献 12)によると切削面から深さ約 0.2㎜ 程度範囲の非常に狭い領域にほぼ一様な層（加工硬化層）として存在する．したがって，切削に伴う塑性化により生ずる残留応力も切削面の近傍に限り一様に分布するものと予測される．ここで用いる切断法での小片の分割形状では各小片の１面に必ず切削による加工硬化層が残存するため加工硬化層における残留ひずみは解放されず，今回の溶接残留応力の計測結果に影響を与えないと考えられるが，ここでは確実を期すため検証する．

まず，(2) で述べた残留ひずみ計測のため実験供試体から切断した 30×30(㎜)の小片を用いて， X 線応力測定装置により切削面近傍の残留応力を計測する．X 線による応力測定方法は $Sin^2\phi$ 法 [13] であり，板表面の応力を非破壊により測定することができる．ここではさらに電解研磨(特殊な電解液で鋼板の表面を溶解する研磨)により板表面を 0.05，0.1，0.2，0.3，0.4，0.5㎜ と段階的に研磨してそれぞれの状態において残留応力を計測し，板厚方向の残留応力分布を調べる．

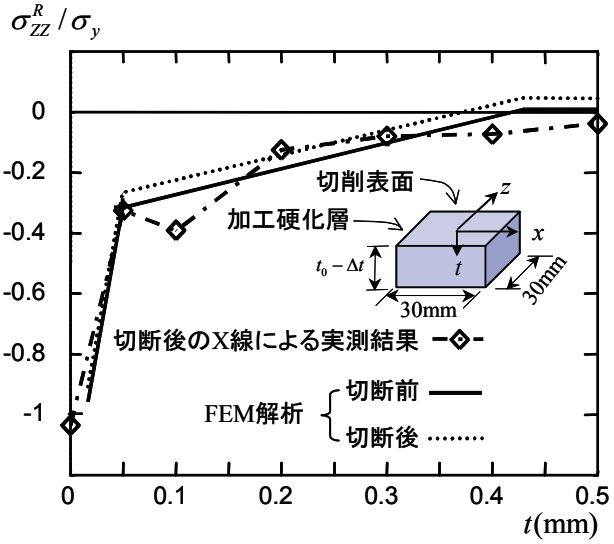
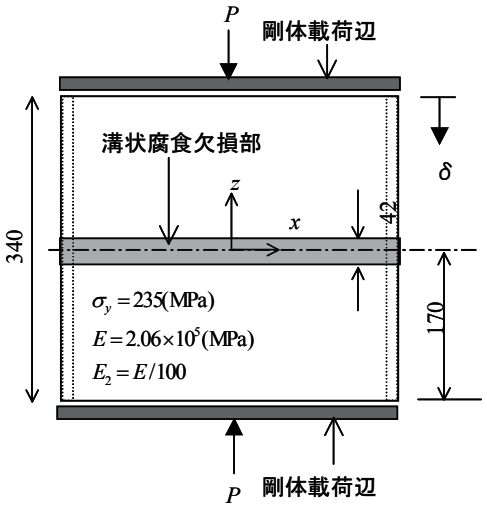


図 4.4.5.13　機械切削面近傍の残留応力分布

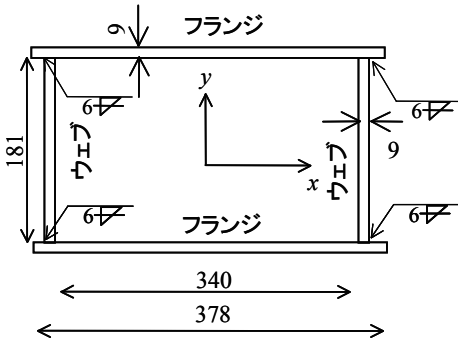
つぎに，この残留応力分布が切断法で小片に分割する前の残留応力とほとんど変化しないことを解析的に確認する．すなわち，(3) で示した切断前の解析モデルの切削溝底面直下に薄く層状に塑性ひずみに相当する熱ひずみを与えることで X 線応力測定結果に近似した残留応力を導入する．そして，ABAQUS の要素休止機能 [12] を利用して残留応力計測のための切断作業を再現し，30×30(㎜)の小片の残留応力分布を解析する．解析により得られた小片への切断前後における溝底表面から板厚方向の残留応力分布を X 線応力測定による結果と比較する形で図 4.4.5.13 に示す．この図より，残留応力計測のために切断された小片には切削溝底面およびその近傍には高い圧縮の残留応力が存在しているが，深さ方向には急激に減少し，予測したとおりに約 0.2㎜ 付近で残留応力は $-0.1\sigma_y$ 程度となりほぼ消散していることが分かる．また，小片への切断前後の応力分布は最大でも約 10MPa 程度しか変化しておらず，機械切削にともなう残留応力は切断法により計測される溶接残留応力の測定時にはほとんど開放されない．このことから，切断法による溶接残留応力の計測結果への機械切削の影響は小さいことが確認される．

(9)　腐食体積欠損による残留応力の変化が耐荷力特性に及ぼす影響

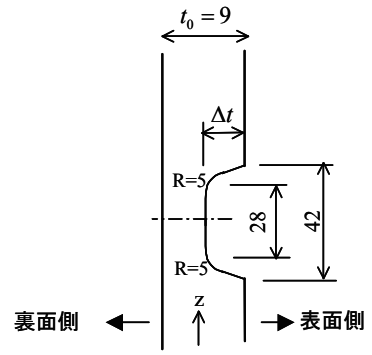
(7) の実験結果と解析結果の比較より，提示した解析手法を用いると体積欠損で変化する残留応力や残留たわみを精度よく評価しうることが判明したので，ここでは提示した解析法を用いて，実験と同様な溶接箱形断面短柱を対象に腐食体積欠損による残留応力・残留たわみの変化が耐荷力特性に及ぼす影響を検討する．さらに，腐食欠損による残留応力や残留たわみの変化を予測するための他の近似的で実用的な解析法も提示しその適用性についても調べる．



(a) 寸法諸元および載荷方法



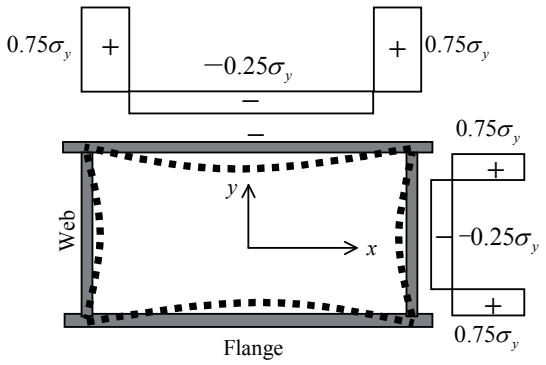
(b) 断面形状



(c) 溝状体積欠損の形状詳細

図 4.4.5.14 解析対象（鋼箱形断面柱）

a) 解析モデル



初期たわみ

$$\text{Flange}: \Delta y = \mp\frac{340}{150}\cos\left(\frac{\pi x}{340}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{340}\right)$$

$$\text{Web}: \Delta x = \pm\frac{181}{150}\cos\left(\frac{\pi y}{181}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{340}\right)$$

図 4.4.5.15 初期応力と初期たわみ

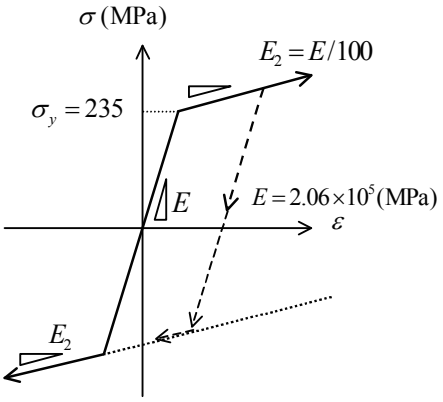


図 4.4.5.16 一軸真応力－対数ひずみ関係

解析対象とした箱形断面短柱の諸元を図 4.4.5.14 に示す．解析モデルは(5)で記した図 4.4.5.9(a)と同様に８節点固体要素と三角柱固体要素を用いて離散化モデルを構築する．残留応力・残留たわみの x-y 平面および y-z 平面に関する対称性を仮定して 1／8 モデルで解析する．ここで考慮する腐食欠損は，パネル中央部(z=0)に幅 42(㎜)の溝状の体積欠損（図 4.4.5.14 (c)）が断面を１周するように生じた局部腐食を想定する．溝の欠損率 β_f は0,0.25,0.50,0.75 の 4 ケースについて計算を行い，欠損深さの影響を調べる．腐食欠損前の初期状態において存在する残留応力と残留たわみには図 4.4.5.15 に示すものを z 軸方向の初期垂直応力および初期たわみ量として与え，一度つり合い計算を行って得られる応力およびたわみ分布を用いる．鋼材の材料構成則は図 4.4.5.16 に示すように Bi-Linear 型とし，塑性域における 2 次勾配はヤング係

数Eの1/100とする.

b) 腐食欠損により変化した残留応力と残留たわみ

腐食欠損により変化した軸方向残留応力σ_{ZZ}^{R}と残留たわみをフランジパネル中央(z=0)の欠損溝底面について図 4.4.5.17，図 4.4.5.18 に示している．図 4.4.5.17 より，欠損率β_fの増加にともない，圧縮および引張りの残留応力は増加しており，引張残留応力領域の一部には塑性化が生じていることが分かる．また，図 4.4.5.18 より，残留たわみも腐食欠損率の増加にともない大きくなるが，その変化量は腐食前（$\beta_f = 0$）の状態における残留たわみの値に比べて小さい．以上の傾向は前章の実験結果と類似している.

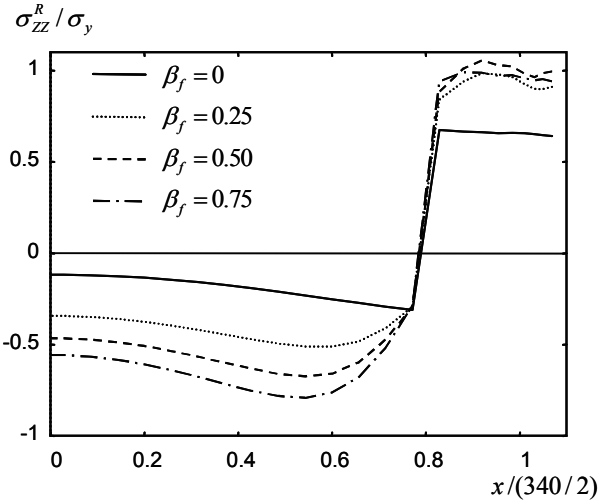


図 4.4.5.17　z=0 におけるフランジの z 軸方向残留応力σ_{zz}^{R} 分布

c) 耐荷力解析

腐食欠損過程を考慮した解析により残留応力と残留たわみの変化を$\beta_f = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75$の４ケースについて計算した後に，箱形断面柱に軸圧縮力が作用した場合の耐荷力解析を実施する．軸圧縮力の載荷方法は図 4.4.5.14 に示すように端部に剛体載荷辺を設け，この載荷辺の z 方向変位δ を変位制御するものである．剛体載荷辺の反力を軸圧縮力P として評価する．なお，この剛体載荷辺では板中心の x および y 軸方向の並進変位成分とフランジ端部の y, z 軸周りの回転成分およびウェブ端部の x, z 軸周りの回転成分を拘束している.

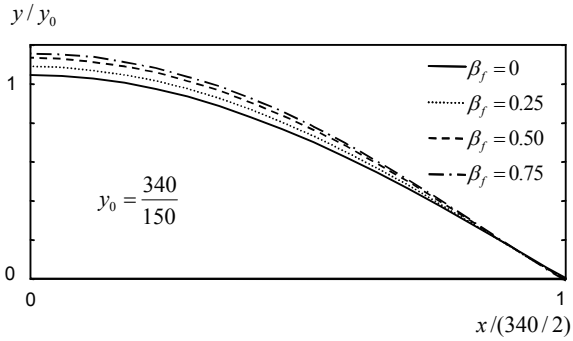


図 4.4.5.18　z=0 におけるフランジの残留たわみ

ここでは提案した厳密な解析法以外に２種類の近似的な解析法を用い，体積欠損による残留応力・残留たわみの変化予測の差異が残存耐荷力の解析結果に与える影響を検討する．用いた解析法を以下に示す.

① “厳密法”：腐食による体積欠損過程を正確に考慮し，厳密に残留応力・残留たわみの変化を計算する提案した解析法

② “体積欠損履歴を無視した近似手法”：厳密法で腐食前の初期状態に用いる初期応力，初期たわみと同じものを体積欠損したモデルに用い，体積欠損の履歴を無視して１度のつり合い計算で残留応力・残留たわみを求める近似手法

③ “初期不整の変化を無視した手法”：体積欠損による残留応力・残留たわみの変化を無視し腐食前の値を体積欠損したモデルに仮想外力法[15]で導入する方法

②“体積欠損履歴を無視した近似手法”，③“初期不整の変化を無視した手法”では①“厳密法”と同じ

レベルでの比較を行うため一貫して８節点線形アイソパラメトリック固体要素を用いた非線形解析をABAQUS により実施する．なお，②，③の解析法では①の解析法のような独自の要素を用いる必要がないので一般の汎用プログラムでも計算が可能である．

３種類の解析結果を比較する形で**図 4.4.5.19** には$\beta_f = 0.75$ の場合のフランジパネル中央(z=0)外面における z 軸方向残留応力分布を示す．①“厳密法”と③“初期不整の変化を無視した手法”の結果を比較すると厳密法では残留応力の圧縮部分ならびに引張り部分はいずれも大きく増加しており，引張り部分では塑性化が生じている．一方，②“体積欠損履歴を無視した近似手法”による結果は①“厳密法”と比較して残留応力の引張り部分はほぼ同等で塑性化が生じているが圧縮部分ではやや低く評価される．腐食欠損過程において材料学的非線形性や幾何学非線形性の影響がなければ，①“厳密法”と②“体積欠損履歴を無視した近似手法”の結果は一致する．しかしながら，本モデルでは腐食による体積欠損過程において引張残留応力が作用している箇所の一部が降伏し，残留応力の再配分過程に経路依存性が生じたため，両者の結果に差が生じたものと考えられる．なお，残留たわみは図 4.4.5.18 に示すように腐食欠損による変化量自体が小さく，さらに３種類の解析法による残留たわみの差も小さかったため，ここでは残留たわみの結果については省略する．

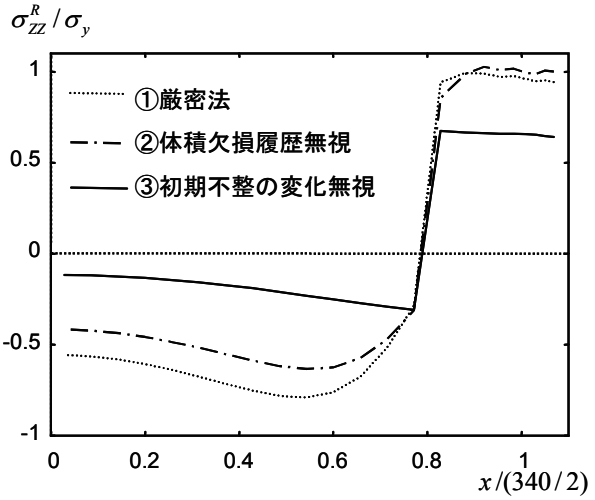


図 4.4.5.19　z=0 におけるフランジの z 軸方向残留応力σ_{zz}^R 分布（$\beta_f = 0.75$）

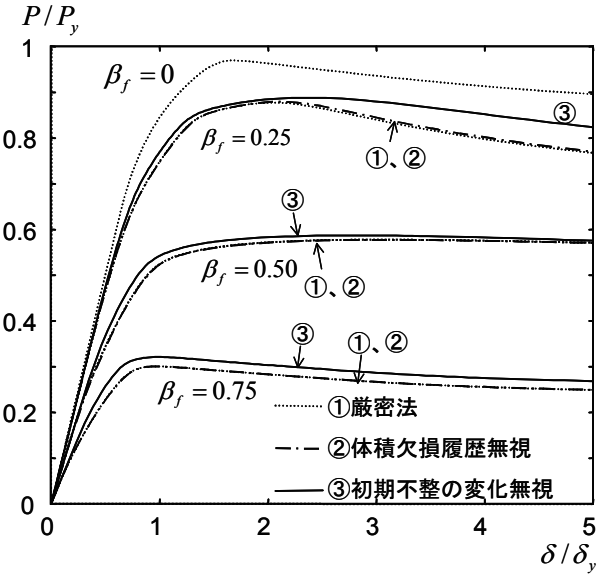


図 4.4.5.20　軸圧縮荷重ー軸圧縮方向変位の関係

３種類の解析法で評価された体積欠損により変化した残留応力と残留たわみをもつ箱形断面短柱の耐荷力解析結果として図 4.4.5.20 に荷重ー変位曲線を示す．この図におけるP_y およびδ_y はそれぞれ$\beta_f = 0$ の場合の初期降伏軸力，初期降伏軸方向変位を表す．この図より，③“初期不整の変化を無視した手法”の場合，いずれの腐食欠損率においても①“厳密法”の最大荷重よりも高くなり，$\beta_f = 0.75$ の場合には，約５%程度の差が生じている．また，荷重上昇域における軸方向剛性が高いことも分かる．さらに，$\beta_f = 0.25$ の場合には，後座屈領域において①“厳密法”と異なっており，荷重の低下傾向が少ない．この差が生じる原因は次のように説明できる．③“初期不整の変化を無視した手法”では，図 4.4.5.19 に示したような腐食欠損に特有の現象である腐食部分近傍の圧縮残留応力の上昇を無視しているため，圧縮力を受けたときの塑性化の進展が“厳密法”と異なる．その結果，①“厳密法”では座屈モードがフランジでは外側に凸，ウェブでは内側に凹となるのに対し，③“初期不整の変化を無視した手法”ではフランジ，ウェブともに内側に凹となることによる．な

お，$\beta_f = 0$ の場合には，フランジでは外側に凸，ウェブでは内側に凹の座屈モードとなる．また，$\beta_f = 0.50, 0.75$ の場合には，いずれの解析手法によってもフランジ，ウェブともに内側に凹の座屈モードとなり，後座屈領域における荷重－変位曲線の差は$\beta_f = 0.25$ の場合よりも小さくなる．以上のように局部腐食欠損による幾何形状の変化のみを考慮し残留応力や残留たわみの変化を無視すると溶接鋼箱型断面短柱の終局性能を危険側に評価する可能性がある．

一方，②“体積欠損履歴を無視した近似手法”による結果は腐食欠損率の大小にかかわらず，①“厳密法”と荷重－変位曲線の差はほとんどなく，耐荷力特性はほぼ一致している．これより，②“体積欠損履歴を無視した近似手法”は腐食による残留応力の変化自体を正確に捉えるには必ずしも十分な手法ではないが，耐荷力解析において用いる体積欠損による初期不整の変化を予測する手法としては実用的で有効な手法であると考えられる．

(10) まとめ

鋼の腐食などによる体積欠損では構造物の幾何形状が変化するが，これにより構造物内に内在している溶接などによる残留応力や残留たわみの値も変化し構造物の力学性能に影響を与える．本論文では，このような現象を定量的に評価するために，まず，これまでに著者らが提示した体積欠損過程を正確に考慮しうる構造解析手法の適用性を実験により検証した．実験では溶接鋼箱型断面短柱の表面に局部腐食欠損を模擬した溝を機械切削して残留応力および残留たわみの変化を実測するとともに解析法の妥当性について検証した．つぎに，提案した解析手法を用いて腐食による初期不整の変化が溶接鋼箱型断面短柱の耐荷特性に与える影響について検討した．ここでは，体積欠損による残留応力や残留たわみの変化を予測するための他の近似手法も提示しその適用性についても調べた．以下に得られた結果をまとめる．

(1) 溶接鋼箱型断面部材の軸直角方向に溝状の局部体積欠損が生じた場合，溝底において圧縮残留応力ならびに引張り残留応力はいずれも増加し，大きく変化することが実験により観察された．

(2) 提示した体積欠損による幾何形状変化を時系列的に考慮しうる構造解析法を用いれば体積欠損により変化した残留応力や残留たわみを直接的かつ正確に求めることができることが実験により確認された．

(3) 腐食による体積欠損量と腐食前の初期状態での残留応力・残留たわみが既知であれば本解析法により体積欠損時の残留応力・残留たわみの変化量を予測することが可能である．一般に腐食前の初期不整量については計測例も多く，代表的な構造要素については残留応力や残留たわみの分布モデルも示されているので，体積欠損量のみの測定によって初期不整量の変化の影響を力学性能評価に容易に反映しうる．

(4) 溶接鋼箱型断面短柱の検討例から局部腐食欠損による残留応力・残留たわみの変化はこれを無視した場合に比べ，その耐力の低下やピーク以降の耐力劣化をもたらす可能性がある．

(5) 腐食欠損過程において残留応力による塑性化が生じ経路依存性の問題があれば著者らの提示した“厳密法”を用いる必要がある．塑性化が生じなければ，“厳密法”で腐食前の初期状態で用いる初期応力，初期たわみと同じものを体積欠損したモデルに導入し，体積欠損の履歴を無視して１度のつり合い計算で残留応力・残留たわみを求める“体積欠損履歴を無視した近似手法”で残留応力の変化を評価できる．

(6) 溶接箱形短柱の計算例より，体積欠損により残留応力で塑性化が生じる場合においても，体積欠損履歴を無視した“近似手法”で予測された残留応力を用いる耐荷力解析結果は“厳密法”による結果とほぼ一致する．

【参考文献】

1) 土木学会：鋼橋における劣化減少と損傷の評価，鋼構造シリーズ7，1996.

2) 日本鋼構造協会: 既存鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集，JSSCテクニカルレポート，No.51，2002.

3) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998.3.

4) 西村宣男，竹内修治，村上茂之，竹下主義，軸屋一美，伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性，鋼構造論文集，第6巻，第21号，pp.55-66， 1999.3.

5) Yoshiaki Goto, Naoki Kawanishi: Long-term strength estimation of steel structures considering histories of corrosion loss and repair, Proc. of the First international conference on steel & composite structures, Pusan, Korea, 14-16 June,2001, pp.117-124, 2001.6.

6) Y. Goto, N. Kawanishi: A uified analysis method to asess the long-term mechanical performance of steel structures considering earthquake, corrosion and repair, Proc. of US-JAPAN seminar on advanced stability and seismicity concept for performance-based design of steel and composite structures, Kyoto, Japan, July 23-26, 2001, pp. 1-8, 2001.7.

7) 後藤芳顯，川西直樹：腐食や補修の影響を考慮した長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発，土木学会論文集，No.689/I-57， pp.85-100， 2001.10.

8) ABAQUS Users Manual 5.8. HKS, Inc., 1999.

9) 渡辺理：ひずみゲージとその応用，日刊工業新聞社，1977.

10) 川西直樹，後藤芳顯：鋼構造物の有限要素法解析における残留応力と初期たわみの導入方法について，構造工学論文集，Vol.45A，pp.137-148，1999.

11) 土木学会：座屈設計ガイドライン，1987.

12) 新井実：切りくず処理の基礎と応用，日刊工業新聞社，1990.

13) 須藤一：残留応力とゆがみ，内田老鶴圃，1994.

14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説， Ⅰ共通編， Ⅱ鋼橋編，1996.

15) 小松定夫，北田俊行，宮崎清司：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析，土木学会論文報告集，No.244，pp.1-14，1975.

4.5 あとがき

構造物を安全かつ適切に維持管理していくためには，腐食した構造物の残存耐荷性能を精度よく把握することが重要である．本章では，腐食した鋼構造物の残存耐荷性能評価法について，板要素，板要素で構成される部材や構造物の観点から，現状での研究成果をとりまとめた．その結果，供用後数十年を経過した腐食構造物が多数存在する現状があるにもかかわらず，精度のよい耐荷性能評価のための基礎資料は少なく，今後さらに実験・解析的成果を蓄積していく努力が必要であることを認識した．一般に，現行の鋼構造物設計では，部材設計を基本とするが，構造物の供用後の維持管理においては構造物としての機能が重要で，構造物全体の残存保有性能の評価が合理的である．しかしながら，ここに紹介したように，構造物としての残存保有性能を十分な精度で評価できる確立された解析手法は無く，また，有限要素法を駆使した高精度で高度な非線形解析は，現在の技術ではすでに可能ではあるものの，損傷を解析にどのように反映するかといった問題やデータ作成，計算経費上の問題などもあって必ずしも容易とはいえない．そこで，ある程度の精度誤差は不可避であると考え，部材や板要素に対して評価された保有性能に基づいて，はり理論などを用いて構造全体の性能を評価するという方法も一つの解決策と考えられる．この場合には，4.2 で示した板や部材の耐荷力評価法が活用できる．また，腐食した板要素や部材の耐荷力解析は，構造全体を解析するよりもずっと容易であるし，代表板厚などを用いた簡易強度評価式の作成も可能である．

本章の後半では，腐食構造物の残存耐荷力を評価するに際し，有限要素法を用いる場合の要素分割や初期不整，応力履歴などの影響について解析的検討を示した．これらの影響については，さらに詳しく検討すべき問題が残されているが，有限要素法による解析は，今後の維持管理での残存耐荷力評価に極めて有力なツールとなるとの考えから，いくつかの解析例を紹介した．いずれにしても，腐食した構造物の残存保有性能を精度よく評価するためには，腐食状態を正確に把握するための計測が不可欠であるのは言うまでもない．残存保有性能解析手法のみならず，簡易で合理的な計測手法の開発，必要な計測項目や精度の検討が並行して必要である．たとえば，4.4.2 に示したように，残存圧縮強度解析に必要な要素分割(要素の大きさ)を勘案すれば，精度のよい評価を行うためには少なくとも要素幅よりも小さい間隔で板厚測定を行うのが望ましいと考えられる．しかし，実際の板厚測定はそれほど密には行われていないのが現状であり，また，実務レベルにおいて，比較的広範囲の腐食表面を数 mm〜1cm 間隔程度で計測することを要求するのも，労力や計測法の面で必ずしも実用的ではない．このような観点から，今後は画像計測などの新しい計測法が期待されるところである．

ところで，現在の鋼構造物の維持管理では，腐食を許容しないことを前提としており，耐久性の問題は塗装などの防食機能が主となる場合が多い．ところが一方で，腐食した構造物が多数実在し，それらをどのように維持管理していくかが社会的喫緊の課題となって

いる現状を鑑みると，「構造物の腐食は許容せざるを得ない」ものとしてとらえ，「腐食を許容した維持管理と予防保全」への概念の変更が必要との感がある．このように考えると，維持管理における残存強度評価の位置づけは，現存の腐食構造物に対する損傷評価を行って適切な対処するための指標を与えることであるが，もう一つの重要性として，将来どのような維持管理を施していくかという将来の維持管理計画に資することも含まれよう．この場合，現在の損傷が将来的にどのように進展し，構造物強度がどのように低下していくかといった将来予測手法の確立が，今後の維持管理においてとくに重要と考えられる．