

腐食損傷した鋼橋の維持管理設計と残存耐荷力評価の現状と理想

CURRENT STATE AND CHALLENGES OF DESIGN FOR MAINTENABILITY
AND EVALUATION OF RESIDUAL LOAD RESISTANCE OF
CORROSION-DAMAGED STEEL BRIDGES

野上邦栄*, 村越 潤**

Kunie Nogami and Jun Murakoshi

ABSTRACT Corrosion damage of steel bridges is one of the decisive factors in evaluating the life of the structure. Evaluation of the load carrying capacity of a corroded structure is an important issue for evaluation of healthiness. This paper presents an overview of maintenance design, covering inspection, diagnosis, repair, strengthening, and performance restoration of corroded steel bridges and members, and the main points requiring attention. In addition the latest research on methods of evaluation of the remaining load carrying capacity of corroded structures is introduced, and expectations for advancement of maintenance design in the future are described.

KEYWORDS : 鋼橋, 腐食, 維持管理, 残存耐荷力

Steel bridge, corrosion, maintenance management, residual load resistance

1. まえがき

鋼橋の腐食損傷は、構造物の寿命を評価する上で決定的な要因の一つである。特に、鋼トラス橋や鋼アーチ橋の斜材等の部材が破断した場合、橋全体の安全性・安定性に著しい影響を及ぼす可能性が高いことから明らかなように、既設鋼橋および構成部材の耐荷力の評価は、構造物の安全性を確保する上で重要になる^{1)~3)}。しかし、この評価には部材の損傷状態に関する実態把握が必要であり、その調査・計測により得られた損傷形態に関するデータを考慮することにより、その損傷と部材、部位あるいは部分構造の各残存耐荷力との関係を明らかにし、それらの構成部材から成る全体系の耐荷力を精度よく評価できる実用的な方法を構築する必要がある。

現在、道路橋の健全度評価における耐荷力照査は、一般に劣化損傷が生じていない条件のもと、応力度等が許容値以内にあるかどうかを指標に行われていることが多い。近年さらなる健全度評価の高度化を図るため、鋼橋の腐食の現状調査²⁾、進行が激しい鋼橋の部材・部位の残存耐荷力や、耐荷力照査への腐食状況の反映方法、さらには、その補修・補強に関する実験的および解析的研究が報告されている^{4)~6)}。しかし、腐食形態は各橋梁の架設環境や構造部位によって様々である上に、腐食した実橋梁や実部材に対する耐荷力試験の実績も少ない。

腐食損傷への対応の重要性は認識されているものの、具体的な鋼橋および部材の診断方法は未だに確立していない状況において、ここでは腐食した鋼橋および部材を対象として、維持管理設計の考え

*工博 首都大学東京客員教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

** 博(工) 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

方とその主な留意事項について、さらに部材の残存耐荷力の評価方法に関する最近の研究を紹介するとともに今後の維持管理設計の高度化への期待について述べる。

2. 維持管理プロセスと留意点

平成 24 年に改定された道路橋示方書⁷⁾では、設計段階から維持管理の容易さだけでなく確実性に配慮すべきことが明確にされた。また、維持管理に必要な設計資料などの保存を目的とした設計図などに記載すべき事項の充実が図られるとともに、将来の維持管理の合理化に資すると考えられる情報の記録を作成し、かつ供用期間中の維持管理に活用できるよう保存しなければならないことが規定された。一方、維持管理に関しては、平成 26 年省令・告示において、知識および技能を有する者が、5 年に 1 回、近接目視を基本とする点検を行い、健全性の診断を部材単位および橋毎に表-1 の 4 つの判定区分により行うことが義務づけられた。また、この省令・告示の規定に基づいた、具体的な点検方法、主な変状の着目箇所、判定事例写真等を示した定期点検要領が規定された。この他、国土交通省、自治体、各高速道路株式会社などが独自に定めた要領に基づいて維持管理が行われている。主な技術要領には、国土交通省橋梁における第三者被害予防措置要領、総点検実施要領、各高速道路株式会社の道路構造物点検要領などがある。また、鉄道橋の維持管理の技術基準には鉄道構造物維持管理標準⁸⁾がある。このように、鋼橋の維持管理設計は、各機関の基準・要領に基づいて実施されている。

ここでは、腐食損傷した鋼橋の維持管理に関して、図-1 に示すような補修・補強および性能回復を含めた橋の維持管理の手順を提示して、点検・診断・措置の内容を腐食損傷に照らして各段階での概要および留意点を示すことを試みる⁵⁾。

(1) 書類調査

現地での調査・点検に先立って、少なくとも①供用年数、設計基準、使用材料、②構成部材や部位の詳細構造と防食の状況、③架設方法、④交通の状況、⑤損傷・補修履歴、⑥点検結果、⑦構成部材や部位の詳細構造への近接手段などの事項について、設計図書や施工記録、点検記録、補修補強履歴などにより確認し、調査方法の検討や優先順位付けに反映する。

(2) 外観調査

近接目視による外観調査は、健全性の評価の最も基本となる調査であり、対象橋梁の外観上に変状・損傷を把握する他、過去の点検時からの損傷の進行状況、点検時における損傷の見落としの確認を重点的に行う。この調査時点で、著しい腐食欠損が主構部材に確認された場合には、部材の重要性を勘案の上、そのまま供用可能か、何らかの規制をかけるべきか否かの概略の評価や各種の不確実性を考慮した断面補強等の緊急対応の要否、その程度の評価を行う必要がある。局部的な腐食の進行に注意すべき代表的な部位を図-2 に示す。

(3) 詳細調査

腐食による断面減少が発生している場合には、腐食量の計測や部材及び構造全体系の解析等の詳細調査を行い、その結果を耐荷力の評価や、補修・補強設計に適切に反映することになる。この調査で

表-1 健全性の診断結果の分類

区分	状態
I 健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
II 予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III 早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV 緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

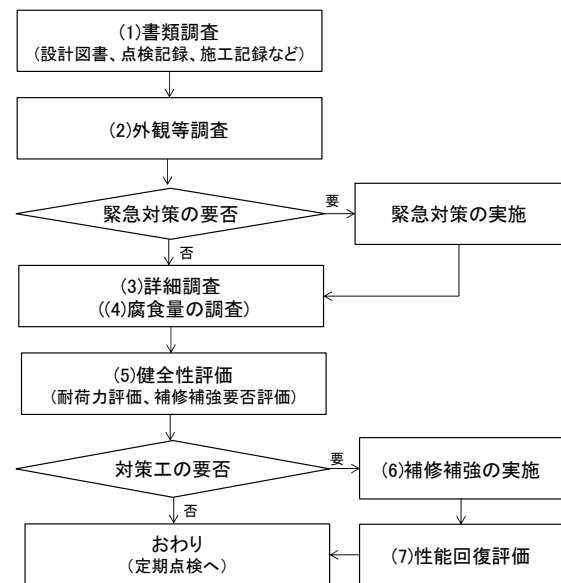


図-1 橋の維持管理手順

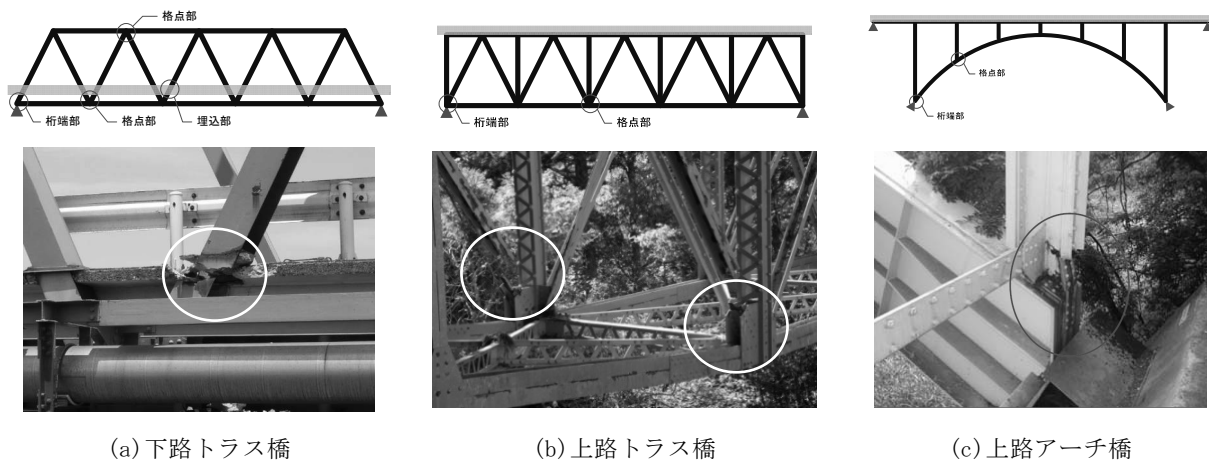


図-2 局所的な腐食の進行に注意すべき部位

は、下記の事項について留意する。

- 1) 鋼材の腐食等が進行している場合には、既に設計で想定するよりも厳しい応力条件になる可能性があるため、調査は段階的に行い、損傷の状況を十分に確認する。
- 2) 著しい腐食損傷が発見された場合には、損傷の進行を監視しつつ、通行制限（例えば、大型車の通行規制、車線規制、速度制限等による荷重軽減）等により部材の荷重負担を軽減する措置や、破断に備えた支持構造の設置を検討する。
- 3) 目視による外観調査では、状態の評価を行えない部位（例えば、斜材埋込部、吊材定着部および格点部）などの調査について検討する。

(4) 腐食量の調査

腐食量の計測は、目視調査により断面減少が確認された箇所の健全性評価や、その後の補修・補強要否の判断および補修・補強設計に必要な情報を得ることを目的として行う。計測に当たっては、調査作業の経済性や効率性を考慮して、調査方法と調査内容（箇所、数量など）を検討した上で実施する。現在、主な計測方法としては、a) キャリパー、b) 超音波厚さ計による計測などがある。

これらの計測方法は、腐食部材のどの箇所から、どの程度の間隔で計測を行うかについて、体系的な手法は確立されていない。したがって、作用力に対する破壊性状を考慮して、断面減少の激しい断面を対象にして、ある程度詳細に計測するのが望ましい。

(5) 健全性の評価

長期供用された既設橋の健全性の評価においては、損傷状況、作用力の状態等不確定要因を念頭に置くことが重要である。特に、不均一に局部的に断面欠損の生じた部位・部材・部分構造の耐力への影響については、定量的な評価方法が確立されているわけではないため、基本的には各種の不確定要因を考慮した上で、安全側の評価を行うのが一般的な考え方であろう。残存耐力の照査を実施する場合、次の事項に留意するのが良い。

a) 応答値算出のためのモデル化

既設鋼橋の応力や変位などの応答値評価においては、荷重状態に応じた部材の材料特性、構造の幾何学的特性、支持条件等を適切に評価できる解析モデルを用いる必要がある。したがって、解析モデルの作成においては、適切な応答値を算出できるように、①モデル化手法・範囲、②境界条件、③腐食条件、④要素分割、⑤構造細目のモデル化、⑥荷重のモデル化などの項目に配慮する必要がある。

鋼橋の設計では、従来から主として、主桁や主構部材等の一次部材をはり要素でモデル化した骨組（格子）解析等による線形構造解析が適用されている。しかし、照査段階では、橋梁部材をより忠実にモデル化した有限要素解析も広く一般的に用いられるようになってきており、既設橋における応答値評価においても、構造形式や照査の目的に応じてこれらの手法を適宜選択の上で使用するのが、構造物が有する安全余裕を適切に反映する観点から望ましい。

b) 残存耐荷力の評価

部材・構造系の残存耐荷力は、モデル化の仮定等部位・構造に対する応答値算出の不確実性や、計測された腐食量計測のデータの精度・信頼性に係る不確実性を考慮した上で、適切に安全余裕を設定して耐荷力の評価を行う必要がある。現在、既設橋における耐荷力の算出は、橋梁部材をより忠実にモデル化した有限要素解析も広く一般的に用いられるようになってきており、構造形式や照査の目的に応じて弾性あるいは弾塑性有限変位解析の手法を適宜選択の上で使用するのが、構造物が有する安全余裕を適切に反映する観点から望ましい。

残存耐荷力の照査については、3.1 で述べる評価法などを参考に、しかも設計基準との整合を図りつつ、供用後の荷重履歴、前述の劣化等の耐荷力への影響評価、構造全体としての補完性・代替性を考慮して、適切に全体安全率を考慮して行うことになる。供用条件、構造的な安全余裕、部材の重要性等を勘案し、適切な安全余裕を確保し、その上で必要な対策を講じることを求められる。なお、防食機能の改善や腐食要因の除去は必ず行う必要がある。

健全性の評価では、腐食損傷による残存耐荷力が重要になるが、部分的に断面が喪失している等の著しい腐食欠損の場合等では、腐食欠損による応力集中部からの疲労き裂の発生や、ぜい性的な破壊への移行が懸念される場合も考えられ、部材破断等への損傷の可能性を慎重に検討した上で、健全性を評価するのが良い。

(6) 補修・補強の実施

補修・補強は、構造物の健全度に応じて、構造物の重要度、補修・補強工事の制約、施工の容易さ、さらには施工環境などを考慮して、最良と考えられる時期に適切な工法を用いて行う必要がある。補修は、変状の進展の抑制、第三者への影響度の低減および当初性能の回復を目的とした対策に適用し、補強は、耐荷力や剛性などの力学的性能の回復、あるいは現状レベルの性能向上を目的とした対策に適用する。構造物の重要度、予測供用期間などを考慮して補修水準および補強水準を定め、事前の点検および調査結果に基づき、変状の状況に応じて適切な方法により実施することになる。

補修・補強工法の選択においては、構造物に変状が発生している場合、まずその状況と程度を十分把握し、原因を究明しておく必要がある。単に、変状部の機能を回復または向上させただけでは変状の真の原因となっている他の箇所の影響を見逃してしまう可能性があり、補修・補強工事後にすぐに同様の変状が再発するおそれがある。そのため、対策工法の選定の際には、変状部の修復のみでなく、変状の根本的な発生原因を低減あるいは取り除くことができる方法を合わせて選定することが重要である。また、具体的な対策工法は、過度に不経済な対策や不十分な対策にならないようにすることも重要である。

(7) 性能回復の評価(対策効果の確認)

腐食損傷が原因で低下した性能を回復させる必要があると判断され、その対策方法として補修・補強を実施する場合、補修・補強工法の選定を行い、変状の進展の抑制や初期性能に回復する対策あるいは力学的性能の回復などに対する対策を実施する。しかし、補修・補強工法が橋梁全体系にとって不適切な対策となっている場合も起こり得ることから、補修・補強後において橋梁の性能回復の評価を行うことが重要である。特に、以下の防食および耐荷性能の回復効果について留意するのが良い。

a) 防食性能の回復効果

塗装、金属溶射、電気防食および耐候性鋼材などの防食方法による施工後、防食性能の回復効果をすぐに確認することは困難な場合が多いため、定期的な点検を実施することで経時的に確認する必要がある。腐食性が高い環境に曝される鋼構造物や部位については、早期に防食性能が著しく低下する場合もあるため、点検時には特に注意して防食性能の効果を確認するのが良い。この点検データを経時的に整理・記録することで、将来の防食性能の回復効果を評価・確認する際に有用な情報とすることができる。

b) 耐荷性能の回復効果

適切な対策工法を施工した後、目標とする耐荷性能の面からその回復効果および適用技術の効果を

確認することが重要である。効果の確認方法としては、代表部位のたわみやひずみ、応力度を実測することで短期的に確認する方法や、モニタリングにより長期的に確認する方法などが考えられるが、①回復技術を適用する目的となる力学量の種類、②計測時に要求される精度、③計測方法の施工性および経済性などを考慮して適切な方法を選定するのが良い。さらに、性能回復対策を実施した後の補修・補強効果および耐荷力などを評価するための有力な評価手段には、有限要素法による非線形構造解析の適用がある。その際、(5)a)のモデル化を基本にして、実構造物をできるだけ再現した解析モデルを構築して実施するのが望ましい。

3. 既存鋼橋の耐荷力評価

3.1 耐荷力照査の現状

実際の維持管理においては、腐食損傷した鋼構造物の現有保有性能を照査する場合、構造物全体としての機能性、耐荷性および耐久性などの要求性能を満たしているかどうかを照査することになる。2.の(5)健全性の評価において、残存耐荷力の照査の必要性を示したが、現在のところ点検や詳細調査のデータに基づき腐食損傷した構造物の健全性を精度よく評価する方法は確立していない。このような状況において、残存耐荷力の照査ではこれまでに次のような手法を適宜適用し、総合的に評価する上での参考としている³⁾。

- 1) 損傷を考慮した部材の実働応力値（および解析値）を求め、この値が許容応力度（あるいは保守限応力度）内にあるかどうかを評価する応力度法。
- 2) 載荷試験により、実荷重を載荷して測定したたわみや応力度および固有振動数などから部材の剛性、荷重分布などを求め、この値と全断面有効とした計算値と比較して耐荷力を評価する剛性法。
- 3) 供用下における部材の発生応力およびその頻度を直接計測し、活荷重に対する耐荷性能を評価する応力頻度法。
- 4) 損傷形態を考慮した有限要素法などによる弾性・弾塑性有限変位解析結果に基づき、構造物全体系の耐荷性能を評価する解析的手法。
- 5) 腐食形態、発生応力および予想される崩壊形式を考慮した適切な評価指標を用いた残存耐荷力評価式の適用。

3.2 鋼トラス橋の耐荷力評価

既設鋼橋および部材の残存耐荷力の評価方法が確立していない現状において、著者らは、腐食により断面欠損の生じた実橋の鋼トラス橋と鋼桁橋を対象にして、トラス橋の軸力部材および格点部、桁橋の桁端部の残存耐荷力評価に関する開発研究を進めている。特に、実務への適用の観点から、数値解析や載荷試験を実施しなくても簡易にしかも精度の高い耐荷力を評価できる、3.1の5)の評価方法による残存耐荷力評価式の開発を試みている。以下では、トラス橋の格点構造^{4)9)~11)}および圧縮部材^{4)12)~15)}の残存耐荷力評価に関する最近の研究成果について紹介する。

(1) 格点部

研究対象とした橋梁は、1962年に建造された銚子大橋であり、橋長407mの側径間にゲルバー構造を有する鋼5径間連続下路式トラス橋である。本橋は、塩害による部材の腐食損傷が著しく、過去に上下横構の交換、主構、床組の当板添接等の大規模な補修補強を繰り返してきたが、2009年に新橋の供用開始に合わせて撤去されている。この橋梁は、撤去前に現地載荷試験を実施し、主構の鉛直方向変位の計測を行うとともに、床版のみシェル要素でモデル化した骨組全体系モデルを用いて弾塑性有限変位解析を行い、図-3に示すように計測値と解析値は概ね対応している

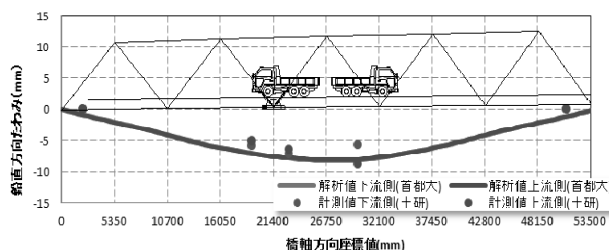


図-3 トラック載荷試験再現解析結果

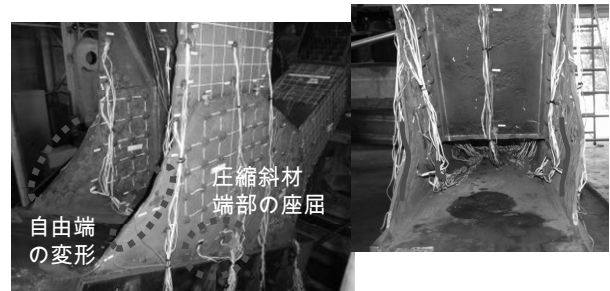
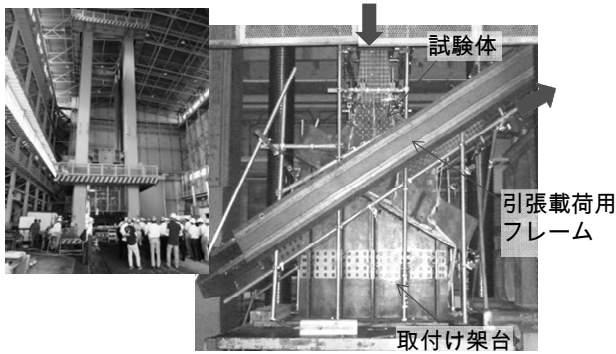
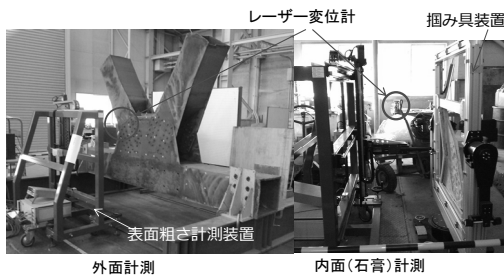


写真-1 圧縮・引張 2 軸载荷試験の状況

写真-2 ガセットの破壊性状



(a) 計測状況(外面) (b) 計測状況(内面)
写真-3 腐食計測状況および計測装置

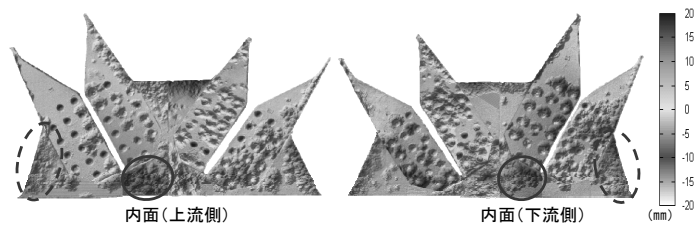
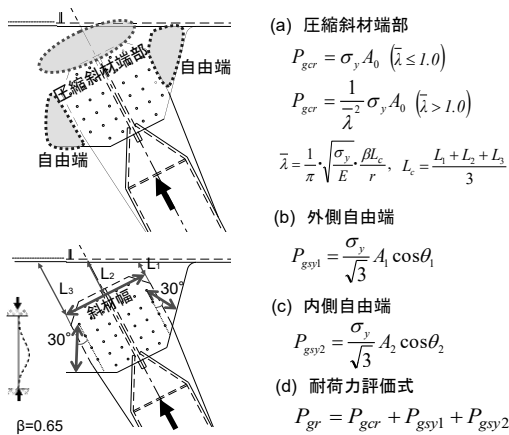
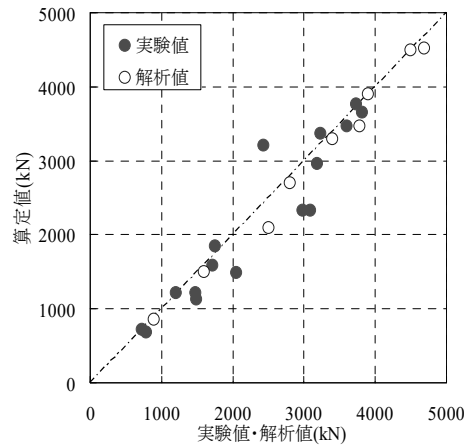


図-4 腐食量分布



(a) 評価式



(b) 評価式による算定値と実験・解析結果の比較

図-5 格点部における圧縮耐荷力評価式と検証

ことを確認した¹⁶⁾。また、腐食状況部位と局部応力集中部位の対比から、局部応力の卓越部分では滞水等の影響により腐食環境が厳しく、構造的弱点となり得る可能性があることを確認した。

また、同橋の撤去後、部材を切り出し、トラス格点部を対象として、塗膜及び錆層の除去後、レーザー変位計を組み込んだ計測装置を用いて腐食量の詳細な計測を行い、減肉状況を把握した。特にガセット内面側の斜材先端部の減肉が著しく、斜材軸力に対するガセットの耐荷力低下への影響評価の重要性が確認された。

腐食量計測後、既往の評価式では試験結果との乖離の大きいトラス格点部の圧縮耐荷力に着目して、斜材圧縮・引張軸力による二軸载荷試験(写真-1)を行い、破壊性状や残存耐荷力を把握した。破壊性状としては、载荷荷重の増加に伴い、写真-2に示すようにガセットの斜材先端部の対称面外変形と斜材両側の自由端部に非対称面外変形が進行し最大荷重に達した。

載荷試験前に、写真-3 に示すようにレーザー変位計を組み込んだ表面粗さ計測装置を用いて格点部の腐食量計測を実施した。格点部の面内については、写真-3 (b) に示すように石膏により型どりを行い、石膏試験体を掴み具装置に固定して同じ計測装置を用いて計測した。図-4 は、格点部内面を石膏で型どり計測した腐食量分布である。図中には、腐食減肉の激しい領域を○印で示しており、写真-2 の座屈変形に対応していることを確認している。

また、解析モデルの作成にあたっては、圧縮耐荷力に影響を与える斜材のフランジ、ウェブおよびガセットの各部の残存板厚をシェル要素に考慮している。腐食を考慮するケースは、腐食の著しい領域に対し平均残存板厚を与えることを基本とした。載荷試験で変形の生じたガセットについては、試験における破壊性状等を踏まえ、ガセットの腐食量を4つの領域に区分し、ガセットの元厚12mmに対してそれぞれの領域の平均残存板厚(10.4mm, 10.8mm, 8.1mm, 7.3mm)を考慮した。ガセット表面については、リベット周りで腐食が見られるものの影響は小さいと考え、ここでは考慮しないものとした。また、斜材フランジと接する面のすきま腐食はないと仮定した。このモデルケースを対象として弾塑性有限変位解析を行い、試験結果との比較分析、耐荷力低下の評価を行った。その結果、今回の腐食試験体については、不均一な腐食であっても平均的な残存板厚を考慮することにより、全体的な挙動や残存耐荷力を概ね評価できることを確認した。

次に、試験および解析による破壊性状を踏まえて、ガセットの斜材先端部の局部座屈強度と、その周りのガセット領域の降伏強度を考慮した圧縮耐荷力の評価式を検討した。その結果を図-5 に示す。その上で、本試験結果の他、既往の国内外の載荷試験データ(腐食なしの格点部試験体)および板厚減少、構造諸元をパラメータとした解析との比較分析を行い、格点部の圧縮耐荷力を概ね推定できる実用的な評価式を提案した。なお、図-5 は、均一板厚の状態での結果であり、不均一腐食がある場合には、領域別に平均板厚に換算することにより推定が可能であることを示している。

(2) 圧縮部材

対象部材は、(1)格点部と同じ鋼トラス橋の圧縮斜材の4部材および上弦材の1部材である。これらの部材は、材質SS400の圧縮箱型断面部材である。全体座屈試験を想定した圧縮斜材の4部材はCaseA0～A3と、局部座屈試験を想定した上弦材はCaseB1～B3と呼称する。局部座屈試験体(上弦材)は、長さ1000mmの試験体3体及び材料試験片を切り出すことを想定した。対象部材の腐食は、全体的に少ない。その中では腐食の多いCaseA0, A1とCaseB1は、撤去時の腐食形状をそのまま用いることにし、腐食の少ない部材CaseA2, A3, B2, B3に対しては、機械加工により模擬腐食を導入する。図-6に部材ごとの模擬腐食の大きさ(最大断面欠損率 $R_A=0, 10, 30, 50\%$)および導入位置(赤色)を示す。ここに、 $R_A=(A_0-A_{min})/A_0 \times 100$ 、 A_0 は健全部材の断面積、 A_{min} は最小断面積である。CaseA2, A3, B3の模擬腐食は、いずれも格点部ガセットプレート近傍に発生する斜材の腐食形状を想定しており、端部か

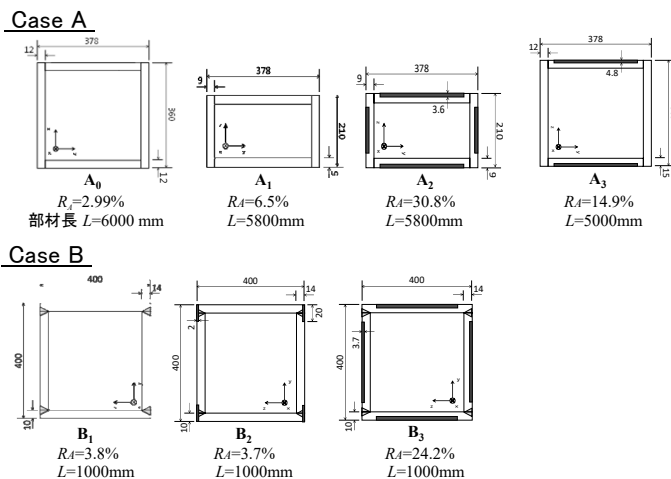


図-6 模擬腐食を導入した箱断面部材

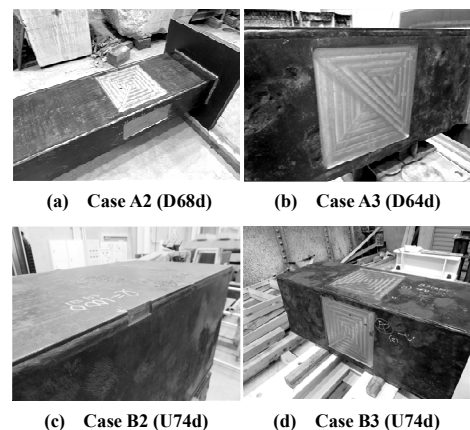


写真-4 模擬腐食の導入状況

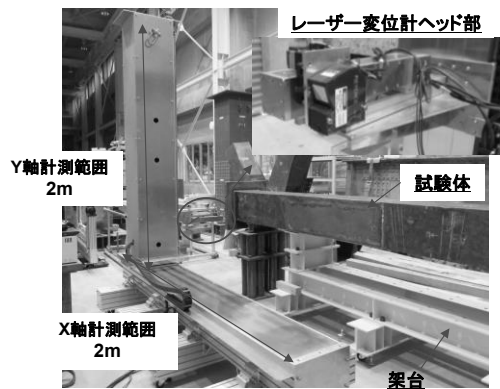


写真-5 3D表面粗さ計測装置

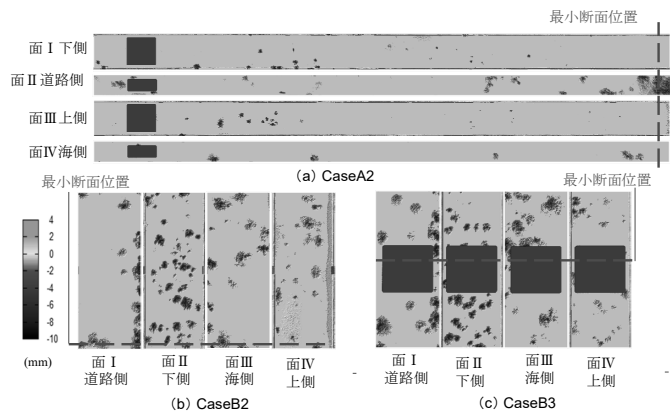


図-7 試験体の腐食深さ分布



写真-6 荷重試験全景と崩壊形状

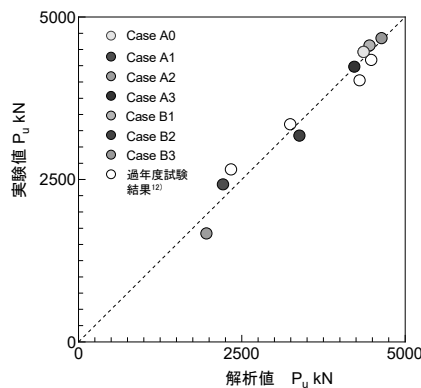


図-8 実験と解析値の比較

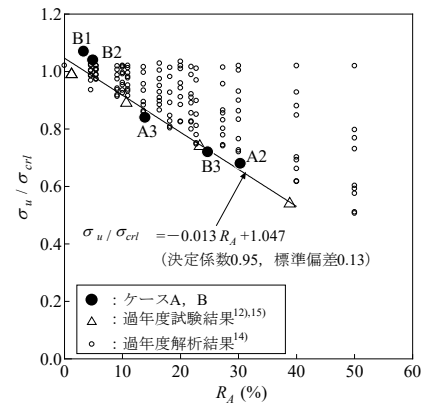


図-9 耐力評価式

ら 500mm の位置を中心に導入している。また、CaseB2 については、溶接部の腐食を想定している。具体的な模擬腐食導入状況を写真-4 に示す。

腐食計測は、写真-5 のレーザー変位計を組み込んだ 3D タワー型表面粗さ計測装置であり、得られた CaseA2 および CaseB2, B3 の腐食深さ分布例を図-7 に示す。

圧縮荷重試験は、写真-6 に示すように両端ピン支持として実施した。局所的な腐食が破壊性状や残存耐力に及ぼす影響を把握した。併せて、解析に必要な溶接残留応力の計測を行うとともに、試験体毎の初期不整、腐食量を考慮した弾塑性有限変位解析を行い、試験結果との比較を行った。写真-6 に CaseA0 の全体座屈崩壊形状を示す。図-8 は、過年度の同様な試験結果を含めた最大荷重の試験値と解析値を比較したものであるが概ね一致すること、また、図-9 から明らかなように実用性の観点から腐食状況を簡易な最大断面欠損率 R_d により表現し、この指標と健全断面と仮定した局部座屈強度 σ_{crit} による無次元耐力を基にした評価式（線形回帰式）により、安全側ではあるが連成座屈を考慮した残存耐力の下限値を概ね推定できることを示した。なお、図中では局部座屈が発生せず、全体座屈で崩壊した A0, A1 は除外している。

3.3 残存耐力評価方法の構築に向けて

一般的な橋梁形式において腐食発生が多い箇所の事例および補修・補強の事例などについては、近年多くの管理機関および学協会から事例集として紹介されている^{1)~3)}。また、鋼橋を代表する鋼桁橋については、多くの腐食形態に関する調査データが蓄積されてきており、実橋レベルでの鋼 I 桁橋の桁端部の圧縮荷重試験^{17)~19)}および解析的検討^{20)~22)}や支点部腹板のせん断荷重試験²³⁾も実施されている。今後は、3.2 で対象にした経年劣化した鋼トラス橋をはじめとして、鋼桁橋、鋼アーチ橋、鋼ラーメン橋さらに吊形式橋梁の橋梁形式別ごとに腐食形態の実態を明確にし、構成する各部位、部材、

接合部および部分構造の残存耐荷力，さらに4.で述べる橋梁全体系としての残存耐荷力評価方法に関する研究が望まれる。さらに，床版の拘束効果および床版損傷が腐食損傷した鋼桁の耐荷力への影響について明らかにすることにより，精度の高い残存耐荷力評価が期待される。

鋼トラス橋や鋼アーチ橋における腐食損傷の多い箇所は，狹隘な格点部，支点部および部材の交差点部²⁾³⁾⁶⁾などであるが，特に格点部の劣化損傷に関する調査は実施されているものの，その腐食形状の詳細な計測データはほとんどなく，実橋格点部の実験的・解析的研究⁴⁾⁵⁾も少ないため，腐食環境の異なる実橋格点部の腐食損傷に関する調査・計測を進めるとともに劣化損傷に伴う格点部の崩壊パターンについても解明を推進していく必要がある。さらに，吊形式橋梁では主ケーブルおよびハンガーケーブル，さらにそれらの定着部に腐食による劣化損傷が発生しており⁶⁾，特に中小規模吊橋などでは崩壊につながる事例が発生していることから，腐食損傷の実態の解明とともに吊形式橋梁全体系としての腐食形態と崩壊メカニズムについての検討が望まれる。

4. 維持管理設計の高度化への期待

現在，土木構造物の維持管理設計の高度化に向けた点検，診断さらに補修・補強・更新の技術開発が活発に推進されている。ここでは，鋼橋の維持管理設計において期待する技術開発として，計測技術，診断技術および維持管理の設計法技術を取上げて，その期待するところを述べる。

4.1 腐食計測技術の開発

現在，腐食量の主な計測方法としては，2.で述べたようにキャリパー，超音波厚さ計など板厚を直接計測する方法が適用されている。これらの計測方法では，鋼板表面が腐食により激しい凹凸形状であったり，激しいさび（層状さび）が付着していたり，特に浮きさびなどが発生している腐食状況下においては正確な計測値が得られなかったり，計測不可能な場合も生じる。また，計測点およびその計測できる範囲も制約を受けることが多い。

近年，このような課題への対策として，残存板厚を短時間に計測可能な技術の研究開発の取組みがなされている。例えば，超音波法，共鳴法（共振，打音法），電磁誘導法（パルス渦流試験法）および放射線透過法などがある。これらの非破壊検査技術に関する最近の調査・確認試験結果²⁴⁾では，さびが付着した状態での残存板厚の計測は難しいか，適用上制約があることが報告されており，詳細な板厚計測が必要な場合や，防錆防食などを実施する場合にはやはりさびを除去し，素地調整が求められることになる。これに対して，現場で簡易に，しかも直接的に残存板厚を計測できる技術も提案されている²⁴⁾。

一方，板の表面形状の計測から板厚を算出する間接計測方法には，レーザー変位計，画像計測法およびレプリカ法がある⁵⁾。レーザー変位計を用いた装置には，卓上型装置，自主開発大型装置，ポータブル2次元，3次元レーザースキャナーなどが使用されている。画像計測法は，デジタルカメラから取り入れた画像データ（写真）をもとに三次元データ化できる3D写真計測法であり，最近はポータブル写真計測装置も開発されている。これらの計測法は，鋼板のケレン，ブラストにより素地調整を行い，さらに内外面の腐食形状の計測結果から板厚に換算する必要がある。しかし，腐食による表面の凹凸に対するブラストの選定方法は，適用された防食技術にも依存することもあり明確でなく，さらにこの間接計測方法の実績も少ないことから実橋における残存板厚の計測法としては確立していない。

このような状況において，実橋における塗装上およびさび層から精度の高い，広範囲を短時間に計測できる計測法の開発が望まれる。

4.2 高度解析手法の適用方法

診断技術として，維持管理上の健全性照査では，有限要素法をはじめとした高度解析手法が広く一般的に適用されるようになってきている。腐食環境下にある鋼橋の応答値や残存耐荷力の算出に適用

する際には、モデル化の仮定などに対する不確実性や腐食計測されたデータの精度に係る不確実性を考慮した上で、適切に安全余裕を設定して評価することが求められる。

既設鋼橋の実作用応力(断面力)および残存耐荷力を算出する際の解析手法やそのモデル化に関する種々の選択については、①作用(荷重状態、環境条件)の変化、②構造全体の形状変化、③部材の形状変化(腐食による板厚減少、疲労き裂の進展、部材交換、補剛材の取り付け、当て板補強など)、④解析条件の変化(境界条件の変化、支承部の変化、基礎の浮上り、剥離など)、⑤経年に伴う材料物性値の変化および⑥地盤の変化など、新設時からの経時変化について検討して判断することになる。

これらの経年後の変化した鋼橋に対する残存耐荷力を算出するには、近年材料および幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析を行うことが多くなってきている。この解析では、2.(5)の健全性の評価における解析における要件とともに次のような事項についての検討が解の精度、信頼性に影響する。

- 1)弾塑性解析における降伏条件、流れ則および硬化則の設定、および有限変位解析におけるラグランジュ法および増分法における解法の選択の検討。
- 2)経年に伴う鋼材の応力～ひずみ関係に変化はないものの、実橋から切出された試験片による引張試験を実施し、その試験データの適用に関する検討。
- 3)部材レベルおよび橋梁全体系の初期たわみ、残留応力さらに荷重の偏心などの、いわゆる初期不整および境界条件や荷重条件に関する検討。
- 4)解析モデルとして、はり要素、シェル要素あるいはソリッド要素による全構造モデルか、「腐食損傷領域：シェル要素あるいはソリッド要素」＋「他の領域：はり要素」による部分構造モデルかの検討。
- 5)腐食量を解析に導入する場合、シェル要素を選択した時の平均板厚の評価や軸線の変化、ソリッド要素を選択した場合の肉厚方向の要素分割数(図-10)、さらに腐食形態(不均一全体腐食、局部腐食、腐食領域、腐食位置、腐食深さなど)と要素分割数の関係などについての検討⁶⁾。

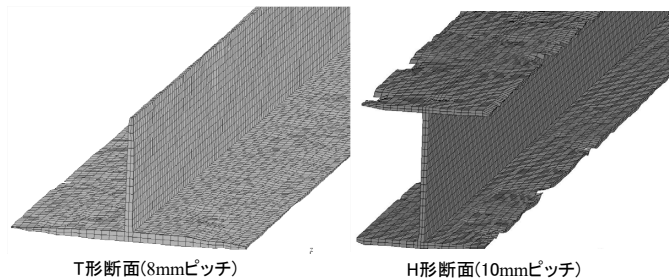


図-10 FEMへの腐食量導入例(ソリッド要素)

- 6)対象となる既設鋼橋のモデル作成作業は最大のネックとなるため、モデル作成の効率化の検討。

このような状況において、部材・部位および構造全体系の腐食損傷と耐荷力特性との関係を、そのばらつきを含めて明らかにした上で、部材の残存耐荷力を実務的に過不足なく評価できる方法を構築することが求められている。さらに、腐食損傷した既設鋼橋の耐荷性能および回復評価のために信頼性のある結果をもたらす解析手法の適用に関するマニュアルの構築が望まれる。

4.3 耐久性を考慮した設計法の開発

(1) リダンダンシーのある構造設計

鋼橋の設計は、適切な維持管理を実施されることを前提に100年の設計供用期間が設定される。言い換えれば、供用期間末までは耐荷性能を確保するように維持管理を行うことを求めることになる。鋼橋の形式や規模によっては、発見された部材、部位や接合部などの損傷が進行して破断し、橋全体が不安定になることが考えられ、その機能を失う状態にあるかどうかの判断を求められる(図-11参照)。一方、橋全体が致命的になることを回避するために、一部の部材が腐食により破断しても他の部材への応力再配分でその機能が補われて、あるいは耐荷機構や構造特性が当初と異なっても橋全体として致命的な状態に至らない、いわゆるリダンダンシーのある構造になるように設計することも求められる。

1970年代からこのリダンダンシーの概念を導入したAASHTO基準では、「橋が、損傷状態において、

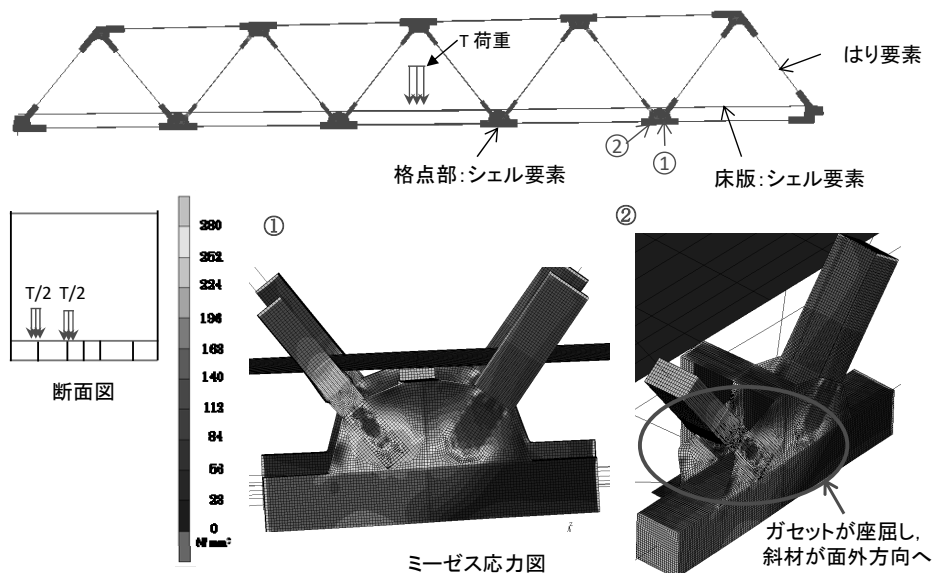


図-11 格点部に腐食を考慮したトラス橋全体系の崩壊例

設計上の機能を維持できる性質」あるいは「部材の損傷や破壊後において、橋が荷重を通し続けることのできる能力」とリダンダンシーを定義している²⁵⁾。このことは、設計された橋梁が、将来にわたっての時間や構造システム全体にとって機能しなくなり、場合によっては損傷により陳腐化したり、崩壊したりして、全体として望ましくない状況に至ることを回避できる構造系が、一般にリダンダンシーのある橋梁と言えらる。その上で橋梁全体の効率的な維持管理を可能にしようとする考え方がリダンダンシーのある構造設計である。

しかし、リダンダンシーのある構造として、明確に規定しづらい余裕度をどのように制御して橋の安全性を担保するかのリダンダンシーの定量的評価手法が未構築であり、統一的なリダンダンシー評価ガイドラインも確立していない。さらに、設計および点検・状態評価 (rating) の各段階におけるリダンダンシー評価結果の利用方法も明らかにされていない。

したがって、リダンダンシーのある構造設計を確立するためには、従来の設計コンセプトによる設計後に、予測供用期間(管理者の意思としての設定期間)における時間概念(状態の変化)を考慮した設計コンセプトを導入した設計体系の構築に向けた研究開発が必要ではないかと考える。そのためには、次のような事項についての検討が望まれる。

- 1) 設計荷重(偶発作用)を超える作用に対して、変形しつつも崩壊し難い粘り強く発揮できる、さらにリダンダンシーのある鋼橋の技術開発。
- 2) 長寿命化効果による目標とする耐久性の性能水準として、予測供用期間とそれに連動した定量的要求性能の明確化。
- 3) 点検、モニタリング、構造解析からの構造性能などの定量的な情報を鋼橋の維持管理に利活用する方法やその体系化。
- 4) 既存橋梁の荷重分配や強度などの性能に関する正確な評価とそれに応じた補修・補強を設計できる対策手法。
- 5) 従来の設計コンセプトにより設計された橋梁について、材料の経年劣化および偶発作用に対する安全余裕の把握。

以上の事項について、産官学の各機関で精力的に検討されており^{25)~27)}、その成果が待たれるところである。

(2) ダメージコントロールを考慮した構造設計

最近の津波や大地震などによる自然災害への対応を考えたとき、減災および構造物の粘り強さの概念に基づく設計法として、被災の発生は止むを得ないとしてもその被害程度を極力低く抑える、あ

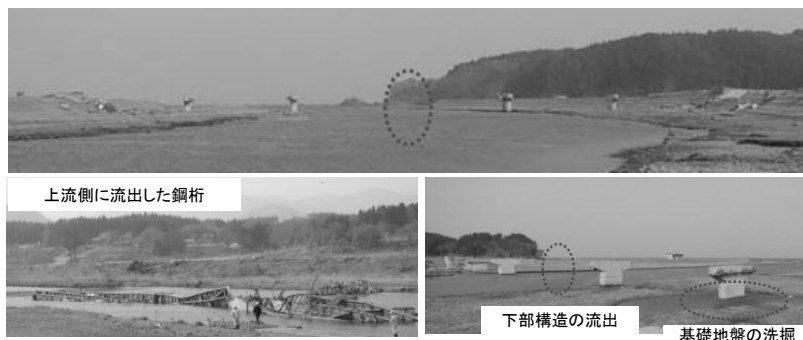


写真-7 津波により流出した上部構造



写真-8 橋全体系の崩壊につながる部材

るいは被災をあらかじめ想定した範囲やモードに収めるなどのダメージコントロールの発想を取り入れた設計法が検討されている²⁸⁾。この考え方そのものは、物理的な攻撃・衝撃を受けた際に、そのダメージや被害を必要最小限に留める事後処置の意味で、自動車分野、医療分野や軍事分野などで古くから使われているものであるが、このダメージコントロールの発想を鋼橋に取り入れる場合、次の事項についての設計の考え方の整理・開発が望まれる。

- 1) これまでの鋼橋を構成する部材が均一耐力になる方針のもとでの設計から脱皮し、構成部材ごと、あるいは部分構造ごとに異なる耐荷力レベルを設定し、つまり鋼橋の上部構造、下部構造および支承における各性能の階層化を設定することにより、鋼橋全体系の大規模な変状を回避できるようにする。
 - ・例えば、津波の影響により下部構造は損傷により崩壊などの致命的な状況にならないように、支承部を先に破壊させ、上部構造を流出させる。(写真-7 参照)
- 2) この設計法では、点検や修繕の省力化の観点から、避けるべき損傷形態・損傷箇所の確実な実現が図られるように、また多様な状況に確実に対処できるように、損傷後の部材間の耐荷性能・耐久性能を制御し、さらに復旧のしやすさを意図した破壊への確実な誘導を達成できるようにする。
 - ・例えば、部分的な破壊が橋全体系の崩壊につながる可能性のないように主たる塑性化を考慮する部材を選定するなどして崩壊につながる部材や接合部が先に壊れないように耐力の階層化を行う(写真-8 参照)。
- 3) 設計荷重を越える偶発作用として限りない選択が存在する中で、この設計法を適用するにはその設定の可能性について検討する。もし、設定が可能な場合その根拠について社会的認知を得られるように丁寧な説明を行う。
- 4) 現行基準により設計された鋼橋に存在するダメージコントロール的な活用に関する現状分析および定量的な評価の検討を実施する。

この設計の考え方は、リダンダンシーのある設計とともに部材単位設計から全体構造設計への移行に繋がるものであり、今後の開発研究を注視していきたい。

5. まとめ

高齢化した鋼橋の増加とともに老朽化による変状も顕在化している状況において、新設橋では、目標とする耐久性の確実な実現、既設橋においては、確実な長寿命化の実現が求められている。現在、道路橋の性能照査型設計への移行が進められている中で、今後はこれまでの鋼橋の設計の考え方に、さらにリダンダンシーを考慮した、維持管理しやすい橋梁の建設を目指すことになる。その実現のためには、設計技術者・施工技術者は維持管理技術者とのコミュニケーションおよび連携をより強化するとともに、致命的な被害を受けない鋼橋の建設を可能にするメンテナンスに配慮した設計基準の高度化に向けた研究開発を継続していかなければならない。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：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
- 2) 国土技術政策総合研究所：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料 No. 294，2006
- 3) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2014
- 4) (独)土木研究所，首都大学東京，早稲田大学：腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書－腐食劣化の生じた鋼トラス橋を活用した臨床研究報告書－，共同研究報告書，No. 456，2013
- 5) 土木学会：腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，鋼構造シリーズ 18，2010
- 6) 土木学会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，鋼構造シリーズ 20，2014
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2012
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物維持管理標準・同解説（構造物編），2007
- 9) (独)土木研究所，首都大学東京，早稲田大学：腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書－腐食の生じた鋼トラス橋格点部の FEM解析－，No. 429，2012
- 10) 野上邦栄，山本憲，山沢哲也，依田照彦，笠野英行，村越潤，遠山直樹，澤田守，有村健太郎，郭路：鋼トラス橋の上弦材側格点部の腐食計測とその腐食形態の特徴，構造工学論文集，Vol. 58A，pp. 679-691，2012
- 11) 村越潤，遠山直樹，澤田守，有村健太郎，郭路，依田照彦，笠野英行，野上邦栄：腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した載荷試験，構造工学論文集，Vol. 59A，pp. 156-168，2013
- 12) 山沢哲也，野上邦栄，小峰翔一，依田照彦，笠野英行，村越潤，遠山直樹，澤田守，有村健太郎，郭路：模擬腐食を導入した鋼トラス橋斜材の残存圧縮耐荷力，構造工学論文集，Vol. 59A，pp. 143-155，2013
- 13) 小峰翔一，村越潤，高橋実，野上邦栄，栗原雅和，田代大樹，岸祐介，依田照彦，笠野英行：断面欠損を有する鋼トラス橋圧縮部材の残存耐荷力に関する実験的検討，土木学会論文集 A1，Vol. 73，No. 1，pp. 69-83，2017
- 14) 小峰翔一，野上邦栄，山沢哲也，依田照彦，笠野英行，村越潤，遠山直樹，澤田守，有村健太郎，郭路：模擬腐食を導入したトラス橋斜材の残存耐荷力，土木学会年次学術講演会概要集，第 66 回，I-531，2011
- 15) 遠山直樹，澤田守，村越潤，依田照彦，笠野英行，野上邦栄：腐食した鋼トラス橋格点部の残存耐荷力に関する載荷試験，土木学会年次学術講演会概要集，第 68 回，I-357，2013
- 16) 村越潤，有村健太郎，澤田守，遠山直樹，依田照彦，野上邦栄，笠野英行：腐食劣化の生じた鋼トラス橋の現地載荷試験と耐荷性能評価に関する検討，構造工学論文集，Vol. 59A，pp. 736-746，2013
- 17) V.T.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試験及び解析，土木学会論文集，No. 710/I-60，pp. 141-151，2002
- 18) 臼倉誠，山口隆司，豊田雄介，三ツ木幸子，金銅晃久：鈹桁端部の支点上の腹板と補剛材の下端腐食範囲の違いがその耐力特性に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 724-734，2011
- 19) Y.Nakata, S.Matsumoto, Y.Kishi, K.Nogami, J.Murakoshi, N.Hosomi, R.Inoue, T.Irube : Load carrying capacity test and finite element analysis for steel riveted plate girder bridge's support area with corrosion damage, Proceeding of PSSC, No.11, 2016
- 20) 田井政行，下里哲弘，玉城喜章，有住康則，矢吹哲哉：腐食により崩落に至った鋼プレートガーダー橋の崩落メカニズムと桁端部の損傷回復評価に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol. 61A，pp. 416-428，2015

- 21) 山口栄輝, 赤城利彰: 腐食した鋼I桁の支点部耐力に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 80-90, 2013.
- 22) 有村健太郎, 有山大地, 船越博行, 山口隆司: 桁端部に腐食劣化の生じた鋼I桁橋の耐荷性能評価に関する解析的検討, 土木学会論文集A1, Vol. 73, No. 1, pp. 232-247, 2017
- 23) 劉翠平, 宮下剛, 長井正嗣: 端部パネルの局部腐食を持つI形断面桁のせん断耐力に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 715-723, 2011
- 24) 村越潤, 高橋実, 飯塚琢英, 小野秀一: 腐食鋼部材の残存板厚計測への各種計測技術の適用性の検討, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 711-724, 2013
- 25) 舘石和雄, 阿部雅人, 奥井義昭, 山口栄輝, 山口隆司: 鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の開発と合理的維持管理への適用—鋼トラス橋のリダンダンシー評価ガイドライン案, 日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業報告書, 2010
- 26) 玉越隆史: 道路橋設計におけるリダンダンシーの評価に向けた取り組み, 第17回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文集, pp. 1-14, 2014
- 27) 土木学会鋼構造委員会: 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会報告書, 2014
- 28) 玉越隆史: 維持管理の時代の技術基準, 第5回 CAESAR 講演会, 2012

土木学会鋼構造委員会
第20回鋼構造と橋に関するシンポジウム

腐食損傷した鋼橋の維持管理設計と残存耐荷力評価の現状と理想

2017年8月4日
法政大学 市ヶ谷田町校舎
マルチメディアホール

首都大学東京 野上 邦栄

1

点検・診断の義務化

定期点検に関する省令・告示 公布(H26.3) 施行(H26.7)

- 橋梁等は、必要な知識および技能を有する者が、5年に1回の頻度で、近接目視により点検を行う
- 統一的な尺度で健全度の判定区分を設定し、診断を実施

健全性の診断結果区分

区分	状態
I 健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
II 予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III 早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV 緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

- 約12% (約2.4万橋) が緊急または早期措置が必要
- 財政難により、撤去(廃止)が増加か？

H26~H27年度点検結果 道路局調べ(H 28.3)

橋梁 (204,533)	I (75,617) 37%	II (104,565) 51%	III (24,101) 12%	IV (250) 0.1%
	■ I	■ II	■ III	■ IV

2

市町村管理の橋は高齢化に伴う深刻な変状が既に顕在化直ちに通行止めとなるような重大な損傷が相次いで発生

鋼トラス橋 斜材の破断

犬吠橋
斜材破断: 2016.9
供用開始: 1924
橋長: 41m
幅員: 4.4m

全 邦 釘 准 教 授 (愛媛大) 提供

3

維持管理プロセスと留意点

```

    graph TD
      A["(1) 書類調査"] --> B["(2) 外観等調査"]
      B --> C{"緊急対策の要否"}
      C -- 要 --> D["緊急対策の実施"]
      C -- 否 --> E["(3) 詳細調査  
(4) 腐食量の調査"]
      D --> E
      E --> F["(5) 健全性評価"]
      F --> G{"対策工の要否"}
      G -- 要 --> H["(6) 補修補強の実施"]
      G -- 否 --> I["(7) 性能回復評価"]
      H --> I
      I --> J["おわり  
(定期点検へ)"]
  
```

- ・道路橋定期点検要領
- ・総点検実施要領など
- ・各高速道路路側の構造物点検要領
- ・鉄道構造物等維持管理標準・同解説, 等

4

既存鋼橋の耐荷力評価

- 点検、診断

```

    graph TD
      A["損傷の発見"] --> B["損傷度の評価"]
      B --> C["対策計画"]
      C --> D["健全性の総合評価"]
  
```

損傷度の1次評価 (日常点検、定期点検、臨時点検)

- ・損傷程度の把握・評価
- ・健全性の診断
 - ・進行性の判断
 - ・リダンダンシーの判断
 - ・影響の重大さの判断

損傷度の2次評価 (詳細点検)

- ・専門技術者による調査
- ・定量的判断・評価
- ・損傷原因の究明

5

残存耐荷力評価の現状

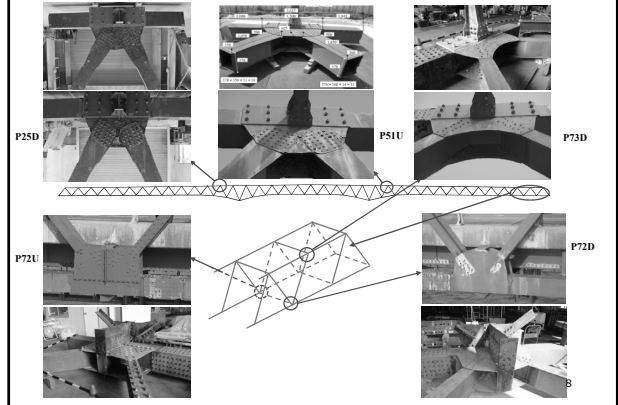
- 損傷を考慮した実働応力値(および解析値)と許容応力度(あるいは保守限度応力度)の比較により評価(応力度法)
- 載荷試験により、測定したたわみ、応力度および固有振動数などから部材の剛性、荷重分担などを求め、計算値と比較により余剰耐力を評価(剛性法)
- 供用下における部材の発生応力、頻度を直接計測し、活荷重に対する耐荷性を評価(応力頻度法)
- 損傷形態を考慮したFEMなどによる解析的評価
- 発生応力と予想される崩壊形式を考慮した適切な評価指標を用いて、既存の耐荷力評価式により評価

6

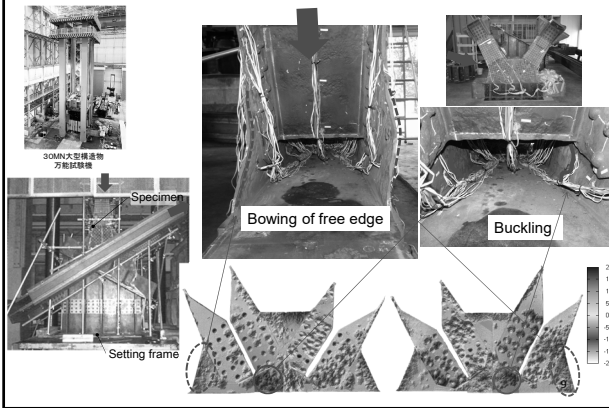
鋼トラス橋



格点部



鋼トラス格点部の載荷試験 (P25d)



圧縮側のガゼットプレートの局部座屈強度

(a) 圧縮斜材端部

$$P_{gr} = \sigma_y A_0 \quad \bar{\lambda} \leq 1.0$$

$$P_{gr} = \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \sigma_y A_0 \quad \bar{\lambda} > 1.0$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{\beta L_c}{t}}$$

$$L_c = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$$

ここに、
 A_0 : 有効幅を有する板の断面積 (= $b_D \times t$)
 b_D : 板幅
 t : ガゼット板厚
 σ_y : 鋼材の降伏点
 E : ヤング係数
 β : 柱の有効座屈係数 (= 0.65)
 L : 細長比パラメータ

(b) 外側自由端

$$P_{gsy1} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} A_1 \cos \theta_1$$

ここに、
 A_1 : 平板の断面積 (= $b_1 \times t$)
 θ_1 : 斜材と抵抗断面のなす角度 (30°)

(c) 内側自由端

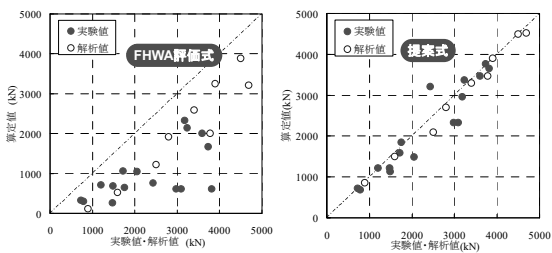
$$P_{gsy2} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} A_2 \cos \theta_2$$

ここに、
 A_2 : 平板の断面積 (= $b_2 \times t$)
 θ_2 : 斜材と抵抗断面のなす角度 (30°)

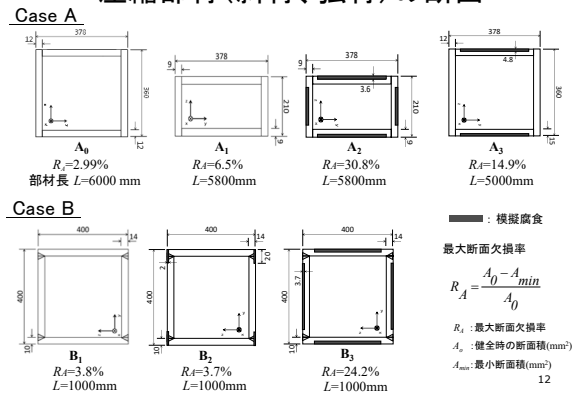
圧縮力を受ける格点部の耐荷力評価式

- ・従来の全面 (圧縮部) だけでなく、3つの領域を考慮した耐荷力評価式を提案
- ・これまでの実験結果を、概ね把握できることを確認

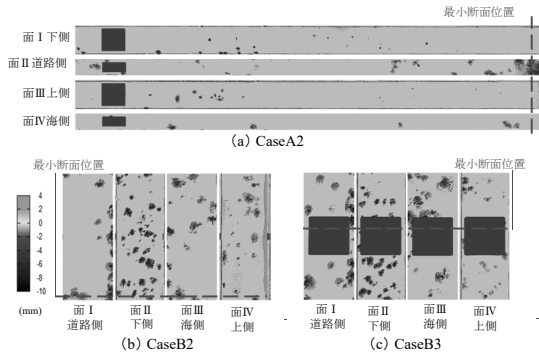
$$P_{gr} = P_{gr} + P_{gsy1} + P_{gsy2}$$



圧縮部材 (斜材、弦材) の断面

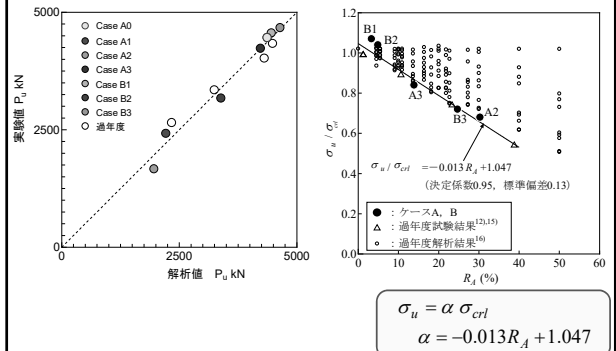


腐食状況と模擬腐食の腐食深さコンター



13

圧縮部材(箱断面)の耐荷力評価



14

残存耐荷力評価方法の構築に向けて

- 近年、鋼桁橋の腐食形態に関する多くの調査データを蓄積
- 実鋼1桁橋桁端部の圧縮載荷試験、支点部腹板のせん断載荷試験およびそれらの解析的検討結果の蓄積
- 橋梁形式別(鋼トラス橋, 鋼桁橋, 鋼アーチ橋, 鋼ラーメン橋さらに吊形式橋梁)ごとに腐食形態の実態の明確化
- 橋梁を構成する部位, 接合部, 部材, 部分構造および橋梁全体系の腐食形態と崩壊メカニズムの解明
- 残存耐荷力の評価および照査方法に関する継続研究の推進
 - 残存耐荷力の要因パラメータ(最小断面位置)の決定方法の開発

15

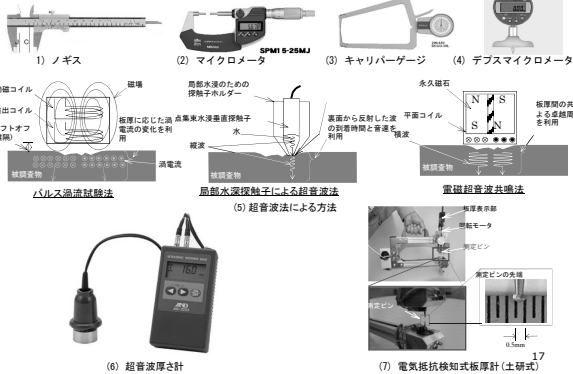
維持管理の高度化への期待

- 腐食計測技術の開発
- 高度解析手法の適用方法
- 耐久性を考慮した設計法の開発

16

腐食計測技術の開発

接触型計測方法



17

高度解析手法の適用方法

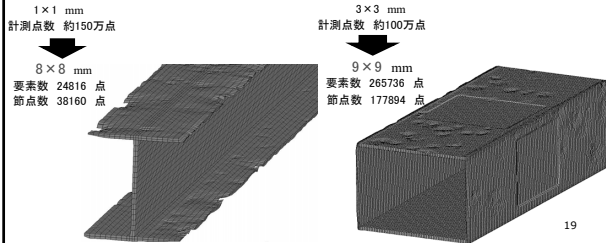
腐食環境下の鋼橋の応答値や耐荷力の算出する際
経年変化の不確実性をいかに正確に考慮できるか?

- 作用(荷重状態)の変化
 - 実態荷重, 利用形態の変更, 環境条件の変化
- 構造全体の形状変化
 - 隣接構造との連結等の構造形式, 力学特性の変化
 - 都市環境の変化に対応するための嵩上げ
 - 土地有効利用を図るための構造物の平行移動
- 部材の形状変化
 - 腐食による板厚減少, 疲労き裂の進展, 部材交換, 補剛材の取付け, 当て板補強
- 境界条件の変化
 - 支承部の変化, 基礎の浮上り, 滑動, 剥離等, 構造物の一部が接触あるいは接地
- 時間依存型の作用による劣化
 - 腐食による板厚減少, 疲労によるき裂進展
- 経年に伴う材料物性値の変化および地盤の変化

18

高度解析手法の適用方法 腐食導入モデル

- シェル要素
平均板厚の評価
軸線の変化
腐食形態(不均一全体腐食、局部腐食など)と要素分割数
- ソリッド要素
肉厚方向の要素分割数と耐荷力



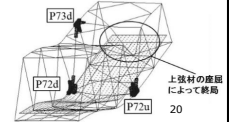
19

維持管理性を考慮した設計法の開発

今後どのような発想で臨むか？

□ リダンダンシーのある構造設計

- リダンダンシーを単なる概念とせず明確に意識する
 - リダンダンシーのある橋梁とは
「設計された橋梁が、将来にわたっての時間や構造システム全体にとって機能しなくなり、場合によっては損傷により陳腐化したり、崩壊したりして、全体として望ましくない状況に至ることを回避できる構造系」
 - すでに存在するリダンダンシーの活用(リダンダンシーの現状分析)
- 従来の設計コンセプトによる設計後、予測供用期間(管理者の意思としての設定期間)における時間概念を考慮した設計体系の明確化
 - 予測供用期間とそれに運動した定量的要求性能の明確化
 - 定量的情報の利活用する方法やその体系化
 - 既設橋梁の正確な性能評価と補修・補強
 - 偶発作用に対する安全余裕



20

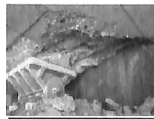
維持管理性を考慮した設計法の開発

□ ダメージコントロールを考慮した構造設計

- 減災および粘り強さの概念に基づく設計法
- 被災の発生は止む得ないものとして、その程度を極力抑える、あるいは被災をあらかじめ想定した範囲やモードに収める
 - 均一耐力の発想から脱皮
 - 上部、下部構造、構成部材、支承などの各性能の階層化
 - 耐力水準を設定して、全体構造系の大規模な変状を回避
 - 復旧のしやすさを意図した破壊への確実な誘導の達成
 - 例えば、橋脚 << 基礎、支承本体 << 取り付け部
 - 設計荷重を超える偶発作用の設定？



耐力の階層化 (JSSC土木鋼構造物の点検・診断・対策技術 2017年度版)



復旧のしやすさ

21

ご清聴ありがとうございました

22

腐食損傷した部材の当て板補修・補強の現状と理想
 Current and ideal states of the art on repairing/strengthening corroded steel members
 by the patch plate

山口隆司*
 Takashi YAMAGUCHI

ABSTRACT This paper presents current and ideal states of the art on repairing/strengthening corroded steel members by the patch plate focusing on high strength bolted connections and stud bolted connections. Furthermore, the future solved problems on them are summarized.

KEYWORDS: 当て板, 腐食, 補修/補強, 高力ボルト
 Patch plate, Corrosion, Repairing/strengthening, High strength bolt

1. 当て板補修・補強工法

1.1 概要¹⁾

当て板による補修・補強とは、一般に、鋼部材にき裂や断面欠損などの損傷が生じた際に鋼製の当て板を高力ボルトもしくは溶接により付加するものであり、荷重伝達機能を含む断面性能の回復・向上を目的としている。当て板による補修・補強は主として、疲労亀裂発生部位を覆うように行うものと腐食損傷部位を金属パテ等で表面成型した後にそこを覆うように行うものがある。また、応力集中部位の応力集中を緩和するために当て板が行われる場合もある。これらの当て板による補修・補強の実例を図-1, 2, 3に示す。

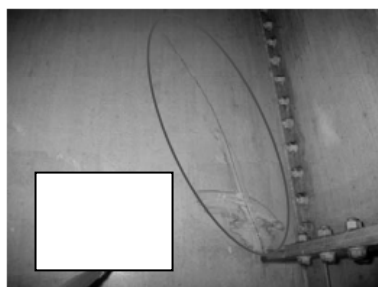


(腐食により一部断面欠損)

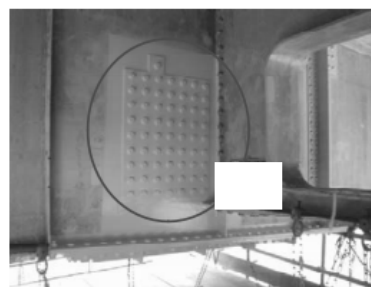


(当て板補修後)

図-1 腐食部に対する当て板補修²⁾



(主桁にき裂)



(当て板補修後)

図-2 疲労亀裂に対する当て板補修²⁾

*博 (工学) 大阪市立大学教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)