



鋼構造物の診断技術

平成28年6月22日

鋼構造物の長寿命化技術に関する検討小委員会報告

構造物の診断とは？

構造物の診断 ≡ 点検 + 性能照査 + 技術者の判定

鋼構造物の診断にあたっては、要求性能、性能規定に対して、適切な手法によって、その性能が満足されているのかを照査することが不可欠である。

主な照査技術（手法）

- ① グレーディングによる方法（目視、非破壊検査など）
- ② 構造解析による方法
- ③ 耐荷力評価式による方法
- ④ 測定、載荷試験による方法

性能照査で得られた情報をもとに、要求される維持管理水準に合わせた補修・補強などの「対策」が行われる。

《鋼構造物の長寿命化技術》

目次

第Ⅰ編 鋼構造物の点検・調査

第Ⅱ編 鋼構造物の診断・劣化予測

1. はじめに

2. 腐食を生じた鋼構造物の診断・劣化予測

2.1 概要

2.2 診断 （*NEXCO中日本の診断事例）

2.3 劣化予測

3. 疲労損傷を受ける構造物の診断・余寿命予測

3.1 概要

3.2 診断 （*NEXCO中日本の診断事例）

3.3 残存寿命の評価

3.4 補修補強効果の確認

4. その他の損傷

5. 更新 （*NEXCO中日本の更新事例）

第Ⅲ編 長寿命化技術

1. はじめに ワークフロー

診断は対象構造物の健全度や劣化度の判定により、保有している性能を適切に評価するために行うもので、日常点検、定期点検、詳細点検結果に基づいて行われる。

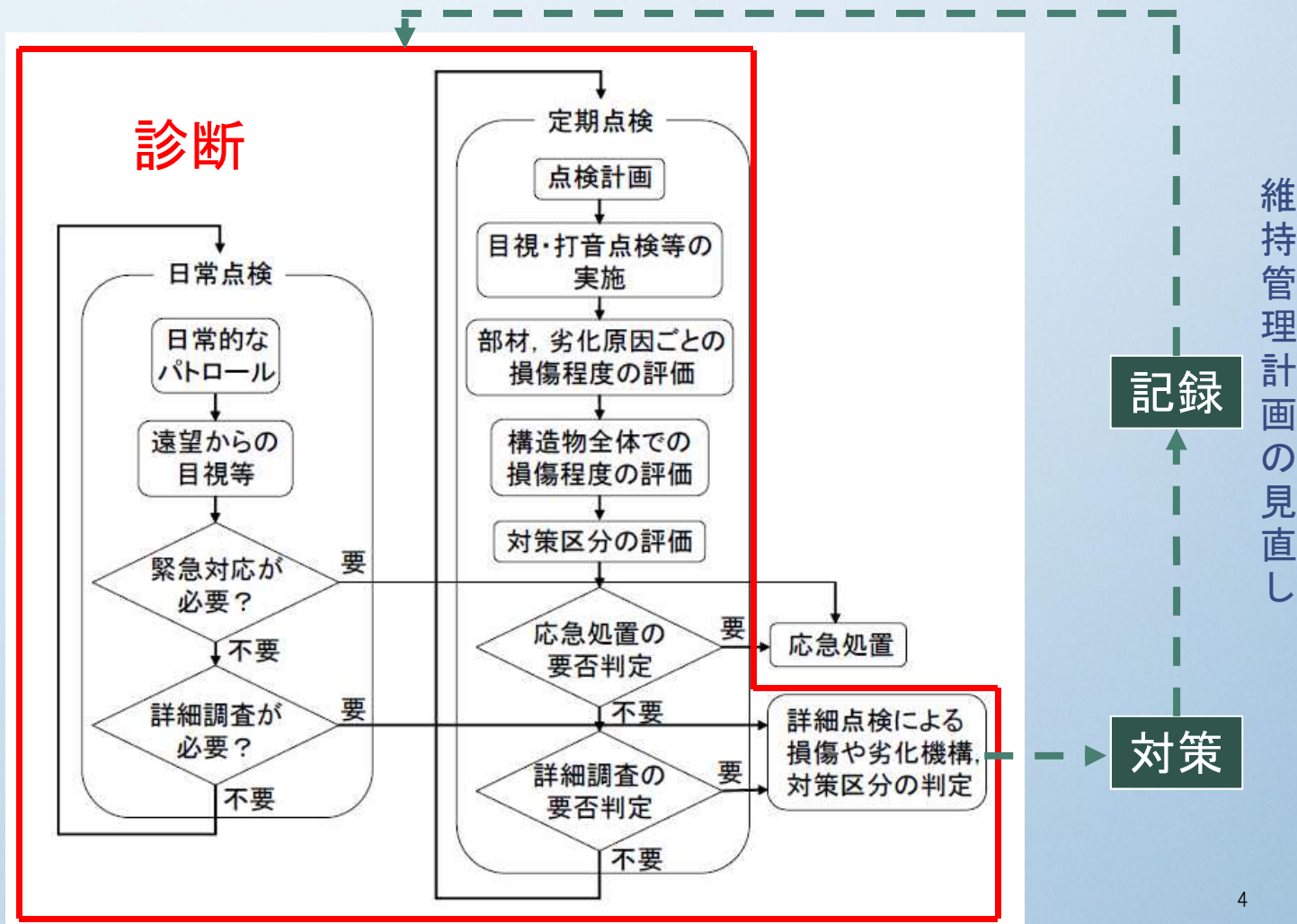


図1.1 点検のワークフローの例

2. 腐食を生じた鋼構造物の診断・劣化予測

2.1 概 要

腐食の定義：金属がそれを取り囲む環境物質によって、化学的又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

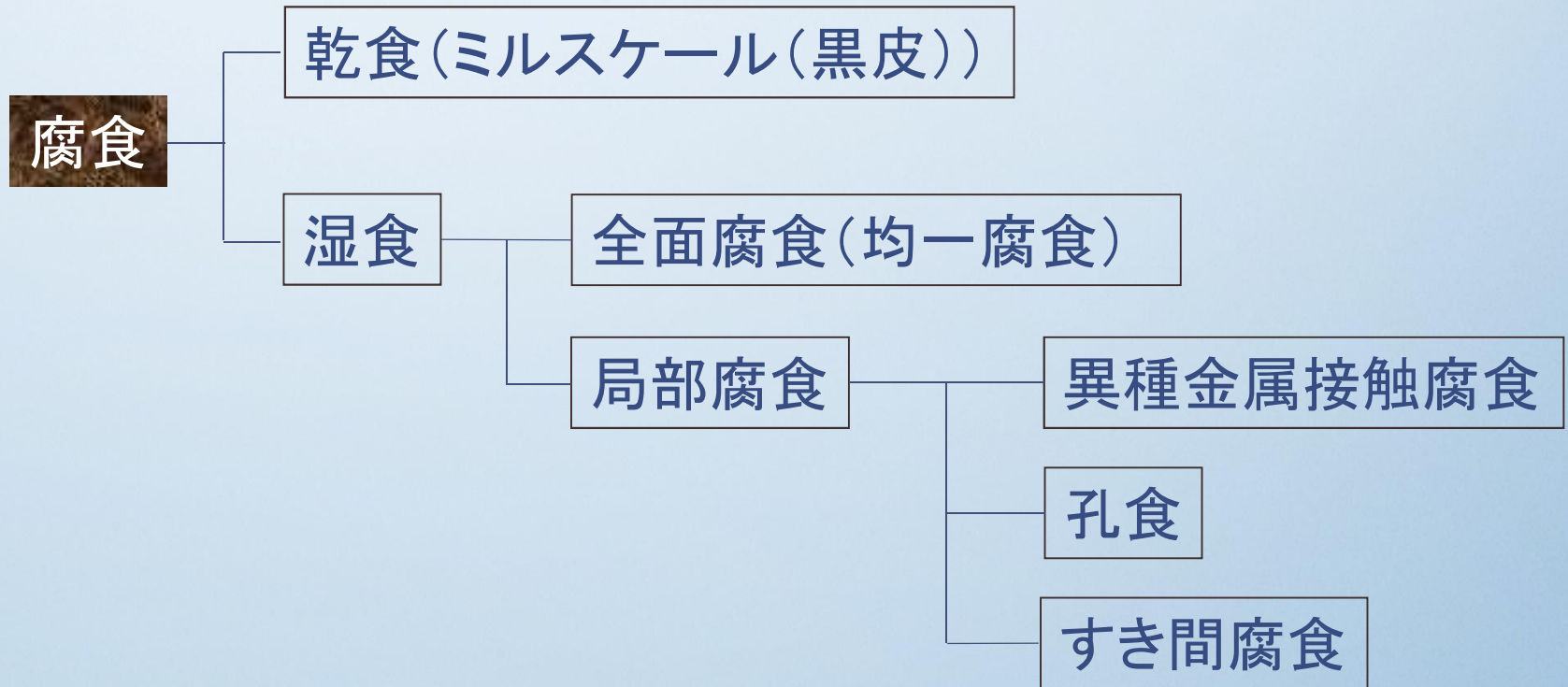


図 2.1 腐食の分類

2.2 診断

2.2.1 目視調査および既存資料による簡易調査

表 2.2 「橋梁定期点検要領」による損傷程度の評価区分

1) 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	

2) 要因毎の一般的状況

a) 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，又は明らかな板厚減少等が視認できる。
小	錆は表面的であり，著しい板厚減少等は視認できない。

注) 錆の状態(層状，孔食など)にかかわらず，板厚減少等の有無によって評価する。

b) 損傷の面積

区分	一般的状況
大	着目部分の全体に錆が生じている，又は着目部分に拵がりのある発錆箇所が複数ある。
小	損傷個所の面積が小さく局部的である。

注：全体とは，評価単位である当該要素全体をいう。

例：主桁の場合，端部から第一横溝まで等。格点の場合，当該格点。

なお，大小の区分の閾値の目安は，50%である。

目視調査による評価例

鋼部材の損傷	①腐食	1 / 4
判定区分 II	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。 (予防保全段階)	
	例	母材の板厚減少はほとんど生じていないものの、広範囲に防食被膜が劣化が進行しつつあり、放置すると全体に深刻な腐食が広がると見込まれる場合
	例	橋全体の耐力力への影響は少ないものの、局部で著しい腐食が進行しつつあり、放置すると影響の拡大が確実に見込まれる場合
	例	耐候性鋼材で、主部材に顕著な板厚減少は生じていないものの、明らかな異常腐食の発生がみられ、放置しても改善が見込めない場合
	例	塗装部材で、主部材に顕著な板厚減少には至っていないものの、放置すると漏水等による急速な塗装の劣化や腐食の拡大の可能性がある場合
備考		
<ul style="list-style-type: none"> ■腐食環境（塩分の影響の有無、雨水の滞留や漏水の影響の有無、高湿度状態の頻度など）によって、腐食速度は大きく異なることを考慮しなければならない。 ■次回点検までに予防保全的措置を行うことが明らかに合理的となる場合が該当する。 		

図 2.2 目視調査による評価例（腐食・判定区分II）²⁾

鋼部材の損傷	①腐食	3 / 4
判定区分 IV	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。 (緊急措置段階)	
	例	ゲルバー桁の受け梁など、構造上重要な位置に腐食による明らかな断面欠損が生じている場合
	例	トラス橋やアーチ橋で、その斜材・支柱・吊材、弦材などの、主部材に明らかな断面欠損や著しい板厚減少がある場合 (大型車の輪荷重の影響によっても突然破断することがある)
	例	主部材の広範囲に著しい板厚減少が生じている場合 (所要の耐力力が既に失われていることがある)
	例	支点部などの応力集中部位で明らかな断面欠損が生じている場合 (地震などの大きな外力によって崩壊する可能性がある)
備考		
<ul style="list-style-type: none"> ■腐食の場合、板厚減少や断面欠損の状況によっては、既に耐力力が低下しており、大型車の輪荷重の通行、地震等の大きな外力の作用に対して、所要の性能が発揮できない状態となっていることがある。 		

図 2.4 目視調査による評価例（腐食・判定区分IV）²⁾

2.2.2 詳細評価

腐食した部材の耐荷性や耐久性の詳細調査法を紹介

(1) 構造解析による方法

- 腐食による断面欠損を平均板厚断面として考慮した**立体骨組解析による許容応力照査**
- 腐食による断面欠損をシェル要素の平均板厚として考慮した**弾塑性FEM解析**
- 腐食表面の凹凸をソリッド要素で表現した**弾性FEM解析による応力集中照査**

(2)耐荷力評価式による方法

腐食した部材単位での耐荷力を評価するための指標の例を紹介

・引張耐力の評価

残存引張強度, 降伏荷重の推定には, **有効板厚**を**評価指標**とした**実験式**などが用いられる。

・圧縮(座屈)耐力の評価

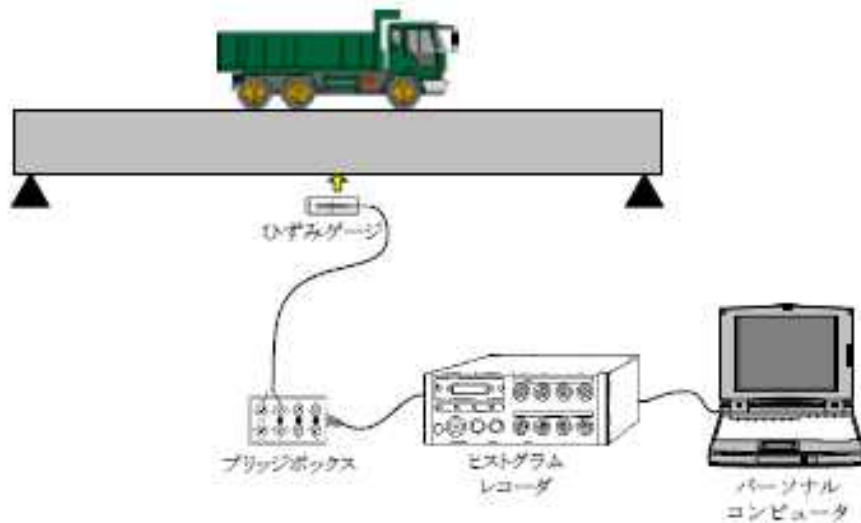
腐食による表面性状の変化に強く影響される。
代表板厚を算出して**幅厚比パラメータ**を求める方法や**断面欠損率**から平滑材の座屈耐荷力曲線を補正する方法など

有効板厚または表面性状(標準偏差, 変動係数)などの定量的な評価指標を用いて, 従来の強度評価式をベースとして残存耐力を推定する。

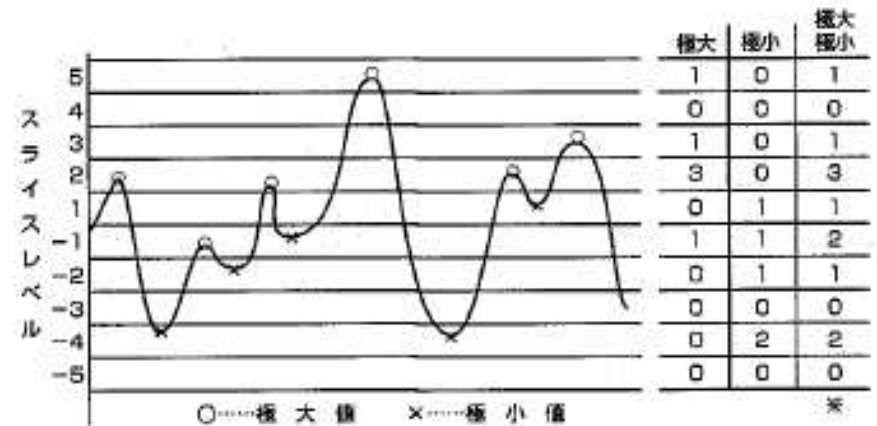
(3) 応力頻度測定, 載荷試験による方法

1) 応力頻度測定

供用下における部材の発生応力, 頻度を直接的に測定し, 活荷重に対する耐荷性を評価する。



(a) 計測システム



(b) ピークバレー法

図 2.8 応力頻度測定の概要

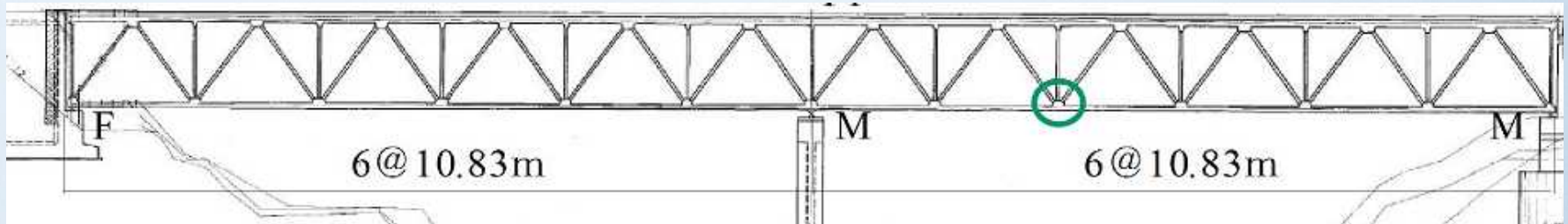
2) 載荷試験

荷重状態(外力)と応力分布や応力範囲を関連付けるために, ダンプトラックなど重量が既知の荷重車で載荷試験を行う。

鋼トラス橋の腐食診断事例 (NEXCO中日本)

鋼トラス橋の診断事例

(トラス格点部の腐食)



AA判定基準

腐食により主部材に孔食や著しい断面減少が生じ、構造物の耐荷力に影響を及ぼす恐れがある。
腐食による断面減少が進行し、主部材が断面欠損している。

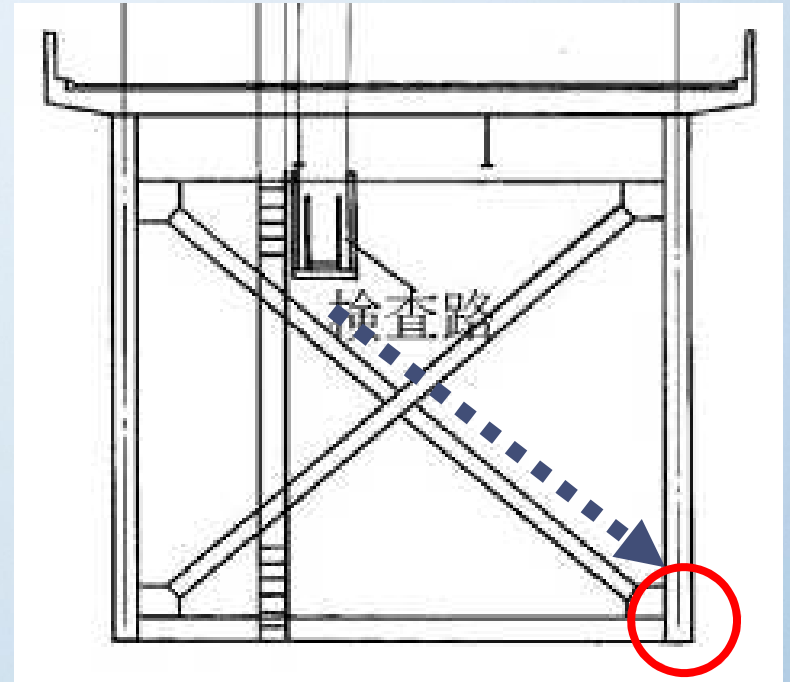


AA判定

腐食状況

なぜ早期に分らなかったか？

検査路からは，詳細な点検が困難な箇所



検査路は，床版近くであり，トラス下弦材格点部を直接見るのは困難な状況がある

実際の診断の流れ

近接目視 AA判定
(FCM部材：緊急性あり)

ロープアクセス等による詳細調査

- ・ 腐食範囲の計測
- ・ 腐食部の板厚の計測
- ・ 溶接ビードの計測
- ・ ひずみ計測

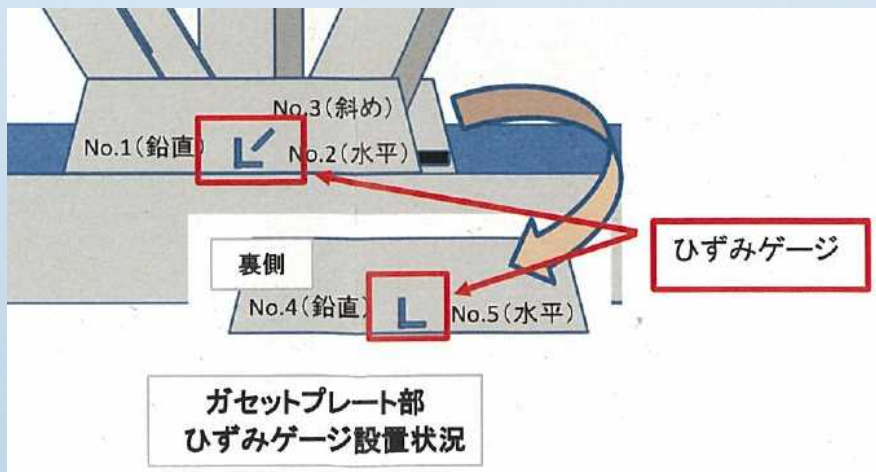
- 耐荷性照査
- ・ 設計計算書レビュー
 - ・ FEM解析

補修要否の判断

補修方法/範囲の判断

- ・ 当て板補修を実施

現地でのひずみ計測



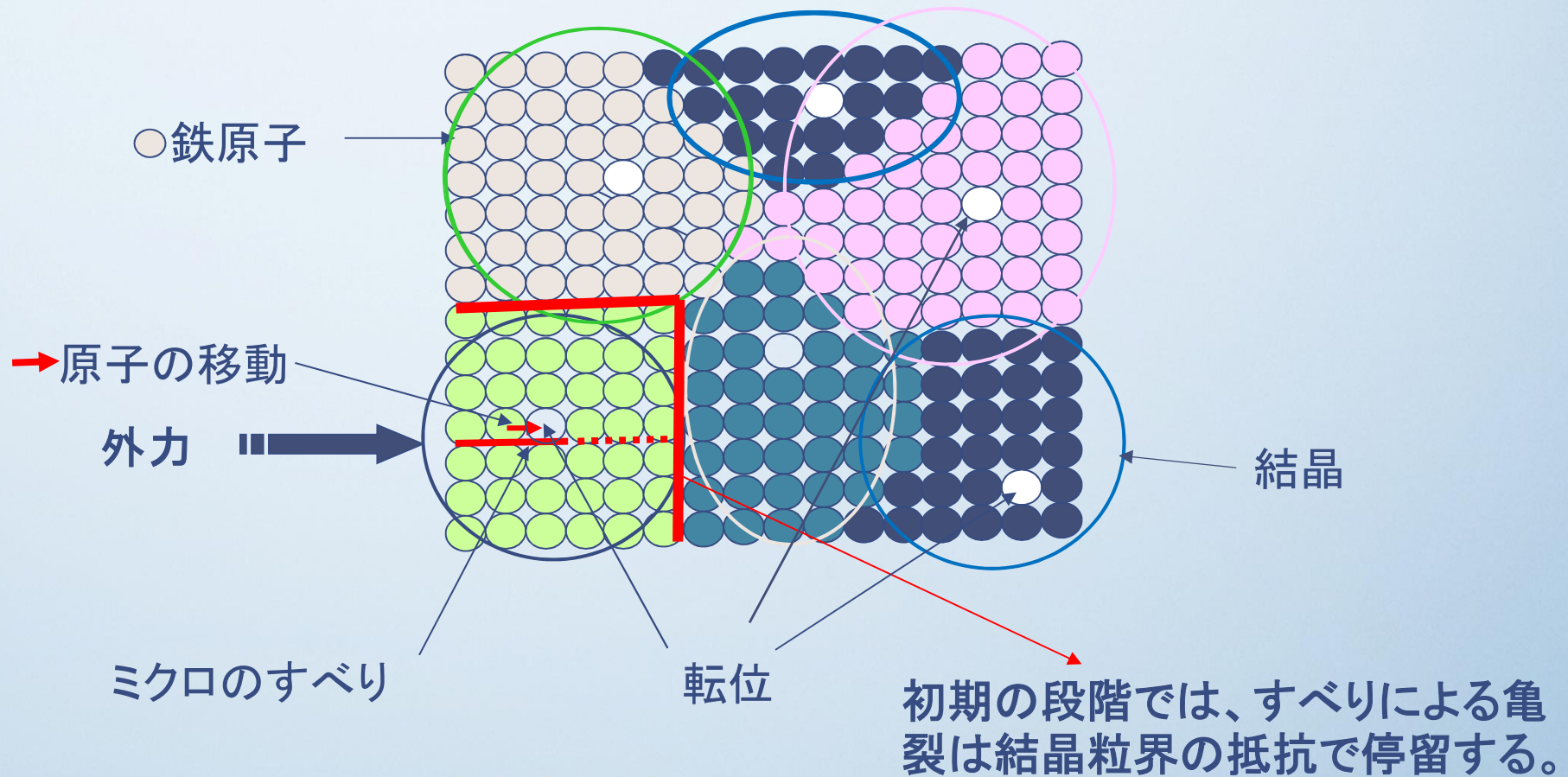
3. 疲労損傷を受ける構造物の診断, 余寿命予測

3.1 概要

疲労の定義: 構造物や材料が繰返し荷重を受けて強度が減少する現象

- ・ 鋼材が繰返し荷重を受けるとき、金属中の線状の結晶欠陥である転位が結晶面を移動し、その結果すべりが発生し、それが成長することで疲労き裂となる。
- ・ 疲労損傷の診断・余寿命予測は、既設構造物の応急対策や補修・補強の必要性の判断、そしてその手法の検討を目的として行われる。

金属はなぜ疲労する？



3.2 診 断

3.2.1 疲労き裂が発生していない場合

(1) 疲労照査の流れ

構造物に作用する応力の評価

- ① 計算による方法
- ② 計測による方法

応力範囲頻度分布の導出

レインフロー法を紹介

疲労等級の選定, ホットスポット応力の計算

「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」(JSSC)の疲労等級, き裂の発生場所、S-N線およびホットスポット応力を求める方法などを紹介

累積損傷度の計算

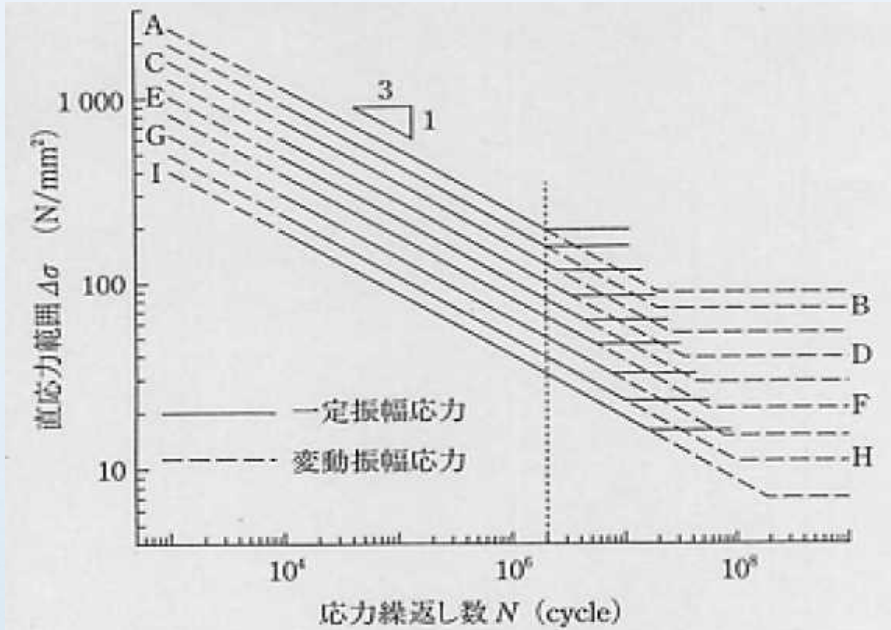
線形累積被害則 $D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)$
(修正)マイナー則, ハイバツハの方法

等価応力範囲の評価

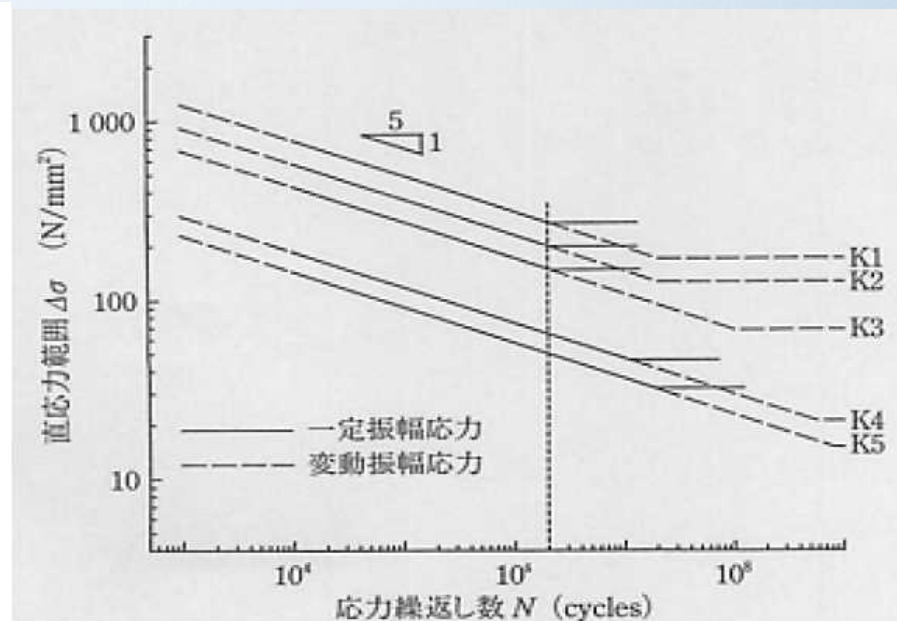
等価応力範囲

疲労設計例

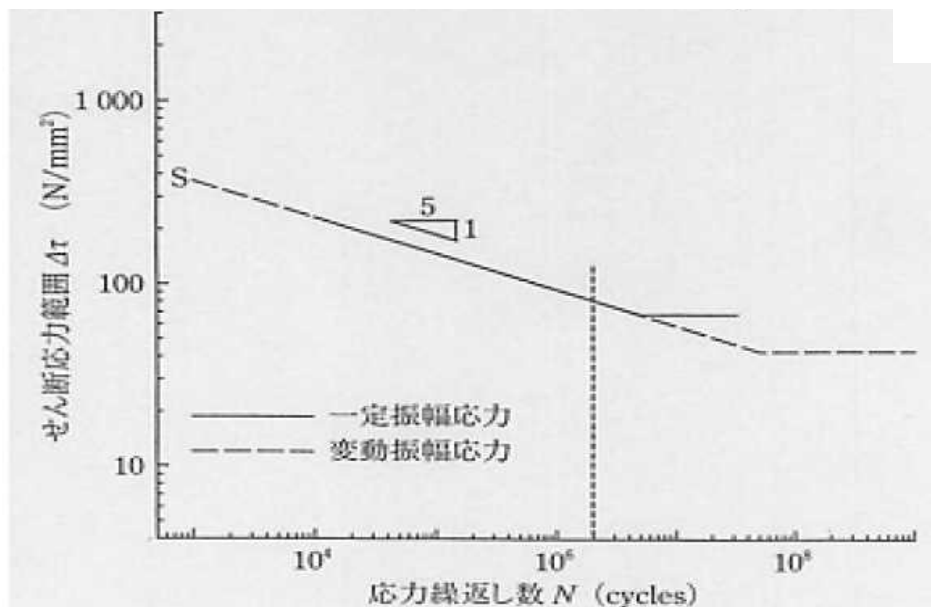
$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m n_i}{\sum n_i}} \quad (m=3,5), \quad \Delta\sigma\tau_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\tau_i^m n_i}{\sum n_i}} \quad (m=5)$$



(a) 疲労設計曲線（直応力を受ける継手）



(b) 疲労設計曲線（直応力を受けるケーブルおよび高力ボルト）



(c) 疲労設計曲線（せん断応力を受ける継手）

図3.4疲労等級別の設計寿命曲線（S-N線）

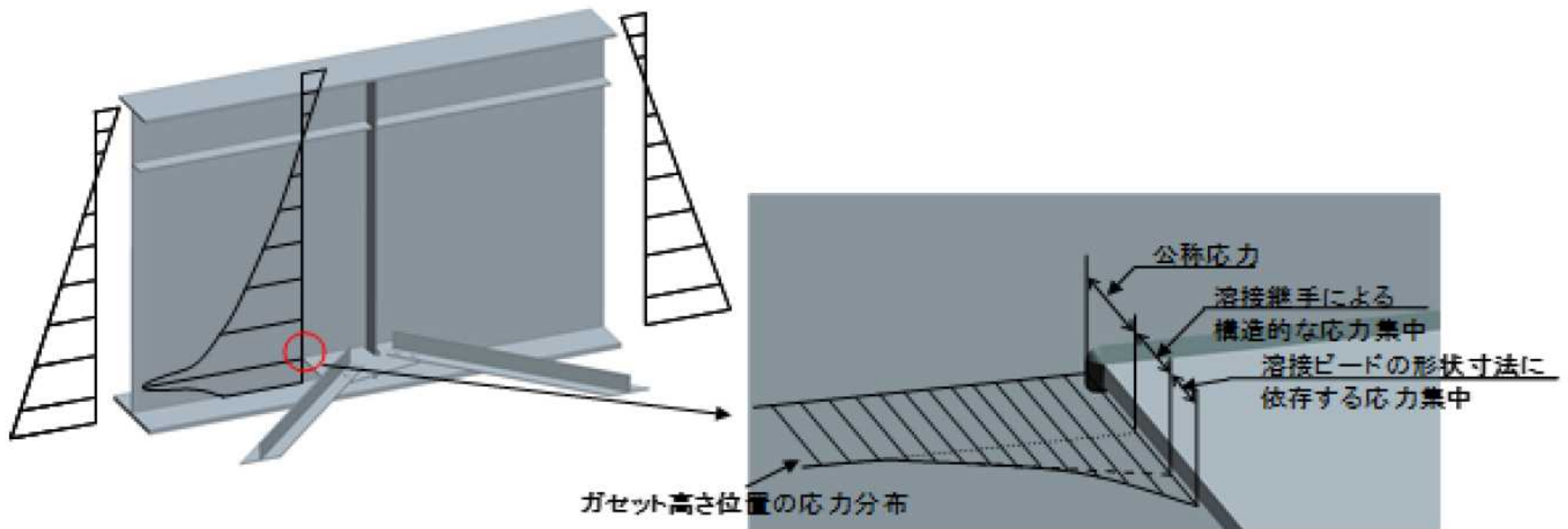


図 3.5 ガセットプレート端でのホットスポット応力を用いた疲労損傷度評価

3.2.2 疲労き裂が発生している場合

(1) 疲労亀裂が目視により確認できる場合

目視結果に基づく診断では、損傷部位の重要性や損傷の程度により、緊急的な措置や詳細調査の必要性の判断等を行う。

橋梁定期点検要領の対策区分判定要領(国交省)では、緊急対応が必要な損傷として下記を例示

- ☆ 鈹桁の主桁腹板，鋼製脚横梁に達しているき裂
- ☆ アーチ橋の支材，トラス橋の斜材，ペンデル支承のアンカーボルトの破断
- ☆ 鋼床版の輪荷重載荷位置直下に縦リブの溶接部からデッキプレート方向に進展するき裂などは緊急対応が妥当と判断できる場合がある。

緊急的な措置の例



①主桁ウェブに大きく進展したき裂（左）と緊急措置の補強材設置例（右） 10)



②支承ソールプレート部の損傷（左） 11)と緊急措置の例（右） 12)

図 3.14 鋼構造物（橋梁）における緊急的な措置の例

(2)疲労き裂の寸法が非破壊検査により特定される場合

- ☆ 非破壊検査では、主に亀裂の形状・寸法を調査する。
- ☆ き裂の損傷状況(貫通の有無, 板厚内の亀裂進展方向, 溶接とき裂の関係など)を詳細に把握することが, 損傷原因特定のための詳細調査立案の重要な情報となる。
- ☆ 構造物の管理者は, 診断に関する規定を定め, 非破壊検査(詳細調査)で得られた情報により, 健全度, 対策区分を判定。

構造物管理者の評価例, 判定基準を紹介
国土交通省
NEXCO 3社
阪神高速
鉄道総研

国土交通省 道路橋定期点検要領の評価例

鋼部材の損傷	②亀裂	2 / 4
判定区分 III	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に処置を講ずべき状態。 (早期措置段階)	
	例 明らかな亀裂が鋼床版のデッキプレートに伸びており、さらに進展すると路面陥没や舗装の損傷につながるが見込まれる場合	
	例 明らかな亀裂が鋼床版のデッキプレートに伸びており、さらに進展すると路面陥没や舗装の損傷につながるが見込まれる場合	
	例 明らかな亀裂が鋼製橋脚の隅角部に発生している。さらに進展すると梁や柱に深刻な影響がでることが見込まれる場合 (発生位置によっては、IVとなることも多い)	
	例 明らかな亀裂が鋼床版のトラブリップに伸びており、さらに進展すると路面陥没や舗装の損傷につながるが見込まれる場合	
備考	■亀裂は、突然大きく進展することがあり、また連続している部位のどこに進展するのかわからないのが通常であり、主部材に発生している場合や、主部材に進展する恐れのある場合には、早期に対策を実施する必要がある。	

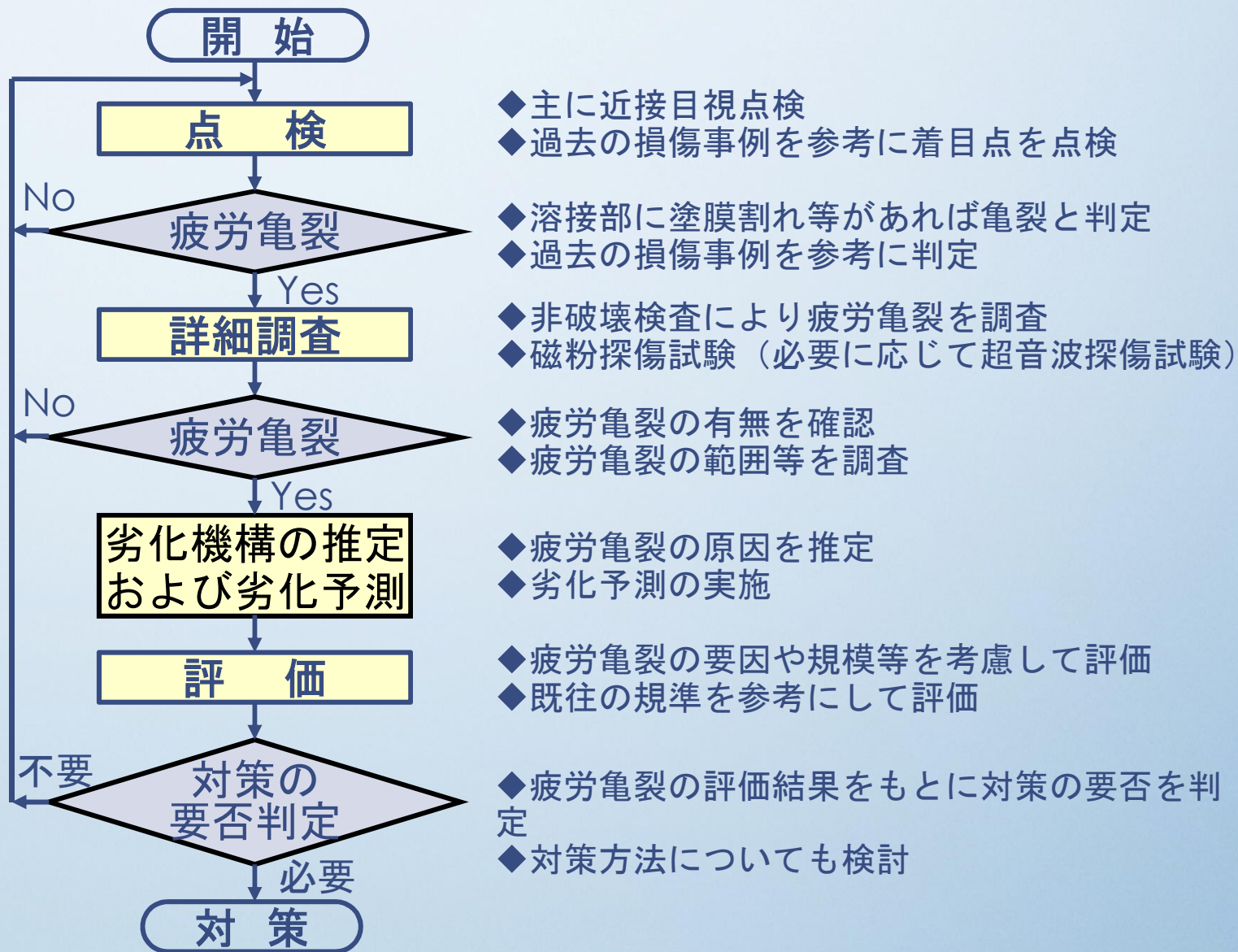
図 3.16 判定区分III 早期措置段階の例¹⁴⁾

鋼部材の損傷	②亀裂	3 / 4
判定区分 IV	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。 (緊急措置段階)	
	例 大きさに関係なく、ゲルバー桁の受け梁に亀裂が発生している場合	
	例 大きさに関係なく、アーチ橋やトラス橋の支柱・吊材・弦材などに明らかな亀裂がある場合	
	例 主げたのフランジからウェブに進展した明確な亀裂がある場合	
	例 主桁や横桁のウェブに大きな亀裂が進展している場合	
備考	■応力の繰り返しを受ける部位の亀裂では、その大小や向きによって進展性(進展時期や進展の程度)を予測することは困難であり、主部材の性能に深刻な影響が生じている場合には、直ちに通行制限や亀裂進展時の事故防止対策などの緊急的な対応を行うべきと判断できることがある。	

図 3.17 判定区分IV 緊急措置段階の例¹⁴⁾

鋼鈹桁橋の疲労亀裂の診断事例 (NEXCO中日本)

診断の手順

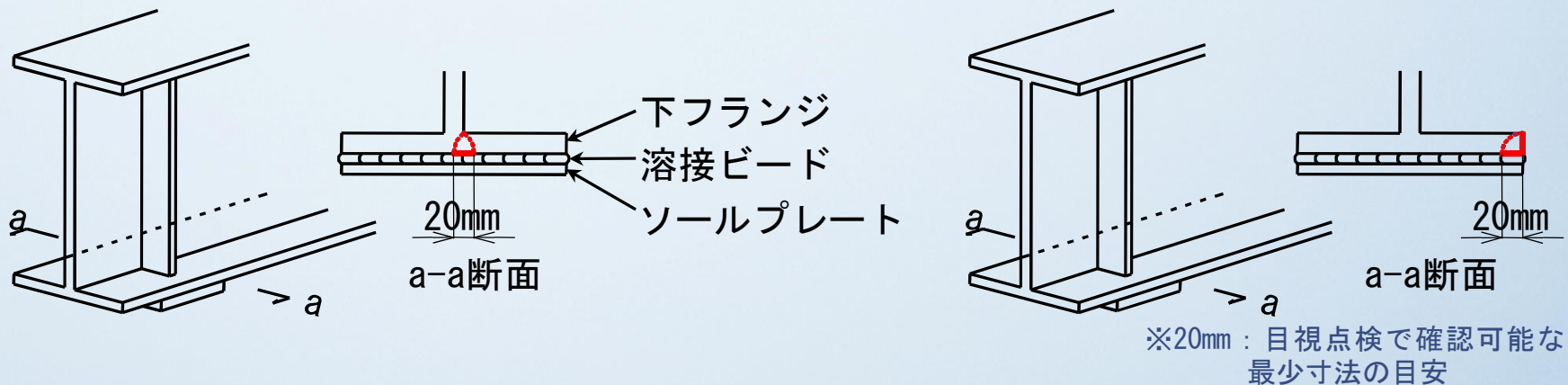


疲労き裂の判定基準

評価区分		一般的状況	鋼部材の疲労き裂を対象とした状況
変状個所別の評価	A A	変状が著しく、機能面への影響が非常に高いと判断され、速やかな対策が必要な場合	<ul style="list-style-type: none"> 主桁や縦桁等が破断に至るおそれがある大きい亀裂もしくは亀裂の疑いがある塗膜割れで、1次応力や溶接欠陥を要因とした損傷。 即時の損傷状況把握と、応急対策（緊急対応）を含めた対策手法検討が必要となるものを対象とする。 また、損傷進展に伴い大規模補修が必要となる亀裂も含む。
	A 1	変状があり、機能低下への影響が高いと判断される場合	<ul style="list-style-type: none"> 主桁や縦桁に発生した亀裂もしくは亀裂の疑いがある塗膜割れで、1次応力や溶接欠陥を要因とした損傷。 即時に損傷状況を把握した上で、対策手法を検討する必要があるものを対象とする。 対傾構等が破断に至るおそれがある明らかな亀裂で、2次応力を要因としたもの。
	A 2	変状があり、機能低下への影響が低いと判断される場合	<ul style="list-style-type: none"> 2次応力により対傾構に発生した明らかな亀裂を対象とする。機能低下への影響は低いと判断されるが、損傷状況は即時に把握することと位置づける。
	B	変状はあるが、機能低下への影響は無く、損傷・変状の進行状態を継続的に観察する必要がある場合	<ul style="list-style-type: none"> 2次応力等が原因で対傾構等に発生した、亀裂の疑いがある塗膜割れを対象とする。観察継続が対応方針となる。
	C	変状の状態（機能面への影響度合いなど）に関する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合	—
	O K	変状がないか、もしくは軽微な場合	

S P型亀裂の評価事例

① 溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合



判定	判定の標準
AA	ソールプレート前面溶接部に亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合。
A1	—
A2	—
B	—

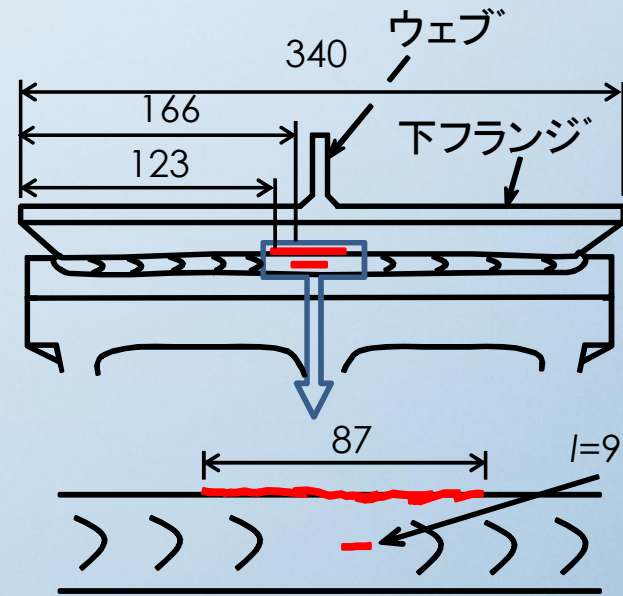
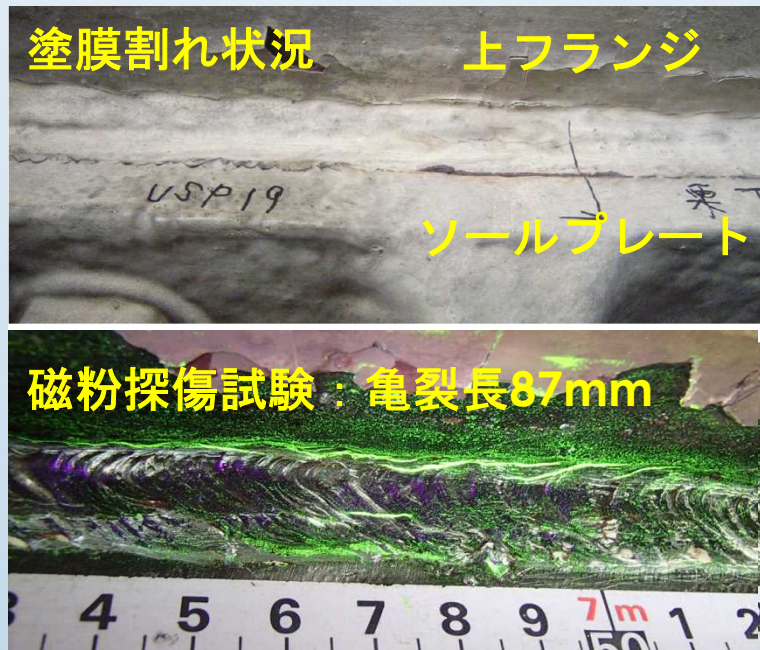
※ソールプレート前面溶接部の亀裂は、進展すれば主桁の破断に至るため特に注意が必要である。また、点検時には、ソールプレート前面溶接部のみでなく、主桁下フランジや同一支承線上の他の主桁についても着目する必要がある。

S P 型亀裂の評価事例

①溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合

損傷判定：A A

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレート前面溶接部、下フランジ側の溶接止端部に亀裂を検出したもの。主桁下フランジの上面とウェブの溶接部付近に亀裂は表出していない。削り込みによるアンダーカットの除去（亀裂残存有無）や亀裂進展方向の確認、超音波探傷試験による下フランジ板厚方向への進展状況確認などの更なる詳細調査の実施が必要であると考えられる事例。

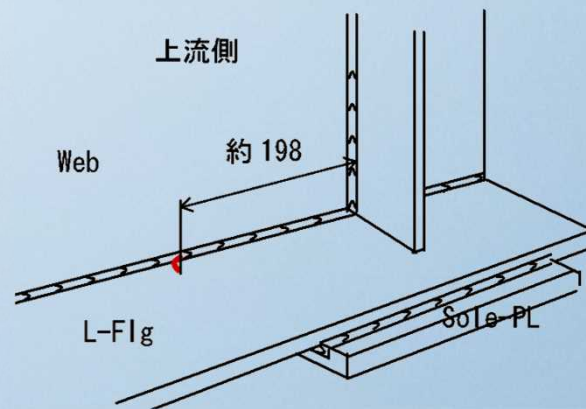
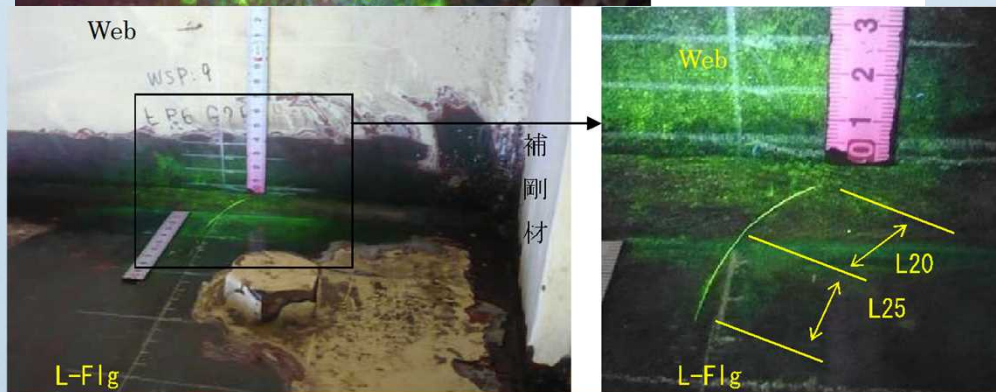
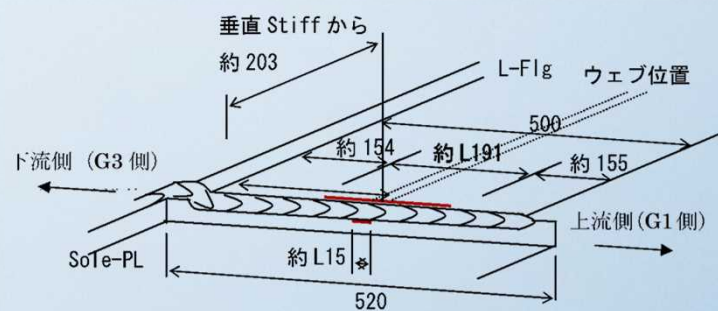
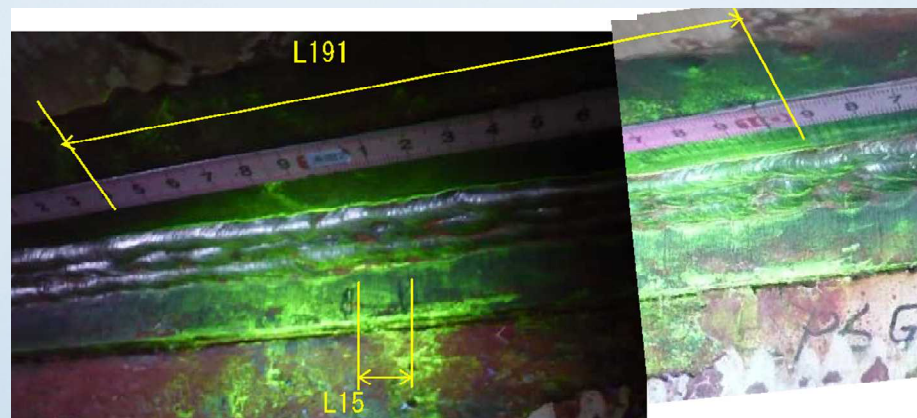


S P 型亀裂の評価事例

① 溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合

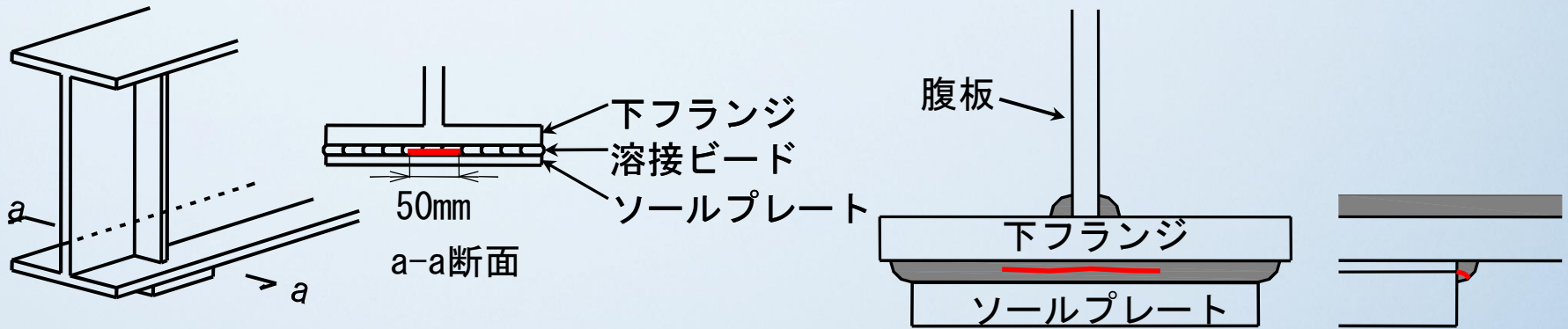
損傷判定：A A

1次詳細調査における磁粉探傷試験により亀裂発生が確認された。ソールプレート前面溶接部から主桁下フランジの板厚方向へ亀裂が進展し、下フランジを貫通、上面に亀裂が表出している。亀裂進展の遅延を目的としたストップホールを設置した後、ソールプレートの取替えおよび主桁ウェブ・下フランジへの当て板補強を実施した事例。



S P 型亀裂の評価事例

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合



判定	判定の標準
AA	ソールプレート前面溶接部ビードに50mm以上の亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合
A1	ソールプレート前面溶接部ビードに50mm未満の亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合。
A2	—
B	—

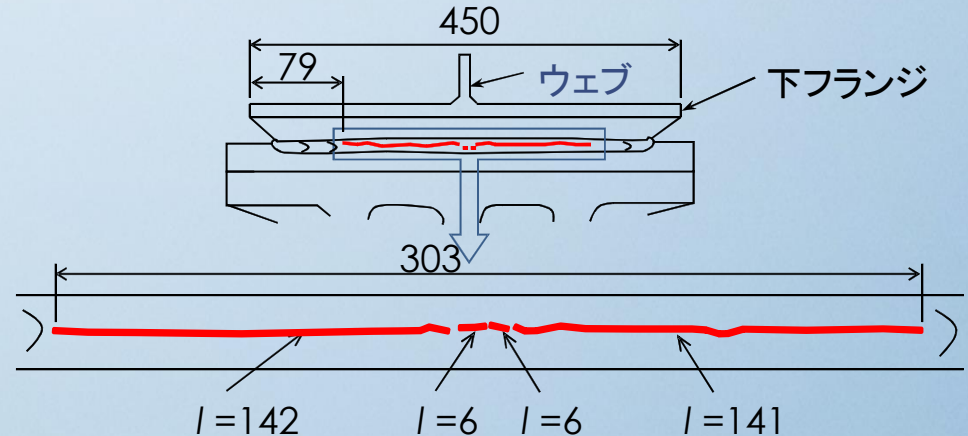
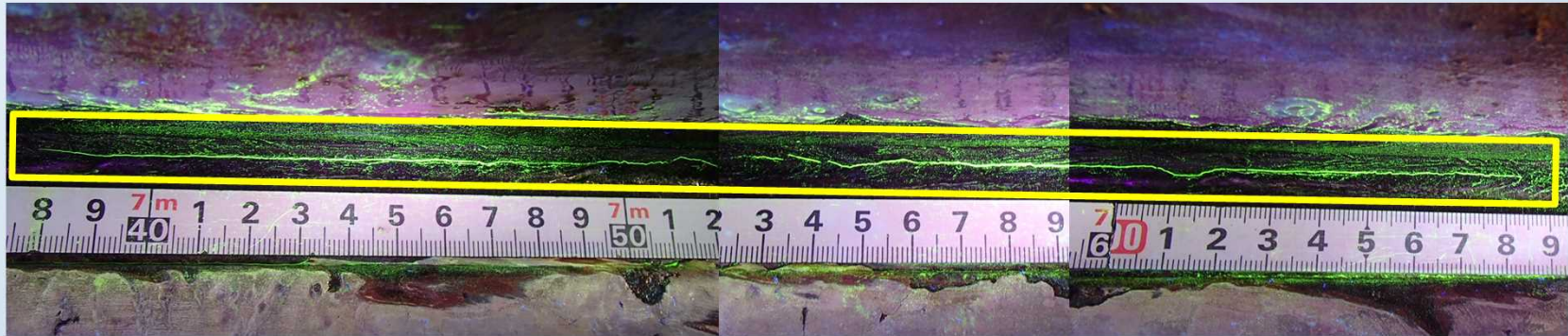
※溶接ルート部を起点とした亀裂は、溶接ビードののど断面のみに進展するケースが多いが、下フランジへ進展している場合も想定される。ソールプレート前面溶接部に50mm程度の亀裂が発生すれば、下フランジを貫通している恐れがあるので、それをAA判定とA1判定の判断基準とした。

S P型亀裂の評価事例

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合

損傷判定：AA

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレートの溶接部前面、溶接ビード上に亀裂を検出した事例。亀裂が溶接ビードの表面的なものである場合、削り込みにより消滅する可能性がある。

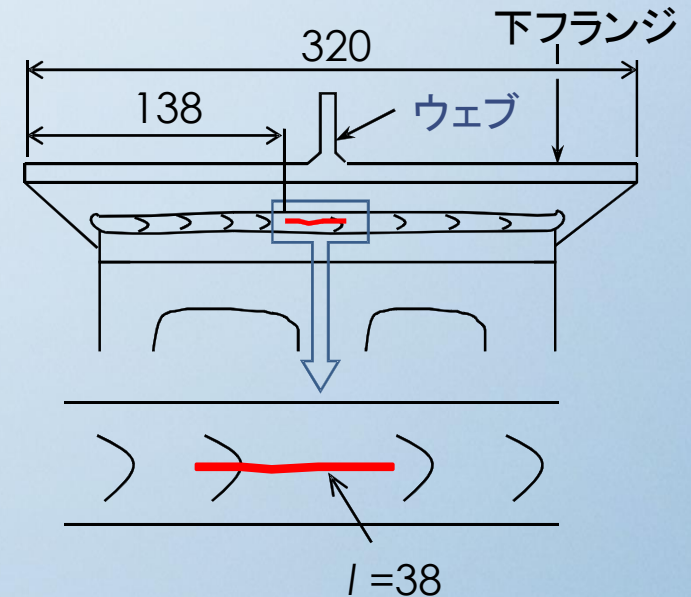
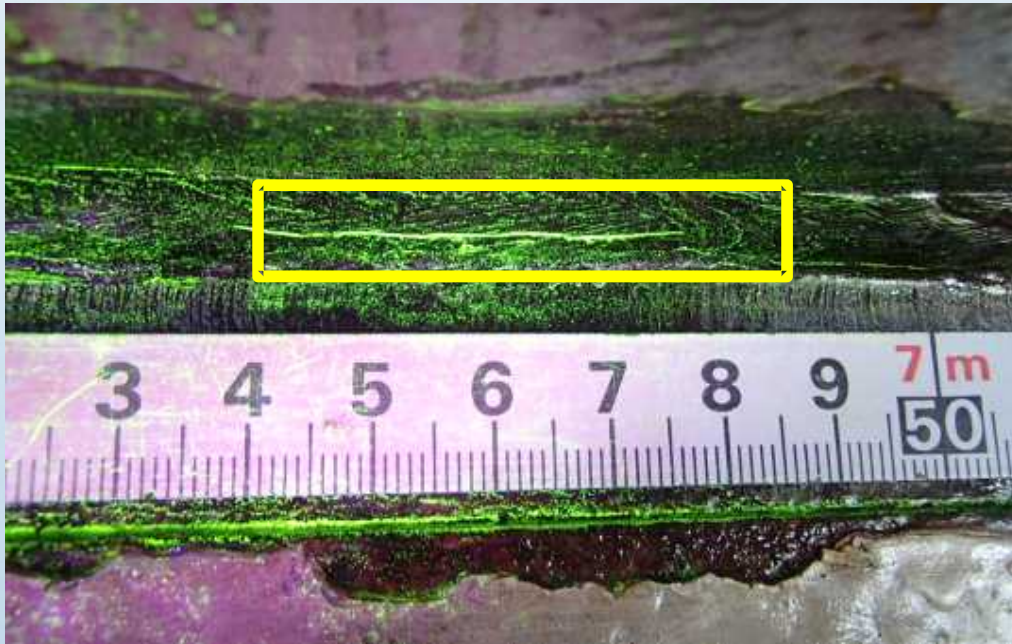


S P型亀裂の評価事例

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合

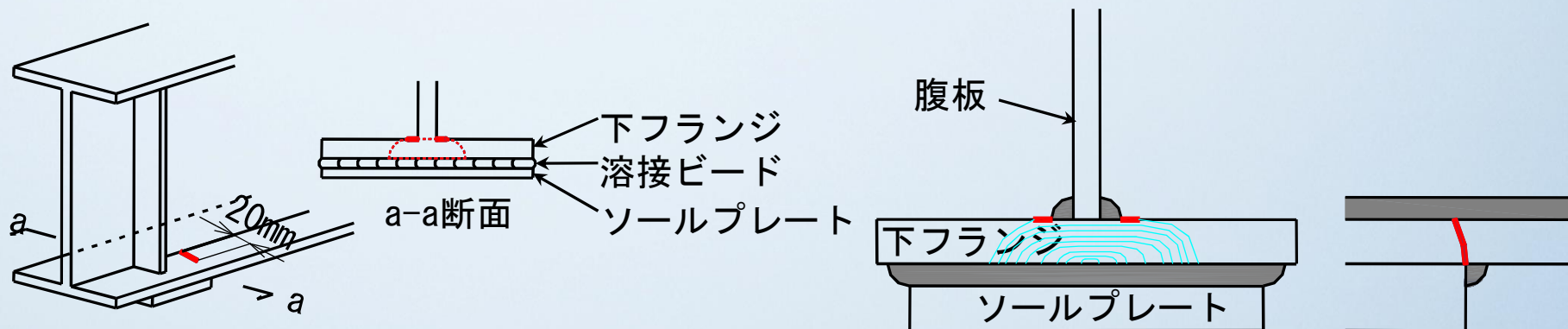
損傷判定：A1

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレートの溶接部前面、溶接ビード上に亀裂を検出した事例。亀裂が溶接ビードの表面的なものである場合、削り込みにより消滅する可能性がある。



S P 型亀裂の評価事例

③溶接ルート部を起点として下フランジに進展する場合

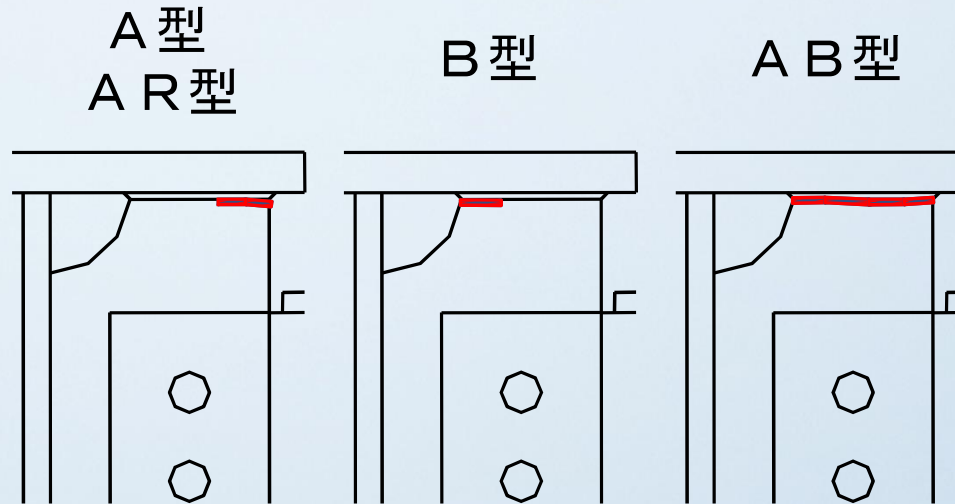


判定	判定の標準
AA	主桁下フランジ上面に亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合。
A1	—
A2	—
B	—

※溶接ルート部を起点とした亀裂は、溶接ビードののど断面には進展せずに、下フランジへ進展することも想定される。その場合には、目視で確認可能な表面的な亀裂は下フランジ上面の小さな亀裂のみとなるため、注意が必要である。

A, A R, B, A B型亀裂の評価事例

垂直補剛材と主桁上フランジ溶接部の亀裂



判定	判定の標準
AA	—
A1	垂直補剛材と主桁上フランジ溶接部が破断、または亀裂長が大きく破断に至る直前の状態にある場合。
A2	垂直補剛材と主桁上フランジ溶接部の一部に明らかな亀裂がある場合。
B	垂直補剛材と主桁上フランジ溶接部に亀裂の疑いがある塗膜割れがある場合。

4. その他の損傷

変形と高力ボルトの遅れ破壊

☆ 変 形

地震や衝突などにより、許容値等を満たしていない場合には補修や補強・取換などの対策が必要.

損傷の評価や判定の参考になる事例集を紹介

国土交通省 橋梁定期点検要領, 2014

道路橋定期点検要領, 2014

国総研 道路橋の定期点検に関する参考資料, 2004

☆ 高力ボルトの遅れ破壊

- ① 遅れ破壊 : 水素脆化の一形態であり、応力集中部に蓄積した水素により、破壊強度が低下することで発生する。特に、**F11T以上**の高力ボルトで多く見られる。
- ② 診断方法 : 目視, たたき検査, 超音波探傷, H_E^*/H_C^* 法(鋼構造協会)など

*まずは、F11TやF13Tなどがどこに使用されているか図面、ヘッドマークの確認により把握しておくことが必要

(参考) 対象となる橋梁(道路橋) : **1966年~1980年**に設計された橋梁では、F11Tが使用されている可能性がある。

発行年月	基準書等	変遷内容
1966年7月	鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針	使用ボルトとして、F9T,F11Tを規定
1980年2月	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	F11Tを規定から削除

5. 更 新

☆ 構造物の更新は、物理的要素の観点からなされるものと機能的要素の観点からなされるのがある。

物理的要素： 保有性能の低下（損傷や劣化）

機能的要素： 供用期間中の要求性能の変化（幅員不足など）

☆ 更新は、安全性の向上やLCCの低減を目的とした選択肢の一つ

☆ 更新は、社会的損失を伴うものであり、その判断基準や根拠を工学的に説明することが重要

表 5.1 橋梁架替理由の内訳

	昭和 52 年度	昭和 61 年度	平成 8 年度	平成 18 年度
上部構造の損傷	295	280	252	179
下部構造の損傷	71	44	32	22
耐荷力不足	29	208	100	60
機能上の問題	248	314	542	319
改良工事	778	682	894	688
耐震対策	0	54	38	23
その他	124	109	65	51
合計	1545	1691	1923	1342

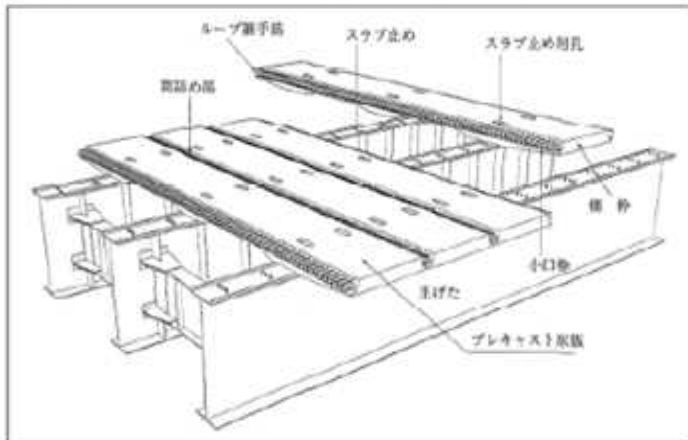
鋼鈹桁橋 R C床版の更新事例 (NEXCO中日本)

更新事例 鋼鈹桁橋 R C 床版⇒ P C 床版

鉄筋コンクリート床版

- 鉄筋コンクリート床版をより耐久性の高いプレストレストコンクリート床版に取替え。
- 工事による交通影響を軽減させるため、対面通行規制により片側ずつ取替え。

プレストレストコンクリート床版の構造



床版取替え工事のイメージ



対面通行規制のイメージ



鋼鈹桁 R C 床版の更新施工手順

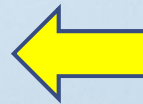
①既設 R C 床版の切断



②既設 R C 床版の撤去完了



③プレキャスト P C 床版の架設



○ ロープアクセスによる詳細点検



ご清聴ありがとうございました