

鋼橋における疲労と腐食の損傷診断と適切な措置

Damage Diagnosis and Appropriate Measures for Fatigue and Corrosion in Steel Bridges

下里 哲弘*

Tetsuhiro SHIMOZATO

ABSTRACT Structural instability will result if appropriate measures are not taken depending on the progress and degree of damage to steel bridges. On the other hand, some damage progresses extremely slowly, and inspection alone may be sufficient. Therefore, the purpose of this research is to develop appropriate diagnosis and measures for corrosion and fatigue damage of steel bridge structural parts from the viewpoint of progress of damage, redundancy and economic rationality.

KEYWORDS: 腐食, 疲労, 進展性, 冗長性, 診断
Corrosion, Fatigue, Progressiveness, Redundancy, Diagnosis

1. はじめに

鋼橋の維持管理は、安全性、耐久性および経済的合理性を踏まえ、構造部位別の損傷特性や発生原因に応じた診断と適切な措置が求められる。一般的に、損傷の進展性や損傷度によっては、早期措置を実施しないと通行規制や大規模補修となり、その措置が遅れると最悪落橋に至る危険性もある。一方、損傷の発生原因や発生位置によっては、進展性が遅いもの（ほぼ停留しているもの）もあり、それらの措置としては点検による経過観察が妥当であるが、そのためには信頼性のある診断法が必要となる。本研究では鋼橋の腐食と疲労損傷に対して、進行性、冗長性、安全性および経済的合理性の観点より、早期措置と経過措置の損傷を分析し、適切な診断技術の構築を目的としている。次章以降では、鋼桁橋の腐食を対象とした構造部位別の腐食特性とその措置技術、腐食弱点部である高力ボルト摩擦接合連結部の腐食診断技術と措置、および疲労き裂の進展性に着目した実橋事例ベースの診断と措置について概説する。

2. 鋼橋の腐食特性と措置技術

2.1 腐食しやすい構造部位

図-1 に腐食事例の収集・分析を基に開発した動画操作機能型の 3D 腐食マップ¹⁾を示す。この腐食マップは、実構造部材で起きている腐食位置や進行範囲などを現場で見える様々な 3D 動画の視点で確認できるものであり、点検技術者の育成や診断法の検討のほか、設計時の留意事項にも役に立つマップである。鋼桁橋で最も早く激しく腐食する部位は図に示す桁端部である。桁端部（支承部含む）は橋台で囲われているため湿気がこもり易く、腐食環境の厳しい部位であることに加えて、伸縮装置の損傷による漏水等を原因として腐食進行する。支承部は狭隘で閉鎖的な空間に設置されることから、滞水や塵埃等の堆積が生じやすく、補修作業も困難な環境であることから、腐食が生じやすく、再発しやすい部位である。次に腐食しやすい部位は高力ボルト連結部である。腐食部はボルト頭及びナットの角部やボルト周辺の連結板、そして連結板境界部の母材であり、著しく減肉する傾向がある。その他、図-2 に示す板エッジ部も塗膜厚の確保が困難である理由で早期に発錆し易い部位であり、角部の

*工博 琉球大学教授 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

膜厚確保と確実な付着力の確保できる成膜技術が求められる。また、鋼桁間（鋼桁内面）は腐食促進因子である飛来塩分が流入することに加えて、桁外面のような雨水の洗浄効果が期待できないことから、腐食進行し易い部位である。この腐食に対して、高耐食性の素材（アルミ、ステンレス鋼、チタン、FRP など）で桁間部に流入する飛来塩分を遮断する多機能防食デッキ（図-3）が提案され、実橋での採用が増加している。なお、このデッキは防食性の他、点検や補修足場としての作業効率性、景観性向上の多機能を有している。

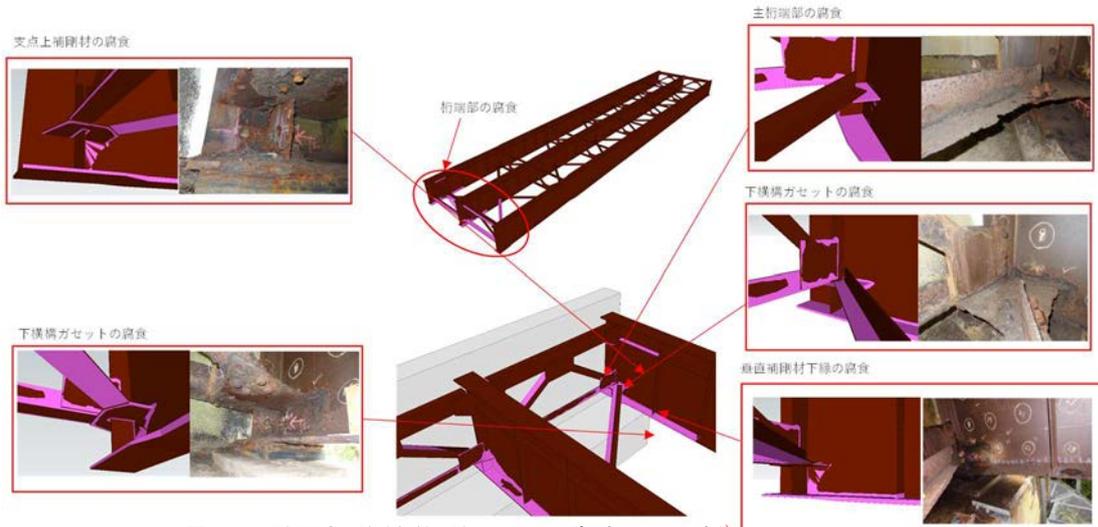


図-1 動画操作機能型の 3DCG 腐食マップ¹⁾

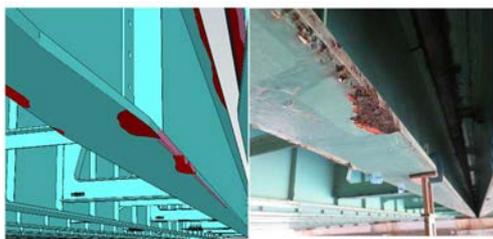


図-2 板エッジ部の 3DCG 腐食マップ¹⁾

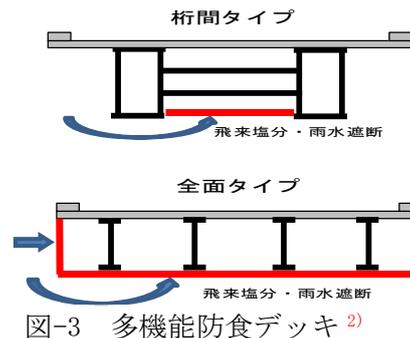


図-3 多機能防食デッキ²⁾

2.2 防食措置技術²⁾

a) 桁端部

桁端部のような激しい腐食環境で且つ狭隘な補修作業環境の場合、さび除去が困難である。そのため残さび上でも防食効果のある補修技術が求められる。その一例として Cold Spray 工法（以下、CS）が期待されている³⁾。CS は残さび上でも強固な密着力を有する防食皮膜を形成できる溶射技術である。本研究では、CS にアルミナと亜鉛の混合粒子を用いて超音速で吹き付ける低温低压溶射技術であり、低温ゆえに純度の高い亜鉛のままで皮膜が形成できる点に特徴がある。図-4 に残さび上での CS 密着メカニズムの検証実験の結果を示す。同図は CS 施工後にコア採取した試験片断面の残さび、鋼素地、CS のビッカース硬さの計測結果である。同図より、残さびは平均約 600Hv と鋼素地と比べて非常に硬く、亜鉛の CS 層は 50Hv 程度と亜鉛の標準的な硬度である。これらの亜鉛<鋼<さびの硬度差により、CS 亜鉛粉体が超音速で硬いさびに衝突し、その際に軟質の亜鉛が塑性変形しながら、硬いさび面に緻密に積層し密着したと評価している。また、残さび上の CS 皮膜の防食評価として、1,000 時間の塩水噴霧試験の結果、残さび上の CS 皮膜は、熔融亜鉛めっきと同等以上の防食性を有すると評価している。図-5 は現場実証として供用約 40 年経過の鋼 I 桁橋（離岸距離 300m、河川上、相対湿度 76.0%、濡れ時間割合 37.7%、飛来塩分量 0.15mdd、腐食速度 0.025mm/y の環境）で実施した CS 施工の状況である。施工後の調査結果より、皮膜厚さ、密着力は室内試験で検証した結果同等の良好な CS 皮膜が成膜された。その CS 施工から 5 年経過後においても、さび発生等は確認されていない。

次に、鋼橋の腐食弱点部である桁端部の耐食性向上を目的として、使用材料そのものを長期耐食性に優れたステンレス鋼材とする研究を紹介する。ステンレス鋼は普通鋼に比べて材料コストが高いため、図-6に示すように新設では腐食しやすい桁端部のみ、補修時には支点部近傍のみをステンレス鋼材にすることでコスト増が大幅に抑制され、ライフサイクルコスト低減となる試算結果が得られている。本研究では、そのステンレス鋼と炭素鋼からなるハイブリッド鋼橋を対象に、ラウンドハウス型の応力ひずみ特性を有するステンレス鋼と炭素鋼を突き合わせ溶接された異材継手としての強度特性、溶接性（品質性、HAZの靱性、残留応力など）、疲労強度（余盛あり・なし）の評価を行っている。また、ステンレス鋼と炭素鋼の自然電位差に起因する溶接接合部近傍での異種金属接触反応について、図-7に示す琉球大構内に建設した実物大試験橋における大気暴露試験および電気化学試験を実施して、ガルバニック反応メカニズム（腐食速度と腐食条件）を解明中である。

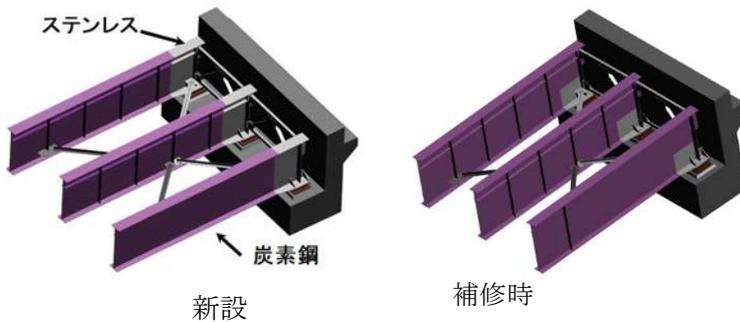


図-6 桁端ステンレス鋼橋

b) 高力ボルト連結部

対策技術の一例として、維持管理の容易性と確実性、それと耐紫外線に優れた透明型ボルトキャップを紹介する。キャップは環境遮断型の防食法であり、研究開発では素材の透明化に様々な工夫を行い、その検証としては紫外線促進試験、大気暴露試験および実橋での実装試験とモニタリングを重ねてきた技術である。透明キャップの特徴は、キャップ内部の状況を目視確認できると、鋼板面とキャップつばのみを接着しているため簡易な工具で取り外すこともできる。透明キャップの防食性検証として、塗装ボルトにきずを入れた状態で透明ボルトキャップ有無に対する経時変化の観察結果を図-8に示す。3年経過後、透明ボルトキャップ設置なしは、きず部からの塗膜膨れと赤さびが認められた。一方、透明ボルトキャップ設置ありは、キャップ内部のボルト部の変状は認められていない。また、ボルトキャップの内部にマイクロ型 ACM センサーを設置しての腐食電流分析の結果、ボルトキャップの大気遮断効果を電気化学的に確認している。

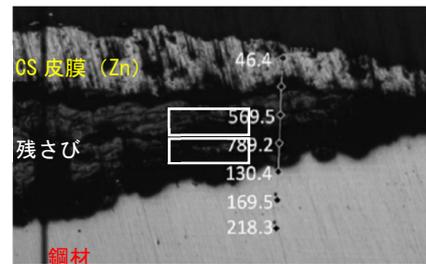


図-4 残さび上の CS 皮膜のビッカース硬さ(Hv)



図-5 実橋における CS 施工状況

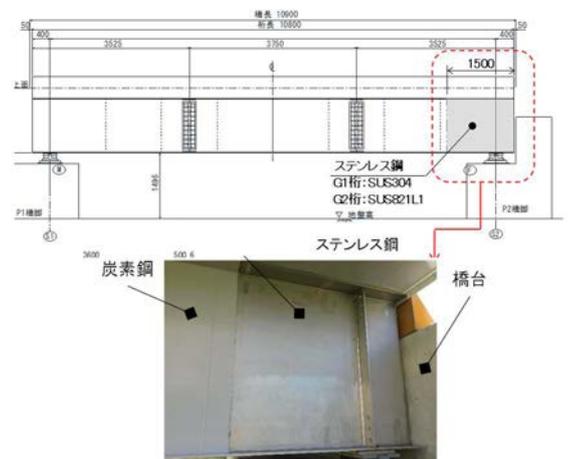


図-7 桁端ステンレス鋼桁橋(琉大構内)



図-8 ボルトキャップ有無による防食性比較

c) 板コバ部（エッジ部：角部）

塗装は塗膜厚が薄くなる部位が存在するボルト部や板コバ部で早期に塗膜劣化し、錆が発生する。防食法として沖縄地区鋼橋防食マニュアル⁴⁾(沖縄仕様)では、全国仕様の鋼道路橋防食便覧⁵⁾より下塗り1層増しの厚い塗膜厚規定となっている。ここでは、下フランジの板コバ部の防食性に着目し、沖縄仕様、全国仕様、および全国仕様の下塗りにステンスフレーク (SUS-flake) を導入した新仕様の暴露結果を述べる。図-9 に SUS-flake の断面観察写真を示す。SUS-flake は厚さ 0.3 μm 、30 μm の円盤状の形状であり、塗膜内に層状に配列された SUS-flake が塗膜硬化時の収縮に抵抗して膜厚の確保できる特徴があること、塗膜内に腐食生成物の侵入を防ぐ環境遮断効果が高いこと、紫外線による樹脂の劣化防止効果などが確認されている。琉球大構内暴露場に建設された実物試験橋の下フランジエッジ部に全国仕様、沖縄仕様、SUS-flake 含有塗装を施工し、外観目視を行った結果より、全国仕様は1年半で板コバの下側に全線発錆、沖縄仕様は2年半後に同部位に発錆、SUS-flake 含有塗装仕様は未だ錆の発生はない。その要因分析のために実物試験橋の下フランジからコア抜きした断面観察結果より、全国仕様はエッジ部の膜厚不足箇所が腐食の起点、沖縄仕様はエッジ部の膜厚が標準膜厚 200 μm に対して約 50 μm と膜厚が小さくなったことが発錆原因である。一方、SUS-flake 含有塗装は下塗りの標準膜厚 120 μm に対して約 90 μm であり、全国仕様や沖縄仕様と比べて、膜厚確保に優れていることが錆発生なしの要因と評価している。今後も継続して観察を行うとともに、塩害環境の厳しい沿岸部での暴露や錆が発生した部位への補修効果の研究を行っていく。



図-9 SUS-flake 断面観察

3. 高力ボルト摩擦接合継手の腐食診断と措置

3.1 高力ボルト摩擦接合継手の腐食特性

高力ボルト摩擦接合継手の腐食は、図-10 の①・②に示す塗膜厚の確保し難いボルトや連結板の角部、③・④に示す腐食促進因子が滞留し易く、濡れ時間も長い連結板と母板の継手境界部や連結板表面の座金周辺での進行が速い。高力ボルト摩擦接合継手の腐食劣化後の対策としては、「塗替え」「高力ボルトの取替」「連結板の補強や取替え」が行われており、高力ボルト摩擦接合継手を適切且つ合理的に維持管理していくためには、腐食状態に応じたすべり耐力診断法の構築が求められる。

3.2 腐食ボルトによる軸力診断と措置

高力ボルトの診断は、塗膜劣化や軽微なさびのみであれば当然ながら塗り替え補修となるが、写真-1 のように腐食進行した高力ボルトは、ケレンによるさび除去が難しい角部やねじ部などにさびが残ることから補修塗装後の早期再発が起きやすい。また、高力ボルトの交換実績が豊富であることを踏まえて、腐食したボルトはボルト交換時期をコントロールする方法を基本として、その診断法は、定期点検時の外観目視結果のみで診断できる「簡便法」と現場における残存軸力調査結果を用いた「詳細法」の2つに大別することを土木学会鋼構造委員会診断小委員会で検討中である。なお、簡便法で

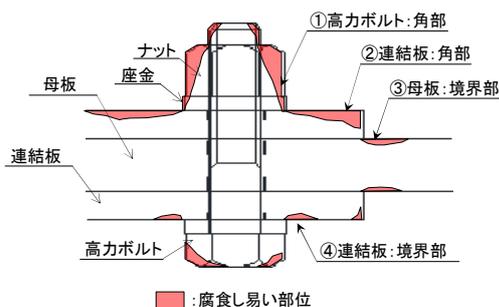


図-10 高力ボルト摩擦接合継手の腐食形態

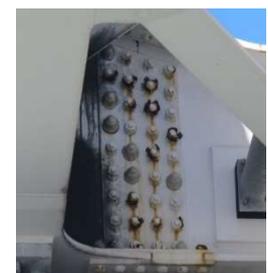


写真-1 実橋での高力ボルトの腐食

は、ボルトの腐食状態に応じた残存軸力を推定する診断図が必要であり、その診断図に対応した腐食写真カルテの構築が必要である。また、腐食したボルトの残存軸力と本数や位置に応じた継手の構造照査の事例ストックも必要である。なお、簡便法のような診断では、安全側の判断となるような設定が必要となり、腐食したボルトの継手照査においてもボルト単位で評価する場合と継手全体での照査の事例研究が必要であり、安全側にどこまで見積もるのがポイントとなる。また、損傷の進行性と冗長性の考えも重要である。これらの成果を上記小委員会に取りまとめ、実用的かつ信頼性のある診断と措置法の構築を目指している。

次に、簡便法と詳細法に関する現時点の考え方を概説する。

簡便法は定期点検時の腐食ボルトの外観写真を用いて、「腐食小」「腐食中」「腐食大」の3つに区分し、残存軸力を推定する方法である。その残存軸力の推定は、図-11 に示す実腐食した高力ボルトのナット部およびボルト頭部の形状計測値とひずみゲージ法を用いて計測した残存軸力値との相関曲線の下限值を用いる。例えば「腐食小＝残存軸力下限値 80%」「腐食中＝残存軸力下限値 60%」「腐食大＝残存軸力下限値 40%」である。これは安全側の診断となると考えている。その推定された残存軸力を用いて、腐食ボルトの本数と位置に応じた継手の構造照査を行うこともでき、適切なボルト交換時期をコントロールすることができる。今後、この簡便法の信頼性を高めるために、環境の異なる地域の腐食ボルトの外観写真（写真カルテ）と残力軸力データを収集していく。

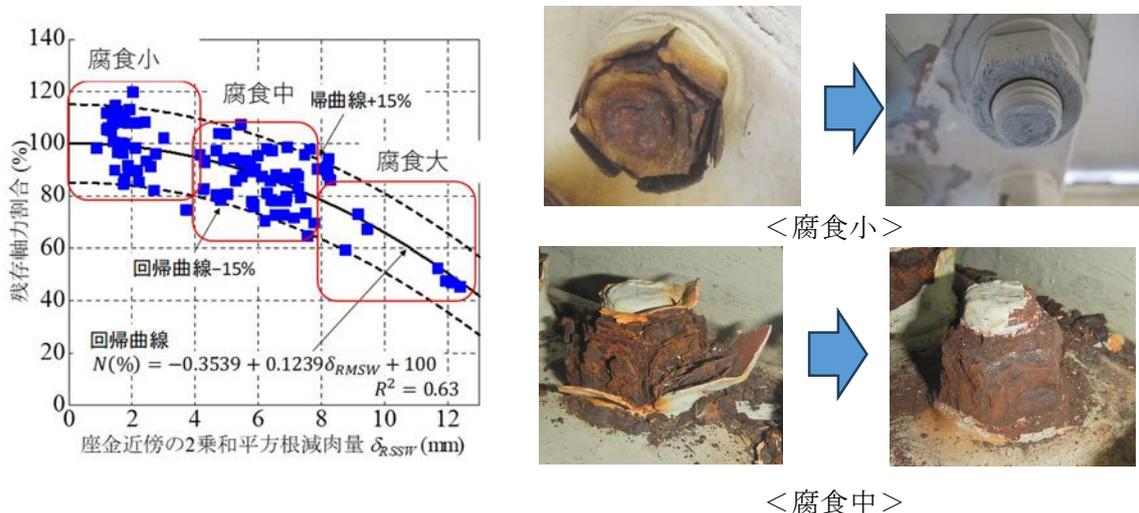


図-11 残存軸力診断と高力ボルトの腐食度

表-1 高力ボルトの軸力測定方法

手法	概要	精度	特徴
1 ひずみゲージ法	ひずみから軸力計測 (直接計測)	高精度	現場での作業が煩雑
2 非破壊法 (過流探傷を用いた軸力測定)	非破壊で軸力測定 (間接的な計測)	1より信頼性が劣る	簡易に計測
3 形状計測法 (減肉形状を用いた軸力評価)	ナットの直径を計測 (直接計測)	1より信頼性が劣る	現場での作業が生じる



渦流探傷法



形状計測法

詳細法は、現場において腐食したボルトの残存軸力を非破壊的に計測し、その残存軸力を用いて継手の構造照査を行う方法である。表-1 に研究実績のある残存軸力計測法を示しており⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ボルトのコア抜きなどで取り外す際のひずみの変化量を計測するひずみゲージ法、低周波数型の渦流探傷法、およびナット近傍の腐食減肉量と残存軸力の相関性を用いた形状計測法などがある。

3.3 連結板のすべり耐力診断

腐食減肉した連結板の取替えや補修を行う場合、一時的に継手の応力が解放されるため、ベントの設置⁹⁾¹⁰⁾やバイパス材¹¹⁾¹²⁾を溶接で主桁に取り付ける必要があるため大規模な工事となる。このため、腐食減肉した連結板を診断する上では、腐食減肉した連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の残存すべり耐力を適切に評価したうえで、補修や取替えを合理的且つ適切に判断することが大切である。ここでは、連結板の腐食進行過程を説明した後、腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手がすべり耐力へ与える影響と診断法について述べる。

a) 連結板の腐食減肉形状と進行過程

実環境下で腐食した連結板は、高力ボルト形状の影響を受けて一様には減肉せず、大きく2種類に分類される¹³⁾。1つは、座金周辺のみ凹型に減肉した環状期連結板と、連結板全面が減肉した全面期連結板である。いずれの減肉形状においても座金直下において腐食減肉はほとんど生じず、健全時の板厚が残存する連結板特有の腐食減肉形状を示す。

腐食減肉した連結板のボルト孔合計112個の腐食減肉形状を計測し、平均減肉量の大きい順番に減肉形状を整理した結果を図-12に示す。図は、各平均減肉量の代表的なボルト孔の断面と減肉量のコンターを示しているが、同程度の平均減肉量の腐食減肉形状は類似の形状を示していた。図から分るように連結板の腐食減肉は、はじめに座金と連結板表面の境界部に飛来塩分や水などの腐食促進因子が滞留し、座金近傍の腐食減肉が進行して凹型の減肉形状を示す(図-12(b)・(c))。その後、座金近傍に生じた凹部に腐食促進因子が滞留し、減肉で生じた凹の幅方向に腐食減肉が進行していく(図-12(d)・(e))。腐食減肉がさらに進行すると、座金直下を除く全面で腐食減肉が進行し凸型の腐食減肉形状(図-12(f))を示す進行過程を辿ると推察される。

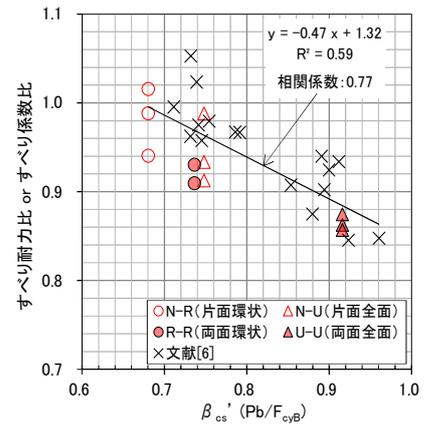


図-13 すべり耐力評価図

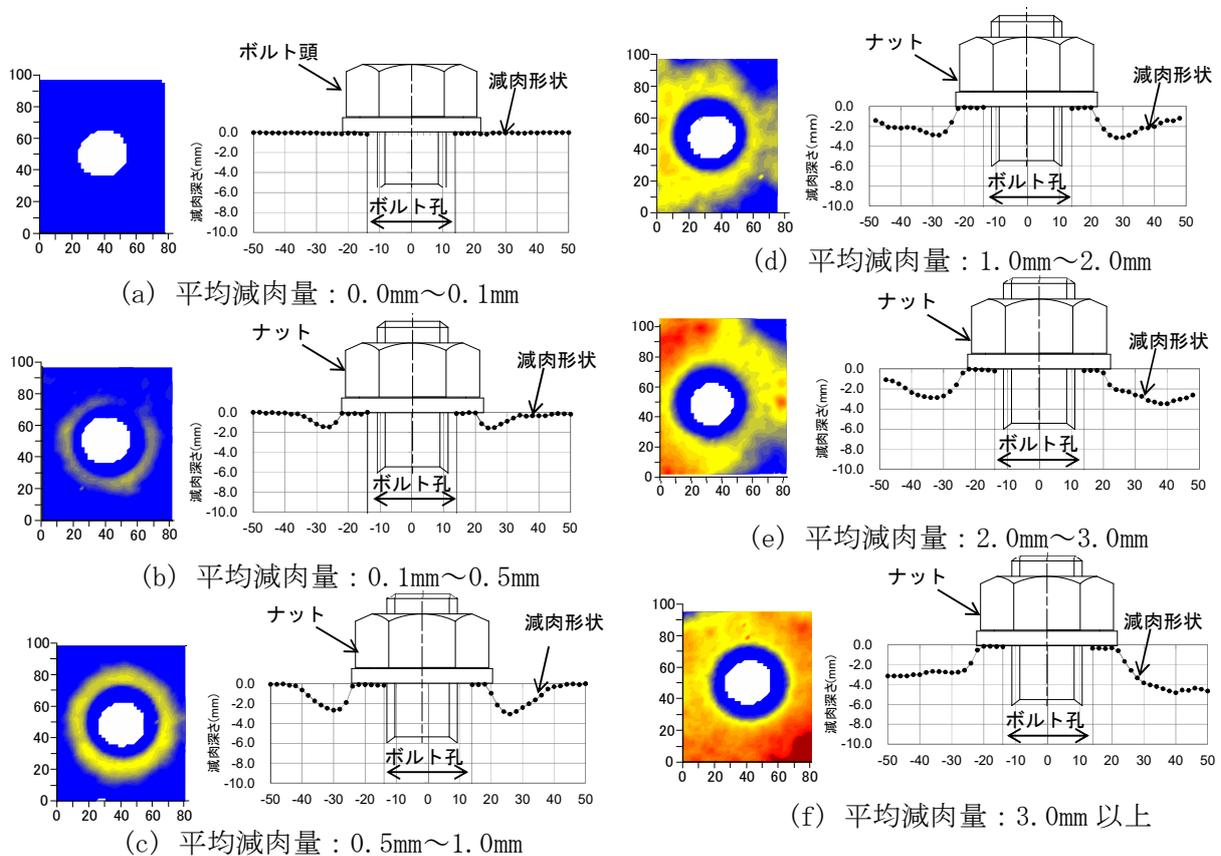


図-12 連結板の減肉進展

b) 腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力評価法

連結板が腐食減肉したときのすべり耐力への影響は、文献 13)14) で実験的に検証されており、すべり試験で得られた腐食連結板の降伏性状ならびに軸力低下の関係から、腐食減肉した連結板の評価指標とすべり耐力の評価法が提案されている。腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は、両面連結板の降伏耐力とすべり耐力の比 $\beta_{cs'}$ から図 13 を用いて評価する手法が提案されている。式-1 に $\beta_{cs'}$ の算出式を示す。 $\beta_{cs'}$ は、図 14(a)に示す腐食評価範囲の平均減肉量を用いて、図 14(b)で求めた両面連結板の腐食換算断面積 A_{cB} に降伏強度を乗じた換算降伏耐力と基準すべり耐力との比として算出する。なお、基準すべり耐力とは連結板の減肉が無い状態での継手のすべり耐力で、実際の診断時には設計すべり耐力を用いることを想定している。

$$\beta_{cs'} = P_b / F_{cyB} \quad \text{(式-1)}$$

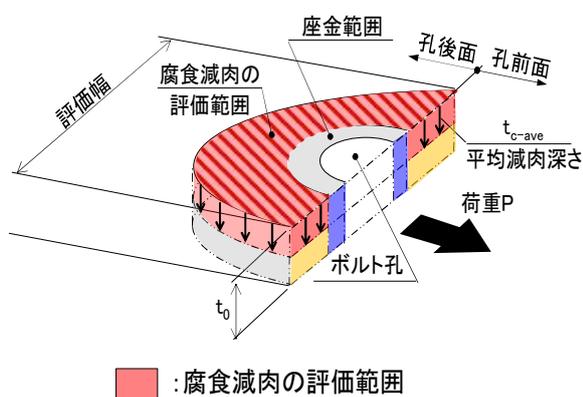
ここで、

P_b : 基準すべり耐力 (kN) / F_{cyB} : 両面連結板の換算降伏耐力 (kN)

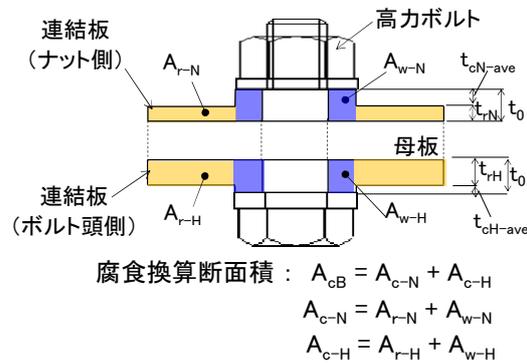
$$[F_{cyB} = A_{cB} \times \sigma_y = (A_{c-N} + A_{c-H}) \times \sigma_y]$$

A_{cB} : 両面連結板の腐食換算断面積 (mm²) / A_{c-N} : ナット側の腐食換算断面積 (mm²)

A_{c-H} : ボルト頭側の腐食換算断面積 (mm²) / σ_y : 降伏強度 (N/mm²)



(a) 腐食減肉の評価範囲



腐食換算断面積 : $A_{cB} = A_{c-N} + A_{c-H}$
 $A_{c-N} = A_{r-N} + A_{w-N}$
 $A_{c-H} = A_{r-H} + A_{w-H}$

A_w : 座金直下断面積 (mm²), A_r : 残存換算断面積 (mm²)
 t_{c-ave} : 平均減肉深さ (mm), t_0 : 健全時の板厚 (mm), t_r : 換算残存板厚 (mm)
 注) マークのNはナット側, Hはボルト頭側を表している。

図-14 腐食換算断面積 (b) 腐食換算断面積の算出式

なお、連結板が腐食減肉したときのすべり耐力低下メカニズム¹⁵⁾は、連結板の降伏性状と軸力低下の関係から、腐食の進展により異なる腐食減肉形状の連結板を有する高力ボルト摩擦接合の軸力低下は、接触面における孔後面側の塑性域の拡がりにより連結板が圧縮変形し、それに伴って高力ボルトの軸長も短くなることが要因と考えられる。

実橋の診断では、式-1 で算出した $\beta_{cs'}$ から図-13 を用いて腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下率 S_r を算出し、健全時のすべり耐力に S_r を乗じることで保有すべり耐力を算出する。その保有すべり耐力と継手の作用力と比較して連結板の取替や補修・補強を判断することになる。式-2 に腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の保有すべり耐力の算出式を示す。なお、母板と連結板の接合面は、錆の発生に伴いすべり係数が増加することが知られており、すべり耐力低下への影響は少ないと考えられることから、式-2 で用いるすべり係数は、設計値を用いることを考えている。また、腐食した高力ボルトについては、新材ボルトと取替えを考えているため、ここで用いる高力ボルト軸力は設計軸力を用いる。

$$P_{ac} = S_r \times \mu \times N \times m \times n / \nu \quad \text{式-2}$$

ここで、

P_{ac} : 保有すべり耐力 (kN) / S_r : すべり耐力低下率 / μ : すべり係数 / m : 摩擦面数
 n : ボルト本数 / ν : 安全率

c) 今後の課題

腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の診断法について概説したが、前項に示したすべり耐力評価を実際の診断に用いる際は、錆の除去後に腐食減肉形状を計測し、設計計算を行う必要があるため多くの手間を要することになる。このため、現場での減肉形状の計測技術の開発や簡易的なすべり耐力評価法を構築することが今後の課題である。また、前項で示した診断手法は、あくまですべり耐力に対するの評価でありすべり後の耐力や連結板の破壊性状は考えていない。このため、腐食減肉した連結板の引張試験により、すべり後の連結板の破壊性状を明らかにした上で、連結板の診断法を構築していく必要があると考えている。なお、高力ボルト摩擦接合継手では、連結板境界部の母板の減肉の継手耐力への影響について検討する必要がある、この部位に対する診断法の構築も求められる。また、高力ボルト、連結板、母板の腐食減肉の連成を考えた継手耐力の評価も必要と考えている。

4. 疲労診断と措置

鋼橋の主部材に発生する疲労き裂は、一般的に①蓄積期、②進展期、③加速期となる特性があり、加速後には最悪脆性破壊に至る場合もある。よって、進展性の疲労き裂は維持管理上注意を要する。一方、2次部材に発生する疲労き裂は、発生要因が変位誘起であったり、き裂発生部位が圧縮振幅域にあった場合などは、①蓄積期の後、進展の遅い②進展期となる場合もある。その後③停留期となる事例も蓄積してきており、そのようなき裂の診断は点検のみの措置が望ましいと考えられる。しかしながら、上述の特性の疲労き裂は、どのような状態であれば点検のみの措置でよいのかが十分明確になっていない。それを解明することは今後の鋼橋の安全性の持続性と適切な維持管理上、重要であると考えており、診断技術としてはき裂の進行性と、き裂が進展した場合の構造の冗長性を明確にしなければならない。その進行性や冗長性を診断指標として構築するためには、既往研究の知見の整理と実橋でのモニタリングなどの事例収集が必要となる。ここで、冗長性は損傷を生じた位置が構造的に診て、危険な部位なのかそうでないのかこれまでに研究や設計技術により判定できるが、き裂進展性は実橋での事例研究を積み上げることが重要と考えている。

a) 進展の早い疲労き裂事例

まず、き裂進展・加速した実橋での事例を示し、疲労き裂の怖さを改めて共有する。図-15は、土木学会鋼構造シリーズ19「鋼床版の疲労」¹⁶⁾に掲載されている鋼床版のデッキ貫通型の疲労き裂である。このき裂の怖いのは、き裂起点がデッキとトラフリップ溶接ルート部であるため定期点検で見ることができず、舗装下で進展・加速した後に路面の変状・陥没まで発見されにくいことである。そのき裂の発生要因は車輪载荷による12mm厚の薄いデッキの局所的な曲げ応力であることが知られており、デッキ板厚方向に進展・加速し、デッキ厚12mmの約半分になると、一瞬停留期(図-15のストップホール内の水平方向き裂状態)になる。その後、前輪と後輪通過などの車輪位置の変化によりデッキ貫通方向に進展すると言

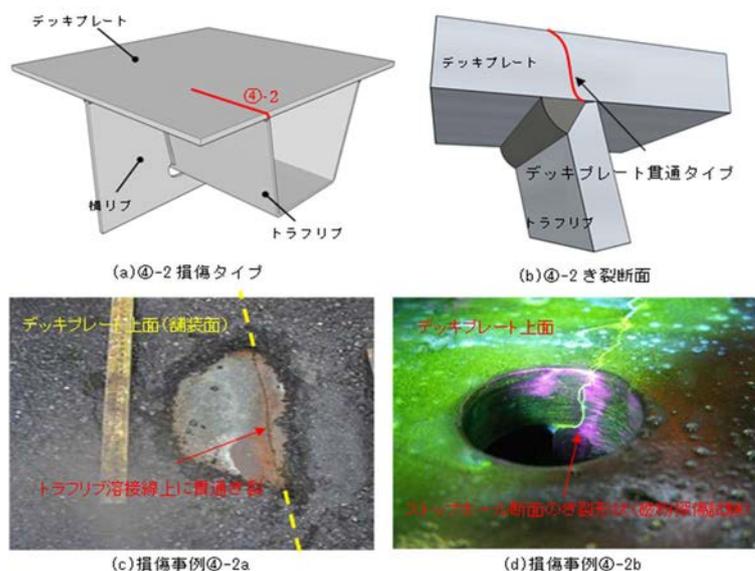


図-15 鋼床版デッキ貫通の進展き裂

われている。なお、これは定点の疲労試験や同じ位置を走行する輪荷重疲労試験では貫通しない特性を有している。デッキ貫通後は橋軸方向に進展し、ある長さまで進展すると橋軸直角方向に曲がり、路面陥没に至る恐ろしいき裂である。現在は、非破壊技術の開発と点検知識の蓄積により、路面陥没に至る前に発見されるようになっており、また、対策としては既設ではデッキの曲げ剛性を向上させる SFRC 舗装などが実施され、新設ではデッキ厚を厚くする設計が行われている。



図-16 に鋼製橋脚隅角部で起きたき裂進展・加速事例を紹介する。このき裂は、横梁ウェブとカバープレートの溶接ルート部を起点とし、き裂進展に伴い応力の卓越するフィレット形状のウェブ板コバへ曲がっていき、その後、ウェブ面と柱フランジ面に進展し、柱部を水平に切断する方向に大きく進展した。原因は、構造部材でないカバープレートの溶接状態である。また、カバープレートは景観に配慮して曲線となっており、さらに横梁断面を横梁先端から柱部に向かって断面を絞る形状となっているため、カバープレートは台形の鋼板である。そのためカバープレートを設置した際には、フィレット形状のウェブとはギャップのある溶接とならざるを得ない。発生したき裂が応力の高いフィレット部に進展後は、柱母材とウェブ母材へ進展しており危険な状態であった。緊急応急対策としてストップホールとベント設置、その後、当て板補強を行っている。

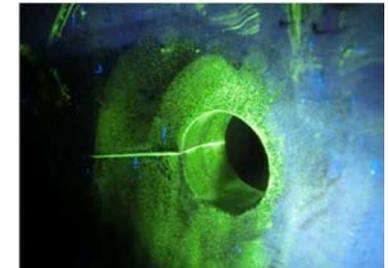


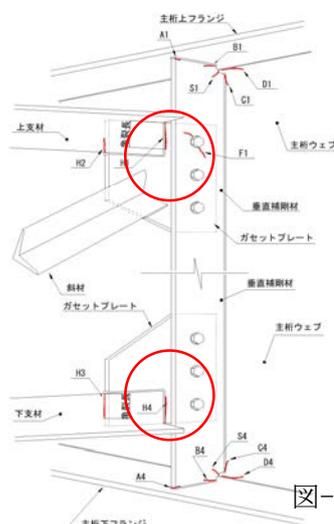
図-16 鋼製橋脚カバープレートの進展き裂

b) 進展のおそいき裂の事例

主桁-横桁取り合い部の疲労き裂は、床版のたわみの影響が大きいと考えられ、建設年次により発生状況・進展速度は異なる。新しい路線ほど、損傷の発生数や進展速度は遅く、古い路線でも縦桁増設などが行われたことにより、損傷の新規発生や進展速度は抑制されていると考えられる。

2000年～2022年の定期点検にて発見されているき裂データについて、床版補強工事を実施していない路線の対傾構ガセットのき裂を対象に分析した。図-17 に発生数の多いき裂タイプである H4 (184個)、H1 (81個) に関して、き裂進展の発生比率を示す。対傾構部材のき裂進展比率は低く、対傾構ガセット下側 (H4) で 26.1%、ガセット上側 (H1) で 11.1%であった。進展が確認された、63 データに対し、経過年数と進展長さを用いて、進展速度 (mm/年) を算出した結果、ほぼ全数で 5 mm/年であった。しかしながら、H4 (対傾構下側) のき裂では 20 mm/年も数個あった。

この進展性を踏まえて、対傾構のような二次部材のき裂については、点検のみの措置で対応できると思われるが、更なるデータの蓄積と分析が必要となる。



損傷部位	進展あり	進展なし	総計	進展発生比率(%)
対傾構下支材 H4	48	136	184	26.1%
対傾構上支材 H1	9	72	81	11.1%
端対傾構上支材 H7	6	173	179	3.4%
対傾構下支材 H7		16	16	0.0%
端対傾構下支材 H4		11	11	0.0%
端対傾構下支材 H6		10	10	0.0%

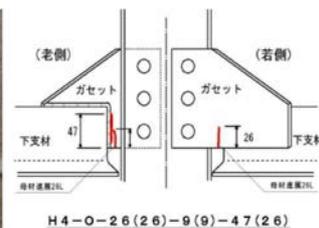


図-17 主桁-横桁取り合い部の疲労き裂の進展性

5. あとがき

鋼橋の腐食と疲労に対する診断技術の確立のためには、橋梁を管理している技術者と大学などの研究者が連携することが不可欠となる。また、研究成果の論文投稿や学会発表での公開し、課題の共有化を図る環境づくりも必要と思われる。なお、本文は主に日本鋼構造協会「鋼橋の腐食耐久性・維持管理技術の高度化」の研究部会での成果、および土木学会鋼構造委員会診断小委員会の中間成果をベースに概説した。詳細は参考文献を参照されたい。

参考文献

- 1) 長坂康史, 下里哲弘, 田井政行, 玉城喜章, 日和裕介(2019): 3DCG による可視化技術を利用した鋼橋の腐食点検学習システムの開発, Vol.75 No.1, pp.35-47., 2019
- 2) 日本鋼構造協会: 鋼橋の腐食耐久性・維持管理技術, テクニカルレポート No.116, 2018
- 3) 下里哲弘, 日和裕介, 有住康則, 山城慶: さび鋼板面に対するコールドスプレー法の防食皮膜形成に関する実験的研究, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第 22 卷(第 85 号), pp.133-141, 2015
- 4) 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部監修: 沖縄地区鋼橋防食マニュアル, 2019
- 5) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, 2014.
- 6) 日本鋼構造協会: 鋼橋の腐食耐久性・維持管理技術の高度化, テクニカルレポート No.121, 2020.
- 7) 阿久津絢子, 佐々木栄一, 田井政行, 下里哲弘: 渦電流計測に基づく高力ボルト残存軸力評価手法の構築, 土木学会論文集 A1, Vol.78, No.2, pp.231-242, 2022.
- 8) 下里哲弘, 田井政行, 長嶺由智, 有住康則, 矢吹哲哉: 実腐食減肉形状を有する摩擦接合用六角高力ボルトの残存軸力特性、構造工学論文集、vol.62A, pp503-513, 2016.3
- 9) 日本道路協会: 道路橋補修・補強事例集, 丸善, 2012
- 10) 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, 丸善, 2014
- 11) 菊地勇氣, 染谷厚徳, 増井隆: 鋼桁添接部腐食損傷の補修設計, 第 66 回土木学会年次学術講演会, IV-140, pp.279-280, 2011
- 12) 川村弘昌, 竹内正一, 鮫島力, 西谷朋晃: バイパス工法による連結板取替手法, 鋼構造年次論文報告集, vol.24, pp.383-390, 2016
- 13) 山下修平, 下里哲弘, 田井政行, 有住康則, 矢吹哲哉: 高力ボルト摩擦接合継手における連結板の腐食減肉形状とすべり耐力特性に関する研究, 土木学会論文集 A1, vol.74 No.3, pp.359-375, 2018
- 14) 下里哲弘, 山下修平: 両面減肉した連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力特性に関する実験的検証, 構造工学論文集, 68A, pp.458-467, 2022
- 15) 山下修平, 下里哲弘, 田井政行, 大城泰樹: 腐食減肉した連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下メカニズムに関する解析的研究, 構造工学論文集, 66A, pp.486-496, 2020
- 16) 土木学会鋼構造シリーズ 19 「鋼床版の疲労」, 2010.