

既設道路橋における鋼部材の腐食と技術開発

村越 潤・田中良樹・高橋 実

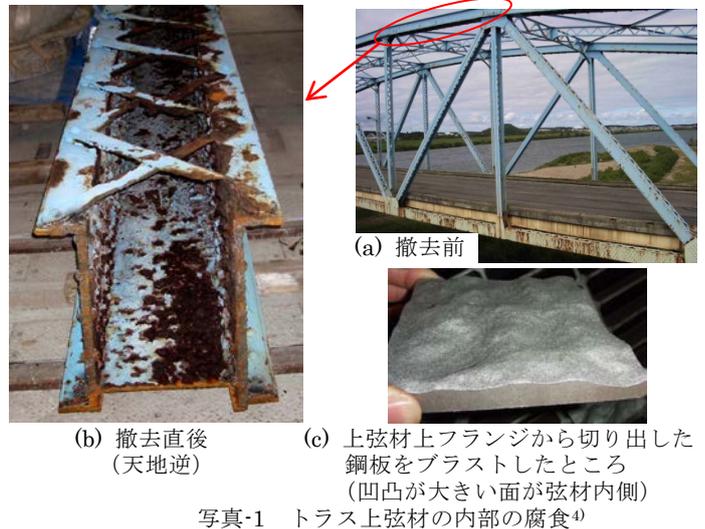
1. はじめに

鋼部材の腐食は、既設道路橋における主たる劣化・損傷であり、腐食への対処が橋の健全性を確保し適切に維持管理していく上で重要な課題となっている。例えば、過去の鋼道路橋の架替え理由の調査結果によれば、構造的理由による架替え理由の半数は、鋼材の腐食であることが報告されている¹⁾。このため、これまでもLCC低減の観点から重防食塗装系を基本とした防食設計の導入など、鋼道路橋防食便覧等^{2),3)}基準類を通じて防食技術の普及が図られている。一方、断面欠損を伴うような著しい腐食が生じてしまった鋼部材に対する適切な性能評価や補修・補強については、多くの課題があり、さまざまな技術開発が必要である。本文では、道路橋の寿命にも影響を及ぼし得る鋼部材の腐食について、主として鋼橋の構造への影響に着目して腐食劣化の現状と課題を示すとともに、土木研究所構造物メンテナンス研究センター（CAESAR）の取組みを報告する。

2. 既設橋鋼部材の腐食劣化の現状と課題

2.1 腐食劣化の現状

写真-1は、日本海から3kmの地点に架かっていたトラス橋であり、供用停止後の約15年を含めて長期にわたり塗替えられずに置かれていたことから、弦材や床組に著しい腐食が見られた⁴⁾。そのうち、写真-1は、上弦材の内部の腐食状況を示す。海岸線ほどではないが、飛来塩分量が比較的多く、腐食環境は厳しい箇所であった。開断面の弦材は、内側に付着した塩分が雨で洗われることがない。また、塗装塗替えの際、プレーシングがあるために、供用下で十分な素地調整や塗替えが容易でなかったと推察される。これらのことから、雨で洗われることによって断面欠損がほとんど見られなかった上面とは対照的に、裏面は同写真(b)、(c)に示すように、深さ約5mmのクレーターが密集するような、腐食による断面欠損が見られた。多量の塩化物が介在する場合に見られる典型的な鋼部材の腐食である。



スパイクタイヤが禁止された1990年代半ば以降、一般道においても凍結防止剤の散布量が急増した⁵⁾。そうした路線では、凍結防止剤の散布量と、それに由来する塩化物を含む路面の塩水の防水・排水への配慮の程度が、鋼部材の腐食に大きな影響を及ぼすようになってきている。

鋼橋の桁端部は湿気がこもり易く、伸縮装置からの漏水や土砂等の堆積があると、腐食しやすい環境に置かれる³⁾。特に、凍結防止剤の散布によって、漏水や堆積土中に塩分が含まれると、鋼板に孔が開くほどに著しい腐食が生じることがある。写真-2は、内陸部にかかる橋で、凍結防止剤が散布される路線である。鋼桁端部で、地震の際に水平変位に伴う鋼材の破断や座屈が生じて、路面に段差が生じた。下フランジやウェブの破断面の一部は、既に年数を経過したと考えられる腐食が見られたことから、地震の前から著しい腐食で断面欠損が生じていたと考えられる⁴⁾。



写真-3 歩車道境界付近の床版からの漏水による鋼桁側面の著しい腐食（右上：下フランジ端部上面）



写真-4 歩道部床版コンクリート中に埋め込まれたトラス斜材の腐食と破断（右上：はつり前の状況）

写真-3に示す橋では、日本海から直線で17km（山間を跨ぐ）の位置にあることから、飛来塩分量は軽微であったが、比較的多量の凍結防止剤が使用されていた。路面の性状や桁の腐食状況などから、路面の塩水が歩車道境界付近の地覆と舗装の目地などから浸入して、床版下面に通じて箱桁側面を流下したものと推察される。橋全長にわたって歩車道境界のほぼ直下にウェブが位置していたため、橋全長にわたってウェブやウェブと下フランジの境界付近に著しい腐食が見られた。

写真-4は、歩道部のコンクリート床版に埋め込まれたトラス斜材が、コンクリート中で著しく腐食していた事例である。他のトラス橋で同様の部位の腐食による破断が見られたことから、コンクリートをはつって調査した際に斜材が破断してしまった。この橋は、日本海沿岸部に位置して飛来塩分量が多いとともに、凍結防止剤の散布も比較的多く、厳しい腐食環境に置かれていた。主部材であるにもかかわらず、斜材がコンクリートで覆われていたため、直接目視で確認できない部位で、腐食が進行していた事例である。

2.2 腐食劣化に対する主な課題

(1) 腐食が構造性能に及ぼす影響評価

写真-1に例示したように、著しい腐食が生じた鋼材は、表面の凹凸が大きいため、腐食してしまった鋼部材の残存性能を把握する際にさまざまな支障が生じる。構造的な評価をする上で、まず、部材の断面欠損の状況を把握する必要があるが、厚いさび層で覆われていて、かつ大きな凹凸のある素地の断面積を、現地で効率よくかつ精度よく把握するのは容

易でない。また、不均質な表面形状は、応力集中が生じたり、部材の伸び性能を低下させたりするため、座屈に及ぼす影響も含めて、部材の強度特性を予測することが難しい。

写真-5に、桁端部の腐食による著しい断面欠損が見られた事例を示す⁶⁾。ウェブに孔が開いた場合、この部位の断面欠損が構造性能に及ぼす影響は必ずしも明確でない。設計段階では健全な鋼材を前提として、各種作用に対して強度照査や構造詳細等の規定を満たすように設計されるが、断面欠損が橋の構造性能に及ぼす影響は、要求性能に立ち戻って検討する必要がある。別の事例では、類似の断面欠損に対する当て板補強として、ウェブのみに当て板が施された。ウェブの断面欠損は覆われているが、ウェブとフランジの連続性は失われたままであり、かつ母材との隙間が見られた。このような当て板は補強とは言い難く、本来この部位に求められる要求性能が、十分に理解されていないことが一因であると考えられる。既往の事例を踏まえて、起こり得る腐食による断面欠損を想定し、既設橋の補修・補強の観点から本来求められる性能を整理して明示する必要がある。

(2) 腐食鋼材の補強技術

写真-4のように部材の一部が局所的に著しく腐食した場合は、欠損部分の力の伝達や強度低下を補うために、一般に、その部分を挟む形で健全な部分に当て板を高力ボルトで固定する方法がとられている。

しかし、写真-1や写真-5のように、周囲もある程度腐食して鋼材の表面形状が不均質で、適切に摩擦接合できない場合には、図-1のように、エポキシ系樹脂のパテで不陸を修正した上で、当て板補強が施されることがある。そのパテは、接着剤としての性能を有することから、実質はボルト接着併用の当て板あるいは継手となる。ボルト接着継手は、外見上は高力ボルト摩擦接合継手のようであるが、むしろ接着継手に近い挙動を示す⁷⁾。このことから、当て板



写真-5 鋼橋桁端部の腐食による著しい断面欠損事例⁶⁾

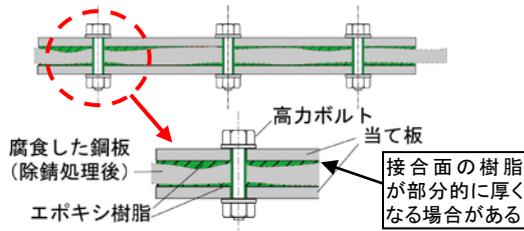


図-1 腐食鋼板の当て板補強 (模式図)⁷⁾

補強する場合に、ボルト接着併用としての挙動を考慮した設計を行う必要がある。また、ボルト孔付近で、凹凸のためにパテが厚くなると、クリープの影響による軸力低下や当て板の局部変形を避けるために、導入軸力を抑制するなどの配慮が必要である⁸⁾。
 (3) 凍結防止剤散布に対する配慮

写真-2～5に示したとおり、凍結防止剤の影響は、桁端部だけでなく、床版からの漏水によって広範囲にわたる主部材の腐食をもたらす可能性がある。また、排水管の損傷や流末水の飛散などによっても鋼部材の腐食を引き起こす場合がある。

これらの腐食については、凍結防止剤散布に由来する塩水が流下する際に、塩水が構造物にできるだけ触れないように、防水や排水に配慮することで、劣化を未然に防ぐことができると考えられる。しかし、実橋における防水、排水は必ずしも容易でなく、防水、排水の改善に向けた技術開発が必要である。

3. 土木研究所CAESARの取組み

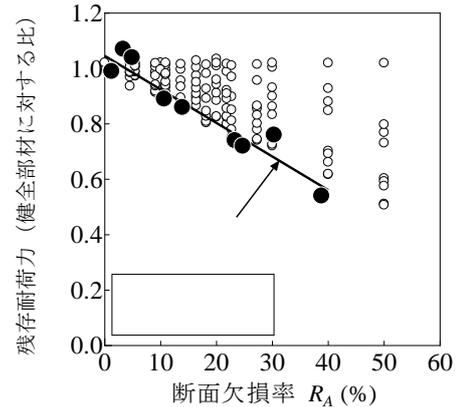
3.1 腐食したトラス部材の耐荷力評価

写真-6のような、構造条件や損傷部材によっては破断等の損傷が橋全体の致命的損傷につながる可能性があるトラス橋を対象として、現地載荷試験、実橋腐食部材の載荷試験や構造解析を行い、部材及び橋全体系の破壊メカニズムや残存耐荷力の評価手法の検討を行っている。

例えば、図-2は、トラス主構部材に関して、腐食による断面欠損量が圧縮耐荷力に及ぼす影響を示したものである⁹⁾。試験では、実橋から切り出した部材に厳しい腐食を想定した模擬腐食を与えたのに対して、解析では、腐食条件（腐食位置、深さ、範囲等）をパラメータとしている。試験結果を見る限りでは、断面欠損率 R_A といった単一の腐食状態の評価指標では耐荷力のばらつきの評価は困難であるが、安全側には耐荷力を概略推定できる可能性がある。実腐食に対して高い精度でより合理的に耐荷力を推定するには、 R_A だけでなく複数の腐食評価指標と耐荷力との関連付けについて、より詳細な実験的・解析的検討による知見の蓄積が必要と考えられる。



写真-6 トラス橋から切り出した格点部試験体の例



$$*R_A = (A_0 - A_{min}) / A_0 \times 100 (\%)$$

A_0 : 健全時断面積 (mm^2)、 A_{min} : 最小断面積 (mm^2)

図-2 断面欠損率と耐荷力の関係

3.2 ボルト接着継手による当て板補強

写真-5の鋼桁端部の腐食による断面欠損に対して、写真-7のとおり応急的な当て板補強の試験施工を行った。この事例では、ウェブの貫通孔だけでなく、下フランジの片側半分がほとんど消失していた。腐食前の桁端部の剛な構造を回復するため⁶⁾、ウェブ、下フランジ及び支点上垂直補剛材それぞれの連結を確実にするように、3面に接する当て板をウェブの両面に設置した。また、当て板箇所は、腐食による凹凸が著しかったことから、当て板との接合面にパテを塗り、1日硬化させた後、高力ボルトと高力クランプで固定した。その当て板補強の前後で、大型車の走行載荷試験及び供用下の24時間計測を行い、断面欠損部の高いひずみが、当て板によって著しく軽減され、その効果が十分に得られることを確認した⁶⁾ (図-3)。



写真-7 断面欠損部の応急的な当て板補強の試験施工⁶⁾

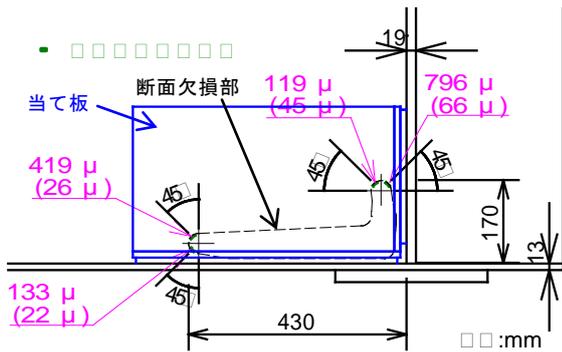


図-3 実橋における断面欠損部のひずみ測定結果
(赤字は20トン荷重車走行時の断面欠損部の最大ひずみ振幅を示す、括弧内は当て板設置後の測定値)

3.3 桁端部の腐食環境改善

鋼橋、コンクリート橋を問わず、道路橋桁端部の腐食環境が厳しい傾向にある。特に、コンクリート橋では、桁端部の遊間の取り合いが狭く、漏水対策、補修・補強ともに対応が一層難しい。漏水が生じると、必ずしも桁端部だけでなく、上部構造の勾配や下部構造の高さに応じて、広範囲に塩害等の劣化が生じる可能性がある。これらのことから、コンクリート橋の桁端部を対象とした漏水対策技術として、図-4に示すような、通行規制なしに側面から遊間内部に設置することができる排水装置の開発に取り組んでいる¹⁰⁾。

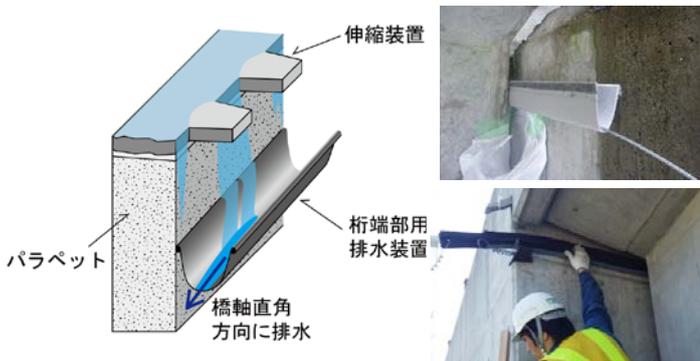


図-4 コンクリート橋桁端部の狭い遊間に設置可能な排水装置の提案、試験施工¹⁰⁾ (右上：ポリエチレン製、右下：ゴム製)

4. おわりに

通行者や橋の安全の確保と、社会資本ストックの有効活用の観点で、腐食してしまった鋼部材を発見した後の適切な対応や、凍結防止剤散布の影響の軽減が重要である。しかし、さまざまな技術的課題が山積している。平成28年度からの新たな研究課題では、損傷程度等に応じた対処方法（優先度、対策内容等）、鋼部材の補修・補強技術の信頼性向上と、床版防水に配慮した橋面舗装の改善に取り組むこととしている。

謝 辞

調査や写真提供にご協力いただいた道路管理者の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 玉越隆史、大久保雅憲、市川明広、武田達也：橋梁の架替に関する調査結果 (IV)、国土技術政策総合研究所資料、第444号、2008.4
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0444.htm>
- 2) 鋼道路橋防食便覧、日本道路協会、2014.3
- 3) 鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、日本道路協会、2010.9
- 4) 村越潤、田中良樹、船木孝仁：鋼橋桁端部の腐食対策に関する研究、土木研究所資料、第4142号、2010.3
<http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D6681.pdf>
- 5) 田中良樹、村越潤、石田雅博、吉田英二：道路橋桁端部の腐食環境調査～橋台、橋脚の調査事例～、土木技術資料、第57巻、第6号、pp.36～41、2015
- 6) 田中良樹、村越潤、飯塚拓英：鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強、土木技術資料、第56巻、第4号、pp.40～45、2014
- 7) 田中良樹、村越潤、飯塚拓英：道路橋の補強に用いるボルト接着継手の設計、土木技術資料、第54巻、第10号、pp.45～46、2012
- 8) 村越潤、田中良樹、船木孝仁：接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究、構造工学論文集、No.54A、pp.563～574、2008.3
- 9) 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、No.59A、pp.143～155、2013.3
- 10) 村越潤、田中良樹、藤田育男、坂根泰、田中健司、植田健介：既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境改善への取り組み、土木技術資料、第55巻、第11号、pp.29～34、2013

村越 潤



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員、現 公立大学法人首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境コース 教授、博士(工学)
Dr.Jun MURAKOSHI

田中良樹



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Yoshiki TANAKA

高橋 実



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Minoru TAKAHASHI