

実環境下で腐食劣化した 高力ボルト摩擦接合継手の腐食性状

Corrosion Characteristics of Friction-type High-strength Bolted Joints Corroded and Degraded under an Actual Environment



山下 修平*¹
Shuhei YAMASHITA



下里 哲弘*²
Tetsuhiro SIMOZATO



田井 政行*³
Masayuki TAI

要 旨

高力ボルト摩擦接合継手は鋼橋において重要な構造部位である。一方、腐食が進行しやすい部位でもある。このため、鋼橋における合理的な維持管理の観点から、高力ボルト摩擦接合継手部の腐食性状を把握することが重要である。本稿では、28年間実腐食環境で曝露された無塗装仕様耐候性鋼橋から高力ボルト摩擦接合継手部を切り出し、高力ボルト、母板、連結板それぞれの腐食性状について調査した結果を示す。

キーワード：高力ボルト摩擦接合継手，実環境下，腐食性状

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は、我が国における鋼橋の接合法として1965年（昭和40年代）以降から一般に広く用いられてきた。一方、高力ボルト摩擦接合継手は、腐食が進行し易い部位としても知られており、これまでも腐食劣化による「塗装の塗替え」「高力ボルトの取替」「連結板の補強や取替え」が多く行われてきた^{1)~4)}。今後、老朽化した鋼橋の割合が急増する我が国において⁵⁾、高力ボルト摩擦接合継手の維持管理の充実性と確実性向上が益々求められる⁶⁾。

高力ボルト摩擦接合継手は、高力ボルト、母板、連結板で構成されている。このため、高力ボルト摩擦接合継手の合理的な維持管理の観点からは、各部材の腐食性状を明らかにし、各々の腐食劣化がすべり耐力へ与える影響を検討する必要がある。また、建設後に不可視部となる摩擦接合面については、腐食劣化がすべり係数へ直接影響を与えると考えられることから、すべり耐力への影響の有無を事前に把握しておくことが重要である。

高力ボルト摩擦接合継手の腐食に関する研究は、これまでにいくつか行われている。橋本ら⁷⁾は人工的に腐食促進させた継手試験片で摩擦接合面の腐食性状を詳細に

調査し、ボルト軸力の影響があるボルト孔付近では腐食が進行し難いことを示している。池田ら⁸⁾は、継手試験片を厳しい腐食環境下にて長期間屋外曝露し、約20年経過した場合でもボルト頭やナットで腐食が進行する一方、ボルト軸部の腐食は殆ど生じない結果を示している。しかし、これらは実験室や暴露場での試験結果であり、実環境下にある鋼橋ではさらに厳しく予想し難い腐食が進行することも考えられる。よって、実環境下で腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継手の腐食性状を把握することが重要である。

そこで本稿では、約28年間厳しい塩害環境下にあり2006年に激しい腐食により崩落に至った鋼橋の高力ボルト摩擦接合継手の腐食性状を調査した結果を示す。調査では、外観目視及びレーザー計測機による腐食減肉形状の計測を行い、高力ボルト摩擦接合継手（高力ボルト、母板、連結板）の腐食性状を検証した。

2. 対象橋梁の概要

(1) 対象橋梁の諸元

本研究で検証した高力ボルト摩擦接合継手部は、写真-1及び図-1に示す鋼プレートガーダー橋より採取した。

*¹ 技術本部設計部生産計画グループ係長

*² 琉球大学工学部教授

*³ 琉球大学工学部助教



写真-1 対象橋梁の全景

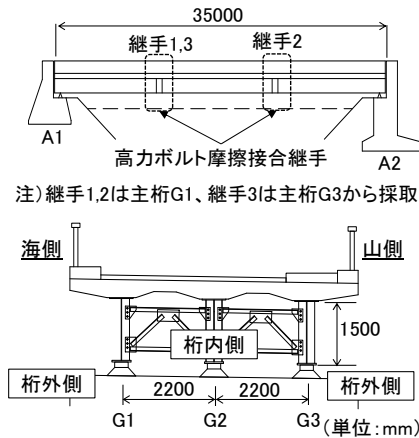


図-1 対象橋梁の側面図・断面図

当該橋梁は、1981年に架設された、橋長35.0m、幅員6.4mの耐候性橋梁である。鋼材は旧JIS表示でSMA50A, SMA50B, SMA41Aの耐候性鋼材であり、建設当時には鍍安定化処理材が施されていた。架橋位置は離岸距離50mの河川上であり、架橋位置から判断しても厳しい腐食環境下であったと言える。当該橋梁は、桁端部の著しい腐食損傷により一部部材が破断し2009年7月に自然崩落した。

(2) 腐食環境

当該橋梁の腐食環境調査として、ドライガーゼ法（JIS Z 2382）による飛来塩分量計測を行った。飛来塩分の捕集は、桁内の下フランジ上面4箇所（100mm×100mm）のガーゼをウェブ面と並行に設置した。また、G2桁の下フランジ下面にも設置し、桁下を流通する飛来塩分を採取した。図-2にドライガーゼの設置状況を示す。なお、計測期間は、2008年12月から2009年6月までの約7か月間である。

計測した飛来塩分量の結果を図-3に示す。図-3は各位置で毎月捕集した飛来塩分量の平均値を示している。図-3における下フランジ上面の飛来塩分量を比較

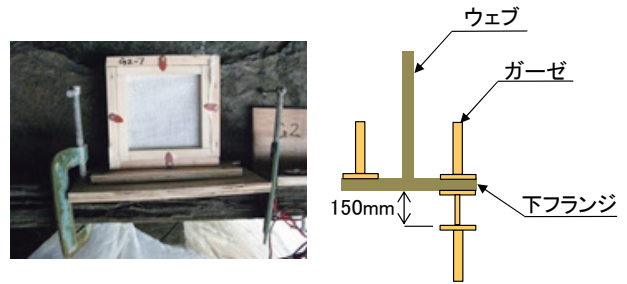


図-2 ドライガーゼの設置状況

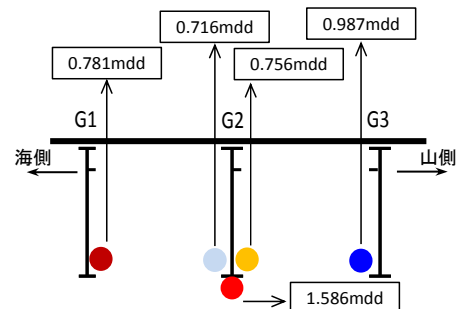


図-3 各位置での飛来塩分量（平均値）

すると、G3桁の海側の飛来塩分量が最も多く0.987mddであった。次に、G1桁の山側が多く0.781mdd、最も少ないのはG2桁の海側で0.716mddであった。このように、同一橋梁でも各主桁位置により飛来塩分量が異なっていることが分かる。また、桁下を流通する飛来塩分量は1.586mddで、耐候性橋梁を採用するための指標である0.05mdd⁶⁾を大きく上回る飛来塩分量であり過酷な腐食環境下にあったと言える。

3. 腐食性状の調査

採取した高力ボルト摩擦接合継手は、片側1行2列の試験片に切断加工したのち、コア抜き法⁹⁾により高力ボルトを撤去して解体した。試験片解体後は、外観目視、鋼材の成分分析、連結板表面の減肉量計測を行った。なお、試験片として供した高力ボルト摩擦接合継手は、図-1に示す主桁G1,G3のウェブ3箇所のシャーププレートである。

(1) 外観目視

1) 高力ボルトの腐食

写真-2及びに写真-3に採取した高力ボルトを示す。写真-2に示す高力ボルト軸部先端は、コア抜き法⁹⁾による高力ボルト撤去時にねじ部を切削している。高力ボルト



写真-2 高力ボルトの腐食状態

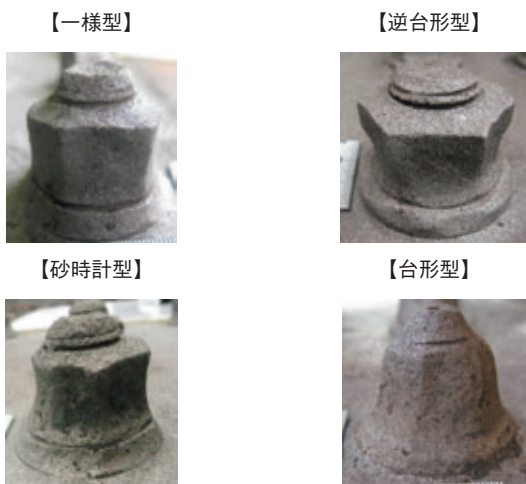


写真-3 ナットの減肉形状

トのボルト頭やナットは、さまざまな減肉形状を示しており、ナットの減肉形状は、写真-3に示す4種類に分類された⁹⁾。一方、写真-2からわかるように高力ボルト軸部は比較的健全で発錆も少なかった。また、座金についても縁端部で腐食減肉が見られる一方、連結板やナットとの接触面は健全で腐食は進行していないことが分かる。高力ボルト軸部ならびに座金の接触面では、高力ボルト軸力による接触圧の影響で空気や水分が遮断されるため腐食が進行し難く、過酷な腐食環境下で約28年経過した後も比較的健全な状態が保たれたものと考えられる。

2) 非接合面の腐食

写真-4に継手試験片の近接写真を示す。継手試験片

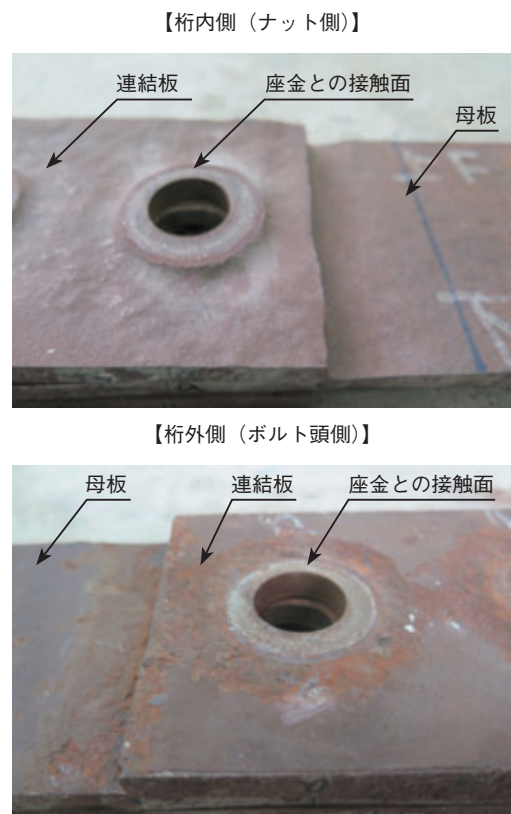


写真-4 非接合面の腐食状態

は、図-1に示す桁内側（ナット側）と桁外側（ボルト頭側）それぞれの試験片を示している。写真から、以下の腐食性状が確認出来る。

- ①桁内側、桁外側ともに、座金と接触していた連結板表面は比較的健全で腐食減肉による凹凸は生じていない。同様に、ボルト孔内も腐食減肉が生じていない。これは、座金との接触面やボルト孔内は、高力ボルト軸力の影響で空気や水分が遮断され腐食が進行し難いためであると考えられる。
- ②桁内側の連結板では腐食減肉による著しい凹凸が生じている。一方、桁外側では座金と接触していた周辺で環状的に腐食減肉が生じているが、ボルト孔から離れた位置では腐食減肉がほとんど生じていない。桁外側は、雨水による洗浄効果で主桁に付着した飛来塩分が洗浄されるため、桁内側と比較して腐食が進行し難く比較的健全な状態であったものと考えられる。
- ③桁内側、桁外側ともに座金周辺や連結板縁端部は腐食減肉により凹凸が生じている。また、母板の連結板との境界部でも腐食が進行しており、凹型の減肉が生じているものもある。座金周辺や母板と連結板の境界部では、主桁に付着した水分の水路となることから、そ



写真一五 摩擦接合面の腐食状態

他の部位と比較して濡れ時間が長くなり腐食減肉が激しくなったものと考えられる。

3) 摩擦接合面の腐食

写真一五に試験片の摩擦接合面を示す。摩擦接合面は、表面と比較して健全で腐食減肉による凹凸は確認出来なかった。また、ボルト孔周辺は点錆びが発生している程度で鋼板の光沢も確認できるほど健全な状態であった。ボルト孔から離れるにつれて錆の発生が見られ、ボルト孔から50mm程度離れた位置では層状錆も確認された。発錆の状態は、ボルト孔を中心として環状的に変化していることが写真からも分かる。ボルト孔近傍では、高力ボルト軸力による接触圧の影響で、連結板と母板が密着され空気や水分が遮断されるため、腐食が進行し難かったものと考えられる。接合面に生じる接触圧は、ボルト孔近傍で最大となりボルト孔から離れるに伴い漸減することが知られている¹⁰⁾。このため、接合面の縁端部では接触圧の影響が小さく、空気や水分の侵入により腐食が進行したものと考えられる。さらに、ボルト孔から離れた位置では、赤錆に混じり黒錆の発生も確認出来る。黒錆は酸素の供給が少ないところで赤錆から変化する¹¹⁾。つまり、既往研究⁷⁾でも示されているように、発生した赤錆の膨張によって接合面内への酸素供給が遮断され、赤錆から黒錆へと変化したものと考えられる。



□ : 試料採取箇所

写真一六 成分分析に用いた試料

表一 成分分析の結果

試料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	V
F10TW (現行基準)	0.20 ~0.25	0.15 ~0.25	0.70 ~0.90	≤0.03	≤0.03	0.60 ~0.80	0.30 ~0.50	0.30 ~0.50	—	—
採取 ボルト①	0.229	0.24	0.78	0.015	0.009	0.72	0.33	0.32	<0.01	<0.01
採取 ボルト②	0.228	0.27	0.83	0.015	0.009	0.71	0.33	0.31	<0.01	<0.01
SMA490 (現行基準)	0.17 以下	0.30 ~0.65	0.80 ~1.25	0.35 以下	0.35 以下	0.45 ~0.65	0.30 ~0.40	0.05 ~0.30	—	0.02 ~0.10
採取母板	0.118	0.43	1.04	0.018	0.005	0.43	0.27	0.1	<0.01	0.05

(2) 成分分析

鋼材成分の経年変化を確認するため、高力ボルトならびに母板から試験片を採取し成分分析を行った。成分分析は、以下に示す分析法と分析機器を用い「日鉄住金防食株式会社」にて実施した。

①Si, Mn, P, Cu, Cr, Ni, Mo, Vの成分分析

分析方法：ICP発光分析法

分析機器：高周波プラズマ発光装置

機器名：iCAP6300Duo

(サーモフィッシャーサイエンティフィック製)

②C, Sの成分分析

分析方法：赤外線吸収法

分析機器：炭素・硫黄同時分析装置

機器名：CS600 (LECO製)

成分分析に供した試料は、高力ボルト2個、母板2個であり、高力ボルトは軸先端部から母板は非接合面部から採取した。写真一六に成分分析に供した試料を示す。

表一に成分分析結果を示す。表には、現在JISで定められている高力ボルトと耐候性鋼板 (SMA490) の各成分の規格も併せて示す。成分分析の結果、高力ボルトならびに鋼板ともに現況の成分規格をほぼ満足している。つまり、経年劣化ならびに腐食が鋼材成分へ与える影響

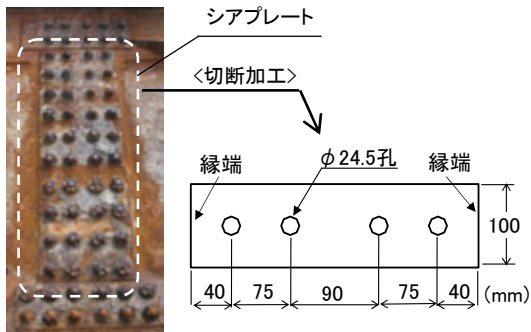


図-4 連結板の形状



写真-7 レーザ計測状況

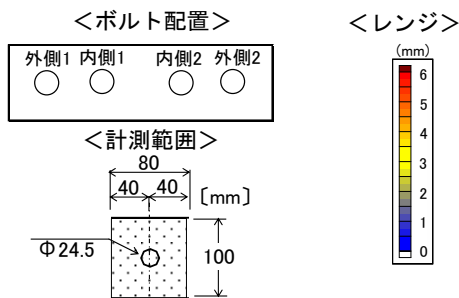
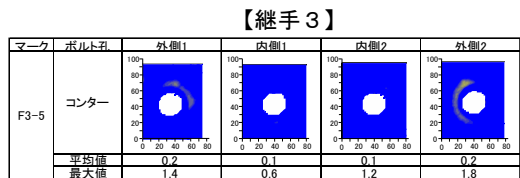
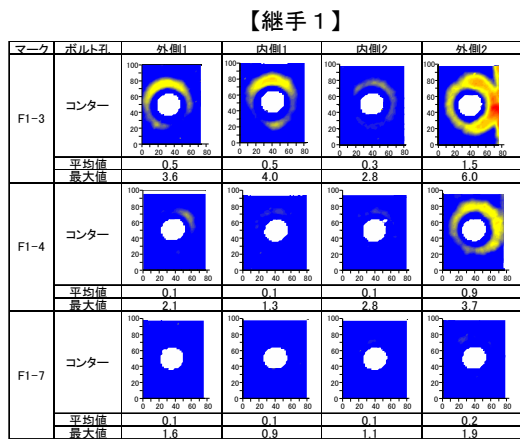
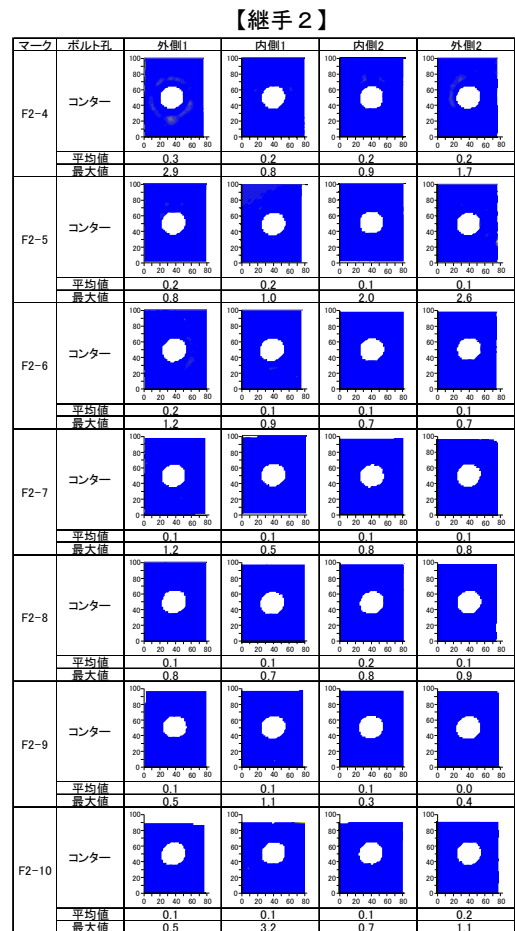


図-5 連結板の腐食減肉状態 (桁外側：ボルト頭側)



は小さいものと考えられる。

(3) 連結板表面の減肉量計測

採取した連結板の錆をブラスト処理にて除去し、CCDレーザー変位計（基準距離80mm、測定範囲±15mm、スポット径70 μ m）を用いて減肉深さの計測を行った。図-4に採取した連結板の形状寸法を示し、写真-7にレーザー変位計での計測状況を示す。計測間隔は文献

12) を参考に2mmピッチとした。先述したように摩擦接合面は点錆び程度で減肉による凹凸が確認されなかったことから、計測は非接合面の連結板表面のみ行った。レーザー計測は4つのボルト孔毎に80mm×100mmの範囲で行い、各ボルト孔周りの減肉深さを求めた。計測したボルト孔は28試験片（ボルト頭側：11試験片、ナット側17試験片）のボルト孔合計112個である。

図-5にボルト頭側、図-6にはナット側における連

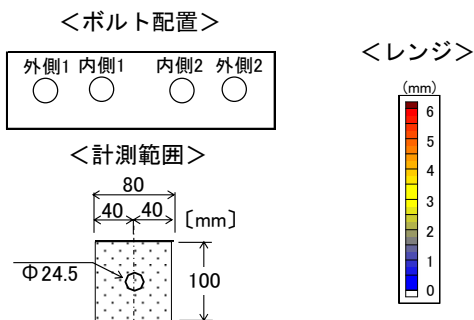
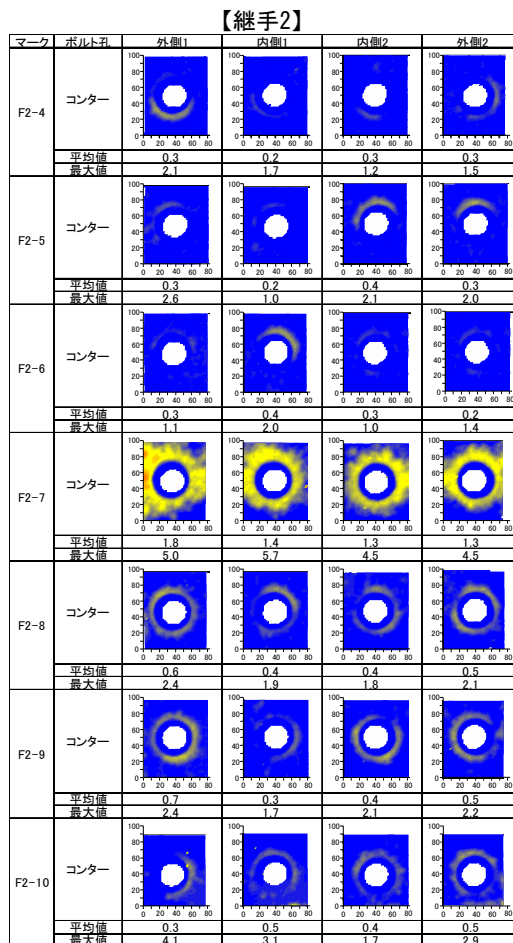
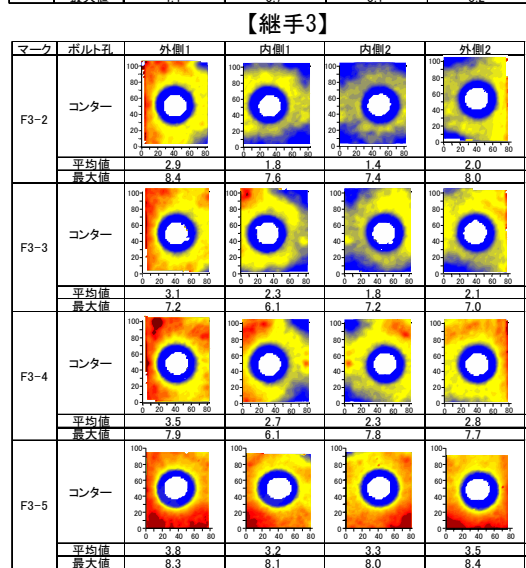
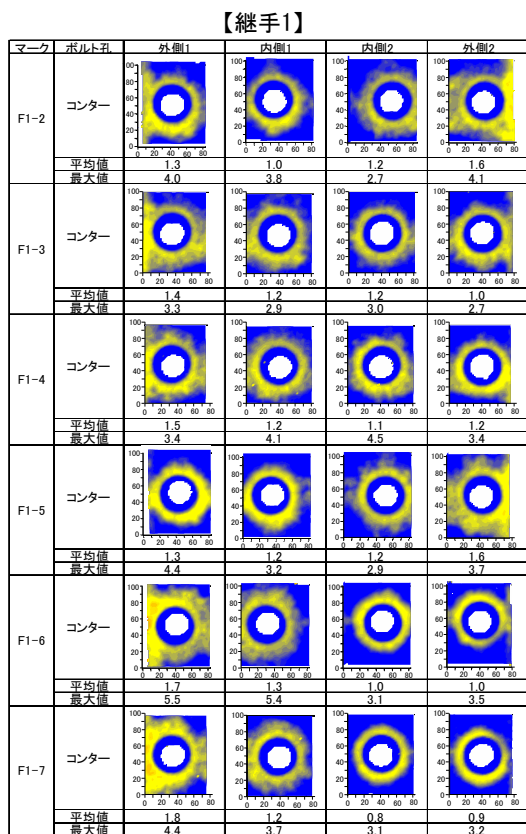


図-6 連結板の腐食減肉状態（桁内側：ナット側）

結板表面のレーザー計測結果を示す。図には計測結果から作成したコンターと減肉量の平均値ならびに最大値を示す。図のマーク「F-O-△」は、「○：継手番号、△：ボルト行数」を示している。つまり、マークF1-3は図-1に示す継手1の上から3行目の試験片であることを示す。なお、ナット側とボルト頭側で同一マークの試験片は、同一継手で表裏の連結板であることを示す。

図-5より、継手1のボルト頭側では、内側ボルト孔

周りの平均減肉量が0.1～0.5mm、外側ボルト孔周りの平均減肉量が0.1～1.5mmで、外側ボルト孔周りの減肉量が大きい傾向が伺える。これは、F1-3,4の外側2ボルトのコンターから分かるように、連結板縁端部では著しい腐食減肉が生じるためであると考えられる。一方、継手2のボルト頭では、継手1と同様に図-1に示す主桁G1から採取したものであるにも関わらず、継手1と比較して腐食減肉の程度が小さい。また、いずれもボルト頭側

は座金と接触していた面での腐食減肉はほとんど生じておらず、座金周辺で環状的に腐食減肉が進行していることが分かる。

図-6よりナット側での減肉量はボルト頭側と比較して腐食減肉が激しいことが分かる。これは、ナット側では雨水による洗浄効果が期待できず、ボルト頭側と比較して腐食環境が厳しいことが要因と考えられる。腐食減肉はボルト頭側と同様に、座金周辺で環状的に進行している。図-6に示す継手3のナット側の腐食減肉がもっとも著しく、平均減肉量は3mm以上で、最大値が8mm（建設時の設計板厚10mm）を超えるものもあった。しかし、いずれの連結板においても座金と接触していた面においては腐食減肉がほとんど生じていないことが分かる。

以上のことから、実環境下で腐食した高力ボルト摩擦接合継手は、同一継手でも表裏の連結板で腐食減肉の程度が異なる。また、同じ主桁でも連結板の位置によって腐食減肉の程度が異なると言える。

4. まとめ

本稿では、過酷な塩害環境下で28年間暴露され激しい腐食減肉が生じた鋼プレートガーダー橋から高力ボルト摩擦接合継手部を採取し、高力ボルト、母板、連結板の腐食性状を調査した結果を示した。以下に、本調査で明らかとなった高力ボルト摩擦接合継手の腐食性状を示す。

- ①採取した高力ボルト摩擦接合継手は、桁外側と比較して桁内側の腐食減肉が激しい傾向が確認された。これは、桁外側では雨水による洗浄効果が期待できるためであると考えられる。
- ②連結板の座金と接触していた面ならびにボルト孔内は腐食が進行し難い。これは、高力ボルト摩擦接合継手の軸力によって腐食促進因子の侵入が遮断されるためであると考えられる。
- ③座金周辺では、環状的に腐食減肉が進行し易い。これは、座金やボルト頭の形状による影響で滞水が生じやすいためであると考えられる。
- ④28年経過した高力ボルト摩擦接合継手の接合面は、連結板表面と比較して健全で腐食減肉による凹凸はほとんど無かった。特にボルト孔周辺ではほとんど発錆は見られず、ボルト孔から離れるにしたがって錆の発生が見られた。
- ⑤高力ボルトのボルト頭ならびにナットは腐食減肉が激しい。一方、高力ボルト軸部は比較的健全で発錆も少

なかった。これは、座金との接触面や摩擦接合同様に高力ボルト軸力による影響と考えられる。

- ⑥実環境下では、同一継手でも表裏の連結板で腐食減肉の程度が異なる。また、同じ主桁でも連結板の位置によって腐食減肉の程度が異なる。
- ⑦28年経過した鋼材の成分分析を行った結果、現況の成分規格を概ね満足していた。よって、腐食劣化が鋼材成分へ与える影響は小さいものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：道路補修・補強事例集，丸善，2012.
- 2) 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.
- 3) 菊地勇氣，染谷厚德，増井隆：鋼桁添接部腐食損傷の補修設計，土木学会第66回年次学術講演会概要集，IV -140，pp.279-280，2011.
- 4) 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.
- 5) 国土技術政策総合研究所資料：平成25年度道路構造物に関する基本データ集，No.822，2015.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，2017.
- 7) 橋本国太郎，築地貴裕，杉浦邦征：腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継手の残存耐力に関する研究，土木学会論文集A1，vol.69 No.2，pp.159-173，2013.
- 8) 池田秀継，畑中清：耐力点締付法に用いる摩擦接合用高力ボルトの暴露試験報告，鋼構造論文集，第21巻 第84号，pp.1-7，2014.
- 9) 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高力六角ボルトの残存軸力特性，構造工学論文集，vol.62A，pp.503-513，2016.
- 10) 日本鋼構造協会：高力ボルト接合技術の現状と課題，JSSCテクニカルレポート，No.96，pp.69-78，2013.
- 11) 藤井哲雄：初歩から学ぶ防錆の科学，工業調査会，2001.
- 12) 森猛，橋敦志，野上邦栄，山沢哲也：腐食鋼板の引張・降伏耐力評価法の検討，土木学会論文集A，vol.64 No.1，pp.38-47，2008.

2019.3.22 受付