

皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手の鋼道路橋での適用

阪神高速道路(株) 技術部 技術推進室

青木 康素

阪神高速道路(株) 建設・更新事業本部 大阪建設部設計課

田畑 晶子

阪神高速道路(株) 建設・更新事業本部 神戸建設部

金治 英貞

要 旨

鋼道路橋の部材ボルト接合部では、高力ボルトを用いた摩擦接合が一般的に用いられている。ボルト接合部では塗装塗膜が薄くなりやすく、一般部に比べて塗膜のはがれや腐食が生じやすいことが経験的に知られている。また、鋼床版デッキプレート部でボルト接合する箇所では、ボルト頭がある影響で、舗装の基層厚さが設計厚どおりは確保できず、薄いことでひび割れや流動わだちといった損傷への抵抗性が低下し、舗装構造体としての損傷リスクが高くなっていることがわかっている。さらに、舗装打ち替えでは、バックホウなどで舗装撤去する際に、ボルト頭部に擦過傷を与えることや、稀に頭部を断面欠損させる場合もある。このような問題に対して、ボルト頭が皿型形状の高力ボルトを用いて、連結板の表面の凸部をなくすことで、鋼材としての防食性能の確保、舗装構造の耐久性の確保を図る皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手の開発と現場適用性の検討を実施してきている。今般、「皿型高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工の手引き」が制定されたのを受け、本稿では、皿型高力ボルトの検討概要と設計法とその前提となる製作管理値、施工事例についてまとめている。

キーワード: 皿型高力ボルト, 摩擦接合, 連結, 鋼道路橋

はじめに

鋼道路橋での鋼部材の接合方法として、従前より高力ボルトを用いた摩擦接合が一般的に用いられており、部材どおしの連結のみならず、腐食や疲労による鋼部材の損傷部での当て板補強の接合などでも用いられている。図-1 は鋼箱桁ウェブ部での腐食事例であるが、ボルト頭部で塗装が減耗したことによる鋼材の腐食が生じていることがわかる。このように、塗膜がのりにくい角部が多く存在するため、高力ボルトの頭部やナット部では塗装塗膜が薄くなりやすく、腐食が一般部よりボルト部で先に生じることが知られている。これまで新設橋の塗装仕様は、ボルト連結部は一般部より防食層が厚くなっているにもかかわらず、実

態としては、ボルト頭部やナット部が防食上の弱点となっている。

筆者らは、このような維持管理上の課題に対し、高力ボルト連結部の防食性能の向上を目的として、ボルトの頭が連結板から外に突出しないことで、ボルト頭側での均質な塗膜厚の確保を可能とする、皿型高力ボルト図-2、図-3 を摩擦接合継手で用いる検討を進めてきた。^{1), 2), 3), 4), 5)}

これまで、摩擦接合継手の荷重伝達特性の評価や、構造寸法や製作施工誤差、リラクゼーションなどが継手性能へ及ぼす影響などを評価してきた。^{1), 2), 3), 4), 5)} 本稿では、皿型高力ボルトの摩擦接合について概説し、実際の現場運用に際して作成した設計施工の手引きと、試験的に現場適用した事例について述べる。



図-1 高力ボルト腐食部の例
(鋼箱桁のウェブ部)



図-2 皿型高力ボルト

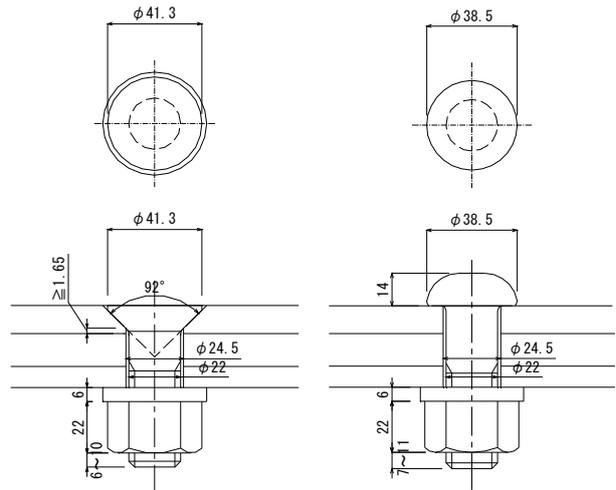


図-3 皿型高力ボルトとトルシア形高力ボルト
(共に M22, 左: 皿型ボルト, 右: トルシア形ボルト)

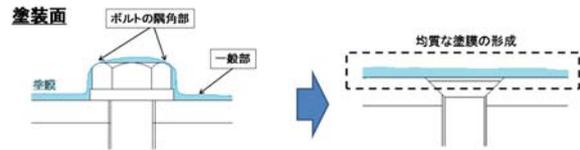


図-4 ボルト頭部の塗膜の均質化と素地調整の品質

1. 皿型高力ボルトの概要

1-1 ボルトの形状

皿型高力ボルトの形状は、図-3 に示すとおり皿頭部の角度 92° を設計値として、 $+3^\circ$ までの許容としている。なお、皿頭角度は 92° であるが、連結板の皿型加工角度は 90° としている。これは既往の研究において軸力導入とすべり強度の安定性を評価し、最適角度を求めた結果⁵⁾を反映している。この場合に、並行部高さを確保するため連結板厚さは 12mm 以上とする必要がある。

1-2 ボルト適用で期待する効果

皿形高力ボルトを適用する効果のイメージを図-4、図-5 に示す。皿型頭であることから、締結後には連結板上で凸部がほぼなくなり、塗装塗膜厚さが均質となる。また、塗装前の素地調整の品質も向上する。これにより、一般部と連結部で塗装仕様を同一とすることも可能である。ただし、ナット側については凸部が残るため、その適用はボルト頭側面の塗装仕様などが想定され、例えば箱型断面部材の外面では、下塗のエポキシ樹脂塗

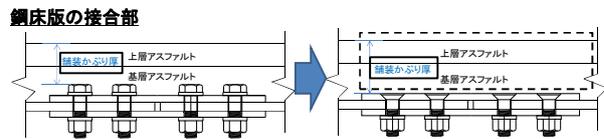


図-5 鋼床版デッキプレート上での舗装厚



図-6 ボルト頭部上の舗装状況
(鋼床版デッキプレート上)

料⁶⁾を $300\mu\text{m}$ (連結部) から $120\mu\text{m}$ (一般部) へ低減できる可能性がでてくる。

皿型高力ボルトを摩擦接合継手で用いる場合のもう一つの利点として、鋼床版デッキプレートの連結部で用いた場合の舗装耐久性向上が挙げられ

る。鋼床版デッキプレート連結部上での実際の舗装断面の例を図-6 に示すが、基本構成が表層 40mm (排水性 As) + 基層 40mm (グース As) であるところ、ボルト頭部では基層が実質 5mm もないことが分かる。皿型高力ボルトを採用することで、連結部上での舗装厚さ 28mm 程度 (連結板 12mm のため) は確保が可能となり、舗装混合物の耐久性向上にも寄与することが挙げられる。将来の舗装補修時においても、デッキプレート面に凸部がなくなることから、バックホウなどによる連結部での舗装撤去が容易になり、作業時間の低減にもつながる。

2. 摩擦接合設計の考え方

皿型高力ボルトは、これまで検討してきた結果を基に、呼び径 M22、強度 F10T 級を用いることを標準としている。実際の現場適用にあたり「皿型高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工の手引き (案)」を社内運用の手引きとして作成した。手引きの主要な部分を、以下のとおり紹介する。

2-1 限界状態 1 のすべり強度の特性値

摩擦接合継手として一軸引張試験を実施した結果¹⁾を図-7 に示す。ここでは、軸方向の母材と連結板の相対変位が 0.2mm に達した状態をすべりと定義し、そのときのすべり係数を実験値より算定している。通常の高力六角ボルトに比して少し小さいが、道路橋示方書 (以下、道示)⁷⁾ の設計で用いる 0.45 より高いすべり強度を有していることがわかる。この差の原因として、図-8 のように、皿型部分の連結板の変形とそれに伴うボルト部の落ち込みによって、軸力が低下することが確認されている²⁾。また、リラクゼーション¹⁾についても計測しており、締付後 30 日経過時点で概ね 8~14% であり、同時に計測した高力六角ボルトと同程度の軸力減少であった。ただし、92 日経過後には皿ボルトの軸力減少率が高力六角ボルトより少し大きかった (最大で 2 割程度)。以上は検討結果の一部であるが、これまで実施

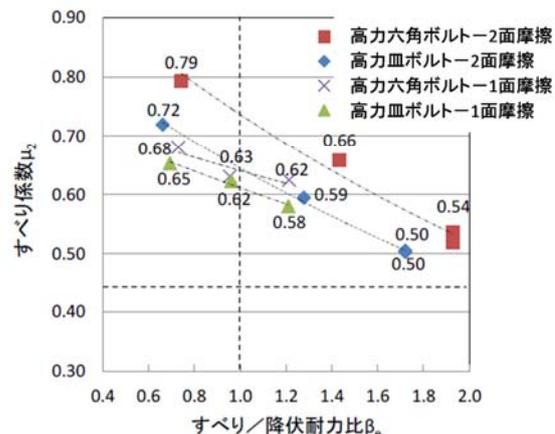


図-7 実験値から求めたすべり係数の例¹⁾
(0.2mm 変位時の軸力で算定、3 体ずつの平均)

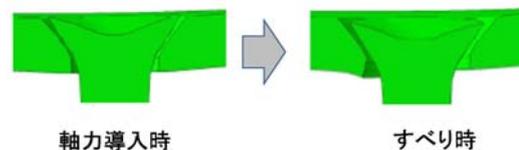


図-8 ボルトの皿頭側での変形

表-1 皿型摩擦接合用高力ボルトの
すべり強度の特性値

ねじの呼び	皿型高力ボルト (kN)
M22	82

※ 1 ボルト 1 摩擦面あたり、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布する場合

してきたボルト軸力導入時と荷重作用時の継手の伝達特性の変化や、母材や連結板の強度や構造寸法、摩擦面数などの各種構造パラメータのすべり強度への影響評価、リラクゼーションといった軸力低下要因についての評価を踏まえ、道示の設計規定に基本的に準拠して設計が可能であると判断した。ただし、限界状態 1 について、すべり強度の特性値をすべり係数を 0.4 として算出することとした。これは、道示での高力六角ボルトやトルシア形高力ボルトを用いた摩擦接合継手で、接合面に無機ジンクリッチペイントを用いる場合にすべり係数を 0.45 としてよい規定があることを念頭に、皿型高力ボルトでは、上記の影響のうち、皿型形状に起因するボルト頭部及び連結板の変形特性による軸力の抜けとボルト軸力のリラクゼー

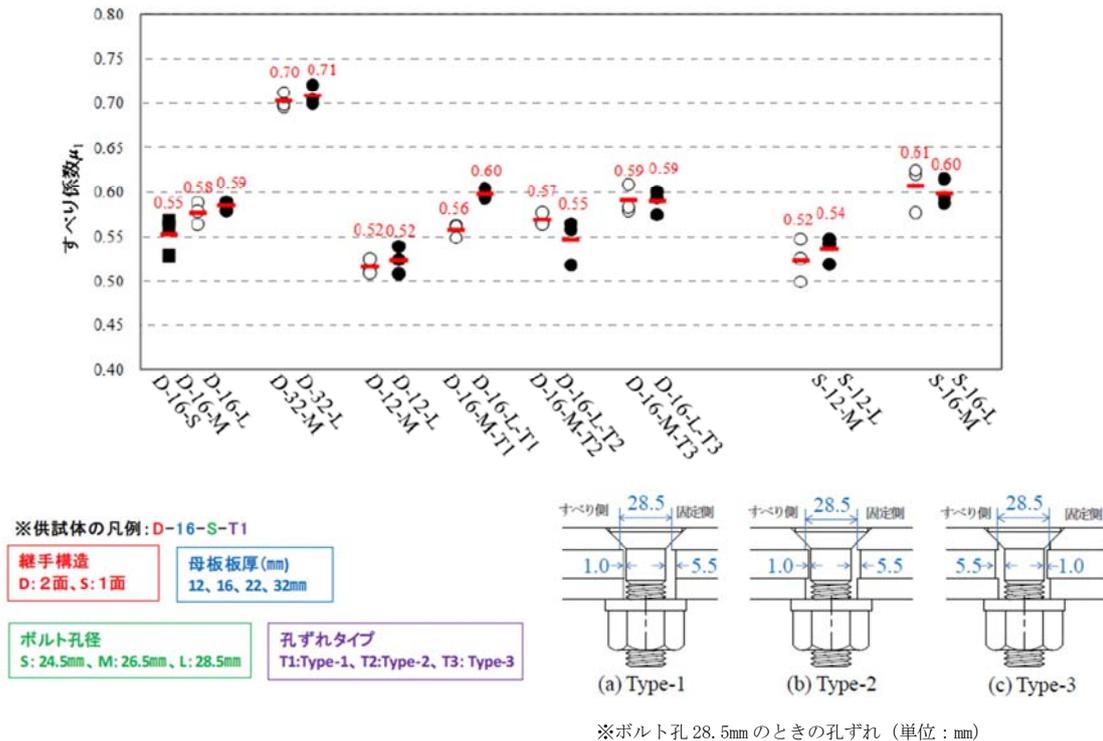


図-9 拡大孔を適用した場合のすべり係数³⁾

シヨンの影響を考慮し、すべり係数 0.4 とすることで、設計上の安全余裕を担保することを考えたものである。すべり強度の特性値を表-1 のとおり算出し、この特性値を用いて道示の限界状態 1 を超えない条件を照査することとしている。

2-2 適用するボルト孔の径

ボルト孔については M22 に対して 24.5mm を標準とし、施工上やむを得ない場合に、母板に拡大孔 26.5mm (呼び径+4.5mm) を用いてよい規定とした。M22 において実験検証した結果の例を図-9 に示すが、すべり強度に対して拡大孔および孔ずれの影響はあまりないことが分かる。実験および FEA での検討³⁾によれば、+6.5mm であってもすべり強度の低下は小さいとの知見はあったものの、限られた実験条件であること、道示での拡大孔の

規定も考慮し、+4.5mm まで許容し、26.5mm までとした。

3. 皿加工部の精度と材料規格

3-1 連結板の製作管理値

連結板ざぐり部の製作方法は一般的に刃先角度 90° のドリルを使うことになっている。しかし、ざぐり部の切削深さによって、皿型高力ボルトの頭部は連結板表面から突出し、または落ち込む可能性がある。実橋での使用に際してはこの影響を確認する必要がある。文献 5) では皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手の連結板ざぐり部の切削深さ h_c に着目し、それがすべり挙動に与える影響を検討している。

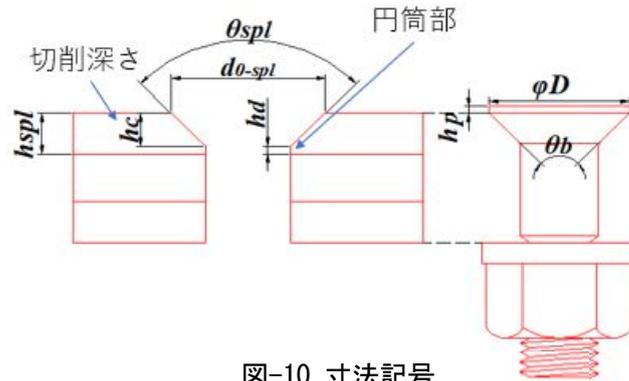


図-10 寸法記号

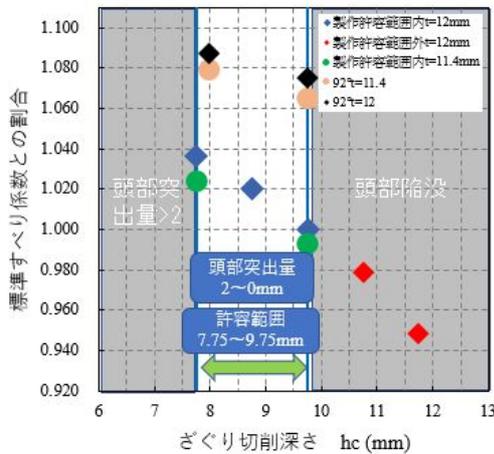


図-11 すべり係数と切削深さの関係

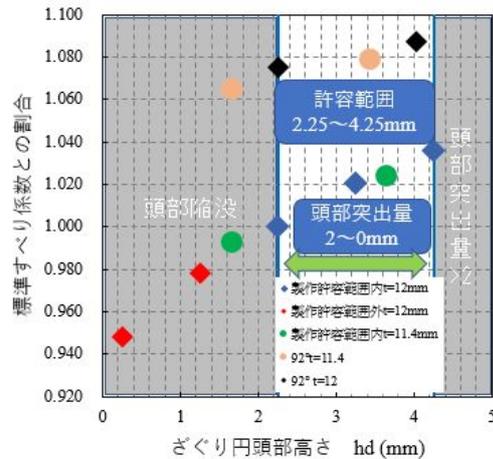


図-12 すべり係数と円頭部高さの関係

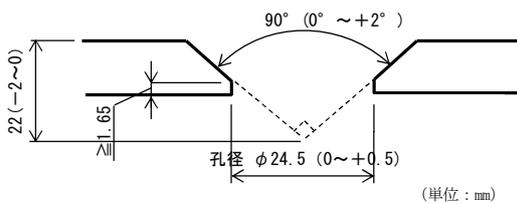


図-13 連結板の皿加工部

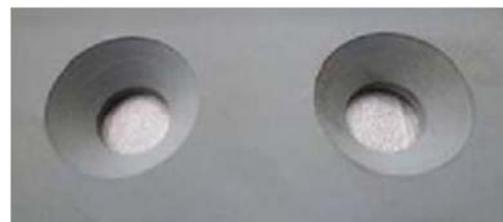


図-14 皿加工後の連結板

FEA では、皿型高力ボルトの頭部開き角度 θ_b を 90° に固定して、連結板ざぐり部の切削深さ h_c を $7.75\text{mm} \sim 11.75\text{mm}$ と変化させている。図-11、図-12 に示すように、ざぐり部の切削深さが大きくなるにつれて、すべり係数は小さくなっている。これはざぐり部の切削深さが大きくなるにつれて、ざぐり部の降伏範囲も相対的に大きくなり、ボルトの落ち込みが大きくなるためと考えられる。逆にざぐり部の切削深さが小さくなるにつれて、す

べり耐力は向上するが、連結板表面からのボルト頭部が突出し、防食耐久性の低下が懸念される。

以上のことから、皿型高力ボルトの頭部開き角度が 90° 、連結板の厚さ h_{spl} が 12mm の場合、頭部突出量を抑え、かつすべり係数の低下を抑えることのできる、 $7.75\text{mm} \sim 9.75\text{mm}$ を切削深さ h_c の管理値とすることが望ましいと言える。

さらに、連結板の板厚公差を考慮した場合の結果も同図に示している。道示⁷⁾で規定される板厚

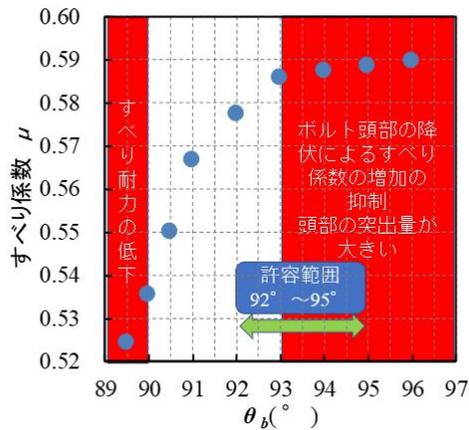


図-15 すべり係数と頭部角度の関係図

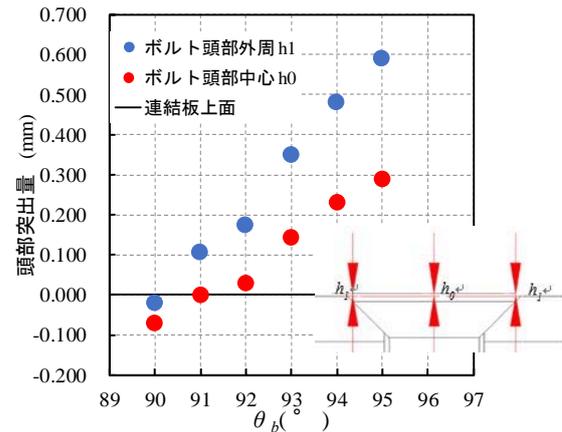


図-16 頭部突出量と頭部角度の関係

の許容差を参考に、(-)側の許容差が公称板厚12mmの5%(11.4mm)を設定した場合(連結板の板厚が0.6mm程度小さくなる場合)、すべり係数の低下は最大で1.1%と小さい。

なお、皿型高力ボルトの頭部開き角度が92°である場合は90°の場合よりもざぐり部の切削深さの影響は小さく、開き角度とざぐり角度を同じとする検討結果が安全側の結果を与えることを確認した。

以上より、皿型高力ボルト頭部の開き角度が90°、連結板の厚さが12mmの場合、ざぐり部の切削深さの目標値は9.75mmとし、製作精度としては-2mm、+0mmを許容し、切削範囲は7.75mm~9.75mmとした(図-13)。

さらには、精度誤差や施工誤差による片当たりやボルトの軸ずれなどのすべり強度への影響を実験と解析で検討⁴⁾し、すべり強度の低下が少ないことを確認し、求める許容差を図-13のように規定した。皿加工後の例を図-14に示す。

3-2 皿型高力ボルトの製作管理値

連結板ざぐり部の開き角度を90°と一定にし、皿型高力ボルトの頭部開き角度を90°から95°まで変化させたすべり試験およびそのFEM解析の結果から、頭部開き角度が大きくなるにつれて軸力低下が抑えられ、すべり係数が向上することが示されている⁵⁾

図-15に示す解析から得られた頭部開き角度とすべり係数の関係から、連結板ざぐり部の開き角度を90°と一定する場合、頭部開き角度によるすべり係数の低下率は90°から89.5°で約2%となり、90°未満となる場合、すべり係数が低下する。また、頭部開き角度が90°より大きい場合、すべり係数の増加率は90°から93°で約9.4%、93°から96°で約0.7%となり、93°になるまでのすべり係数の増加率が大きく、93°以降では増加率は小さくなっている。これは頭部開き角度が93°より大きくなると、締付け時にボルト頭部の塑性変形が発生し、ボルト頭部の落ち込みが大きくなるためと考えられる。

一方、頭部開き角度が大きくなるにつれて、皿型高力ボルトと連結板ざぐり部の接触位置が連結板上面方向に移動することから、ボルト頭部が突出し、塗膜の耐久性低下も懸念される。頭部開き角度を変化させた場合の皿型頭部の突出量の関係を図-16に示している。頭部開き角度が95°の場合の突出量は、頭部外縁で0.6mm程度であり、この角度とした場合でも塗膜厚の確保に与える影響は少ないと考えられる。以上を考慮し、頭部開き角度は92°を基本に0°、+3°を許容値として設定した。

皿型高力ボルトの材料規格については、皿型高力ボルト・六角ナット・平座金のセットについて材料規格を作成しとりまとめた。規定は道路協会



図-17 鋼床版縦シーム部での
皿型高力ボルトの適用例

でのトルシア形高力ボルトの材料規格⁷⁾を参考に、材料メーカーの協力により、製作誤差や製作可能な範囲を確認したうえで作成した。「摩擦接合用皿型高力ボルト (C10T)・六角ナット・平座金のセット」を社内規格として作成した。なお、施工はトルク法による軸力管理となる。

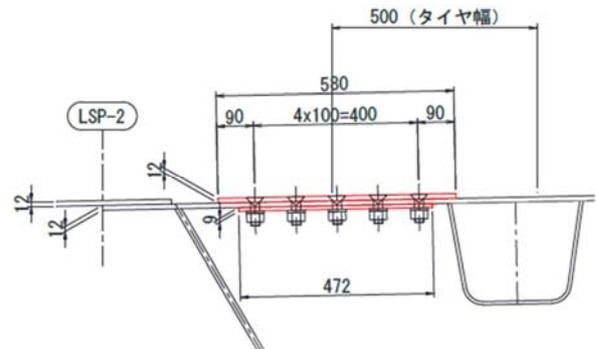
4. 適用の事例

これまでの検討知見を踏まえ、一部現場で試験的な使用を開始している。図-17 に車線増設のための既設鋼床版の拡幅部で新設部材を連結する縦シーム部で皿型高力ボルトを使用した事例を示す。皿頭側の状況からわかるように、連結板上で凸部がない仕上がりになっている。なお、横リブと交差する断面において、下面側からのボルト締めが空間的に困難なことから上面から頭締めするために、高力六角ボルトを用いた箇所が一部あった。

次に、補修の現場での当て板接合に使用した事例を図-18 に示す。これは鋼床版箱桁の上側コーナープレート部で生じたデッキプレートを通するき裂の補修に、当て板を接合した事例である⁸⁾。こちらも当て板上面で凸部がなく施工ができていることがわかる。



(a) 当て板の状況



(b) 当て板補修断面図

図-18 当て板での皿型高力ボルトの適用

おわりに

本稿では、皿型高力ボルトを摩擦接合継手として用いることで、鋼部材の連結部での防食性能の向上と舗装耐久性の向上と舗装打替え時の施工性向上を図る技術について、継手としての構造特性と設計法を中心に一部試験適用の事例も含め述べた。

現在、皿型高力ボルトを用いた場合の塗膜の耐久性評価を屋外暴露により実施している。また、ナット側について塗膜の付着性を向上したナット形状改良を検討し、その場合の塗装塗膜の耐久性評価も進めている。今後、検討結果について機会を得て報告したい。さらに、現状は軸力導入に際しトルク管理を要するボルトであるが、トルシア形皿型高力ボルトについても開発検討を進めたい。

謝辞：本検討にあたり，技術審議会構造技術委員会鋼構造分科会（主査：杉浦邦征京都大学教授）においてご審議頂き，委員各位より貴重なご意見を頂戴した．同分科会委員の山口隆司大阪市立大学教授には，皿型高力ボルトの開発段階から，研究遂行および設計施工法のまとめに至るまで，一貫してご指導頂いた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

- 1) 田畑晶子，金治英貞，黒野佳秀，山口隆司：皿型高力ボルトを用いた摩擦接合の継手特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.159A，pp. 808-819，2013. 3
- 2) 田畑晶子，金治英貞，黒野佳秀，山口隆司：皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手のボルト形状及び継

- 手特性に関する解析的検討，鋼構造論文集，Vol. 20，No. 79，pp. 19-28，2013. 9
- 3) 田畑晶子，黒野佳秀，金治英貞，山口隆司：拡大孔を有する皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 674-685，2014. 3
- 4) 田畑晶子，黒野佳秀，金治英貞，山口隆司：皿型高力ボルト摩擦接合継手の施工誤差に起因する片当たりがすべり耐力及びすべり後耐力に与える影響の検討，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 686-693，2014. 3
- 5) 郎宇，山口隆司，青木康素：皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に影響する構造因子，土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，2018. 8
- 6) （公社）日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014. 3
- 7) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 編鋼橋・鋼部材編，2017. 11
- 8) 田畑晶子，小林寛，仲田晴彦，坂根英樹：連続鋼斜張橋の鋼床版に発生した疲労き裂と補修，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，2017. 9

APPLICATION OF FRICTION GRIP JOINTS WITH HIGH STRENGTH COUNTERSUNK HEAD BOLTS TO STEEL BRIDGES

Yasumoto AOKI, Akiko TABATA and Hidesada KANAJI

This paper reports development of friction grip joints with high strength countersunk head bolts. A convex protruding above the surface of the connecting plate was eliminated by using high strength countersunk head bolts to secure steel corrosion protection performance and pavement durability. Various experimental and analytical studies were carried out for on-site applicability to establish a design method of the friction grip joints with high strength countersunk head bolts. In response to the recent establishment of a guideline for design and construction of friction grip joints with high strength countersunk head bolts, this paper shares technical knowledge about the high strength countersunk head bolts, including research findings and the design method.

青木 康素



阪神高速道路株式会社
技術部 技術推進室

Yasumoto Aoki

田畑 晶子



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
大阪建設部 設計課

Akiko Tabata

金治 英貞



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
神戸建設部

Hidesada Kanaji