

超高力ボルトの鋼道路橋への適用性に関する実験

横井芳輝・水口知樹・玉越隆史

1. はじめに

鋼道路橋の架設における鋼材の連結は、溶接による他、高力ボルトを用いた**摩擦接合継手**^{*}（写真-1）が多く用いられている。ボルトによる接合は、高い強度を有するボルトを用いるほど、少ない本数で大きな連結力が得られるために継手部の小型化、施工数量の削減等、道路橋の建設時及び補修・補強時におけるコスト縮減につながる。

しかしながら、1964年に従来の高力ボルト（S10T及びF10T^{*}）よりも高強度のボルト（F13TまたはF11T）が導入されたものの、実橋においてF13Tに遅れ破壊（高強度の鋼材が高応力状態で、ある時間の経過後に突然に破壊する現象）が生じ、その後1975年頃からF11Tにも同様の損傷が発生したことから、1980（昭和55）年の道路橋示方書からは採用されなくなり、供用中の橋では、順次遅れ破壊の懸念のあるボルトの取替えや落下防止等の対策が行われている。

建築分野では1990年頃から高強度のボルト（以下、現在の高力ボルトよりも高強度のボルトを「超高力ボルト」という。）の開発研究が始まり、1999年には超高力ボルトS14Tの建設大臣一般認定¹⁾が取得され、鉄骨高層ビルなど建築分野では採用されてきている。しかし、道路橋では屋外暴露条件で50年以上の耐久性を有することが期待される。このため、遅れ破壊の観点から、一般に建築よりも使用条件が厳しいと考えられてきたこともあり、現在まで超高力ボルトの採用は行われていない。



写真-1 主桁の継手部

Experimental Study of Super-High-Strength Bolts Application for Bridges

^{*}土木用語解説：「S10T」「F10T」の規格、摩擦接合継手、高力ボルトの遅れ破壊

このような経緯も踏まえ、国土技術政策総合研究所では道路橋への超高力ボルトの適用性について、以下の点に着目して検討を進めている。

1点目は、長期間屋外で直接自然環境にさらされる腐食環境の影響の評価である。2点目は、道路橋特有の荷重や施工方法などの使用条件との関係である。本論文ではその一部を紹介する。

2. 耐遅れ破壊性能の検討

2.1 He/Hc法²⁾による耐遅れ破壊性能の評価

超高力ボルトの腐食環境に対する耐遅れ破壊性能の検証のために、「高力ボルトの遅れ破壊^{*}特性評価ガイドブック」²⁾に準じて、ボルトが遅れ破壊するときの限界拡散性水素量Hcと腐食促進試験による侵入水素量Heの比較を行った。

限界拡散性水素量Hcは、ボルト材料から図-1に示す環状切欠き付き丸棒試験片を作成し、水素チャージ後に定荷重試験を行い、破断が生じる最少水素量を求める。

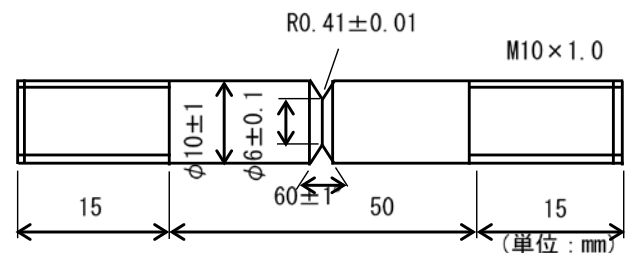


図-1 環状切欠き付き丸棒試験片（S14Tの例）

次に、ボルト材料から作成した試験片を3.0%食塩水に塩酸を添加してpH1~3とした溶液に浸漬することで水素チャージを行い、浸漬時間によらず定常となる侵入水素量Heを求める腐食促進試験を行う。以上の試験法の詳細は「高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック」²⁾に準じる。

試験は超高力ボルトS14Tと比較用のS10Tで行った。試験結果を図-2に示す。S14T（裸使用）とS10T（裸使用）では差があるもののいずれもHe/Hcが1以下で、Heの計測を行った腐食促進試験の環境条件からは遅れ破壊に対して実用に問題のない抵抗性がある可能性が高いと判断された。

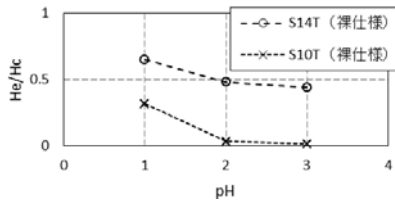


図-2 He/Hc試験結果

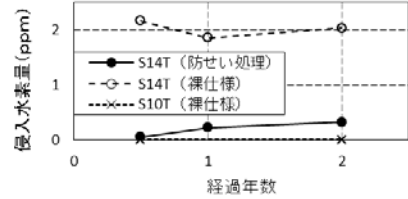


図-3 腐食促進試験によるボルトへの侵入水素量

2.2 腐食促進試験による侵入水素量の計測

実際の道路橋での使用環境により近い状態を再現して耐遅れ破壊性能の評価を行うために、板厚22mmの鋼板を2枚重ねたものを超高力ボルトにより締め付けたものを供試体とし、観覧車式の装置で繰り返し塩水に漬ける腐食促進試験を行った。供試体は、常温管理された室内で回転しながら装置下方の3.5%食塩水への浸漬と引上げ乾燥を1時間に1回転（10分浸漬）の頻度で繰り返される（写真-2）。



(a) 腐食促進試験状況



(b) 供試体浸漬状況

写真-2 腐食促進試験

試験には、S14TとS10Tの裸仕様とS14Tに道路橋で一般的に行われる防せい処理を施したものを用いた。試験開始後の経過年数と各ボルトへの侵入水素量の関係を図-3に示す。侵入水素量の計測はねじ先端部で行っている。裸仕様ではS14TはS10Tより侵入水素量が多くなっており、防せい処理を行ったS14Tが裸仕様のS10Tと近い侵入水素量となっている。

試験開始2年後のボルトの状態の例を写真-3に示す。裸使用のS14Tでは、防せい処理した場合には見られないボルト頭の表裏両側のさびが生じており、これは裸使用のS10Tも概ね同様である。

これより、裸仕様ではボルト頭部と鋼板の隙間などから水等の腐食因子が侵入しやすいのに対して、防せい処理は、腐食因子の侵入を抑制する効果が期待できるものと考えられ、裸仕様より侵入水素量も低く抑えられるものと考えられる。

以上より、超高力ボルトS14TはS10Tに比べてやや耐遅れ破壊性能に劣る可能性があるものの、防せい処理を施すことで現在問題が生じていないS10Tの裸仕様と同程度の耐遅れ破壊性能が確保出来る可能性の高い結果が得られている。観覧車式の試験は現在も継続しており、引き続き遅れ破壊防止の観点からのS14Tの道路橋での適用可能条件をより詳細に見極めていく予定である。



(a) S14T (防せい処理)



(b) S14T (裸仕様)



(c) S10T (裸仕様)

写真-3 腐食促進試験2年後の各ボルトの状態

3. 桁曲げ試験

超高力ボルトを道路橋に用いるためには、継手としての性能確認も不可欠であり、これまでも「高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」³⁾に準じる方法での標準すべり試験を行っている⁴⁾。そこでは、継手性能に大きな影響を及ぼすボルト等級、径、母材板厚、母材板厚差、肌すき量、接合面の処理方法をパラメータとした実験やボルト列数を変化させた実験を行い、接合面の処理を有機ジンクリッチペイントとした場合を除いて、道路橋示方書の規定値（無機ジンクリッチペイントの場合は0.45、粗面の場合は0.40）を上回るすべり係数が得られることを確認している⁴⁾。特に、接合面の処理を無機ジンクリッチペイントまたは粗面とした場合の標準すべり試験に限ると、道路橋示方書に規定されたすべり係数を超過確率99.9%以上で上回る結果となっている⁵⁾。

本稿では、これらを踏まえて、鋼道路橋の桁部材における実際の使用状況により近い条件での継手性能を確認するために行った、桁曲げ試験の結果について報告する。

標準すべり試験では純粋な引張りに対する継手性能が確認される。しかし道路橋の部材では曲げが作用することがほとんどであり、接合部では母材自体が曲げられることによる影響が生じる可能性がある。そこで厚板フランジを有するI桁にS14Tによる摩擦接合継手を設けた供試体を製作し、曲げ载荷試験を行う。曲げ試験は1800kNの载荷試験機を使用して継手部が等曲げ区間となるように2点载荷を行う（図-4）。なお下フランジのボルト接合に着目することとし、下フランジより先に上フランジのボルトがすべることがないように、上フランジのボルト本数は下フランジより多くしている。また母材の降伏がすべりよりも先に生じないように桁断面の幅厚などは決定した。

連結部の組立、超高力ボルトS14Tの締付等の施工要領は標準すべり試験と同様とし、荷重は単調载荷とする。接合面処理は道路橋示方書に規定された無機ジンクリッチペイントとする（写真-4）。ボルト孔周辺の合計塗膜厚は、一部で250 μm と、道路橋示方書で規定された上限値200 μm を超過した箇所があったものの、最小値に着目すると、下限値である100 μm を下回る箇所はなく、すべり係数に大きな影響はなかったと推定される。



写真-4 桁曲げ試験の载荷状況

4行×2列に配置した超高力ボルトの試験時の軸力の変動及びFEM解析による再現結果を図-5に示す。この図より、桁曲げ試験では、標準すべり試験ではほとんど差がないボルト毎の軸力の差が比較的明確に現れており、桁の曲げ変形の影響によるものと考えられる。別途行った試験条件を再現したFEM解析においてもボルト位置によって軸力の変動の程度が異なる結果が得られている。

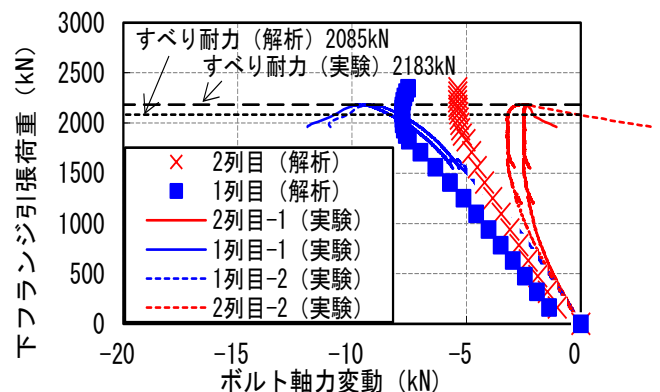


図-5 桁曲げ試験におけるボルトの軸力変動⁶⁾

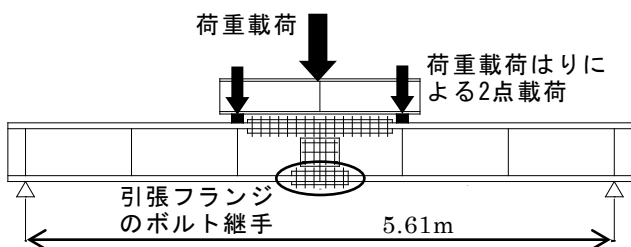


図-4 桁曲げ試験の概要図

曲げ試験では、曲げ引張を受ける下フランジの超高力ボルト摩擦接合として、4行×2列のほか、2行×3列のボルト配置とした試験も実施した。比較用に、4行×2列の配置において、高力ボルトを

S10Tとした試験も実施した。これらの試験結果から得られた曲げ引張を受ける下フランジの設計ボルト軸力から求めたすべり係数 μ_1 と、試験直前に計測したボルト軸力から求めたすべり係数 μ_2 の両方を図-6に示す。引張フランジの板厚及び材質が同じ標準すべり試験結果も合わせて示す。

いずれの桁曲げ試験においても、ボルト位置ごとに軸力変動に差がある結果となっている。標準すべり試験と桁曲げ試験では得られるすべり係数の値が異っており、使用条件によっては標準すべり試験以外に、部材の使用条件に近い桁供試体によるすべり試験を行うことも正確な継手性能の把握には有効な手段と考えられる。

なお、今回の実験条件では、桁曲げ試験の場合も試験直前のボルト軸力から整理したすべり係数 μ_2 は、道路橋示方書に規定されたすべり係数 $\mu=0.45$ を上回る結果となっており、S10Tと超高力ボルトS14Tのすべり係数には明確な違いは見られなかった。

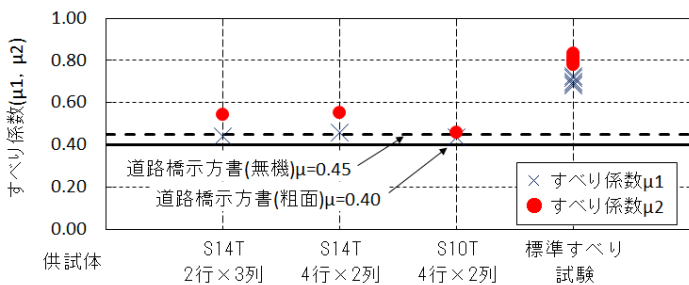


図-6 桁曲げ試験のすべり係数

4. まとめ

超高力ボルトの道路橋への適用について、長期間屋外で直接自然環境にさらされる腐食環境での耐遅れ破壊性能の確認、道路橋で代表的な仕様における継手性能の確認の2つの観点から実験的検討を行った結果、現在道路橋で用いられているS10T、F10Tに準じた適用条件において超高力ボルトが使用できる可能性が高い結果が得られた。

高力ボルト継手の継手性能には多くの影響要因があるため、引き続き検証を進め、基準への導入を図っていく予定である。

なお本研究は、公立大学法人大阪市立大学、新日鐵住金株式会社、日鉄住金ボルテン株式会社との共同で実施した。

参考文献

- 1) MBLT-9038、国土交通大臣認定、2002.5
- 2) 高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック、一般社団法人日本鋼構造協会ほか、2010.7
- 3) 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）、公益社団法人土木学会、2006.12
- 4) 玉越隆史ほか：超高力ボルトの橋梁分野への適用に向けた各要因の影響、土木技術資料、第55巻、第5号、pp.34~37、2013
- 5) 玉越隆史ほか：鋼道路橋への適用に向けた超高力ボルトを用いた摩擦接合継手の継手強度に関する研究、国総研資料、第827号、2015.2
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0827.htm>
- 6) 玉越隆史ほか：高力ボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデルに関する研究、鋼構造論文集、第21巻、第84号、pp.95~110、2014.12

横井芳輝



本州四国連絡高速道路(株)鳴門管理センター(前 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室研究官)
Yoshiteru YOKOI

水口知樹



(株)横河ブリッジ設計センター(前 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室交流研究員)
Toshiki MIZUGUHI

玉越隆史



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長
Takashi TAMAKOSHI