

1. 序 論

1.1 概要

鋼道路橋の設計基準である道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編^{1.1)}(以下、道示という)では、鋼道路橋の高力ボルト継手に用いるボルトとしてF10T、S10Tまでの高力ボルトを規定している。過去には、鋼道路橋においてこれを越える強度のボルトであるF11Tが1966年の鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針^{1.2)}および1973年の道示Ⅱ鋼橋編^{1.3)}で規定されたものの、実橋で遅れ破壊等の事例が見られたことを受け、1980年の道示Ⅱ鋼橋編^{1.4)}では規定から削除された。

一方で、建築分野では、F10T、S10Tを超える強度を有しているものの、耐遅れ破壊性能を改善した超高力ボルトが国土交通大臣の認定の取得により鉄骨高層ビルの接合に採用されている^{1.5), 1.6)}。ここで、超高力ボルトとは、耐遅れ破壊性能を改善した、引張強さ1400N/mm²、降伏点1260N/mm²を有する高力ボルト(S14TおよびF14T)を示す。

道路橋においても、超高力ボルトの採用により、継手部の小型化や施工量の削減によるコスト縮減、品質確保が困難な条件での厚板溶接の回避など、道路橋のコストが縮減したり品質が向上する場合も考えられる。

しかし、道路橋においては、建築と異なり屋外で使用するため、直接自然環境下に縛されることが多い。そのため、国土技術政策総合研究所では、2011年から超高力ボルト材料の耐久性等の品質水準に関する共同研究(共同研究者: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)を行うなど、道路橋での利用を目的にボルト材料の耐遅れ破壊性能の評価手法の検討を行っている。

また、道路橋では、力学的な使用環境においても建築分野に比べて大型部材の接合のため、より多行多列ボルト継手やより長尺ボルトが用いられることが多いこと、自動車荷重をはじめ、比較的大きな変動荷重作用下に置かれることが多いことなどから、建築分野とは使用条件が異なる。そのため、道路橋においてF10T、S10Tの強度を超える高力ボルトを採用するには、その施工条件・使用条件における性能を明らかにする必要がある。

本研究では、現行の道示(2012年)におけるF10T、S10Tと同様な規定や適用範囲に対して、耐遅れ破壊性能を有した超高力ボルトを適用した場合の継手性能を明らかにすることを目的とし、接合条件を変えたすべり試験および数値解析を実施する。なお、高力ボルトの継手形式として、摩擦接合、支圧接合および引張接合が一般に用いられるが、本研究では最も使用頻度の高い摩擦接合を検討対象とした。

1.2 高力ボルト摩擦接合継手の応力伝達機構

高力ボルト継手は、応力伝達の機構から摩擦接合、支圧接合、引張接合の3つの接合方式に分類して適用される。ここで、本研究で対象とする摩擦接合の伝達機構について以下に述べる。

摩擦接合とは、図-1.1 に示すとおり、ボルトで継手材片を締め付けることにより接合材片間に生ずる摩擦力により応力を伝達するものである。この場合、応力はボルト軸の直角方向に伝えられる。したがって、ボルト軸方向に応力を伝えるものは含まない。接合面とは、接合材片間の摩擦力を伝える接触面のことをいい、座金と接合材片間の接触面は含まない。

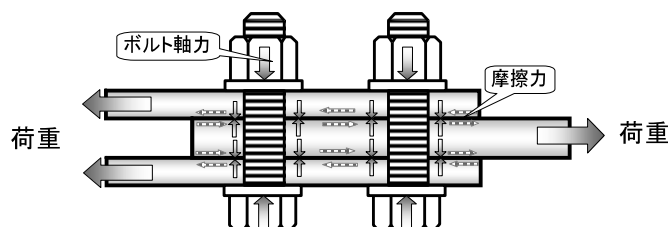


図-1.1 高力ボルト摩擦接合継手の応力伝達機構

1.3 鋼道路橋における高力ボルト摩擦接合継手に関する基準の変遷

鋼道路橋における主な接合形式として、ボルト継手、溶接継手、リベット継手がある。古くはリベット継手が広く用いられていたが、鋼材の高強度材料の開発に対応したリベット材がなかったことや、リベット工の減少および現場での騒音発生問題などから採用が減少していった。溶接継手は、一般に現場での付属設備費が高力ボルト継手より高いことや、現場条件によっては施工が困難な場合があることなど、採用に当たっては制約条件が附帯される場合がある。一方、ボルト継手は、1964年に高力ボルトのJIS規格JIS B 1186が制定され、また1966年に鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針^{1,2)}が発刊され、高力ボルト摩擦接合継手が採用され始めた。1962年にはF11T、1964年にはF13T^{1,7)}までの高強度ボルトについても開発され実用に供された。

しかし、F13Tは施工後数ヶ月で、F11Tの場合は施工後数年で遅れ破壊による脱落事故が多発した(図-1.2、1.3参照)。このような事故を受けてF13Tは使用を禁止され、F11Tについても1980年の道示Ⅱ鋼橋編^{1,4)}では規定から削除された。F10Tまでの高力ボルトについては遅れ破壊が発生しなかったことから、規定され続けている。それまで採用されていたF11Tについては、F10Tへ順次取り替えがなされているが、設計上継手の強度が不足している場合は補強を伴う場合もある。

上述のとおり、現在、道示(2012年)ではF10T、S10Tまでが規定されており、これ以上の高強度の高力ボルトは規定されていない。一方で、新設橋において厚板化が進む中で、ボルト1本当たりの荷重伝達力がF10T、S10Tより大きい超高力ボルトを用いることにより必要ボルト本数や施工工数の削減など、合理的で経済的な継手となる可能性があることが期待されている。既設橋の補修では、高力ボルトを用いた当て板補修を行う場合があり、ボルト本数の使用が多い(図-1.4参照)ことから、超高力ボルトの使用によるボルト本数の削減は、補修部材の小型化により合理的な補修構造となることも期待されている。

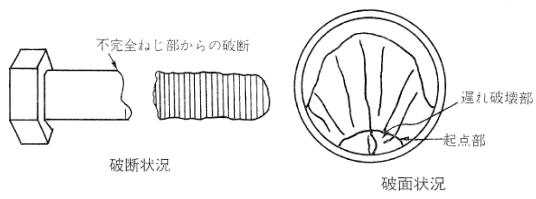


図-1.2 高力ボルト(F11T)の遅れ破壊

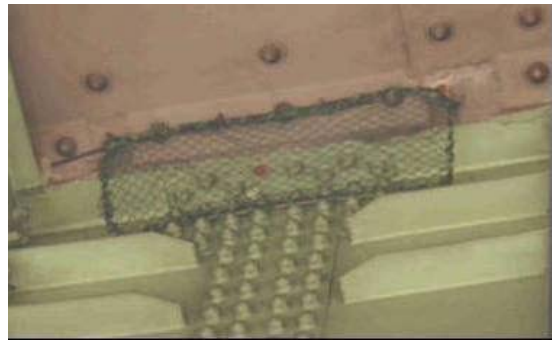


図-1.3 高力ボルト脱落の実例

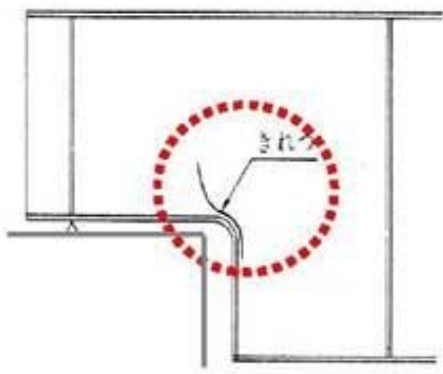


図-1.4 当て板による補修事例

1.4 用語と記号

本報告書においては、以下に示す記号と用語を用いる。

- N : 道示Ⅱ 表-解3.2.6 高力ボルトの許容力に示される設計ボルト軸力で、ボルトの降伏点(N_y)に対する比率 α とボルトの耐力(σ_y)、ボルトのねじ部の有効断面積(A_e)を乗じた式で計算される(N)
- N_2 : 引張試験直前のボルト軸力(実測値) (N)
- μ_1 : 設計ボルト軸力 N に対するすべり係数 $\mu_1=P/(m \times n \times N)$
- μ_2 : 試験前ボルト軸力 N_2 に対するすべり係数 $\mu_2=P/(m \times n \times N_2)$
- μ : 設計すべり係数
- P : 継手に作用する軸力(N)
- m : 摩擦面数
- n : ボルト本数
- β : すべり降伏耐力比
=設計すべり耐力/設計降伏耐力
設計すべり耐力= $\mu \times m \times n \times N$
設計降伏耐力= $t \times (B - \text{孔径})$ 孔母板の降伏点
- B : 母板の板幅(mm)
- γ : 連結板母板降伏強度比
 γ =連結板降伏強度/母板降伏強度
- t : 母板の板厚(mm)
- 板厚差 : 厚い方と薄い方の母板の板厚差

1.5 超高力ボルトおよび遅れ破壊に関する既往の研究

超高力ボルトに関する既往の研究は、その多くが建築分野のものであり、内容は耐荷力、疲労、遅れ破壊、適用性や技術紹介などに分類される。以下より、超高力ボルトに関する既往の研究および高力ボルトの遅れ破壊に関する既往の研究をまとめたものを示す。

1.5.1 超高力ボルト

建築における鉄骨構造分野の主要接合技術は、高力ボルト接合と溶接接合に分けられる。溶接接合は、接合部の品質が溶接工の技量に強く依存しているが、高力ボルト接合

は、溶接接合と比較して高度な技能を必要とせず、所定の品質が得られやすいことから、多くの採用実績を有している。採用実績の中では、超高層建築をはじめ構造物の大型化により厚板化・高強度化した継手が多くなってきた^{1.8)}。

一方で、土木分野でも鋼少数I桁橋の採用などにより、厚板化・高強度化された鋼板が使用される中、必要ボルト本数や施工工数の削減など、合理的で経済的な継手となる可能性がある高力ボルトの高強度化が期待されている^{1.9)}。

(1) 遅れ破壊を起こしにくいボルト形状の開発

遅れ破壊は、鋼材内部に侵入した水素が応力集中部に集積することで応力集中部周辺の鋼材の破壊強度を低下させて作用応力に抵抗できなくなることで発生すると考えられている。ボルトの場合、遅れ破壊による高力ボルトの破断は、大きな応力集中や塑性ひずみの集中が存在するねじ部に多発しており、特に不完全ねじ部に多いことが既往の暴露試験結果から明らかとなっている^{1.8)}。超高力ボルトの場合、例えばSHTBでは、基本的な形状寸法をJSS II 09(1981)およびJIS B 1186(1979)に準拠しつつ、ボルト各部に生じる応力集中、塑性ひずみ集中を緩和するために、ねじ形状の改良、ボルト軸からねじ部への移行部形状の改良、ボルト頭部首下アールの増大、ナットの形状変更を行い、耐遅れ破壊性能の改善が図られている^{1.8)}。

(2) 材質の改良

遅れ破壊が発生する鋼中濃度の限界値を限界拡散性水素量 H_c と呼び、ボルトに侵入する拡散性水素の鋼中濃度がこの限界値を超えなければ遅れ破壊は発生しないとすると、例えばSHTBの場合、少なくともF10Tの約3倍の限界拡散性水素量 H_c を有するように改善されている可能性が示唆されている^{1.8)}。

(3) 施工方法

従来のトルシア形高力ボルトS10Tと概ね同様に施工できるが、トルクがS10Tより大きいため、超高力ボルトに対応した締め付け機を選ぶ必要がある^{1.8)}。

1.5.2 鋼道路橋における高力ボルトの遅れ破壊

高力ボルトの遅れ破壊とは、鋼材が静的な応力を負荷されてから、ある時間経過後に突然脆性的な破壊を生じる現象のことであり、水素脆化の一形態である。

これまでに、鋼道路橋における(1)遅れ破壊の発生確率、(2)破壊の発生部位、(3)構造型式と遅れ破壊、(4)遅れ破壊したボルト、(5)遅れ破壊の原因などについて研究・調査が行われている。

(1) 遅れ破壊の発生確率

首都高速道路の1980年～1982年の調査結果によると、調査ボルトF11Tの本数約51万本のうち、損傷ボルトは全体の0.2%以下であり、上部と橋脚で比較した場合、上部は0.11%、橋脚は0.35%であった。阪神高速道路の調査結果によると、1964年に竣工したある高架橋に用いられたF13Tの本数約1.2万本のうち、1980年までに発見された損傷ボルトは全体の

0.5%であった^{1.10), 1.11)}。

(2) 遅れ破壊の発生部位

損傷が確認された初期には、不完全ねじ部からの破断が多く確認されたが、その後、不完全ねじ部の形状が改良されたことにより、ナットのかかり部からの破断が最も多くなり、次いでボルトの首下部、不完全ねじ部の順となっている^{1.12)}。

(3) 構造型式と遅れ破壊

高力ボルトの使用箇所別の損傷状況を見ると、鋼 I 桁が鋼箱桁の5倍以上となっている。鋼桁におけるボルトの暴露環境として、閉断面の方が開断面より良い状態にあると考えられる。また、高力ボルトの損傷数について、鋼桁と鋼製橋脚を比べると鋼製橋脚の方が多く、これは鋼桁に比べて鋼製橋脚内部の水溜まり、結露などの腐食環境が高力ボルトの折損に大きく影響しているものと推定されている^{1.13)}。

(4) 遅れ破壊したボルト

これまで遅れ破壊が発見されている高力ボルトは、主にF13T、F11Tで、引張強度1250N/mm²以上のものである^{1.14)}。

(5) 遅れ破壊の原因

遅れ破壊の原因は水素脆性と応力腐食によるものがあり、水素脆性は時間の経過とともに急激に減少する傾向にある。応力腐食は腐食環境下での応力集中によるもので、時間経過とともに増える傾向にある^{1.14)}。

1.6 本研究における検討項目

以上を踏まえて本研究では、道示におけるF10T、S10Tの規定に対して、耐遅れ破壊性能を改善した超高力ボルトを適用する場合の検討項目を以下に示す。高力ボルト継手のすべり耐力に影響を与える要因としては、母板の板厚、材質、肌すき、フィラー（母板間の板厚差）、すべり/降伏耐力比、接合面処理のちがい、ボルト孔径、ボルト軸力のリラクゼーション等が挙げられ^{1.15)}、これらのほか、2章に示す高力ボルト摩擦接合継手に関する建築分野と鋼道路橋の基準のちがいから検討項目を抽出する。

(1) ボルトの等級と径

本研究で検討するボルトの等級は超高力ボルト（実験および解析で用いたボルトはS14T）とし、ボルトの径は道路橋では高力ボルトの施工実績が多いM22、M24とする。

(2) 高力ボルト継手に用いるボルト、ナット

超高力ボルトは、耐遅れ破壊性能を改善した、引張強さ1400N/mm²、降伏点1260N/mm²を有する高力ボルト（S14TおよびF14T）とする（実験および解析で用いたボルトはS14T）。

(3) ボルトの許容力

超高力ボルトの許容力は、耐遅れ破壊性能を改善した、引張強さ1400N/mm²、降伏点1260N/mm²を有する高力ボルト（S14TおよびF14T）の許容力とする。

(4) 接合面処理

本研究では道示の規定を使用条件とした場合の超高力ボルトのすべり耐力に関する検討を行うため、道示の規定により接合面処理を行い、所定のすべり係数が確保されることを検討する必要がある。

(5) 母板の板厚、材質、肌すき、フィラー（母板間の板厚差）、すべり/降伏耐力比

本研究では道示の規定を使用条件とした場合の超高力ボルトのすべり耐力に関する検討を行うため、道示の規定の範囲内で、母板の板厚、材質、肌すき、フィラー（母板間の板厚差）、およびすべり/降伏耐力比をパラメトリックに変化させて、すべり係数への影響検討を行う。

(6) 1ボルト線上に並ぶ列数

母板の板厚、材質、肌すき、フィラー（母板間の板厚差）、すべり/降伏耐力比、接合面処理のちがいなど各パラメータによるすべり耐力への影響については、土木学会で規定しているボルト列数 2 列の標準すべり試験^{1,15)}により検討し、別途、道示で規定されている最大 12 列までの多列すべり試験によりボルト列数の影響を検討する。

(7) ボルト孔径

本研究では現行の道示（2012 年）の S10T、F10T までのボルトにおける規定の使用条件とした場合の超高力ボルトのすべり耐力に関する検討を行うため、道示の規定によるボルト孔径のすべり耐力への影響を検討する。さらに、既設部材への補強部材設置を想定し、施工性の確保のために許容されることが期待されると想定される、標準孔径より大きい孔径によるすべり耐力への影響を検討する。

(8) ボルトの最小中心間隔、最大中心間隔、縁端距離

本研究では道示の規定を使用条件とした場合の超高力ボルトのすべり耐力に関する検討を行うため、道示の規定の範囲内で検討を行う。

さらに、地震災害等の影響により継手部にすべりが生じた場合に、すべり後も道示に規定されているすべり係数が確保できるかを確認するため、『再試験』を行う。

また、作用力状態としてすべり試験よりも鋼道路橋での使用状況下に近い環境を再現するために鋼 I 桁の供試体を用いた『桁曲げ試験』を行う。

ボルトに導入した軸力は、リラクセーションによって減少することが知られており^{1,15)}、ボルト軸力導入後に 12 時間以上保管してからすべり試験を行った『12H』、1 ヶ月以上保管してから試験した『1 ヶ月』、および屋内で長期間（約 1 年程度）保管して試験した『長期』を比較する。

以上の項目に着目した検討を行うため、本研究では以下の種別の試験を行う（図-1.5 参照）。

- ・標準すべり試験：すべり耐力の低下に影響を与える要因をパラメトリックに設定し標準すべり試験を行う

- ・多列すべり試験：多列化によるすべり耐力の低下状況の確認を行う
- ・桁曲げ試験：作用力状態として、鋼道路橋での使用状況下に近い環境を再現させるため、鋼 I 桁の供試体を用いた桁曲げ試験を行う
- ・再試験：各試験ですべりが計測された後、新規のボルトに取り替えて再度すべり試験を行う

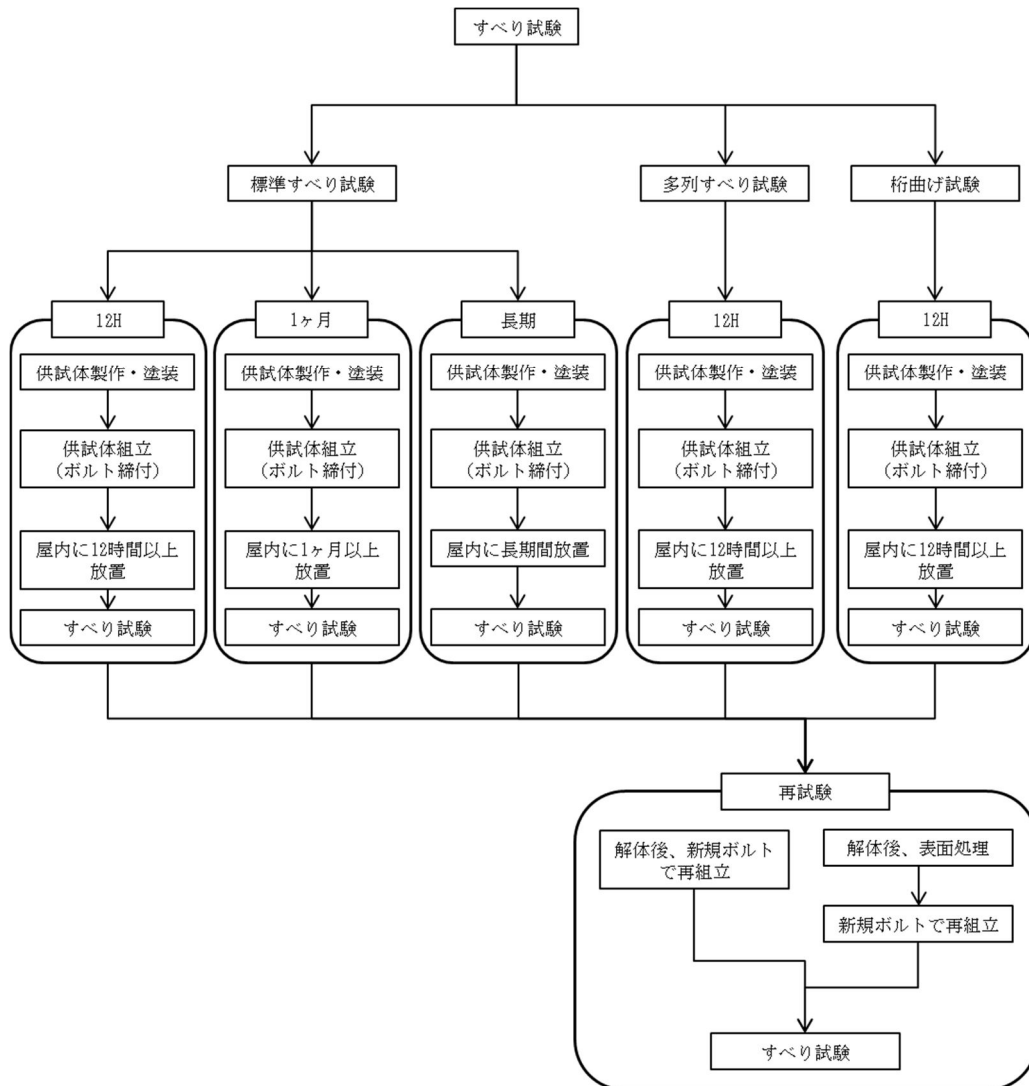


図-1.5 試験種別

各試験の供試体は基本的に 5 体と少なく、各因子のばらつきを統計的に網羅しているとはいえない。そこで、各試験のほかに FEM 解析を用いた解析的検討を行い、試験結果を力学メカニズムに着目して検討する。

1 章参考文献

- 1.1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 1.2) (社) 日本道路協会：鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針，1966.8
- 1.3) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1973.2
- 1.4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1980.2
- 1.5) 脇山広三：高力ボルト接合(6)，超高力ボルトの開発，JSSC No.40，2001.4
- 1.6) (一社) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.3
- 1.7) 多田安夫，篠原洋司：花輪跨道橋・高力ボルト摩擦接合について，土木研究所資料第27号，1965.
- 1.8) 宇野暢芳，久保田学，永田匡宏，樽井敏三，蟹澤秀雄，山崎真吾，東清三郎，宮川敏夫：超高力ボルト SHTB，新日鉄技報 第387号，pp.85-93、2007.
- 1.9) 太田雅夫，山口隆司：太径・高強度高力ボルトを用いた摩擦接合の有効性に関する検討，土木学会第57回年次学術講演会，pp.263-264，2002.9
- 1.10) 早坂博文：高力ボルトの取換え補修，橋梁と基礎，pp.60-64，1983.8
- 1.11) 村田広治，小笠原宇一：高力ボルト(F13T)の取替えについて，栗本技報 No.10，pp.31-45，1984.1
- 1.12) 土木学会：鋼構造シリーズ7 鋼橋における劣化現象と損傷の評価，1996.10
- 1.13) 西岡敬治，乙黒幸年，矢幡健，長沼敏彦，吉川紀：施工後10数年経過した橋梁の高力ボルト継手の維持管理に関する諸問題，構造工学論文集 Vol.43A，pp.961-966，1997.3
- 1.14) (社) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート96 高力ボルト接合技術の現状と課題，2013.3
- 1.15) 土木学会：鋼構造シリーズ15 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2006.12.