

環境配慮型高力ボルトの開発概要

Overview of Environmentally Friendly High-strength Bolt Development



飯野 元*¹
Hajime IINO



吉元 大介*²
Daisuke YOSHIMOTO



神野 夢希*³
Yumeki KAMINO

要 旨

環境に配慮した新たな高力ボルトを開発するために、FEM解析や試作ボルトを用いた引張試験を実施し、その基本的な機械的性質を把握した。この新しいボルトは、従来のトルシア形高力ボルトの課題を解決するとともに、ボルト製造工程での自然環境への負荷軽減や施工時の労働環境改善を目的としており、トルシア形高力ボルトと比較して、機械的性能や品質は同等でありながら、約10%の軽量化の可能性がある。

キーワード：環境配慮，ボルト形状，FEM解析，引張試験，リラクセーション試験

1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出や廃棄物などによる自然環境への影響、少子高齢化社会における労働環境への対応および現場作業の軽減・効率化など、様々な環境に配慮し貢献する取り組みが強く求められている。

現在、高力ボルト摩擦接合継手で主流となっているトルシア形高力ボルトは1981年にJSS II-09規格として制定され、JIS規格化されている高力六角ボルトに対して施工管理の簡略化と施工精度の向上を目的として開発された。トルシア形高力ボルトは、そのボルト締結機構に多くの特長を有している。しかしながら40年間以上に亘る多くの実績を経て、課題も明らかになってきた。すなわち、その構造的特徴であるピンテールの落下防止および回収作業、破断部の研磨処理および鉄粉飛散防止ならびに清掃作業等を要することなどである¹⁾。また、トルシア形高力ボルトは頭部にボルト締緩用の平面がないため、共回りの防止やボルト頭部が腐食した場合、頭部から緩めてボルト交換することが不可能などの課題もある。

以上を踏まえ、トルシア形高力ボルトの課題を解決するとともに、ボルト製造工程での自然環境への負荷軽減および施工時の労働環境改善を目的とした新しい高力ボルト（以下、環境配慮型高力ボルト）を開発することにした。

本稿では、トルシア形高力ボルトと比較して機械的性

能・品質は同等でありながら、軽量化への可能性を探るために実施したFEM解析によるボルト頭部の最適形状や低ナットの検討、試作ボルトを用いた引張試験やリラクセーション試験について概説する。

2. 環境配慮型高力ボルトの概要

(1) トルシア形高力ボルトとの比較

環境配慮型高力ボルトはトルシア形高力ボルトと比較して図-1のような特長がある。トルシア形高力ボルトには、ボルトを締めたり緩めたりするための締緩機構が頭部に存在せず、ナット側には完成後に余剰となり、落下防止対策が必要なピンテールがある。一方で、環境配慮型高力ボルトは労働（作業）環境への配慮として、頭部に締緩機

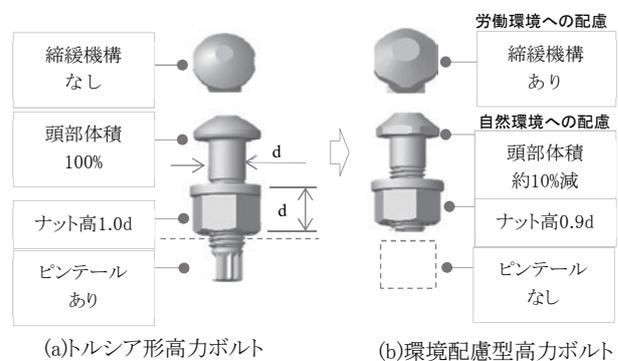


図-1 環境配慮型高力ボルトの概要

*¹ 技術・開発本部 設計・開発部 設計・開発第2グループ グループリーダー

*² 技術・開発本部 本部長

*³ 技術・開発本部 研究開発部 研究開発グループ

構を備えている。また、自然環境への配慮として、ピンテールを省略し、ナットの高さを低くするなどの特長があり、ボルトセット全体の体積を削減することを目指している。

(2) 要求性能

環境配慮型高力ボルトに必要な力学性能や機械的性質などの要求性能を以下に列挙する。

- ①ボルトセットとして、トルシア高力ボルトと同等の力学的性能を有していること。
- ②ボルト頭部の形状が、被締結体の鋼板応力度に大きな影響を与えないこと。
- ③ナット高さが、最大引張荷重および終局破壊状態において、高力ボルトとしての性能を有していること。また、ボルト頭部が先に引張破断しないこと。
- ④リラクセーション特性は、トルシア形高力ボルトと同等であること。
- ⑤既存の締付機器等を使用してボルトを締めたり緩めたりでき、施工性に問題ないこと。
- ⑥他の高力ボルトと同様な方法でボルト製造が可能なこと。

3. FEM解析による力学性能の検討

(1) 検討項目と検討フロー

環境配慮型高力ボルトは、使用材料を可能な限り削減した製品とするために、トルシア形高力ボルトのピンテールを省略することに加え、ボルト頭部およびナットの形状・寸法を見直すものとした。検討項目と検討フローを図-2、着目部位を図-3に示す。まず、ボルト頭部形状およびナット高さの検討を軸力導入解析で行い、その後、締緩機能を検証するためのトルク導入解析を行う。

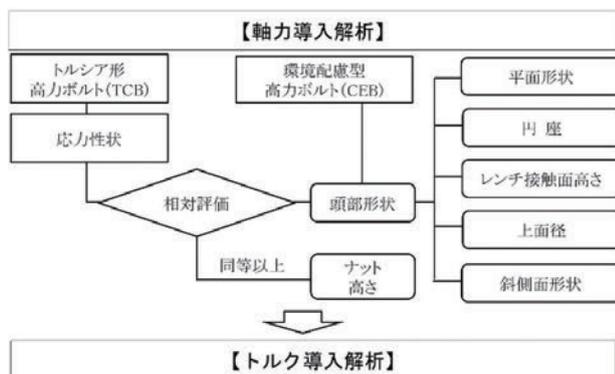


図-2 検討項目と検討フロー

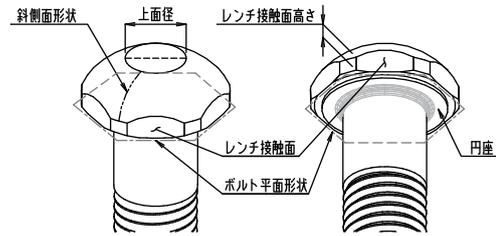


図-3 環境配慮型高力ボルト頭部の着目部位

(2) 軸力導入解析

解析モデルは、標準すべり試験体のボルト1本分に相当する範囲とし。ボルト初期軸力は、M22 (F10T) 相当を導入する。また、最大応力度の違いを単純に比較できるように弾性解析とし、接触設定は、マスター・スレーブ法による接触（固着）とする。

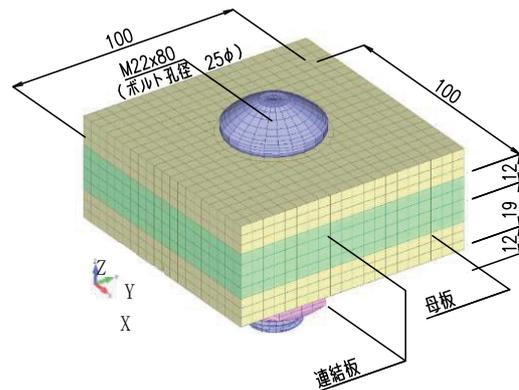


図-4 解析モデルの例 (単位: mm)

1) ボルト頭部の平面形状

図-5に示すように、トルシア形高力ボルトと同じ円形のほかに、四角形、六角形、八角形の計4種類を比較した。その結果、図-7に示すように、ボルト頭部の平面形状の違いが、鋼板のすべり面を含め、応力にほとんど影響を与えないことが判明した。そこで、施工性の観点から既存のレンチが使用できる六角形を採用することにした。

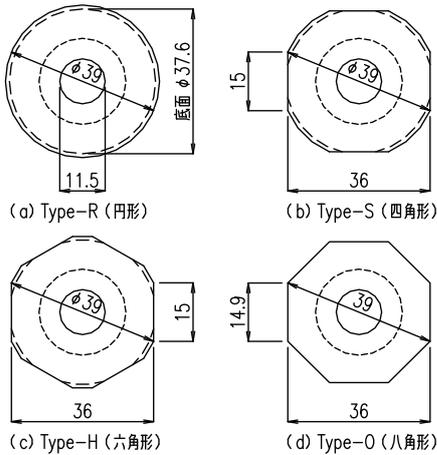


図-5 ボルト頭部の平面形状 (単位: mm)

2) 円座

図-8に示すように、円座の直径33~36mmまで検討した。その結果、図-9に示すように、座金面のボルト形状は、径が小さくなるほど応力が高くなり、直径33の場合、環境配慮型高力ボルトの応力がトルシア形高力ボルトよりも大きくなることが判明した。そこでトルシア形高力ボルト相当の応力である直径34を採用することにした。

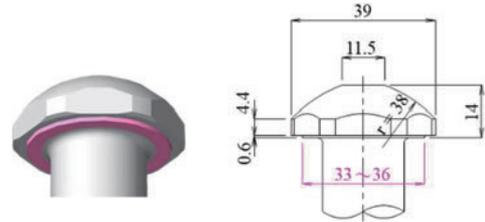


図-8 ボルト頭部寸法 [円座着目] (単位: mm)

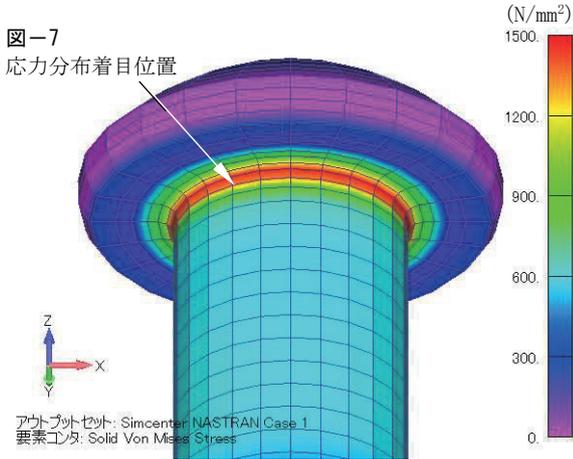


図-6 トルシア形高力ボルト頭部のミーゼス応力コンター

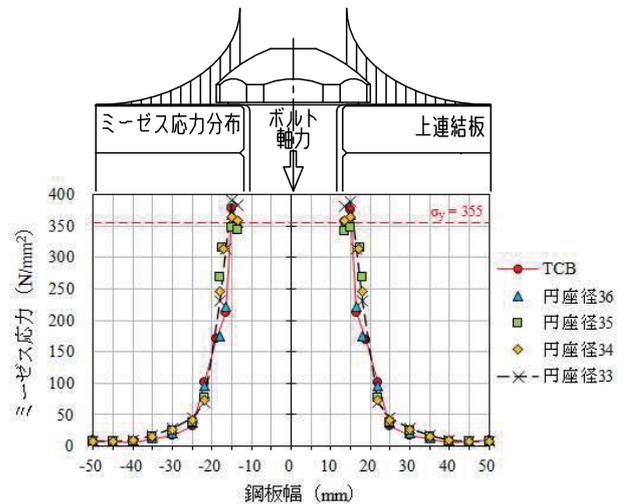


図-9 上連結板上面の板幅方向ミーゼス応力分布 [円座着目]

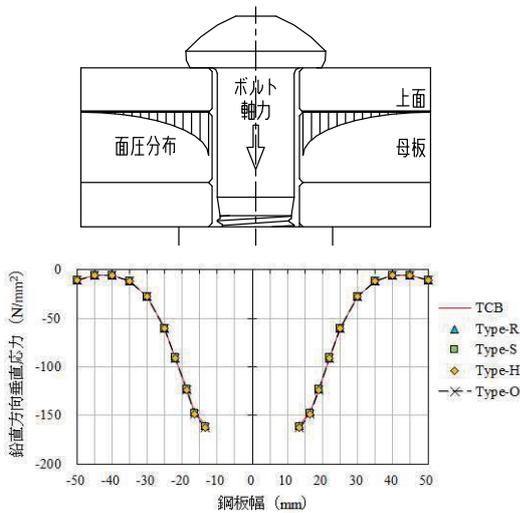


図-7 母板上面の板幅方向垂直応力分布 [ボルト平面形状着目]

3) レンチ接触面高さ

図-10に示すように、レンチ接触面高さについて、3.4mm、4.0mm、4.4mmの3種類を比較した。その結果、図-11に示すように、レンチ接触面高さが4mm以下になると、環境配慮型高力ボルトの応力がトルシア形高力ボルトを超えるため、最小高さを4mmに設定した。

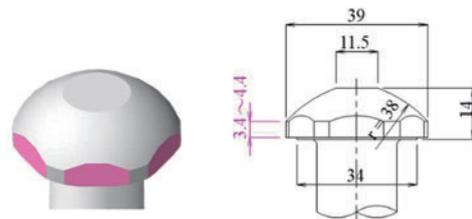


図-10 ボルト頭部形状 [レンチ接触面高着目] (単位: mm)

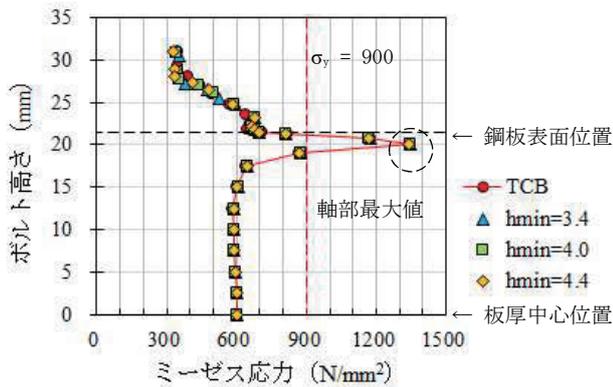


図-11 ボルト軸部ミーゼス応力分布
[レンチ接触面高着目]

4) 上面の直径

図-12に示すように、上面の直径について、10mm、11mm、11.5mmの3種類を比較した。その結果、図-13に示すように、直径が11mmを超えると、環境配慮型高力ボルトはトルシア形高力ボルトの応力度を下回ることが判明した。

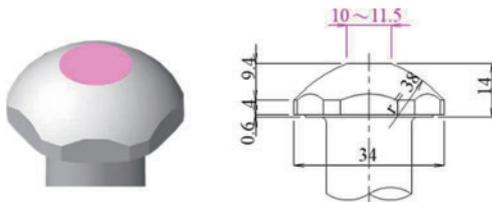


図-12 ボルト頭部形状 [上面径着目]
＜斜側面：円弧＞（単位：mm）

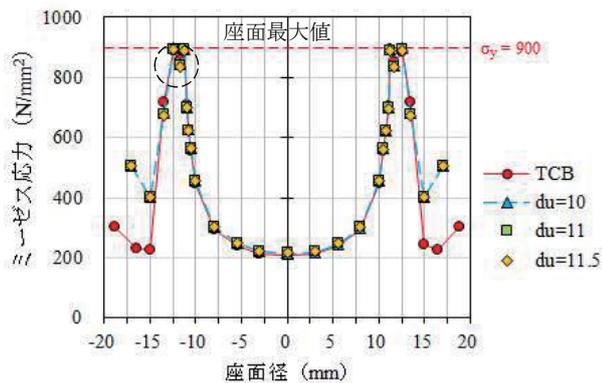


図-13 ボルト座面ミーゼス応力分布
[上面径着目]

5) 斜側面形状

頭部体積の減少と発生応力との関係を図-15のグラフにまとめた。円弧部分の体積に余剰があることが判明したため、この部分を直線状に変更した。また、上面の直径が16mmのとき、トルシア形高力ボルトとほぼ同等の応力度になることが判明した。

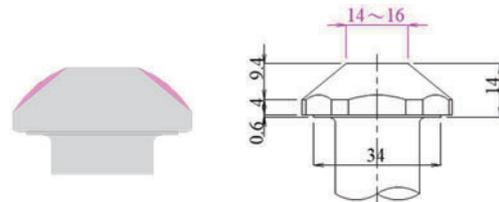


図-14 ボルト頭部形状 [斜側面着目]
＜斜側面：直線＞（単位：mm）

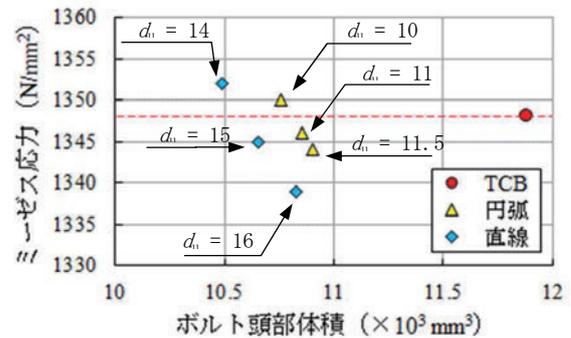


図-15 ボルト頭部体積と軸部応力最大値との関係

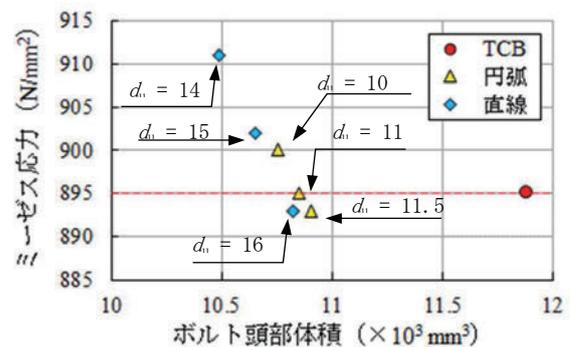


図-16 ボルト頭部体積と座面応力最大値との関係

6) ナットの高さ

図-17に示すように、ボルトM22のナット高さを22mmからその半分の12mmまでの5種類を検討した。図-18に示すように、NT22は高応力の領域が第1ねじ山と第2ねじ山の高さ程度までに広がっており、ナット頂面側やボルト突出し部では応力が低下する。一方、NT12では、高応力領域が第3ねじ山まで延びており、ナット

頂面側やボルト突出し部にも比較的高応力が発生することが確認された。このことから、ナットの高さの影響が応力に与える影響が明確に現れていることが判明した。

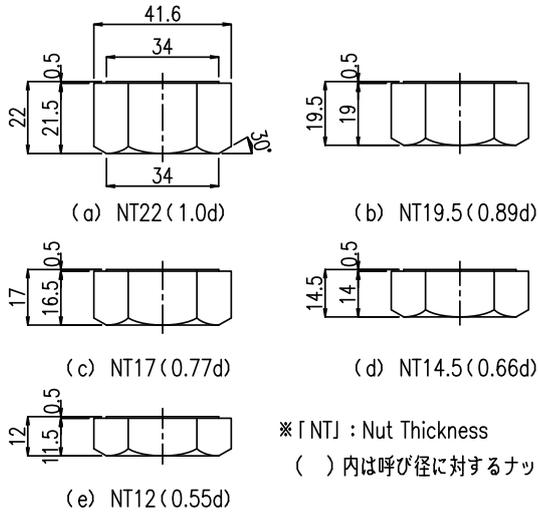


図-17 ナット寸法 (単位: mm)

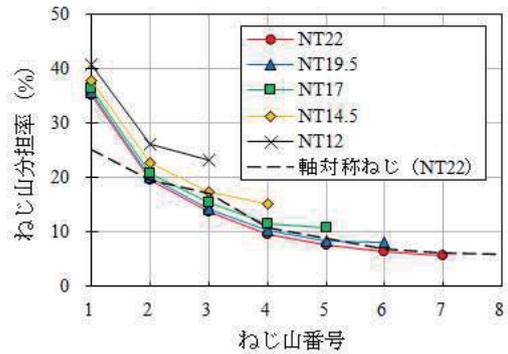


図-19 ナットねじ山の分担率

(3) トルク導入解析

図-20に示すように、ボルト頭部をレンチにより締緩作業を行うことを想定したモデル化を行う。レンチとボルトの接触面は、1面あたり1/2で6箇所とする。その結果、図-21および図-22に示すように、トルクが全ての接触面に対して均等に作用しているため、各ケースとも特に問題となるような応力の発生は生じていない。ただし、解析ではレンチとボルト頭部とのクリアランスなどが考慮していないため、今後、施工試験などで検証することにする。

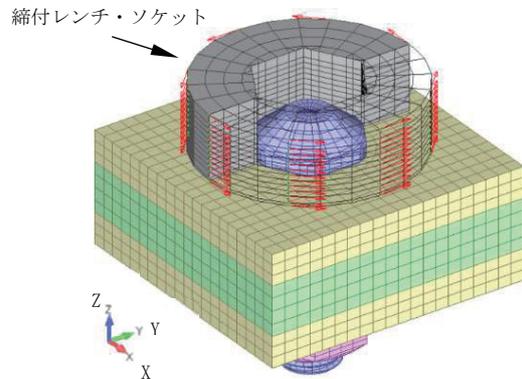


図-20 トルク導入解析モデル

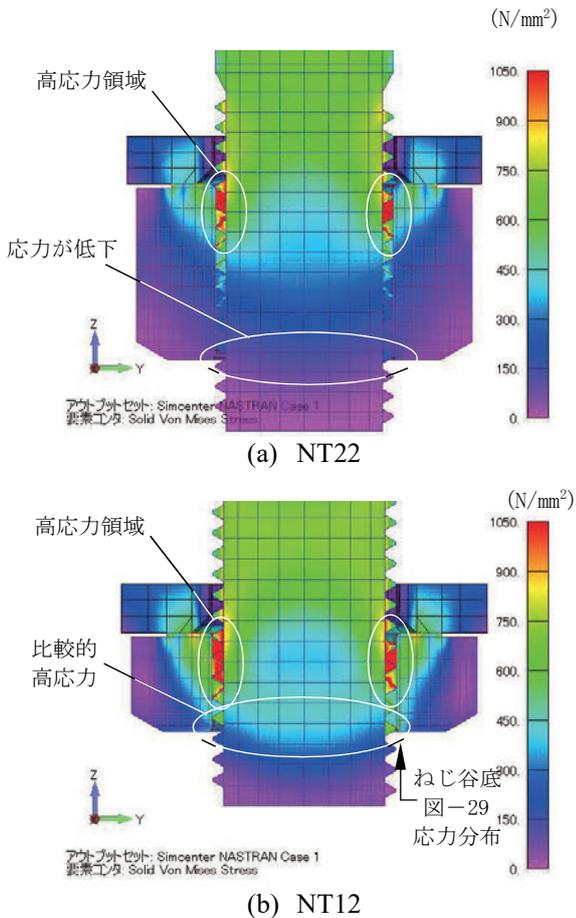


図-18 ナット側のミーゼス応力コンター

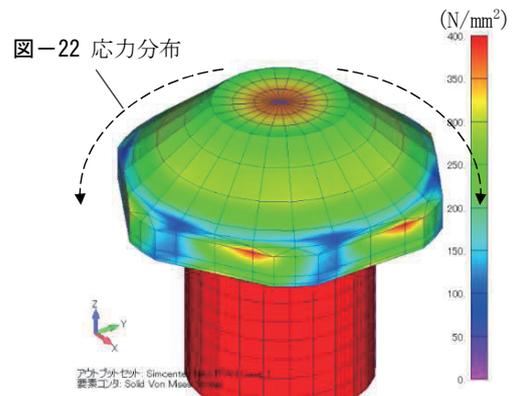
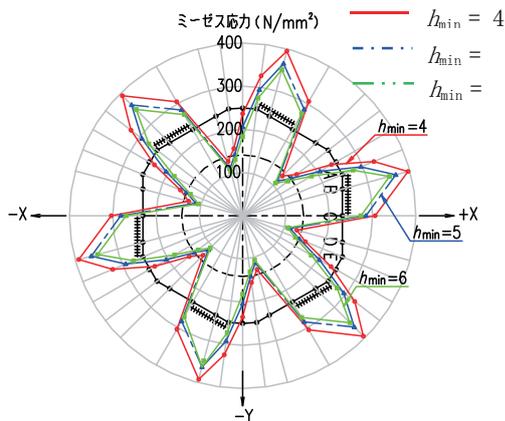
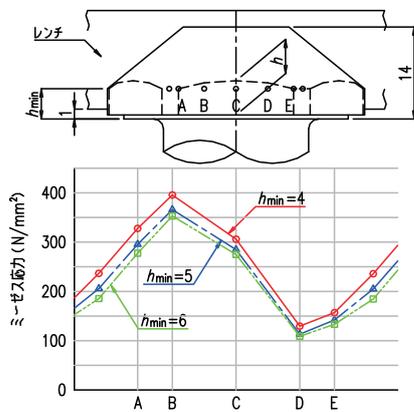


図-21 トルク導入時ミーゼス応力コンター



(a) 極座標分布



(b) 水平方向分布 (代表面)

図-22 トルク導入時ミーゼス応力分布図



写真-1 引張試験治具

(3) 試験ケース

ナット高さは、ボルトM22の一般的なナット高さ22mmからその半分の12mmまでの5種類で試験を行った。試験ケースの詳細は表-1のとおりである。

表-1 試験ケース

記号	ナット		ボルト寸法	ボルト数	試験数
	高さ(mm)	呼び径との比(d=22)			
NT22	22.0	1.0d	M22×85	3	2
NT20	19.8	0.9d		3	3
NT18	17.6	0.8d		3	3
NT17	16.5	0.75d		3	1
NT12	12.0	0.5d		3	1

(4) 引張試験結果と考察

NT12の場合、ボルト設計軸力(205kN)に到達する前にねじ山のせん断破壊が徐々に進行し、終局に至った。NT17とNT18については、いずれもボルト設計軸力には到達しているものの、ねじ山のせん断破壊が先行し、試験が終了した。一方で、NT20とNT22の場合、ねじ山のせん断破壊に先行せず、どちらもほぼ同じ耐荷重性能を示した。

写真-2はNT12の終局状態であり、ねじ山のせん断破壊が先行していることが分かる。写真-3はNT22の終局状態であり、この場合、ねじ山でのせん断破壊は発生せず、ねじ部は適切な状態で伸びていることが分かる。表-2は試験結果をまとめたものである。

4. ボルト引張試験

(1) 試験目的

環境配慮型高力ボルトの頭部形状(「ボルト平面：六角形」・「円径34mm」・「レンチ接触面高4mm」・「斜側面：直線タイプの上径16mm」)の耐荷力性能および締結性能を確認・検証するため、この形状を再現したボルトおよびナットを用いて引張破断試験を実施する。

(2) 試験方法

引張試験は写真-1に示すように、試験ボルトを専用治具で固定し、万能試験機でボルト軸部の軸方向に強制変位を加え、ボルトに引張軸力を導入する。万能試験機の荷重をボルト軸力とし、ボルトの終局状態(破断もしくは破壊)まで載荷する。

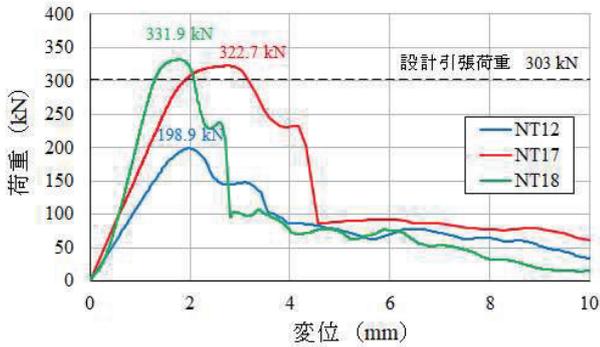


図-23 NT12～NT18荷重と変位との関係

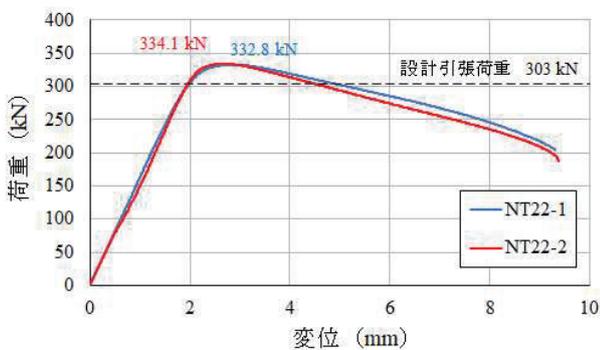


図-24 NT22荷重と変位との関係

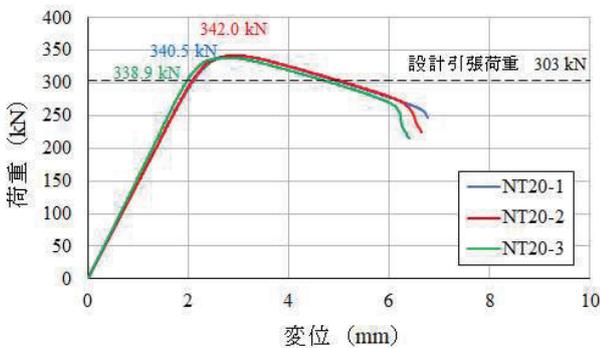


図-25 NT20荷重と変位との関係

表-2 試験結果のまとめ

記号	ナットの種類		試験結果 (試験体数)	
	呼び径 (d=22)	高さ (mm)	最大荷重 330kN以上	ねじ山のせん断破壊
NT22	1.0d	22.0	2 / 2	0 / 2
NT20	0.9d	19.8	3 / 3	0 / 3
NT18	0.8d	17.6	3 / 3	2 / 3
NT17	0.75d	16.5	1 / 1	1 / 1
NT12	0.5d	12.0	0 / 1	1 / 1



写真-2 NT12の終局状態



写真-3 NT22の終局状態

5. リラクセーション試験

(1) 試験目的と試験方法

第3章で得られた最適形状を基に切削加工した試験ボルトを用いて、環境配慮型高力ボルトのリラクセーション特性を把握することを目的とする。

試験方法は、標準すべり試験体と同形状とし写真-4に示すように実施する。

(2) 試験結果と考察

図-26の棒グラフはトルシア形高力ボルトと環境配慮型高力ボルトの軸力残存率を比較したものである。既往の研究によると、軸力残存率の差は3%未満であり、環境配慮型高力ボルトの特性はトルシア形高力ボルトと同等であると考えられる。



写真-4 試験体とそのセットアップ状況

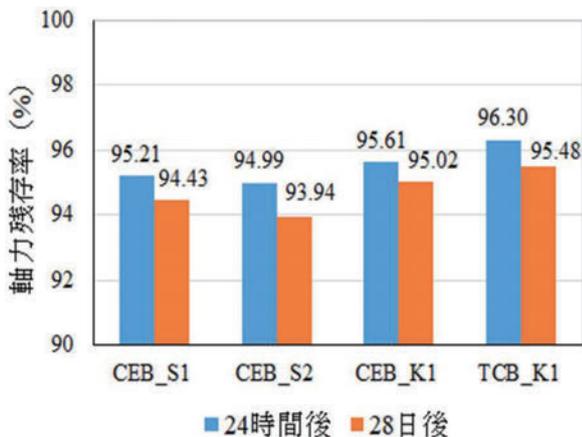


図-26 軸力残存率の比較

6. 環境配慮型高力ボルトの形状

現時点で想定される環境配慮型高力ボルトの形状と寸法は図-27に示す通りである。使用材料はトルシア形高力ボルトM22の首下長さ80mmを基準にし、その場合、トルシア形高力ボルトに対して12%、高力六角ボルトに対して18%削減される可能性があることが判明した。

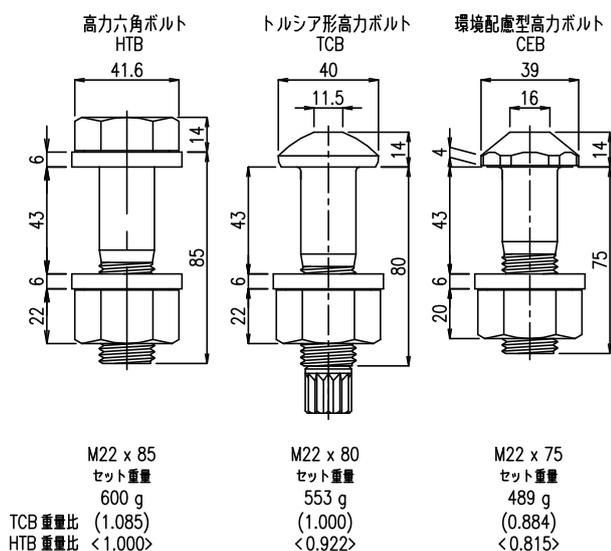


図-27 各種高力ボルトの比較 (単位: mm)

7. おわりに

本稿では、トルシア形高力ボルトと同等の力学性能を確保しつつ、使用材料減となる新しいボルト形状の開発を目的とし、その形状による特性をFEM弾性解析および高力ボルト性能確認試験を実施して検討した。本研究開発で得られた結果を以下にまとめる。

- ①ボルトセットとして、トルシア形高力ボルトと同等の力学性能を有していることをFEM弾性解析および高力ボルト性能確認試験により確認した。
- ②ボルト頭部の平面形状による被締結体の鋼板応力度への影響は小さいことが判明した。
- ③ナット高さは最大引張荷重と終局破壊状態から高力ボルトとしての性能を満足する高さとして、10%低い0.9dタイプを適用できる可能性を確認した。
- ④リラクゼーション特性は、軸力残存率と経過時間との関係および軸力残存率から、トルシア形高力ボルトと同等と考えられる。
- ⑤既存の締付機器等を使用できることなどの施工性の観点から六角形を採用した。
- ⑥ボルト製造については、量産化に向けた試作品を作成し、高品質・低コストになる方法を検討する。

今後、環境配慮型高力ボルトの実用化に向けては、実施工に供し得る高力ボルトとして製造可能であるための形状・品質・コスト等の検討、ボルト締付管理方法に対する検討、すべり試験による継手性能の検証等を計画・実施する必要がある。

最後に、新しい高力ボルトの開発にあたり、ご指導いただきました大阪公立大学大学院の山口隆司教授、並びにご協力いただいた関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 南邦明, 遠藤輝好, 小峰翔一, 藤野大地, 吉岡夏樹, 宮井大輔: 架設現場での高力ボルト締付け作業の実態と作業効率向上に向けた方策案, 橋梁と基礎, Vol. 53-9号, pp. 27-33, 2019.
- 2) 社団法人日本鋼構造協会: 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. 33~37, 2013.
- 3) 吉元大介, 山口隆司, 鄒瑩, 飯野元: 環境に配慮した新しい高力ボルトの開発, 構造工学論文集Vol. 69A, 2023年3月
- 4) 吉元大介, 山口隆司, 飯野元: 環境配慮型高力ボルトの開発に関する解析的研究, 土木学会第77回年次学術講演会, I-93, 2022.
- 5) 鄒瑩, 山口隆司, 吉元大介, 飯野元: 環境配慮型高力ボルトセットのナット形状に関する実験的検討, 土木学会第78回年次学術講演会, I-293, 2023.

2024.01.29 受付