

# 連続生産可能な 1800MPa 級超鉄鋼高力ボルトの開発に関する研究

橋梁工学分野 潘 超

## Abstract

近年構造物の大型化に伴う部材断面力の増加に伴い、1か所の接合部に多量のボルトが必要になり、接合部の巨大化や施工能率の低下となっている。そのため、これらを考慮したコスト削減と省力化の一つのソリューションとして高力ボルトの高強度化が強く望まれている。本研究では、物質・材料研究機構の木村勇次氏が開発された水素感受性が低い超鉄鋼鋼材（引張強さ 1800MPa 級）を用いて現在使っている高力ボルトの製造プロセスと機械で大量連続生産できる耐遅れ破壊超鉄鋼高力ボルトの開発を行う。材料強度が高くなれば、硬くなり、要求された高力ボルト形状を工場生産する加工性が悪く、生産機械の負荷が高くなり、生産機械の部品（金型）などの寿命が短くなる。そこで、超鉄鋼高力ボルトの開発には、以上のことを考慮し、FEM 解析による超鉄鋼高力ボルトの形状を設計し、優れた形状を用い、高力ボルトの性能試験を行う。

## 1. はじめに

高力ボルトの高強度化を図る上で最大の技術的課題は遅れ破壊の克服である。遅れ破壊とは、鋼材が静的な応力を負荷されてから、ある時間経過後突然破壊を生じる現象であり、水素脆化の一形態である<sup>1)</sup>。鋼材中の水素が増大すると急激に引張強度が低下している。遅れ破壊は鋼材の強度が高いほど発生しやすく、高力ボルトの場合、鋼材の引張強さが1200MPaを超えると発生が顕著になる。図-1には高力ボルトの強度の推移を示している。JIS規格としてF13T（引張強さ1300MPa）まで制定されていた高力ボルトが、1964年のF13T高力ボルトの遅れ破壊発生を契機に、1967年にまずF13TがJISから除外され、さらに1979年にF11T（引張強さ1100MPa）が実質的に使用禁止になって、高力ボルトの強度上限がF10Tまで後退した<sup>2)</sup>。しかし最近では、接合部のコンパクト化と省力化のニーズから建築分野において、F10Tを超えるF14T（引張強さ1400MPa）の耐遅れ破壊の高力ボルトが製品化され、実用に供されている<sup>3)</sup>。

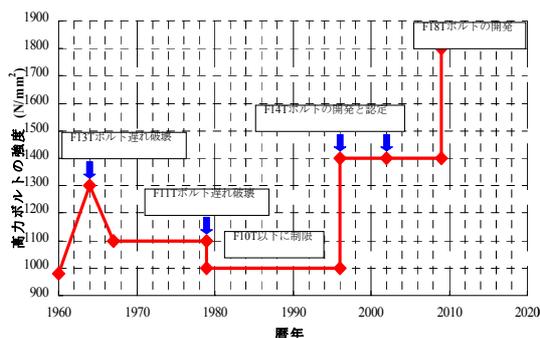


図-1 高力ボルトの強度の推移

このような背景の中、本研究では、物質・材料研究機構の木村勇次氏が開発された水素感受性が低い超鉄鋼鋼材（引張強さ 1800MPa）を用い、生産機械の負荷および部品（金型）の寿命を考慮し、FEM 解析による超鉄鋼高力ボルトの形状を設計し、優れた形状を用い、高力ボルトの性能試験を行う。

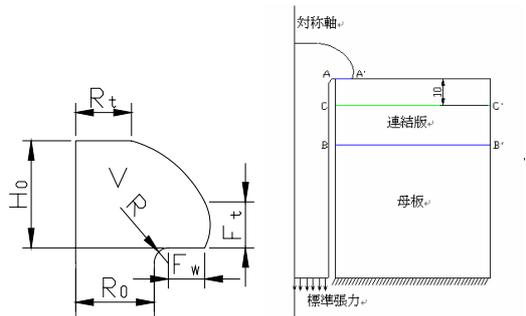
## 2. 高力ボルトの最適頭部形状

高力ボルト頭部形状については、高力ボルト頭部に発生する応力集中係数の大きさと部位および標準張力を導入時に高力ボルトが連結板に発生する接触圧を着目点とする。まず、様々な頭部形状に対して FEM 解析を行い、高力ボルト頭部に最大応力集中係数とその発生部位を把握する。次に、従来の S10T 高力ボルト頭部形状を基に、頭部体積を一定として頭部に対してパラメーターを変えて応力集中係数を調べることにした。そして、得られた解析結果をもとに、これらの中から優れた頭部形状に対して標準張力を導入した場合の連結板に発生する垂直応力を調べた。高力ボルト頭部加工性も考慮し、高力ボルト頭部の形状を改善する。そこで、応力集中係数解析は 1800MPa 級高力ボルト遅れ破壊防止のためである。また接触圧解析は 1800MPa 級高力ボルトの 1000MPa 級高力ボルトに比べての性能比較が目的である。

### 2.1 応力集中係数

高力ボルト頭部形状パラメーターとは解析モデルの概要図-2 に示す。解析は汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS6.7 を用い、弾性軸対称 FEM 解析である。従来 S10T

高力ボルトの頭部形状に基づき、頭部体積変動が5%の範囲で、頭部形状パラメーターを変えて絞った頭部形状を表-1に示す。



(1) 形状パラメーター (2) 解析モデル概要

図-2 頭部形状パラメーターと解析モデル概要

表-1 ボルト頭部解析モデル内訳

頭部形状	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
首下R (mm)	2.00	2.00	3.00	4.00	3.00	3.00	3.00
軸半径R <sub>0</sub> (mm)	11.10	11.1	11.1	11.1	10.00	10.00	10.00
頭部高さH <sub>0</sub> (mm)	13.77	13.40	13.53	13.77	13.00	12.50	14.00
頂部半径R <sub>t</sub> (mm)	7.89	7.45	7.83	7.90	7.50	6.00	7.50
座面幅F <sub>w</sub> (mm)	5.12	5.45	4.12	3.42	5.50	8.50	4.50
つば厚さF <sub>t</sub> (mm)	5.91	5.28	4.55	4.70	4.50	2.00	4.50
頭部体積V (mm <sup>3</sup> )	12.77	12.73	12.72	13.49	12.08	13.43	12.13

表-1に示す頭部形状N1が従来S10Tボルトの頭部形状であり、頭部形状N7がN2~N6の結果から基づいて実際加工可能な再設計した高力ボルト頭部形状である。それぞれ解析モデルの応力集中度解析の結果が図-4と図-5にまとめて示している。

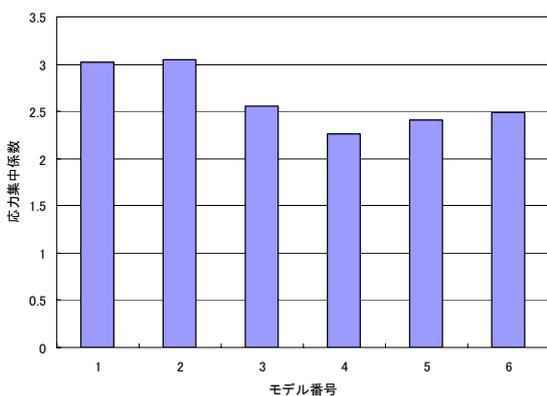


図-3 各解析モデルの最大応力集中係数

図-3により、解析モデルN4の応力集中係数は一番低くなっている。応力集中係数影響因子を考査のため、頭部形状パラメーターを着目して各解析モデルと比較すると以下の結果を考える。高力ボルト軸半径R<sub>0</sub>が一定の場合、高力ボルト首下Rと高力ボルト座面幅F<sub>w</sub>が大きくなるほど低減する傾向がある。

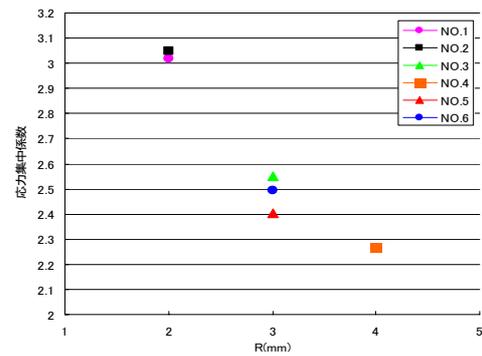


図-4 首下Rの大きさと応力集中係数の関係

図-4により、首下Rが大きくなるにつれて、応力集中度が低減することがわかる。また、首下R=2時の最大応力集中係数に対して首下Rが2mmから3mmまでに大きくなると最大応力集中係数は20%程度を下がった。また、首下Rが3mmから4mmまでに大きくなると最大応力集中係数は5%程度を下がった。

## 2.2 接触圧

1800MPa級超高力ボルトでは、締め付け張力が高くなることで座面圧縮応力が高くなり、標準ボルト張力の締め付けを行った際に被締め付け材（連結板）の塑性変形が危惧される。そこで、前節の各ボルト頭部形状（表-1中のN2~N6）と既存のS10Tボルト頭部形状（表-1中のN1）でF10TとF18Tレベルの標準ボルト張力を締め付けた時の性能を検討する。解析には、連結板の垂直応力が接触圧として作用すると考えられる。解析モデルの概要は図-2に示している解析概要と同じである。解析に用いる連結板と母板の寸法、材料を表-2に示す。

表-2 連結板と母板の寸法、材料表

部材名	厚さ (mm)	長さ (mm)	材料
連結板	25	50	SS400/SM490Y
母板	50	50	SM490Y

解析はABAQUS 6.7解析ソフトを用い、弾塑性軸対称FEM解析である。解析中の摩擦係数はボルトと連結板の間は0.15であり、連結板と母板の間は0.3である。解析結果の垂直応力出力面は連結板表面から10mm, 5mmおよび1mmである。解析に用いた応力-ひずみ関係は図-5に示す。また、高力ボルトの標準張力の算出式  $N = \alpha \cdot \sigma_y \cdot A_{be}$  ( $N$ : 設計ボルト張力,  $\alpha$ : 降伏点に対する比率,  $\sigma_y$ : ボルトの降伏耐力,  $A_{be}$ : 有効断面積)<sup>4)</sup>より、S10T場合は205kNであり、S18Tの場合は降伏耐力がS10Tの1.8倍でほかの係数がS10Tと同じで概算で369kNである。

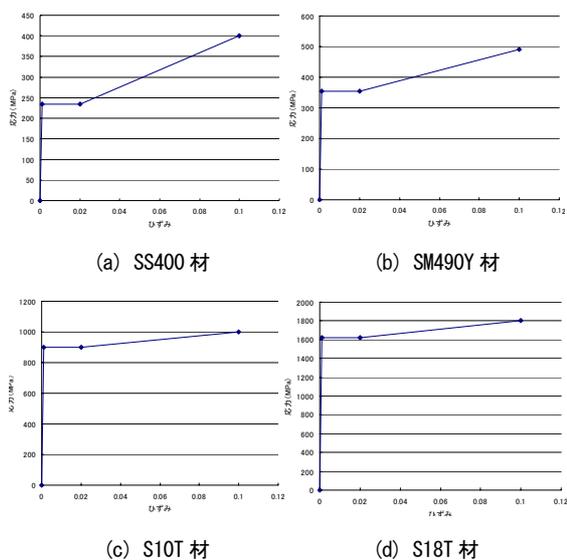


図-5 解析に用いた応力-ひずみ関係

(1) 連結板内垂直応力分布

連結板 SS400 材, 母板 SM490Y 材, F10T 張力の場合, 解析より得られた結果は図-6 に示す.

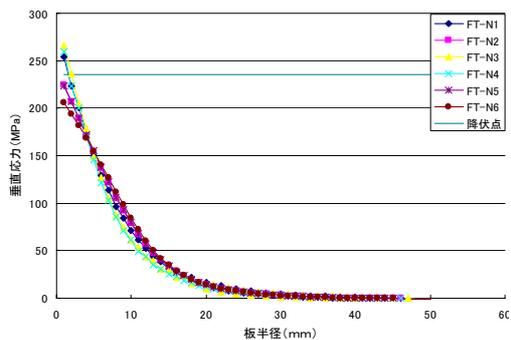


図-6 F10T 張力, 連結板 (SS400), 母板 (SM490Y) の結果

図-6 により, 解析モデル FT-N1 (従来 S10T ボルト) が F10T レベルの標準ボルト張力を締め付けた時に連結板表面から 10mm 深さの最大垂直応力は連結板の降伏点 (235MPa) より 20MPa ほどを超えている. 解析モデル FT-N2, FT-N4, FT-N5 および FT-N6 は超えていない.

連結板 SS400 材, 母板 SM490Y 材, F18T 張力の場合, 解析より得られた結果は図-7 に示す.

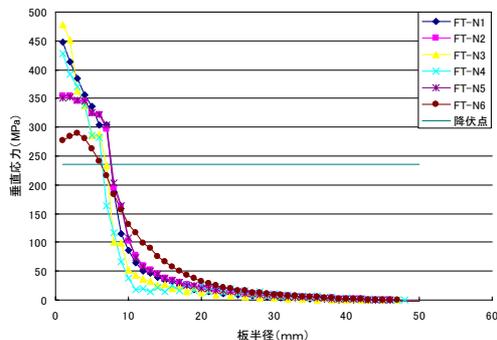


図-7 F18T 張力, 連結板 (SS400), 母板 (SM490Y) の結果

図-7 により, F18T レベルの標準ボルト張力を締め付け

た時, 各モデル最大垂直応力は連結板の降伏点 (235MPa) より大幅に超えている. したがって, F18T レベルの標準ボルト張力 (1800MP 級高力ボルト) を用いられる接合部に連結板の材料は SS400 材以上が必要である. そこで, 連結板材料は SM490Y 材に変え, 解析結果を図-8 に示す.

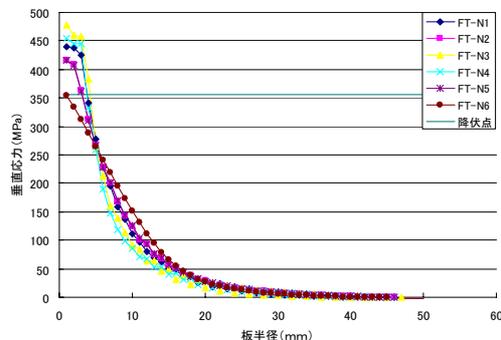


図-8 F18T 張力, 連結板 (SM490Y), 母板 (SM490Y) 結果

図-8 により, 連結板材料 SM490Y 材を用いた時, 解析モデル FT-N6 のみ最大垂直応力は連結板降伏点 355MPa の付近である. それ以外の解析モデルは連結板の降伏点 (355MPa) より大幅に超えている.

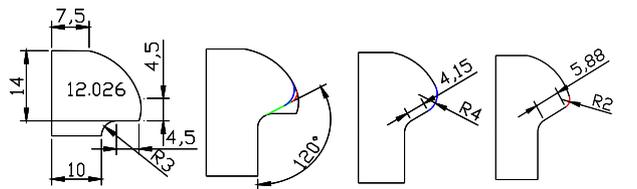
以上の解析結果より, 解析モデル FT-N6 のように座面幅 (図-2 に示している) を大きくすれば, SM490Y 材連結板を用いることが可能である. しかし, ボルトの加工上で, なお 1800MPa 材料はそこまでを伸びることが不可能である. したがって, ボルトと連結板の間に座金を入れることが考えられる.

(2) 座金を考慮した場合

頭部形状が表-1 に示している N2~N6 に基づいて実際加工可能な再設計した形状 N7 で, 座金がなしとありの FEM 解析を行った. 解析モデルは FT-N7 (座金なし) と FT-N7-Z (座金あり) である. 解析モデル FT-N7 の結果が以後の解析結果の比較対象である. 解析における諸条件は前述と同じ, F18T 張力, 連結板 SM490Y 材である.

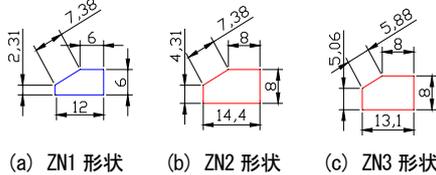
(3) 座金と頭部の形状に着目した場合

座金が必要になることの方, 負荷を低減のために, ボルト頭部成形の塑性体積を減らすことより, 表-1 に示している頭部形状 N7 の上で座面にテーパを入れる頭部形状 (図-9 に示す) を考える. また, 座金の幅および厚さの影響を考慮した形状は図-10 に示す. 各解析モデルの連結板表面から 10mm ところの垂直応力分布はほぼ同じである. そこで, 以後の解析結果と比較のため解析モデル TT-N7t2-ZN1 を代表とする. また, 解析モデル TT-N7t2-ZN1 は連結板表面から 10mm, 5mm, 1mm での応力分布も出した.



(a) N7 頭部形状 (b) 頭部テーパ角度 (c) 頭部形状 N7t1 (d) 頭部形状 N7t2

図-9 120度テーパ頭部形状



(a) ZN1 形状 (b) ZN2 形状 (c) ZN3 形状

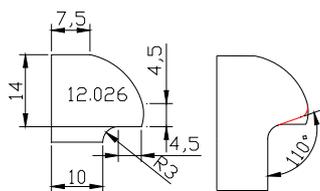
図-10 120度テーパ頭部形状と合わせた座金形状

解析モデル名の説明: TT-N7t1-ZN1 → 座金形状 (図-10 と 12 に示す)

テーパ頭部形状 ← 頭部形状寸法 (図-9 と 11 に示す)

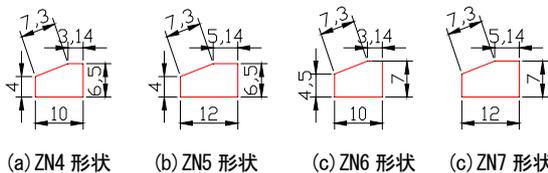
#### (4) 頭部テーパ角度に着目した場合

同じN7 頭部形状に基づき、テーパ角度が120度を110度に変え、FEM 解析を行った。



(a) N7 頭部形状 (b) 頭部形状 N7t3

図-11 110度テーパ頭部形状



(a) ZN4 形状 (b) ZN5 形状 (c) ZN6 形状 (d) ZN7 形状

図-12 110度テーパ頭部形状と合わせた座金形状

#### (5) まとめて比較

各代表解析モデルの連結板表面から10mm, 5mm, 1mm各深さでの垂直応力分布をまとめて、図-13, 図-14 および図-15 にそれぞれ示す。

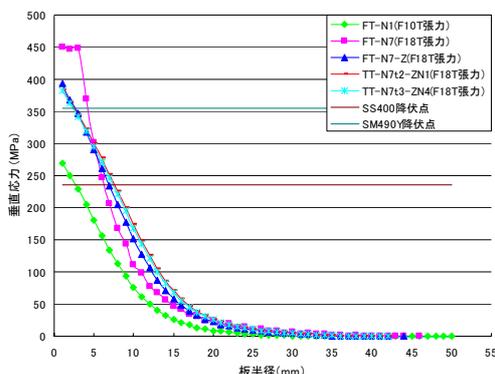


図-13 深さ10mmで各代表解析モデルの結果

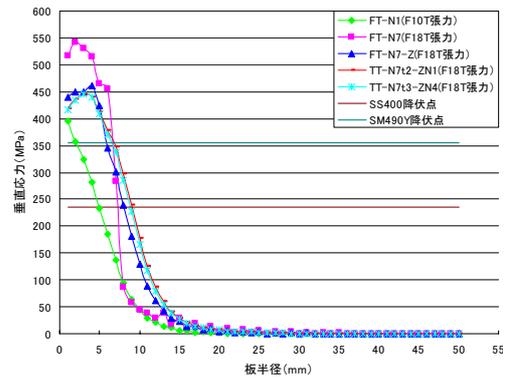


図-14 深さ5mmで各代表解析モデルの結果

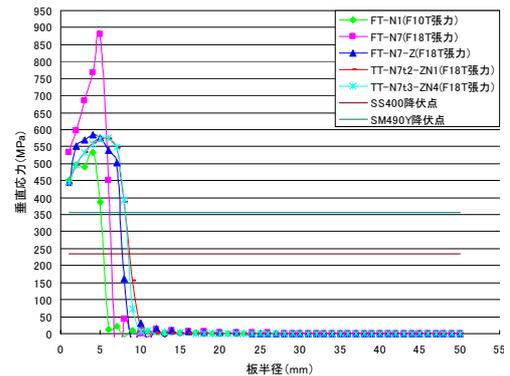


図-15 深さ1mmで各代表解析モデルの結果

F18Tの標準張力で座金ありとなしについて、座金ありの解析モデルはFT-N7-Z, TT-N7t2-ZN1とTT-N7t3-ZN4であり、座金なしの解析モデルはFT-N7である。各深さで座金ありの場合は座金なしの場合より垂直応力が大幅に減少していることが見える。また、座金を入れると連結板SM490Y材を用いることできる。

頭部テーパありとなしについて、頭部テーパありの解析モデルはTT-N7t2-ZN1とTT-N7t3-ZN4であり、頭部テーパなしの解析モデルはFT-N7-Zである。各深さで、頭部テーパありと頭部テーパなしの結果はほぼ同じである。ただし、テーパありの場合はテーパなしの場合より垂直応力の範囲がやや広く、摩擦接合に有利であると言える。また、テーパありの場合は頭部体積を少なくなる（頭部成形で塑性体積も少なくなる）ことにより加工機械の加工荷重を減少できると考えられる。

### 3. 高力ボルトの最適ねじ形状

高力ボルトが実際締め付けるとき、ねじ部の純断面積が軸部より少ないので、かなり高い応力およびひずみがねじ山の谷底ところに集中し、これがボルト疲労破壊や遅れ破壊が発生する原因である。本研究は1400MPa級超高力ボルトよりさらに大きな標準軸張力を導入し、各ネジ山での荷重分担量、およびねじ底における応力とひず

みの分布を正確に把握するため、過去の研究を模擬した解析を行った。解析に用いた高力ボルトの材料はS10T、S14TおよびS18Tである。解析はABAQUS 6.7解析ソフトを用い、弾塑性軸対称FEM解析である。解析中の摩擦係数はねじ部以外が0.3であり、ねじ部が0.2である。

(1) JISねじ形状, SHTBねじ形状および新しい形状

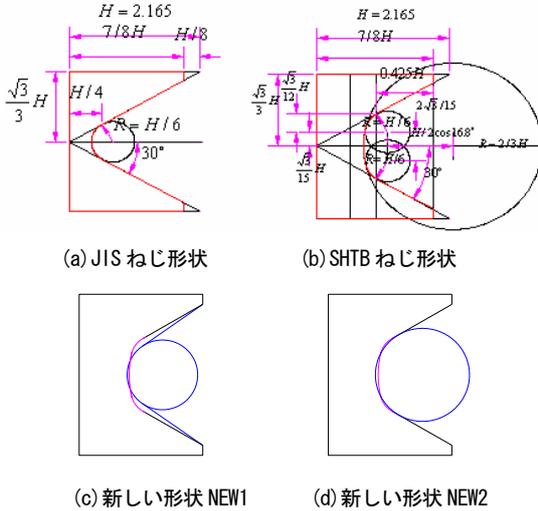


図-16 JISねじ形状, SHTBねじ形状および新しい形状

(2) 解析結果

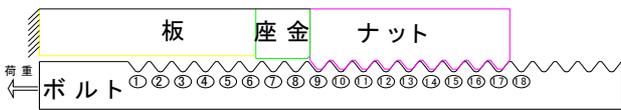


図-17 解析モデル概要およびねじ位置番号

図-17に示すように各ねじ形状について解析を行った。解析には、F18標準張力を導入した時の最大主応力および最大相当塑性ひずみを着目する。

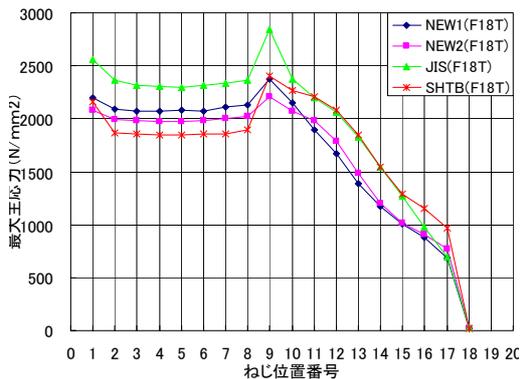


図-22 ねじ形状による最大主応力の比較

図-22により、ねじ番号2~8(遊びねじ部分)の最大主応力はJISねじが2300MPa前後、SHTBねじが1850MPa前後で、新しいねじ形状NEW1が2000MPa前後、新しいねじ形状NEW2が1950MPa前後である。ねじ番号9(ナット座面側第1ねじ)の最大主応力はJISねじが2850MPa前

後、SHTBねじが2400MPa前後、新しいねじ形状NEW1が2350MPa前後、新しいねじ形状NEW2が2200MPa前後である。以上の結果より、遊びねじ部分の最大主応力についてSHTBねじ(1850MPa)と新しいねじ形状NEW2(1950MPa)より100MPa程度低い。また、ナット座面側第1ねじ部の最大主応力についてSHTBねじ(2400MPa)と新しいねじ形状NEW2(2200MPa)より200MPa程度高くなる。

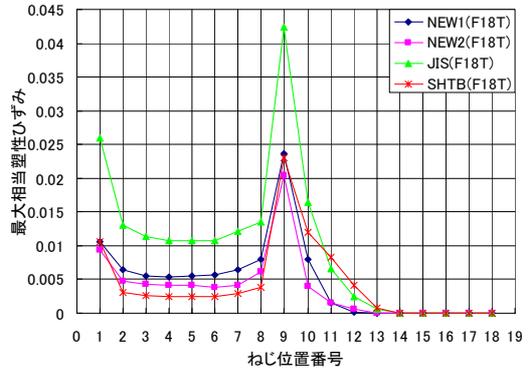


図-23 ねじ形状による最大相当塑性ひずみの比較

図-23により、ねじ番号2~8(遊びねじ部分)の最大相当塑性ひずみはJISねじが0.0110前後、SHTBねじが0.0025前後、新しいねじ形状NEW1が0.0053前後、新しいねじ形状NEW2が0.0041前後である。ねじ番号9(ナット座面側第1ねじ)の最大相当塑性ひずみはJISねじが0.042前後、SHTBねじが0.0235前後、新しいねじ形状NEW1が0.0240前後、新しいねじ形状NEW2が0.0205前後である。

以上の結果より、遊びねじ部分の最大相当塑性ひずみについてSHTBねじ(0.0025)と新しいねじ形状NEW2(0.0041)より39%程度低い。また、ナット座面側第1ねじ部の最大主応力についてSHTBねじ(0.0235)と新しいねじ形状NEW2(0.0205)より15%程度高くなる。

#### 4. 新しい頭部形状性能評価試験

本試験は、前章のFEM解析結果より優れた形状(TT-N7t3-ZN1)の高力ボルトを試験で性能を評価するものである。優れた形状(TT-N7t3-ZN1)は従来S10Tトルシアボルトから軸部から110度テーパを削ったものである(以下はテーパ有りボルトと称す)。評価する参照物としては、優れた形状の高力ボルト頭部体積と同じの条件による従来S10Tトルシアボルトのつば部を均等に薄く削ったものである(以下はテーパ無しボルトと称す)。(1) 単純引張試験

載荷治具を用いて、万能試験機で圧縮することによる高

力ボルトに引張力を作用させ、高力ボルト破断まで載荷する。試験で得られた結果は図-24 に示す。

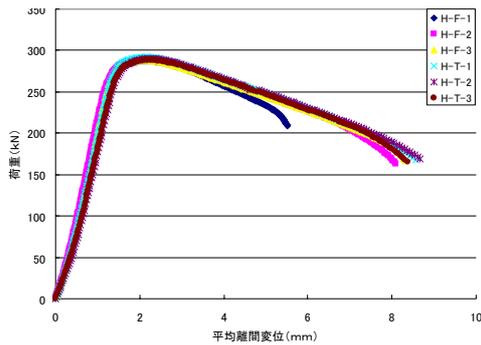


図-24 荷重と平均離間変位の関係

図-24 により、テーパー無しボルトはテーパー有りボルトと同様の傾向である。また、テーパー無しとテーパー有り高力ボルトは従来 S10T トルシア高力ボルトの頭部体積より少なくなり、従来 S10T トルシア高力ボルトの引張強さ (297kN) と同じである。したがって、テーパー有り高力ボルトは頭部体積が従来 S10T トルシア高力ボルトより減らしても同じ引張強さ (297kN) を持つことができ、同等 F10 標準張力を締付けることもできる。

## (2) ナット回転角試験

ナット回転角試験は、新しい形状高力の締付けトルクを検討するためのものである。試験で得られたボルト張力とナット回転角、ボルト張力とトルク関係は図-25 と図-26 に示す。

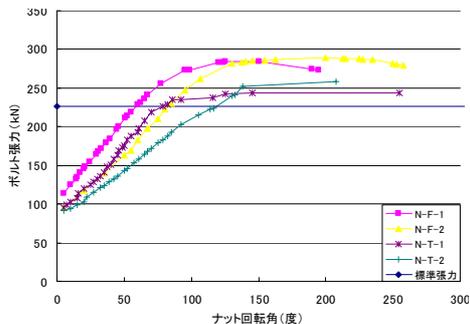


図-24 ボルト張力とナット回転角の関係

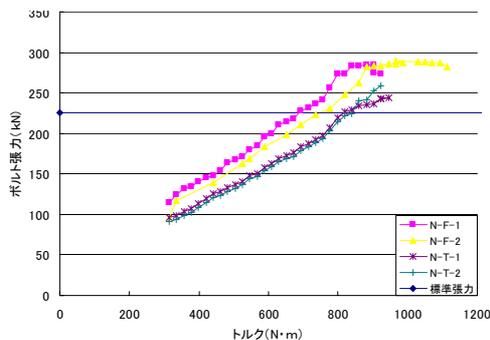


図-25 ボルト張力とトルクの関係

図-24 と 25 によるボルト張力 225 kN まで、それぞれの

関係は線形になっており、従来 S10T ボルトと同じである。

## (3) リラクゼーション試験

高力ボルト締め付ける後の張力の経時変化を調べるためにリラクゼーション試験を行った。

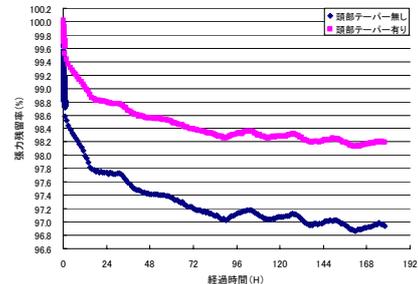


図-26 ボルト張力の経時変化

図-26 により、テーパー無しとテーパー有り高力ボルトのリラクゼーション試験結果は同じ傾向である。但し、ボルト締め付け一時間経過後、二者の張力の残存率差は大きくなる形跡が見える。90 時間前後で二者とも大幅低減が止まっていることを見える。

以上の結果より、テーパー有り高力ボルト (新しい形状) はテーパー無し (従来形状) と同様以上のリラクゼーション特性を示している。

## 5. 結論および今後の課題

(1) 首下 R が大きくすれば、応力集中度が低減し、金型の延命することもできる。実際加工の適合性を考慮した上で R 大きさが 3mm に提案している。

(2) 解析結果によりボルトと連結板の間に座金が必要となった。圧造負荷が減少できることと摩擦接合に有利のことを考え、テーパー頭部形状を提案する。

(3) 試験結果より、新しい頭部形状高力ボルトは従来 S10T 高力ボルトと同等以上の力学特性ことを認められる。また、省エネルギーの観点から、新しい頭部形状高力ボルトの頭部体積が少なく、加工機械負荷の低減および金型の延命化を改善することが期待できる。

## 参考文献

- (1) 独立行政法人 物質・材料研究機構：新構造の提案と求められる材料技術, PP53-58, 1995. 3
- (2) 田中淳夫, 高力ボルトの規格と使用状況の変遷, 鉄鋼技術, PP64-66, 1993. 9
- (3) 宇野暢芳, 久保田芳, 永田匡宏, 超高力ボルト SHTB, 新日鉄技報, 第 387 号, (2007)
- (4) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針 (案)

## 討 議 等

### ◆討議 [ 木内龍彦 講師]

高力ボルトにおける遅れ破壊の原因は腐食か.

◆回答：高力ボルトの材料による応力集中部に水素が集まり，遅れ破壊を発生するのであり，腐食ではない.

### ◆討議 [ 谷池義人 教授]

1800MPa 超鉄鋼高力ボルトにはメッキは不要か.

◆回答：メッキすると高力ボルトの強度が下がる．本研究ではメッキ不要と考えている.

### ◆討議 [ 山口隆司 教授]

1800MPa 超鉄鋼高力ボルトの開発に対する要求性能は何か.

◆回答：形状による高力ボルトの応力集中の低減，製造過程での高力ボルトの加工性（機械への負荷，金型の寿命など）.

### ◆討議 [ 角掛久雄 助教]

超高力ボルトだからこの形状を提案しているのか.

◆回答：従来の形状を 1800MPa 超鉄鋼高力ボルトに使用すると，応力集中係数が高い，遅れ破壊が発生しやすく，本研究で開発した形状を提案している.

### ◆討議 [ 木内龍彦 講師]

引張試験の結果から応力はどの程度発揮するか.

◆回答：引張試験の結果から，引張強度は約 1000MPa であった.