

機関番号：82108
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2008～2010
課題番号：20246105
研究課題名(和文) 1800MPa級超高力ボルトを実現するための材料・土木・建築分野の学際的基礎研究
研究課題名(英文) A fundamental study on the fabrication of a1800MPa-class ultrahigh strength bolt
研究代表者 津崎 兼彰 (TSUZAKI KANEAKI) 独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・センター長 研究者番号：40179990

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、超高力ボルト創製に関する基礎研究を材料・建築・土木分野の研究者が共同で行った。その結果、1800MPa級超高力ボルトを実現するための最適材料化学成分と金属組織ならびにボルト形状を提案した。

## 研究成果の概要(英文)：

A fundamental study on the fabrication of an ultrahigh strength bolt has been carried out through the collaboration among the researchers in the fields of metallurgy, architecture, and civil engineering. The optimized chemical composition and microstructure of the steel and bolt shape were proposed to realize 1800 MPa-class ultrahigh strength bolt.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2010年度	16,300,000	4,890,000	21,190,000
年度			
年度			
総計	34,800,000	10,440,000	45,240,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、構造・機能材料

キーワード：建築構造・材料、土木材料、構造・機能材料、材料加工・熱処理、接合

## 1. 研究開始当初の背景

東京オリンピックをひかえた1960年代前半、東海道新幹線や名神・東名高速道路などの社会インフラの整備が行われた。この時期に高力ボルトが開発され、これらインフラ建設に貢献した。これまでのリベット接合に取って代わり、火気を必要としない、打ち込み時の騒音から解放されるなどの大きなメリットをもたらしたのである。高力ボルトとはJISB1186-1195で規定される800MPa以上の引

張強度を持つ鉄鋼製のボルトである。

現在、土木・建築分野ではF10Tの高力ボルト(引張強さが1000~1100MPa)による摩擦接合が主流であるが、都市内高架橋などの都市部のインフラ整備には、施工費用とともに施工期間の圧縮などが強く求められており、ボルト本数を低減できる土木・建築用高力ボルトの高強度化が希求されている。また、超高層建築物をはじめとする部材の薄肉化や高強度化に対してより一層のボルトの高強

度化が求められている。最近ではF10Tの約1.5倍に相当する軸力の導入が可能なF14T超高力ボルト（引張強さ1400MPa～1600MPa）が製品化され建築分野での利用実績が増えている<sup>1)</sup>。さらに2000MPa級の超高力ボルトが実用化されれば、接合部の更なるコンパクト化が可能となり鋼構造物のデザインも変革できる。すなわち、ボルトの超高強度化によって、省資源化、省力化、省エネルギー化そしてCO<sub>2</sub>削減という大きな波及効果が期待できる。

ところが引張強さが1200MPaを超えた低合金鋼（炭素以外の合金元素の添加量が10%以下）では遅れ破壊が深刻な問題であり、高力ボルト高強度化の大きな妨げとなってきた。遅れ破壊とは、大気腐食によって水素が発生、鋼材中に侵入して鋼材が脆化して起こる破壊で、時間遅れ破壊の略称である。室温において鋼中で応力集中部に拡散集積する水素、いわゆる拡散性水素が遅れ破壊の原因である。この遅れ破壊、すなわち安全性の問題のため、F14T超高力ボルトが開発されるまでの約30年間、土木・建築用高力ボルトの高強度化はF10Tの高力ボルトで頭打ち状態であった。

研究代表者らは、独）物質・材料研究機構（NIMS）で1997年～2005年度まで遂行された超鉄鋼プロジェクトにおいて、まず1800MPaの引張強度で耐遅れ破壊性に優れた1800MPa級低合金鋼（0.6%C-2%Si-1%Cr-1%Mo鋼＝プロトタイプ鋼）<sup>2)</sup>を開発した。ついてプロトタイプ鋼材を用いて、ボルトメーカーの既存の頭部熱間圧造、ねじ部冷間転造の設備で、JIS B1180で規格されたM22六角ボルト（引張強さ1700MPa）の試作に成功した<sup>2)</sup>。ところが、既存のF10Tと同じねじ形状では、ボルトの大気暴露試験でボルトのねじ部を起点とした遅れ破壊が頻繁に発生するという問題点があった。しかも引張強さが1700MPaを超える超高強度鋼材では切欠靱性が低く、ボルトの引張変形能が低いという問題点もあった。

高軸力のボルト締め付けに際しては塑性ひずみも大きくなるため、ねじ部を起点として遅れ破壊が起こることは良く知られている。したがってボルトの機械的性能を向上する主な方策として、（1）素材の耐遅れ破壊特性を向上することに加えて、（2）ボルトの形状を工夫してねじ部への応力集中を低減することが一般に提案されている。例えば、前述のF14Tボルトでは、拡散性水素の許容量が大きい鋼材の開発と遅れ破壊の起こりにくいボルト形状の開発により耐遅れ破壊性能の向上が図られている<sup>1)</sup>。具体的には、Mo、Vの炭窒化物等の鋼中水素をトラップするナノサイズの粒子をマトリクス中に微細に分散させて許容水素量を大きくした鋼材を素材とすると共に、ボルトの（1）新ねじ

形状の開発、（2）ボルト軸からねじ部への移行部形状の改良、（3）ボルト頭部首下曲率半径rの増大、（4）ナット形状の変更により、従来のF10Tの高力ボルトとは異なる独自の形状が開発されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記背景を踏まえて、安全安心な社会基盤を効率良く達成するために、都市内高架橋や高層建築などに汎用可能な1800MPa級超高力ボルトを実現することを目指して、材料・建築・土木分野の研究者がチームを組んで材料化学成分と金属組織ならびにボルト形状の最適化のための基礎研究を行った。まず、（1）成形性と部品強度を満足させるための材料化学成分の最適化を行った。ついで、（2）得られた鋼材を用いて、ボルト締結時の施工性や地震などの巨大力の負荷を考慮したボルト形状の検討を行ってボルトの試作を行った。そして、（3）ボルトの機械的性能を評価して提案するボルト形状の検証を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 鋼材の最適化

プロトタイプ鋼の問題点は、炭素量が0.6 mass%（以下mass%は単に%と記す。）と多いために、靱性が低いことに加えて、軟質化が困難で冷間成形性が従来材よりも劣ることであった。表1に実験で用いた鋼材の化学成分を示す。なお、P、Sの含有量は10 mass ppm以下である。プロトタイプ鋼（C鋼）からCとSi量を変えた鋼材（A、B鋼）を真空溶解で溶製し、鋼材の軟質化挙動と成形性の関係、ならびに450℃～650℃焼戻軟化挙動を調査した。その結果、冷間成形性と1800MPaの引張強さを満足させるための材料化学成分および熱処理条件（＝金属組織）の最適化を行った。

表1 供試材の化学組成 (mass%)

鋼材	C	Si	Mn	Cr	Mo
A	0.52	0.98	0.2	1.02	1.00
B	0.51	1.99	0.19	1.02	1.00
C	0.59	1.99	0.20	1.02	1.01

ここで得られた鋼材について、引張変形特性、遅れ破壊特性を評価し、ボルト形状を設計するための材料力学特性データを取得した。

### (2) ボルト形状の検討とボルトの試作

上記3. 1で合金成分が最適化された鋼について、150 kg真空溶解・ casting、ならびに熱間鍛造のプロセスによりM22ボルト用丸棒素材を作製した。素材は軟質化焼鈍処理を施した後、M22トルシア型ボルトを作製した。ボ

ルト頭部は既存のボルトフォーマーにより冷間で作製した。ボルト成形体は焼入れ・焼戻処理を施してボルト製品とした。試作したボルト製品の基本性能は、JIS B1186 の評価法に従って調査した。

ボルト製品の引張変形性能に及ぼす軸径の影響は以下の手順で調査した。図1に加力概要図を示す。加力はアムスラー型万能試験機で圧縮力を加え、治具を介して試験体に引張力を作用させた。変位計を鋼板の4辺に取付け、上下の鋼板の相対変位を試験体が破断するまで測定した。なお、試験は、事前にキャリブレーション試験を行い、張力管理により、締め付けを行って、ボルト製品のねじ部の降伏耐力の0.75倍に相当する初期張力(=0.75×降伏強さ×Ae)を導入した。この試験により、種々の軸径を有するボルト製品の変位量と荷重の関係を調査した。

ねじ部については、FEM解析により最適なねじ形状を見出した後、試作したボルト製品の引張試験により解析結果の妥当性を検証した。

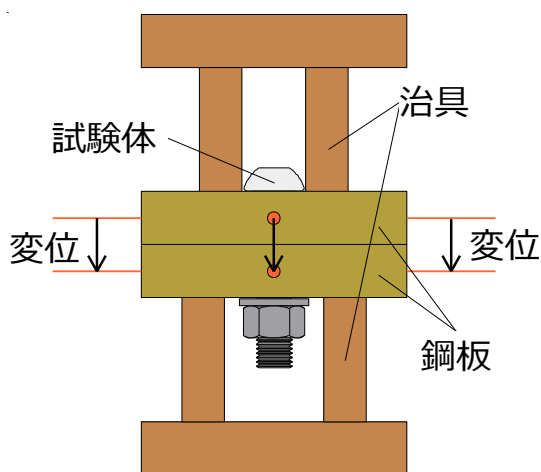


図1 ボルトの加力概要図

#### 4. 研究成果

##### (1) 鋼材の最適化

図2は、920℃から焼入した鋼材の硬さと焼戻温度の関係を示す。図中のカッコ内の数値は、軟質化処理後の鋼材のビッカース硬さを示す。軟質化処理後の硬さはC→B→A鋼の順に低くなっている。よって、これまでに開発してきたプロトタイプ鋼(C鋼)に対して、C量とSi量を下げるほど鋼材の軟質化に効果がある。その一方で、(1)1800MPaの引張強度を達成するにはビッカース硬さ520以上、(2)Mo炭化物の析出に関連した水素トラップ機能が発現し、耐遅れ破壊特性の改善が期待される焼戻処理温度域は530℃~600℃であり、この条件をA鋼は、満たさない。この結果から、冷間成形性と1800MPaの引張強さを

を満足させるための最適な鋼材としてB鋼を選択した。

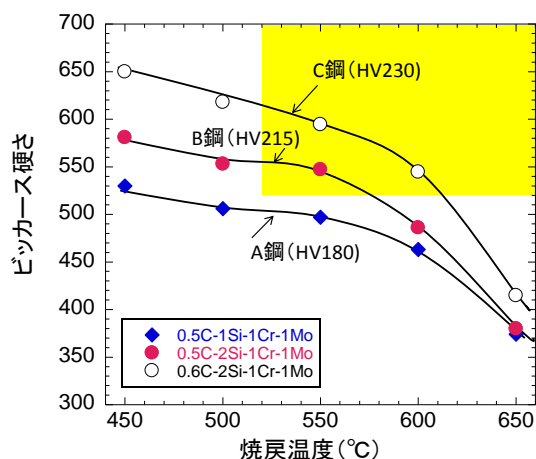


図2 焼戻温度と硬さの関係

図3はA鋼、B鋼、ならびにC鋼の切欠試験片の応力集中係数と切欠引張強さとの関係を示す。ここでは万能型引張試験を用いて、クロスヘッドスピードが0.005mm/minで試験片を破断するまで試験した。なお、比較として、JIS-SCM440鋼材(引張強度=1400MPa)のデータも示す。SCM鋼材と比べて、B、C鋼材で切欠引張強さの応力集中係数依存性が高く、応力集中係数を低くすることによって高い切欠引張強さを得ることができる。

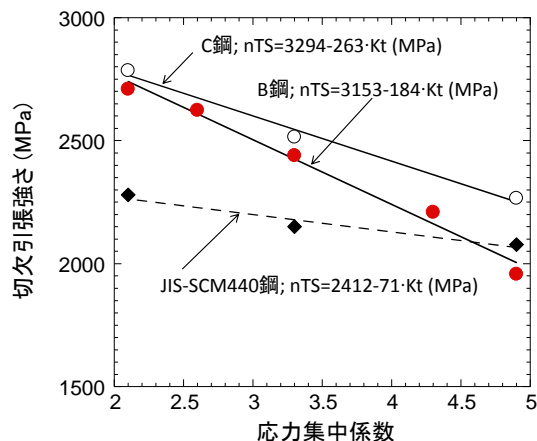


図3 応力集中係数と切欠引張強さの関係

例えば、図4は低歪速度引張(クロスヘッドスピード=0.005mm/min)による水素割感受性試験の結果である。なお、鋼中の水素量は昇温脱離分析法で測定し、100℃/hで試験片を加熱し300℃までに放出される水素量を拡散性水素量として定義した。同じ負荷荷重で拡散性水素の許容量を比べた場合、例えば負荷荷重1400MPaでは、図中に矢印で示すようにSCM440鋼よりもC鋼の方が許容水素量が高い。A鋼では切欠底の応力集中係数を小さ

くすること、すなわちねじ部への応力集中を小さくすることでさらに許容水素量を高くできる。

以上の結果は、B鋼材について、ねじ部への応力集中を低減できるボルトの形状設計ができれば、ボルトの機械的性能を向上できることを示している。

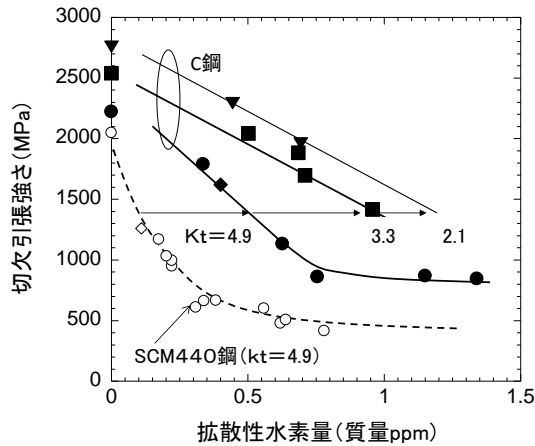


図4 鋼中の水素量と切欠引張強さの関係

### (2) ボルト軸形状

図5は、JIS-F10Tボルトに対して軸部径を変えたボルトの形状を示す。なお、ねじ形状は既存のF10Tボルトと同じである。ボルト成形体は940℃で1時間のオーステナイト化処理後、焼入れし、540℃で1時間の焼戻処理を施した。ボルト製品から切り出したJIS4号試験片の引張強さは1815MPaであった。

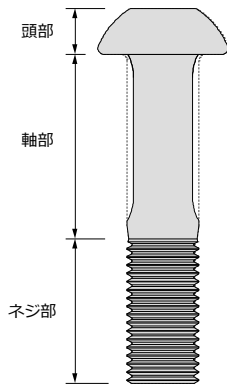


図5 ボルト形状の概略図

図6は、ボルトの最大変位量と最大荷重の関係を保ルト軸径の関数として示す。ボルト軸径が小さくなるほど最大荷重は低下するが、軸径19.5mmでは荷重をあまり低下させることなくボルトの変形量を急激に大きくできることがわかる。この試験体では終局時に軸部破断が生じており、ねじ部への応力集中が緩和されることに加えて、軸部での変形により大きな変位量が得られたものと考

える。すなわち、ボルト軸部の形状を適切に設計することでボルトの張力をあまり損なわずに優れたエネルギー吸収能力を發揮する超高力ボルトを作製できることが明らかとなった。

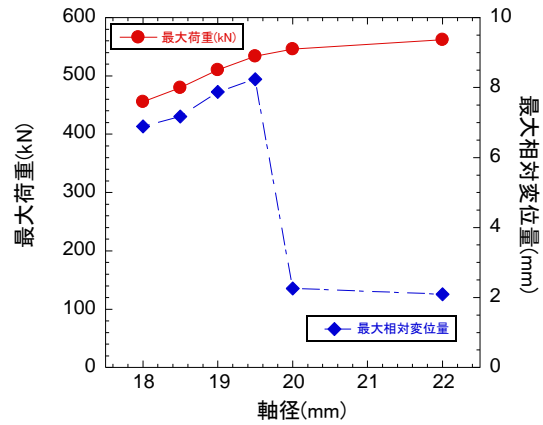


図6 ボルトの引張変形特性と軸径の関係

### (3) ボルトねじ部

素材力学特性パラメータとFEM解析により以下のようなねじ部を設計した。すなわち、ねじ部に等間隔ピッチで設けられるねじ山の相対するフランク面の角度が60°を有し、かつねじ部の谷底の形態がとがり山の高さをHとし、相対するねじ山のフランク面と谷底との移行点を前記とがり山底辺からH/2に設定するとともに、前記それぞれの移行点においてフランク面に当接する半径RがH/3の当接小円を描く弧状曲線を形成する方法でねじ形状(NEWねじ形状と呼ぶ)を規定した。ここでは、ねじ部の加工精度をJIS-F10Tボルトと同様に保ちつつ、ねじ部での応力集中をJISボルトよりもねじ部よりも低減できるように工夫した。JISねじ形状とNEWねじ形状の超高力ボルトを前記4.1のボルトと同様に製造して引張試験(ボルト張力なし状態で)を行った。JISねじとNEWねじ形状ボルトの破断荷重を図7に示す。NEWねじボルトはJISねじボルトより200MPa高い破断荷重を示し、耐荷性能が高いことが検証できた。

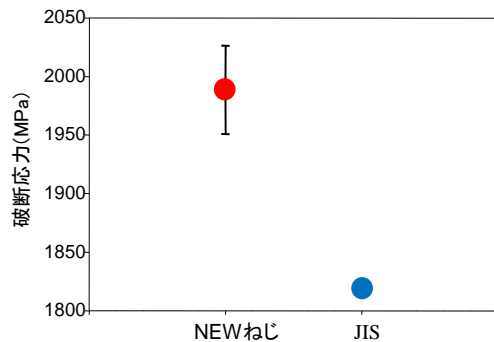


図7 ボルトのネジ形状と破断応力の関係

以上、本研究では、汎用高力ボルト (F10T) の 1.8 倍の世界最高強度を持つ量産可能な 1800MPa 級超高力ボルトの材料化学成分と金属組織ならびにボルト形状を提示できた。

参考文献

- 1) 宇野暢芳、F14T 高力ボルトの性能、2008 年度日本建築学会大会 (広島)、構造部門 (鋼構造)、高力ボルト接合における高強度化技術の最前線パネルディスカッション資料集、2008、1-10.
- 2) 木村勇次、秋山英二、津崎兼彰、超高力ボルトの創製と機械的特性、鋼構造論文集、第 14 巻、2007、121-127.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 山口隆司、増田浩志、木村勇次、超鉄鋼高力ボルトを用いた摩擦接合パイロット試験、鋼構造論文集、査読有、第 15 巻、2008、99-107.
- ② S. LI, E. AKIYAMA, Y. KIMURA, K. TSUZAKI, N. UNO and B. ZHANG, Sci. Technol. Adv. Mater., 査読有、Vol. 11, (2010), 025005.

[学会発表] (計 1 件)

- ① 木村勇次、高力ボルト高強度化の現状と将、2008 年度日本建築学会大会 (広島)、2008 年 9 月 18 日-20 日、構造部門 (鋼構造)、高力ボルト接合における高強度化技術の最前線パネルディスカッション

[図書] (計 3 件)

- ① 木村勇次、超高力ボルト (解説)、工業材料、第 57 巻、2009、34-35.
- ② 山口隆司、高力ボルト接合-接合法- (解説)、ふえらむ、第 16 巻、2011、317-323.
- ③ 増田浩志、高力ボルト接合-設計と施工- (解説)、ふえらむ、第 16 巻、2011、725-729.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：高力ボルト及びその製造方法

発明者：木村勇次、津崎兼彰、山口隆司、増田浩志

権利者：独) 物質・材料研究機構、大阪市立大学、宇都宮大学

種類：特許出願

番号：2011-269868

出願年月日：2011 年 12 月 9 日

国内外の別：国内

名称：高力ボルト及びその製造方法

発明者：木村勇次、津崎兼彰、山口隆司、増田浩志

権利者：独) 物質・材料研究機構、大阪市立大学、宇都宮大学

種類：特許出願

番号：2011-269993

出願年月日：2011 年 12 月 9 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津崎 兼彰 (TSUZAKI KANEAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構

新構造材料センター・センター長

研究者番号：40179990

(2) 研究分担者

山口 隆司 (YAMAGUCHI TAKASHI)

大阪市立大学・工学研究科・教授

研究者番号：50283643

増田 浩志 (MASUDA HIROSHI)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：90238907

木村 勇次 (KIMURA Yuuji)

独立行政法人物質・材料研究機構

新構造材料センター・主幹研究員

研究者番号：80253483