

超高力ボルトSHTB®

Super High Strength Bolt “SHTB®”

宇 野 暢 芳^{*(1)}
Nobuyoshi UNO
蟹 澤 秀 雄^{*(5)}
Hideo KANISAWA

久保田 学^{*(2)}
Manabu KUBOTA
山 崎 真 吾^{*(6)}
Shingo YAMASAKI

永 田 匡 宏^{*(3)}
Masahiro NAGATA
東 清三郎^{*(7)}
Kiyosaburo AZUMA

樽 井 敏 三^{*(4)}
Toshimi TARUI
宮 川 敏 夫^{*(8)}
Toshio MIYAGAWA

抄 録

ボルトの強度が従来のF10Tの1.5倍であり、遅れ破壊を克服した“超高力ボルトSHTB®”について述べた。遅れ破壊を克服するため、遅れ破壊特性の評価方法の開発、耐遅れ破壊特性に優れた鋼材の開発、遅れ破壊を起こしにくいボルト形状の開発、および暴露試験による実証試験を行った。SHTBの開発により、接合部を従来比2/3にコンパクト化することができ、建設費削減、工期短縮、施工安全性に寄与することができる。

Abstract

Super High Strength Bolt “SHTB®” which overcame the delayed fracture with strength 1.5 times strength of conventional F10T is described. To overcome the delayed fracture, development of evaluation method for delayed fracture susceptibility, development of steel with delayed fracture resistance, development of bolt shape with delayed fracture resistance and the atmospheric exposure test were carried out. By the development of SHTB, the joint can become 2/3 compared with the conventional joint. Consequently, SHTB contributes to the reduction of construction cost, the term of work shortening, and the construction safety.

1. 緒 言

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2分される。高力ボルト接合は工業製品である鋼材を工業製品である高力ボルトで締付けることで接合部を形成する接合法であるため、接合部の品質が溶接工の技量に強く依存している溶接接合に比べ、高度な技能を必要とせず容易に所定の品質が確保できる。一方、超高層建築をはじめ構造物の大型化が進み使用部材が厚肉化、高強度化する中で、従来からのF10T高力ボルト(引張強さ1000N/mm²級)だけでは、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が避けられないことから、高力ボルトの高強度化が強く望まれた。

このような市場の要請に対し、(1)実用的な範囲で厚板材、高強度材の高力ボルト接合を可能にすること、(2)高力ボルト接合部の本数を低減して、接合部のコンパクト化や施工の省力化、スピードアップを図ることを目標に、F15T級の超高力ボルトの実現を目指した。

しかし、開発に着手した当時は、遅れ破壊発生への危惧からF11T高力ボルトが実質的に使用禁止に追い込まれ、“安心して使用でき

る高力ボルトの強度上限はF10T”との認識が広く定着していた時期で、F15T級超高力ボルトの開発は技術への大いなるチャレンジであり、その実現には、(1)遅れ破壊特性の評価方法の開発、(2)耐遅れ破壊特性に優れた鋼材の開発、(3)遅れ破壊を起こしにくいボルト形状の開発、そして(4)実使用環境におけるボルトの暴露試験による耐遅れ破壊性能の実証などの、総合的な取組みを要した。

これらの取組みにより、鋼材の引張強さが1400N/mm²級であり、新しいねじ形状によりF10T高力ボルトの1.5倍の引張強さを有する“超高力ボルトSHTB®(以下、SHTB)”を開発した。SHTBは、1999年に建設大臣(現国土交通大臣)の一般認定を取得し、2001年に超高層ビルに初適用され、以後順調に適用が拡大している。

本報では、SHTBの技術および適用事例を紹介する。

2. 遅れ破壊の克服

2.1 遅れ破壊の発生プロセス

高力ボルトの高強度化を図る上で最大の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、ある時間経過後に突然破壊を生じる現象であり、水素脆化の一形態である。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

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 所長 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2195

*⁽²⁾ 室蘭技術研究部 主任研究員

*⁽³⁾ 建材開発技術部 部長

*⁽⁴⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員

*⁽⁵⁾ 名古屋支店 部長 工博

*⁽⁶⁾ 君津技術研究部 主任研究員 Ph.D

*⁽⁷⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

*⁽⁸⁾ (株)NSボルテン 製造本部 技術部 次長

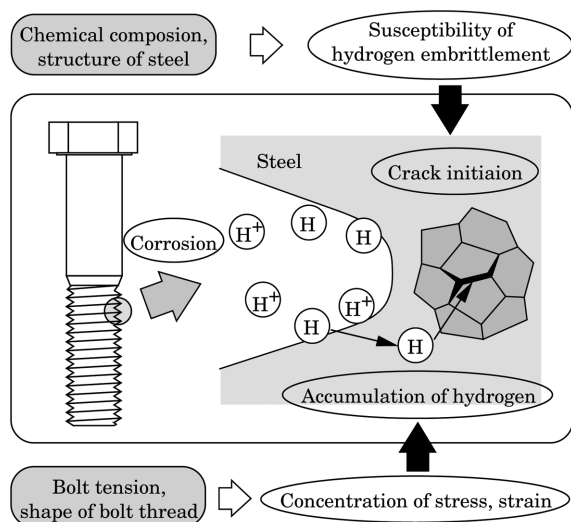


図1 遅れ破壊の発生プロセス
Process of delayed fracture initiation

場合、鋼材の引張強さが1200N/mm²を超えると発生が顕著になる。かつてJIS規格としてF13T(引張強さ1300N/mm²級)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F13TがJISから除外され、さらに1979年にF11T(引張強さ1100N/mm²級)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まで後退したのは、F11T以上の高力ボルトにおいては遅れ破壊発生の危惧を払拭できなかったからである。

遅れ破壊は鋼の製造プロセスや、熱処理雰囲気、酸洗、電気めっき、腐食などによって外部から鋼中に侵入する微量の水素によって引き起こされる。土木・建築用高力ボルトの遅れ破壊の原因となる水素は主に腐食によって発生するものであり、破壊に至るまでのプロセスは以下のように考えられる。図1はこれを模式的に示している。

- (1) ボルトが腐食し、ボルト中に水素が侵入する。
- (2) 侵入した水素が、ねじ部や首部下部などの応力や塑性歪の集中部に拡散、集積する。
- (3) 集積した水素の量とその鋼材の破壊に対する許容量を超えると、亀裂が発生する。
- (4) 亀裂発生による応力集中の増加により、より少ない水素量で亀裂が進展する。
- (5) 亀裂の成長がある段階に達すると、遅れ破壊による破断が発生する。

従って、使用期間中の高力ボルトの遅れ破壊発生を防止するためには、上記プロセスのいずれかを遮断するか、あるいは各プロセスの進行をできるだけ抑えることが有効である。SHTBは、許容水素量の大きな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を必須要件として実施して耐遅れ破壊性能の向上を図っている。

2.2 遅れ破壊特性評価方法の開発

遅れ破壊特性の評価方法には統一されたものがなく、各研究機関、評価機関が独自の方法で評価を行ってきた。従来の遅れ破壊特性評価方法の多くは、酸水溶液中での破断時間、あるいは破断応力比で遅れ破壊特性を評価している。これらの方法の問題点は、酸溶液中での鋼材中への水素侵入特性が、ボルトの実使用環境である大気腐食環境での水素侵入特性と異なる点にある。このため、酸溶液の種類によって鋼材の遅れ破壊特性の評価が逆転する、実験室での

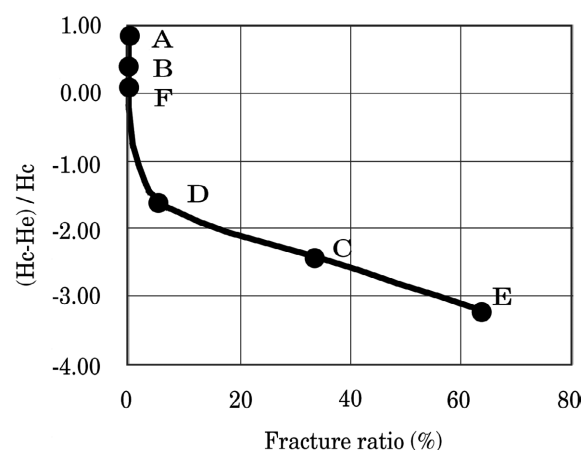


図2 暴露試験による遅れ破壊発生確率とパラメータ $[(H_c]-[H_e])/[H_c]$ の関係
Relationship between delayed fracture probability in exposure test and parameter $[(H_c)-[H_e])/[H_c]$

遅れ破壊特性と実環境中での遅れ破壊の発生とが対応しない、などの問題が生じる場合がある。従って、耐遅れ破壊特性に優れた鋼材開発のためには、まず鋼材の遅れ破壊特性を適切に評価できる方法の開発が必要である。

そこで、これらの問題の解決に向けて、鋼中水素量を測定するための昇温脱離分析法、および水素量を基準とする新たな遅れ破壊特性の評価方法を開発した^{1,2)}。この水素量を基準とする評価方法は、鋼材が破壊を起こさない水素量の上限値 $[H_c]$ と、実環境から鋼材中に侵入し、蓄積される水素量 $[H_e]$ を比較し、 $[H_e]$ に対して $[H_c]$ が十分大きい鋼材であれば使用中に遅れ破壊が発生しない、と判定する方法である。 $[H_c]$ はボルトの応力集中部を模擬した環状切り欠きノッチ付きの試験片に対して、陰極電解によって種々の水素量を導入し、その後外部への水素の放散を防ぐためにめっきを施し、室温放置によって試験片内部の水素濃度を均一化した後、実際のボルト締結時に導入される軸力に応じた静的応力を負荷し、破断までの時間を測定することによって測定する。 $[H_e]$ は実環境を模擬した乾湿繰り返し試験(CCT)を行い、腐食によって鋼材中に侵入、蓄積された水素量を測定する。

図2²⁾に化学成分と熱処理条件を変化させることによって引張強さを1078-1627N/mm²に変化させた6種類の鋼材について実験室で測定した $[H_c]$ 、 $[H_e]$ と、同じ鋼材について沖縄の海浜地区でボルトの暴露試験を行って求めた遅れ破壊発生確率との関係を示す。両者に良い相関関係が認められることから、本評価法を用いて実環境での遅れ破壊特性を評価することが可能であると考えられる。また、応力の荷形形態(例えば、繰り返し応力)や水素環境が高力ボルトの場合と異なる構造部材や機械部品の水素脆化特性の評価に適用する場合でも、本評価法のような水素量を基準とした方法であれば、 $[H_c]$ と $[H_e]$ の測定条件を適切に選択することによって評価することが可能である^{3,4)}。

2.3 遅れ破壊特性に優れた高強度鋼の開発

一般に高力ボルトは焼入れ、焼戻しによって強度を付与され、その組織は焼戻しマルテンサイトである。焼戻しマルテンサイト鋼の遅れ破壊の起点部は、多くの場合、旧オーステナイト粒界割れを呈することから、鋼材の耐遅れ破壊特性を向上するためには旧オーステナイト粒界を強化することが課題となる。旧オーステナイト粒界

強化の手法として、(1)P、Sなどの粒界偏析元素の低減⁵⁾、(2)Nb、Ti、Vなどのマイクロアロイング元素の添加によるオーステナイト結晶粒の微細化⁶⁾、(3)高温焼戻しによる旧オーステナイト粒界のフィルム上セメンタイトの析出防止⁷⁾、などが報告されている。

一方、高力ボルトの遅れ破壊は腐食によって外部から侵入する微量の水素で引き起こされることから、鋼中に侵入した水素の無害化により、耐遅れ破壊特性を向上することができると考えられる。Mo、V、Ti、Nbの炭化物が鋼中の水素をトラップする性質があることが見出されている^{2,8-11)}。Mo、Vの炭窒化物は、通常のボルトの焼入れ加熱温度において比較的多量にマトリックス中に固溶させることができるため、焼戻し時に析出する微細な炭化物として析出強化に利用することが可能となる。このため、Mo、V添加鋼の水素トラップ挙動と遅れ破壊特性との関係が詳細に調査されており¹²⁻¹⁶⁾、V炭化物を用いた水素トラップ鋼は、腐食が進行する場合(雨天など)は遅れ破壊に対して有害な水素をトラップして無害化し、腐食が停止する場合(晴天など)にトラップした水素を大気中に放出する機能を有していることが明らかにされている¹⁷⁾。

上記の粒界強化技術、水素無害化技術を用いて開発した高力ボルト用鋼の化学成分を表1に示す。Vは焼入れ加熱時には一部が未固溶の炭窒化物としてオーステナイト結晶粒界をピン止めすることによって結晶粒を微細化し、焼戻し時には焼入れ加熱時にマトリックス中に固溶したVが高温焼戻し時に微細な炭化物として析出することにより鋼を強化し、さらに微細なV炭化物が水素をトラップして無害化する効果を有するため、比較的多量に添加している。

図3²⁾に1450N/mm²に調質した開発鋼の遅れ破壊試験結果を示す。開発鋼の[H_C]は2.72ppmであり、極めて大きな値を示す。写真1に遅れ破壊試験後の破面を示す。従来鋼が明瞭な旧オーステナイト粒界破壊を呈しているのに対して、開発鋼は粒内破壊である擬へき開破壊を呈しており、粒界破壊が抑制されていることが分かる。微細析出物による水素トラップを有する鋼は[H_E]も増加する傾向にあるが、CCT試験により測定した[H_E]は2.31ppmであること²⁾、2.5節で示すように沖縄での実ボルトの暴露試験による[H_E]の最大値

表1 SHTBの化学成分(mass%)
Chemical compositions of SHTB (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.40	Decrease	0.50	Decrease	Decrease	1.20	Addition	Addition

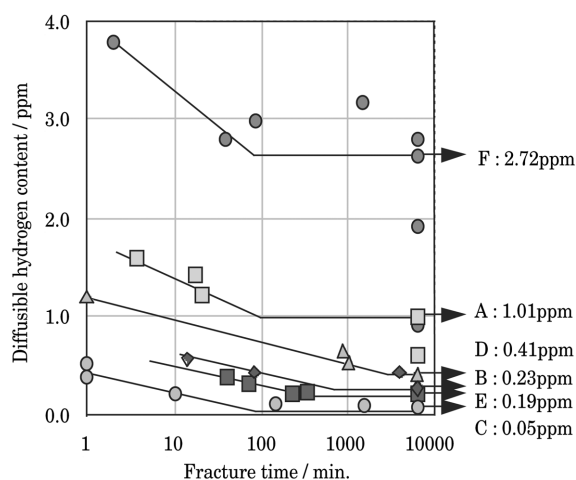


図3 SHTBの遅れ破壊試験結果
Result of delayed fracture test

が1ppm程度であることから、開発鋼は実環境で遅れ破壊を起こさない、満足すべき遅れ破壊特性を有していると考えられる。

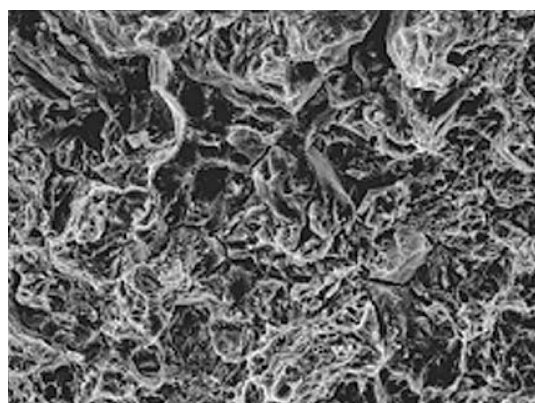
本開発鋼を応用した鋼種は、土木・建築分野のみならず、12.9T(引張強さ1200N/mm²級)の自動車エンジンボルト用鋼としても既に実用化されている。

2.4 応力集中、塑性歪集中を低減したボルト形状の開発

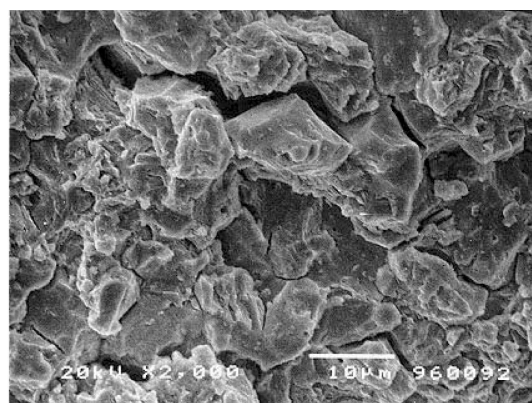
図4¹⁸⁾は1968年から1972年にかけて(社)日本鋼構造協会ボルト強度班が実施した暴露試験における高力ボルトの破断部位と破断本数の関係である。図からわかるように遅れ破壊による高力ボルトの破断は、大きな応力集中や塑性歪集中が存在するねじ部に多発している。特に不完全ねじ部に多い。そこで、SHTBは、基本的な形状寸法はJSS II 09-1981¹⁹⁾およびJIS B 1186-1979²⁰⁾に準拠しつつ、ボルト各部に生じる応力集中、塑性歪集中を緩和するために、図5に示す(1)新ねじ形状(以下、SHTBねじ)の開発、(2)ボルト軸からねじ部への移行部形状の改良、(3)ボルト頭部首下アールの増大、さらに(4)ナットの形状変更を行って、従来のFI0T高力ボルトとは異なる独自の形状を採用した。

(1) SHTBねじの開発

SHTBねじは、FEM解析による形状検討をベースに、谷形状を3円弧の合成曲線で規定している²¹⁾。図6にSHTBねじの形状寸法を示す。ねじ山のフランク面から谷部に移行する折れ曲がり開始点に



SHTB (Transgranular fracture)



Conventional steel (Intergranular fracture)

写真1 遅れ破壊破面
Fractographs of delayed fracture surface

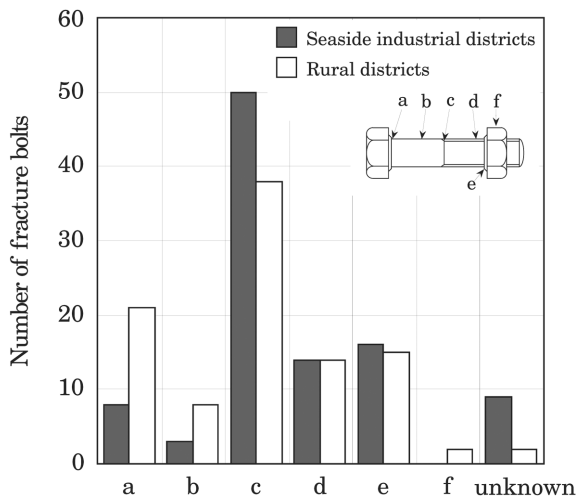


図4 高力ボルトの遅れ破壊部位
Places of delayed fracture of HTB

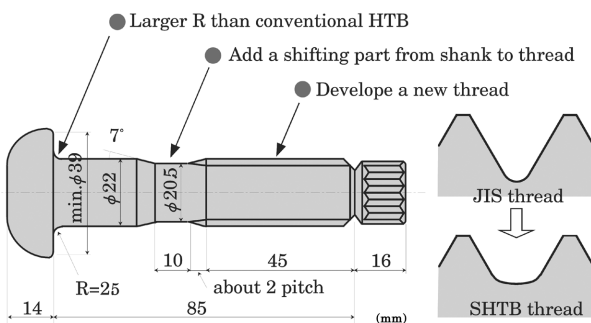


図5 SHTBの形状寸法
Shape and dimension of SHTB

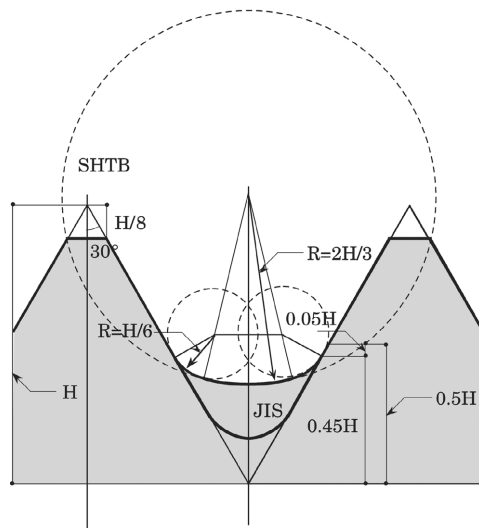


図6 SHTBねじの形状寸法
Shape and dimension of SHTB thread

おける円弧の径を、従来のF10T高力ボルトで採用するJISメートル並目ねじ(以下、JISねじ)の谷底径と同じ $H/6$ (H :とがり山高さ)とし、大きな応力集中、塑性歪集中が予想される谷底の円弧はJISねじの4倍の大きさの $2H/3$ としている。ピッチ、基準山の高さ、外径、フランク角はJISねじと同じである。

図7は遊びねじ部を対象にSHTBねじとJISねじについて実施したFEM解析結果の一例である。弾性解析による応力集中係数分布と弾

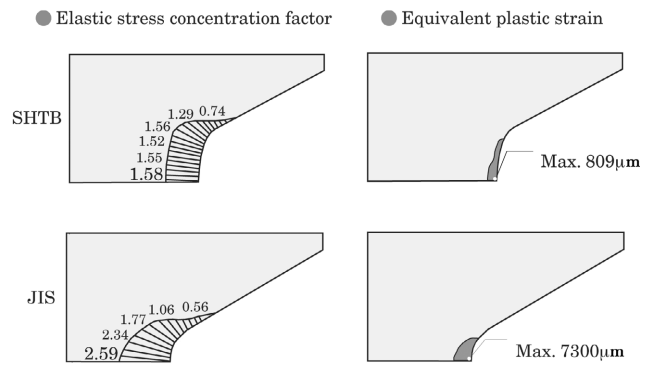


図7 ねじ底部の応力集中係数と相当塑性歪
Elastic stress concentration factor and Equivalent plastic strain of thread bottom

塑性解析によるF15T相当の設計ボルト張力導入時の相当塑性歪分布(着色部が塑性域)および最大相当塑性歪を示している。SHTBねじの応力集中はJISねじの約60%に、また最大相当塑性歪は約10%に大幅に低減している。なお、SHTBねじはその形状寸法からねじの有効断面積がJISねじよりも数%大きくなる。これはボルトの高耐力化にも有効である。

(2) ボルト軸からねじ部への移行部形状の改良

従来のF10T高力ボルトはボルト呼び径と同径のボルト軸部から直ちにねじ部に移行する。SHTBでは、応力が軸部からねじ部にできる限りスムーズに流れるように、軸部とねじ部の間に有効径に等しい4ねじピッチ長さの平行部を新たに設けた。図8は標準ボルト張力(329kN)を導入した時の不完全ねじ部～遊びねじ部～ナット内ねじ部の最大主応力と最大相当塑性歪のFEM解析結果である。SHTBは、SHTBねじと移行部の形状改良の相乗効果で、JISねじで突出する不完全ねじ部の応力、塑性歪がともに大きく低減されており、JSSCの暴露試験において最も多くの遅れ破壊破断が発生した不完全ねじ部の耐遅れ破壊性能の向上に大きな効果が期待できる。

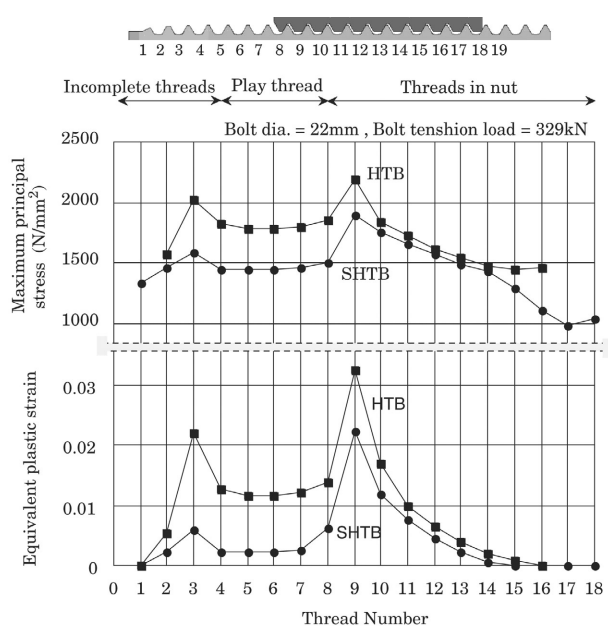


図8 ボルトねじ部の最大主応力と相当塑性歪の分布
Distribution of maximum principal stress and maximum equivalent plastic strain of bolt thread portion

(3) ボルト頭部首下アールの増大

張力導入時のボルト頭部首下部における応力集中がSHTBねじ部と同程度になるように、従来1.5～2.0mmのボルト頭部首下アールを2.5mmまで大きくしている。

(4) ナットの形状変更

SHTBねじは谷底半径を大きくした分、雄ねじと雌ねじのねじ1山のひっかかり抵抗がJISねじよりも10%程度小さい。この低下を補うため、ナットのねじ山数を多少の余裕を見てJISねじ用ナットの1.2倍に増大させている。このねじ山数の増加はナットと嵌合するボルト各ねじ山が分担する応力を減少させるため、ねじ谷底部の最大応力や塑性歪の低減にも有効である。

2.5 実ボルトの暴露試験によるSHTBの耐遅れ破壊性能の検証

2.3節で述べたように、高力ボルトの限界拡散性水素量 $[H_c]$ を増大させることが耐遅れ破壊性能を向上させる有効かつ直接的な手段であるとの考えから、SHTB用鋼材として、標準的なF10T高力ボルト用鋼材の3倍強の $[H_c]$ を有する鋼材を開発した。なお、製品化したSHTB用鋼材は図3の試験に供した鋼材よりもさらに $[H_c]$ の向上を図っている。

一方、ボルトに蓄積される水素量 $[H_E]$ は実際の使用環境毎に異なる。そこで、SHTBの耐遅れ破壊性能を検証するとともにSHTBの $[H_E]$ を調査する目的で、促進暴露試験と屋外暴露試験を行っている^{22,23)}。

2.5.1 促進暴露試験

M22のSHTB(以下、SHTB22)を厚み44mm(22+22)の被締付材に締め付け、3.5%食塩水中への繰り返し浸漬試験を実施した。図9に

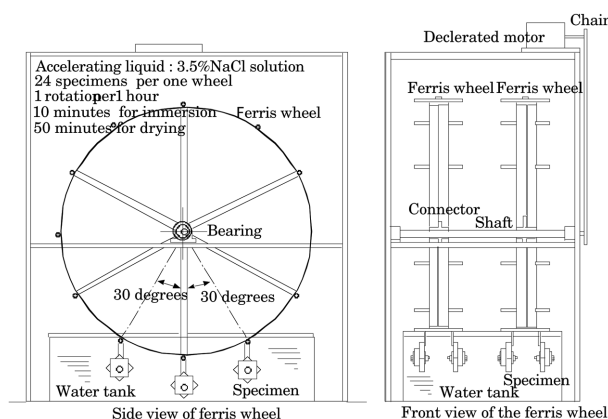


図9 江藤式観覧車による促進暴露試験
Accelerated exposure test using Eto-type ferris wheel

示すように被締付材に締め付けられたSHTB22は回転する車輪上につり下げられており、1時間に1回食塩水中に浸かるようになっている。被締付材には、ボルト頭部側およびナット側に幅10mm×深さ5mmの溝が、板中央部に幅10mm×深さ10mmの溝がそれぞれ十字交差状に設けられており、ボルト軸部にも食塩水が浸入する構造になっている。導入張力は約340kN(引張強さの75%)である。

試験は鋼材ロット、熱処理ロットおよび時期を変えて総数128本実施している。5年超の暴露を行ったが破断は1本もなかった。この間、暴露ボルトは実際の使用環境下では想定できないほどに激しく腐食していた。本暴露試験では定期的に試料を回収して、SHTBに蓄積される水素量 $[H_E]$ の変化を調査した。 $[H_E]$ は暴露開始後半年程度で飽和状態になり、最大でも1.5ppm程度でSHTBの $[H_c]$ の1/2程度であった。

2.5.2 屋外暴露試験

厳しい腐食環境の代表である沖縄(具志頭村)と大都市環境の代表である東京(代々木)の2地域でSHTB22、各800本の屋外暴露試験を実施している。沖縄は1995年10月に暴露開始、東京は1996年5月に暴露を開始した。2007年6月時点で11年以上経過するが、沖縄、東京とも未だ1本も破断していない。

写真2に沖縄での試験状況を示す。暴露場所は海岸の波打ち際から100mほどのところに位置しており、強風時は海からの飛沫が直接ボルトに降りかかる。大気に直接触れている暴露ボルトの頭部やナットは初期の形状をとどめないほど腐食が進行している。本暴露試験でも定期的に試料を回収して、SHTBへの侵入水素量 $[H_E]$ の変化を調査している。図10に侵入水素量 $[H_E]$ の推移を示す。 $[H_E]$ は暴

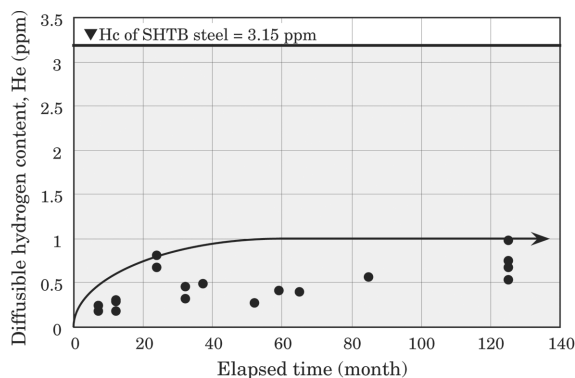


図10 蓄積拡散性水素量
Accumulated diffusible hydrogen content

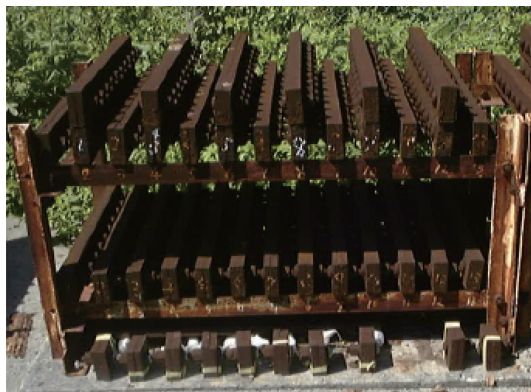


写真2 沖縄での屋外暴露試験
Outdoor exposure test in Okinawa

露開始後約2年ではほぼ飽和状態に達し、その後はほぼ定常状態を示している。最大の $[H_E]$ は1 ppm程度でSHTBの $[H_C]$ の1/3程度である。このことから、本暴露試験でSHTBが破断に至らない理由が理解できる。

3. SHTBの力学特性と設計耐力

3.1 力学特性

(1) 鋼材の機械的性質

ボルトから切り出したJIS4号引張試験片の引張試験結果の一例を図11に示す。SHTBの降伏耐力(0.2%耐力)、引張強さは平均で1345N/mm²、1452N/mm²であった。伸びは17.1%、絞り率は51.3%でいずれもF10TのJIS規格値である14%以上、40%以上を満足している。

(2) ボルトの最大引張耐力

SHTBの引張試験結果を表2に示す。試験はボルト頭部側に10度のテーパ付座金を用いた場合と平座金を用いた場合の2水準を実施している。最大引張耐力457kN(平均値)はF10T-M22の規格値297kNの1.54倍になる。引張強さがF15T相当の規格最低値1500N/mm²に満たないにもかかわらず、最大引張耐力がF10Tの1.5倍以上になる理由は、先に述べたようにSHTBの有効断面積がJISねじに比べ4%ほど増加しているためである。

(3) 変形性能(ボルト張力-ナット回転角の関係)

初期締付けトルク300N・mを与えた状態を起点にナットを回転させてSHTB22の変形性能を調査した。得られたボルト張力とナット回転角の関係を図12に示す。ボルトの遊びねじは約8山(不完全ねじを含む)である。ボルトの破断はいずれも遊びねじ部であり、破断までにナットが2回転以上しており十分な変形性能を有している。

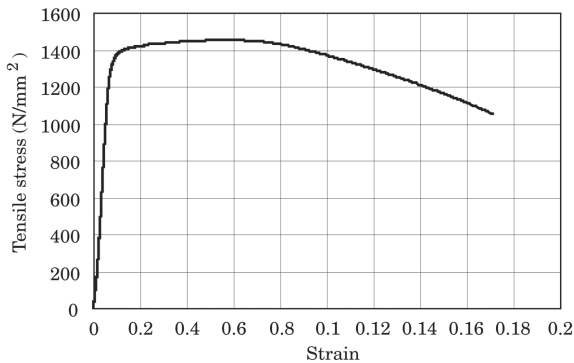


図11 SHTB鋼の応力-歪曲線
Stress - strain curve of SHTB steel

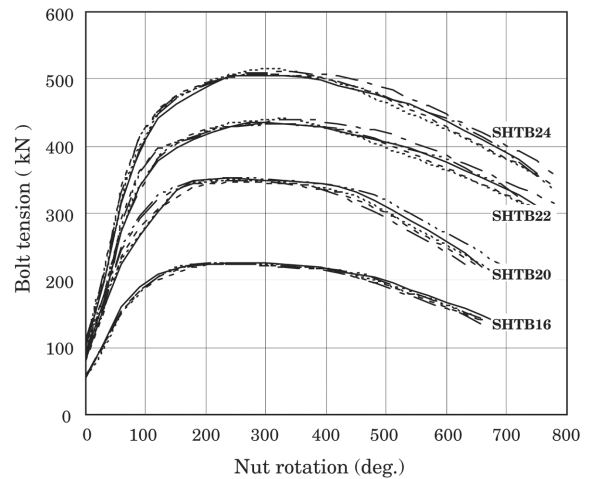


図12 ボルト張力-ナット回転角関係
Relationship between bolt tension and nut rotation

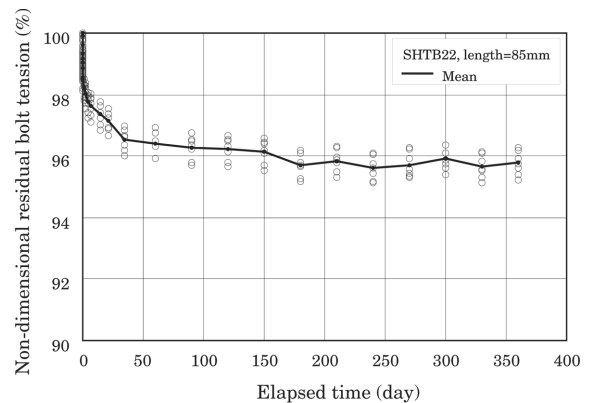


図13 SHTBのリラクセーション特性
Relaxation characteristic of SHTB

(4) リラクセーション特性

SHTB22を厚み46mm(12+22+12)のSS400の鋼材に締付けて実施したリラクセーション試験結果を図13に示す。図はボルト締付け1分経過後のボルト張力を100%として、その張力残存率を示している。ボルト張力の変化はボルト軸部に添付した歪みゲージにより計測した。図13からSHTB22の張力残存率は95%程度であり、これまで計測されたF10T高力ボルトのリラクセーション特性と同様の傾向を示している。

3.2 設計耐力

SHTBはM16、M20、M22、M24の4種類の軸径について国土交通大臣の材料認定を取得している。表3にSHTBの機械的性質の規格

表2 SHTB22の引張試験結果
Results of tensile test of SHTB22

Washer type	Taper washer		Plain washer	
	Max. tensile force T (kN)	T/bA_e^{*1} (N/mm ²)	Max. tensile force T (kN)	T/bA_e^{*1} (N/mm ²)
Min.	450	1 427	451	1 427
Max.	461	1 458	463	1 464
Mean	457	1 445	457	1 447
SD	2.6	8.3	3.4	10.8
Number of spec.	81		17	

^{*1} $bA_e = 316\text{mm}^2$

表3 SHTBの機械的性質の規格
Standard of mechanical properties of SHTB

	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
SHTB22	126 or over	140-149	14 or over	40 or over
F10T-HTB	96 or over	100-120	14 or over	40 or over

表4 SHTBの設計耐力
Design bolt tension of SHTB

Name	Design bolt tension (kN)	Maximum tensile force (kN)
M16	155 (106)	230 (157)
M20	242 (165)	358 (245)
M22	299 (205)	442 (303)
M24	349 (238)	517 (353)

(F10T-HTB)

を、また表4に呼び径毎の設計ボルト張力と最大引張耐力を示す。
括弧内にはF10T高力ボルトの設計耐力も参考に載せている²⁴⁾。

4. SHTBの適用

4.1 SHTBによる接合部の設計と施工

SHTBを用いた接合部の設計例(梁継手)を、F10Tによる従来の継手と比較して図14に示す。SHTBを適用することにより、ボルト接合部を従来比約2/3にコンパクト化でき、図15に示すような建設コスト削減、工期短縮、鉄骨建方の作業性向上など様々なメリットが得られる。なお、小梁などのピン接合では、SHTBの適用メリット

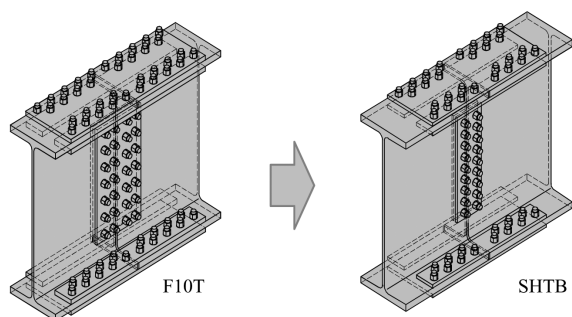


図14 H形鋼梁継手への適用例

Comparison of beam joint between using conventional F10T and SHTB

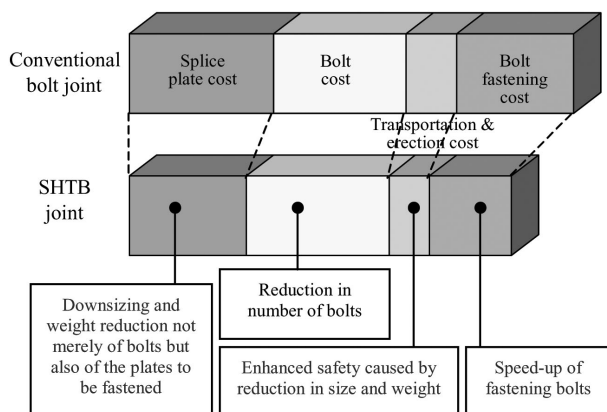
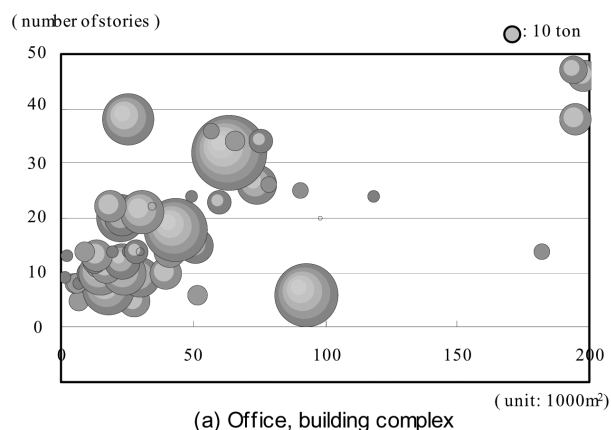


図15 建設コストの削減効果
Reduction of construction cost using SHTB

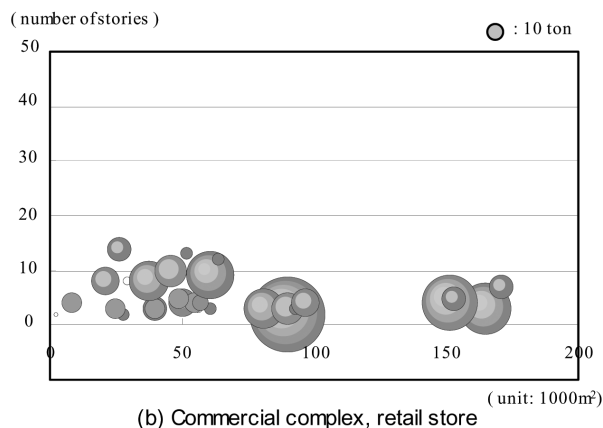
が得られず、同一建物でSHTBとF10Tを混用することがあるが、ボルト頭部の刻印(商品名と社章を刻印)やナット高さの違いなどで容易に判別することができるので、施工管理上の問題はない。SHTBの施工要領は従来のトルシア形高力ボルトと概ね同様である。ただし、1次締めトルクはF10Tの約2倍であり、本締めトルクも高くなるため、SHTBの締め付けにあたっては、SHTBのトルクに対応した締め付け機を選定する必要がある。なお、SHTBを初めて使用する需要家に対しては、施工上の不具合が生じないように、新日本製鐵またはNSボルトの技術者が施工要領の説明を行っている。

4.2 SHTBの適用事例

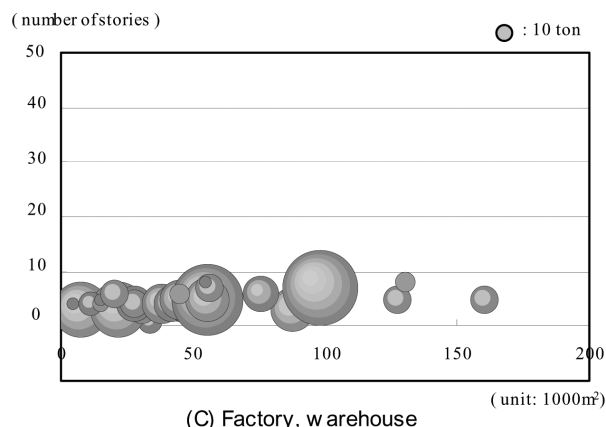
2001年の高層ホテル“ホテル日航ベイサイド大阪”への採用を皮切りに、SHTBの採用実績は高層や大型案件を中心に250件(ボルト重量で約1万t、本数で1500万本)を超える。図16は、販売開始後約5年間にわたる採用実績を用途別に円の大きさを示したものである。



(a) Office, building complex



(b) Commercial complex, retail store



(c) Factory, warehouse

図16 用途別採用実績
Actual application of SHTB by building use

SHTBの適用により図17のような極厚・高強度部材のボルト接合が容易になり、写真6に示す高度な品質管理と熟練技能者が必要な現場での溶接接合の代替技術として、鋼構造の安定的品質確保に寄与することが期待される。また、現状は建築構造物が主用途であるが、SHTBに溶融亜鉛めっきや一次防錆処理を施すことにより、厳しい環境に晒される橋梁構造物や鉄塔など他分野への適用拡大が可能となる。溶融亜鉛めっきSHTB(12GSHTB®)はすでに商品化され、通信鉄塔の耐震補強工事に初採用された。12GSHTBは建築分野でも外部架構を中心に実績が増えており、写真7は大型倉庫のブレース継手への適用事例である。



写真6 現場溶接工法
Field welding



写真7 12GSHTBによるブレース継手
Bracing joint using 12GSHTB

5. 結 言

高力ボルトの強度が従来のF10T高力ボルトの約1.5倍であり、遅れ破壊を克服した“超高力ボルトSHTB®”を紹介した。接合部を従来比2/3にコンパクト化し、建設費削減、工期短縮、施工安全性に寄与するSHTBの採用実績は、高層や大型物件を中心に着実に増大している。また、防錆仕様のボルト開発や高疲労強度ボルトの開発に加え、SHTBの技術を前提とした新たな建築構造も提案されており、SHTBの開発が建築構造を大きく変えている。今後は建築分野のみならず、土木、プラントなど全ての鋼構造物に広く普及することが期待される。

謝 辞

“超高力ボルトSHTB®”の開発にあたり、大阪大学名誉教授 脇山廣三博士、西日本工業大学教授 平井敬二博士、大阪大学教授 多田元英博士、東京電機大学教授 田中淳夫博士をはじめ多くの方々のご指導とご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木信一, 石井伸幸, 宮川敏夫, 原田宏明: 鉄と鋼. 79(2), 227(1993)
- 2) 山崎真吾, 高橋稔彦: 鉄と鋼. 83(7), 454(1997)
- 3) 小畑達郎, 山崎真吾, 岡正春, 樽井敏三, 橋村雅之: CAMP-ISIJ. 13, 1182(2000)
- 4) 岡正春, 樽井敏三, 橋村雅之: CAMP-ISIJ. 16, 1542(2003)
- 5) 南雲道彦: 粒界の偏析と鋼の諸性質. 日本鉄鋼協会編. 1979, 284p
- 6) 石田清仁: 鉄鋼の高強度化の最前線. 日本金属学会編. 1995, 88p
- 7) 福井彰一: 鉄と鋼. 55, 151(1969)
- 8) 戸塚信夫, 中井揚一: 鉄と鋼. 69, A113(1983)
- 9) 土田武広, 原徹, 津崎兼彰: 鉄と鋼. 88(11), 771(2002)
- 10) Stevens, M.F., Bernstein, I.M.: Metall. Trans. A. 20A, 909(1989)
- 11) 大村朋彦, 櫛田隆弘, 宮田佳織, 小溝裕一: 鉄と鋼. 90(2), 106(2004)
- 12) 久保田学, 蟹澤秀雄: CAMP-ISIJ. 9, 511(1996)
- 13) 樽井敏三, 山崎真吾: 鉄と鋼. 88(10), 612(2002)
- 14) 小坂誠, 吉田卓, 樽井敏三: CAMP-ISIJ. 17, 1370(2004)
- 15) 小坂誠, 吉田卓, 樽井敏三: CAMP-ISIJ. 17, 1371(2004)
- 16) 平上大輔, 樽井敏三, 榎本正人: CAMP-ISIJ. 15, 1265(2002)
- 17) 久保田学, 樽井敏三, 山崎真吾, 越智達朗: 新日鉄技報. (381), 57(2004)
- 18) 日本鋼構造協会: JSSC. 15(158), (1979)
- 19) 日本鋼構造協会: JSS II 09-1996
- 20) 日本規格協会: JIS B 1186-1995
- 21) 脇山広三, 金振鎬, 多田元英, 桑原進, 宇野暢芳: 日本建築学会構造系論文報告集. (452), 121(1993)
- 22) 平井敬二, 脇山広三, 宇野暢芳, 宮川敏夫: 日本建築学会構造系論文報告集. (555), 171(2002)
- 23) 平井敬二, 宇野暢芳: 日本建築学会構造系論文報告集. (560), 197(2002)
- 24) 宇野暢芳: 日本ねじ研究協会誌. 28(5), (1997)