

鋼構造に使用されるボルト用鋼材

並村 裕一*

Bolt Steels Used for Steel Structures

Yuichi NAMIMURA

Synopsis : Bolts are used in a wide variety of fields including the automobile industry, the civil engineering and construction industry, and the machine industry. Therefore, bolt strength class and fastening method are all highly variable according to use location and purpose. Consequently, the optimum steel grade for the application concerned must be selected from carbon steels to alloy steels.

Bolts for steel structures are standardized by 'Sets of high strength hexagon bolt, hexagon nut and plain washers for friction grip joints (JIS B 1186 by Japanese Standards Association)' and 'Sets of torshear type high strength bolt, hexagon nut and plain washers for structural joints (JSS II 09 by Society of Steel Construction of Japan)'. But their bolts are not specified about used materials. However, it is necessary for the materials to possess a lot of characteristics, example for toughness and ductility, corrosion resistance, fire resistance, delayed fracture resistance, according to the use condition.

In this paper, high strength bolt steels for steel structures are mainly introduced about conventional bolt, hot dip galvanized bolt, fire resistance bolt, weathering bolt, stainless bolt, super high strength bolt.

Key words: high strength bolt; steel structures; delayed fracture; hexagon bolt; torshear type bolt; hot dip galvanized bolt; fire resistance bolt; weathering bolt; stainless bolt; super high strength bolt.

1. 緒言

ボルトは非常に重要な締結部品であり、自動車用、土木・建築用、産業機械用などさまざまな分野で使用されている。そのため、使用される場所や目的、ボルト強度、締付け方法などは多種多様であり、各必要特性に応じて材料が選定されており、鋼種は炭素鋼や合金鋼などの広範囲の中から選択される。

鋼構造物に使用されるボルト形状には、主にFig. 1, 2に

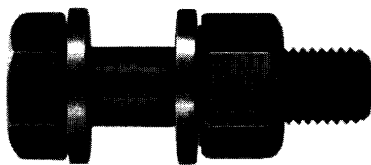


Fig. 1. Sets of high strength hexagon bolt, hexagon nut and plain washers.

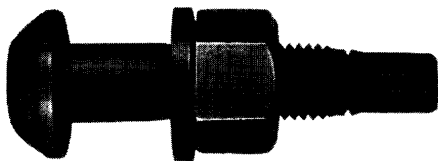


Fig. 2. Sets of torshear type high strength hexagon bolt, hexagon nut and plain washer for structural joints.

示すような高力六角ボルトやトルシア形高力ボルトが使用されている。高力六角ボルトは、JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット、平座金のセット」に規格化され、トルシア形高力ボルトは、社団法人日本鋼構造協会の規格JSS II 09「構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金セット」で定められているが、特に材料の規定は設けられていない。これは所用特性を発揮するのに適した材料、加工方法の選択を自由にして、より優れた製品の開発を期待したものである。

ここでは、主に鋼構造物に使用されている高力六角ボルトおよびトルシア形高力ボルトを①標準ボルト、②溶融亜鉛めっきボルト、③耐火鋼ボルト、④耐候性鋼ボルト、⑤ステンレス鋼ボルト、⑥超高力ボルトに分類し(Table 1)、それぞれ使用されている材料について紹介する。

Table 1. Classification of high strength bolts for structural joints.

| Application | Strength Class |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Conventional high strength bolt | 8T, 10T, (11T) |
| Hot dip galvanized high strength bolt | 8T |
| Fire resistance high strength bolt | 8T<Hot dip galvanized>, 10T |
| Weathering high strength bolt | 10T |
| Stainless high strength bolt | 10T |
| Super high strength bolt | 14T |

Table 2. Combination of classes of sets and the grades according to mechanical properties of components.

| Classes of sets | | Grades according to mechanical properties of components to be applied | | |
|--|--|---|------|--------|
| Class according to mechanical properties | Class according to torque coefficient values | Bolt | Nut | Washer |
| Grade 1 | A | F8T | F10 | F35 |
| | B | | (F8) | |
| Grade 2 | A | F10T | F10 | |
| | B | | | |
| (Grade 3) | A | (F11T) | | |
| | B | | | |

Table 3. Mechanical properties of bolt test pieces.

| Grade according to mechanical properties of bolt | Proof stress N/mm ² [kgf/mm ²] | Tensile strength N/mm ² [kgf/mm ²] | Elongation % | Reduction of area % |
|--|---|---|-----------------|------------------------|
| F 8T | 640 min. {65.3 min.} | 800 to 1000 {81.6 to 102.0} | 16 min. | 45 min. |
| F10T | 900 min. {91.8 min.} | 1000 to 1200 {102.0 to 122.4} | 14 min. | 40 min. |
| F11T | 950 min. {96.9 min.} | 1100 to 1300 {112.2 to 132.6} | 14 min. | 40 min. |

Table 4. Mechanical properties of bolt products.

| Grade according to mechanical properties of bolt | Tensile loads (minimum) (kN) (kgf) | | | | | | | Hardness |
|--|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Designations of screw threads | | | | | | | |
| | M12 | M16 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 | |
| F 8T | 68 {6 934} | 126 {12 848} | 196 {19 987} | 243 {24 779} | 283 {28 858} | 368 {37 526} | 449 {45 785} | 18 to 31 HRC |
| F10T | 85 {8 668} | 157 {16 010} | 245 {24 983} | 303 {30 898} | 363 {35 996} | 459 {46 805} | 561 {57 206} | 27 to 38 HRC |
| F11T | 68 {6 936} | 173 {17 641} | 270 {27 532} | 334 {34 059} | 389 {39 667} | 505 {51 496} | 618 {63 019} | 30 to 40 HRC |

2. 高力ボルトの規格

JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット、平座金のセット」には、Table 2, 3に示すようにF8T (800~1000 N/mm²), F10T (1000~1200 N/mm²), F11T (1100~1300 N/mm²)の強度が規格化されているが、F11Tは遅れ破壊の危険性より括弧付きでなるべく使用しないようになっている。またF8Tは接合効率が悪いことから、F10Tに比べ使用される量は非常に少ない。ボルトサイズはTable 4に示すようにM12, M16, M20, M22, M24, M27, M30が規格化されており、ボルト製品の最小引張荷重および硬さ規格が設けられている。

トルシア形高力ボルトの規格 JSS II 09については、Table 5, 6に示すようにS10T (1000~1200 N/mm²)のみ規格化されている。またボルトサイズはTable 7に示すようにM16, M20, M22, M24, M27, M30が規格化されており、JIS B 1186同様にボルト製品の最小引張荷重および硬さ規格が

Table 5. Combination of the grade according to mechanical properties of component.

| Component of the set | Bolt | Nut | Washer |
|------------------------------|------|------|--------|
| Grade by mechanical property | S10T | F10T | F35 |

Table 6. Mechanical properties of bolt test pieces.

| Grade by mechanical properties of bolt | Proof stress N/mm ² [kgf/mm ²] | Tensile strength N/mm ² [kgf/mm ²] | Elongation % | Reduction of area % |
|--|---|---|-----------------|------------------------|
| S10T | 900 min. {91.8 min.} | 1000 to 1200 {102.0 to 122.4} | 14 min. | 40 min. |

設けられている。

上記のように高力ボルトは10T強度レベルのものが主に使用されているが、JIS B 1186およびJSS II 09には、高力ボルトに使用する材料の種類を規定せず、製品としての機械的性質のみを規定している。ただし、実際に使用される

Table 7. Mechanical properties of bolt products.

| Grade by mechanical properties of bolt | Tensile load (minimum) (kN) [kgf] | | | | | | Hardness |
|--|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Designation of screw thread | | | | | | |
| | M16 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 | |
| S10T | 157 [16 010] | 245 [24 983] | 303 [30 898] | 363 [35 996] | 459 [46 805] | 561 [57 206] | 27 to 38 HRC |

Table 8. Example of chemical composition for high strength bolts steel (mass%).

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Al | Ti | B |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 0.21 | 0.07 | 0.89 | 0.019 | 0.010 | 0.14 | added | added | added |

材料は、頭部成形やねじ転造などの冷間加工性がよく、熱処理により十分な機械的性質が得られ、耐遅れ破壊性も優れ、かつ低コストの材料であることが望まれる。

また形状的には、六角ボルトや六角ナットの六角形部の寸法（2面幅）は、高い締付け軸力を考慮して、一般のねじ部品に比べ1サイズ大きい呼び径のものを採用し、ナットの高さを呼び径と同じにしている¹⁾。

さらにこれらの高力ボルトが他の一般ボルトと異なる点は、ボルト、ナット、座金のそれぞれの種類、形状、機械的性質などが規格化されていることはもちろん、トルク係数値が一定となるように製造管理されていることである。トルク係数値は他の機械的性質と異なり、ボルト・ナット・座金をセットとして取り扱うべき性質のものである。

またこれら上記の規格によって、具備すべき条件のすべてが尽くされているわけではなく、さらにボルトの使用条件に応じて、寒冷地などにおける衝撃に対する注意、耐火上の問題、腐食環境の厳しい地域・場所における耐食性の問題、遅れ破壊の問題など、いろいろと考慮しなければならぬ問題は多々ある。

3. 各種高力ボルトについて

3.1 標準高力ボルト

高力ボルトが製造され始めた初期のころは、低炭素鋼・中炭素鋼・低合金鋼（クロム鋼、クロムモリブデン鋼）などのJIS規格材やSAE規格材などが使用されていたが、1970年頃からボロン鋼が採用され始め、コストダウン化が行われてきた。ボロン鋼とは、微量のボロンを添加することにより焼入性を向上させた鋼材であり、中炭素系低合金鋼から合金元素の低減および低炭素化を図ることができる。また、高力六角ボルトやトルシア形高力ボルトの熱処理には水焼入れを採用しているためボルトサイズが太いにもかかわらず、十分な焼入れ硬さを得ることができる。つまり、CrやMoなどの合金元素を低減し鋼材の低炭素化を図るとともに、低炭素化によりボルトの冷間圧造性を改善することが可能になる。そのため最近の標準的高力ボルトは、

低炭素系材料にMn, Cr, Bを添加した低炭素ボロン系材料が多く使用されている。

例えばTable 8に示す低炭素ボロン鋼（0.21% C程度）などが使用され、線材加工された鋼材をボルト頭部成形およびねじ転造した後、焼入れ焼戻し処理を行うことにより必要強度を得ている。Table 8に示すボロン鋼で作製した10Tボルトでは使用され始めてから20年以上も経過するが遅れ破壊の発生は皆無である。

3.2 溶融亜鉛めっき高力ボルト

鋼構造物の高耐食性を目的として、半永久的な耐食性が期待できる溶融亜鉛めっきを施した構造物が増加している。その継手部に使用される溶融亜鉛めっき高力ボルトにはJIS規格がなく、建築で使用する場合、建築基準法に基づきメーカーごとに大臣認定を取得して使用されている。この溶融亜鉛めっき六角ボルトについてもTable 8の低炭素ボロン鋼などが用いられ、最高強度は遅れ破壊の危険性および溶融亜鉛めっき時（480~500°Cに加熱）の強度低下を考慮してF8Tとされている。溶融亜鉛めっき付着量は550 g/m²以上であり、長期防食性に優れている。

3.3 耐火鋼高力ボルト

建築基準法では、不特定多数の人が利用する特殊建築物（ホテル・共同住宅）と市街地内の建築物には、耐火建築物とすることが義務付けられている。耐火建築物では、主要建造部材を耐火構造にする必要があり、法定耐火時間ごとの耐火試験で鋼材温度が350°C以下になるように鉄骨を耐火被覆するように決められていた。しかし、工事費の低減、工期短縮、室面積有効利用などの面から、耐火皮膜の低減が強く望まれていた。そんな中、1987年3月建設省総合技術プロジェクト「建築物の総合防火設計法」が完了し、法定耐火時間や耐火試験によらず建築物の耐火安全性を評価できる「新耐火設計法」が新設された。

これにより、鋼材温度ではなく建築物の火災時を想定した高温耐力の評価で耐火建築物として認められ、従来の一般建築構造用鋼材と比較して鋼材温度600°Cにおける降伏点が常温規格値の2/3以上を有する耐火鋼（FR鋼：Fire Resistance Steel）が開発・実用化された。

この耐火鋼材を使用した主要構造物材の継手部には、部材と同等以上の高温耐力が必要である。つまり鋼板を締結するボルトについても当然耐火性が要求される。高力ボルト継手は、高温になると導入軸力が弛緩されるため、摩擦力の低下ですべりを生じる。耐火鋼高力ボルトには、このすべりが起こった後、ボルトがせん断接合状態になった時点で、母材よりも先に破断しない耐力を有する必要がある。

耐火鋼高力ボルトの化学成分系はTable 9に示すようにJIS SCM822相当鋼であり、Cr, Moを添加することにより耐熱性が向上されている。この鋼材を使用したボルトは、Fig. 3に示すように常温時の強度は一般の高力ボルトと同等であるが、高温性能が優れており、特に600°Cにおいて従来の高力ボルトの約2倍の耐力を有している。

Table 9. Example of chemical composition for FR bolt steel (mass%).

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ti |
|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| 0.23 | 0.18 | 0.84 | 0.011 | 0.011 | 1.10 | 0.31 | added |

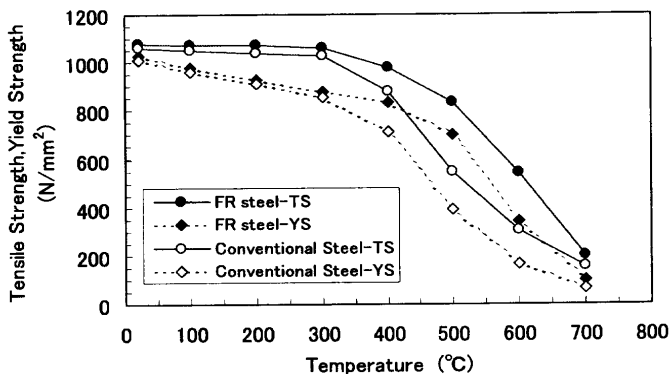


Fig. 3. Relationship between temperature and strength of FR steel.

Table 10. Example of chemical composition for JIS weathering bolt and plate steels (mass%).

| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | Ti | B | |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|---------|
| Bolt | 0.23 | 0.14 | 0.82 | 0.83 | 0.47 | 0.42 | 0.020 | 0.0012 | |
| Plate | 0.12 | 0.28 | 1.13 | 0.48 | 0.19 | 0.34 | tr | tr | SMA490W |

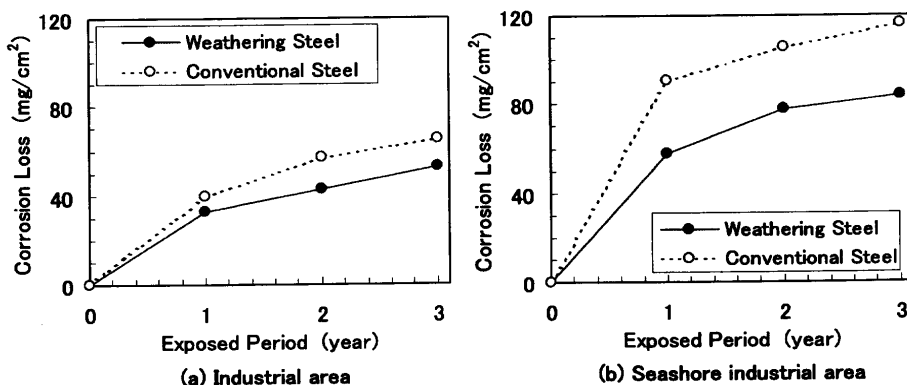


Fig. 4. Result of exposure test of weathering steel.

耐火鋼高力ボルトは、裸ボルトの場合10T強度、溶融垂鉛めっきをする場合8T強度として使用される。

3.4 耐候性鋼高力ボルト

橋梁分野では、初期建設コストの低減や維持管理コストの軽減が求められており、最小限の維持管理で最大限の長寿命化をめざす「ミニマムメンテナンス橋」に対する要望が高まってきている。特に、海岸部の橋梁や凍結防止剤を散布する橋梁など高塩分環境下にさらされる場合においても、無塗装使用の実現が望まれている。これに伴い高力ボルトにも本来の高力ボルトとしての特性以外に鋼板と同等の耐候性が要求されてきている。

耐候性鋼材は、材料自身が安定した錆を発生させることにより、塗装を省略できることに特徴がある。また、腐食環境の厳しいところでは、錆が安定しないことがあり、流出錆を抑えると同時に安定錆をむらなく生成させるために錆安定化処理を施す場合もある。

ここでは、1) JIS 耐候性鋼板 SMA490W などに適用される JIS 鋼板用耐候性鋼高力ボルトおよび2) 海浜・海岸耐候性鋼板に適用される海浜・海岸耐候性鋼高力ボルトについて述べる。

3.4.1 JIS 鋼板用耐候性鋼高力ボルト

一般の JIS 耐候性鋼板 SMA490W と同等な耐食性を有するように、JIS 鋼板用耐候性鋼高力ボルトにも、耐候性有効成分である Cu, Ni などが適量添加されている (Table 10)。この鋼材を曝露試験した結果を Fig. 4 に示すが、耐候性鋼は普通鋼に比べ、工業地帯、海岸工業地帯ともに曝露期間1年以上において腐食減量が低減されているのがわかる。

3.4.2 海浜・海岸耐候性鋼高力ボルト

飛来塩分量が多く、一般の JIS 耐候性鋼板が適用できない海岸地帯などにおいても無塗装にて使用できる海浜・海岸耐候性鋼板 (高耐候性鋼板) が、近年開発されている²⁻⁵⁾。

例えば、1%Ni-1%Cu-Ti添加の耐候性鋼板などが開発・実用化されており、腐食電位や腐食減量などの耐候性能は、Ti添加を前提とすればCuとNiの総和量でよく整理できることがわかっている^{2,3)}。つまり、Fig. 5に示すように鋼中のCu+Ni量が増加するにつれて裸耐食性が向上し、さらにTi添加により耐食性がさらに向上する^{2,3)}。しかし、この鋼板をボルトで締結する場合、一般の鋼製ボルトでは腐食電位が鋼板に対して相対的に低いため、鋼板との間にガルバニック電池を形成し、ボルトの腐食を促進させる恐れがある。そこで、鋼板とボルト用材料の起電力をできるだけ同一にする必要がある。

Ti添加ベースでCu+Ni量を変化させたボルト用鋼と鋼板との間に生じる起電力を評価した結果、Fig. 6のようにCu+Ni=1.8-2.4%であれば鋼板とほぼ同等の電気化学特性になることがわかった⁶⁾。この結果をもとに設計した開発鋼の化学成分の一例をTable11に示す⁶⁾。尚、Cu, Ni量は高

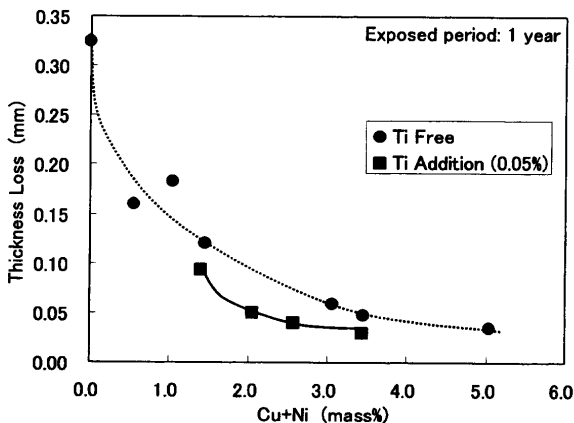


Fig. 5. Effect of Cu, Ni, and Ti on the chloride corrosion resistance of steel.²⁾ (3% NaCl aq. sol. spray once a week at Kakogawa Work's quay for 1 year)

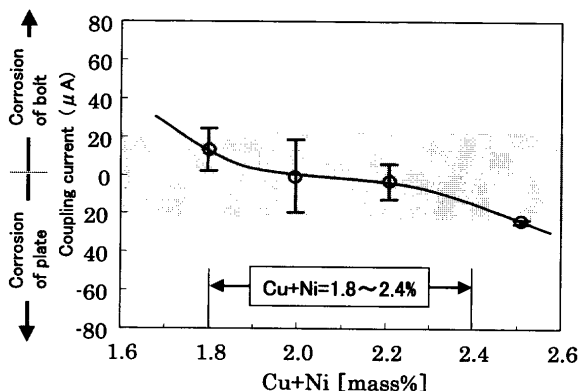


Fig. 6. Electromotive force between plate and bolt.⁶⁾

力ボルトとしての加工性、熱処理条件などの製造性も考慮し決定されている。このボルト用鋼材はCu+Ni=1.96%であり、鋼板とほぼ同じ電気化学特性を有している。また、このボルト用鋼を用いてJIS B 1186に定めるF10T M22高力ボルト、六角ナット、平座金のセットを作製し、高力ボルト添接部の特性試験（すべり係数試験、リラクゼーション試験）を行った結果、JIS鋼板用耐候性鋼高力ボルトと同等以上の評価が得られたことが確認されている⁶⁾。

3.5 ステンレス鋼高力ボルト

ステンレス鋼高力ボルトは、高い耐食性や通常的环境下での長寿命化やメンテナンスフリーが要求される建物に対応できる他、熱による耐力低下が少なく、また低温での靱性が高い特徴を有しているため耐火性や低温特性が要求される建物にも適している。

このステンレス鋼高力ボルトの規格は、社団法人ステンレス構造建築協会の規格SSBS 301「構造用ステンレス鋼高力六角ボルト・六角ナット・平座金セット」で定められている。この規格は、平成12年6月施行の改正建築基準法において、ステンレス鋼(SUS304A, SUS316A, SUS304N2A, SCS13AA-CF: JIS G 4321)が、鉄骨造の規定に位置付けられ、その摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金については、JIS B 1186に規定されることになった。しかし、前述のようにJIS B 1186には化学成分の規定がなく、構造部材の耐久性の観点から、ステンレス建築構造物に用いるステンレス鋼の摩擦接合用として制定された。これらのボルト、ナット、座金の材料にはJIS G 4303(ステンレス鋼棒)またはJIS G 4304(熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯)に規定されている析出硬化系SUS630が使用されている。例えば、Table12に示す化学成分系の鋼材が用いられ、固溶化熱処理および析出硬化熱処理を施し製品となる。

3.6 超高力ボルト

超高層ビルや大型構造物などに使用される厚肉、高強度部材の継手には多量のボルトが必要となる。そのため締付け本数を削減したり、ボルトのサイズダウンを図ることにより、作業能率を上げ、建設コストを削減したいとの要望が強い。そのためには現状10Tレベルの高力ボルトをさらに高強度化する必要があるが、JIS B 1186には、F11T強度が規格化されているものの、遅れ破壊の危険性より括弧付きでなるべく使用しないようになっている。例えば、Fig. 7に示すように通常の低合金調質鋼では、引張強さが1200 N/mm²以上になると遅れ破壊感受性が強くなることが知られている⁷⁻⁹⁾。つまり、11T強度以上では遅れ破壊を起こす可能性があり、13T, 14Tとさらに強度が高くなる程

Table 11. Example of chemical composition for costal weathering bolt and plate steels⁶⁾ (mass%).

| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | Ti | B | Cu+Ni |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|
| Bolt | 0.23 | 0.30 | 0.90 | 0.04 | 1.44 | 0.52 | 0.048 | 0.0019 | 1.96 |
| Plate | 0.06 | 0.30 | 1.11 | 0.02 | 0.96 | 0.97 | 0.050 | Tr | 1.93 |

その危険性は高くなる⁷⁻⁹⁾。

その一方で、現在遅れ破壊を克服した14T超高力ボルトが紹介され^{10,11)}、一部の建造物に使用されている。また、各鋼材メーカーはTable13に示すように各種高強度ボルト用鋼材を開発しており¹²⁻¹⁸⁾、主に以下のような手段で遅れ破壊性の改善を図っている。

1) 不純物元素の低減：不純物のP, Sを極力減らすとともに、P, Sの粒界偏析を促すMnを減らすことにより、粒界強化を図る¹²⁾。

2) 結晶粒の微細化：Ti, Nb, Vなどの添加により結晶粒を微細化し、粒界強化を図るとともに鋼材の靱延性を向上させる。

3) 微細炭窒化物の析出および高温焼戻し：析出硬化型の元素であるMo, V, Tiなどを添加し、高温焼戻し処理を行うことにより、微細な炭窒化物を析出させる。それらの析出物が、拡散性水素をトラップし、有害な水素を低減する。さらに高温焼戻しは、旧オーステナイト粒界のフィルム状

セメント析出を防止し、粒界強度の低下を抑制する。

4. 結言

鋼構造物に用いられる高力ボルトは、市場のニーズに応じて耐火性、耐候性などの様々な機能を付与してきた。今後ますます多様化すると考えられ、高力ボルトもそれらの要求に応えるものが開発され実用化されるだろう。

また遅れ破壊発生が懸念される超高力ボルトへの関心は高いが、まだ遅れ破壊発生機構が完全に解明されず、根本的な解決がなされていないのが実状である。今後、遅れ破壊発生機構の解明はさることながら、遅れ破壊発生有無を明確に判断できる評価法を確立し、高力ボルトが安心して使用できる基準を設けることが必要と考える。

おわりに、本報をまとめるにあたり有益なご助言を頂いた神鋼ボルト(株)取締役技術担当寺門三郎氏、技術部長長崎英二氏に深く感謝します。

Table 12. Example of chemical composition for stainless bolt steel (mass%).

| | C | Si | Mn | Cu | Ni | Cr | Nb |
|--------|------|------|------|------|------|-------|------|
| SUS630 | 0.05 | 0.30 | 0.75 | 3.25 | 4.01 | 16.05 | 0.30 |

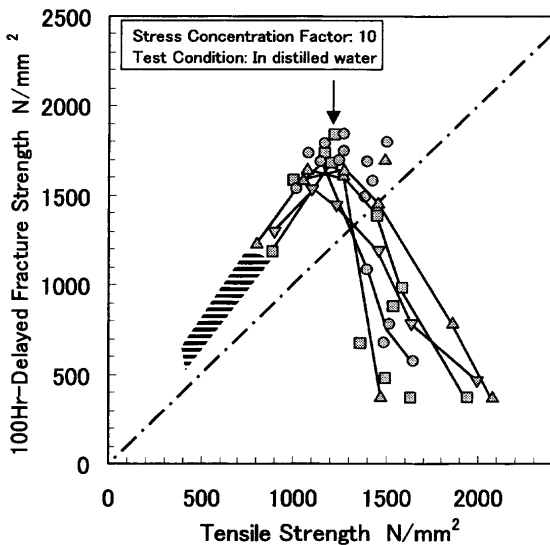


Fig. 7. Effect of tensile strength on delayed fracture strengths.⁷⁻⁹⁾

文 献

- 1) E.Kurata: *Special Steel*, **40** (1991) Feb., 35.
- 2) T.Nakayama, F.Yuse, H.Kawano, K.Ooe, K.Abe and M.Sakai: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **51** (2001) 1, 29.
- 3) 湯瀬文雄, 中山武典, 竹下 智, 菅 俊明: 土木学会第55回年次学術講演会, 土木学会, 東京, (2000), VI-150.
- 4) 保坂鐵夫, 楠 隆, 富田幸男, 宮坂明博, 田辺 児: 土木学会第55回年次学術講演会, 土木学会, 東京, (2000), I-A190.
- 5) 塩谷和彦, 野埜浩史, 川端文丸, 天野慶一, 宮本一範, 西田俊一: 土木学会第55回年次学術講演会, 土木学会, 東京, (2000), I-A241.
- 6) 保坂鐵夫, 山田節雄, 稲田 淳, 堺 雅彦, 長崎英二: 土木学会第56回年次学術講演会, 土木学会, 東京, (2001), I-A233, 466.
- 7) Japanese Society of Steel Construction: *JSSC*, **6** (1970) 52, 4.
- 8) S.Yamamoto and T.Fujita: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **18** (1968) 3, 93.
- 9) 松山晋作: 遅れ破壊, 日刊工業新聞社, 東京, (1989), 67.
- 10) M.Nagata: *J. JFRI*, **32** (2001) Feb., 33.
- 11) K.Wakiyama: *JSSC*, No. 40 (2001), 47.
- 12) S.Matsuyama: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 679.
- 13) Y.Namimura, N.Ibaraki, T.Hasegawa and Y.Oki: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **50** (2000) 1, 41.
- 14) T.Tsumura, F.Nakasato, T.Ueda and N.Murai: *Sumitomo Met.*, **40** (1988), 19.
- 15) T.Kushida, H.Matsumoto, N.Kuratomi, T.Tsumura, F.Nakasato and T.Kudo: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 297.
- 16) S.Yamasaki, M.Kubota and T.Tarui: *Shinnittetsu Giho*, No. 370 (1999), 51.
- 17) T.Kimura and S.Nakamura: *Electr. Furn. Steel*, **65** (1994), 31.
- 18) T.Siraga and N.Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1982.

Table 13. Example of chemical composition for high strength bolt steels¹²⁻¹⁸⁾ (mass%).

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | V | other | Ref. |
|---|------|-------|------|--------|--------|------|------|------|-------|----------|------|
| A | 0.40 | 0.06 | 0.52 | 0.007 | 0.005 | 0.30 | 1.00 | 0.62 | - | Ti=0.050 | 13) |
| B | 0.42 | 0.06 | 0.53 | 0.007 | 0.004 | 0.54 | 1.00 | 0.97 | 0.007 | Ti=0.050 | 13) |
| C | 0.34 | 0.22 | 0.36 | 0.011 | 0.012 | - | 1.26 | 0.40 | - | Nb=0.019 | 14) |
| D | 0.49 | 0.28 | 0.31 | 0.009 | 0.004 | - | 1.02 | 0.68 | 0.32 | Nb=0.034 | 15) |
| E | 0.40 | 0.05 | 0.50 | <0.010 | <0.010 | - | 1.20 | add. | add. | - | 16) |
| F | 0.33 | <0.10 | 0.30 | ≤0.015 | ≤0.005 | - | 1.20 | 1.00 | 0.30 | - | 17) |
| G | 0.41 | 0.32 | 0.81 | 0.005 | 0.017 | 0.55 | 0.49 | 0.22 | - | Ti=0.039 | 18) |