



# 入門講座

鋼を接合する-6

## 高力ボルト接合 —設計と施工—

High Strength Bolted Connections – Design and Fabrication

増田浩志

Hiroshi Masuda

宇都宮大学 大学院工学研究科  
地球環境デザイン学専攻 教授

### 1 はじめに

土木および建築における鋼構造物は一般に梁と梁または柱と梁などの部材を組み立て建設される。組み立てる際にはこれら部材を繋ぐ接合部が必要となる。応力の流れが複雑となる接合部は力学的に弱点となりやすく、接合部の破壊は構造物全体の耐震性能に影響する。したがって、接合部の設計と施工は重要である。接合法として溶接接合と高力ボルト接合が一般的である。梁や柱などの部材を組み立てる場所として鉄骨製作工場と建設現場がある。鉄骨製作工場で溶接する場合は精度および溶接条件の設定が容易なため品質を確保しやすいが、建設現場で溶接する場合は精度と溶接条件の点から品質確保が難しい。また、溶接は作業者の技能レベルが接合部性能に与える影響が大きく、接合部の品質にばらつきが生じやすい。一方、高力ボルト接合は溶接に比べると施工が容易であり、品質にばらつきが小さい長所がある。このことから、なるべく接合部の溶接を鉄骨製作工場で済ませ、建設現場で高力ボルト接合により組み立てるだけとする工法が多く採用されている。以下に現在の鋼構造物に実績が多い高力ボルトについて、概要、施工方法および設計の考え方を解説する。

### 2 高力ボルトの概要

高力ボルトの形状を図1に示し、高力ボルトの種類を表1にまとめる。高力ボルトはボルトとナットと座金のセットの規格または認定であり、セットで用いなければならない。一般のボルトを用いる場合とこの点は異なっており、ボルト、ナット、座金はそれぞれ別の規格のため、使用者がそれぞれ

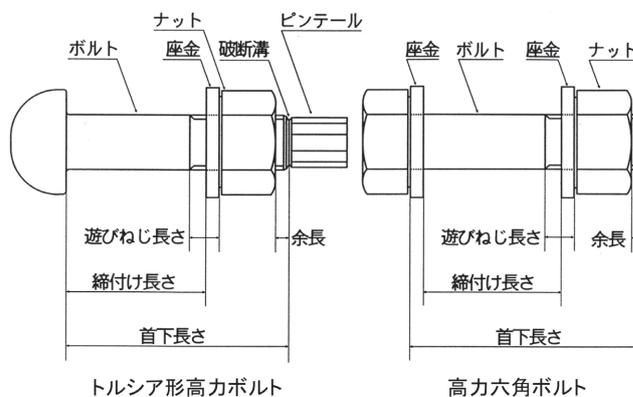


図1 高力ボルトの形状

表1 高力ボルトの種類

種類	トルシア形高力ボルト	高力六角ボルト	溶融亜鉛めっき高力ボルト	ステンレス高力ボルト
規格	JSS II 09 (日本鋼構造協会規格)	JIS B 1186	—	JIS B 1186
認定	建築基準法第37条に基づく認定	—	建築基準法第37条に基づく認定	—
機械的性質による等級	ボルト	S10T	F10T	F8T
	ナット		F10	F8T
	座金		F35	F8T
締付け方法	ピンテールの破断(トルクコントロール法)	ナット回転法(トルクコントロール法)	ナット回転法	ナット回転法

を組み合わせ使用している。高力ボルトには一般にトルシア形高力ボルト、高力六角ボルト、溶融亜鉛めっき高力ボルト、ステンレス高力ボルトがある。普通鋼の構造物にはトルシア形高力ボルトまたは高力六角ボルトが用いられる。めっき構造物には溶融亜鉛めっき高力ボルトが用いられ、ステンレス構造物にはステンレス高力ボルトが用いられる。鋼構造物に最も多く使用されているのはトルシア形高力ボルトである。この規格の基になっているのはJIS規格の高力六角ボルトであり、トルシア形高力六角ボルトはこれに破断溝とピンテールを設けて締付けが容易になるように改良したものである。高力ボルトの機械的性質は削り出し試験片により確認される。応力度とひずみ度の関係を図2に示す。等級のS10TおよびF10Tについて、耐力が900N/mm<sup>2</sup>以上で引張強度が1000～1200N/mm<sup>2</sup>と定められている。ここでの耐力は0.2%オフセット耐力である。高力ボルト接合部が期待される性能を発揮するためには締付けによって所定のボルト張力を確実に導入することが重要である。この所定のボルト張力を設計ボルト張力N<sub>0</sub>と呼んでいる。設計ボルト張力は締付け時の振り応力の影響および締付け後のリラクゼーションを考慮してF10Tについて下式のように定めている。

$$N_0 = 0.85bF_y \cdot bA_e \dots\dots\dots (1)$$

bF<sub>y</sub> : 高力ボルトの耐力 (0.2%オフセット耐力)  
bA<sub>e</sub> : 高力ボルトのねじ部有効断面積

高力ボルトのねじ部断面積bA<sub>e</sub>は軸部断面積bA<sub>s</sub>より小さいため、高力ボルトに張力が導入されて軸部より先にねじ部に降伏が生じる。したがって、設計ボルト張力として、安全率を考慮してねじ部の降伏耐力の85%程度が規定されているといえる。

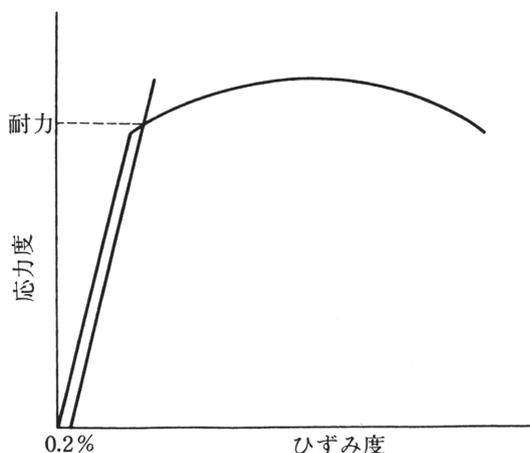


図2 高力ボルト削り出し試験片の応力度-ひずみ度関係

### 3 高力ボルトの施工

施工の基本は締付けによって設計ボルト張力を確保することである。施工時にボルトに導入される張力にはある程度のばらつきが生じるため、この点を考慮して設計ボルト張力の10%増しの値である標準ボルト張力を目標値として締め付ける。高力ボルトに張力を導入する締付け方法として、トルクコントロール法とナット回転法がある。締付け時に導入張力の変化を逐次読み取ることが可能であればよいがこれが難しいため、実際には締付けトルクまたはナット回転角によって締付けを制御している。締付けトルクTrのボルト張力Nの関係は以下となる。

$$Tr = k \cdot d \cdot N \dots\dots\dots (2)$$

Tr : 締付けトルク  
k : トルク係数  
d : ボルト呼び径 (軸部直径)  
N : ボルト張力

ボルト張力と締付けトルクの間関係を図3に示す。両者は比例関係にあり、比例定数をトルク係数と呼んでいる。締付けトルクが適正であってもトルク係数が大きいとボルト張力が大きくなり、トルク係数が小さいとボルト張力が小さくなる。ねじに凹凸が生じたり、異物が混入するとトルク係数は大きくなり、ねじの潤滑が過大であるとトルク係数は小さくなる。したがって、製造業者はねじ表面に留意して安定したトルク係数が生じるよう品質管理を行っている。トルクコントロール法は(2)式の関係から目標となるトルクを定めて締付けを行う方法である。トルシア形高力ボルトはトルクコントロール法を応用した締付けが考えられたものであり、ボルト

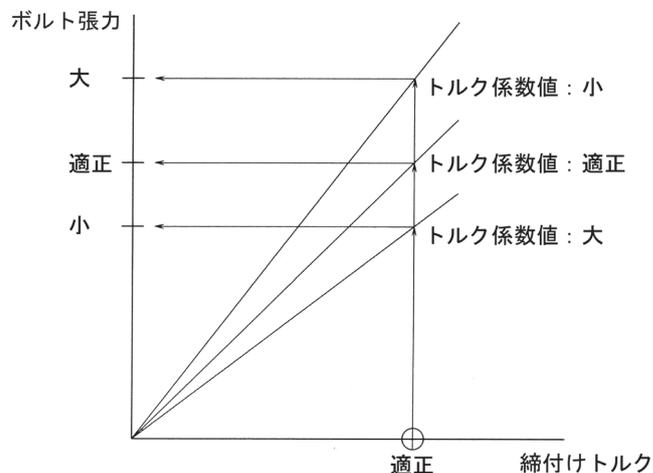


図3 ボルト張力と締付けトルク

トにピンテールと破断溝が設けられている(図1)。締め付け機でピンテールを掴んで固定し、ナットを回転させて締め付ける。締め付けによってボルトに捩り応力が発生し、破断溝で破断が生じて締め付け終了となる。破断時の締め付けトルクでボルト張力を確保する仕組みであり、短時間で簡単な締め付けのため、一般の構造物ではほとんどこのトルシア形高力ボルトが採用されている。

ナット回転法はナットの回転角を締め付けの目標とする方法である。図4にボルト張力とナット回転角の関係を示す。また、図5にマーキングとナット回転角を示す。まず、標準ボルト張力の25%程度の1次締めを行う。これはボルト張力と回転角が比例関係を示すまでの締め付けである。この状態で図5の左に示すようにボルト、ナット、座金、被接合材に渡ってマーキングを行う。この状態を0°として120°ナットを回転させ、回転角に応じたボルト張力を確保してこれを本締めとする。これより更にナットを回転させると遊びねじ部に塑性化が生じて徐々に剛性が低下し最大耐力を示す。その後、耐力低下が生じてねじ部に破断が生じる。ナット回転法ではボルトの降伏耐力より大きな張力が導入される。トルクコントロール法によるボルト張力の10%程度高いボルト張力がナット回転法による締め付けで生じていることを認識しておくとうい。

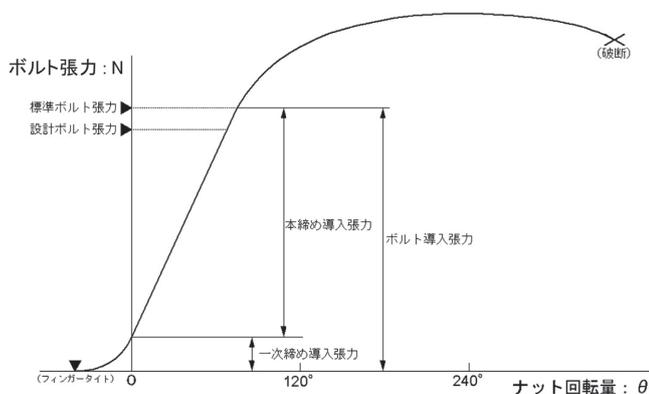


図4 ボルト張力とナット回転量

## 4 高力ボルト接合部の設計

高力ボルト接合を用いた接合部の設計について、図6のような1層1スパンの建築物モデルを例として解説する。モデルは柱、梁、筋かい(ブレース)から構成され、それぞれがピン接合(回転可能なジョイント)されている。この筋かいの下側端部は図7のようなディテールである。H形鋼の柱に鋼板によるガセットプレートが溶接され、ガセットプレートと梁が8本の高力ボルトにより摩擦接合され、ガセットプレートと筋かいは5本の高力ボルトにより摩擦接合されている。以下は後者のガセットプレートと筋かいの高力ボルト摩擦接合部の設計における考え方である。建築物が地震などの外力を受ける場合、図6に示すモデルの柱頂部に水平力Qが作用すると考えることができる。外力によって右図のように筋かいに伸びが生じて骨組全体が平行四辺形状に変形する。建築物がその耐用年数の間に何度か受ける中程度の地震については構造物に変形は生じるが弾性を維持するよう設計される。層間変形角(柱に生じる見かけの角度)が1/200以下となるように設計される。層間変形角1/200の場合、柱の長さが4mの場合に柱頂部の水平変位は2cmとなる。高力ボルト接合部において、筋かいおよびガセットプレートが生じる応力により降伏しないように設計され、高力ボルトで締め付けられた摩擦接合部にすべりが生じないように設計される。したがっ

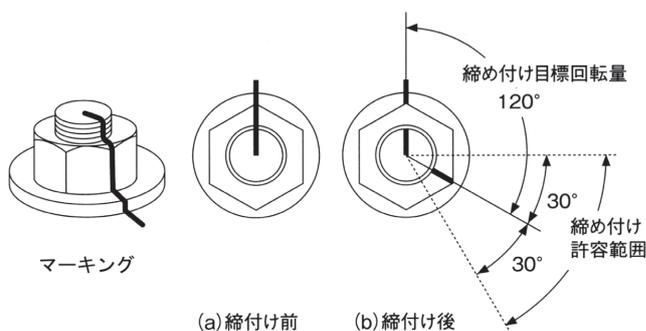


図5 マーキングとナット回転角

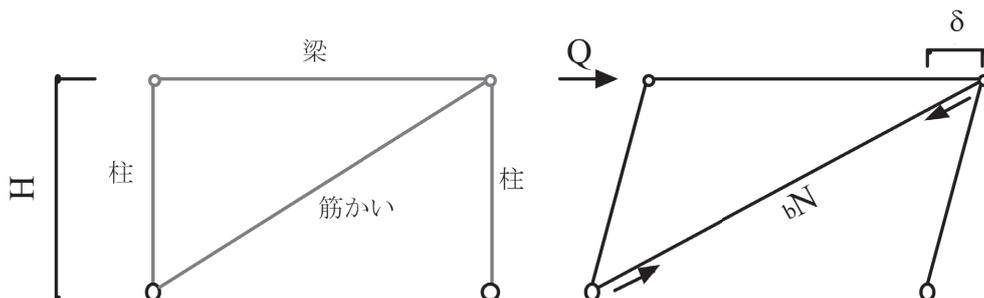


図6 筋かい付き骨組の変形

て、一般に筋かいの降伏耐力より大きなすべり耐力となる高力ボルトの本数が配置されることになる。これが通常の高力ボルト接合部の弾性設計である。一方、建築物がその耐用年数の間に一度受けるかどうかの確率で生じる大地震（阪神大震災、東日本大震災のレベル）については1/50程度の層間変形角が想定される。筋かいに十分な伸びが生じて、その塑性変形による吸収エネルギーが地震エネルギーに抵抗するように設計される。このように筋かい材に十分な伸びが生じる接合部設計の条件を保有耐力接合と呼んでいる。保有耐力接合の条件式は以下である。

$$jNu \geq \alpha \cdot Ny \dots\dots\dots (3)$$

- jNu：接合部の最大耐力
- α：接合部係数 (1.3程度の値)
- Ny：筋かい材の降伏耐力

筋かい材に大きな伸びを生じると筋かいの応力は降伏耐力の1.3倍程度の値に上昇する。(3)式はその応力で接合部に破断が生じない条件である。これは接合部係数αの値が1の場合に、筋かいに降伏が生じると同時に接合部が破断することを意味している。図8は保有耐力接合でない接合部(a)と保有耐力接合の接合部(b)について、水平荷重と柱頂部水平変位の関係である。高力ボルトの本数が少なく、保有耐力接合の条件を満たさず高力ボルトの破断が生じる場合、左図のように急激な耐力低下が生じて骨組の吸収エネルギーは小さいものとなる。一方、高力ボルトの本数が適切でボルトの破断が生じず、筋かい材に破断が生じ、保有耐力接合の条件を満たす場合は右図のように変形能力が大きく、骨組の吸収エネルギーは大きくなる。また、筋かいのボルト孔欠損位置にお

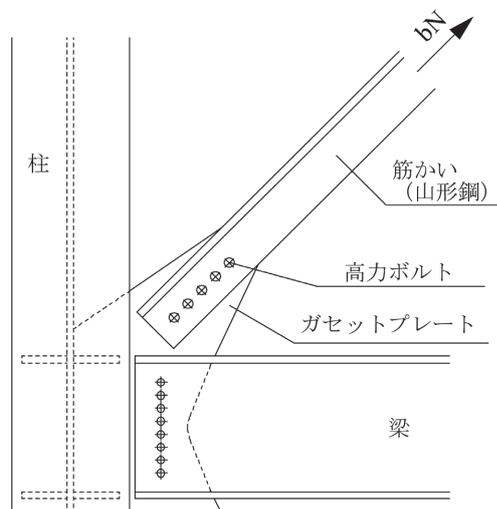


図7 筋かい端接合部のディテール

る正味断面で破断が生じる場合、(3)式は下式で表せる。

$$Ae \cdot \sigma_u \geq \alpha \cdot Ag \cdot \sigma_y \dots\dots\dots (4)$$

- Ae：筋かいのボルト孔欠損位置の正味断面積
- σ<sub>u</sub>：筋かい材の引張強度
- Ag：筋かいの総断面積
- σ<sub>y</sub>：筋かい材の降伏強度

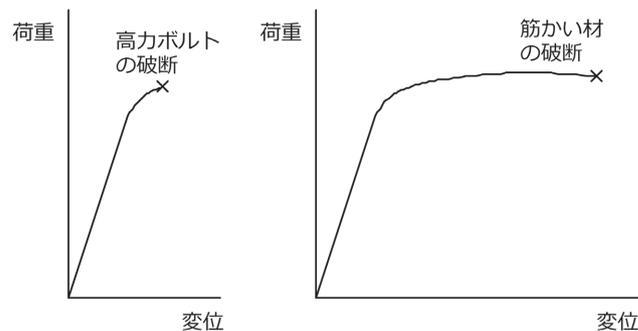
(4)式を変形すると以下となる。

$$Ae/Ag \geq \alpha \cdot \sigma_y/\sigma_u \dots\dots\dots (5)$$

Ae/Agは有効断面率であり、σ<sub>y</sub>/σ<sub>u</sub>は降伏比である。(5)式より、高力ボルト接合部を設計する際には有効断面率を降伏比よりも1.3倍大きくしておきなさいということになる。エネルギー吸収能力に優れた構造物を設計する際に高力ボルト接合部に関する保有耐力接合の考え方は大変重要である。設計時に接合部の最大耐力が高力ボルトの破断でなく、接合される材（ここでは筋かい）の破断が生じるよう設計すること、ボルト孔による断面欠損と降伏比の関係を検討しておくことになる。構造物全体の安全性から接合部設計の際に、高力ボルトと部材のバランスを考えること、降伏比などの材料特性が接合部設計の基本となることを理解しておくことが大切である。

## 5 おわりに

高力ボルトとしてこれまで種々の開発が進められ、表1に示した高力ボルト以外にもF14Tの超高力ボルト、耐候性鋼高力ボルト、ワンサイドボルトなどがある。これらについては参考文献<sup>1)</sup>および<sup>2)</sup>を参照されたい。接合部の種類は多種多様であり、それぞれ特徴を有する高力ボルトが開発されている。高力ボルトに期待される大きな方向として高強度化が



(a) 保有耐力接合でない接合部 (b) 保有耐力接合でない接合部

図8 筋かい付き骨組の荷重変位関係

ある。高強度化によって接合部をコンパクトにすることが可能となる。しかし、高強度化については高力ボルト製作加工の難しさと遅れ破壊の問題があり、これらを克服する技術が必要となる。遅れ破壊については日本鋼構造協会に「高力ボルトの遅れ破壊評価法の開発」小委員会が設置され、高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブックとしてその成果がまとめられているので参照されたい。

高力ボルト接合は摩擦面処理および締付け施工を適切に行えば、建設現場での溶接に比べて施工が容易で安定した接合部性能を期待できる。しかし、立体的に接合する接合部ディテールは複雑であり、応力伝達機構について不明確な点がまだまだ多い。鋼構造物を構成する柱・梁および筋かいなどの部材も高強度化が進み、制震などの技術も進歩しており、これらに相応しい高力ボルトの研究と開発、接合部のディテールと接合部設計の提案が期待されている。

#### 参考文献

- 1) 鋼構造接合部設計指針, 日本建築学会, (2006)
- 2) 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 土木学会, (2006)
- 3) 建築高力ボルト接合管理技術者講習テキスト, 日本鋼構造協会, (2011)
- 4) 高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 日本建築学会, (2003)
- 5) 高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック, 日本鋼構造協会, (2010)

(2011年9月7日受付)