



入門講座

鋼を接合する-1

高力ボルト接合 ー接合法ー

High Strength Bolted Joints -Connecting Methods-

山口隆司

大阪市立大学 大学院工学研究科
都市系専攻 教授

Takashi Yamaguchi

1 はじめに

我が国における大規模社会インフラ構造物の多くは、耐震性などを考慮して鋼構造物として建設されることが多い(図1)。鋼構造物は一般に工場で鋼板等を組み合わせた部材を製作し、それを現地に運搬し、現地でこれらの部材を接合し、建設される。接合技術は、工場内での部材組み立てや現地で部材接合において重要な役割を果たしており、計画、設計、建設、維持管理といった鋼構造物のライフサイクルマネジメントにおいて考慮すべき重要な要素となっている。

インフラ鋼構造物における鋼部材の接合方法は、図2に示すように、溶接接合と高力ボルト接合とに大別される。高力ボルトが登場する以前には、リベットによるリベット接合が高力ボルト接合に変わるものとして主流であったが、昭和39年にJIS B 1186摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセットが制定された後には、リベット締め作業に熟練を要すること、騒音が激しいこと、火気を必要とすることなどの施工・環境・安全上等の問題からリベット接合はほと

んど使われていない。インフラ鋼構造物における接合方法の分類を図2に示す。

高力ボルト接合は、工場で作成された部材を架設現場で接合する際に最も多く採用される接合法であり、荷重伝達メカニズムの違いにより、摩擦接合、支圧接合、引張接合に分類される。一方、溶接接合は、部材の組み立て時、すなわち、工

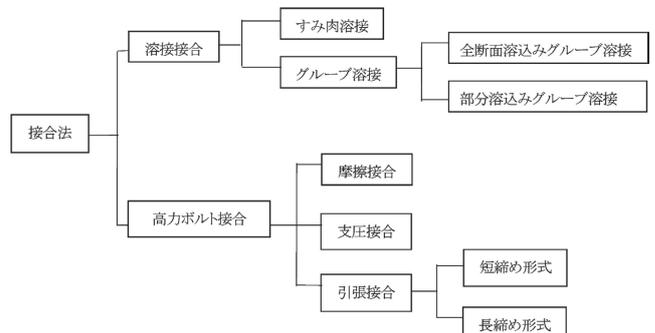


図2 インフラ鋼構造物における接合法の分類



図1 大規模社会インフラ構造物の例

場製作時に多く用いられる。

高力ボルト接合におけるいずれの接合形式においても、使われるボルトは高強度のボルトで、高い軸力（降伏ボルト軸力またはその付近）を導入して使用する。なお、高力ボルトに導入される軸力を管理せず、単にとじあわせのボルトとして使用する場合は、我が国では高力ボルト接合とは呼ばず、区別している。高力ボルト接合のインフラ鋼構造物における事例を図3に紹介する。左図は、人道橋のトラス格点部であり、右図は道路橋の鋼桁の現場継手部分である。いずれも摩擦接合形式であり、多数の高力ボルトが配置されている。

本稿では、インフラ鋼構造物の接合に使われている高力ボルト接合を対象に、接合形式ごとの荷重伝達メカニズムやその特徴について解説する。

2 摩擦接合

摩擦接合は、図4に示すように、ボルト軸と直角方向の作用力を伝達する接合形式であり、鋼構造物の現場接合形式として最も多用される。摩擦接合の適用事例は既に図3に示した。部材の板厚が厚く、作用断面力が大きい場合、ボルトの列数が10列程度となることも多い。

摩擦接合は、高力ボルトを締め付けて接合面間に発生させた接触力により作用力に抵抗する摩擦力を発生させ、作用力の伝達を行う。同じように材片を重ねて接合するリベットや軸力を導入しない普通ボルトによる接合法は、リベットおよびボルト軸部と材片との間の局所的な支圧力やせん断力によって作用力を伝達しており、摩擦接合と異なる。

摩擦接合では、作用力が摩擦力を超えて作用し、材片間にすべりが発生するまでは、静的摩擦力により作用力に抵抗し、材片間にずれは生じない。このように摩擦力を介して荷重伝達を行うことから、ボルト孔周辺の鋼板に高い応力集中

も発生せず、ボルトの軸力変動も小さい。そのため、疲労に対しても有利な接合形式である。また、摩擦力により被接合材と連結板とが一体となるため接合部の剛性は高い。ただし、静的摩擦力を超えた作用力が作用すると材片間にずれが発生し、作用力の増大とともに、残った摩擦力とボルトのせん断力および支圧力で作用力を伝達する。最終的には作用力のすべてをボルトのせん断力および支圧力で伝達する状態（支圧状態）へと移行する。なお、材片間のずれをすべりと呼び、このすべりが発生する限界をすべり限界と呼んでいる。我が国のインフラ鋼構造物の設計では、このすべり限界を終局限界として設計されることが多い。しかしながら、すべり限界以降、すべりによる相対ずれが発生し、接合部は支圧状態となるが、接合部の耐力は増加することから、欧米では、構造物の種類によっては、すべり限界を終局限界とせず、支圧状態においてボルトのせん断耐力もしくは、孔壁の支圧耐力に到達する限界状態（支圧限界状態）を終局限界とする場合もある。摩擦接合における作用力 P と相対変位 δ との関係の概念図を図5に示す。

摩擦接合では、前述した荷重伝達メカニズムから材片間（接合面）の摩擦力が重要となる。この摩擦力を確実に発生させるためには、高力ボルトに所定の軸力を確実に導入するこ

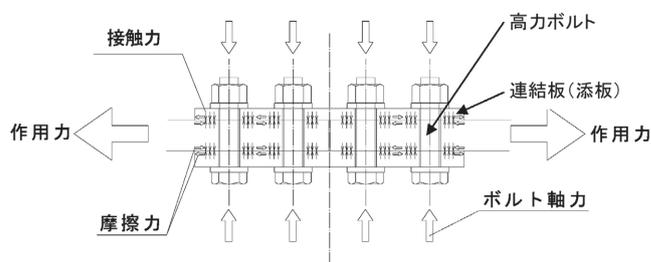


図4 摩擦接合の荷重伝達メカニズム

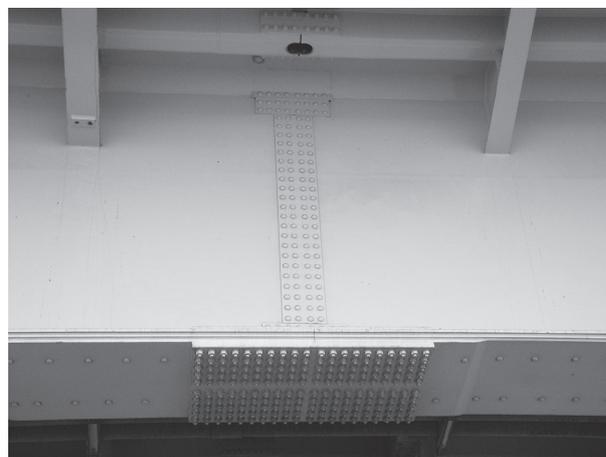
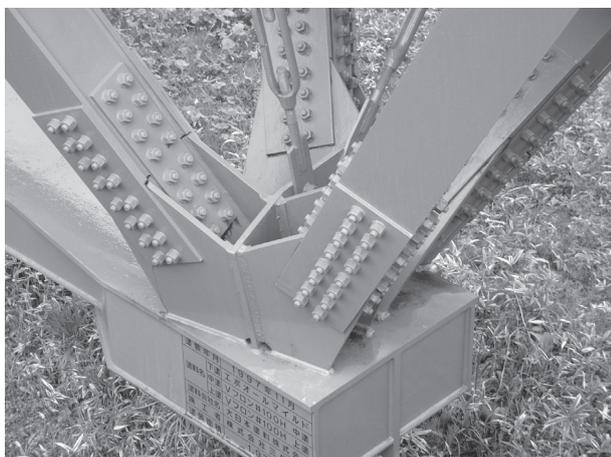


図3 インフラ構造物における高力ボルト接合の事例（摩擦接合）

と、および所定のすべり係数 μ を確保できる接合面処理を行うことが必要であり、これらの管理が重要となる。そのため、接合面では、これらのすべり係数値以上を確保できるよう、十分な配慮がなされる。

摩擦接合における一接合面あたりの摩擦力は次式で表され、作用力がこの摩擦力を超えた段階ですべりが発生する。

$$F = \mu N \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

F ：ボルト1本、1接合面あたりの摩擦力

N ：設計ボルト軸力

μ ：すべり係数

ここでいう、すべり係数とは、式(1)からわかるように、接合面にすべりが生じた時の荷重(作用力)を、設計ボルト軸力で除した値である。つまり、接合面にすべりが生じた時の

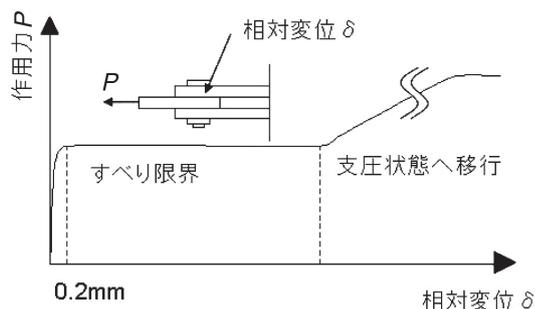


図5 摩擦接合における作用力と相対変位の関係の概念図

ボルト軸力で除すのではないということであり、それ故、摩擦係数と呼ばずにすべり係数と呼んでいる。また、あくまで、接合部に作用した荷重に着目した平均的な摩擦係数であり、この意味からもすべり係数と呼ばれる。なお、実際の施工では、接合面におけるリラクゼーション等を考慮して、設計ボルト軸力を1割増しとした標準導入軸力を目標値として軸力を導入・管理し、リラクゼーションによりボルト軸力が設計ボルト軸力を下回らないよう配慮している。

すべり係数 μ はすべり試験の結果から求められるものであるが、その値は締付けられる接合面の処理状況で異なる。しかしながら、設計・施工上の簡便さから、日本道路協会道路橋示方書・同解説²⁾では0.4、日本建築学会鋼構造設計規準³⁾では、0.45と一律の値をすべり係数として規定している。

一方、現在では、接合部のコンパクト化(ボルト本数の低減)などの観点から、接合面処理に見合った高いすべり係数を採用したいとのニーズもあることから、過去の実験結果を参照し、接触面の処理状態に応じてすべり係数の推奨値を提案している。例えば、土木構造物を対象としている文献⁴⁾では、これらすべり係数の推奨値を表1のように規定している。また、建築構造物についても、文献⁵⁾で接合面処理に応じたすべり係数が提案されている。

土木構造物では、継手部が防錆上の弱点となりやすいこと、錆汁などの発生から外観が損なわれることなどから、接合面にプラスト処理後、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布する接合面処理が一般的である。一方、建築構造物では、プラスト処理後、赤さびを発生させる接合面処理が一般的である。

高力ボルトは、接合面間に高い接触力を生じさせる役割を担うため、大きな引張力に耐え得るものが必要となる。現在、

表1 土木鋼構造物におけるすべり係数の推奨値⁴⁾

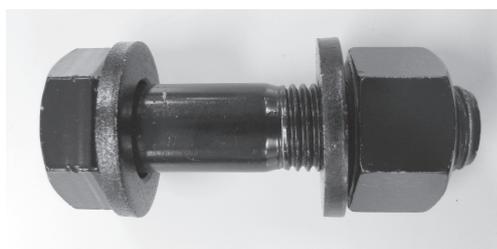
接合面の処理	すべり係数	備考
赤錆状態	0.55	粗面仕上げの後に、健全な赤錆を発生させたもの。
薬剤による発錆	0.45	化学薬剤によって、健全な赤錆を発生させたもの。
粗面状態	0.25	ディスクグラインダーによって粗面とし、錆がないもの。
粗面状態	0.35 (表面粗さの指定なし)	ショットプラストまたはグリッドプラストによって粗面とし、錆がないもの。
	0.40 (10 μ m > Ra \geq 5 μ m)	
	0.45 (Ra \geq 10 μ m)	
無機ジンクリッチペイント	0.40 (塗膜厚 \leq 65 μ m)	合計塗膜厚を90~250 μ mとする。塗料中の乾燥亜鉛含有量は80%以上を原則とする。
	0.50 (塗膜厚 > 65 μ m)	合計塗膜厚を150~250 μ mとする。塗料中の乾燥亜鉛含有量は80%以上を原則とする。
有機ジンクリッチペイント	個別にすべり試験を行うなど、継手の性能を確認して決定する。	
溶融亜鉛めっき		
金属溶射		
機械的な粗面加工		

一般的に使用されている高力ボルトは、JIS B 1186摩擦接合用高力六角ボルト、ナットおよび座金のセットに規定される第1種 (F8T) および第2種 (F10T) 高力六角ボルト、摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット、同解説^{6,7)}に規定されるトルシア形高力ボルトである。なお、ここでFはfor Friction Grip Joints (摩擦接合用) を意味し、Tはボルトの引張試験による引張強さとTensile Strengthを表している。例えば、F10Tは引張強さ $100\text{kgf}/\text{mm}^2 = 10\text{tonf}/\text{cm}^2$ の摩擦接合用を表している。両者のボルトの例を図6にそれぞれ示す。後者のトルシア形高力ボルトは、ねじ部の縁端部にあるピンテールをつかんでナットを回転させ、所定のトルクに達するとピンテール部の溝が破断するボルトであり、容易に一定のトルクでボルト締めが可能となっている。図6に示すとおり、摩擦接合用高力六角ボルトでは、2枚の座金を使用するが、トルシア形高力ボルトでは、頭部側の座金を用いない。実際の架設現場では、所定の軸力が導入されているかなどの施工管理上の容易さから、トルシア形高力ボルトの採用が主流となっている。いずれも、ボルト、座金、ナットを組み合わせたセットとして製造、出荷される。これは高力ボルトに一定の軸力を確実に導入するためにセットとして、その性能が保証されているからである。

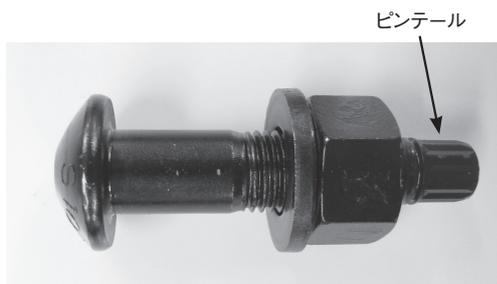
摩擦接合におけるボルト孔径は施工性も考慮して、ボルトの呼び径+2から2.5mm (M20からM24の場合) となっている。

3 支圧接合

支圧接合は、摩擦接合同様に、ボルト軸と直角方向の作



(a) 高力六角ボルト



(b) トルシア形高力ボルト

図6 摩擦接合用高力六角ボルトとトルシア形高力ボルト

用力に対し、ボルト軸部のせん断抵抗およびボルト軸部とボルト孔壁部材の支圧抵抗によって作用力を伝達する接合形式である。支圧接合の荷重伝達メカニズムを図7に示す。支圧接合は摩擦接合や後述べる引張接合と異なり、高力ボルトを締め付けることによって生じる材片間の接触力を利用するのではなく、高力ボルトそのものの高い強度を利用する接合形式であり、荷重伝達メカニズム上はボルトの締め付けを必要としない。

設計上、支圧接合の耐力は、ボルトのせん断耐力と鋼材孔壁の支圧耐力のいずれか小さい方で定義される。支圧耐力が鋼材の一軸降伏耐力よりも大きいこと、摩擦力よりもボルトのせん断耐力が大きいことから、支圧接合の耐力は摩擦接合のそれよりも高くなる。そのため、摩擦接合に比べ、少ないボルト本数で接合部を構成することも可能となり、十分なボルトを配置するだけのスペースがない時など、補修・補強時の接合法として現在、注目されている。

道路橋示方書・同解説²⁾では、支圧接合でも摩擦接合の場合と同様な軸力を高力ボルトに与えて継手性能の改善を図るよう規定している。ただし、設計上は、摩擦による力の伝達は考慮せず、ボルトに対してはボルト軸部のせん断応力、被接合材および連結板に対しては、それらの降伏応力に対して安全となるよう設計するものとしている。

既に述べたように、支圧接合ではボルトのせん断抵抗とボルト軸部とボルト孔壁部材の支圧抵抗によって荷重伝達を行うことから、ボルト孔壁とボルト軸部との密着性が重要となる。したがって、用いる高力ボルトは、それに対応した、図8に示すような突起付きの支圧接合用打込み式高力ボルトを採用することが多い。ただし、摩擦接合用高力六角ボルトや摩擦接合用トルシア形高力ボルトを用いる場合もあり、この場合、ボルト孔とボルト軸との隙間をできるだけ小さくし、すべりが生じても接合部のずれが小さくなるように配慮する。このため道路橋示方書・同解説²⁾では、支圧接合に用いるボルトは、支圧接合用打込み式高力ボルト、六角ナット、平座金暫定規格⁸⁾によるものとし、ボルト孔径については、ボルト軸径と等しいとし、打ち込み作業の難易も考慮して、工作上許容できる限界を孔加工の精度として規定している。さらに、打ち込みの作業性(打ち込み難易度)や、ボルト孔周縁の傷、

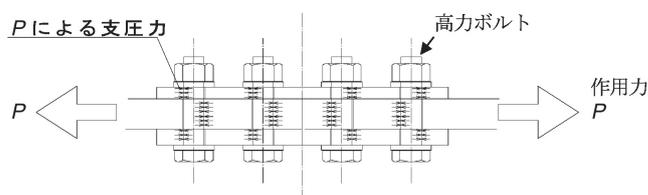


図7 支圧接合の荷重伝達メカニズム

被接合材の厚さと打込み強さ、ボルト孔の大きさと食い違いなどの部材精度についても十分検討するよう規定している。実際の施工にあたっては、作業者はもちろん、周辺環境、周辺住民への施工時騒音に対する配慮が必要となる。

支圧接合で用いられる孔径は高力ボルトの呼び径 (M20 から M24) に対し、+1.5mm となっている。

このようなことから支圧接合は我が国の鋼構造物での使用実績は多くはないが、最近では、大きな断面力が作用する鋼製ラーメン橋脚隅角部の補修・補強工事のあて板補強に用いられるなど、有効な接合法として注目されている。

4 引張接合

引張接合は、高力ボルトを締め付けて接合面間に発生させた接触力により作用力の伝達を行うことは摩擦接合と同じであるが、図9に示すように、伝達すべき作用力はボルト軸方向に作用し、作用力の増加分と接触力の減少分とがつり合って作用力を伝達する。引張接合の荷重伝達メカニズムを図9に示す。

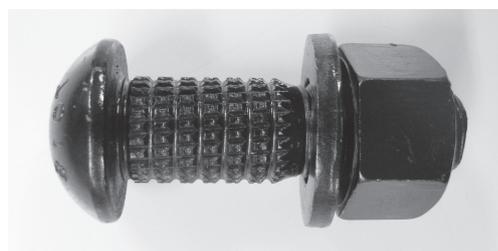
引張接合には、接合面を向かい合わせに直接接触させて、高力ボルトで締め付けて接合する短縮め形式と、リブプレートおよびアンカープレートなどを介して締め付ける長縮め形式とがある。短縮め形式と長縮め形式とは、リブプレートを介して作用力を伝達するか否かで分類されており、単にボルトの長さで短縮め、長縮めと分類するのではない。短縮め形式では、接合用材片の形状から、スプリットティー接合やT接合とも呼ばれる。作用力が主として接触力の減少とつり合

うという基本的なメカニズムは短縮め形式でも長縮め形式でも同一である。接触力によって発生する摩擦力を利用する摩擦接合と引張接合とを比較すると、すべり係数が関与しない引張接合は、接触力を直接利用するため、大きな荷重 (ボルト1本あたり) を伝達することができ、効率的である。また、高力ボルトに導入される高い軸力によってもたらされる接触力のために接合部の剛性は高い。さらに、この接触力の存在により、作用荷重の変動に対してボルト軸力の変動はきわめて小さく、耐疲労性にも優れている。ただし、摩擦接合では荷重に伴うボルト軸力の増加はほとんどないが引張接合では荷重に伴い、短縮め形式か長縮め形式かによるが、ボルト軸力の増加を伴う場合がある。

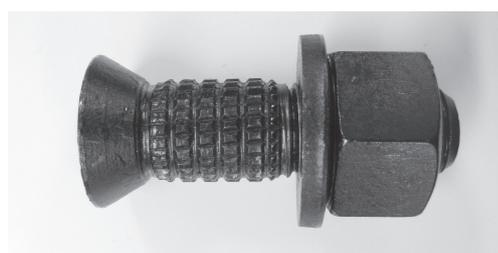
引張接合にせん断力が作用する場合には、摩擦接合と同様の荷重伝達機構によってせん断力に抵抗する。このように見ると、引張接合は、引張力とせん断力、それぞれの作用力に対応した、異なる荷重伝達メカニズムにより荷重伝達を行う接合形式であると言える。

引張接合は高力ボルトの高い引張強さを活かした合理的な接合方法ではあるが、その力学的挙動に対する理解が一般的でないことや施工時誤差の吸収が困難であることなどから、広く普及するには至っていない。

短縮め形式の場合は、いわゆる、てこ作用と呼ばれる現象が発生し、作用力の増加に伴ってボルト軸力が増加する。作用力が初期ボルト軸力より大きい場合のてこ作用およびてこ反力の概念図を図11に示す。Tフランジの剛性が無限大でないため、Tフランジ先端部分には作用力の増加に伴うTフランジの変形に伴って、てこ反力 R が発生する。このようなTフランジの変形に伴って接合面間に発生する接触力をてこ反



(a) 丸頭



(b) 皿頭

図8 支圧接合用打込み式高力ボルト

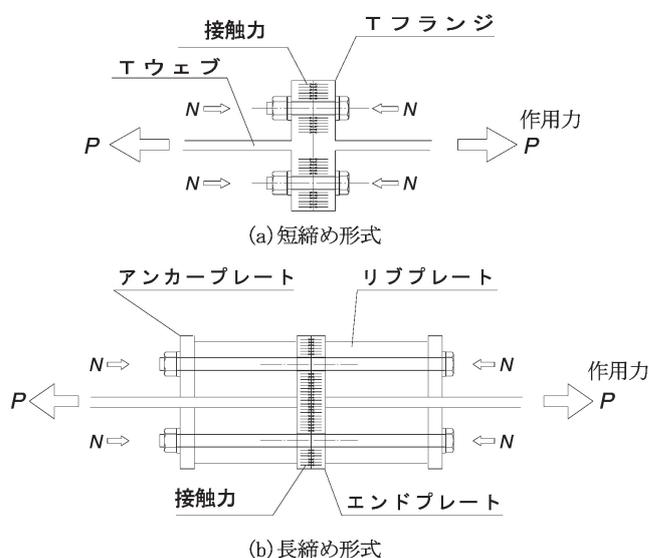


図9 引張接合の荷重伝達メカニズム

力 R と呼んでいる。短縮め形式の引張接合の設計では、このてこ反力の発生は無視できない重要な項目である。Tフランジの板厚が大きくなればなるほど、Tフランジの剛性が大きくなり、てこ反力の発生を少なくすることができる。設計では、作用力に対して、てこ反力を考慮したボルト軸力がボルトの限界軸力を越えないように設計する。

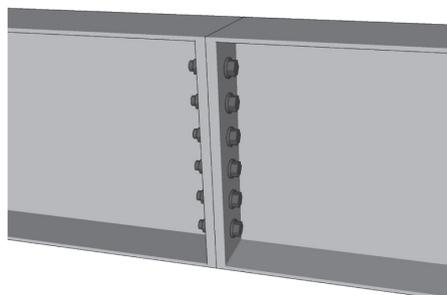
T接合における作用力（荷重）と離間量（Tウェブ位置）の関係の概念図を図12に示す。図に示すように、Tフランジ

（フランジ板）の板厚によりその挙動は異なる。すなわち、Tフランジ（フランジ板）が薄いほど離間開始の荷重レベルも低く、Tフランジの降伏が支配的となり、Tフランジの曲げ崩壊で終局状態となる。一方、Tフランジ（フランジ板）が厚い場合、離間開始の荷重レベルは高く、離間量も小さい。この場合、Tフランジではなく、高力ボルトの挙動が支配的となり、高力ボルトの降伏、そして破断により終局状態となる。

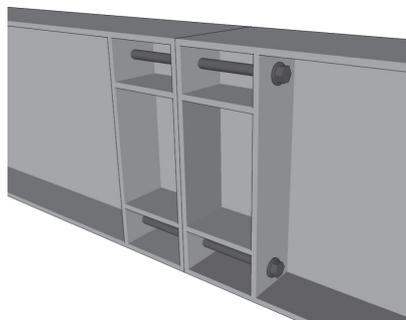
一方、長縮め形式の場合は、図13に示すように、短縮め形



(a)短縮め形式 (○部分) (上)
(b)長縮め形式 (右)



(c)短縮め形式を適用した事例



(d)長縮め形式を適用した事例

図10 引張接合を用いた継手構造の例

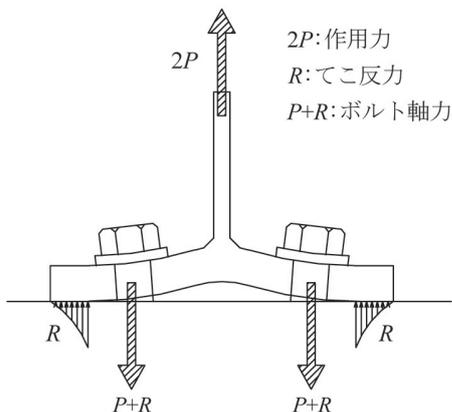


図11 てこ作用とてこ反力

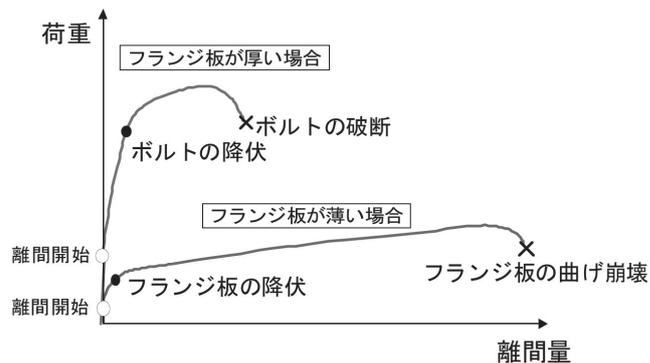


図12 T接合における作用力と離間量の関係

式と異なり、短縮め形式のTフランジに相当するエンドプレートがリブプレートで補剛されること、また、その結果、作用力と発生する接触力の作用位置の偏心が少なくなることから、てこ作用は考慮しなくてよいほど小さくなる。そのため、設計にあたってそれを考慮する必要はない。しかし、短縮め形式と異なり、接合部の弾性変形によってボルト軸力が増加することは無視できず、これを考慮する必要がある。

短縮め形式に用いるボルトには、摩擦接合に用いる摩擦接合用高力六角ボルトや摩擦接合用トルシア形高力ボルトを採用する。特に、短縮め形式では作用力によってボルト軸力が初期ボルト軸力よりも増加するので、トルシア形高力ボルトを使用する場合には、ボルト頭の鋼材へのめりこみによる初期ボルト軸力の減少が摩擦接合に比べ大きくなることが予想される。そのため、日本鋼構造協会橋梁用高力ボルト引張接合設計指針⁹⁾では、ボルト頭部側にも座金を用いることとしている。

一方、長縮め形式に用いるボルトは、短縮め形式に用いるボルトのほかに、六角ボルト (JIS B 1180¹⁰⁾ で規定される強度区分8.8、10.9の2種) および棒鋼をねじ加工したボルトを用いる。素材としては、炭素鋼や合金鋼 (強度区分10.9以下の範囲) を使用することができる。

高力ボルト引張接合におけるボルト孔径は、摩擦接合と同様であり、M20からM24の高力ボルトに対して、ボルトの呼び径+2.5mmとなっている。

5 まとめ

以上のように、高力ボルト接合は、高力ボルトに高い軸力を導入してその結果得られる接触力を利用する摩擦接合と引張接合、さらに、主として高力ボルトそのものの高い強度を

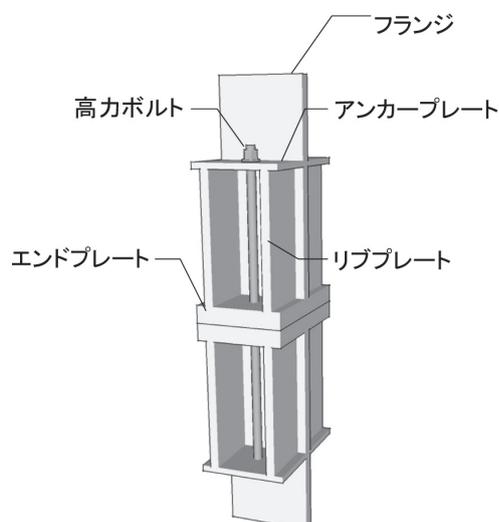


図13 長縮め継手の構造詳細の例

利用する支圧接合に分類される。いずれも、高力ボルトの高い強度を利用した接合形式である。

現在、社会インフラ構造物には、我が国の経済・社会情勢を踏まえ、建設費や維持管理費を含めたライフサイクルコストの縮減が強く求められている。鋼構造物は、主として、構造のシンプル化、高耐久性化によってそれを実現しようとしている。したがって、部材と部材とを接合する、代表的な接合形式である高力ボルト接合においても同様なことが求められている。高力ボルトの一層の高強度化はボルト本数の低減をもたらす、継手構造をシンプルにし、省力化、高耐久性化に大きく貢献する。特に、高力ボルト接合部は、塗装の面から防錆上の弱点となっており、ボルト本数の低減が高耐久性化にもたらす影響は小さくない。社会インフラ鋼構造物における高力ボルトの高強度化は、F11T、F13Tのボルトで発生した過去の遅れ破壊の問題から、あまり進んでおらず、部材を構成する鋼材の高強度化とのアンバランスが設計上問題となる場合がある。実際、建築構造物ではF14T高力ボルトの使用が認められているが、橋梁などの土木構造物においては、F14Tの使用は認められておらず、橋梁構造物の接合部設計を難しくしている場合がある。

したがって、高力ボルトに適した、高強度で高耐久な鋼材の開発とその高力ボルトへの加工技術、そして、性能評価技術の開発が、社会インフラ鋼構造物の接合部において強く求められており、これらを用いた大規模社会インフラ鋼構造物の一日も早い出現を期待したい。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS B 1186-1995 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1995)
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, (2002)
- 3) 日本建築学会：鋼構造設計基準, (2005)
- 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), (2006)
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, (2006)
- 6) 日本道路協会：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1983)
- 7) 日本鋼構造協会：JSS II 09-1996 構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, (1996)
- 8) 日本道路協会：支圧接合用打込み式高力ボルト・六角ナット・平座金暫定規格, (1971)
- 9) 日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, (2004)
- 10) 日本規格協会：JIS B 1180-2004 六角ボルト, (2004)

(2011年2月16日受付)