

Chapter 8 ファスナ接合の設計

Abstract この章には、ボルト接合部の設計問題について説明する。

8.1 鋼構造の接合

鋼構造は、設計図書に基づいて鋼材を工場で構造部材に加工し、それらを工事現場で組み立てる構造である。したがって、接合部は構造の形態を保ち、部材から部材へと力を伝達する構造上重要な役割を果たしている。

鋼構造の部材と部材との間（梁・梁、柱・柱または、柱・梁）を接合するには、ファスナ接合 (Fastener) と溶接接合 (Welding) という二つの方法がある。

- ファスナ接合は機械的接合方法であり、接合しようとする部材に孔をあけ、その孔に挿入したファスナによって力を伝達させる方法である。
- 溶接接合は冶金学的接合方法であり、接合部分を溶融（ようゆう）凝固（ぎょうこ）させることによって、部材を連続させる方法である。

8.1.1 ファスナ接合

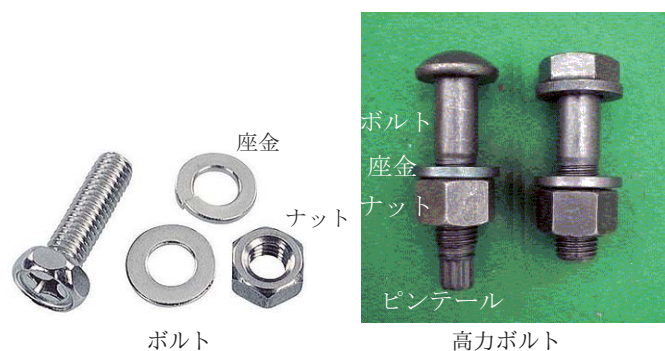


図 8.1 ボルトと高力ボルト

ファスナ接合には、力の伝達方法によってリベット (Rivet) 接合、ボルト (Bolt) 接合および高力ボルト (High-strength Bolt) という三つの方法がある。

- リベット接合は、片方の端に既成の頭を付けた鋼の丸棒を高温（約 1,100°C）に加熱して被接合材の孔に通し、ハンマーで叩いて、孔の中を充填すると同時にもう一方の頭に成形するも

のである。リベットが冷却し、軸の収縮によって、被接合材を締め付ける。しかし、作業時の騒音や、熟練技能者の不足などにより、現在の建築分野ではほとんど使われていない¹ため、その説明は省略される。

- ボルト接合は、被接合材の孔に差し込んで、ボルトに直接働くせん断力あるいは引張力により部材に力を伝達する接合方法である。孔が充填されていないため、ボルトと孔の間に隙間が残る。したがって、外力の作用によりボルト接合された部分にずれが生じて、十分な剛性が確保できないことや振動や繰り返し荷重によってナットが緩むという問題がある。このため、構造上重要な部材にボルト接合を使用できる構造物は、一般的に軒高 9m 以下でスパン 13m 以内のものに限定される。
- 高力ボルト接合は、高張力鋼をボルト素材とし、使用時には高い締め付け力を与えて、被接合材の間の圧縮力により生じる摩擦力または材軸方向の引張力を利用して力を伝達する接合方法である。溶接接合と同じように、力の伝達がなめらかであり、接合部の剛性も高いという利点がある。



図 8.2 高力ボルト接合（名市大北千種キャンパスの外にある歩行橋）

現在の建築分野において、高力ボルト接合と溶接接合は、最も広く使われている接合方法である。たとえば、土木構造物になるが、名市大北千種キャンパスの外にある歩行橋には高力ボルト接合が採用されている。

8.2 ファスナ接合の応力計算

8.2.1 力の伝達機構

ファスナによる接合形式は、図 8.3 に示すように、せん断接合 (Shear Connection) と引張接合 (Tensile Connection) に大別される。

- せん断接合では、応力の作用方向がファスナの軸と直交するため、ファスナにせん断力が作用する。せん断接合はさらに支圧接合 (Bearing-type Connection) と摩擦接合 (Friction-type Connection) に分けられる。支圧接合はリベット・ボルト・高力ボルトのいずれにも適用できるが、摩擦接合は高力ボルトにのみ可能である。
 - 支圧接合では、力が接合される部材の支圧力とせん断位置でのボルトのせん断力により伝達される。このため、力が伝達される前に接合部では、隙間分に相当するずれが生じる。
 - 摩擦接合では、ボルトに高い張力を与えることによって被接合材の面に生じる摩擦力で外力（せん断力）を伝達する。
- 引張接合では、応力の作用方向がファスナの軸に平行するため、ファスナには引張力が作用する。

¹ リベット接合は、飛行機などの分野ではまた広く応用されている。

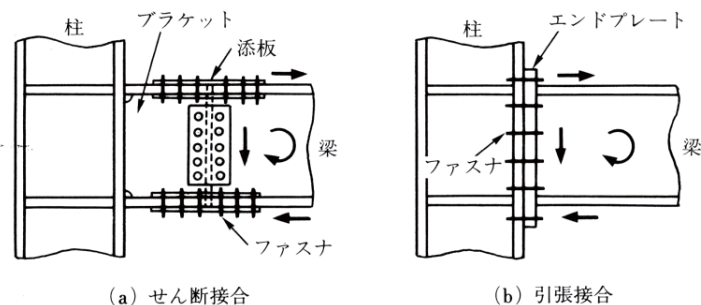


図 8.3 ファスナ接合の力の伝達機構：せん断接合と引張接合

以下では、せん断力接合の支圧接合と摩擦接合、および引張接合を分けてそれぞれの設計問題について説明する。

8.2.2 支圧接合の設計

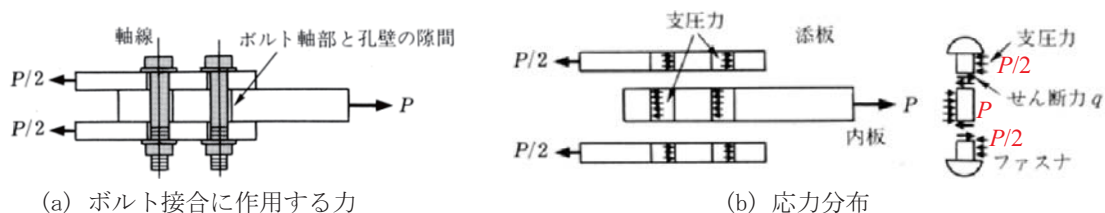


図 8.4 支圧接合における力の伝達（ボルト）

たとえば、図 8.4(a) に示すように、ボルト接合で 1 枚の鋼板（内板）に作用する外力 P を 2 枚の鋼板（添板）に伝達する問題を考える。

- ボルト接合の場合には、板が先に滑り、ボルトの軸と孔壁の隙間がなくなってからその力の伝達が始まる。
- 高力ボルト接合の場合には、摩擦力でせん断力を伝達するため、板間には滑りが生じない。

孔壁およびボルトに作用する垂直応力およびその（板の面と一致する）断面に作用するせん断応力は図 8.4(b) に示す。

力の釣合いによって、ボルト 1 本の 1 せん断面に作用するせん断力 q は

$$q = \frac{P}{m \cdot n} \tag{8.1}$$

で計算できる。ここで、 n はボルトの本数、 m はせん断面の数（1 または 2）であるたとえば、図 8.4 のボルト接合では、ボルトが 2 本、各ボルトのせん断面が 2 であるため、 $n = 2, m = 2$ である。

支圧接合のせん断応力度算定：

ボルト 1 本の 1 せん断面に作用するせん断応力 τ は

$$\tau = \frac{q}{A_b} \tag{8.2}$$

となる。ここで、 A_b はボルトの軸断面積で、 $A_b = \pi d^2/4$ であり、ボルトの d は呼び径である。

式 (8.2) で算定されるせん断応力 (度) τ は

- ボルト材料の降伏せん断強さ τ_y を超えなければ、すなわち $\tau \leq \tau_y$ 、ボルトが降伏しない；
- ボルト材料の最大せん断強さ τ_u を超えなければ、すなわち $\tau \leq \tau_u$ 、ボルトが破断しない。

8.2.3 摩擦接合

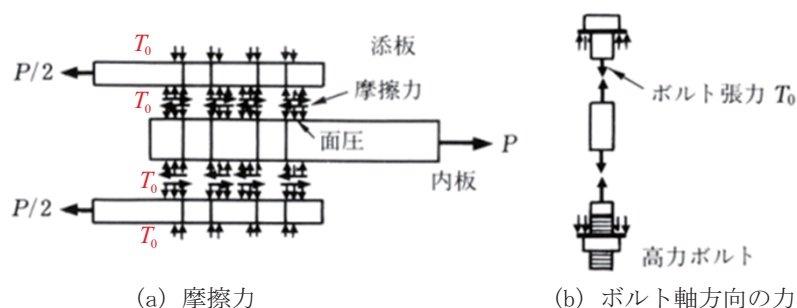


図 8.5 摩擦接合における力の伝達 (ボルト)

図 8.5 には、高力ボルト接合における摩擦力でせん断力の伝達を示している。

1 本の高力ボルトに導入された張力を T_0 とすると、これにより鋼板と鋼板の間に T_0 と等しい面圧が生じる。摩擦係数を μ とすれば、高力ボルト 1 本の 1 せん断面について最大 $\mu \cdot T_0$ の摩擦力が期待できる。

摩擦接合のすべり限界せん断力：

高力ボルト摩擦接合が滑らない限界せん断力 P_s は次の式で計算できる。

$$P_s = m \cdot n \cdot (\mu \cdot T_0) \quad (8.3)$$

高力ボルト摩擦接合の場合には、 P_s をすべり耐力、 μ をすべり係数、 T_0 を導入軸力という。また、 m を摩擦面の数、 n は高力ボルトの本数である。

たとえば、図 8.5 のボルト接合では、ボルトが 2 本、各ボルトの摩擦面が 2 であるため、 $n = 2$ 、 $m = 2$ である。

高力ボルト摩擦接合では、鋼板は滑らない限りに非常に剛性の高い接合が実現できる。また、外力が作用してもボルトには付加される応力が小さいため、導入した張力応力が一定に保たれるので、疲労強度も高い。

外力が式 (8.3) で算定されるすべり耐力を超える場合に、鋼板がすべて支圧接合と同じような支圧状態に移行する。したがって、(支圧接合と摩擦接合を含めた) せん断接合の終局状態は、支圧状態となるので、ボルトのせん断破壊あるいは被接合材の破壊が起こる。被接合材の破壊には有効断面破断、端抜け破断、ちぎれ破断があるが、その破断耐力の計算方法については第 3 章の引張材の設計を参考にしてください。

8.2.4 引張接合

引張接合では、外力の方向とボルトの軸方向が平行であるため、外力に対してボルトが引張力で抵抗する。

接合されている鋼板（母材）間で離間が始まる前に、接合部に作用する力は、ボルトを伸ばすように働く。それと同時に、ボルトを締め付けたときに生じている母材の圧縮ひずみが元に戻す作用も生じるため、母材間の圧縮力が減少する。しかし、ボルトの軸断面積に比べて、母材間の圧縮力が分布している面積のほうがはるかに大きいので、ボルトへの作用力は、かなりの分が接合された母材の圧縮変形解除で吸収される。したがって、直接ボルト張力の増加となる分は少ない。

これは、接合部の剛性がボルトのみで作用力を負担する場合に比べてはるかに大きなものとなる原因である。さらに、外力の変動によりボルト張力の変動が小さいため、疲労しにくい理由ともなっている。

8.3 ボルト接合の設計

8.3.1 ボルト・高力ボルトの種類

ボルトにはさまざまな種類があるが、鋼構造に使われるのはほとんど六角ボルトである。六角ボルトは M16 のように表記され、M はメートルねじ、16 は呼び径を表している。

六角ボルトの強度区分の表示としては、たとえば 4.6 は最初の 4 が呼び引張強さ (400N/mm^2) を、後の 6 が呼び降伏比 (60%) を表している。一般に使用が認められている強度区分は 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8 となっている。

鋼構造に使われる高力ボルトは、JIS で規定された高力六角ボルトと日本鋼構造協会が制定したトルシア形高力ボルトがある。この基本的性質は同じである。

高力ボルトのセットは構成部品の組合せによって 1 種、2 種、3 種がある。さらにそれぞれがトルク係数値によって A と B に分けられている。A は一般にボンデ処理を施してトルク係数の低減と安定化を図ったものである。F8T, F10T の F は摩擦 (Friction)、8 や 10 は引張強さの下限値 ($800, 1000\text{N/mm}^2$)、T は引張強さ (Tensile Strength) を表している。

ボルトと高力ボルトの設計基準強度を表 8.1 に示している。

表 8.1 ボルトと高力ボルトの設計基準強度

ファスナ	強度区分	一次設計 F (N/mm^2)	二次設計 F_u (N/mm^2)
ボルト	4.6	240	400
	4.8		
	5.6	300	500
	5.8		
高力ボルト	6.8	420	600
	F8T	640	800
	F10T	900	1,000

8.3.2 せん断接合

設計では、ボルトの設計基準強度 F と F_u を用いて、せん断に対する設計基準強度 $\tau_y = F/\sqrt{3}$ と $\tau_u = F_u/\sqrt{3}$ とする。

ボルトのせん断接合 (支圧接合) 応力度検定 :

$$\begin{aligned} \text{降伏しない (一次設計)} : \quad q &\leq q_y = \frac{F}{\sqrt{3}} A_b \\ \text{破断しない (二次設計)} : \quad q &\leq q_u = \frac{F_u}{\sqrt{3}} A_b \end{aligned} \quad (8.4)$$

ここで、1本のボルトの1せん断面の降伏せん断耐力は q_y 、最大せん断耐力は q_u で表される。許容応力度設計 (一次設計) では、 q_y を短期許容せん断耐力、 $q_y/1.5$ を長期許容せん断耐力とする。

8.3.3 引張接合

ボルトを引張接合に使用するときは、その軸断面が外力と等しい引張力 p を受けるものとして設計する。このとき、引張応力度がボルトの降伏強さ σ_y あるいは引張強さ σ_u に達したときをもって、それぞれ降伏引張耐力と最大引張耐力とする。設計では、 σ_y と σ_u の代わりにそれぞれ基準強度 F と F_u を用いる。

ボルトの引張接合応力度検定 :

$$\begin{aligned} \text{降伏しない (一次設計)} : \quad p &\leq p_y = F A_e \\ \text{破断しない (二次設計)} : \quad p &\leq p_u = F_u A_e \end{aligned} \quad (8.5)$$

ここで、1本のボルトの降伏引張耐力は p_y 、最大引張耐力は p_u で表される。また、 A_e は有効断面積であるが、ボルトでは軸断面積 A_b の 0.75 倍、すなわち $A_e = 0.75 A_b = 0.75 \pi d^2 / 4$ としてよい。

また、許容応力度設計では、 p_y は短期許容引張耐力であるため、長期許容引張耐力は $p_y/1.5$ となる。

8.3.4 引張とせん断の組合せ

引張力 p とせん断力 q を同時に受けるボルトの応力度検定 :

- 降伏しない条件 (一次設計)

$$\frac{p}{1.4 p_y} + \frac{1.6 q}{1.4 \sqrt{3} q_y} \leq 1 \quad (8.6)$$

- 破断しない条件 (二次設計)

$$\left(\frac{p}{p_u} \right)^2 + \left(\frac{q}{q_u} \right)^2 \leq 1 \quad (8.7)$$

8.4 高力ボルト接合の設計

高力ボルト接合を設計するとき、一次設計と二次設計の基本的な考えについては以下のようにまとめられている。

- 許容応力度設計法（一次設計法・弾性設計法）で高力ボルト接合を設計するとき、摩擦接合ではすべり耐力に基づき、引張接合では離間耐力に基づき、それぞれ短期許容応力度または高力ボルト1本当たりの短期許容耐力を定めている。長期許容応力度または高力ボルト1本当たりの長期許容耐力は、短期の値を安全率1.5で除したものである。
- 終局耐力設計法（二次設計法・塑性設計法）では、接合される部材が全塑性状態に達し十分な塑性変形能力を発揮するまで高力ボルト接合部が破壊しないように設計する。したがって、それに合わせて摩擦接合では最大せん断耐力、引張接合では最大引張耐力を用いる。

8.4.1 摩擦接合

摩擦接合のすべり耐力は高力ボルトの導入軸力と摩擦面のすべり係数に左右される。設計すべり耐力を算定する際の導入軸力を設計ボルト張力といい、次のように定めている。

$$\begin{aligned} \text{1種 (F8T)} : \quad T_0 &= 0.85FA_e \\ \text{2種 (F10T)} : \quad T_0 &= 0.75FA_e \end{aligned} \quad (8.8)$$

ここで、 F は高力ボルトの基準強度である。 A_e は高力ボルトのねじ部の有効断面積である。

F8TとF10Tの設計基準強度 F にそれぞれ 640N/mm^2 と 900N/mm^2 を代入し、さらに有効断面積 $A_e = 0.75A_b$ とすると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{1種 (F8T)} : \quad T_0 &= 400A_b \\ \text{2種 (F10T)} : \quad T_0 &= 500A_b \end{aligned} \quad (8.9)$$

実際の施工では、ばらつきやリラクセーション（時間とともに導入軸力が減少していく現象）を考慮して、設計ボルト張力の1割増やしの張力を導入する。これは標準ボルト張力と呼ばれる。すべり係数は所定の摩擦面処理を施した一般の構造用鋼材に対して $\mu = 0.45$ としている。

高力ボルトせん断接合の検定：

せん断接合として使用される場合、高力ボルトの一次設計（摩擦接合・すべりが生じない）は

$$\begin{aligned} \text{1種 (F8T)} : \quad q &\leq q_s = 0.45 \times T_0 = 180A_b \\ \text{2種 (F10T)} : \quad q &\leq q_s = 0.45 \times T_0 = 225A_b \end{aligned} \quad (8.10)$$

となる。ここで、1本の高力ボルトあたり1摩擦面において、すべり耐力すなわち短期許容耐力は q_s で表される。

また、せん断接合として使用される場合、高力ボルトの二次設計（支圧接合・破断しない）は

$$q_u = \frac{F_u}{\sqrt{3}}A_b \quad (8.11)$$

ここで、1本の高力ボルトあたり1せん断面の最大せん断耐力は q_u で表される。

高力ボルトの二次設計においては、高力ボルト摩擦接合にすべり耐力以上のせん断力が作用し、すべりが生じてしまう。その後は支圧状態となり、高力ボルトにせん断力が作用する。

8.4.2 引張接合

引張接合の理論と実験的検証に基づき、高力ボルト1本につき設計用離間耐力 p_{sep} は導入軸力の約90%であり、すなわち

$$p_{\text{sep}} = 0.9T_0 \quad (8.12)$$

高力ボルト引張接合の検定：

引張接合として使用される場合、高力ボルトの一次設計においては、以下の不等式を満足すべきである。

$$\begin{aligned} \text{1種 (F8T)} : \quad & p \leq p_{\text{sep}} = 375A_b \\ \text{2種 (F10T)} : \quad & p \leq p_{\text{sep}} = 465A_b \end{aligned} \quad (8.13)$$

ここで、 p_{sep} は設計用離間耐力である。

また、引張接合として使用される場合、高力ボルトの二次設計においては、引張接合における高力ボルトの最大耐力 p_u はねじ部の破断で決まり、次の式で与えられる。

$$p_u = F_u A_e = 0.75F_u A_b \quad (8.14)$$

8.4.3 引張とせん断の組合せ

引張力 p とせん断力 q を同時に受ける高力ボルトの検定：

- 一次設計において、摩擦接合にすべりが生じない条件式は以下ようになる。

$$q \leq \left(1 - \frac{p}{T_0}\right) q_s \quad (8.15)$$

ここで、 q は高力ボルト1本の1摩擦面に作用するせん断力、 p は高力ボルト1本に作用する引張力、 q_s はすべり耐力、 T_0 は設計ボルト張力である。また、長期荷重に対する許容せん断耐力はその値を1.5で除したものとなる。

- 二次設計において、破断しない条件に対しては、高力ボルトが支圧状態となるので、ボルトと同様に次の式を用いる。

$$\left(\frac{p}{p_u}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_u}\right)^2 \leq 1 \quad (8.16)$$