

Chapter 3

引張材の設計

Abstract この章には、引張力を受ける部材の設計問題を説明する。

3.1 部材設計の分類

一般的に、外力を受けたとき、(鋼構造の部材)には、軸力(引張力と圧縮力)、せん断力および曲げモーメントといった断面力¹が生じる。ただし、トラス構造の場合には、トラス材の間にピン接合で繋がれているため、部材に軸力しか生じない(せん断力と曲げモーメントがゼロ)。

ビル型の建物(ラーメン構造)の基本的な構造要素としては、鉛直方向の柱、水平方向の梁、場合によって斜め方向で配置されるブレースがある²。これらの部材には、軸力・せん断力・曲げモーメントが同時に生じているが、場合によって計算上の便宜のため、その構造計算が省略されることがある。

鋼構造の部材設計においては、部材はどのような断面力を主に受けているかによって以下のように分類される。

鋼構造部材の種類：

- 引張材：引張力を主に受ける部材のこと。たとえば、トラスの弦材、ブレース(筋交い)などがある。
- 圧縮材：圧縮力を主に受ける部材のこと。たとえば、トラスの束材などがある。また、板要素の局所座屈も圧縮力によるもので、設計上一定の板厚比が必要となる。
- 曲げ材：曲げモーメントを主に受ける部材のこと。たとえば、ラーメン構造の梁などがある。
- 圧縮・曲げ材：同時に圧縮力と曲げモーメントを受ける部材のこと。たとえば、ラーメン構造の柱などがある。

場合によって、せん断力も支配になるケースがあるが、建築構造物の場合にはそういうケースが少ないため、ここではそれに対する設計は特別に説明しないとする。

本章のこれからの部分は、引張材の設計問題を説明する。ほかの部材の設計は該当の章を参考してください。

¹ 断面力の計算はすでに二回生前期の構造力学で習った。

² 梁の上には床が載せられ、われわれの活動空間を作っている。鋼構造の場合でも、床は鉄筋コンクリートで作られるのは一般的なもので、ここではその設計問題を触れないとする。

3.2 引張材の基本

引張力を主として受ける部材を引張材という。鋼構造では、トラスの弦材および腹材、軸組筋交い、屋根面および床面の筋交い材などがこれに相当する。これらのうち軸組筋交い材は、鋼構造の主要な耐震要素であり、許容応力度設計（一次設計）のみでなく、終局耐力設計（二次設計）に対する検討も必要とある部材である。

また、引張材では座屈の影響を考慮する必要はない。

3.3 引張材の一次設計（許容応力度設計）

引張材では基本的に部材の全断面で（軸力の）引張力を負担する。厳密には、引張力の合力が図心を通らなければならないが、現実には偏心がわずかに存在する場合も引張材として扱っている³。

部材に接合などにより断面欠損が生じる場合に、その影響を考慮しなければならない。したがって、引張材の接合部（仕口⁴・継手⁵）にボルト、高力ボルトなどを用いる場合には、孔部の断面欠損の影響を考慮した有効断面積 A_e (Effective Sectional Area) を用いて、引張材の断面検定を以下のように行う。

引張材の断面検定式：（断面欠損あり）

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A_e} \leq f_t \quad (3.1)$$

ここに、 σ_t ：引張応力度、 N_t ：引張力、 A_e ：有効断面積、 f_t ：許容引張応力度（長期応力・荷重に対して $f_t = F/1.5$ 、短期応力・荷重に対して $f_t = F/1.0$ 、 F ：材料の基準強度、鉄骨の場合には鉄の降伏応力）である。

要するに、引張材の一次設計（許容応力度設計・弾性設計）においては、中小規模の地震などのような短期荷重があった場合に、引張材が弾性範囲⁶にとどまるように設計される。

接合部が溶接接合のような断面欠損が生じない場合には、式 (3.1) 中の有効断面積 A_e の代わりに全断面 A_g (Gross Sectional Area) を用いる。

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A_g} \leq f_t \quad (3.2)$$

ボルト接合の場合、有効断面積はボルトの配置によって影響されるので、具体的な計算は後ほど説明する。

3.4 引張材の破断耐力（二次設計・終局耐力設計）

鋼材の降伏応力（強さ）を σ_y 、引張強さを σ_u とする。引張材に対して、引張力がゼロからだんだん大きくなるとともに、以下のような三つの状態がある。

³ 偏心が大きい場合には、偏心引張材といい、引張力および偏心による曲げモーメントが同時に作用する曲げ引張材として扱う。

⁴ 仕口（しぐち）とは、構造部材の柱や梁、桁など、2つ以上の部材を組み合わせ、接合する方法、またはその接合箇所をいう。

⁵ 継手（つぎて、joint）とは、2つの部分を接合する構造の総称である。

⁶ すなわち降伏応力を超えない、または損傷が生じない

引張材の（正しい）破断プロセスおよび計算式：

1. 有効断面の全面が降伏する（引張応力度が降伏強さに達する）：
このときの引張力が有効断面の降伏耐力 T_{ye} と呼ばれ、その大きさの下で計算できる。

$$T_{ye} = A_e \cdot \sigma_y \quad (3.3)$$

2. 引張材の全長にわたって降伏する：
このときの引張力は軸部の降伏耐力 T_y と呼ばれ、その大きさは下の式で計算できる。

$$T_y = A_g \cdot \sigma_y \quad (3.4)$$

3. 欠損部が破断する（その応力度が材料の引張強度に達する）：
このとき、引張材が破断するため、その引張力は接合部の最大耐力または（終局）破断耐力 T_u と呼ばれ、その大きさは下の式で計算できる。

$$T_u = A_e \cdot \sigma_u \quad (3.5)$$

以上に述べた段階を順次に踏んで破断するとき、引張材の全長にわたって降伏した後も、破断するまでに大きな伸び能力が発揮できるので、耐震上好ましい挙動である。また、このようなとき、引張材は靱性（粘り強さ）あるいは塑性変形能力が優れているという。引張材の靱性を確保するには、以下の二つのメリットがある。

- ・ 塑性化によってエネルギーを吸収する。
- ・ 破断するまでに時間かかり、構造物はすぐに倒壊しないため、避難時間が確保される。

軸部の降伏の前には接合部が破断しないことを確保するために、以下の関係式がある。

引張材の靱性を確保するための条件式：

$$\begin{aligned} T_y &\leq T_u \\ \Rightarrow A_g \cdot \sigma_y &\leq A_e \cdot \sigma_u \\ \Rightarrow Y = \frac{\sigma_y}{\sigma_u} &\leq \frac{A_e}{A_g} \end{aligned} \quad (3.6)$$

この式では、降伏強さの引張強さに対する比 σ_y/σ_u は降伏比であり、有効断面積の全断面に対する比 A_e/A_g は有効断面積比である。

式 (3.6) によると、引張材が降伏してから十分な伸び能力を発揮するためには、材料の降伏比よりも有効断面積比が大きくなる必要がある。断面欠損が大きいときや、材料の降伏比が高いときには、引張材の軸部が降伏する前に接合部が破断する恐れがあるため、設計時注意しなければならない。

3.5 有効断面

接合部にボルトまたは高力ボルトなどを用いる引張材の有効断面積 A_e は、それらの配置形式により求められる。

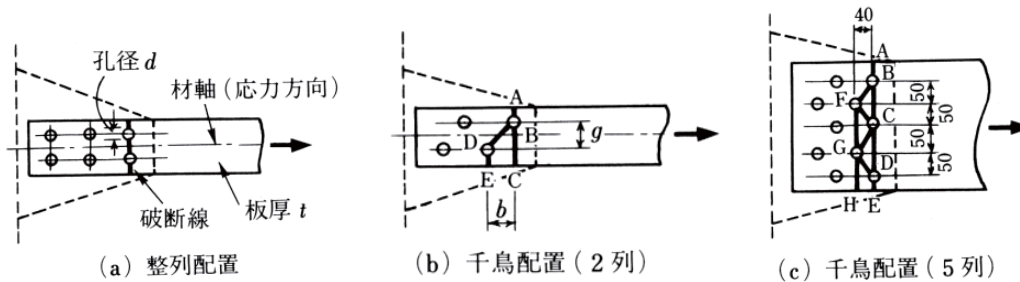


図 3.1 有効断面積 (Taken from 桑村 仁:「鋼構造の性能と設計」、共立出版)

3.5.1 規則な配置

図 3.1(a) に示すように、孔が規則正しく整列している場合には、一つの孔の欠損面積を a_0 ($=$ 孔径 $d \times$ 板厚 t)、材軸と直行する方向の孔の数を n とすると、有効断面積は

$$A_e = A_g - n \cdot a_0 = A_g - n \cdot d \cdot t \quad (3.7)$$

3.5.2 不規則な配置

図 3.1(b), (c) に示すように、ボルトは千鳥 (ちどり) または不規則に配置される場合には、ボルト相互の位置関係 (b, g) によりいくつかの破断線が考えられる。この場合の引張材の有効断面積 A_e は、各破断線についての有効断面積を次式で求め、これらのうちの最小値として求められる。

$$A_e = A_g - \sum \alpha \cdot d \cdot t \quad (3.8)$$

ここで、 α は破断面の第 1 孔については $\alpha = 1$ とし、第 2 孔以降については、これに先立つ孔との相関位置関係に応じて次のように定める。

$$\alpha = \begin{cases} 1.0, & \text{if } b/g \leq 0.5 \\ 1.5 - b/g, & \text{if } 0.5 < b/g < 1.5 \\ 0, & \text{if } b/g \geq 1.5 \end{cases} \quad (3.9)$$

ここに、 b は隣接孔間の材軸方向の距離、 g は隣接孔の材軸と直行する方向の距離である。

3.6 破断耐力

ボルトの配置によっては、鋼板の破断はいくつかのパターンがある。たとえば、図 3.2 には有効断面破断と端抜け破断の実験写真を示している。破断耐力は、すべての破断パターンに対応する破断耐力のうち最小のものである。

3.6.1 有効断面破断

ファスナ孔を有する引張材の破断は、孔欠損のある最小断面部 (破断耐力が最小となる断面) で起こる。これを有効断面破断 (Net Section Fracture) という。破断線は孔を縫うように形成される。有効断面積は破断線に沿って計算できる。降伏するときの降伏線も破断線と同じとしてよい。

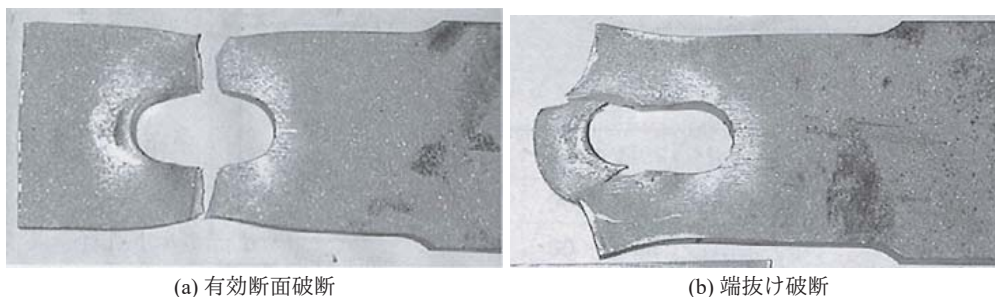


図 3.2 破断形式 (Taken from ??)

有効断面積 A_e は前節の式 (3.7) か式 (3.8) で計算し、接合部の破断耐力の式 (3.5) に代入して計算する。

3.6.2 端抜け破断

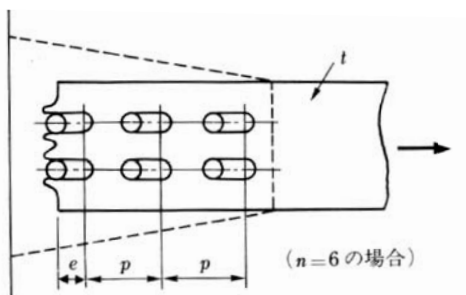


図 3.3 端抜け破断 (Taken from 桑村 仁：「鋼構造の性能と設計」、共立出版)

引張材のファスナ接合部には上述の有効断面破断に先行して端抜け破断 (End Opening Fracture, または支圧破壊 Bearing Failure) が起こることがある。端抜け破断は、ファスナと被接合材との間に生じる支圧力で被接合材が破壊され、最後尾のファスナが飛び出す破断形式である。これは、引張力の方向の縁端距離⁷ やファスナのピッチ⁸ が小さいときに起こる。

端抜け破断で決まる破断耐力の算定には次の実験式が使われている。

$$T_u = n \cdot e_1 \cdot t \cdot \sigma_u \quad (3.10)$$

ただし

$$e_1 = \min\{e, p, 12t\} \quad (3.11)$$

ここで、 n はファスナの全本数、 t は被接合材の厚さ、 σ_u は被接合材の引張強さ、 e は引張力方向の縁端距離、 p はピッチである。

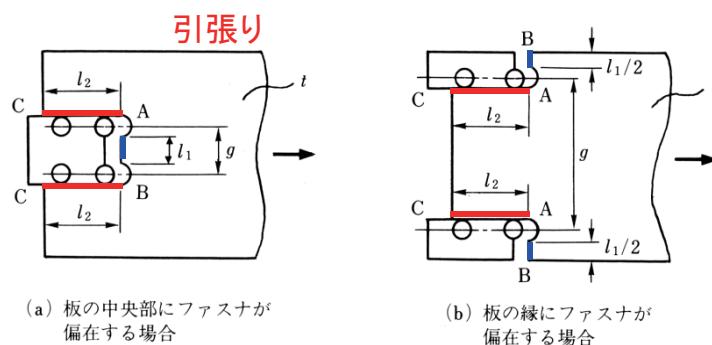


図 3.4 ちぎれ破断 (Taken from 桑村 仁：「鋼構造の性能と設計」、共立出版)

3.6.3 ちぎれ破断

ちぎれ破断 (Block Shear Fracture) は、ファスナ群を囲む板が抜け出す形式で、幅の広い板が局所的にファスナで接合されている場合に起こる。一部の有効断面破断と一部の引張力方向にせん断破断の組み合わせとなる。

ちぎれ破断で決まる破断耐力の算定には次の実験式が使われている。

$$T_u = l_1 \cdot t \cdot \sigma_u + 2l_2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

ここで、ミーゼス (von Mises) の降伏条件を延性破壊に拡張して、せん断破壊応力は引張破壊応力の $1/\sqrt{3}$ とした。

3.6.4 ファスナ破断

ファスナ (ボルト・高力ボルト) 接合部の章に詳しく説明するので、ここで省略する。

3.6.5 溶接継目破断

溶接接合部の章に詳しく説明するので、ここで省略する。

3.7 引張材の注意点

引張材は圧縮材のように座屈現象が生じないので、理論的にはいくら細長くてもよいが、部材の自重による垂れ下がりや振動障害などを起こさないようにする必要がある。このため、次の点に注意しなければならない。

- 引張材の細長比
日本では具体的な規定がないが、アメリカ鋼構造協会の AISC 基準には引張材の細長比限度を決めている。
主材：240 以下、筋交いまたは二次部材：300 以下

⁷ 縁端距離 (えんたんきより) は、ボルト孔中心から端部までの距離を意味する。

⁸ ピッチは、引張力の方向のファスナ中心間の距離である。

- 組立引張材のつづり合わせるための材軸方向のボルトおよび溶接の間隔を一定以上にする。
(具体的な数値はここでは省略する。)