

5. 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材

5.1 軸引張力と曲げを受ける部材の強度と照査

軸方向の引張力と曲げモーメントを受ける部材の終局限界状態の照査は、次の各項により行うものとする。

$$\frac{P_d}{P_{tu}} + \frac{M_{dy}}{M_{tuy}} + \frac{M_{dz}}{M_{tuz}} \leq 1 \quad (5.1.1)$$

$$-\frac{P_d}{P_{tu}} + \frac{M_{dy}}{M_{cuy}} + \frac{M_{dz}}{M_{cuz}} \leq 1 \quad (5.1.2)$$

$$-\frac{P_d}{P_{tu}} + \frac{M_{dy}}{M_{cuy}} + \frac{M_{dz}}{M_{buz}} \leq 1 \quad (5.1.3)$$

このとき、断面を構成するすべての板要素が表 4.2 の塑性限界幅厚比より小さい場合には、圧縮側の断面強度照査式(5.1.2)は不要となり、式(5.1.1)の断面強度の照査は、次の各項に代えることができる。

a) 箱形および円形中空断面の断面強度

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} < \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \text{ の場合 } \quad \frac{3}{4} \left(\frac{M_{dy}}{M_{npy}} \right)^2 + \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \leq 1 \quad (5.2.1)$$

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} \geq \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \text{ の場合 } \quad \frac{M_{dy}}{M_{npy}} + \frac{3}{4} \left(\frac{M_{dz}}{M_{npz}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.2.2)$$

ただし、

$$M_{npy} = C \left(1 - \frac{P_d}{P_{tu}} \right) \phi_{b0} M_{py} \leq \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{npz} = C \left(1 - \frac{P_d}{P_{tu}} \right) \phi_{b0} M_{pz} \leq \phi_{b0} M_{pz}$$

ここに、箱形断面： $C=1.18$ ，円形中空断面： $C=1.25$

b) I 形および H 形断面の断面強度

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} + \left(\frac{M_{dz}}{M_{npz}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.3)$$

ただし、

$$M_{npy} = 1.19 \left[1 - \left(\frac{P_d}{P_{tu}} \right)^2 \right] \phi_{b0} M_{py} \leq \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{npz} = 1.18 \left(1 - \frac{P_d}{P_{tu}} \right) \phi_{b0} M_{pz} \leq \phi_{b0} M_{pz}$$

5.2 軸圧縮力と曲げを受ける部材の強度と照査

軸方向の圧縮力と曲げモーメントを受ける部材の終局限界状態の照査は、次の各項により行うものとする。

$$\frac{P_d}{P_{cul}} + \frac{M_{dy}}{M_{cuy}} + \frac{M_{dz}}{M_{cuz}} \leq 1 \quad (5.4.1)$$

$$-\frac{P_d}{P_{tu}} + \frac{M_{dy}}{M_{tuy}} + \frac{M_{dz}}{M_{tuz}} \leq 1 \quad (5.4.2)$$

$$\frac{P_d}{P_{cu}} + \frac{M_{dy}}{M_{cuy} \left(1 - \frac{P_d}{P_{cry}} \right)} + \frac{M_{dz}}{M_{buz} \left(1 - \frac{P_d}{P_{crz}} \right)} \leq 1 \quad (5.4.3)$$

このとき、断面を構成するすべての板要素が表 4.2 の塑性限界幅厚比より小さい場合には、引張側の断面強度照査式(5.4.2)の断面強度の照査は不要となり、式(5.4.1)の断面強度の照査、および式(5.4.3)の部材強度の照査は、次の各項に代えることができる。

a) 箱形および円形中空断面

断面強度の照査は

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} < \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \text{ の場合 } \quad \frac{3}{4} \left(\frac{M_{dy}}{M_{npy}} \right)^2 + \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \leq 1 \quad (5.5.1)$$

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} \geq \frac{M_{dz}}{M_{npz}} \text{ の場合 } \quad \frac{M_{dy}}{M_{npy}} + \frac{3}{4} \left(\frac{M_{dz}}{M_{npz}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.5.2)$$

ただし、

$$M_{npy} = C \left(1 - \frac{P_d}{P_{cul}} \right) \phi_{b0} M_{py} \leq \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{npz} = C \left(1 - \frac{P_d}{P_{cul}} \right) \phi_{b0} M_{pz} \leq \phi_{b0} M_{pz}$$

ここに、箱形断面： $C=1.18$ ，円形中空断面： $C=1.25$

部材強度の照査は

$$\left(\frac{M_{dy}}{M_{nuy}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{dz}}{M_{nuz}}\right)^\beta \leq 1 \quad (5.6)$$

ただし,

$$\alpha = 1.3 + \frac{P_d}{P_{cul}} \frac{1000}{(l/r_y)^2} \geq 1.4$$

$$\beta = 1.3 + \frac{P_d}{P_{cul}} \frac{1000}{(l/r_z)^2} \geq 1.4$$

$$M_{nuy} = \left(1 - \frac{P_d}{P_{cu}}\right) \left(1 - \frac{P_d}{P_{cry}}\right) \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{nuz} = \left(1 - \frac{P_d}{P_{cu}}\right) \left(1 - \frac{P_d}{P_{crz}}\right) M_{buz}$$

b) I形およびH形断面

断面強度の照査は

$$\frac{M_{dy}}{M_{npy}} + \left(\frac{M_{dz}}{M_{npz}}\right)^2 \leq 1 \quad (5.7)$$

ただし,

$$M_{npy} = 1.19 \left[1 - \left(\frac{P_d}{P_{cul}}\right)^2\right] \phi_{b0} M_{py} \leq \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{npz} = 1.18 \left(1 - \frac{P_d}{P_{cul}}\right) \phi_{b0} M_{pz} \leq \phi_{b0} M_{pz}$$

部材強度の照査は

$$\left(\frac{M_{dy}}{M_{nuy}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{dz}}{M_{nuz}}\right)^\alpha \leq 1 \quad (5.8)$$

ただし,

$$\alpha = 1.0 \quad (B/D < 0.3)$$

$$\alpha = 0.4 + \frac{P_d}{P_{cul}} + \frac{B}{D} \geq 1 \quad (B/D \geq 0.3)$$

$$M_{nuy} = \left(1 - \frac{P_d}{P_{cu}}\right) \left(1 - \frac{P_d}{P_{cry}}\right) \phi_{b0} M_{py}$$

$$M_{nuz} = \left(1 - \frac{P_d}{P_{cu}}\right) \left(1 - \frac{P_d}{P_{crz}}\right) M_{buz}$$

ここに,

- B : フランジ幅(mm)
 D : 断面の高さ(mm)
 F : 材料強度の規格値(N/mm²)
 l : 部材の有効座屈長(mm). 表 3.1 に示す値を基準とするが, 拘束が不十分と考えられる場合には, その値を合理的な値に増大させる.
 A_g : 照査する断面の総断面積(mm²)
 A_n : 照査する断面の純断面積(mm²)
 r_y, r_z : 総断面のそれぞれ弱軸と強軸まわりの断面 2 次半径(mm)
 Z_y, Z_z : 総断面のそれぞれ弱軸と強軸まわりの塑性断面係数(mm³)
 P_d : 軸方向引張りまたは圧縮力(N)であり, それぞれ正值で扱う.
 M_{dy}, M_{dz} : それぞれ照査する断面に作用する弱軸, 強軸まわりの曲げモーメント(Nmm)である. ただし, 式(5.1.3), (5.4.3), (5.6)および(5.8)の適用にあたって, 部材両端の曲げモーメントが異なりほぼ直線的に変化する場合には, M_{dy} , M_{dz} を等価換算曲げモーメント M_{eqy} , M_{eqz} に置き換えてよい.
 M_{eqy}, M_{eqz} : 等価換算曲げモーメント(Nmm)

$$M_{eq} = C_m M_1 \quad (5.9)$$

$$C_m = 0.6 + 0.4\beta \geq 0.4, \quad \beta = M_2 / M_1$$

ただし, M_1, M_2 は部材両端の曲げモーメント(Nmm)であり, 着目しているフランジに圧縮応力が生じるモーメントを正とし, $M_1 > M_2$ とする.

- M_{buz} : 照査するはり部材の弱軸まわりの横ねじれ座屈を考慮した部材曲げ強度(Nmm)であり, 式(4.1)で与えられる.
 M_{cuy}, M_{cuz} : それぞれ照査する断面の弱軸および強軸まわりの作用曲げモーメントに対し圧縮側に着目した曲げ強度(Nmm)であり, 次式で与えられる.

$$M_{cuy} = \phi_{b0} M_{ny}, \quad M_{cuz} = \phi_{b0} M_{nz}$$

- M_{tuy}, M_{tuz} : それぞれ弱軸および強軸まわりの作用曲げモーメントに対し引張側に着目した曲げ強度(Nmm)であり, 次式で与えられる.

$$M_{tuy} = \phi_{b0} M_{ny}, \quad M_{tuz} = \phi_{b0} M_{nz}$$

- M_{ny}, M_{nz} : 照査する断面の局部座屈を考慮したそれぞれ弱軸および強軸まわりの曲げ強度(Nmm)であり, 4.1 節で与えられる. ただし, 引張側または圧縮側の照査に対して, それぞれの断面係数を用いる.

- M_{py}, M_{pz} : 断面のそれぞれ弱軸および強軸まわりの全塑性モーメント(Nmm)であり, 次式で与えられる.

$$M_{py} = FZ_y, \quad M_{pz} = FZ_z$$

P_{cry}, P_{crz} : それぞれ弱軸および強軸まわりのオイラー座屈荷重(N)であり、式(3.3)の細長比 $\bar{\lambda}_c$ を用いて次式で与えられる。

$$P_{cry} = \frac{A_g F}{\bar{\lambda}_{cy}^2}, \quad P_{crz} = \frac{A_g F}{\bar{\lambda}_{cz}^2}$$

P_{cul} : 局部座屈を考慮した断面の圧縮強度(N)であり、次式で与えられる。

$$P_{cul} = \phi_{c0} Q_c F A_g$$

P_{cu} : 局部座屈を考慮した部材の圧縮強度(N)であり、式(3.1)で与えられる。

P_{tu} : 断面の引張強度(N)であり、次式で与えられる。

$$P_{tu} = \phi_t F A_n$$

Q_c : 局部座屈を考慮するための有効断面積係数であり、式(3.4)で与えられる。

ϕ_{b0} : 曲げに対する断面の部材強度係数(=0.92)。

ϕ_{c0} : 圧縮に対する断面の部材強度係数(=0.92)。

ϕ_t : 引張に対する断面の部材強度係数(=0.92)。

【解説】 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の強度については、すでに2, 3, 4章で述べた通りである。ここでは、軸方向力と曲げモーメントが同時に作用する場合の部材強度の照査について述べている。この場合も限界状態は部材断面の全降伏、局部座屈および部材の全体座屈のいずれかによって支配されであろうが、薄肉断面では局部座屈の影響が有効断面積の減少により加味されている。厚板断面で短い部材では、軸方向力の影響を考慮した全塑性曲げ耐力まで期待できるとしている。

軸引張力と軸圧縮力を受ける場合とに大別し、それぞれで考えられる限界状態に応じた照査式を定めている。軸方向力が引張である場合、式(5.1.1)は作用曲げモーメントの引張側に着目した断面強度の照査式である。式(5.1.2)は断面の圧縮側に着目した断面強度の照査式であるが、有効断面が2軸対称であるときには式(5.1.1)に対して不要となる。この2つの式による照査では、後述する軸力が圧縮である場合も含めて、断面が2軸対称でなく断面強度が縁端降伏モーメントであるときには、過度に安全側となる場合があり、応力表示での断面照査をすることも考えられる。他方で、断面のすべての板要素が表4.2の塑性限界幅厚比より小さく、全塑性モーメントまで断面強度が期待できるときには、合理的な設計のために非線形の断面照査式(5.2)~(5.3)を用いることができるものとした。式(5.1.3)は横ねじれ座屈に対しての部材強度の照査式であるが、厚板断面での非線形照査式はその研究成果が十分に得られていないので採用していない。

軸方向力が圧縮である場合、式(5.4.1)が断面の圧縮側に着目した断面強度の照査式である。式(5.4.2)は引張側に着目した断面強度の照査式であるが、有効断面が2軸対称である場合には不要となる。式(5.4.3)は、部材座屈に対しての照査式であるが、分母に含まれる $(1-P_d/P_{cry})$, $(1-P_d/P_{crz})$ は、曲げモーメントによる変形の上に軸圧縮力が作用して生じる付加曲げモーメントの効果を考慮したものであり、

道路橋示方書⁵⁾に準じて採用している。断面を構成するすべての板要素が表 4.2 の塑性限界幅厚比より小さい場合は、式(5.4.1)~(5.4.3)に代えて、非線形の断面強度と座屈強度の照査式(5.5)~(5.8)を用いることができるものとした。なお、 M_{dy}, M_{dz} は、不等端曲げモーメントの場合には等価換算曲げモーメント M_{eqy}, M_{eqz} に置き換えることができるとしているが、特に、式(5.4.3)に対して最大曲げモーメントが部材端部に生じるときの使用は不適切との指摘がなされており¹⁾、端モーメント比 $\beta = M_2/M_1$ が1より小さく0に近づき、負になるような場合の等価換算曲げモーメントの使用には注意すべきである。

図 5.1 は、塑性限界幅厚比を満足する場合において断面強度の照査に適用している軸圧縮力と曲げモーメントの相関式を示す。軸力による塑性モーメントの低下は、断面形および曲げの作用軸によっても変化する。図 5.2 は、強軸曲げを受ける広幅 H 形断面 (8WF31) の式(5.4.3)で決まる関係を示す。

相関曲線は、ある特定の細長比 $l/r_z = 78(\bar{\lambda}_c = 0.84)$ に対して描いてある。等曲げ ($C_m=1$)の曲線が一番下に位置し、最も厳しい荷重状態を表している。不等曲げ ($C_m=0.4$)の曲線が最大強度となり、軸力がある程度小さくなると断面強度により与えられる。横ねじれ座屈の影響を考慮すると、等曲げの場合わずかな強度低下がみられる。

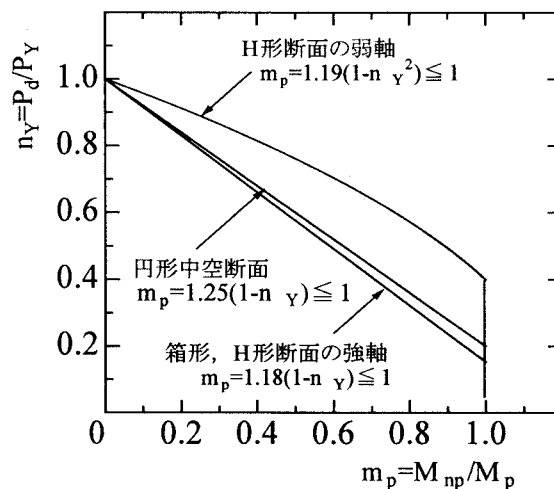


図 5.1 軸力を考慮した塑性モーメント

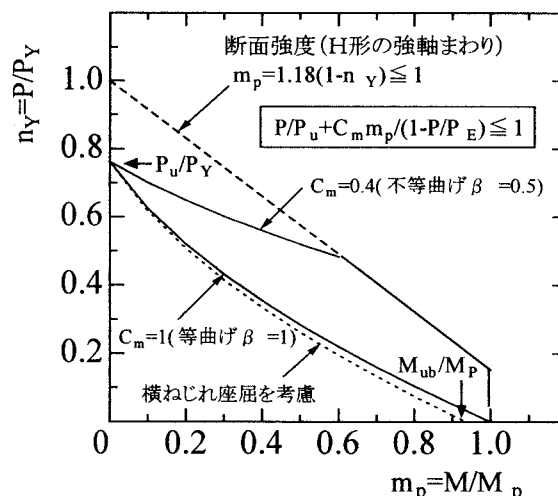


図 5.2 部材の相関強度

参考文献

- 1) 当麻庄司, 倉 真也: 道路橋示方書における軸方向圧縮力と不等端曲げモーメントを受ける部材の座屈安定照査式に関する検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.113-124, 2001.3.