

## 第7章 限界状態の照査

### 7.1 一般

設計においては、構造物に応じた考えられるすべての限界状態について安全性の照査を行うことを原則とする。ここに、限界状態は、終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態の3種類とする。

**【解説】** 鋼構造物の設計では、本項に示す3つの限界状態の照査をすれば十分であると考えられるので、このように規定した。経済性をそこなく設計することができる場合には、部材に関する一般事項に代表される設計細則のなかで、限界状態に対して十分に安全性が確保されるよう構造細則を規定することもある。この場合、限界状態に対する安全性の照査は当然のことながら不要になる。

本章では限界状態に対して安全性の照査が必要な項目のみを取り上げ規定している。

### 7.2 骨組部材の終局限界状態の照査

#### 7.2.1 軸方向力を受ける部材の照査

軸方向力を受ける部材の照査は次の各項により行うものとする。

(1) 引張力を受ける場合

$$\nu \frac{P}{P_{tu}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.1)$$

(2) 圧縮力を受ける場合

$$\nu \frac{P}{P_{cu}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.2)$$

ここに、 $\nu$ : 6章の安全率

$P$ : 軸方向力 (kgf)

$P_{tu}$ : 断面の引張耐力 (kgf),  $P_{tu} = A_n \cdot \sigma_{tu}$

$P_{cu}$ : 断面の圧縮耐力 (kgf),  $P_{cu} = A_g \cdot \sigma_{cus} \cdot \sigma_{cul} / \sigma_{cu0}$

$A_n$ : 照査する断面の純断面積 (cm<sup>2</sup>)

$A_g$ : 照査する断面の総断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{tu}$ : 式 (5.1) に示す軸方向引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cus}$ : 式 (5.2) に示す局部座屈を考慮しない弱軸まわりの軸方向圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cu0}$ : 表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cul}$ : 両縁支持板, 片縁支持板, 補剛板, および鋼管についてそれぞれ式 (5.4), (5.5), (5.6), (5.10) に示す局部座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**【解説】** 本節の7.2.1~6では、道路橋示方書・同解説 (日本道路協会)<sup>1)</sup> II 鋼橋編の3.3, 2.2.1および

8.2.1~4の規定を参考に、条文を断面力の表現を用いて定めた。定めた内容については、道路橋示方書の規定と本質的な差異はない。式(7.1)を例にとり等価交換であることを解説する。

現行の許容応力度法に基づく設計基準では、外力による作用応力度  $\sigma_t = P/A_n$  が許容応力度  $\sigma_a$  以下であるという条件

$$\sigma_t \leq \sigma_a \dots\dots\dots (解7.1)$$

を満たすことを要求し、これが設計における安全性の照査式になっている。一般に、許容応力度  $\sigma_a$  は保証降伏点強度に代表される材料の引張強度  $\sigma_{tu} = F$  を安全率  $\nu$  で除した値

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{tu}}{\nu} \dots\dots\dots (解7.2)$$

で定義されているので、式(解7.1)の設計照査式は

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_a} = \nu \frac{\sigma}{\sigma_{tu}} = \nu \frac{A_n \sigma_t}{A_n \sigma_{tu}} \leq 1 \dots\dots\dots (解7.3)$$

と変換できる。ここで、外力の作用による軸方向引張力が  $P = A_n \sigma_t$  であることを考慮し、断面の引張耐力を  $P_{tu} = A_n \sigma_{tu}$  と定義すれば、式(解7.3)は、

$$\nu \frac{P}{P_{tu}} \leq 1 \dots\dots\dots (解7.4)$$

と書ける。したがって、応力表示の設計照査式(解7.1)と断面力表示の設計照査式(解7.4)は全く等価であることがわかる。すなわち、どちらの設計照査式によっても同じ断面が設計できることになる。

以上のように、本節では、道路橋示方書に準拠しつつ、規定の内容を変えることなく、限界状態の性格が明確になるように設計照査式を書き換えている。骨組構造物にあっては、断面力表示の照査式が限界状態の照査式として妥当であろうとの判断のもとに条文の表現を統一した。限界状態の照査式の表現に断面力表示を用いた場合と応力表示を用いた場合との比較・検討については【付録2】に詳しく記述されている。

次に、断面の圧縮耐力  $P_{cu}$  について触れておきたい。圧縮耐力  $P_{cu}$  は、架設時に一時的に小さな圧縮力が作用する部材に対しても局部座屈が生じないような断面構成を課するのは不経済であるとの判断から、このような部材にも適用できるように配慮された、局部座屈の影響を考慮した連成座屈耐力である。全体座屈と局部座屈の連成座屈強度の推定方法としては、道路橋示方書に準拠しているが、ここに示した形が最善であるかどうかは今後の課題と思われる。たとえば、AISC<sup>2)</sup>の規定では全体座屈の生じない短柱の局部座屈強度をもとに、長柱の連成座屈強度を推定している。この方法では、局部座屈の影響を取り入れるために、柱と同一断面を有する短柱の局部座屈強度  $\sigma_{cul}$  を用いて、

$$Q = \frac{\sigma_{cul}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_{cul}}{F} \dots\dots\dots (解7.5)$$

を定義し、 $QF$  を低減された柱の降伏点強度と考え、式(5.2)に含まれている設計強度  $F$  をこの低減された降伏点強度  $QF$  に置き換えることにより、連成座屈強度が求まると考えている。具体的に示せば、局部座屈の影響を考慮した軸方向圧縮強度  $\sigma_{cu}$  は式(解7.6)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cu} &= QF & (\lambda \leq 0.2) \\ &= [1 - 0.545(\lambda - 0.2)]QF & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ &= \frac{1.0}{0.773 + \lambda^2} QF & (1.0 < \lambda) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (解7.6)$$

ここに、細長比パラメータ  $\lambda$  は

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{QF}{E}} \cdot \frac{l}{r} \dots\dots\dots (解7.7)$$

である。道路橋示方書の考え方との差異は、式(解7.7)の中にある設計強度  $F$  にも  $Q$  が掛けられている点だけである<sup>3)</sup>。

さらに、圧縮力を受ける部材の断面が一樣でなく、変断面部材であるときには、式(7.2)の適用には十分な配慮が必要となる。鋼構造設計規準(日本建築学会)<sup>4)</sup>では、圧縮力を受ける変断面部材に対しては、これと同一の弾性座屈荷重を持つ圧縮材に換算して安全性を照査することができるとしている。ただし、その適用にあたっては断面積の変化が著しい場合には、断面積の小さい部分で圧縮応力が過大にならないよう注意する必要がある。変断面材に対しては、構造物の全体座屈を基に各断面で細長比を定義し、この細長比を用いて各断面で安全性を照査する方法も提案されている<sup>5)-6)</sup>。

### 7.2.2 曲げモーメントを受ける部材の照査

曲げモーメントを受ける部材の照査は式(7.3)、(7.4)、(7.5)により行うものとする。

$$\nu \frac{M_y}{M_{tuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{tuz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.3)$$

$$\nu \frac{M_y}{M_{cuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.4)$$

$$\nu \frac{M_y}{M_{culy}} + \nu \frac{M_z}{M_{culz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.5)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$M_y, M_z$  : それぞれ弱軸および強軸まわりに作用する曲げモーメント (kgf・cm)。ただし、式(7.4)の適用にあたっては、部材両端の曲げモーメント  $M_z$  が異なり、その間で曲げモーメント  $M_z$  がほぼ直線的に変化する場合には、 $M_z$  を等価換算曲げモーメント  $M_{eq}$  に置き換えるものとする。

$M_{eq}$  : 等価換算曲げモーメント (kgf・cm) で、圧縮フランジの固定点間距離が明確な場合には式(7.6)、(7.7)のうち大きい方の値をとる。

$$M_{eq} = 0.6 M_1 + 0.4 M_2 \dots\dots\dots (7.6)$$

$$M_{eq} = 0.4 M_1 \dots\dots\dots (7.7)$$

圧縮フランジの固定点間距離が明確でない場合には式(7.8)の値をとる。

$$M_{eq} = 0.85 M_1 \dots\dots\dots (7.8)$$

$M_1, M_2$  : それぞれ部材両端の曲げモーメント (kgf・cm)。ただし、 $M_1 > M_2$  とし、符号は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する。

$M_{tuy}, M_{tuz}$  : それぞれ照査する断面の引張側における弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{tuy} = \frac{I_{yy}}{y_t} \sigma_{tu}$$

$$M_{tuz} = \frac{I_{zz}}{z_t} \sigma_{tu}$$

$M_{cuy}, M_{cuz}$  : それぞれ照査する断面の圧縮側における弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{cuy} = \frac{I_{yy}}{y_c} \sigma_{bu0}$$

$$M_{cuz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{busz}$$

$M_{culy}$ ,  $M_{culz}$ : それぞれ照査する断面の圧縮側における局部座屈に対する弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{culy} = \frac{I_{yy}}{y_c} \sigma_{cul}$$

$$M_{culz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{cul}$$

$y_t$ ,  $z_t$ : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の原点 (中立軸) から引張縁までの距離 (cm)

$y_c$ ,  $z_c$ : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の原点 (中立軸) から圧縮縁までの距離 (cm)

$I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ : それぞれ照査する断面における弱軸および強軸まわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$\sigma_{tu}$ : 式 (5.1) に示す軸方向引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

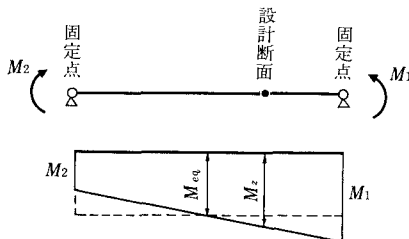
$\sigma_{buz}$ : 式 (5.3) に示す局部座屈を考慮しない強軸まわりの曲げ圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>).

ただし, 式 (5.4), (5.5), (5.6) に示す局部座屈強度が式 (5.3) に示す値よりも小さい場合には, 式 (5.4), (5.5), (5.6) に示す値を  $\sigma_{buz}$  の値とする.

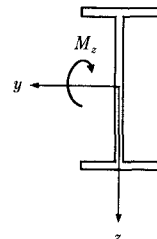
$\sigma_{bu0}$ : 式 (5.3) に示す局部座屈を考慮しない曲げ圧縮強度の上限値 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cul}$ : 両縁支持板, 片縁支持板, 補剛板, および鋼管についてそれぞれ式 (5.4), (5.5), (5.6), (5.10) に示した局部座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**【解 説】** 曲げモーメントのみを受ける部材の照査は, 式 (7.3), (7.4), (7.5) の3式により行う。これは, それぞれの表現が意味する限界状態が異なるためである。すなわち, 式 (7.3) は部材に横倒れ座屈も局部座屈も生じないときの断面の終局曲げモーメントに対する照査式であり, 式 (7.4) は横倒れ座屈を考慮したときの部材の終局曲げモーメントに対する照査式, 式 (7.5) は局部座屈の影響を考慮したときの断面の終局曲げモーメントに対する照査式である。このうち式 (7.4) の適用には注意が必要である。横倒れ座屈現象は軸方向圧縮力を受ける部材の座屈とは異なり局部座屈との連成は少ない。それ故, 局部座屈強度  $\sigma_{cul}$  が曲げ圧縮強度  $\sigma_{buz}$  を下回る場合には, 終局曲げモーメントが局部座屈強度  $\sigma_{cul}$  で決定される。条文中の  $\sigma_{buz}$  に対するただし書きはこの意味で加えたものである。さらに, 式 (7.4) は部材の両端で等しい曲げモーメントを受ける等断面部材の照査を基本としている。これは, 曲げ圧縮強度が等曲げを受ける等断面部材の横倒れ座屈応力をもとに定められたことによる。したがって,  $M_z$  のただし書きにもあるように, 部材両端に等しい曲げモーメントが作用していない場合には, 式 (5.3) に定めた曲げ圧縮強度が適用できるような等価換算曲げモーメント  $M_{eq}$  が必要になる。本条文では, 道路橋示方書を参考に圧縮フランジの固定点間距離が明確な場合には式 (7.6), (7.7) を適用し, 圧縮フランジの固定点間距離が明確でない場合には AISC<sup>2)</sup> の規定を参考に, 式 (7.8) を適用することとしている。ただし, 部材は等断面であることを前提としているので, 極端な変断面部材の場合には式 (7.4) は適用できない。



解説図 7.1 固定点間で曲げモーメントがほぼ直線的に変化する部材



解説図 7.2 座標系

記号の定義について補足すると、部材断面内の強軸（ $y$  軸）と弱軸（ $z$  軸）を断面の図心を原点に選び解説図 7.2 のようにとることは道路橋示方書と同様であるが、本指針では計算に用いる軸を優先させた表記を採用している。すなわち、式（解 7.8）、（解 7.9）のような定義を用いている。

$$M_z = \int_A \sigma_{xx} z dA \dots\dots\dots (解 7.8)$$

$$I_{zz} = \int_A z^2 dA \dots\dots\dots (解 7.9)$$

ここに、 $\sigma_{xx}$ ：軸方向応力度、 $A$ ：I形断面の断面積である。以上のことより、一般に用いられている強軸方向まわりの断面二次モーメント  $I_y$  が  $I_{zz}$  になり、強軸まわりの曲げモーメントによる応力  $\sigma_{by}$ 、 $\sigma_{by}$  が、 $M_z$  に対応することになる。

付言するならば、条文中では、断面力表示で照査式を表現しているので、引張フランジにボルトやリベットなどの孔があることによる断面の欠損については考慮していない。また、フランジの幅が広い場合には、せん断おくれの影響を考慮して、フランジの有効幅に対応する有効断面を総断面とみなす必要がある。

### 7.2.3 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査

軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける部材の照査は次の各項により行うものとする。

#### 1) 軸方向力が引張力の場合

$$\nu \frac{P}{P_{tu}} + \nu \frac{M_y}{M_{tuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{tuz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.9)$$

$$-\nu \frac{P}{P_{tu}} + \nu \frac{M_y}{M_{cuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.10)$$

$$-\nu \frac{P}{P_{cul}} + \nu \frac{M_y}{M_{culy}} + \nu \frac{M_z}{M_{culz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.11)$$

#### 2) 軸方向力が圧縮力の場合

$$\nu \frac{P}{P_{cu}} + \nu \frac{M_y}{M_{cuy} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{cry}}\right)} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{crz}}\right)} \leq 1 \dots\dots\dots (7.12)$$

$$\nu \frac{P}{P_{cul}} + \nu \frac{M_y}{M_{culy} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{cry}}\right)} + \nu \frac{M_z}{M_{culz} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{crz}}\right)} \leq 1 \dots\dots\dots (7.13)$$

ここに、 $\nu$ ：6章の安全率

$P$ ：軸方向力 (kgf)

$P_{tu}$ ：断面の引張耐力 (kgf)、 $P_{tu} = A_n \cdot \sigma_{tu}$

$P_{cu}$ ：断面の圧縮耐力 (kgf)、 $P_{cu} = A_g \cdot \sigma_{cus} \cdot \sigma_{cul} / \sigma_{cu0}$

$A_n$ ：照査する断面の純断面積 (cm<sup>2</sup>)

$A_g$ ：照査する断面の総断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{tu}$ ：式 (5.1) に示す軸方向引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cus}$ ：式 (5.2) に示す局部座屈を考慮しない弱軸まわりの軸方向圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cu0}$ ：表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cul}$ ：両縁支持板、片縁支持板、補剛板、および鋼管についてそれぞれ式 (5.4)、(5.5)、(5.6)、(5.10) に示す局部座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_{cry}$ 、 $P_{crz}$ ：それぞれ弱軸および強軸まわりのオイラー座屈荷重で下式により算出する (kgf)

$$P_{crx} = \pi^2 EI_{yy} / l^2$$

$$P_{crz} = \pi^2 EI_{zz} / l^2$$

$E$  : 表 2.3 に示すヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_{cul}$  : 局部座屈を考慮した圧縮耐力 (kgf)

$$P_{cul} = A_g \sigma_{cul}$$

$M_y, M_z$  : それぞれ弱軸および強軸まわりに作用する曲げモーメント (kgf・cm)。ただし、式 (7.10) と式 (7.12) の適用にあたって、部材両端の曲げモーメント  $M_z$  が異なり、その間で曲げモーメント  $M_z$  が直線的に変化する場合には、 $M_z$  を式 (7.6), (7.7) もしくは式 (7.8) に示す等価換算曲げモーメント  $M_{eq}$  に置き換えるものとする。

$I_{yy}, I_{zz}$  : それぞれ照査する断面における弱軸および強軸まわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$M_{tuy}, M_{tuz}$  : それぞれ照査する断面の引張側における弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{tuy} = \frac{I_{yy}}{y_t} \sigma_{tu}$$

$$M_{tuz} = \frac{I_{zz}}{z_t} \sigma_{tu}$$

$M_{cuy}, M_{cuz}$  : それぞれ照査する断面の圧縮側における弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{cuy} = \frac{I_{yy}}{y_c} \sigma_{bu0}$$

$$M_{cuz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{busz}$$

$M_{culy}, M_{culz}$  : それぞれ照査する断面の圧縮側における局部座屈に対する弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{culy} = \frac{I_{yy}}{y_c} \sigma_{cul}$$

$$M_{culz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{cul}$$

$y_t, z_t$  : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の原点 (中立軸) から引張縁までの距離 (cm)

$y_c, z_c$  : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の原点 (中立軸) から圧縮縁までの距離 (cm)

$\sigma_{busz}$  : 式 (5.3) に示す局部座屈を考慮しない強軸まわりの曲げ圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。

ただし、式 (5.4), (5.5), (5.6) に示す局部座屈強度が式 (5.3) に示す値よりも小さい場合には、式 (5.4), (5.5), (5.6) に示す値を  $\sigma_{busz}$  の値とする。

$\sigma_{bu0}$  : 表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$l$  : 部材の有効座屈長 (cm) で、その値の決定にあたっては該当箇所の規定に従うものとするが、特に規定されていない場合には表 5.2 の値を参考に定めるものとする

る。

**【解 説】** 本条文は、道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）の3.3, 2.2.1の規定を参考に定めたものである。ここでも、限界状態の性質に応じて照査式が分けられている。軸方向力が引張力の場合には、式(7.9)が断面の終局曲げモーメントに対する照査式、式(7.10)が横倒れ座屈を考慮した部材の終局曲げモーメントに対する照査式、式(7.11)が局部座屈の影響を考慮した断面の終局曲げモーメントに対する照査式となっている。軸方向力が圧縮力の場合には、式(7.12)が横倒れ座屈を考慮した部材の終局曲げモーメントに対する照査式、式(7.13)が局部座屈の影響を考慮した断面の終局曲げモーメントに対する照査式となっている。これらの式において、断面の圧縮耐力、終局曲げモーメントの定義は、7.2.1あるいは7.2.2に示したものと同一である。また、式(7.10)、(7.12)のような座屈に対する照査式は等断面部材の場合について適用されるものであるので、変断面部材の場合には特別な配慮を必要とする。道路橋示方書では、便宜的にすべての断面に対して式(7.10)、(7.12)の照査を行うように規定している。

軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける部材の照査式の特徴は、式(7.12)、(7.13)の分母にそれぞれ  $(1-\nu P/P_{cuy})$ 、 $(1-\nu P/P_{cuz})$  と表わされる付加曲げモーメントの影響が入っている点である。この項は、曲げモーメントによって生じた変形のため軸方向圧縮力により付加曲げモーメントが加わり、曲げモーメントが増加する影響を考慮するための補正係数である。ここでは、道路橋示方書に準拠して補正係数を定めている。

#### 7.2.4 せん断力あるいはねじりモーメントを受ける部材の照査

(1) せん断力を受ける部材の照査は式(7.14)により行うものとする。

$$\nu \frac{S}{S_u} \leq 1 \dots\dots\dots(7.14)$$

ここに、 $\nu$ :6章の安全率

$S$ :断面に作用するせん断力(kgf)

$S_u$ :断面のせん断耐力で  $S_u = A_e \cdot \tau_u$  (kgf)

$A_e$ :照査する断面のせん断力を受けもつ有効断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\tau_u$ :式(5.7)に示すせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。ただし、局部座屈の照査を行う場合には式(5.8)を用いるものとする。

(2) せん断力とねじりモーメントを受ける部材の照査は式(7.15)、(7.16)、(7.17)により行うものとする。

$$\nu \frac{S}{S_u} + \nu \frac{T_s}{T_{su}} + \nu \frac{T_\omega}{T_{\omega u}} \leq 1 \dots\dots\dots(7.15)$$

$$\nu \frac{M_z}{M_{tuz}} + \nu \frac{M_\omega}{M_{\omega u}} \leq 1 \dots\dots\dots(7.16)$$

$$\nu \frac{M_z}{M_{cuz}} + \nu \frac{M_\omega}{M_{\omega u}} \leq 1 \dots\dots\dots(7.17)$$

ただし、式(7.18)に示すねじり定数比  $\chi$  が  $\chi < 0.4$  の場合には、純ねじりモーメント  $T_s$  を、ねじり定数比  $\chi$  が  $\chi > 10$  の場合には、そりねじりモーメント  $T_\omega$  をそれぞれ無視することができる。

$$\chi = l \sqrt{\frac{GK}{EI_{\omega\omega}}} \dots\dots\dots(7.18)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$S$  : 断面に作用するせん断力 (kgf)

$S_u$  : 断面のせん断耐力で  $S_u = A_e \cdot \tau_u$  (kgf)

$T_s$  : 断面に作用する純ねじりモーメント (kgf · cm)

$T_\omega$  : 断面に作用するそりねじりモーメント (kgf · cm)

$M_\omega$  : 断面に作用するそりモーメント (kgf · cm<sup>2</sup>)

$T_{su}$  : 断面の終局純ねじりモーメント (kgf · cm)

$$T_{su} = K\tau_u/h$$

$A_e$  : 照査する断面のせん断力を受けもつ有効断面積 (cm<sup>2</sup>)

$K$  : 断面の純ねじり定数 (cm<sup>4</sup>)

$\tau_u$  : 式 (5.7) に示すせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$h = \begin{cases} t & (\text{開断面の場合}) \\ \frac{2A_c}{t \int \frac{1}{t} ds} & (\text{閉断面の場合}) \end{cases} \quad (\text{cm})$$

$t$  : 板厚 (cm)

$A_c$  : 板厚中心線の囲む面積 (cm<sup>2</sup>)

$s$  : 板厚中心線に沿った座標 (cm)

$T_{\omega u}$  : 断面の終局そりねじりモーメント (kgf · cm)

$$T_{\omega u} = \frac{I_{\omega\omega}}{Q_{\max}} (\tau_u t)$$

$M_{\omega u}$  : 断面の終局そりモーメント (kgf · cm<sup>2</sup>)

$$M_{\omega u} = \frac{I_{\omega\omega}}{\omega_{\max}} \sigma_{tu}$$

$\omega$  : そり関数 (cm<sup>2</sup>)

$Q$  : そり 1 次関数 (cm<sup>4</sup>)

$I_{\omega\omega}$  : そりねじり定数 (cm<sup>6</sup>)

$M_z$  : 断面に作用する曲げモーメント (kgf · cm)

$M_{tuz}$  : 照査する断面の引張側における終局曲げモーメント (kgf · cm)

$$M_{tuz} = \frac{I_{zz}}{z_t} \sigma_{tu}$$

$I_{zz}$  : 照査する断面における断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$z_t$  :  $z$  軸の原点 (中立軸) から引張縁までの距離 (cm)

$\sigma_{tu}$  : 式 (5.1) に示す軸方向引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$M_{cuz}$  : 照査する断面の圧縮側における終局曲げモーメント (kgf · cm)

$$M_{cuz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{bu0}$$

$z_c$  :  $y$  軸の原点 (中立軸) から圧縮縁までの距離 (cm)

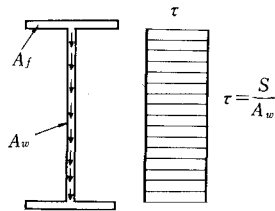
$\sigma_{bu0}$  : 表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)



$\alpha$  : ねじり定数比  
 $l$  : ねじりに対する支間長 (cm)  
 $G$  : 表 2.3 に示すせん断弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $E$  : 表 2.3 に示すヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**【解 説】** 道路橋示方書 (Ⅱ鋼橋編) の 8.2.2 および 8.2.3 に規定されている内容を断面力の表現を用いて定めた。

(1) せん断力を受ける部材の照査式である式 (7.14) は、プレートガーダーあるいはこれと類似の構造物の腹板の照査を目的とした略算式である。この場合には、解説図 7.3 に示すようにせん断応力が腹板内で一定であるとして、腹板の面積が  $A_w$  すなわち照査する断面のせん断力を受けもつ有効断面積  $A_e$  となる。しかしながら、フランジについては、上記のような略算式を用いて照査することはできないので、せん断力が各板の中心線に沿った方向に流れると考えるせん断流理論により応力度を算出し、フランジのせん断応力に対する照査が必要となる。



解説図 7.3 せん断応力の分布

(2) せん断力に加えてねじりモーメントの影響を考慮する場合の安全性の照査は、曲線部材の曲率面外に荷重が作用しねじりの影響が無視できない場合に適用される。プレートガーダーあるいはこれと類似の薄肉断面部材では、ねじりモーメントは純ねじりモーメントとそりねじりモーメントの和として受け持たれる。純ねじりモーメントは断面内にせん断応力のみを生じさせ、そりねじりモーメントはそりねじりに伴う垂直応力とそれとつり合うせん断応力を生じさせる。式 (7.15) の  $T_s$  がせん断応力による純ねじりモーメントを、 $T_w$  がせん断応力によるそりねじりモーメントを表わしている。式 (7.16)、(7.17) は、 $M_x$  が曲げモーメントを、 $M_w$  がそりモーメントを表わしている。ねじりモーメントを受ける薄肉部材では、純ねじりモーメントとそりねじりモーメントが共存しているが、一般に箱形断面のような閉断面を持つ部材では純ねじりモーメントの方が大きく、I形、 $\pi$ 形、U形断面のような開断面部材ではそりねじりモーメントの方が大きい。これらの分担の比率が式 (7.18) に示されるねじり定数比  $\alpha$  で判断できるため、条文のように、 $\alpha < 0.4$  の場合は純ねじりモーメント  $T_s$  を無視し、そりねじりモーメント  $T_w$  のみ考慮すれば良いとし、 $\alpha > 10$  の場合にはそりねじりモーメント  $T_w$  を無視し、純ねじりモーメント  $T_s$  のみを考慮すれば良いとしている。また、 $0.4 < \alpha < 10$  の場合には、純ねじりモーメント  $T_s$  とそりねじりモーメント  $T_w$  を考慮した曲げねじり理論に基づいて安全性の照査を行う必要がある。

普通、大きなねじりモーメントが作用する部材には、ねじり抵抗の大きい箱形断面部材が使用される。

### 7.2.5 合成応力度の照査

軸方向応力度とせん断応力度がともにそれぞれの材料強度の 25 % 以上の場合は次の各項により合成応力度の照査を行うものとする。

(1) 軸方向力、曲げモーメントとせん断力を同時に受ける部材の照査は式 (7.19) により行うものとする。

$$\left(\bar{\nu} \frac{P}{P_u} + \bar{\nu} \frac{M_y}{M_{uy}} + \bar{\nu} \frac{M_z}{M_{uz}}\right)^2 + \left(\bar{\nu} \frac{S_y}{S_{uy}} + \bar{\nu} \frac{S_z}{S_{uz}}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots(7.19)$$

(2) ねじりモーメントの影響を考慮に入れる場合の照査は式(7.20)により行うものとする。

$$\left(\bar{\nu} \frac{P}{P_u} + \bar{\nu} \frac{M_y}{M_{uy}} + \bar{\nu} \frac{M_z}{M_{uz}} + \bar{\nu} \frac{M_\omega}{M_{\omega u}}\right)^2 + \left(\bar{\nu} \frac{S_y}{S_{uy}} + \bar{\nu} \frac{S_z}{S_{uz}} + \bar{\nu} \frac{T_s}{T_{su}} + \bar{\nu} \frac{T_\omega}{T_{\omega u}}\right)^2 \leq 1 \dots\dots(7.20)$$

$\bar{\nu}$ : 6章の安全率を1.1で除した値

$P$ : 軸方向力 (kgf) で、絶対値をとる。

$P_u$ : 断面の軸方向耐力,  $P_u = A_n \cdot F$  (kgf)

$A_n$ : 照査する断面の純断面積 (cm<sup>2</sup>)

$F$ : 表5.1に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$M_y, M_z$ : それぞれ弱軸および強軸まわりに作用する曲げモーメント (kgf・cm)

$M_{uy}, M_{uz}$ : それぞれ照査する断面の弱軸および強軸まわりの終局曲げモーメント (kgf・cm)

$$M_{uy} = \frac{I_{yy}}{y} F$$

$$M_{uz} = \frac{I_{zz}}{z} F$$

$y, z$ : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸の原点 (中立軸) から縁端までの距離 (cm)

$I_{yy}, I_{zz}$ : それぞれ照査する断面における弱軸および強軸まわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$S_y, S_z$ : それぞれ  $y$  軸および  $z$  軸方向に作用するせん断力 (kgf)

$S_{uy}, S_{uz}$ : それぞれ照査する断面の  $y$  軸および  $z$  軸方向のせん断耐力 (kgf)

$$S_{uy} = A_{ey} \cdot \tau_u$$

$$S_{uz} = A_{ez} \cdot \tau_u$$

$A_{ey}, A_{ez}$ : それぞれ照査する断面の  $y$  軸および  $z$  軸方向のせん断力を受けもつ有効断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\tau_u$ : 式(5.7)に示すせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$T_s$ : 断面に作用する純ねじりモーメント (kgf・cm)

$T_\omega$ : 断面に作用するそりねじりモーメント (kgf・cm)

$M_\omega$ : 断面に作用するそりモーメント (kgf・cm<sup>2</sup>)

$T_{su}$ : 断面の終局純ねじりモーメント (kgf・cm)

$$T_{su} = K \tau_u / h$$

$K$ : 断面の純ねじり定数 (cm<sup>4</sup>)

$$h = \begin{cases} t & \text{(開断面の場合)} \\ \frac{2A_c}{t \int \frac{1}{t} ds} & \text{(閉断面の場合)} \end{cases} \quad (\text{cm})$$

$t$ : 板厚 (cm)

$A_c$ : 板厚中心線の囲む面積 (cm<sup>2</sup>)

$s$ : 板厚中心線に沿った座標 (cm)

$T_{\omega u}$ : 断面の終局そりねじりモーメント (kgf・cm)

$$T_{\omega u} = \frac{I_{\omega\omega}}{Q_{\max}} (\tau_u t)$$

$M_{\omega u}$  : 断面の終局そりモーメント (kgf・cm<sup>2</sup>)

$$M_{\omega u} = \frac{I_{\omega\omega}}{\omega_{\max}} \sigma_{ru}$$

$\omega$  : そり関数 (cm<sup>2</sup>)

$Q$  : そり1次関数 (cm<sup>4</sup>)

$I_{\omega\omega}$  : そりねじり定数 (cm<sup>6</sup>)

**【解 説】** 道路橋示方書(Ⅱ鋼橋編)の8.2.4に規定されている内容を断面力の表現を用いて定めた。この条文の適用にあたっては、本指針の7.2.1～7.2.4の各項が満たされていることが前提である。合成応力度の照査が重要となる箇所は、一般に、腹板とフランジとを連結する溶接部の母材やすみ肉溶接部などである。薄肉断面部材に本条文を適用した場合、不経済な断面構成になることも考えられるので、このような場合には、せん断流理論を用いて補正を行うことが望ましい。

さらに、本条文は杭や斜張橋なども適用対象としているため、軸方向力と二方向の曲げモーメントを作用させている。

なお、照査式の根拠はせん断ひずみエネルギー説によっている。この説によれば、垂直応力 $\sigma$ とせん断応力 $\tau$ が共存する状態は垂直応力 $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ が存在する状態に相当する。したがって、 $\sigma$ と $\tau$ の組合せが式(解7.10)を満足すれば、 $\tau$ のみを受ける部材と同等の安全率が確保できている。

$$\nu \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}{F} \leq 1 \dots\dots\dots (解7.10)$$

一般に、 $\sigma$ と $\tau$ の合成応力度を照査するときには、従来の経験より強度を10%程度高めることができるので、式(解7.10)は次式のように書き換えられる。

$$\frac{\nu}{1.1} \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}{F} \leq 1 \dots\dots\dots (解7.11)$$

式(7.19)、(7.20)は、式(解7.11)の両辺を二乗し、強度の割増し係数を安全率の低減と解釈し、それぞれ $\sigma$ および $\tau$ を断面力の表現を用いて記述したものである。

### 7.2.6 二軸応力状態の照査

二方向の応力が加わる部分の照査は式(7.23)により行うものとする。

**【解 説】** 骨組部材において、二軸応力状態が発生する箇所の例としては、連続縦桁の連結部でフランジを共有するような箇所があげられる。本条文の適用にあたっては、7.2.1～7.2.4の安全性の照査が行われていることが前提である。

## 7.3 板の終局限界状態の照査

### 7.3.1 面内力を受ける板の照査

面内力を受ける板の照査は次の各項により行うものとする。

#### (1) 応力度の照査

$$\nu \frac{\sigma_{\max}}{F} \leq 1 \dots\dots\dots(7.21)$$

$$\nu \frac{\tau_{\max}}{\tau_u} \leq 1 \dots\dots\dots(7.22)$$

(2) 二軸応力状態の照査

$$\left(\frac{\nu \sigma_x}{F}\right)^2 - \left(\frac{\nu \sigma_x}{F}\right)\left(\frac{\nu \sigma_y}{F}\right) + \left(\frac{\nu \sigma_y}{F}\right)^2 + \left(\frac{\nu \tau}{\tau_u}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots(7.23)$$

(3) 座屈の照査

$$\nu \frac{\sigma_{cx}}{\sigma_{cutx}} + \left(\nu \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{butx}}\right)^2 + \nu \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{cuty}} + \left(\nu \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{buly}}\right)^2 + \left(\nu \frac{\tau}{\tau_{ul}}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots(7.24)$$

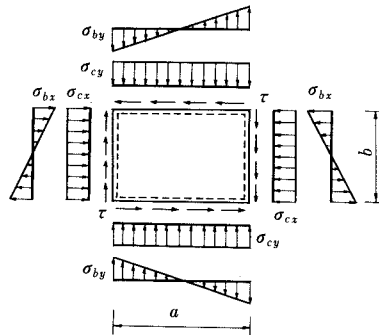


図 7.1 面内圧縮応力を受ける板

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$\sigma_{\max}$  : 最大垂直応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) で、絶対値をとる。

$F$  : 表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{\max}$  : 最大せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_u$  : 式 (5.7) に示すせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\bar{\nu}$  : 6章の安全率を 1.1 で除した値

$\sigma_x, \sigma_y$  : 照査する箇所互に直交する方向に生じる垂直応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。ただし、引張応力度を正、圧縮応力度を負とする。

$\tau$  : 照査する箇所に生じるせん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cx}, \sigma_{cy}$  : 互に直交する方向に生じる圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。ただし、一様引張応力度が作用している場合には零とする。

$\sigma_{bx}, \sigma_{by}$  : 互に直交する方向に生じる曲げ応力度の最大値 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cutx}, \sigma_{cuty}$  : 互に直交する方向の式 (5.4) に示す局部座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{butx}, \sigma_{buly}$  : 互に直交する方向の式 (5.4) に示す曲げ圧縮座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{ul}$  : 式 (5.9) に示すせん断座屈強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**【解 説】** 面内力を受ける板の照査は、式 (7.21)、(7.22) に示す応力度に対する照査、式 (7.23) に示す二軸応力状態の照査、および式 (7.24) に示す座屈に対する照査よりなっている。応力度に対する照査は板の断面

内の最大垂直応力度と最大せん断応力度に対するものであるので、板の形状、板厚の変化の影響を受けずに、一般的な板について適用できる。二軸応力状態の照査は、7.2.5の合成応力度の照査の解説でも述べたように、せん断ひずみエネルギー説によっている。この説によれば、二軸応力状態にある場合の相当応力度は  $\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$  と表わされる。したがって、合成応力度の照査の場合と同様に経験的に強度を10%程度高め、強度の割増し係数を安全率の低減と解釈して照査式を

$$\frac{\nu}{1.1} \frac{\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}}{F} \leq 1 \dots\dots\dots (解7.12)$$

とした。式(7.23)は、式(解7.12)の両辺を二乗し、 $\tau_u = F/\sqrt{3}$ を用いて定めたものである。この照査式も一般的な板に適用可能な照査式である。

座屈に対する照査は、4辺が単純支持された板厚一定の長方形平板要素のみを対象としている。板要素の形状が長方形平板と見なせない場合や境界条件が仮定と相違する場合などについては、適切な構造解析法を用いて限界状態の照査を行う必要がある。条文の内容は、ロイド船級協会の近似相関関係式<sup>7)</sup>を参考に、5章の材料強度との整合性をはかりつつ記述されている。

### 7.3.2 面外力を受ける板の照査

面外力を受ける板の照査は次の各項により行うものとする。

#### (1) 応力度の照査

$$\nu \frac{\sigma_{\max}}{F} \leq 1 \dots\dots\dots (7.25)$$

$$\nu \frac{\tau_{\max}}{\tau_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.26)$$

#### (2) 二軸応力状態の照査

$$\left(\frac{\nu \sigma_x}{F}\right)^2 - \left(\frac{\nu \sigma_x}{F}\right)\left(\frac{\nu \sigma_y}{F}\right) + \left(\frac{\nu \sigma_y}{F}\right)^2 + \left(\frac{\nu \tau}{\tau_u}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots (7.27)$$

ここに、 $\nu$ :6章の安全率

$\sigma_{\max}$ :引張縁または圧縮縁の最大垂直応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) で、絶対値をとる。

$F$ :表5.1に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{\max}$ :引張縁または圧縮縁の最大せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_u$ :式(7.5)に示すせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\bar{\nu}$ :6章の安全率を1.1で除した値

$\sigma_x, \sigma_y$ :照査する箇所互に直交する方向に生じる垂直応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。ただし、引張応力度を正、圧縮応力度を負とする。

$\tau$ :照査する箇所に生じるせん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**【解 説】** 面外力を受ける板の照査は、応力度の照査と二軸応力状態の照査よりなる。応力度の照査は板の外縁部での照査であり、 $\tau_{\max}$ は一般にモールの応力円を用いて計算される。ここでは、薄板を対象としているため、板厚方向に分布するせん断応力度の照査は行っていない。したがって、厚板の場合には板厚方向のせん断応力についてもせん断応力度の照査が必要となる。二軸応力状態の照査については、7.2.2の解説と同様に、相当応力度に対する照査である。

なお、面外力を受ける板は、面外たわみが増大すると、板としての働きに加えて膜としての働きも期待でき

るようになるので、この点を考慮して強度を割増すことがある。本条文では適用の対象を特定していないため、このような強度の割増しは行っていない。

### 7.3.3 面内力と面外力を受ける板の照査

板が最も不利になる載荷状態に対して、7.3.1と7.3.2を参考に、合応力度の照査と二軸応力状態の照査を行うことを前提とし、必要に応じて座屈の照査を行うものとする。

**【解説】** 面内力と面外力を受ける板の照査は、条文として整えるほどには照査方法が明確になっていない。このため、条文のような表現にとどめた。

面内力と面外力を受ける板の応力度の照査は、垂直応力度とせん断応力度のそれぞれの合計値について照査を行えばよい。二軸応力状態の照査については7.3.1、7.3.2と変わる所はない。座屈に対する照査では、面外力がどのような影響を板に与えるかを十分に検討する必要がある。

境界条件によっては、膜応力の存在によって強度の増加が期待できることがある。その場合には、周辺の支持条件に十分注意する必要がある。

## 7.4 連結部の終局限界状態の照査

### 7.4.1 溶接継手の照査

(1) 軸方向力またはせん断力を受ける溶接継手の安全性の照査は式(7.28)により行うものとする。

$$\nu \frac{P}{P_u} \leq 1 \dots\dots\dots(7.28)$$

ここに、 $\nu$ : 6章の安全率

$P$ : 継手に作用する力 (kgf)

$P_u = \sigma_{tu} \sum a l$  または  $\tau_u \sum a l$  (kgf)。ただし、すみ肉溶接および部分溶込み溶接の場合のみ、作用力による応力はすべてせん断応力と見なし、 $P_u$  は後者をとる。すみ肉溶接および部分溶込み溶接を用いた溶接継手では引張応力を生じさせないような設計を原則とする。

$\sigma_{tu}$ ,  $\tau_u$ : 5.2.3 (1) に示す溶接部の強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$ : 溶接の有効のど厚 (cm) (9.2.2 参照)

$l$ : 溶接の有効長 (cm) (9.2.3 参照)

(2) 曲げモーメントを受ける溶接継手の安全性の照査は式(7.29)により行うものとする。

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq 1 \dots\dots\dots(7.29)$$

ここに、 $\nu$ : 6章の安全率

$M$ : 継手に作用する曲げモーメント (kgf・cm)

$M_u = \frac{I}{Y_t} \sigma_{tu}$  または  $\frac{I}{Y_t} \tau_u$  (kgf・cm)。ただし、すみ肉溶接の場合のみ作用モーメントによる応力はすべてせん断応力と考え、 $M_u$  として後者をとる。

$\sigma_{tu}$ ,  $\tau_u$ : 溶接部の強度で 5.2.3 による (kgf/cm<sup>2</sup>)

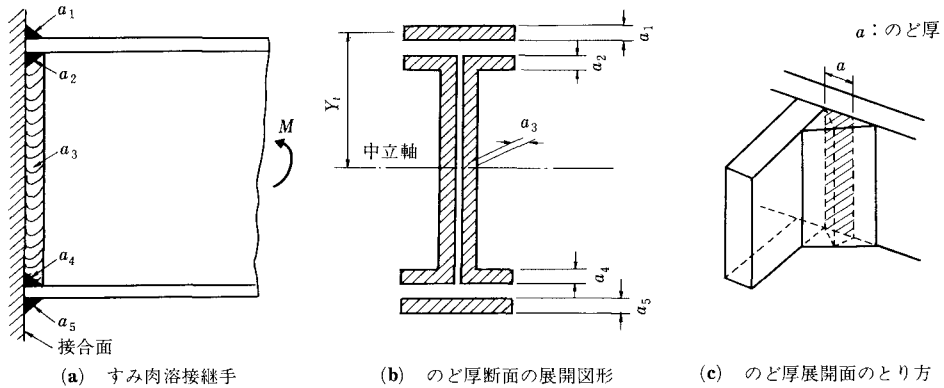


図7.2 曲げモーメントを受けるすみ肉溶接継手

$I$  : のど厚を接合面に展開した断面のその中立軸のまわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)  
(図7.2参照)

$Y_t$  : 展開図形の中立軸から溶接継手の安全性を照査する位置までの距離 (cm)

(3) 軸方向力、曲げモーメントおよびせん断力を同時に受ける溶接継手の安全性の照査は次の各項により行うものとする。

1) 全断面溶込グループ溶接の場合

$$\left(\bar{\nu} \frac{P_p}{P_u} + \bar{\nu} \frac{M}{M_u}\right)^2 + \left(\bar{\nu} \frac{P_s}{P_u}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots (7.30)$$

ここに、 $\bar{\nu}$  : 6章の安全率を1.1で除した値

$P_p$  : 継手に作用する軸方向力 (kgf)

$P_s$  : 継手に作用するせん断力 (kgf)

$M$  : 継手に作用する曲げモーメント (kgf・cm)

$$P_u = \sigma_{tu} \sum a l \text{ または } \tau_u \sum a l \text{ (kgf)}$$

$$M_u = \frac{I}{Y_t} \sigma_{tu} \text{ (kgf・cm)}$$

$\sigma_{tu}, \tau_u$  : 5.2.3 (1) に示す溶接部の強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$  : 溶接の有効のど厚 (cm)

$l$  : 溶接の有効長 (cm)

$I$  : のど厚を接合面に展開した断面のその中立軸のまわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$Y_t$  : 展開図形の中立軸から溶接継手の安全性を照査する位置までの距離 (cm)

2) すみ肉溶接の場合

$$\left(\nu \frac{P_p}{P_u} + \nu \frac{M}{M_u}\right)^2 + \left(\nu \frac{P_s}{P_u}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots (7.31)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$P_p$  : 継手に作用する軸方向力 (kgf)

$P_s$  : 継手に作用するせん断力 (kgf)

$M$  : 継手に作用する曲げモーメント (kgf・cm)

$$P_u = \tau_u \Sigma a l \text{ (kgf)}$$

$$M_u = \frac{I}{Y_t} \tau_u \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$\tau_u$ : 溶接部の強度で 5.2.3 による (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$ : 溶接の有効のど厚 (cm)

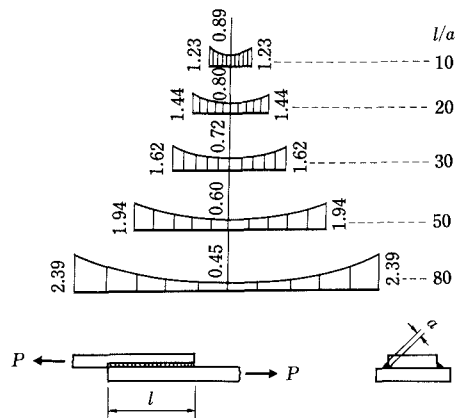
$l$ : 溶接の有効長 (cm)

$I$ : のど厚を接合面に展開した断面のその中立軸のまわりの断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$Y_t$ : 展開図形の中立軸から溶接継手の安全性を照査する位置までの距離 (cm)

**【解 説】** 道路橋示書・同解説(Ⅱ鋼橋編)の 4.2.6~4.2.8 の規定を参考に断面力の表現を用いて定めた。

(1) 全断面溶込み溶接継手の場合には、式 (7.28) より継手部に母材と同等以上の耐力が期待できることが分る。すみ肉溶接の場合には、作用断面力、溶接線の方にかかわらず、のど断面におけるせん断強度で抵抗すると考えているため、式 (7.28) の  $P_u$  にただし書きがついている。前面すみ肉溶接の破壊面をのど断面とするならば、すみ肉溶接の強度は作用力の方によって変化させるのが合理的であるが、繁雑さを避ける意味で、その最低値であるせん断強度を使用して、すみ肉溶接継手の耐力を照査することとした。また、側面すみ肉溶接では、解説図 7.4 に示すようにその端部は中央部に比べて応力度が高くなり、この傾向は溶接の有効長が長くなるほど著しくなる。したがって、特別に長いすみ肉溶接の場合には式 (7.6) によって継手部の照査を行うことは適切でない。たとえば、鋼構造設計規準<sup>4)</sup>では、側面すみ肉溶接の有効長がすみ肉のサイズの 30 倍を超えるときには、強度を低減するように規定している。



解説図 7.4 側面すみ肉溶接におけるせん断応力分布<sup>5)</sup>

(2) 曲げモーメントを受ける溶接継手には、全断面溶込みグループ溶接を用いるのを原則としている。ただし、主げたと横げたとの連結部などで曲げモーメントにより生じる応力度が小さい場合には、溶接性を考え、すみ肉溶接を用いることがある。

(3) 式 (7.30) は 7.2.5 で述べた合成応力度の照査式と等価であり、全断面溶込みグループ溶接継手の照査式を断面力の表現を用いて記述したものである。すみ肉溶接の場合には、曲げに伴うせん断応力とせん断力によるせん断応力が単に合成されるだけであるので、式 (7.31) のような照査式となり、安全率の低減はない。

## 7.4.2 高力ボルト継手の照査

### (1) 摩擦接合の場合



1) 軸方向力と曲げモーメントを受ける高力ボルト継手の安全性の照査は、各列のボルトが式(7.32)を満足するように行うものとする。ただし、軸方向力のみを受ける場合は、式(7.33)を満足すればよい。

$$\nu \frac{P_i}{n_i m P_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.32)$$

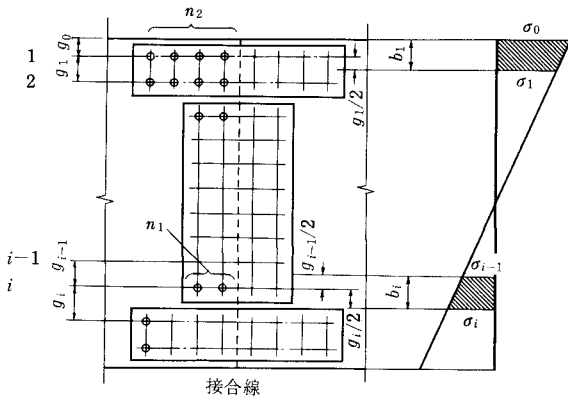
ここに、 $\nu$ : 6章の安全率

$P_i$ :  $i$ 列目の接合線の片側にあるボルト群に作用する力 (kgf) (図7.3参照)

$n_i$ :  $i$ 列目の接合線の片側にあるボルト群のボルト本数

$m$ : 摩擦面の数

$P_u$ : 表5.3に示すボルト1本、1摩擦面あたりのすべり耐力 (kgf)



1列目のボルトでは

$$b_1 = g_0 + \frac{g_1}{2}$$

$$p_1 = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2} \cdot b_1 \cdot t$$

$i$ 列目のボルトでは

$$b_i = \frac{g_{i-1} + g_i}{2}$$

$$p_i = \frac{\sigma_{i-1} + \sigma_i}{2} \cdot b_i \cdot t$$

ここに、 $t$ : 板厚

図7.3 ボルトに作用する力 (軸方向力と曲げモーメントを受ける場合)

$$\nu \frac{P}{n m P_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.33)$$

ここに、 $\nu$ : 6章の安全率

$P$ : 接合線の片側にある全ボルトに作用する力 (kgf)

$n$ : 接合線の片側にある全ボルトの本数

$m$ : 摩擦面の数

$P_u$ : 表5.3に示すボルト1本、1摩擦面あたりのすべり耐力 (kgf)

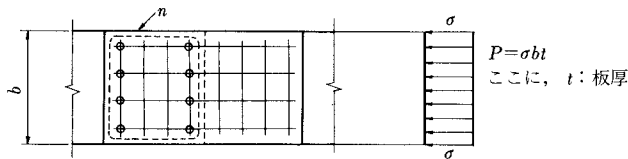


図7.4 ボルトに作用する力 (軸方向力の場合)

2) せん断力を受ける高力ボルト継手の安全性の照査は式(7.34)により行うものとする。

$$\nu \frac{S}{n m P_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.34)$$

ここに、 $\nu$ ：6章の安全率

$S$ ：せん断力 (kgf)

$n$ ：接合線の片側にある全ボルトの本数

$m$ ：摩擦面の数

$P_u$ ：表 5.3 に示すボルト 1 本、1 摩擦面あたりのすべり耐力 (kgf)

- 3) 曲げモーメント、軸方向力およびせん断力を同時に受ける高力ボルト継手の安全性の照査は式 (7.35) により行うものとする。

$$\left(\nu \frac{P_i}{n_i m P_u}\right)^2 + \left(\nu \frac{S}{n m P_u}\right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots (7.35)$$

ここに、 $\nu$ ：6章の安全率

$P_i$ ： $i$  列目の接合線の片側にあるボルト群に作用する力 (kgf)

$S$ ：継手に働くせん断力 (kgf)

$n_i$ ： $i$  列目の接合線の片側にあるボルト群の本数

$m$ ：摩擦面の数

$n$ ：接合線の片側にあるボルトの全本数

$P_u$ ：表 5.3 に示すボルト 1 本、1 摩擦面あたりのすべり耐力 (kgf)

(2) 支圧接合の場合

支圧接合ボルトの照査は 7.4.2 (1) の定めを準用するものとする。

(3) 引張接合の場合

高力ボルトの引張接合部では、十分な配慮のもとにボルトの軸方向引張力およびせん断力、接合される板の曲げモーメントに対して安全性の照査を行うものとする。

(4) 連結板の場合

高力ボルト継手における連結板の安全性の照査は次の各項により行うものとする。

1) 軸方向力を受ける場合

$$\nu \frac{P}{P_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.36)$$

2) 曲げモーメントを受ける場合

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.37)$$

ここに、 $\nu$ ：6章の安全率

$P$ ：連結板に作用する軸方向力 (kgf)

$P_u = A_n \cdot F$  (作用力が引張力のとき) (kgf)

$= A_g \cdot F$  (作用力が圧縮力のとき) (kgf)

$A_n, A_g$ ：それぞれ連結板の純断面積、総断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$F$ ：表 5.1 に示す設計強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$M$ ：連結板に作用する曲げモーメント ( $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ )

$$M_u = \frac{I}{Y} \sigma_{tu} \text{ (kgf} \cdot \text{cm)}$$

$I$  : 部材断面の中立軸に関する連結板の総断面の断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)  
 $Y$  : 部材断面の中立軸から連結板の縁端までの距離 (cm)  
 $\sigma_{tu}$  : 表 5.1 に示す設計強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

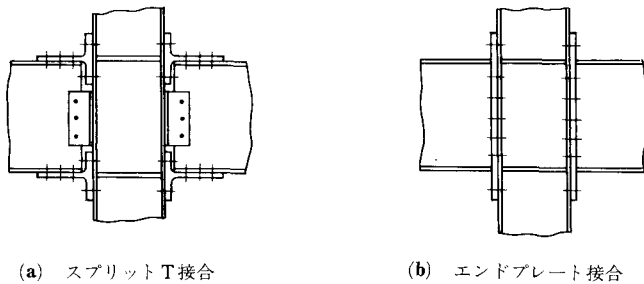
**【解 説】** ここでは、高力ボルト引張接合の場合を除いて、道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）4.3.4～4.3.7の規定を参考に、断面力の表現を用いて条文を作成した。

(1) 高力ボルト摩擦接合継手の安全性の照査は、母材の応力分布に着目して定めている。摩擦が有効な範囲内で使用するようにボルトの本数を定めれば、力の伝達に変形は関与しないので、中立軸からの距離にかかわらずボルトのすべり耐力に対して式 (7.32) の照査を行えば良い。軸方向力のみを受ける場合およびせん断力を受ける場合には、ボルト群全体で均等に抵抗するものと考え、それぞれ式 (7.33), (7.34) により安全性の照査を行うことになる。曲げモーメント、軸方向力、およびせん断力を同時に受ける場合には、合成された応力度に対する照査式 (7.35) を適用する。

(2) 高力ボルトの支圧接合継手の安全性の照査は、リベットの規定を準用している。

(3) 高い引張強さを利用してボルト軸方向の力を伝達させる引張接合の利用価値は大きいと考えられるが、高力ボルト引張接合を採用する場合には、ボルトの強度、締付け力、継手部の剛性、応力状態などについて十分配慮する必要がある。ただし、疲労の影響が考えられる連結部には使用しないことを原則とする。

たとえば、高力ボルト接合設計施工指針（日本建築学会）<sup>8)</sup>では、引張接合の例として、解説図 7.5 に示すようなスプリットT接合とエンドプレート接合が挙げられている。さらに、引張接合部の安全性の照査は次の各項に示す方法を標準としている。



解説図 7.5 高力ボルトの引張接合<sup>8)</sup>

a) スプリットT接合の場合

1) 軸方向引張力を受けるボルトの安全性の照査は、各ボルトが式 (解 7.13) を満足するように行う。

$$\nu \frac{P+R}{P_u} \leq 1 \dots\dots\dots (解 7.13)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$P$  : ボルト1本あたりの軸方向引張力 (kgf)

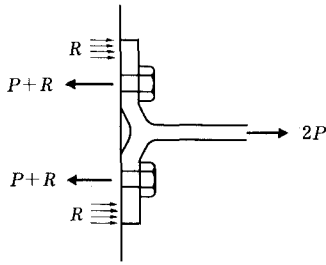
$R$  : てこ反力でTフランジの板厚、その形状・寸法、ボルトの位置、ボルトおよび接合される板の剛性などを考慮して解析により求める (kgf). (解説図 7.6 参照)

$P_u$  : 表 5.4 に示すボルト1本あたりの引張耐力 (kgf)

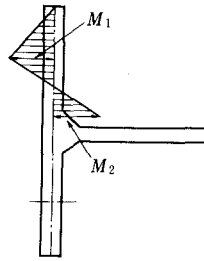
2) 接合される板の安全性の照査は式 (解 7.14) を満足するように行う。

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq 1 \dots\dots\dots (解 7.14)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率



解説図 7.6 てこ反力

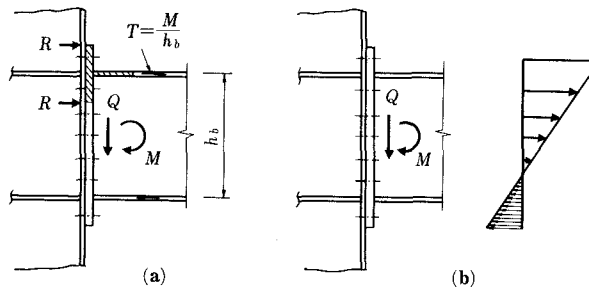
解説図 7.7 曲げモーメント図<sup>8)</sup>

$M$  : 接合される板の曲げモーメントの最大値 (kgf・cm) (解説図 7.7 参照)

$M_u$  : 全塑性モーメント (kgf・cm)

#### b) エンドプレート接合の場合

エンドプレート接合の場合には、引張側フランジ周辺の部分だけを対象に、この部分について、スプリット T 接合の安全性の照査法を準用するか (解説図 7.8 (a) 参照)、エンドプレートの板厚を厚くして、てこ反力の影響をなくし、ボルトに作用する力を平面保持の仮定により単純化して安全性の照査を行うか (解説図 7.8 (b) 参照) のどちらかである。

解説図 7.8 エンドプレートの接合のモデル化<sup>8)</sup>

(4) 連結板では、軸方向圧縮応力を受ける場合でも、連結板はボルトで固定されており、座屈は生じないと考えられるので、連結板の強度として設計強度を利用して安全性の照査を行っている。

#### 7.4.3 普通ボルト継手の照査

(1) 普通ボルト継手の安全性の照査は、7.4.2 (2), (3) の定めを準用するものとする。ただし、普通ボルトの強度は表 5.7 に示す強度を標準とする。

(2) 普通ボルト継手における連結板の安全性の照査は、7.4.2 (4) を準用するものとする。

**【解 説】** 普通ボルト継手の安全性の照査は高力ボルト継手の規定を準用することとした。ただし、普通ボルト継手は疲労の影響が考えられる連結部には使用しないことを原則とする。

#### 7.4.4 リベット継手の照査

(1) リベット継手の安全性の照査は次の各項により行うものとする。

1) 軸方向力またはせん断力を受ける場合

$$\nu \frac{P}{nP_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.38)$$

2) 曲げモーメントを受ける場合

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.39)$$

3) 軸方向力、曲げモーメントおよびせん断力を同時に受ける場合

$$\left( \nu \frac{P_p}{nP_u} + \nu \frac{M}{M_u} \right)^2 + \left( \nu \frac{P_s}{nP_u} \right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots (7.40)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$n$  : リベットのの本数 (図7.5 参照)

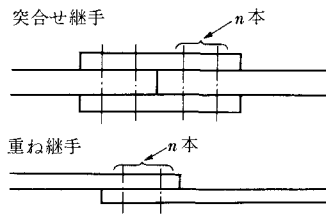


図7.5 リベットのの本数

$P$  : 継手に働く軸方向力 ( $P_p$ ) またはせん断力 ( $P_s$ ) (kgf)

$M$  : 継手に働く曲げモーメント (kgf・cm)

$P_u$  : リベット1本あたりの耐力 (kgf) で、径に基づいて算出したせん断耐力と支圧耐力のうち小さい方の値。この場合、リベットの有効支圧面積はリベット径と支承する鋼材の厚さとの積とする。ただし、さらりベットの有効支圧面積の計算にあたっては、さらり部はその深さの1/2を有効とする (図7.6 参照)。

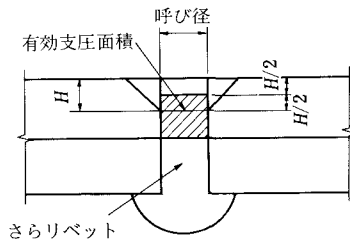


図7.6 さらりベットの有効支圧面積

$$M_u = \frac{\sum Y_i^2}{Y_n} \cdot P_u : \text{リベット継手の終局曲げモーメント (kgf・cm)}$$

$\Sigma$  : 接合面の片側にあるリベットに対する和

$Y_i$  : リベットから中立軸までの距離 (cm)

$Y_n$  : 最縁リベットの中立軸からの距離 (cm)。ただし、同一連結部のフランジをリベットで連結している場合は、中立軸からフランジの圧縮縁または引張縁までの距離。

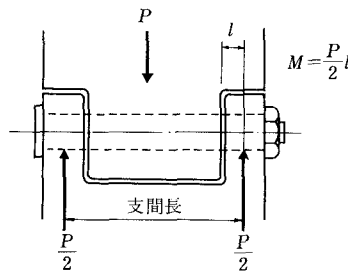
(2) リベット継手における連結板の安全性の照査は7.4.2を準用するものとする。

【解 説】 道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）4.4.4～4.4.6の規定を参考に断面力の表現を用いて定めた。

### 7.4.5 ピン継手の照査

ピン継手の照査は、軸方向力が作用しない場合のボルトの支圧接合7.4.2(2)あるいはリベット継手7.4.4の定めを準用するものとする。ただし、ピンの支圧力を計算する場合の有効支圧面積は、その径と支承する鋼材の厚さとの積とする。

【解 説】 ピンは短いはりに横荷重が加わる形式で力を伝え、支承の幅も比較的大きいので、発生する応力は計算応力より小さくなる場合が多い。このため、道路橋示方書では、断面力算出時の支持幅を考慮して（解説図7.9参照）、ピンの曲げ強度を表5.10のように定めている。



解説図7.9 ピンの計算上の支間長

## 7.5 使用限界状態の照査

### 7.5.1 一般

構造物または部材の変位・変形・振動騒音等が、構造物の機能、使用性、耐久性を損なわないことを、適宜適切な形で照査するものとする。

【解 説】 構造物または部材は、耐用期間中、使用目的に応じた十分な機能を保持しなければならない。一般に、鋼構造の使用限界状態としては、たわみ、振動等に対する限界状態が考えられている。

### 7.5.2 たわみの照査

構造物または部材のたわみの照査は次式により行うものとする。

$$\nu \frac{\delta}{\delta_u} \leq 1 \dots\dots\dots (7.41)$$

ここに、 $\nu$ ：安全率（通常は1.0）

$\delta$ ：構造物または部材のたわみ（m）で、通常、自重（死荷重、固定荷重）を除いた荷重作用に対して部材の総断面積を用いて算出する。

$\delta_u$ ：構造物または部材のたわみの限界値（m）。ただし、設計にあたって考慮すべきたわみの限界値は、類似の構造物に設計基準の定めがある場合にはそれを準用し、な

い場合には責任技術者の判断による。

**【解 説】** 構造物または部材のたわみに関する安全性の照査式を限界状態の照査の形で表現した。たとえば、道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）1.4では、活荷重（衝撃を含まない）による鋼橋の主げた、床げたおよび縦げたのたわみの限界値を解説表7.1のように定めている。ただし、ラーメン構造については、本指針10.3.2に示す値によるものとする。

解説表 7.1 たわみの限界値 (m)<sup>1)</sup>

| 橋の形式               |                               | けたの形式            | 単純げたおよび連続げた           | ゲルバーげたの片持部            |
|--------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| プレート<br>ガーダー<br>形式 | 鉄筋コンクリート<br>床版をもつプレ<br>ートガーダー | $L \leq 10$      | $L/2\ 000$            | $L/1\ 200$            |
|                    |                               | $10 < L \leq 40$ | $\frac{L}{20\ 000/L}$ | $\frac{L}{12\ 000/L}$ |
|                    |                               | $40 < L$         | $L/500$               | $L/300$               |
|                    | その他の床版をもつプレートガー<br>ダー         |                  | $L/500$               | $L/300$               |
| 吊 橋 形 式            |                               |                  | $L/350$               |                       |
| 斜 張 橋 形 式          |                               |                  | $L/400$               |                       |
| そ の 他 の 形 式        |                               |                  | $L/600$               | $L/400$               |

また、鋼構造設計規準10.2では、クレーン走行ばりのたわみの限界値を手動クレーンなどではスパンの1/500、その他の電動クレーンにあつては実状によりスパンの1/800~1/1 200としている。

### 7.5.3 振動に対する照査

部材の振動に対する安全性の照査は、たわみ制限の形で照査する場合には式(7.41)を準用するものとし、それ以外の形で照査する場合には適宜適切な形で照査するものとする。

**【解 説】** 細長比の大きい鋼管を使用した場合の風による振動や歩道橋の活荷重による主げたの振動などを制限するための検討事項を、使用限界状態の照査の形で表現した。たとえば、細長比の大きい鋼管の場合には、カルマン渦の周期的な発生による振動のため、部材端の連結部から疲労破壊する恐れがあるので、鋼管の共振風速を調べ細長比の制限とは別の形で鋼管の外径を制限している<sup>1)</sup>。また、横断歩道橋の場合には、歩行者が2 Hzの強制周期力を橋に与えると見なして、主げたのたわみ振動の固有振動数が2 Hz前後にならないように配慮すると共に、2 Hzの強制周期力による橋の最大加速度が0.1 g (gは重力加速度)以下となるように設計することが望ましいとしている<sup>9)</sup>。

## 7.6 疲労限界状態の照査

### 7.6.1 一般

この節は、疲労に対する安全性の照査が必要な鋼構造物の部材および連結部の疲労設計に適用する。

**【解 説】** 荷重による応力度が繰り返し変化する部材や連結部の設計では、繰り返し応力の数、応力変化の範囲、部材や連結部の形式と位置に注意を払い、疲労に対する安全性の照査を行うものとする。

### 7.6.2 疲労限界状態の照査

荷重の中で、変動荷重の占める割合が大きく、その作用頻度が高い場合には、適宜適切な形で疲労に対する安全性の照査を行うものとする。

**【解 説】** 一般に、疲労に対する安全性の照査は、部材および連結部の終局限界状態の照査が行われることを前提として、作用する応力の変動範囲をもとに、設計繰返し回数に対応させて設定した疲労限界応力範囲を用いて行われている<sup>6),10),11)</sup>。たとえば、国鉄建造物設計標準解説（土木学会）<sup>6)</sup>では、疲労に対する安全性の照査を式（解7.15）、（解7.16）を用いて行っている。

$$\nu \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_f} \leq 1 \dots\dots\dots (解 7.15)$$

$$\nu \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_f} \leq 1 \dots\dots\dots (解 7.16)$$

ここに、

$\nu$  : 6章の安全率

$\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  : それぞれ引張を正号、圧縮を負号とし、軸方向応力度の代数的最大値、最小値 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{\max}$ ,  $\tau_{\min}$  : それぞれ絶対値の大きい方の応力方向を正号、逆方向を負号とし、せん断応力度の代数的最大値、最小値 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ,  $\tau_{\max} - \tau_{\min}$  : 作用応力範囲

$\sigma_f$ ,  $\tau_f$  : 疲労限界応力範囲で次式で与えられる。

$$\sigma_f = a \cdot b \cdot \sigma_0 \dots\dots\dots (解 7.17)$$

$$\tau_f = a \cdot b \cdot \tau_0 \dots\dots\dots (解 7.18)$$

$\sigma_0$ ,  $\tau_0$  : 繰返し数 200 万回の基本疲労限界応力範囲 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$  : 累積疲労被害効果を表す低減係数で、修正マイナー則による。

$b$  : 作用応力範囲に占める負の成分の割合によって割増す係数

ただし、構造用鋼材の基本疲労応力範囲、作用応力範囲に占める負の成分の割合によって割増す係数については、国鉄建造物設計標準解説に示されている値を用いるものとする。

近年、疲労限界状態の照査方法として、破壊力学を用いた疲労破壊の評価法が注目を集めている。現在では、一部の設計基準の中に見られる程度であり、その適用範囲も比較的単純な溶接接合部に限定されているが、今後必要なデータ類が整備されれば、構造物の疲労設計に採用されてゆく可能性がある<sup>12)</sup>。

疲労破壊の評価法の概要は、応力集中部に潜在欠陥を仮定し、疲労き裂伝播挙動をパリス則（疲労き裂進展則）を用いて次式のように表わす。

$$\frac{da}{dN} = c (\Delta K)^m \dots\dots\dots (解 7.19)$$

ここに、 $a$  : き裂長さ

$N$  : 繰返し数

$\Delta K$  : 応力拡大係数範囲

$c$ ,  $m$  : 材料、応力比などによって決まる定数

この関係式を  $N$  について解くことにより、疲労に対する有効寿命を推定する方法である。潜在初期欠陥寸法の仮定が難しいが、非破壊検査では検出不可能な最大欠陥が存在していると仮定するのが一般的である。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編），1980年2月
- 2) AISC：Specification for the Design, Fabrication and Erection of Steel for Bridges, 8th Ed. 1980.



- 3) 桑野忠生・依田照彦：局部座屈と全体座屈の連成効果を考慮した補剛板の耐荷力に関する一考察，土木学会論文集，No. 368/I -5, 1986.
- 4) 日本建築学会：鋼構造設計規準，1973年5月.
- 5) 西野文雄・三木千寿・鈴木 篤：道路橋示方書 II 鋼橋編改訂の背景と運用（第8回），橋梁と基礎，1981年10月.
- 6) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983年4月.
- 7) LR PASS : Lloyd's Resister's Plan Appraisal Systems for Ships, 1978年.
- 8) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針，1983年7月.
- 9) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979年1月.
- 10) BSI : BS 5400, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10, Code of Practice for Fatigue 1980.
- 11) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges, 13th Ed. 1983.
- 12) ECCS : Recommendations for Fatigue Design of Steel Structures, 1985.