

## 【付録 2】

## 限界状態の照査における断面力表示と応力表示

まえがきにも述べられているように、本指針（特に PART A）では原則的に限界状態設計法の書式を採用して、主に断面力の形で限界状態の照査を行っている。世界的にみても「限界状態設計法」は広く採用されつつあるし、わが国でもコンクリート標準示方書の改訂により<sup>1)</sup>、コンクリート構造物の設計はこの形に変わっている。

既往の許容応力度設計法と限界状態設計法との関係については、【付録 1】にも述べたように現在なお様々な議論が行われているところである。本指針の基本的な立場は、鋼構造物の既往の設計法は、実質的な内容において、設計値の選択において安全性確率に配慮し、終局限界状態を中心に考えた、一つの限界状態設計法としての性格を有しているという認識<sup>2)</sup>にもとづく。そして、特に7章においては、道路橋示方書（鋼橋編）を中心とした既存の規定を、内容を変えることなく、限界状態の性格をよく表わしうると思われる書式に書直す作業を行っている。

しかしながら、この作業のすべてが、果たして設計を合理的にさせる方向に向かっているのかどうか、また、応力表示の設計式が不合理であるかどうかには、なお議論の余地が残されていると思われる。そこで、今後の参考資料として、照査式の断面力表示と応力表示について、書換える上での問題点の整理、さらには条文の書き方の方針、その背景となる対象構造物の性格づけ等につき、若干の考察を試みた。

限界状態照査の表現に断面力表示を用いるか、応力表示を用いるかでどのような違いが生じるかを、7章の条文の表現に即して具体的に考えてみる。7章の規定のうち、7.2.1～5および7.4.1～5において断面力表示が用いられているが、これらを代表する形で、7.2.3節（軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査）のみ取出して、応力表示による条文と対比したものを以下に示す。

## 【1】 断面力表示（本文）

## 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

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

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

$$-\nu \frac{P}{P_{cui}} + \nu \frac{M_y}{M_{cuy}} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz}} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (7.11)$$

## 2) 軸方向力が圧縮力の場合

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

$$-\nu \frac{P}{P_{cui}} + \nu \frac{M_y}{M_{cuy} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{cry}}\right)} + \nu \frac{M_z}{M_{cuz} \left(1 - \frac{\nu P}{P_{crz}}\right)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (7.13)$$

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),  $P_{cu} = A_g \cdot \sigma_{cu} \cdot \sigma_{cui} / \sigma_{cuo}$

$A_n$  : 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>)

$\sigma_{cu}$  : 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>)

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

$\sigma_{cui}$  : 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)

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

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

$E$  : ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_{cui}$  : 局部座屈を考慮した圧縮耐力 (kgf)

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

$M_y$ ,  $M_z$  : 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)

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

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

$M_{cuiy}$ ,  $M_{cuiz}$  : 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)

$$M_{cuiy} = \frac{I_{yy}}{y_c} \sigma_{cui}$$

$$M_{cuiz} = \frac{I_{zz}}{z_c} \sigma_{cui}$$

$y_t$ ,  $z_t$  : 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)

$\sigma_{buoz}$  : 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  $\sigma_{buoz}$  の値とする.

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

$l$  : 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。

[2] 応力表示

7.2.3 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査

(1) 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) 軸方向力が引張の場合

$$\nu \frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} + \nu \frac{\sigma_{btly}}{\sigma_{tu}} + \nu \frac{\sigma_{btz}}{\sigma_{tu}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.9)$$

$$-\nu \frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} + \nu \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bu0}} + \nu \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bugz}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.10)$$

$$-\nu \frac{\sigma_t}{\sigma_{cul}} + \nu \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{cul}} + \nu \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{cul}} \leq 1 \dots\dots\dots (7.11)$$

2) 軸方向力が圧縮の場合

$$\nu \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} + \nu \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bu0} \left(1 - \frac{\nu \sigma_c}{\sigma_{cry}}\right)} + \nu \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bugz} \left(1 - \frac{\nu \sigma_c}{\sigma_{crz}}\right)} \leq 1 \dots\dots\dots (7.12)$$

$$\nu \frac{\sigma_c}{\sigma_{cul}} + \nu \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{cul} \left(1 - \frac{\nu \sigma_c}{\sigma_{cry}}\right)} + \nu \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{cul} \left(1 - \frac{\nu \sigma_c}{\sigma_{crz}}\right)} \leq 1 \dots\dots\dots (7.13)$$

ここに、 $\nu$  : 6章の安全率

$\sigma_t, \sigma_c$  : それぞれ照査する断面に作用する引張および圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{btly}, \sigma_{btz}$  : 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による曲げ引張応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bcy}, \sigma_{bcz}$  : 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による曲げ圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

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

$\sigma_{cu}$  : 軸方向圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_{cu} = \sigma_{cug} \cdot \sigma_{cul} / \sigma_{cu0}$

$\sigma_{cug}$  : 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

$\sigma_{cul}$  : 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>)

$\sigma_{cry}, \sigma_{crz}$  : それぞれ弱軸および強軸まわりのオイラー座屈荷重応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{cry} = \frac{\pi^2 EI_{yy}}{A_g l^2}$$

$$\sigma_{crz} = \frac{\pi^2 EI_{zz}}{A_g l^2}$$

$E$  : ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$I_{yy}, I_{zz}$  : 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>)

$A_g$  : 照査する断面の総断面積 (cm<sup>2</sup>)

$l$  : 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。

$\sigma_{bugz}$  : 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.

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

これらの他の条文においても, 個々の設計式を応力表示の形に書換えることはさほど困難な作業ではない.

上記の [1], [2] を対比すると, 断面力表示の方が, 式の後ろに続く定義が長くなり, その分条文が長く, 見た目に煩わしくなる傾向があることがわかる. ここに示していない他の条文についてもこれはいえることである. ただ節によって, 条文が長くなる度合いには差がみられる.

これら 2 通りの条文で表現される内容は全く等価であるので, 簡潔さという観点からすれば応力表示にも利点を認めることができよう. それとともに, 本指針の表現 (すなわち [1] の表現) は「応力表示と等価な断面力表示」を示すことに重点があり, 限界状態の表現という意味では必ずしも十分なものになっていない意味もあることに注意が必要である.

たとえば, [1] においては, 終局曲げモーメントの表現を,

$$M_{tu0} = \frac{I_{yy}}{y_t} \sigma_{tu}$$

といった式ひとつを示すことで処理をしているが, 表現をこれだけに留めず, 材料が限界強度 (降伏点) を発現するために必要な条件, あるいは断面二次モーメントの計算法までも条文に含めて書くことも可能である. これはコンクリート標準示方書の, 曲げモーメントと軸方向力を受ける部材の規定において, 断面内のひずみ分布, モデル化された応力ひずみ曲線等を条文に記載していることに対応する. こうした条項を取込んでも, 条文の表わす内容そのものは依然 [2] の応力表示と全く同一ではある. しかし限界状態設計法としての性格づけをより鮮明にするには, 条文の中に説明的部分を増やすことも有効であろう. 実務目的のために簡潔を旨とするか, 教科書的性格を重んじて条文を長くするのがよいか, という判断になるが, 結果的に本指針の条文はこの中間的な性格づけになっているといえるであろう.

断面力表示を採用するという事は, 断面全体, あるいは部材全体としての挙動に注目するという視点をもつことに他ならない. 11 章のプレートガーダーの腹板の規定などは, 腹板自体の限界状態に対応する規定であると同時に, 部材全体という視点からはフランジを 5 章で規定された限界強度まで保たせるといった性格を有するものであるし, また曲げを受ける部材を効率的に設計するという設計思想の産物でもある. これらの視点を条文の中で関連づけていくことも, 限界状態設計法の採用という目的に適合することであろう. 反対に応力表示を採用すると特定の「点」に注目する性格をもつ. 静的な破壊実験をすると, 応力分布は必ずしも平面保持の仮定によって推定する値にならず, 理論値からはずれることが多い. ところが, 耐荷力についてみると, ばらつきはそれ程大きくない. このことを考慮すると静的な破壊に対しては, 応力値で規定するよりも, 断面の終局耐荷力で規定する方が現実に即しているともいえる. 一方, 疲労破壊のように局所的な応力によって破壊が支配されるような限界状態に対しては, 応力による照査が自然である.

本指針の基本的な姿勢として, 設計における選択枝を広げ, かつ選択に際して適切な判断を下しうる資料を提供することがある. ごく薄肉の材料の使用という意味では, 17 章の軽量形鋼構造物も該当するが, この他に, 例えば 7.2.1 節における断面の圧縮耐力の規定において, 局部座屈による板要素の有効幅の減少の考え方を, 限界状態の説明として加えておくことも有効であろう. また, 曲げを受ける部材の条項で, ひずみ分布や応力ひずみ関係を示しておけば, 将来塑性設計的な考え方や, コンパクト断面をひとつの選択枝に加えるような場合, 条文を書きやすいであろう. これは厚肉の板要素の採用に道を開くことにつながる.

本指針では, 断面力表示のできるどころでは, 極力この表示を用いるようにしているが, 必ずしもここに示したものが最善の案とは限らない. たとえば 7.2.5 節は断面全体の挙動というよりは, 断面内の局所的な現象に対する照査という理解の方が一般的であるかもしれない. また, たとえば前に対比を例示した 7.2.3 節においても,

本来の限界状態に忠実に記述しようとするならば、部材としての座屈照査である式 (7.10), (7.12) は断面力表示, 断面内板要素の局部座屈照査である式 (7.11), (7.13) は応力表示となり, その中でもモーメントの拡大係数だけは断面力を用いることになる. 一つの条文内にこうした混在を許すことが合理的な印象を与えるか, かえって見苦しくなるかは判断の難しい問題である.

最後に, 今ひとつ注意すべきと思われる点がある. 構造物の設計においては, 建築骨組等のように, 発生断面力に応じて既製品の部材をカタログ (断面力レベルで耐荷力が記載されている) から選択していく方法と, 橋梁のように発生断面力に応じて部材断面を組立てていく方法とがある. 前者の手法においては, 提供されたカタログのデータベースさえできていれば, 断面力照査が合理的であるのはいうまでもない. 一方, 後者の中で, とりわけ, 薄肉の板要素が用いられ, 座屈制約が設計条件を支配することの多い鋼構造では, しいて断面力照査に変換することの利点は必ずしも大きくはない. 鋼とコンクリートの設計の違いもこうしたことに反映されるのであり, 近年の, 鉄筋コンクリート部材の終局状態の表現に, 断面力表示が適しており, 応力の形ではうまく表わせないことと対照的といえる.

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 1986年10月.
- 2) 西野・佐藤・長谷川: 許容応力度法の内容と問題点, 橋梁と基礎, 第17巻第12号, 第18巻第1号, 1983年12月, 1984年1月.