

軸力と曲げを受ける鋼部材の断面区分

CLASSIFICATION OF CROSS-SECTIONS FOR STEEL MEMBERS IN COMBINED AXIAL COMPRESSION AND BENDING

西村宣男*, 間瀬利明**, 大呑智正**

Nobuo NISHIMURA, Toshiaki MABUCHI and Tomomasa OHNOMI

*工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

**大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

The adoption of the limit state design method to steel structures is planned in Japan. Generally, standard limit state design method has two indexes for structural classifications. One is the classification of member by slenderness ratios, another is classification of section by width-to-thickness ratios of plate elements. This study determines the limiting width-to-thickness ratios for typical plate elements, all edges simply supported plates and one edge free others simply supported plates, in combined axial compression and bending moment by numerical simulation.

Key Words: Limiting width-to-thickness ratios, structural classification, local buckling, ductility

1. まえがき

現在, わが国では, 土木鋼構造物の設計において座屈ないし部材の降伏を限界状態とする許容応力度設計法¹⁾を採用している。しかし, 部材を構成する板要素が厚肉である場合, 構造物は降伏強度よりもかなり大きい荷重まで抵抗できることが分かっており, すでに限界状態設計法を導入している諸外国の設計示方書^{2)~4)}および日本建築学会⁵⁾では, 構造物の塑性強度ないし断面の全塑性強度の利用を可能としている。また, わが国の土木鋼構造物に対しても限界状態設計法の導入が計画されており, 塑性強度の利活用を含んだ, 統一的設計規準の策定が求められている。

各種の鋼構造物を対象とした限界状態設計規準においては, 塑性設計を可能とする厚肉断面部材から, 部材強度に対して局部座屈強度が支配的となる薄肉断面部材までを含んだ, 鋼構造物の包括的な部材強度評価法の確立が必要となってくる。また, 各国の限界状態設計規準では, 部材の長さに関する区分(部材区分)と, 断面構成板要素の幅厚比に関する区分(断面区分)を組み合わせ, 設計に用いる構造解析法と強度の評価式を選択する方法が一般的に採用されている。本研究では, この2つの区分のうち断面区分について検討する。

鋼構造物を対象とした限界状態設計法では, 断面の構成板要素の幅厚比については3つの限界値を設けて, 座屈強度断面, 降伏強度断面, 塑性強度断面および塑性設計適用断面に区分するのが一般的である。それら断面区分の限界を降伏強度限界, 塑性強度限界および塑性設計限界と称する。ほとんどの部材断面は周辺支持板と3辺支持1辺自由板(以下, 自由突出板と称する)の2種類

で構成されるものとし, 純圧縮, 純曲げおよび曲げ圧縮の応力状態について, 断面区分のための限界幅厚比が規定されている。

これまでに, 我が国においては数値解析により, 軸圧縮力と曲げを受ける鋼板の終局強度に関する研究^{6), 7)}が行われている。そこでは局部座屈の評価に重点が置かれており, 幅厚比の限界値については論及されていない。

一方, 現行の設計規準における限界幅厚比の比較検討が, S S R C (構造安定研究評議会) の A World View 2nd Edition⁸⁾の圧縮部材およびはり部材の項目で行われている。しかし, 曲げ圧縮を受ける場合の規定値の分析は不十分である。Bild-Kulak⁹⁾は, 欧米の設計規準における板要素の限界幅厚比規定について詳細な比較を行っているが, 規定間の相違を明らかにしているものの, 実験データや解析データとの照合が行われていないので, 規定の適用性の評価には触れていない。

そこで, 本研究では, 代表的部材断面の構成板要素として周辺支持板と自由突出板を考え, それらが面内曲げ圧縮を受ける場合の耐荷力について, 広範な数値シミュレーションを行う。断面強度は構成板要素間の相互作用の影響を受けるが, 各国の設計規準で規定されているように適用する断面に一般性を与えるため, 実務上の煩雑さを避けるため, 断面強度は構成板要素の強度の和として評価することを前提にしている。また, 強度のレベルはさしあたり平均値強度とし, 塑性設計を可能とする厚肉断面から, 局部座屈強度が支配的となる薄肉断面までを対象とした板要素の幅厚比に応じた断面区分の明確化, さらに, 諸外国の鋼構造設計規準における関連条項との比較を行う。また, 実際の設計規準に反映させるための, 下限値強度に対応した限界値を提案する。

2. 幅厚比パラメータと強度パラメータ

2.1 幅厚比パラメータ

面内曲げ圧縮を受ける周辺単純支持板および自由突出板の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ は次式により定義される。

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2) \sigma_Y}{\pi^2 k E}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 b ：板幅、 E ：弾性係数、 σ_Y ：降伏応力度、 t ：板厚、 k ：座屈係数、 ν ：ポアソン比
座屈係数 k の計算には以下の近似式⁴⁾を適用する。

・周辺単純支持板

$$k = \begin{cases} \frac{8.2}{\psi + 1.05} & \psi > 0 \\ 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 & \psi \leq 0 \end{cases} \dots \dots (2)$$

・自由突出板

$$k = 0.57 - 0.21\psi + 0.07\psi^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 ψ はそれぞれの板要素の両端での縁応力 σ_1 、 σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$ 、圧縮力を正とする)の比 $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ である。

2.2 板要素の強度パラメータ

軸力と曲げを受ける板要素の強度を、無次元表示した作用軸力と作用曲げモーメントを用いて、

$$K = \frac{N}{N_Y} + \frac{M}{M_Y} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 N ：作用軸方向力（圧縮を正とする）、

M ：作用曲げモーメント、 N_Y ：降伏軸力、

M_Y ：降伏モーメント

と表現する。この K を強度パラメータと称する。特に、極限強度値を、次式で表現する。

$$K_U = \frac{N_U}{N_Y} + \frac{M_U}{M_Y} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

N_U ：極限強度時の作用軸方向力（圧縮を正とする）

M_U ：極限強度時の作用曲げモーメント

ここで、無次元表示した作用軸力と作用曲げモーメントの比を、圧縮曲げ比 c として

$$c = \frac{N / N_Y}{M / M_Y} \dots \dots \dots (6)$$

と表すと、降伏強度、塑性強度は以下ようになる。

・降伏強度

$$K_U = \frac{N_U}{N_Y} + \frac{M_U}{M_Y} = 1.0 \dots \dots \dots (7)$$

・塑性強度

$$K_U = \begin{cases} \frac{(c+1)\{\sqrt{9c^2+1}-1\}}{3c^2} & c \neq 0 \\ 1.5 & c = 0 \end{cases} \dots \dots (8)$$

塑性設計の適用可能断面は塑性強度を確保することはも

とより十分な変形能も確保しなければならない。任意の軸力と曲げの組み合わせ状態についても一貫性を保つために、圧縮縁のひずみに着目して、極限強度時における圧縮縁ひずみ ϵ_1 と降伏ひずみ ϵ_Y の比で定義される塑性率が以下の値となる場合¹⁰⁾を塑性設計限界とする。

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_Y} = 3.0 \dots \dots \dots (9)$$

なお、塑性強度限界についてもある程度の変形能を確保するため補助的に以下のような塑性率に関する制限を設けた。

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_Y} = 2.0 \dots \dots \dots (10)$$

2.3 限界幅厚比パラメータ

板要素の限界幅厚比パラメータとしては以下のような限界状態を考える。

・降伏強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_r$

断面強度が降伏強度まで保証される幅厚比パラメータ

・塑性強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_p$

断面強度が塑性強度まで保証される幅厚比パラメータ

・塑性設計限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_{PA}$

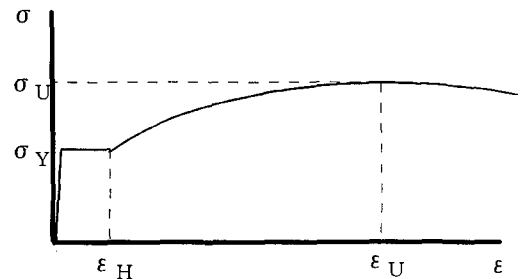
塑性設計が適用できる幅厚比パラメータ

3. 周辺単純支持板

3.1 数値解析モデル

(1) 鋼材特性

解析に使用した鋼材の応力-ひずみ関係は、SS400材の実測データ¹¹⁾に基づいており、図-1に示す材料定数を持つようなひずみ硬化領域まで考慮した関係を用いる。



$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \begin{cases} \frac{\epsilon}{\epsilon_Y} & (\epsilon \leq \epsilon_Y) \\ 1 & (\epsilon_Y \leq \epsilon \leq \epsilon_H) \\ B \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_Y} \right)^n & (\epsilon_H \leq \epsilon) \end{cases}$$

SS400
 $B=0.480, n=0.310$
 $\epsilon_H=0.013, \epsilon_U=0.197$
 $\sigma_U=4100\text{kg/cm}^2$
 $\sigma_Y=2400\text{kg/cm}^2$
 $Y.R=0.585$

図-1 応力-ひずみ関係

(2) 解析モデル

解析モデルは、平均値強度に対応した初期たわみと残留応力を有する周辺支持板で、非載荷辺の面内方向変位は非拘束とする。

各国の設計規準を対象とした予備的調査によると、純曲げに対する限界幅厚比パラメータは0.45-1.1の範囲に、また純圧縮に対する限界幅厚比パラメータは0.5-0.95の範囲にある。従って、解析モデルの幅厚比パラメータ

$\bar{\lambda}_p$ は、下限値を0.4、上限値を1.2とし、この範囲内で適切に幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を変化させる。

(3) 初期不整

板要素の座屈強度の平均値強度として、奈良¹¹⁾は純圧縮、西村¹²⁾は純曲げに関して実測の板たわみと残留応力を用いた数値解析により、それぞれの耐荷力曲線を与えている。

圧縮と曲げを受ける場合に共通の初期不整量を与えるために、残留応力は実測値の平均値として、圧縮残留応力 $\sigma_{rc} = -0.12\sigma_Y$ 、引張残留応力 $\sigma_{rt} = \sigma_Y$ の大きさを有する自己平衡型の矩形分布形状を持つようにモデル化された残留応力を考慮した。図-2に残留応力分布形状を示す。

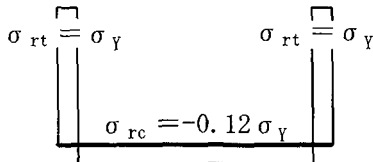


図-2 周辺単純支持板の残留応力分布

最大初期たわみの平均値 δ_p は、座屈実験データベース¹³⁾より $b/520.8$ を用い、予備解析により整合性を確かめた。予備解析は、初期たわみを $b/168.0$ 、 $b/520.8$ 、 $b/1000.0$ と変化させ極限強度を求めた。その結果をターゲットとした平均値強度曲線と比較して図-3に示す。板の初期たわみの最大値 δ_p を $b/520.8$ としたときの解析結果はほぼ平均値曲線と対応している。

初期たわみモードは図-4のように、板幅方向に対して、純圧縮の場合sine半波を、純曲げの場合減衰sine波を与える。圧縮と曲げの組み合わせ状態に対しては、純圧縮と純曲げに対するモードを圧縮曲げ比 c に応じて組み合わせ変化させる。また、軸方向に対しては、sine半波を与える。

(4) 要素分割とアスペクト比

予備的な数値解析を行い、解析モデルの要素の最適分割を検討した。最適要素分割は、引張残留応力の強度に

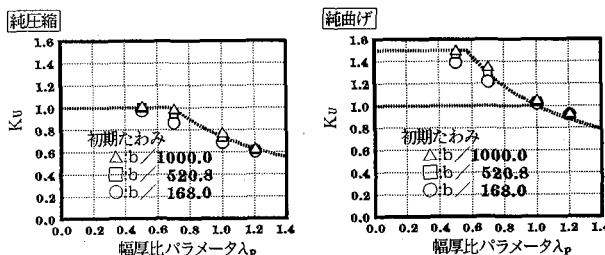


図-3 周辺単純支持板の初期不整と平均値強度曲線

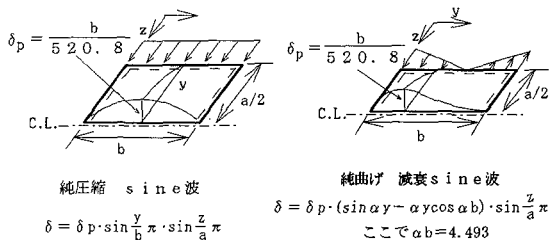


図-4 周辺単純支持板の初期たわみモード

与える影響が著しい、曲げが卓越する場合に支配される。また、曲げと圧縮とでは最小座屈強度を与える板パネルのアスペクト比が異なるので、圧縮曲げ比 c に応じて解析モデルのアスペクト比を0.7~1.0まで変化させる必要がある。図-5に、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p = 1.0$ で、圧縮曲げ比 $c = 0.0$ (純曲げ) のケースについて、板幅方向の要素分割の変化による荷重-圧縮縁ひずみの関係の収束状況を示す。これから、板の両端の引張残留応力が存在する部分にそれぞれ2分割、圧縮残留応力が存在する部分に12分割の合計16分割 ((2-12-2)分割) とした。板幅方向の要素分割数を図-6に示す。

また軸方向の要素分割については、圧縮曲げ比 c によって変化するアスペクト比に関して、純曲げの場合の12分割から純圧縮の場合の16分割まで変化させている。なお解析モデルは対称性を考慮して軸方向はパネルの1/2を対象としている。

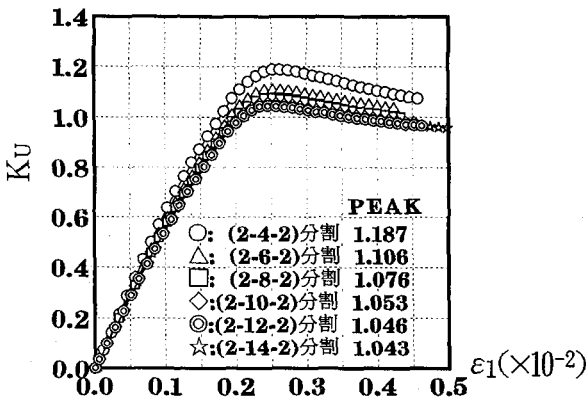


図-5 周辺単純支持板要素分割の予備解析強度-ひずみ関係 (純曲げ, $\bar{\lambda}_p = 1.0$)

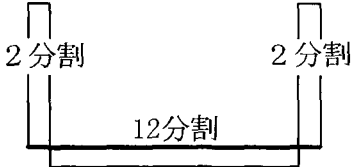


図-6 周辺単純支持板の要素分割数(2-12-2分割)

3.2 解析結果および考察

(1) 幅厚比パラメータと極限強度

降伏強度限界幅厚比パラメータおよび塑性強度限界幅厚比パラメータは、前述のように板要素の極限強度がそれぞれ降伏強度および全塑性強度に到達できる幅厚比で定義される。面内組み合わせ力を受ける板要素の塑性強度は式(8)で与えられるように、純曲げで1.5、圧縮曲げ比 $c = 0.25$ で1.667と最大となり純圧縮で1.0となる。

図-7に圧縮曲げ比 c を6個の一定値0.0、0.2、0.5、1.0、2.0、 ∞ と固定し、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を変化させたときの数値解析による極限強度 K_U と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示す。

降伏強度は、薄い板の座屈強度から厚板の塑性強度への連続的変化の通過点にすぎないので、降伏強度限界は圧縮曲げ比 c を一定としたときの強度曲線と、降伏強度

の交点で比較的明瞭に定めることができる。

これに対して塑性強度は、圧縮曲げ比 c を一定としたときの強度曲線が、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を小さくしたときにある値に収束していく目標値であるため、限界値付近で幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の変化に対して、強度の変化が鈍感になる傾向がある。周辺単純支持板の解析において、降伏強度限界と塑性強度限界を求めるために $K_U - \bar{\lambda}_p$ の関係を以下の式で近似した。

$$K_U = \left(\frac{[\bar{\lambda}_p]_Y}{\bar{\lambda}_p} \right)^\alpha \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 α は定数

ここで、図-8に示すように圧縮曲げ比 $c=0.5$ の場合の強度-ひずみ関係をみると幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p=0.4, 0.5$ の場合の極限強度以降は、ひずみが増加しても強度はあまり低下しておらず、式(10)を満足している。よって、極限強度が近似式より若干低くなる塑性強度限界付近において、塑性強度の5%程度の差を許容範囲として近似した。

(2) 幅厚比パラメータと変形能

図-9では同じく圧縮曲げ比 c を6個の一定値0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, ∞ と固定して、塑性率 ϵ_1/ϵ_Y と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示している。これから、塑性設計限界幅厚比パラメータを決定した。

(3) 限界幅厚比パラメータ

図-7および図-9より定めた各限界幅厚比パラメータ

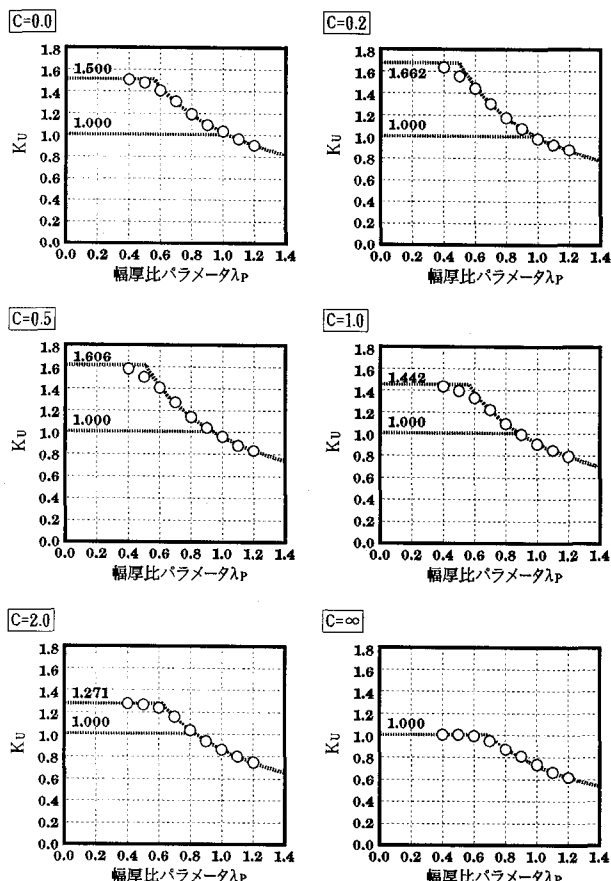


図-7 周辺単純支持板の幅厚比パラメータと極限強度

タの解析値を、図-10のように幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を原点からの距離としてとり、圧縮曲げ比 c の値を傾きにとる極座標上に各限界幅厚比パラメータを示す。降伏強度限界は、純曲げの場合の約1.0から圧縮曲げ比 c の増加とともにほぼ一様に減少して、純圧縮の場合約0.7となる。以上の解析結果から、降伏強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_Y$ を以下のように近似した。

$$[\bar{\lambda}_p]_Y = \frac{1.03 + 0.49c}{1.00 + 0.71c} \dots \dots \dots (12)$$

また塑性強度限界は、圧縮曲げ比 c 0.2~0.5の範囲で、

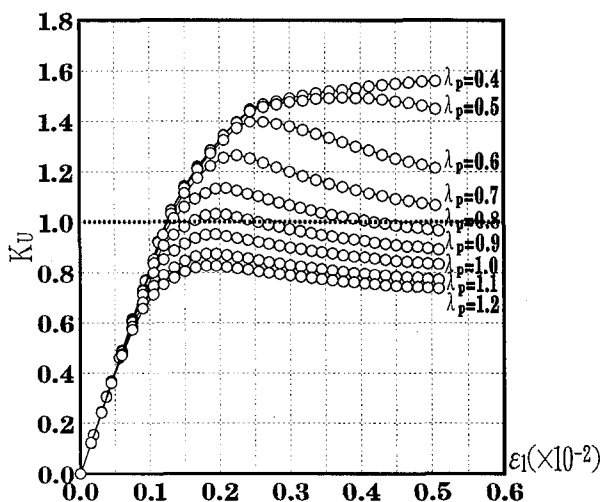


図-8 強度-ひずみ関係 ($c=0.5$)

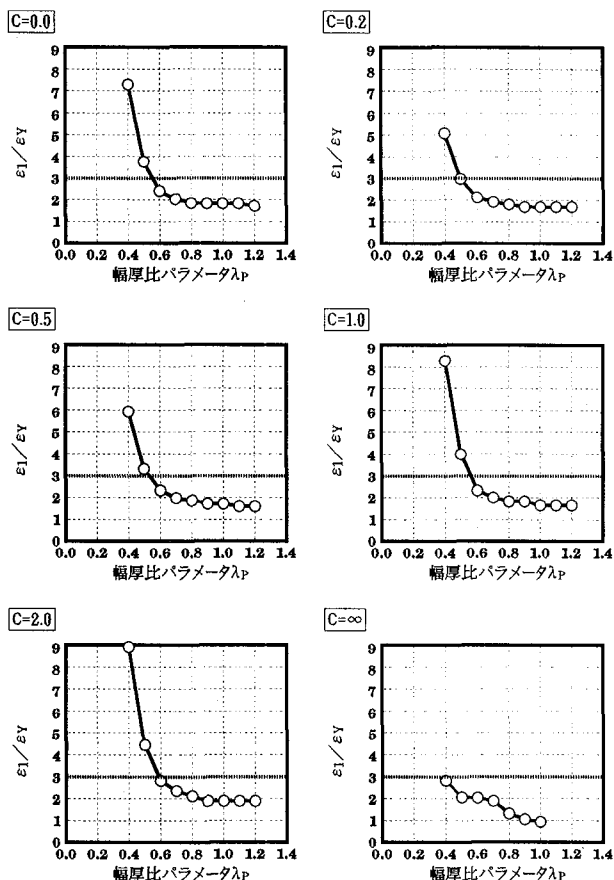


図-9 周辺単純支持板の幅厚比パラメータと塑性率

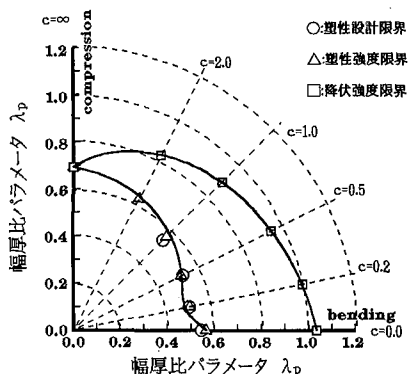


図-10 周辺単純支持板の限界幅厚比パラメータ
塑性強度限界が原点側に縮小する傾向がみられる。これを考慮して塑性強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_P$ を以下のように近似した。

$$[\bar{\lambda}_p]_P = \frac{0.56 - 0.44c + 4.51c^2}{1.00 + 0.47c + 6.54c^2} \dots (13)$$

塑性設計限界は、周辺単純支持板の解析では、純圧縮の場合を除いて塑性強度限界とほぼ一致する。純圧縮で塑性設計を行うことはなく、塑性設計限界 $[\bar{\lambda}_p]_{PA}$ は圧縮曲げ比 $c \leq 1.0$ の条件を設けて、塑性強度限界 $[\bar{\lambda}_p]_P$ と同じ以下の式で与える。

・塑性設計限界

$$[\bar{\lambda}_p]_{PA} = \frac{0.56 - 0.44c + 4.51c^2}{1.00 + 0.47c + 6.54c^2} \dots (14)$$

但し、 $c \leq 1.0$

図-11に、現行の設計規準における、I型断面のウェブの各限界幅厚比パラメータを示す。降伏強度限界については、どの設計規準も同様な傾向を示している。図-10に示す解析結果による降伏限界幅厚比と比較すると、解析結果は設計規準の中でもDINや道路橋示方書とほぼ相似形で同じ限界値を示していることが分かる。塑性強度限界は大きく分けてDIN型とAISC型の2つに分類される。DIN型は、塑性強度限界が降伏強度限界と相似形を示す。それに対して、AISC型の塑性強度限界は、圧縮曲げ比 $c = 0.0 \sim 0.5$ の範囲で、塑性強度限界が原点側に縮小するという傾向を示す。周辺単純

支持板の解析結果による塑性強度限界の傾向は、AISC型に非常に似ている。しかし、純曲げの場合の塑性強度限界の値は一致しておらず、特にAISCの規準値は解析値と比較して大きく設定されている。

4. 自由突出板

4.1 数値解析モデル

(1) 鋼材特性

周辺単純支持板と同様の、SS400材の応力-ひずみ関係を解析に用いる。

(2) 解析モデル

解析モデルは自由辺が圧縮となる面内曲げと軸力を受け、平均値強度に相当する初期たわみと残留応力を有する自由突出板とする。解析モデルの幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ は、周辺単純支持板と同様に、下限値を0.4、上限値を1.2とし、この範囲内で適切に幅厚比 $\bar{\lambda}_p$ を変化させる。

(3) 初期不整

圧縮と曲げを受ける場合に共通の初期不整量を与えるために、残留応力は実測値の平均値として、突出板先端部の引張残留応力 $\sigma_{rr} = 0.259\sigma_Y$ と圧縮残留応力 $\sigma_{rc} = -0.12\sigma_Y$ 、引張残留応力 $\sigma_{rt} = \sigma_Y$ の大きさを有する自己平衡型の矩形分布形状を持つようにモデル化された残留応力を考慮した。図-12に残留応力分布形状を示す。

最大初期たわみの平均値 δ_p は、 $b/108.0$ を用い、予備解析により整合性を確かめた。予備解析は、初期たわみを $b/84.0$ 、 $b/108.0$ 、 $b/295.5$ と変化させ、極限強度を求めた。その結果をターゲットとした平均値強度曲線と比較して図-13に示す。純圧縮の場合には、板の初期たわみの最大値を $b/108.0$ としたときの解析結果はほぼ平均値曲線と対応している。純曲げの場合には、平均値強度曲線が明確でないため、降伏強度と塑性強度の基

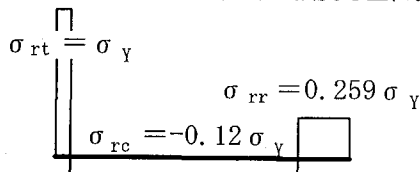
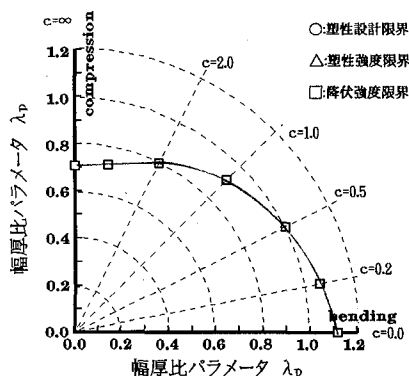
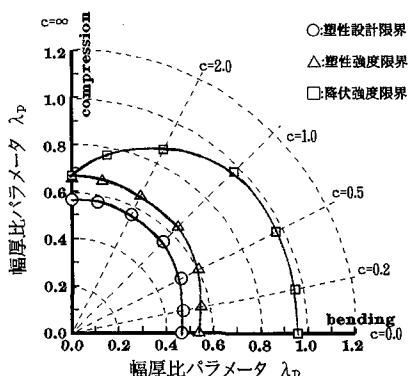


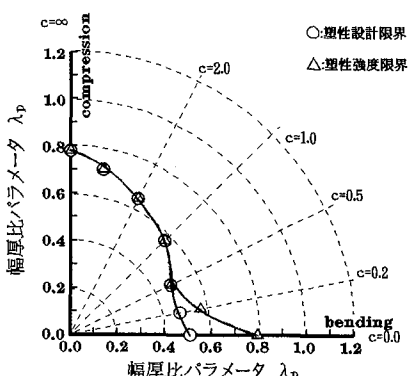
図-12 自由突出板の残留応力分布



(a) 道路橋示方書



(b) DIN



(c) AISC

図-11 各国の設計規準におけるI型断面ウェブの各限界幅厚比パラメータ

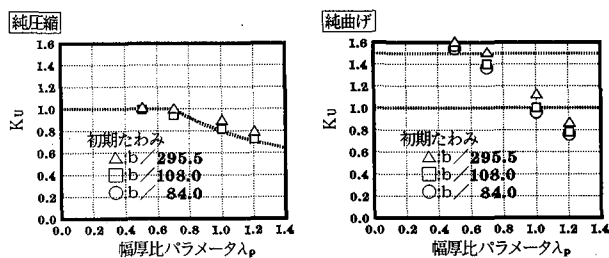


図-13 自由突出板の初期不整と平均値強度曲線

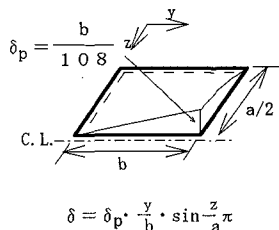


図-14 自由突出板の初期たわみモード

準値を参考として示す。

初期たわみモードは図-14のように、板幅方向に対して直線分布とし、軸方向に対してはsine半波を与える。

(4) 要素分割とアスペクト比

予備的な数値解析を行い、解析モデルの要素の最適分割を検討する。圧縮から曲げにおいては最小座屈強度を与える板パネルのアスペクト比は $6.0^{15)}$ とし、圧縮曲げ比 C によらず一定とする。

図-15に、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p = 1.0$ で、圧縮曲げ比 $C = 0.0$ について、板幅方向の要素分割の変化による荷重-圧縮縁ひずみの関係の収束状況を示す。純曲げの場合は、引張残留応力が存在する部分にそれぞれ2分割、圧縮残留応力が存在する部分に8分割の合計12分割（2-8-2）分割）を、板幅方向にとる必要があることが明らかになった。板幅方向の要素分割数を図-16に示す。

また軸方向の要素分割については、12分割とする。なお解析モデルは対称性を考慮して軸方向はパネルの1/2を対象としている。

4.2 解析結果および考察

(1) 幅厚比パラメータと極限強度

図-17に圧縮曲げ比 C を6個の一定値0.0, 0.2, 0.5,

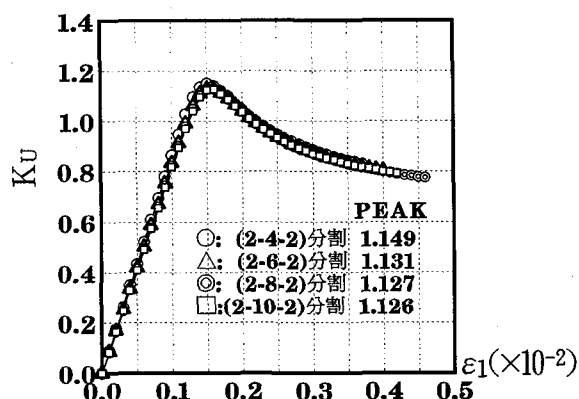


図-15 自由突出板要素分割の予備解析強度-ひずみ関係（純曲げ， $\bar{\lambda}_p = 1.0$ ）

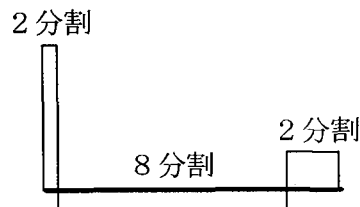


図-16 自由突出板の要素分割数(2-8-2)分割

1.0, 2.0, ∞ と固定し、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を変化させたときの、数値解析による極限強度と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示す。

降伏強度は、周辺単純支持板と同様に、降伏強度限界は強度曲線と降伏強度の交点で、比較的明瞭に定めることができる。また、塑性強度についても周辺単純支持板と同様に、限界値付近で幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の変化に対して強度の変化が鈍感になる傾向がある。

各限界幅厚比パラメータを求めるため、周辺単純支持板と同様に耐荷力曲線を式(11)の形で近似した。ここでも図-18に示すように、圧縮曲げ比 $C = 0.5$ の場合の強度-ひずみ関係をみても、周辺支持板と同様に塑性強度限界付近の近似誤差を塑性強度の5%程度として近似した。

(2) 幅厚比パラメータと変形能

図-19では、同じく圧縮曲げ比 C を6個の一定値0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, ∞ と固定して、塑性率 ϵ_1 / ϵ_T と幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ の関係を示している。これから塑性設計限界幅厚比パラメータを決定した。

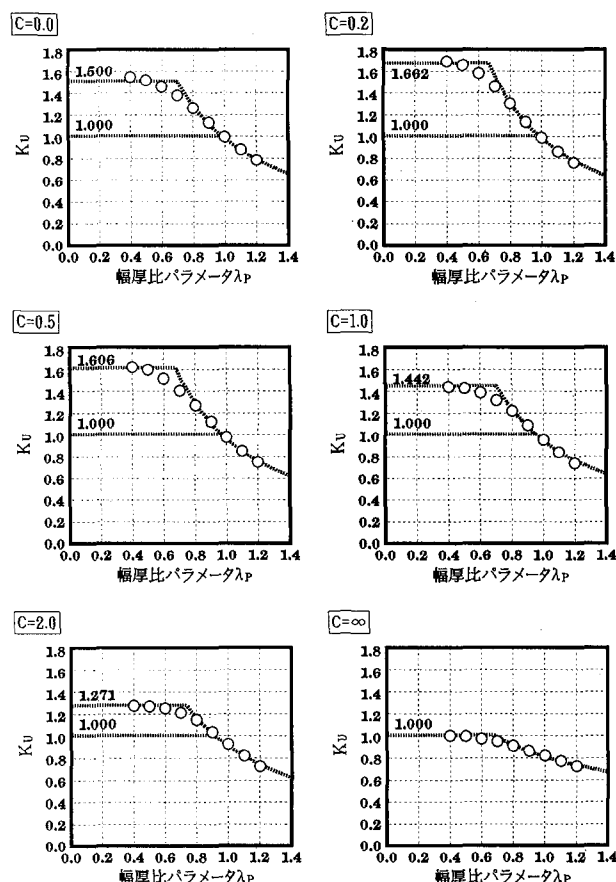


図-17 自由突出板の幅厚比パラメータと極限強度

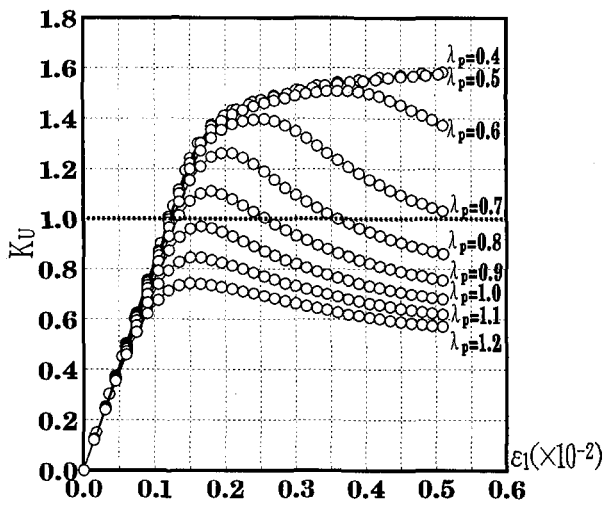


図-18 強度-ひずみ関係 (c = 0.5)

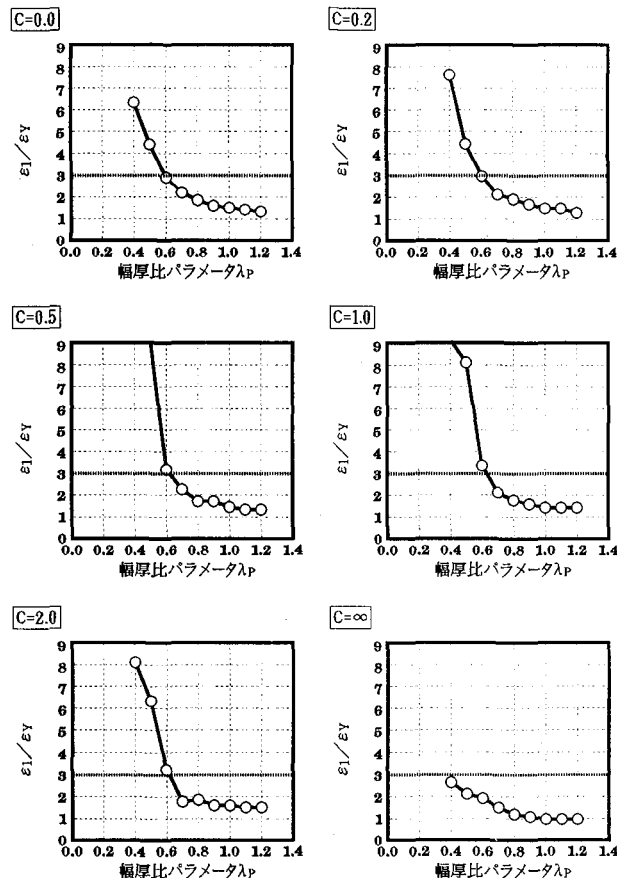


図-19 自由突出板の幅厚比パラメータと塑性率

(3) 限界幅厚比パラメータ

図-17および図-19より定めた各限界幅厚比パラメータの解析値を、周辺単純支持板と同様に極座標上に示すと図-20のようになる。

以上の解析結果より、降伏強度限界 $[\bar{\lambda}_p]_Y$ 、塑性強度限界 $[\bar{\lambda}_p]_P$ 、塑性設計限界 $[\bar{\lambda}_p]_{PA}$ を周辺単純支持板の解析と同様に、以下のように近似した。

- 降伏強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_Y = \frac{0.98 + 0.10c}{1.00 + 0.15c} \dots (15)$$

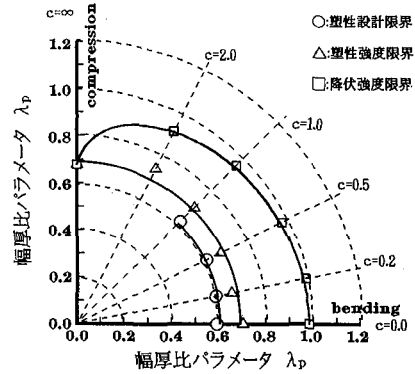


図-20 自由突出板の限界幅厚比パラメータ

- 塑性強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_P = 0.691 \dots (16)$$

- 塑性設計限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_{PA} = 0.602 \quad \text{但し, } c \leq 1.0 \dots (17)$$

降伏強度限界は、周辺単純支持板と同様に圧縮が卓越する部分で限界値が低下する傾向がある。塑性強度限界では、圧縮曲げ比cが0.0-0.5の範囲で、原点側に縮小する傾向があるが、ごく僅かである。

5. 下限値強度に基づく板要素の限界幅厚比

以上では、強度の平均値に対応した限界幅厚比を検討してきたが、実際の設計規準に反映する場合、強度の下限値に対応した限界幅厚比を与えることも必要である。ここでは、SGST Format¹³⁾に準拠して前述の平均値相当の解析によって与えられた極限強度を規定値と見なし、これに抵抗係数φを乗ずることによって、下限値が与えられるものとする。板要素の抵抗係数φとしては、文献16)より、純圧縮の場合に抵抗係数φ=0.847、純曲げの場合に抵抗係数φ=0.915とし、圧縮曲げ比cにより補間して、組合せ状態に対する抵抗係数とする。今までと同様に各限界幅厚比パラメータを求めた。

周辺単純支持板の各限界幅厚比パラメータを以下の式のように近似した。(図-21)

- 降伏強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_Y = \frac{1.02 + 0.53c}{1.00 + 0.84c} \dots (18)$$

- 塑性強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_P = \frac{0.55 + 4.45c^2}{1.00 + 0.73c + 7.80c^2} \dots (19)$$

- 塑性設計限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_{PA} = \frac{0.55 + 4.45c^2}{1.00 + 0.73c + 7.80c^2} \dots (20)$$

但し, $c \leq 1.0$

また、自由突出板の各限界幅厚比パラメータを以下の式のように近似した。(図-22)

- 降伏強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_Y = \frac{0.98 + 0.11c}{1.00 + 0.19c} \dots (21)$$

- ・塑性強度限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_P = \frac{0.70 + 0.19c}{1.00 + 0.34c} \dots\dots\dots (22)$$

- ・塑性設計限界幅厚比パラメータ

$$[\bar{\lambda}_p]_{PA} = 0.602 \quad \text{但し, } c \leq 1.0 \dots\dots\dots (23)$$

6. 結論

以上、本文では、鋼部材断面の代表的構成板要素である、軸力と曲げを受ける周辺単純支持板と自由突出板の各限界幅厚比パラメータを明らかにし、考察を加えた。

本研究において得られた結論を列挙すれば次の通りである。

- (1) 周辺単純支持板と自由突出板の降伏強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_Y$ 、塑性強度限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_P$ 、塑性設計限界幅厚比パラメータ $[\bar{\lambda}_p]_{PA}$ を圧縮曲げ比 c の関数で提案した。
- (2) 提案式を各国の設計規準と比較し、降伏強度限界はDINと、塑性強度限界、塑性設計限界はAISCと類似していることを明らかにした。
- (3) 抵抗係数を用いて強度の下限值に対応した各限界幅厚比パラメータを明らかにした。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990. 2
- 2) ISO/TC 167/SC 1, Steel structures, materials and design (N236E). Draft, International Standards Organization, Oslo Norway, April 1990.
- 3) AISC, Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, September 1986.
- 4) DIN 18800 Teil 1, Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institute für Normung, Berlin, Germany, November 1990.
- 5) 日本建築学会：限界状態設計基準（案），1990
- 6) 奈良 敬，小島治雄，津田 真，小松定夫：面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究，土木学会論文集，No. 386，1987，pp. 275-283
- 7) 奈良 敬，津田 真，福本嘯士：面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度の評価法に関する研究，土木学会論文集，No. 392，1988，pp. 259-264
- 8) SSRC：A World View 2nd edition, Stability of Metal Structures, 1989.
- 9) Bild, S. and Kulak, G. L.: Local buckling rules for structural

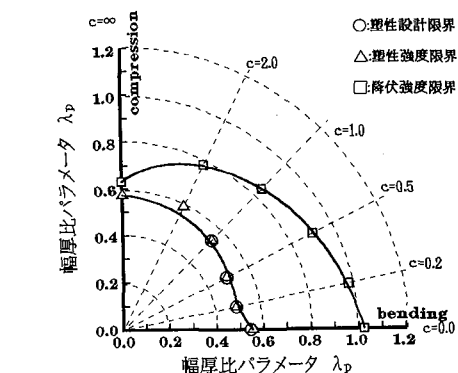


図-21 周辺単純支持板の限界幅厚比パラメータ

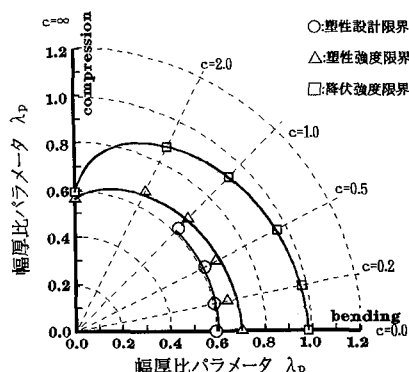


図-22 自由突出板の限界幅厚比パラメータ

steel members, J. Construct. Steel Research, 20, 1991, pp.1-52.

- 10) 福本嘯士(研究代表者)：動的荷重を受ける鋼構造物の繰返し座屈安定に関する総合的研究，文部省科学研究費総合研究A，研究成果報告書，1992. 3.
- 11) 奈良 敬：面内力を受ける鋼板および補剛板の極限強度に関する研究，大阪大学学位論文，1986. 12.
- 12) 福本嘯士(研究代表者)：鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究，文部省科学研究費総合研究A，研究成果報告書，1990. 3.
- 13) 小松定夫他：鋼橋部材の形状初期不整と耐荷力の統計学的研究，日本鋼構造協会誌 Vol. 16, No. 179, 1980.
- 14) 東海鋼構造研究グループ(代表 福本嘯士)：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用，橋梁と基礎，第14巻，第11号/12号，1980.
- 15) 北田俊行：圧縮力を受ける鋼板及び補剛鋼板の極限強度に関する研究，大阪大学学位論文，1980. 9.
- 16) 奈良 敬，下野直己，森脇良一：面内曲げ圧縮を受ける鋼板の極限強度の統計学的評価法，構造工学論文集，Vol. 40A, 1994. 3. pp. 309-316

(1994年9月14日受付)