

薄板集成短柱の強度推定法

STRENGTH PREDICTION OF THIN-WALLED PLATE ASSEMBLIES

宇佐美 勉*, 葛 漢 彬**

Tsutomu USAMI and Hanbin GE

*D.Sc. 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

**工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

The present study is aimed at verifying the effective width method for predicting the ultimate strength of thin-walled plate assemblies in compression. In the effective width concept, it is assumed that the ultimate compression strength of a section or a stub-column can be predicted by an algebraic sum of the compressive strengths of individual plate elements. Thus, for a plate assembled section, its approximate ultimate strength can easily be obtained if the strength formulas for the isolated plate components are available. To this end, a set of strength formulas for outstanding plates are derived as a function of both magnitudes of the initial out-of-flatness and residual stress based on numerical results of an extensive elasto-plastic large displacement analysis. The proposed formulas are then used, along with the strength formulas for simply supported plates, to predict the ultimate compressive strength of the members of box, polygonal and H-shape sections. Comparisons of the predicted ultimate strengths using the effective width method and analytical results as well as test results have shown that the present method is very simple and accurate in predicting the ultimate strength of the thin-walled plate assemblies.

Key Words : Compression, Effective width, Initial out-of-flatness, Residual stress, Ultimate strength, Thin-walled, Elasto-plastic analysis

1. 緒言

薄板集成短柱の圧縮強度（局部座屈強度）は、圧縮部材の局部座屈と全体座屈の連成座屈強度を求める際に重要となる¹⁾。

これまでに提案されている局部座屈強度の推定方法は、次の3つに大別されよう²⁾：

- (1) 有効幅の概念に基づいて各構成板要素の強度の和から算定する方法³⁾。
- (2) 板要素間の連成効果を考慮して求めた断面としての等価幅厚比を用いて強度評価式から算定する方法^{4)~6)}。
- (3) 各構成板要素の幅厚比の相乗平均により求めた断面の等価幅厚比を用いて強度評価式から算定する方法²⁾。

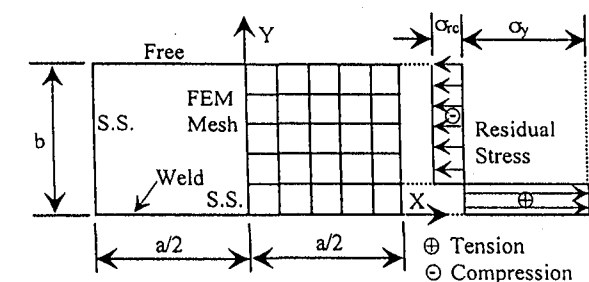
上記の方法の相互比較は次のようになる：

- ① (1)は各構成板要素単独の強度さえ判ればよい。しかし、(2)および(3)は、短柱の局部座屈強度評価式を導くために、短柱の強度が既知である必要がある。
- ② (2)は断面形状ごとに異なる、板要素間の連成を考慮した座屈係数をあらかじめ求めておく必要があり、また、その算定式がかなり複雑になる。
- ③ (3)は②のようなことはないが、構成板要素が3枚以上の時は等価幅厚比をどのように求めるのか不明である。

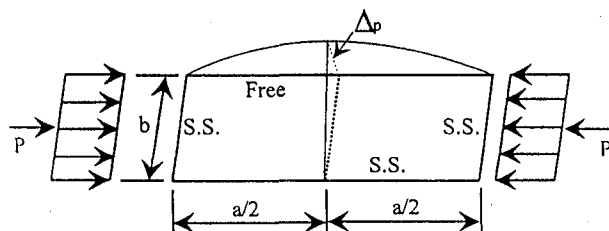
以上のことを総合すると、(1)の方法が最も簡便のように思われる。

(1)の有効幅に基づく方法（以下、有効断面法²⁾と呼ぶ）の妥当性については、実験から求められた単独板要素の強度式を用いて推定した短柱強度を、短柱の実験強度と比較した文献¹⁾と²⁾、数値計算から求められた単独板要素の強度式を用いて推定した短柱強度を、やはり数値計算から求められた短柱強度と比較した文献³⁾がある。これらにより、有効断面法の有効性が実証されたと思われたが、最近、有効断面法の適用に批判的と思われる論文⁷⁾が発表されているので、この方法の有効性を主張するために、若干の数値計算を文献³⁾の結果に追加し論文を発表する次第である。文献⁷⁾では、著者が実験結果から求めた単独板要素の強度式を用いて推定した短柱強度を、数値計算（最大初期たわみは板幅の1/150で圧縮残留応力は降伏応力の30%）から求められた短柱強度と比較した結果、有効断面法の精度は良くなく、上記(2)の方法の方が精度が良いと主張している。しかしながら、実験から求められた強度式は平均値曲線であり、数値計算での強度は下界値相当（初期不整がかなり大きい）であるので有効断面法の精度が良くなかったものと思われる。

この論文では、構成板要素（単純支持板、片持板）の強度推定式を初期不整の関数として数値計算によりあ



(a) FEM Mesh and Residual Stress Pattern



S.S. : Simply supported
(b) Initial Out-of-flatness

Fig. 1 Outstanding Plate

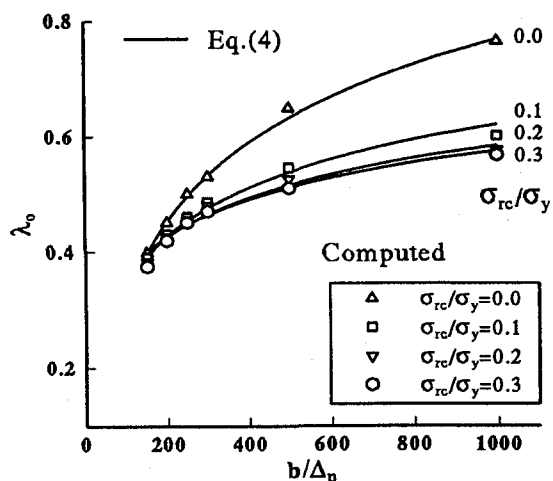
Table 1 Input Data for Numerical Analysis

Parameter	Values
E (GPa)	205
σ_y (MPa)	313
ν	0.3
t (mm)	10
$\alpha=a/b$	2.0
λ	0.315, 0.500, 0.630, 0.788, 0.945, 1.260
σ_{rc}/σ_y	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Δ_p/b	1/50, 1/75, 1/100, 1/150, 1/250

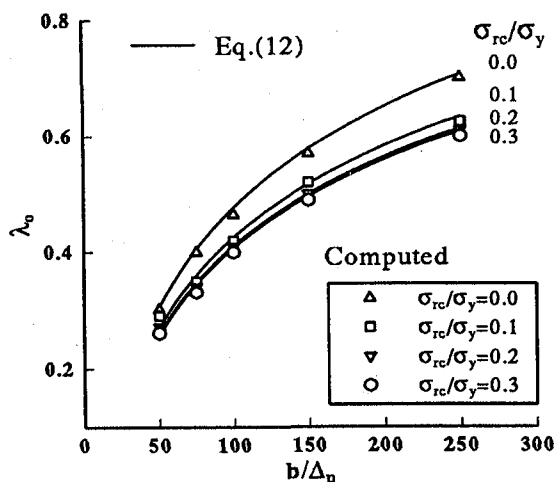
あらかじめ求めておき、特定の初期不平整を元に求められた板要素の強度の和と、同一の初期不平整を与え数値計算より求めた短柱の強度と比較することにより、有効断面法の妥当性を数値計算の面からまず実証する。ついで、平均値強度を与えると考えられる初期不平整を与えて求められた板要素の強度の和と実験値を比較することにより、実験的な面から有効断面法の有効性を実証する。断面形としては正方形、長方形と多角形箱形断面およびH形断面を考える。なお、この論文は、短柱の強度を構成板要素の強度式から求めるところが文献3)とは異なる。文献3)では板要素の強度式は与えられていない。

2. 初期不平整の関数で表した板要素の強度推定式

両縁支持板（単純支持板）および片持板の圧縮強度を初期不平整としての残留応力および初期たわみの関数



(a) Simply-supported Plates



(b) Outstanding Plates

Fig. 2 Plate Slenderness Parameter λ_0 for $\sigma_m/\sigma_y=1.0$

として表すことを考える。

2.1 両縁支持板

箱形断面の構成板要素、H形断面のウェブは両縁支持板と考える。圧縮残留応力 σ_{rc} 、最大初期たわみ Δ_p および幅厚比パラメータ λ の関数で表した両縁支持板の強度推定式は既に文献8)に求められている。残留応力分布は、両非載荷縁溶接によって生ずると考えられる矩形分布、初期たわみモードは、板の幅、長さ方向に半波の正弦曲線を仮定し、板のアスペクト比は0.5としている。なお、幅厚比パラメータは、次式で定義される。

$$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

ここで、 b = 板幅、 t = 板厚、 ν = ポアソン比、 k = 座屈係数で4.0を用いた。得られた具体的な式の形は以下になる。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1}{2\lambda} [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda}] \quad (2)$$

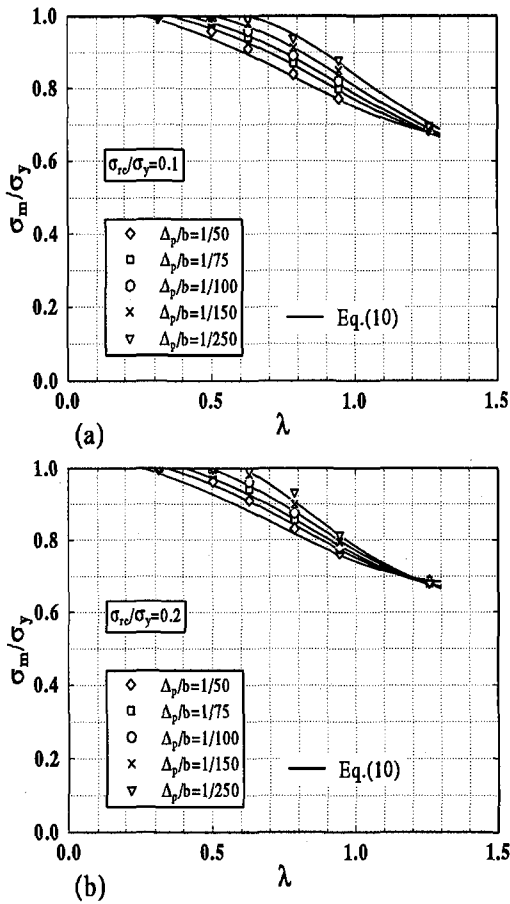


Fig. 3 Comparison of Proposed Strength Formula and Computed Results

ここに

$$\beta = 1 + C \cdot (\lambda - \lambda_o) + \lambda \quad (3)$$

$$\lambda_o = A - B \cdot \ln\left(\frac{\Delta_p}{b}\right) \leq 1.0 \quad (4)$$

$$A = -0.05 - 0.542 \cdot \exp\left(-11.9 \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) \quad (5)$$

$$B = 0.09 + 0.107 \cdot \exp\left(-12.4 \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) \quad (6)$$

$$C = -157\left(\frac{\Delta_p}{b}\right)\left(\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) + 43\left(\frac{\Delta_p}{b}\right) + 1.2\left(\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) + 0.03 \quad (7)$$

式(3)での λ_o は、全断面降伏に達するときの幅厚比パラメータであり、初期不整量との関係を後述する片持板のそれとともにFig. 3に示す。式(2)の適用範囲は以下のようである。

$$0 \leq \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} \leq 0.5, \quad \frac{1}{3233} \leq \frac{\Delta_p}{b} \leq \frac{1}{150} \quad (8)$$

2.2 片持板

H形断面のフランジは片持板と考える。これについてはまだ公式がないので、数値計算から求めることにする。

解析モデルはFig. 1(a)に示すようなものであり、仮定した初期たわみモードは次式で与えられる。

$$\Delta = \Delta_p \cdot \cos\left(\frac{X}{a}\pi\right) \cdot \frac{Y}{b} \quad (9)$$

ここで、 Δ_p = 最大初期たわみ、 a = 板の長さ、 b = 板の幅で、 X 、 Y は図に示す座標である。残留応力分布は、Fig. 1(b)に示す矩形分布を用いた。この分布は $Y = 0$ の辺に沿っての溶接によって生じた残留応力分布をモデル化したものである。引張残留応力は降伏応力 σ_y と考える。なお、この残留応力分布は、自己つり合い条件の1つである、板に直角な軸(Z 軸)回りのモーメントが零の条件を満足しない。この影響については後述する。アスペクト比 a/b は小松・北田の解析結果⁹⁾に従い強度がほぼ最低になるように2.0を用いた。解析は8節点の離散キルヒホッフ・シェル要素を用いて汎用プログラムMARC¹⁰⁾によって行った。载荷は、载荷辺の幅方向に一定の面内変位を与える変位増分法によった。

数値計算に際しての入力データをTable 1に示す。これらの条件で計算した180ケースの結果から、回帰分析によって得られた推定式は以下のようである。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1}{2\lambda} [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda}] + 2.5\lambda(\beta - \lambda - 1)^2 \quad (10)$$

ここに

$$\beta = 1 + C \cdot (\lambda - \lambda_o) + \lambda \quad (11)$$

$$\lambda_o = A - B \cdot \ln\left(\frac{\Delta_p}{b}\right) \leq 1.0 \quad (12)$$

λ は片持板の幅厚比パラメータ(式(1)で座屈係数 k を0.425とおいた式)である。常数 A 、 B および C は、両縁支持板の場合と同様に残留応力と初期たわみの関数で以下のように表される。

$$A = -0.603 - 0.071 \cdot \exp\left(-13.6 \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) \quad (13)$$

$$B = 0.219 + 0.031 \cdot \exp\left(-13.2 \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}\right) \quad (14)$$

$$C = C_1 - C_2 \cdot \exp(-C_3 \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}) \quad (15)$$

ただし

$$C_1 = 0.276 - 4.71 \frac{\Delta_p}{b} \quad (16)$$

$$C_2 = 0.278 - 9.18 \frac{\Delta_p}{b} \quad (17)$$

$$C_3 = 3.55 - 211 \frac{\Delta_p}{b} \quad (18)$$

上式の適用範囲は、

$$0 \leq \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} \leq 0.5, \quad \frac{1}{809} \leq \frac{\Delta_p}{b} \leq \frac{1}{50} \quad (19)$$

である。

片持板の強度推定式(10)は、両縁支持板の強度推定式(2)に右边第2項を加えた形になっている。両縁支持板と同様に $\lambda = \lambda_o$ で $\sigma_m/\sigma_y = 1.0$ となり全断面降伏が期待できる。すなわち、 λ_o は限界幅厚比と呼ばれる量に一致する。この量を、両縁支持板、片持板につい

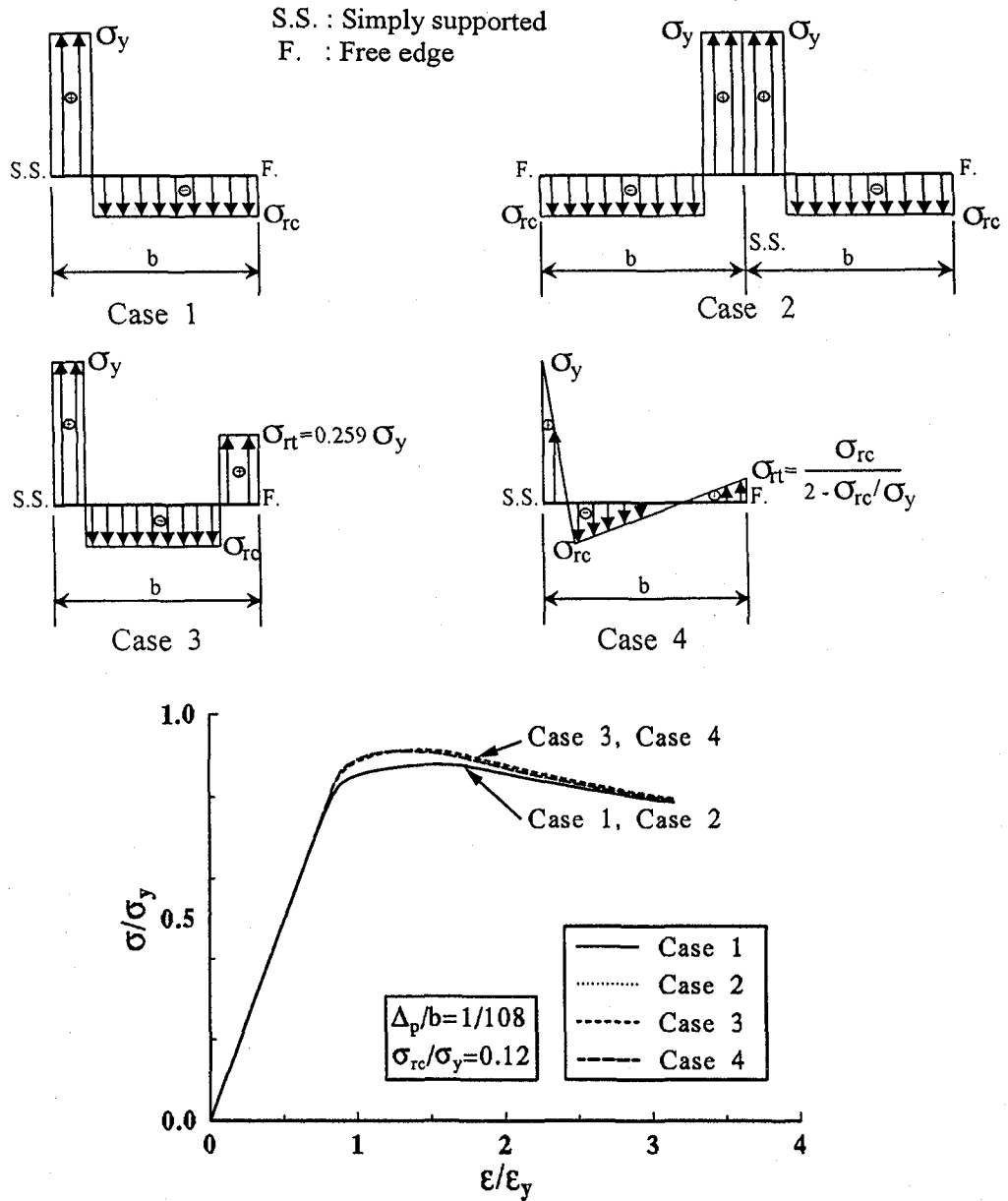


Fig. 4 Residual Stress Patterns and their Effect

て計算したものが Fig. 2 である。この図からわかるように、単純支持板と片持板の限界幅厚比は、全般的に残留応力が大きくなるほど小さくなる傾向が見られるが、残留応力が $\sigma_{rc}/\sigma_y \geq 0.1$ であれば、限界幅厚比の変動幅は非常に小さい。すなわち、残留応力に関しては、 $\sigma_{rc}/\sigma_y \geq 0.1$ のある値を用いて計算すれば、得られた限界幅厚比の値は残留応力を考慮した場合の一般的なものと考えてもよい。

式 (10) の適合性を見るために、残留応力が降伏応力の 0.1 倍と 0.2 倍で種々の初期たわみを与えた場合について数値計算結果と推定式を比較したものが Fig. 3 である。初期不整の値が上記と異なる場合でも同様な結果が得られている。この図より、推定式は妥当な

ものと考えられる。

前述のように、本解析に用いた残留応力分布は、自己つり合い条件の 1 つを満足しない。この影響を調べるため、Fig. 4 に示すような 4 つの残留応力パターンを用いた解析を行った。初期不整は、 $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.12$ および $\Delta_p/b = 1/108$ とした。Case 1 の分布は、本研究に用いられたものである。他のケースの残留応力分布は、自己つり合い条件の全てを満足している。Case 2 は、板の幅を $2b$ とし、Case 1 を 2 枚連ねたものである。ただし、単純支持条件は板中央において与えられる。一方、Case 3 は、文献 11) で用いられたパターンであり、自由端での引張残留応力は $\sigma_{rt}/\sigma_y = 0.259$ である。また、Case 4 は、文献 3) で補剛材の残留応力を

表すため用いられているが、基本的に Case 3 のと同じものである。この場合、自由端での引張残留応力は自己つり合い条件より $\sigma_{rt} = \sigma_{rc}/(2 - \sigma_{rc}/\sigma_y)$ となる。

Fig. 4 に、以上 4 つの残留応力パターンを用いて行った解析から得られた平均応力ー平均ひずみ関係を示す。Case 1 および Case 2 の解析結果は、ほとんど一致して曲線の区別が出来ない。すなわち、残留応力分布は、軸力に関する自己つり合い条件さえ満足しておれば局部座屈強度に大きな差を生じない。また、Case 3 と Case 4 も、ほぼ同じな結果が得られている。すなわち、解析結果は 2 種類に分かれ、自由端の引張残留応力を考えていない Case 1 または Case 2 のときの極限強度は、自由端の引張残留応力を考えている Case 3 または Case 4 のそれより、約 4% 低いことがわかる。したがって、ガス切断の場合は、自由端付近にはある程度の引張残留応力が存在し、局部座屈強度が多少高くなるが、安全側の見地より、Case 1 に示すような分布形と仮定しても良いと考えられる。

3. 薄板集成短柱の強度

有効断面法の妥当性は弾塑性有限変位解析により解析した短柱の強度との比較により文献 3) で示されている。この方法では、集成薄板短柱の強度 P_u は、各板要素の強度 P_{ui} の和で与えられるとしている (Fig. 5 参照)。すなわち、

$$P_u = \sum P_{ui} \tag{20}$$

ここで、 Σ は全板要素の和を意味する。板要素の強度 P_{ui} は式 (2) または (10) の σ_m にその板要素の断面積を乗じて求められる。

この節では、上記の方法で求めた圧縮強度を種々の断面について弾塑性有限変位解析によって得られた結果および既存の実験結果と比較する。

3.1 推定強度と解析結果との比較

まず、有効断面法による推定強度を文献 3) での箱形および H 形断面短柱に対する弾塑性有限変位解析による強度と比較する。解析には、初期たわみは、単純支持板の場合 $\Delta_p/b = 1/200$ 、片持板の場合 $\Delta_p/b = 1/100$ を用いている。残留応力は共に $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.3$ を仮定した。上述の初期不整値を用いて、式 (2) または (10) より計算した種々の単純支持板と片持板の強度を Table 2 に示す。そして、これらの板要素からなる種々の箱形および H 形断面短柱の推定強度を式 (20) より求め、種々の断面についての解析結果とともに Table 3 に示す。また、Fig. 6 は、全断面降伏荷重 P_y で無次元化した推定強度 $(P_u/P_y)_{PRE}$ を解析結果 $(P_u/P_y)_{ANA}$ と比較したものである。Table 3 と Fig. 6 からわかるように、有効断面法により推定した強度は、2 つの短柱を除いて推定強度と解析結果との差は 10% 以内に収まって

Table 2 Predicted Strengths of Isolated Plates

Plate Type	Plate Number	b/t	λ	σ_m/σ_y
S.S. Plate	P-80-S	80	1.642	0.415
	P-60-S	60	1.231	0.535
	P-40-S	40	0.821	0.732
	P-30-S	30	0.616	0.868
	P-20-S	20	0.410	1.000
	P-10-S	10	0.205	1.000
S.F. Plate	P-20-F	20	1.260	0.682
	P-10-F	10	0.630	0.945
	P-5-F	5	0.315	1.000

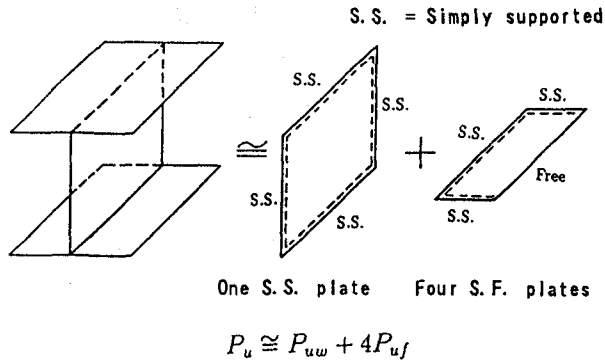


Fig. 5 Concept of Effective Width Method

おり、両者は良く一致していると言える。柱 B-80-0.25 および H-80-4.0 は有効断面法による推定強度が解析結果より 10% 以上低い。この 2 つの断面の構成板要素を調べてみると、いずれの場合も単純支持板要素 P-80-S があり、その幅厚比パラメータが 1.642 とかなり大きい (Table 2 参照)。単純支持板と片持板の強度推定式は、幅厚比パラメータ λ が約 1.2 までの解析データを元に提案したものであるが、これ以上の幅厚比の板パネルに対しては、安全側の強度を与えることが推察される。しかし、このような薄い板要素を使用することは希であること、および安全側の推定値を与えることで、提案する方法を実際の設計に使用することは適切であろうと思われる。

3.2 推定強度と実験結果との比較

次に、上記の方法で求めた圧縮強度 $(P_u/P_y)_{PRE}$ を実験値 $(P_u/P_y)_{EXP}$ と比較する。短柱の断面形としては、正方形、長方形と多角形箱形および H 形を考える。用いた実験データは、文献 1), 4), 12)~31) によるものである。短柱の推定強度を求める際に板要素の初期不整は、平均的な強度を与えるために、単純支持板について $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.115$ と $\Delta_p/b = 1/425$ 、片持板について $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.1$ と $\Delta_p/b = 1/250$ を仮定している。得られた正方形箱形断面柱、長方形箱形断面柱、多角形箱形断面柱および H 形断面柱の極限強度を実験結果とともに Fig. 7 の (a), (b), (c) および (d) に示す。図からわかるように、いずれの断面の場合も式 (20) から

Table 3 Comparison of Predicted Strengths and Nemrical Results ³⁾

Column Type	Column Number	Component Plates		d/b	Ultimate Strength σ_m/σ_y	
		Flange	Web		Analysis of Whole Section	Prediction (error)
Rectangular Section	B-40-0.75	P-30-S	P-40-S	0.75	0.794	0.790 (-0.5%)
	B-40-0.50	P-20-S	P-40-S	0.50	0.830	0.821 (-1.1%)
	B-40-0.25	P-10-S	P-40-S	0.25	0.829	0.786 (-5.2%)
	B-80-0.75	P-60-S	P-80-S	0.75	0.501	0.466 (-7.0%)
	B-80-0.50	P-40-S	P-80-S	0.50	0.578	0.521 (-9.9%)
H-shape Section	B-80-0.25	P-20-S	P-80-S	0.25	0.596	0.532 (-10.7%)
	H-40-4.0	P-10-F	P-40-S	4.0	0.801	0.840 (4.8%)
	H-40-8.0	P-5-F	P-40-S	8.0	0.800	0.822 (2.7%)
	H-80-4.0	P-20-F	P-80-S	4.0	0.618	0.549 (-11.2%)
	H-80-8.0	P-10-F	P-80-S	8.0	0.605	0.592 (-2.1%)

Note: error = (Prediction - Analysis)/Analysis

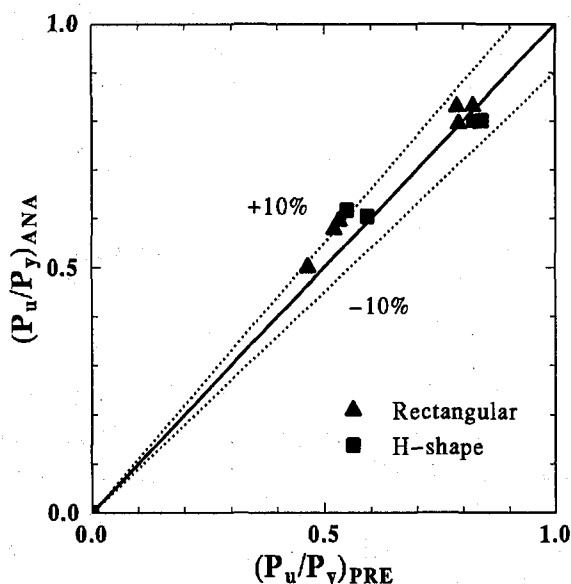


Fig. 6 Comparison of Predicted Ultimate Strengths and Analytical Results

求められた推定強度は実験値と良く一致している。したがって、有効断面法より、種々の断面の短柱の局部座屈強度を精度よく推定できると考えられる。

4. 結論

本研究により得られた結果を要約すると以下のようになる。

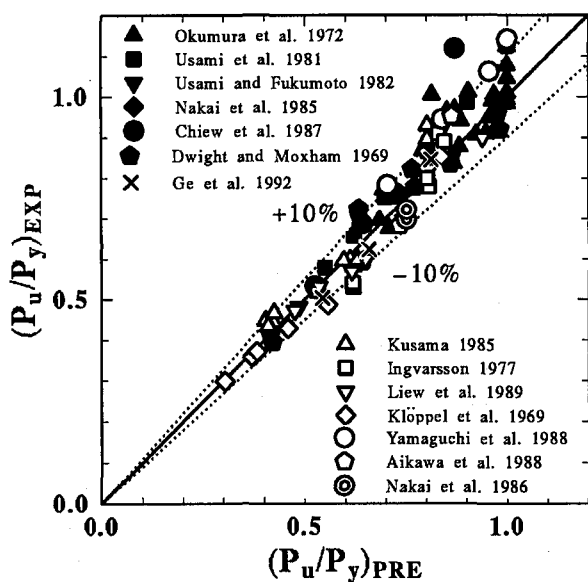
1. 片持板の強度推定式を、文献8)で示された単純支持板の強度推定式と同様に残留応力と初期たわみの関数として求めた。
2. 本論文で提案した有効幅概念に基づく有効断面法では、まず、構成板要素の強度を、与えられた初期不整について強度推定式(2)または(10)より求める。そして、断面強度は、各構成板要素の強度の和として得られる。

3. 有効断面法を用いて推定した長方形およびH形断面短柱の強度を、弾塑性有限変位解析結果と比較した。また、既往の実験データを用い、正方形、長方形、多角形箱形断面およびH形断面について有効断面法による推定強度を実験結果との比較を行った。その結果、推定強度は解析結果および実験結果と良く一致していることがわかった。

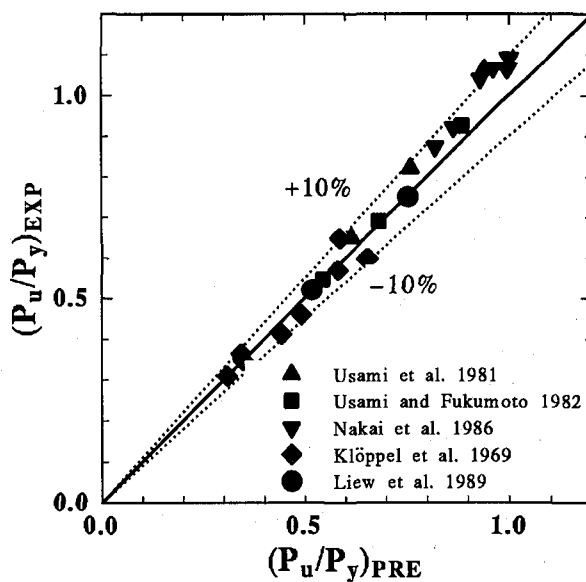
4. したがって、有効断面法は、これまで提案されている方法の中で最も簡便かつ精度の良い方法であることが数値解析および実験の両面から実証できた。

参考文献

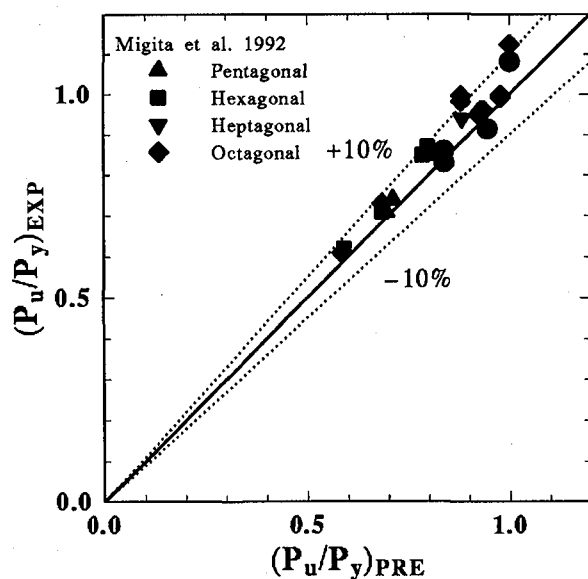
- 1) 宇佐美勉、福本秀士：鋼圧縮部材の連成座屈強度実験と有効幅理論による解析、土木学会論文報告集、No.326, pp.41-50, 1982.
- 2) 久保全弘、小川春由樹：薄肉鋼柱の極限強度の簡単な評価法、構造工学論文集、Vol.37A, pp.83-91, 1991.
- 3) Usami, T., Wada, M., Kato, M., and GE, H. B.: Ultimate Compressive Strength of Plate Assemblies, Proc. of International Conference on Steel and Aluminium Structures, Singapore, pp.471-480, 1991.
- 4) 山尾敏孝、崎元達郎：薄肉H形鋼柱の連成座屈に関する実験的研究、土木学会論文集、No.380/I-7, pp.380-390, 1987.
- 5) 西村宣男、吉田信博：鋼H形断面柱部材の連成座屈特性と設計公式、土木学会論文集、No.398/I-10, pp.311-318, 1988.
- 6) 西村宣男、吉田信博、竹内正一：局部座屈を考慮した鋼箱形断面はり一柱部材の強度評価式、土木学会論文集、No.416/I-13, pp.385-393, 1990.
- 7) 山尾敏孝、崎元達郎：鋼材特性を考慮した薄肉鋼H形短柱の耐荷力と終局強度について、構造工学論文集、Vol.40A, pp.355-364, 1994.
- 8) 宇佐美勉、天雲宏樹：圧縮と曲げを受ける板要素の極限強度と有効幅公式、土木学会論文集、No.441/I-187, pp.77-85, 1992.
- 9) 小松定夫、北田俊行：初期不整を含む自由突出圧縮鋼板の極限強度特性について、土木学会論文報告集、No.314, pp.15-28, 1981.
- 10) 日本マーク株式会社：MARC プログラム/ユーザ・マニュアル、A編～E編、1990.
- 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、学位論文、1986.
- 12) 奥村敏恵、西野文雄、長谷川彰夫：箱形断面柱の局部座屈、土木学会論文報告集、No.205, pp.19-30, 1972.
- 13) 宇佐美勉、福本秀士、青木徹彦：溶接箱形断面柱の局



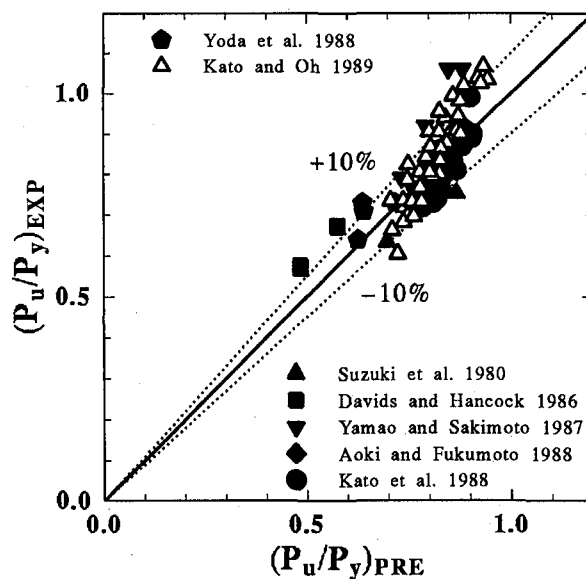
(a) Square Sections



(b) Rectangular Sections



(c) Polygonal Sections



(d) H-shape Sections

Fig. 7 Comparison of Predicted Ultimate Strengths and Test Results

- 部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.308, pp.47-58, 1981.
- 14) 中井 博, 北田俊行, 酒造敏廣: 圧縮を受ける薄肉箱形短柱の終局強度特性と終局強度算定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.65-77, 1985.
 - 15) Chiew, S. P., Lee, S. L., and Shanmugam, N. E.: Experimental Study of Thin-Walled Steel Box Columns, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol.113, No.10, pp.2208-2220, 1987.
 - 16) Dwight, J. B., and Moxham, K. E.: Welded Steel Plates in Compression, *The Structural Engineer*, Vol.47, No.2, pp.49-66, 1969.
 - 17) Kusama, H.: Cyclic Deformation Behavior of Thin-Walled Structural Members, Doctor Thesis Submitted to Nagoya University, 1985.

- 18) Ingvarsson, L.: Welded Box Columns of High Strength Steel, Bulletin No.120, Dept. of Building Statics and Structural Engineering, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1977.
- 19) Klöppel, K., Schmied, R., and Schubert, J.: Die Traglast mitting und außermittig gedrückter dünnwandiger stützen mit kastenartigem Querschnitt im überkritischen Bereich unter Verwendung der nichtlinearen Beultheorie, Teil II: Experimentelle Untersuchungen, Vergleich der experimentellen und theoretischen Ergebnisse, *Der Stahlbau*, 38, H. 1, H. 3, 1969.
- 20) Liew, J. Y. R., Shanmugam, N. E., and Lee, S. L.: Behavior of Thin-Walled Steel Box Columns under Biaxial Loading, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol.115,

No.12, pp.3076-3094, 1989.

- 21) 山内育雄, 菅野俊介, 長嶋俊雄, 平出 亨, 沢田 博: 充填型鋼管コンクリート短柱の中心圧縮性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1353-1354, 1988.
- 22) 相川和己, 森田耕治, 寺岡 勝, 林 和也, 藤原敏夫, 安藤欽也: 鉄筋コンクリート費服被覆角形鋼管柱に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1349-1350, 1988.
- 23) Nakai, K., Yoshikawa, O., and Terada, H.: An Experimental Study on Ultimate Strength of Composite Columns for Compression or Bending, *Proc. JSCE, Struct. Engrg./Earthquake Engrg.*, Vol.3, No.2, pp.235s-245s, 1986.
- 24) 葛 漢彬, 宇佐美勉, 寺田昌弘: コンクリートを充填した鋼製箱形短柱の圧縮耐荷力に関する実験的および理論的研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.119-132, 1992.
- 25) Migita, Y., Aoki, T., and Fukumoto, Y.: Local and Interaction Buckling of Polygonal Section Steel Columns, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol.118, No.10, pp.2659-2676, 1992.
- 26) 與田香二, 名智竜哉, 小川厚二, 黒羽啓明, 今井克彦: ウェブ幅厚比が大きい溶接H形鋼の残留応力と局部座屈に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1095-1096, 1988.
- 27) 加藤 勉, 呉 榮錫: 局部座屈を伴うH形断面鋼部材の耐力と変形, 構造工学論文集, Vol.35B, pp.351-360, 1989.
- 28) 鈴木俊郎, 金子洋文, 伊藤栄俊, 加藤征宏, 佐藤裕幸: 軽量H形鋼部材の座屈挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1183-1184, 1980.
- 29) Davids, A. J., and Hancock, G. J.: Compression Tests on Short Welded I-sections, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol.112, No.5, pp.960-976, 1986.
- 30) 青木徹彦, 福本秀士: 軽量溶接H形鋼柱の局部座屈と全体座屈に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.161-170, 1988.
- 31) 加藤 勉, 呉 榮錫, 山田 哲: H型断面ステンレス鋼短柱の最大耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1121-1122, 1988.

(1995 年 9 月 18 日 受付)