

局部座屈を考慮した鋼骨組の終局挙動の簡易解析法

A SIMPLIFIED ANALYSIS FOR ULTIMATE BEHAVIOR OF STEEL FRAMES FAIL BY LOCAL AND GLOBAL BUCKLING

崎元達郎* 渡辺 浩** 土田真二*** 三輪清貴****

Tatsuro SAKIMOTO, Hiroshi WATANABE, Shinji TSUCHIDA and Kiyotaka MIWA

- * 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒160 熊本市黒髪2丁目39-1)
- ** 工修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科 (〒160 熊本市黒髪2丁目39-1)
- *** 工修 新日本製鐵(株)九州支店橋梁工事室 (〒812 福岡市博多区博多駅前3-2-1)
- **** 工修 新日本製鐵(株)エンジニアリング事業本部 (〒100-71 千代田区大手町2-6-3)

Short beam-columns of a box-profile cross-section are analyzed by a second order elasto-plastic FEM. As the results, moment(M) versus curvature(ϕ) curves under constant axial forces(N) and axial force(N) versus average axial strain(ϵ) curves under constant curvature(ϕ) are obtained and then approximated by explicit functions. Approximated M - N - ϕ relations and N - ϕ - ϵ relations of short beam-columns with plates of various width-thickness ratios are brought into an usual second order frame analysis to formulate tangent stiffness matrices. Then, the results from the frame analysis provide the ultimate behavior of the frame including local and global instability. The accuracy and efficiency of the present method are demonstrated through several numerical examples.

Key Words: simplified ultimate strength analysis, frames, interaction buckling

1. まえがき

1980年に改訂されたわが国の道路橋示方書では、局部座屈の発生を許した形の圧縮部材の許容応力度式が採用された。それ以後、幅厚比の比較的大きい鋼圧縮部材の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する研究は部材レベルでは比較的多く行われてきたが、骨組構造物に関するこの種の研究は必ずしも多くはない¹⁾。それはこのような圧縮部材で構成される骨組が、構成板要素の溶接残留応力や初期たわみ等の初期不整、使用材料の非線形性、部材軸線の初期曲がり、および $P-\Delta$ 効果などに大きく左右される複雑な非線形挙動を示すことによる困難さもその一因であろう。1995年の兵庫県南部地震における鋼製橋脚の損傷・破壊は、局部座屈に関連するものが多く、この種の研究の必要性が再認識されている。

上述した種々の非線形性の影響を考慮して連成座屈挙動を求めることは、系全体を板要素等でモデル化し、材料の弾塑性と有限変位を考慮した有限要素解析を用いることにより可能ではあるが、多くの労力と時間を要する。また、実務設計に直接有限要素解析を用いることは現実的でなく、何らかの近似解法の開発が必要とされる。

本研究では、まず、断面力と断面変形の関係として、一定曲率 Φ の下で軸ひずみを漸増して得られる軸力 N と

平均軸ひずみ ϵ との関係($N-\Phi-\epsilon$ 関係)と、一定軸力 N の下で曲率を漸増して得られるモーメント M と曲率 Φ との関係($M-N-\Phi$ 関係)を板要素を用いた有限変位弾塑性解析により求める。次に得られた関係を陽な関数で近似する。そして、これらの近似式の接線勾配として評価される接線軸剛性 $E A_t$ と接線曲げ剛性 $E I_t$ を棒要素を用いた弾性有限変位解析に導入し、局部座屈の影響を考慮できる鋼骨組の簡易解析法を提示する。

同種の研究として、宇佐美らのもの²⁾があるが、ここでは軸剛性の変化は考慮されていない。本法では、この点をより一般的なマトリクス構造解析法としたことが、特徴として挙げられる。

2. 圧縮と曲げを受ける鋼製箱形断面部材の弾塑性有限変位解析

2. 1 数値解析法

材料の弾塑性と有限変位を考慮した有限要素解析法²⁾を用いて、軸方向力と曲げを受ける箱形断面はり一柱のパラメトリック解析を行う。解析上の主な仮定は、以下のようである。

- 1) 材料は等方性であり、ひずみ硬化の影響を受ける。
- 2) Von Misesの降伏条件式が成立し、塑性域では

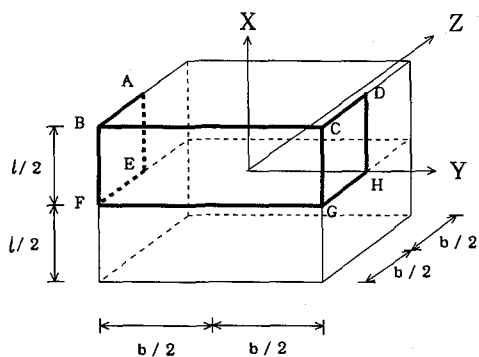


図-1 解析対象

Prandtl-Reussの応力-ひずみ式が成立する。

- 3) 変形前、板の中立面に垂直であった任意の横断面は、変形後も変形した中立面に垂直である。
- 4) 一つの要素内で板面方向の応力は一定である。
- 5) 初期たわみを有する板を、平面の三角形要素の集合体（折板構造）でモデル化し、この状態を無応力状態と考える。

解析モデルは、図-1、2に示すように軸圧縮力 N と Z 軸回りの曲げモーメント M を受ける正方形箱形断面部材とする。計算は一定軸力 N のもとで漸増する曲率 ϕ に対応する曲げモーメント M （ $M-N-\phi$ 曲線）及び、一定曲率のもとで漸増するひずみ ϵ に対応する軸力 N （ $N-\phi-\epsilon$ 曲線）を求めることにある。

解析は、変位制御の増分法で行い、軸方向力については載荷面に対して一様な軸方向強制変位を、曲げモーメントについては、平面を保持するように、 Y 軸方向に直線的に変化する軸方向強制変位を与え、それによって生じる部材軸方向の節点反力を用いて、部材端の断面力を計算した。曲率 ϕ は、図-2に示すように部材端部に与えた強制変位の勾配 θ を用いて $\phi = 2\theta/l$ より計算した。板厚はすべて4.5mmで一定とし、幅厚比 b/t を20~70と変化させた。また、アスペクト比 l/b は、ほぼ最小の強度を与えるアスペクト比として0.7とした³⁾。後述の実験解析を主眼に考えたため板厚を $t=4.5\text{mm}$ としているが、本法の考え方は、幅厚比パラメータが同じであれば、板厚に関わらず適用できることを確認している。

図-1、3に示すように、荷重と変形の対称性から1/4の部分解析することとし、軸方向分割数と板厚方向の層分割数はフランジ、ウェブとも6分割、幅方向

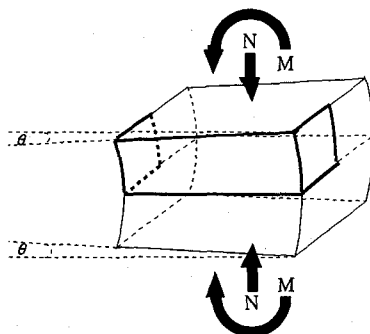


図-2 端部回転角と部材曲率

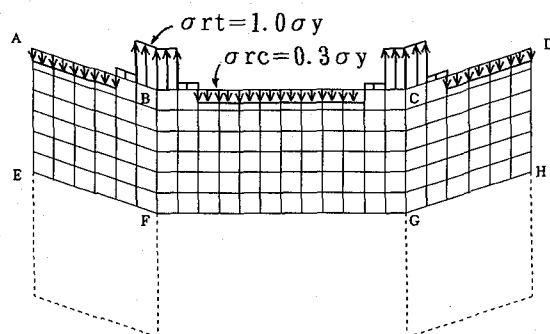


図-3 要素分割と仮定した残留応力度分布

分割数はフランジを6分割、ウェブを12分割とした。

境界条件は、載荷辺（辺AB, BC, CD）で面外に単純支持とし、面内せん断力は零として強制軸方向変位を与えた。境界条件と対称条件を考慮した場合の変位と回転の自由度の拘束を表-1に○印で示している。

残留応力は軸方向および板厚方向に一定とし、引張側 $\sigma_{rt}=1.0\sigma_y$ 、圧縮側 $\sigma_{rc}=0.3\sigma_y$ を図-3に示すような長方形分布で与えた。なお幅厚比には無関係とした。

初期たわみ形状は、図-4に示すように、軸方向および板厚方向に半波の正弦波となるように与えた。初期たわみの最大値は、 $\delta f = \delta w = b/150$ とした。

想定した材料は、SM490で、 $\sigma_y=3200(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $E=2.1 \times 10^6(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\nu=0.3$ である。応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮するTrilinear型と、Bilinear型（完全弾塑性体）の2つの場合を検討した。なお、Trilinearにおけるひずみ硬化開始ひずみは、既往の材料試験結果の平均的な値として、降伏ひずみの10倍とし、ひずみ硬化域における勾配 E_{st} は $E/70$ とした。

表-1 解析モデルの境界条件

	AB	BC	CD	EF	FG	GH	AE	DH
U				○	○	○		
V	○		○					
W		○					○	○
θ_x							○	○
θ_y					○			
θ_z				○		○		

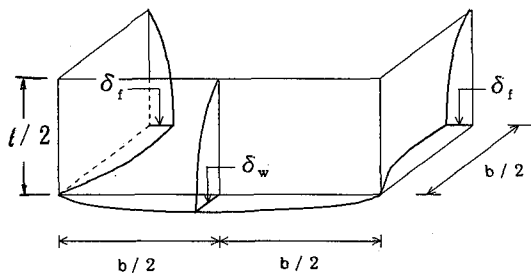


図-4 仮定した初期たわみ形状

2. 2 箱形断面短柱の終局強度

(1) 純圧縮を受ける箱形断面短柱の終局強度

前述の解析モデルに対して、まず圧縮のみを載荷して解析を行った。得られた解析結果を図-5に示す。実線がTrilinear関係を用いた時の結果を、破線がBilinear関係を用いた時の結果を示しているが、両者はほぼ一致しており、この範囲ではひずみ硬化が終局強度や挙動に及ぼす影響はほとんど見られないことが分かる。

次に終局圧縮強度と幅厚比パラメーターの関係を図-6に示す。縦軸は終局圧縮力 N_u を降伏軸力 N_y で除して無次元化した値であり、横軸は文献4)の実験と比較するために式(2)に示す幅厚比パラメーター R_{fw} で示している。また、図中の曲線は、オイラー曲線、小松・北田ら⁵⁾の曲線、宇佐美・福本ら⁶⁾の曲線、三輪⁷⁾の曲線である。小松・北田らの曲線が最も精度よく下限値を押さえているが、 R_{fw} が1.3以下を適用範囲としているので本研究では次式(1)で表される三輪の曲線を採用することとした。

$$\frac{N_u}{N_y} = \left(\frac{0.5}{R_{fw}} \right)^{0.6} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$R_{fw} = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{K_{fw}\pi^2}} \quad (2)$$

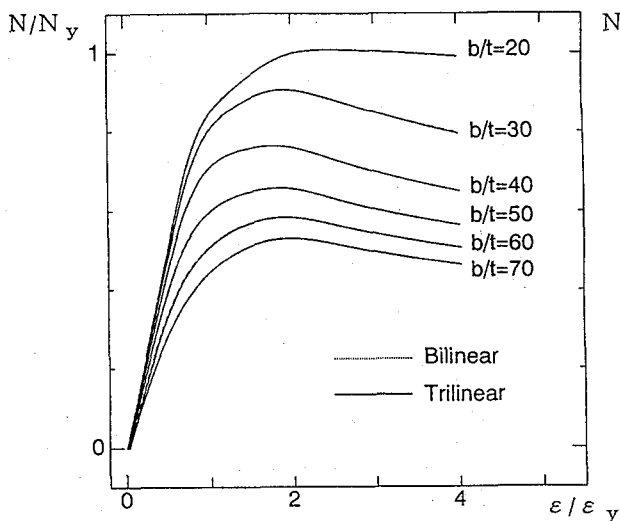


図-5 軸圧縮力-平均軸ひずみ 曲線

ここに

$$K_{fw} = \frac{(\alpha_f + 1/\alpha_f)^2 + (d/b)(\alpha_w + 1/\alpha_w)^2}{1 + (b/d)^3}$$

$$\alpha_f = a/b, \quad \alpha_w = a/d, \quad a = b \left[\frac{1 + (d/b)^3}{1 + (b/d)} \right]^{1/4}$$

b : フランジ幅、 d : ウェブ幅、 $t_f = t_w$ とした。

(2) 純曲げを受ける箱形断面部材の終局強度

前述の解析モデルに対して、曲げのみを載荷して解析を行った。この解析は、曲率に対応する軸方向強制変位を与えて曲げを載荷するのだが、このとき軸方向に反力が生じてしまう。そのため、この反力を打ち消すような調整変位を与えることにより、軸力を消去して純曲げ解析を行った。曲率は降伏モーメント時の曲率（以後、降伏曲率と呼ぶ）の10倍まで与えた。得られた解析結果を図-7に示す。純圧縮解析と同じく実線がTrilinear関係を用いた時の、破線がBilinear関係を用いた時の結果である。この解析結果においては、ひずみ硬化が終局強度に及ぼす影響はほとんど見られなかったが、強度の低下勾配に若干の差が見られた。

次に最大純曲げ強度と幅厚比パラメーターの関係を図-8に示す。縦軸は純曲げの時の最大モーメント M_u を全塑性モーメント M_p で除して無次元化した値であり、横軸はフランジの幅厚比パラメーター R をとっている。ここで、 R は、式(2)において、 $b=d$ 、 $K_{fw}=4.0$ としたものである。また、図中の曲線は、オイラー曲線、三輪⁷⁾の曲線、宇佐美ら⁸⁾の曲線である。ここでは、次式(3)で表される三輪の曲線を用いる。

$$\frac{M_u}{M_p} = 1.147 - 0.308R \leq 1.0 \quad (3)$$

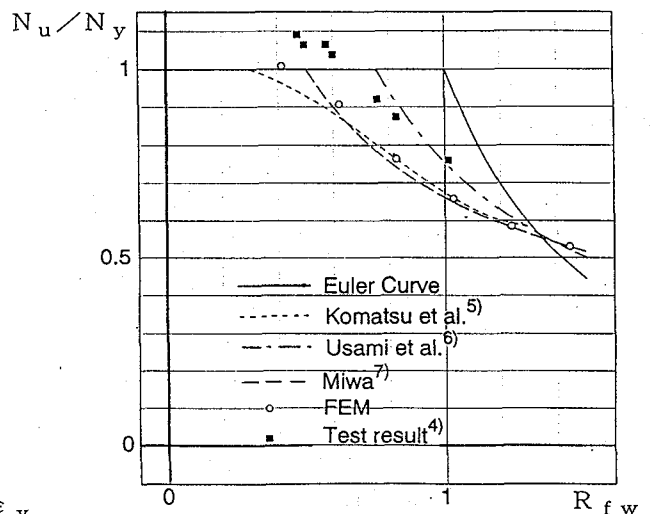


図-6 軸圧縮強度

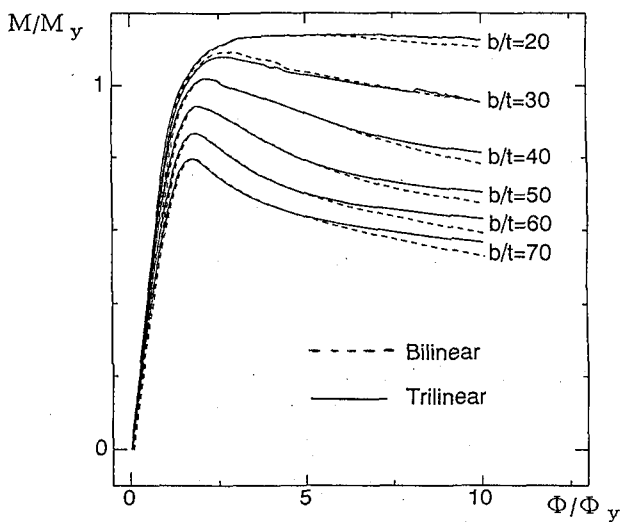


図-7 曲げモーメント-曲率 曲線

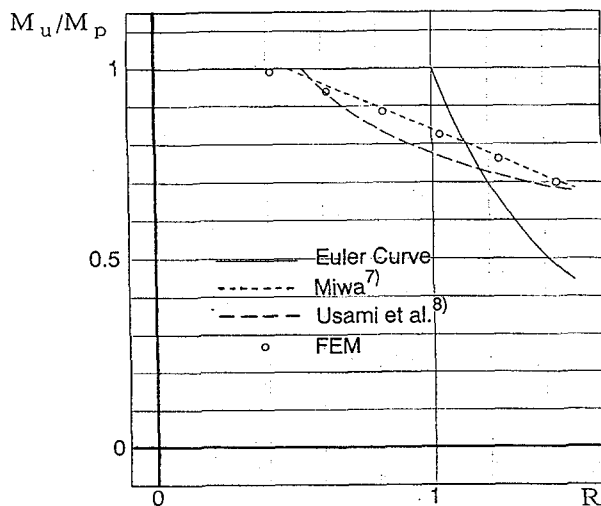


図-8 最大純曲げ強度

(3) 終局強度の相関曲線

短い部材が軸力と曲げを同時に受ける時、断面が抵抗する最大モーメントは最大純曲げ強度と必ずしも一致しない。これは純曲げの時より、軸引張力を受ける場合の方が局部座屈が妨げられ強度が増加するためである。このことを考慮して、部材が軸引張力を受ける場合も含めて、部材が軸力と曲げを同時に受ける時の最大曲げ強度 M_b と幅厚比パラメータ R の関係を図-9に示す。図中の曲線はオイラー曲線、三輪⁷⁾の曲線である。三輪の曲線はやや強めに評価しているので、本研究では強度評価式として次式を提案する。

$$\frac{M_b}{M_p} = \left(\frac{0.5}{R} \right)^{0.2} \quad (4)$$

次に任意の軸力と曲げを同時に受ける箱形断面部材の終局強度相関式として次式を提案する。

$Ny \geq 1.3 Nu$ の時

$$\left(\frac{N}{Nu} \right)^{1.45} + \left(\frac{M}{Mu} \right) = 1.0 \quad (5)$$

$Ny < 1.3 Nu$ の時

$$\left\{ \frac{N + (Ny - 1.3Nu)/2.3}{(Ny + Nu)/2.3} \right\}^{1.3} + \left\{ \frac{M}{M_b} \right\} = 1.0 \quad (6)$$

ここに、 N と M は断面力が最大となる時の軸力とモーメントの組み合わせである。

$b/t = 20$ ($R = 0.411$), $b/t = 70$ ($R = 1.437$)の場合について上式(5)、(6)を図-10に示す。また図中には解析結果をプロットして示す。ほぼ安全側に精度よく評価していることがわかる。

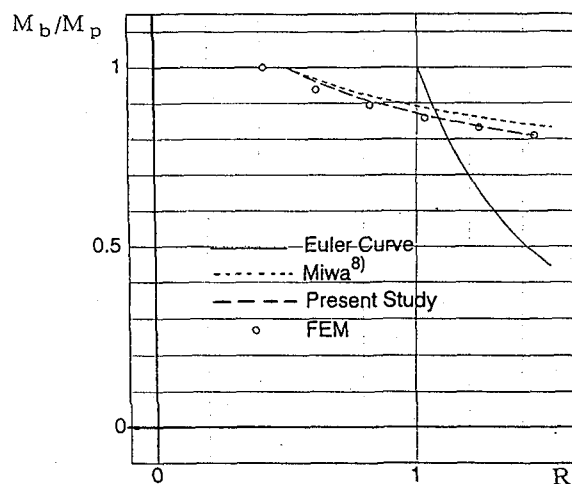


図-9 軸力を受ける短柱の最大曲げ強度 M_b

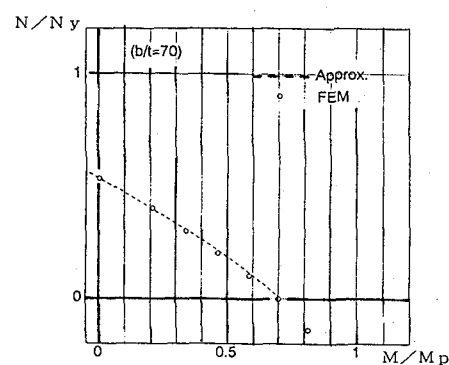
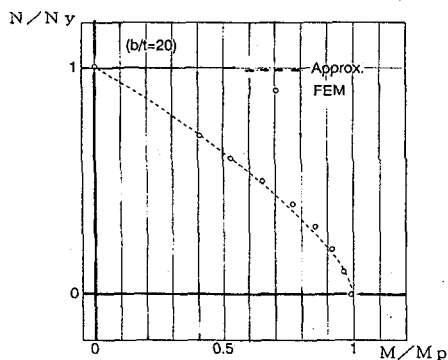


図-10 局部座屈を考慮した短柱の圧縮・曲げ相関強度曲線とその近似

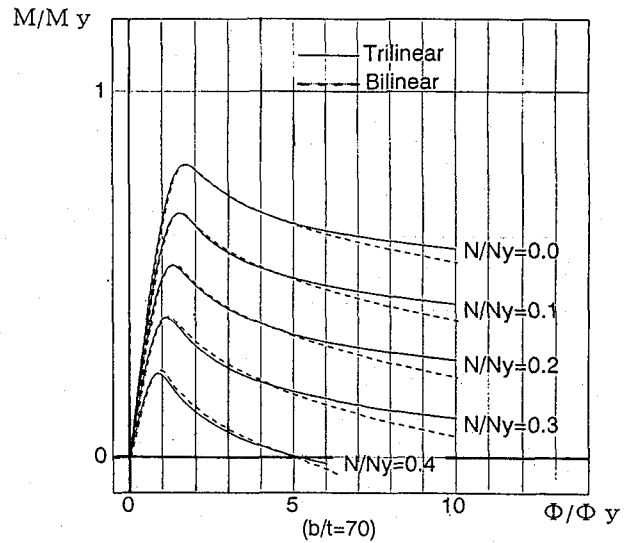
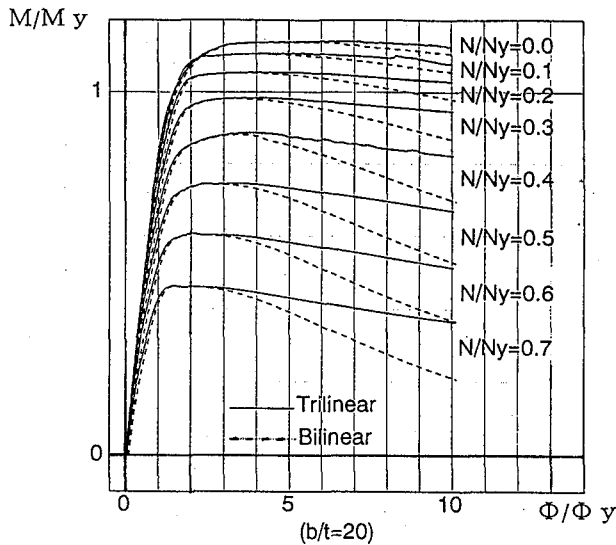


図-11 M-N- ϕ 曲線の解析値

2. 3 解析結果の近似曲線

(1) 部材のM-N- Φ 曲線の解析結果とその近似

前述のモデルに対して、一定軸力のもとで曲率を漸増させるM-N- Φ 曲線を求める解析を行った。一定軸力Nは降伏軸力 N_y の0.1きざみに与えていった。曲率 Φ を漸増させる時、一定であるべき軸力が変動するので、所定の軸力値Nになるように調整変位を与えた。解析結果を図-11に示す。縦軸はモーメントMを降伏モーメント M_y で除して無次元化した値であり、横軸は曲率 Φ を降伏曲率 Φ_y で除して無次元化した値である。純圧縮解析と同じく実線がTrilinear、破線Bilinearの関係を用いた時の結果である。どのモデルにおいても、ひずみ硬化が最大強度に及ぼす影響はほとんど見られない。最大強度後の低下勾配は、どのモデルにおいてもNが大きくなるに従ってひずみ硬化の影響が顕著に見られる。また、幅厚比が小さくなるほどひずみ硬化の影響を受けやすい。ここでは、より実際に近いTrilinearの結果を採用する。

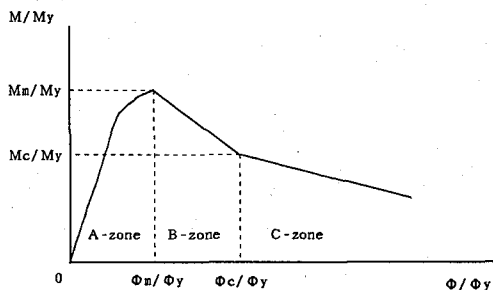


図-12 M-N- ϕ 曲線の近似方法

上に示したM-N- Φ 解析の結果を精度よく且つ簡便な式で近似することを試みる。方法は、図-12に示すように、最大荷重までを原点を通り最大荷重で頂点となる放物線で近似し、それ以後を2直線で近似する。その

際に頂点の座標(Φ_m/Φ_y , M_m/M_y)を求める必要がある。 Φ_m/Φ_y は、軸方向圧縮力Nと幅厚比パラメーターRの関数として次式により求められ、 M_m/M_y は、前章で示した終局強度の相関曲線よりNの関数として求められる。

$$\frac{\phi_m}{\phi_y} = \text{EXP}(0.989 - 1.422N_d), \quad (7)$$

$$N_d = \frac{\{N/N_y + (1 - N_u/N_y)/2\}}{\{(1 + N_u/N_y)/2\}} \quad (8)$$

以上の方法により近似式として次式を提案する。

$0 \leq \phi \leq \phi_m$ の時、

$$\frac{M}{M_y} = -\frac{M_m}{M_y} \left(\frac{\phi}{\phi_m} - 1 \right)^2 + \frac{M_m}{M_y} \quad (9)$$

$\phi_m < \phi$ の時、

$$\frac{M}{M_y} = \alpha \left(\frac{\phi}{\phi_y} + \frac{\phi_m}{\phi_y} \right) + \frac{M_m}{M_y}, \quad (10)$$

$$\frac{M}{M_y} = \beta \left(\frac{\phi}{\phi_y} + \frac{\phi_c}{\phi_y} \right) + \frac{M_c}{M_y}$$

ここで、 α はB領域の直線の勾配、 β はC領域の直線の勾配であり、解析結果の回帰式として、次式で与える。

$R < 0.5$ の時、

$$\alpha = \beta = -0.025$$

$0.5 \leq R < 1.0$ の時、

$$\alpha = -0.147(N/N_y) - 0.1333R + 0.0715$$

$$\beta = -0.025$$

1. $0 \leq R$ の時、

$$\alpha = -0.0323(N/N_y) + 0.0553R - 0.1286$$

$$\beta = -0.025$$

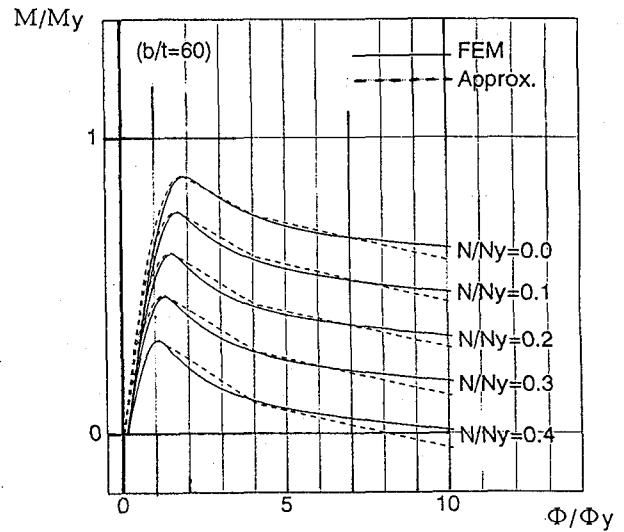
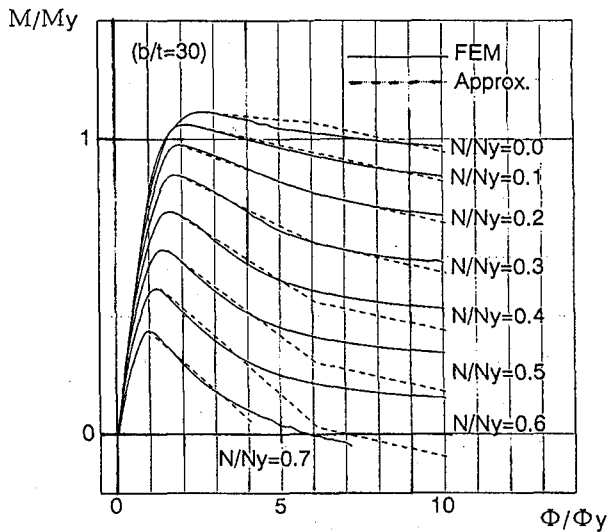


図-13 M-N-φ 曲線の解析値とその近似曲線

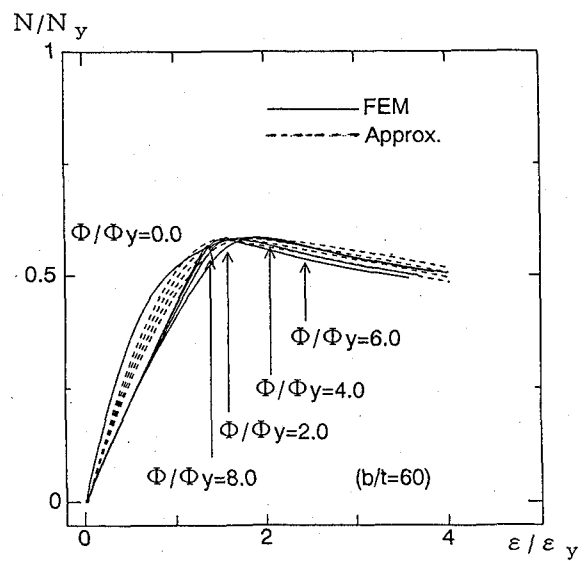
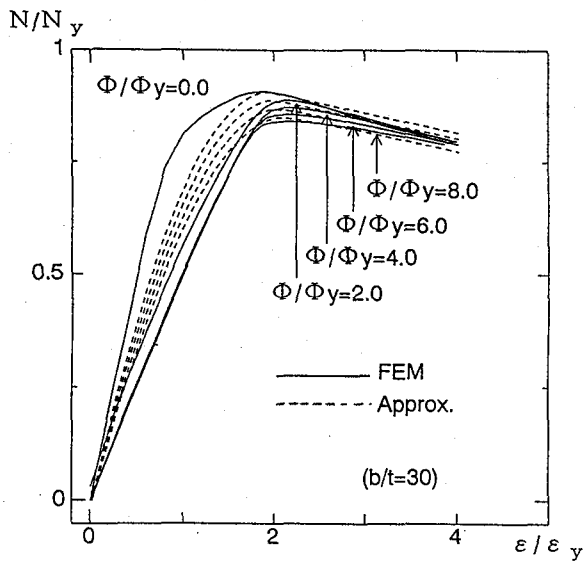


図-14 N-φ-ε 曲線の解析値とその近似曲線

また、B領域とC領域の境界 Φ_c は、下記の値とする。

$R \leq 1.0$ の時、 $\Phi_c / \Phi_y = 6.0$

$R > 1.0$ の時、 $\Phi_c / \Phi_y = 4.0$

上述の方法により求めた近似曲線と解析結果の比較を図-13に示している。

(2) 部材のN-φ-ε曲線の解析結果とその近似

前述したモデルに対して、一定曲率のもとで軸方向圧縮力を与えるN-φ-ε解析を行った。軸方向圧縮力を漸増させると、一定であるべき曲率が変動するので、調整変位を与えて曲率を一定に保ちつつ、軸方向変位を漸増させて軸方向力を求めた。一定曲率 Φ は降伏曲率 Φ_y の2倍きざみに与えていった。Trilinear関係を用いた時の解析結果を図-14に示す。縦軸は軸力Nを降伏軸力 N_y で除して無次元化した値であり、横軸はひずみ ϵ

を降伏ひずみ ϵ_y で除して無次元化した値である。

次に、解析結果をM-N-φ曲線と同じく近似することを試みる。方法は、最大荷重までを原点を通り最大荷重で頂点となる放物線で近似し、それ以後を1直線で近似する。頂点の座標($\epsilon_m / \epsilon_y, N_m / N_y$)は、曲率 Φ と幅厚比パラメータRの関数で表すことができると考え、解析値の回帰式として次式で与えられる。

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_y} = \alpha \frac{\Phi}{\Phi_y} + \beta \quad (11)$$

ここに、 $\alpha = 0.14 - 0.168R$

$\beta = 1.955 - 0.0287R$

$$\frac{N_m}{N_y} = 1.03 \frac{N_u}{N_y} \left\{ 1.0 - \frac{\gamma}{2R} \left(\frac{\Phi}{\Phi_y} \right) \right\}^2 \quad (12)$$

ここに、 $\gamma = 0.00567$

以上の値を用いて近似式として次式を提案する。

$0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_m$ の時、

$$\frac{N}{N_y} = -\frac{N_m}{N_y} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} - 1 \right)^2 + \frac{N_m}{N_y} \quad (13)$$

$\varepsilon_m < \varepsilon$ の時、

$$\frac{N}{N_y} = \xi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_y} \right) + \frac{N_m}{N_y} \quad (14)$$

ここで、 $\xi = 0.1126R^2 - 0.1999R + 0.0359$

上述の方法により求めた近似曲線を $b/t = 30$ ($R = 0.616$) と $b/t = 60$ ($R = 1.232$) の場合について解析結果と比較して図-14に示している。

3. 局部座屈の影響を考慮した鋼骨組の解析

3.1 解析方法

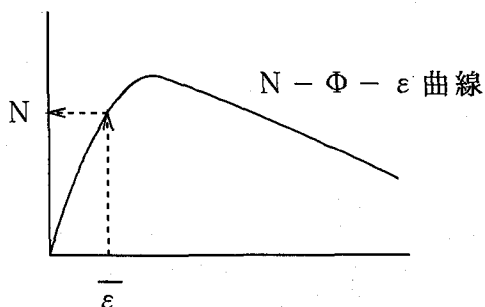
前章で導いた各式を通常の骨組の弾性2次解析プログラムに組み込むことにより近似解法が完成する。

解析上の主な仮定は以下のようにまとめられる。

- 1) 部材断面形状及び構成材料特性は板構造解析のもので近似できるものとする。
- 2) 材料の塑性化及び局部座屈の影響は $M-N-\Phi$ 曲線、 $N-\Phi-\varepsilon$ 曲線の接線勾配として評価される接線剛性により表す。
- 3) 断面の一部が塑性化または局部座屈した後も、曲げに対してはEuler-Bernoulliによる平面保持の仮定が成立する。
- 4) 曲げによるせん断力の影響は小さいものとし、これを無視する。
- 5) ひずみの反転はないものとし、これを無視する。
- 6) 変位は大きくても、局部変形は、平均軸ひずみで $5\varepsilon_y$ 程度、曲率で $10\phi_y$ 程度までとする。

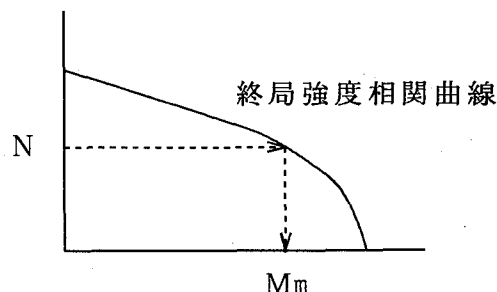
解析は、以下の手順で行う。

- (1) $\bar{N}$, $\bar{M}$ (基本荷重) を与える。
- (2) 基本荷重に対するひずみ $\bar{\varepsilon}$, $\bar{\phi}$ を計算する。
- (3) $\bar{\phi}$ から N_m , ε_m を求める。これにより $N-\Phi-\varepsilon$ 曲線が決定する。



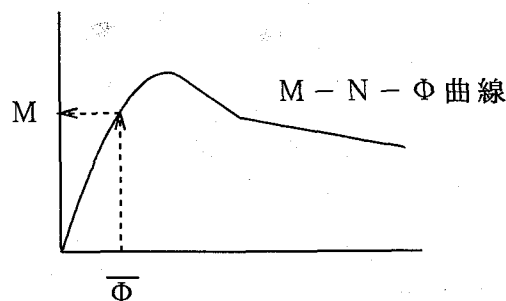
- (4) 決定した $N-\Phi-\varepsilon$ 曲線に $\bar{\varepsilon}$ を代入し N を求める。
またこの点の接線勾配を軸剛性 $E A_t$ とする。

- (5) 決定した N を強度相関曲線に代入し M_m を求める。



- (6) 決定した N から Φ_m を求める。これにより $M-N-\Phi$ 曲線が決定する。

- (7) 決定した $M-N-\Phi$ 曲線に $\bar{\phi}$ を代入し M を求める。
またこの点の接線勾配を曲げ剛性 $E I_t$ とする。



- (8) $|N - \bar{N}| \leq \zeta \bar{N}$, $|M - \bar{M}| \leq \zeta \bar{M}$ (ζ は微小値)

を満たしていなければ、 $\bar{N} = N$, $\bar{M} = M$ として繰り返し計算を行う。

3.2 既往の解析結果との比較

先に紹介した宇佐美ら⁹⁾の数値解析結果と比較することにより本解析法の妥当性を検討する。宇佐美らは、板要素を用いた弾塑性有限変位解析により求めた $M-N-\Phi$ 関係を離散値として入力データに用い、軸線不伸張の仮定を用いた棒部材に対する有限変位解析の中で、任意の曲率と軸力に対応する接線曲げ剛性と曲げモーメントを3次のBスプライン法により補完して求めている。

解析対象モデルを図-15に示す。ただし、はり、柱部材は全て図-16に示す正方形断面で構成されるものとする。なお、解析する時の軸方向の分割数はモデルにより変化させた。それは1つ1つの要素が箱形短柱の解析モデルとできるだけ同じになるように、幅の約0.7倍としたためである。解析結果を図-17に示す。

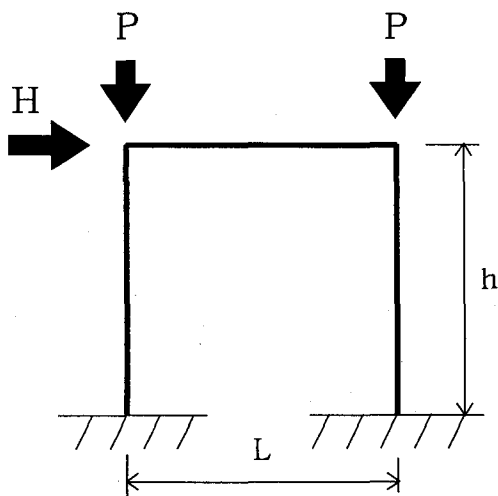
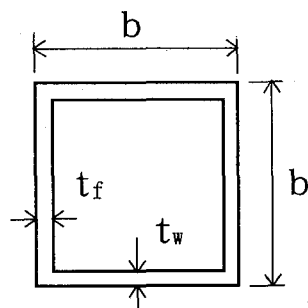


図-15 門型ラーメンの数値例



$E=2.1 \times 10^6 (\text{kgf/cm}^2)$, $\sigma_y=3200 (\text{kgf/cm}^2)$
 $t_f=t_w=1.0 (\text{cm})$, $\nu=0.3$
 $b=30.0 (\text{cm})$ の場合 $L=h=164.8 (\text{cm})$
 $b=60.0 (\text{cm})$ の場合 $L=h=353.2 (\text{cm})$

図-16 数値例の材料定数と断面寸法など

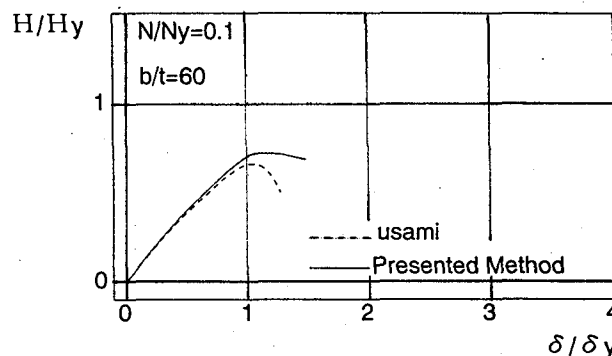
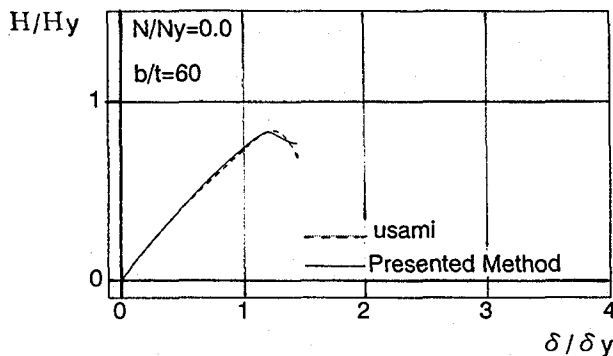
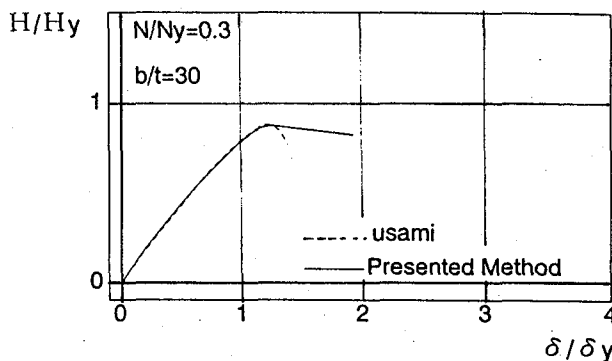
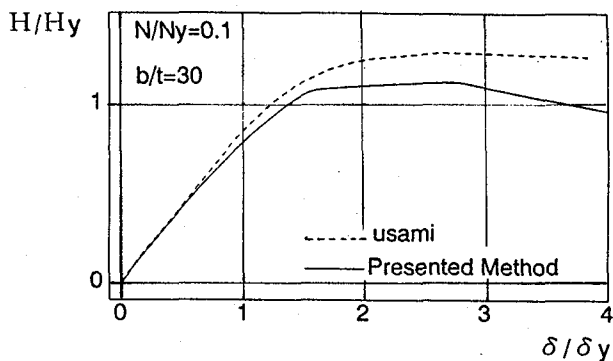


図-17 門型ラーメンの水平力-水平変位関係

幅厚比が小さくかつ軸力比が小さいモデルでは、本解析結果の方が多少安全側となった。これは宇佐美らの解析では $b/t=30$ における $M-\Phi$ 関係は、軸力が降伏軸力の 0% と 10% の場合は完全弾塑性挙動として最大強度後の局部座屈による剛性の低下はないものとして取り扱っているのに対し、本研究で求めた $M-\Phi$ 関係では、最大荷重後の局部座屈による剛性の低下が算入されるためであると考えられる。その他のモデルではかなり精度よく一致した。宇佐美らの解析では、軸力不伸張の仮定を行っているため、水平力が軸力に与える影響などは考慮されな

いと考えられるが、ここに示した例では、この影響は、さほど大きくないことを結果が示している。

4. 鋼骨組の耐荷力実験¹⁰⁾

4.1 実験概要

本解析法の妥当性を検討するために、一定鉛直力のもとで漸増水平力を受ける鋼製門型ラーメンの耐荷力実験を行った。供試体は、図-18に示すような骨組寸法が同一の2体とし、無補剛正方形断面の構成板の幅厚比のみを変化させたType A とType Bとした。

供試体は、SM400相当品で製作したが、その材料定数は、 $\sigma_y=3559(\text{kgf/cm}^2)$, $E=2.17 \times 10^6(\text{kgf/cm}^2)$, $\nu=0.28$, $\varepsilon_y=0.167(\%)$, $\varepsilon_{st}=2.177(\%)$ である。なお、一定鉛直力は降伏軸力 N_y の 15% とした。供試体の寸法と構造諸元を表-2 に示す。また、実験状況を図-19 に示す。

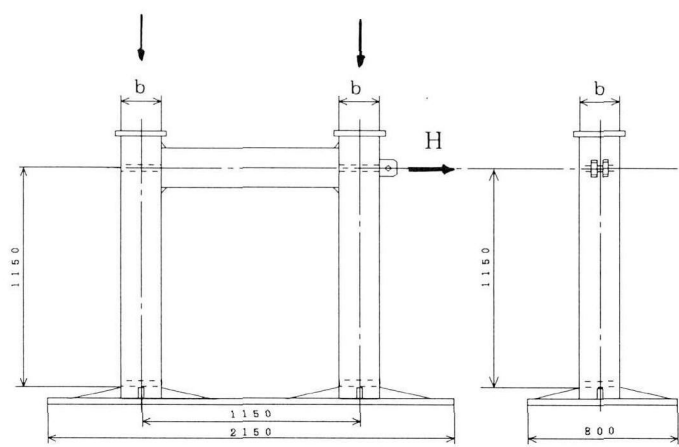


図-18 ラーメン供試体

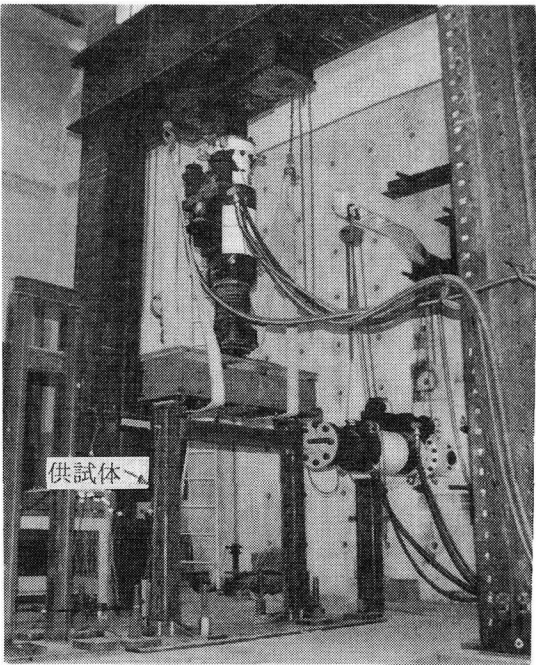


図-19 実験の状況

表-2 供試体の寸法および構造諸元

供試体名	b (cm)	t (cm)	h=L (cm)	R	λ	$H_y(\text{tonf})$	$\delta_y(\text{mm})$	H_p/H_y
Type A	11.35	0.55	115	0.468	0.645	9.79	7.74	1.20
Type B	21.25	0.55	115	0.814	0.345	35.0	4.22	1.18

ここに、
$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$$
 ,
$$\lambda = \frac{K h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

k = 板の座屈係数（無補剛断面の場合 4.0）、
 K = 有効座屈長係数（梁と柱の剛比が 1.0 の門型ラーメンの場合 1.157）とする。
 r = 断面 2 次半径
 H_y = 柱脚基部断面が降伏する時の水平荷重
 H_p = 柱脚基部断面が全塑性となる時の水平荷重

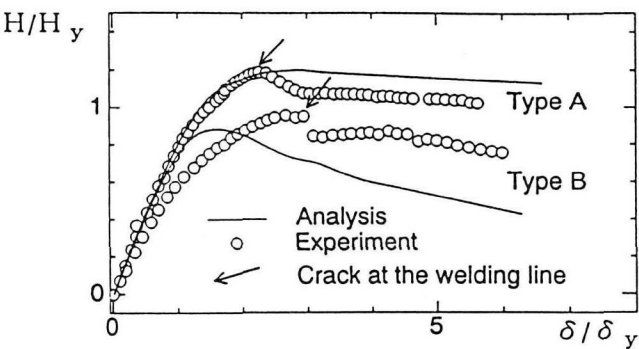


図-20 実験結果と解析結果の比較

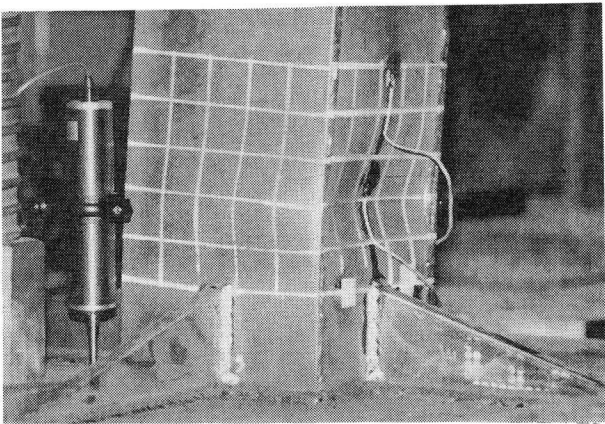


図-21 試験後の供試体の状況（脚基部の局部座屈）

表-3 最大水平荷重Hmの比較

	Analysis① Hm/Hy	Experiment② Hm/Hy	①/② (%)
Type A	1.20	1.19	101
Type B	0.88	0.96	92

4. 2 実験結果と解析結果の比較

実験供試体を本法により解析した。実験結果と解析結果の比較を図-20、表-3、4に示す。図の縦軸は水平荷重Hを降伏荷重Hyで除して無次元化した値であり、横軸は載荷点の水平変位 δ を降伏変位 δ_y で除して無次元化した値である。なお、Hyと δ_y は柱基部において初期降伏が起こる時の理論値で、次式で示される。

$$H_y = \frac{7M_y}{2h}, \quad \delta_y = \frac{5H_y h^3}{84EI} \quad (15)$$

ここに、My=降伏モーメント、h=柱長、

EI=曲げ剛性

実験結果で、急激に荷重が低下しているのは(図-20中の矢印の点)、柱-梁接合部の下側フランジ、およびウェブのレ型溶接においてクラックが生じたためである。このため実験の最大荷重は若干低めに計測された可能性がある。

解析結果と実験結果を比較してみると、最大荷重については、両者はかなりよく一致している。Type Aについては、隅角部の溶接割れの影響を除けば、全体挙動も良く解析されている。幅厚比の大きなType Bについては、最大強度に達する変位、最大強度以降の強度低下勾配が必ずしも良く一致していない。実験供試体の固定端の固定度の問題、隅角部の溶接の問題など、実験技術上にも改良の余地があると考えられる。なお、実験においては、基部の回転角を測定し、図-20においては、これによる補正を行っている。

次に参考として、軸方向の分割数を変化させて解析を試みたが、軸方向の分割数が最大強度に及ぼす影響はほとんど見られなかった。しかし、最大強度後の低下勾配は分割数に大きく依存し、分割数が少なくなるほど勾配は小さくなった。本研究の仮定から考えて、1つの要素の長さは箱形短柱解析のモデルに近いもの(0.7b)にするべきであると思われる。なお、柱脚基部の局部座屈の波長は、いずれの供試体についてもほぼ0.7bであることを、実験で確認した(図-21参照)。

5. 結論

弾塑性局部座屈を考慮したFEM解析で求めた短い一柱のM-N- ϕ 関係とN- ϕ - ϵ 関係を弾性2次解析のプログラムに持ち込むことにより、連成座屈を考慮して薄肉鋼骨組の終局挙動を簡易に解析する方法を提案した。

表-4 最大荷重時の変位 δ_m の比較

	Analysis① δ_m/δ_y	Experiment② δ_m/δ_y	①/② (%)
Type A	2.90	2.24	129
Type B	1.45	2.66	54

M-N- ϕ 関係とN- ϕ - ϵ 関係は、陽な関数で組み込まれているため、本報告の前半で述べたFEM解析は、今後行う必要は無く、部材の幅厚比パラメータRを与えるだけで、任意の骨組が解析可能である。なお、補剛断面部材に対する適用性は、今後の検討課題である。

従来、ここで取り扱った問題について、系全体を板要素でモデル化し解析すると、ワークステーションでも、数日のオーダーの計算時間が必要であるが、本方法によると、パソコンで数分の計算時間で解析できる。

本法による解析結果と既往の研究結果や実験結果との比較が良く一致していることから、本解析法は、実用的な簡易計算法としてかなり有効であると思われる。

参考文献

- 1) 酒造敏廣：鋼薄肉ラーメン構造物の終局強度と設計法に関する研究、大阪市立大学提出学位論文 1986.10
- 2) 山尾敏孝、崎元達郎：板要素とはり要素の結合による薄肉鋼構造物の有限変位弾塑性解析、構造工学論文集、Vol.32A, pp.255-264, 1986.3
- 3) 宇佐美勉、土屋信洋、大谷恭弘、福本秀士：薄板集成短柱の弾塑性有限変位解析、木学会論文集 第362号 pp.293-302, 1985.10
- 4) 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, 1985.3
- 5) 小松定夫、北田俊行：初期不整を有する圧縮板の極限強度に関する研究、土木学会論文集 第270号、pp.1-14, 1978.2
- 6) 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、土木学会論文集 第326号 pp.41-50, 1982.10
- 7) 三輪清貴：局部座屈の影響を考慮した箱形断面鋼骨組の終局強度解析法、平成4年度熊本大学修士論文 1993.3
- 8) 宇佐美勉、土屋信洋、福本秀士：鋼圧縮部材の連成座屈挙動の理論的研究、土木学会論文集 第362号 pp.303-312, 1985.10
- 9) 宇佐美勉、寺尾圭史：局部座屈を考慮した箱形断面鋼骨組構造物の強度、土木学会論文集 第398号、pp.197-206, 1988.10
- 10) 大江知也：一定軸力と漸増水平力を受ける鋼骨組の耐力実験について、平成7年度卒業論文、1996.3

(1996年9月6日受付)