

鋼平面ラーメン構造物の 極限強度評価式の実験データによる検証

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF ULTIMATE STRENGTH FORMULAS FOR PLANE RIGID FRAMES

宇佐美 勉*

By Tsutomu USAMI

Ultimate strength formulas for plane rigid frames of steel box sections have been presented in Refs. 1)-7), based on the extensive theoretical and experimental studies. The strength formulas developed take into account the effects of local and overall interaction instability of the structure. This paper is aimed to expand the application of the formulas so that H and pipe sections may be included in addition to unstiffened and stiffened box sections. The formulas thus developed are verified by test results obtained in various organizations.

1. 緒言

鋼ラーメン構造物の設計法を考える場合に問題となるのは次の点などであろう：(a) 骨組全体の安定（全体座屈），(b) 構成要素の強度（局部座屈），(c) せん断遅れ現象に対する配慮—有効幅の概念，(d) 隅角部の設計問題，(e) 連結部の設計問題，(f) 靱性の評価，(g) 疲労に対する配慮。この論文は，上記(a)，(b)に関して，側方拘束のない長方形平面ラーメンが面内荷重を受ける場合について，著者らの最近の研究成果^{1)~8)}に基づいた極限強度評価法をまとめ，併せて実験データによる検証について述べたものである。

極限強度評価式の書式は安全率を含まない形で示すが，例えば，“構造物設計指針”⁹⁾の書式に従い，限界状態設計法の書式に容易に書き換えられる。

また，ラーメン構造物の断面形としては，無補剛箱形，補剛箱形，H形およびパイプ断面を考え，それらを統一的に評価できる方法について述べる。なお，この論文で対象とするラーメンの各部材は等断面とする。

2. 局部座屈のないラーメンの極限強度評価法⁷⁾

前章の(b)が問題とならない比較的厚肉の断面によりなる長方形平面ラーメン(図-1)の極限強度評価法についてまず述べる。平面ラーメンの設計方法は大別して2種類の方法がある。第1は，我国の道路橋

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

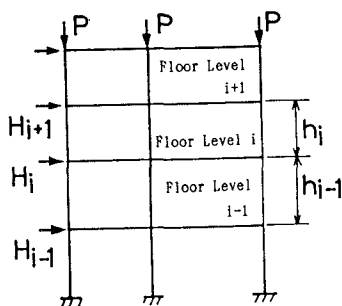


図-1 ラーメン

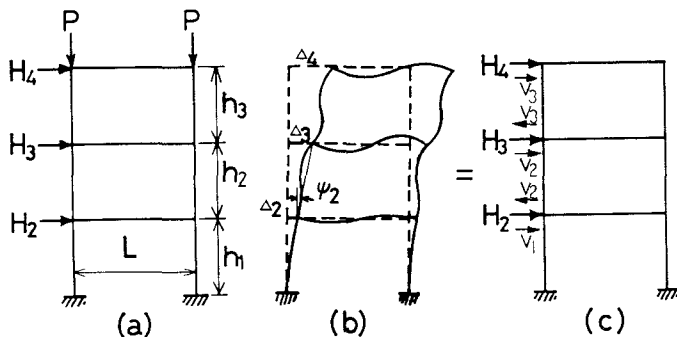


図-2 P-Δ法の概念

示方書（以下、道示と記す。）などに用いられている¹⁰⁾ような有効座屈長の概念に基づき、各部材を両端ピンの部材に置き換え、はり一柱の安定問題として照査する方法（有効座屈長法と称する）である。第2の方法はP-Δ法と呼ばれる方法で、P-Δ効果によって生ずる付加的なモーメントを等価な1対の水平力（層せん断力）に置き換え、この層せん断力と水平荷重の和（換算水平力）をラーメンに作用させて弾性1次解析より断面力を求め、断面の強度相関式により安全性を照査する方法である。換算水平力の概念は図-2の床レベル3に着目すると次のようになる。床レベル2、3の水平変位 Δ_2 、 Δ_3 によって生ずる付加的モーメントは第2層の柱の軸力の和を ΣP とすると、 $(\Sigma P) \cdot (\Delta_3 - \Delta_2)$ となり、これに等価な層せん断力 V_2 は $V_2 = (\Sigma P) (\Delta_3 - \Delta_2) / h_2 = (\Sigma P) \Psi_2$ となる。ここに、 $\Psi_2 = (\Delta_2 - \Delta_1) / h_2$ は第2層の部材回転角である。 V_2 はラーメンの第2層に1対の水平力として図-2のように作用する。従って、床レベル3に作用させるべき水平力すなわち換算水平力 H_3' は $H_3' = H_3 + V_2 - V_3$ となる。

有効座屈長法としてAISCの塑性設計法¹¹⁾（AISC法と略記する）、道路橋示方書の方法（JSHB法）、AISCの荷重・抵抗係数設計法¹²⁾（LRFD法）、P-Δ法としてアメリカのSSRCの方法¹²⁾、ECCSの方法¹³⁾、中井・酒造の方法¹⁴⁾を取り挙げ、文献7)で各手法の特徴を詳細に比較した。さらに、これらの各手法を用いて1層および2層のラーメンの耐荷力を計算し、有限要素法によって計算した、より厳密な値と比較した。その結果、有効座屈長法ではAISC法またはLRFD法、P-Δ法ではECCSの方法が柱の細長比の広い範囲に亘って精度が良いことが分かった。道示の有効座屈長は全般的に安全側過ぎる値を与えた。

そこで、有効座屈長法ではAISC法の考えを取り入れ、道示の方法を改良した方法を本論文での提案法とし、一方、P-Δ法では、ECCSとSSRCの方法を組み合わせ、初期部材回転角などに修正を行った方法を本論文でのP-Δ法の提案法とする。

有効座屈長法

ラーメンの柱部材は次式を満足するように設計する。

$$\frac{P}{P_u} + \frac{C_m M}{M_y (1 - P/P_E)} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{P}{P_y} + \frac{M}{M_y} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$C_m = 0.85 \quad (3)$$

ここで、 P_u = 有効座屈長を用いて計算した中心軸圧縮柱の強度、 P_E = 有効座屈長を用いて計算したオイラー座屈強度、 P_y = 全断面降伏軸力、 M_y = 降伏モーメント、 P = 軸力、 M = 部材両端の曲げモーメントの絶対値の大きい方である。有効座屈長 K は、 P_u と P_E の計算に用いられるが、これは、次式より求める¹⁵⁾。

$$K = \sqrt{\frac{1.6 + 2.4(\xi_1 + \xi_2) + 1.1\xi_1\xi_2}{\xi_1 + \xi_2 + 5.5\xi_1\xi_2}} \quad (4)$$

$$\text{ここで、} \xi_1 = 1 / (1 + G_t), \xi_2 = 1 / (1 + G_b) \quad (5)$$

であり、 G は拘束係数で次式で定義される。

$$G = \frac{\text{柱の剛度の和}}{\text{はりの剛度の和}} = \frac{\sum (I/L)_{\text{column}}}{\sum (I/L)_{\text{beam}}} \quad (6)$$

なお、式(5)の G の添字 t 、 b は柱の上端、下端を表す。

はり部材については、各断面で式(2)が満足されるように設計すればよい。

P-Δ法(図-2参照)

P-Δ法の基本的計算手順は以下のようである。

(a) 仮定した各層の部材回転角 Ψ_i より次式により i 層の層せん断力を求める。

$$V_i = (\sum P)(\Psi_i^0 + 1.2\Psi_i) \quad (7)$$

ここで、 $\sum P$ = i 層の柱の軸力の和である。また、 Ψ_i^0 は i 層の初期部材回転角であるが、この量はAppendixの式(A.1)を用いる。

(b) 換算水平力 H_i' を次式より求める。

$$H_i' = H_i + (V_{i-1} - V_i) \quad (8)$$

ここで、 H_i = 床レベル i に作用する水平荷重(図-1, 2参照)。

(c) H_i' を各床レベルに作用させ、弾性1次解析により各層の部材回転角を求め、これを仮定した部材回転角と比較し、収束していなければ新に求めた部材回転角を Ψ_i としてステップ(a)に戻る。

(d) 上の過程で求めた各部材の各断面の軸力 P 、曲げモーメント M が式(2)を満たすかどうかを照査する。

ステップ(a)での部材回転角 Ψ_i は水平荷重 H_i ($i = 1, 2, \dots$)のみを作用させた状態での弾性1次解析より容易に求められる。

P-Δ法の利点としては次の点が挙げられる：(1) 有効座屈長を求める必要がない。(2) 変断面ラーメンに対しても適用が簡単である。(3) 隅角部の設計の際に問題となるP-Δ効果を含めた断面力が直接算定できる。一方、欠点としては、次の点があろう：(1) 繰り返し計算が必要である。(2) 長方形ラーメンしか適用できない。

なお、たわみ角法を用いると、上記の計算過程(c)での繰り返し計算を避けることが可能である²⁵⁾。

3. 局部座屈を考えた部材の極限強度評価法

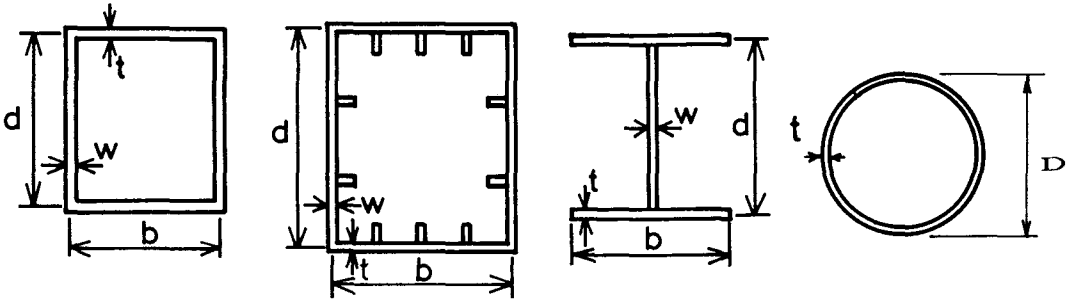
ここでは、局部座屈の影響を考えた部材の極限強度評価式について述べる。

(1) 断面の圧縮強度 Q

純圧縮を受ける短柱の局部座屈強度を断面の圧縮強度と考える。この量を図-3に示す種々の断面について統一的に求めるため、断面の強度は構成板要素の強度の和と考え、板要素間の連成効果を無視する。この仮定により、断面の圧縮強度 $Q = P_u / P_y$ は有効幅の概念¹⁾を用いて次式で表される。

$$Q = \frac{\sum Ae}{\sum A} \quad (9)$$

ここに、 A = 構成板要素の断面積、 Ae = 構成板要素の有効断面積、 $\sum$ = 構成板要素についての和を表す。



(a) 箱形

(b) 補剛箱形

(c) H形

(d) パイプ

図-3 断面形

構成板要素の有効断面積 A_e は次式で表されるものとする。

$$\frac{A_e}{A} = \frac{0.7}{R} \leq 1.0 \quad \text{両縁支持無補剛板} \quad (10)$$

$$\frac{A_e}{A} = \frac{0.85}{R} \leq 1.0 \quad \text{片持板} \quad (11)$$

$$\frac{A_e}{A} = 1.24 - 0.54 \cdot R \leq 1.0 \quad \text{等間隔補剛板} \quad (12)$$

$$\frac{A_e}{A} = f \cdot \left(0.8 + \frac{0.025}{R_t} \right) \leq 1.0 \quad \text{パイプ} \quad (13)$$

ここで、 R は幅 b 、厚さ t の板要素の幅厚比パラメータで次式で定義される。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (14)$$

ただし、 $k=4.0$ (両縁支持板)、 $k=0.429$ (片持板)、 $k=4n^2$ (n =補剛材で囲まれたサブパネルの数) である。等間隔補剛板については、補剛材剛比 γ は道示の縦方向補剛材必要剛比 γ_{req} 以上とする。また、式 (13) の R_t は次式で表される⁹⁾。

$$R_t = 1.65 \frac{\sigma_y}{E} \frac{D}{2t} \quad (15)$$

ここで、 D =円管の直径である。式 (13) は製作管の短柱実験から得られた式⁹⁾であり、純圧縮に対しては $f=1.0$ とおく。

式 (9) は、例えば図-3 (a) の無補剛箱形断面のときは、次式の様になる。

$$Q = \frac{b_o t + d_o w}{b t + d w} = \frac{b_o / b + (d_o / d) (d w / b t)}{1 + d w / b t} \quad (16)$$

ここで、 b_o 、 d_o はそれぞれ幅が b 、 d の板要素 (ウェブ、フランジ) の有効幅であり、 b_o / b 、 d_o / d に式 (10) の A_e / A を代入すれば Q は求まる。

このようにして求めた短柱の局部座屈強度 Q_{comp} を実験値 Q_{exp} と比較したものが図-4 (箱形、補剛箱形、H形) である。また、パイプ断面短柱について局部座屈強度の推定曲線 (式 13、但し $f=1.0$) と実験値を比較したものが図-5 である。

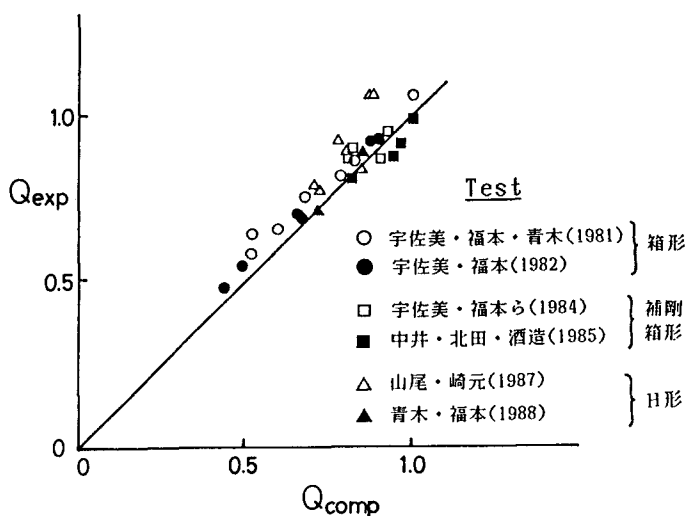


図-4 短柱の強度（箱形，補剛箱形，H形）

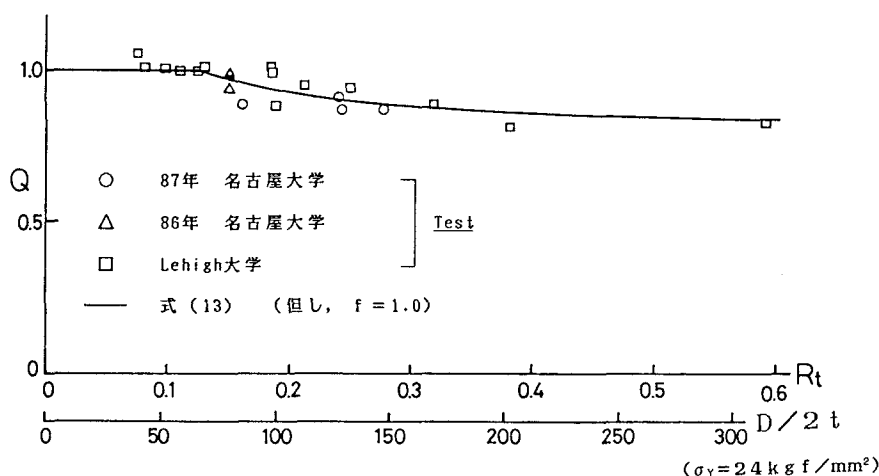


図-5 短柱の強度（パイプ）

(2) 断面の曲げ強度 Q_B

断面が曲げモーメントを受けた場合，圧縮フランジ部は局部座屈を起こし，有効断面が減少する．それに従って中立軸も移動する．これらを考慮に入れた無補剛および補剛箱形断面の曲げ強度 $Q_B = M_u / M_y$ の算定式は文献1)，3)，23)に見られる．ここでは，それらの式より安全側の評価式として，中立軸の移動を無視し，圧縮フランジの有効幅のみで評価する次式を用いる．

$$Q_B = \left[\frac{A_e}{A} \right] \text{ 圧縮フランジ} \quad (17)$$

ただし、H形断面の弱軸まわりの曲げの場合には $Q_B=1.0$ とする。また、パイプ断面の場合には、式(13)を用い、式中の f としては1.2を用いる^{8),9)}。

なお、式(17)はウェブの座屈を無視した式であるが、ラーメン構造物の構成部材断面ウェブは純曲げ状態で座屈することはないと考えられるのでこのような仮定を行った。

(3) 中心軸圧縮柱強度 P_u

局部座屈の影響を考えた中心軸圧縮柱の強度は次式で求める。

$$\begin{aligned} \frac{P_u}{Q P_y} &= 1.0 & (\bar{\lambda}' \leq 0.2) \\ &= 1.109 - 0.545 \bar{\lambda}' & (0.2 \leq \bar{\lambda}' \leq 1.0) \\ &= \frac{1}{0.773 + \bar{\lambda}'^2} & (\bar{\lambda}' \geq 1.0) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}' = \sqrt{Q} \bar{\lambda} \quad (19)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{KL}{r} \quad \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (20)$$

ここで、 K =有効座屈長係数(式4)， L =柱の長さ， r =断面2次半径である。

図-6、7はそれぞれ箱形断面、H形断面の弱軸回りの座屈に対する中心軸圧縮柱の実験結果を式(18)と比較したものである。2、3の実験結果を除いて式(18)は安全側の式となっている。

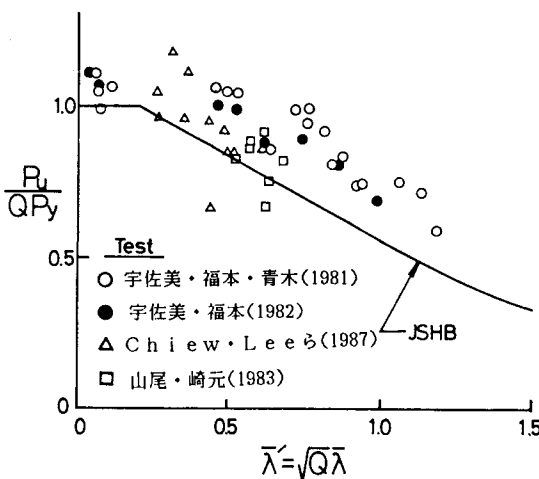


図-6 中心軸圧縮柱(箱形断面)

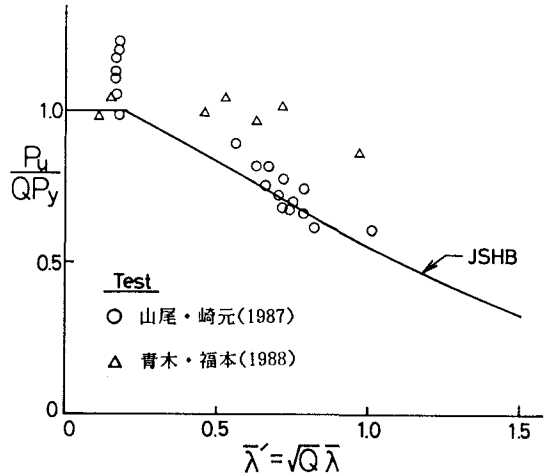


図-7 中心軸圧縮柱(H形断面)

(4) 圧縮力と曲げを受ける部材の極限強度照査式

軸方向圧縮力と両端に曲げモーメントを受ける部材の安定性照査は、式(1)、(2)に局部座屈の影響を考えた次式を用いる。

$$\frac{P}{P_u} + \frac{C_m M}{M_u (1 - P/P_E)} \leq 1.0 \quad (21)$$

$$\frac{P}{Q P_y} + \frac{M}{M_u} \leq 1.0 \quad (22)$$

$$M_u = Q_B M_y \quad (23)$$

ここで、 P_u =式(18)、 Q =式(9)、 Q_B =式(17)、 C_m =式(3)である。

両端単純支持の箱形および補剛箱形柱が等偏心圧縮力を受ける場合の実験より求められた耐荷力と式(21)(ただし、支点移動がないので $C_m=1.0$ と置く)を比較したものが図-8であり、式(21)は良好な下界曲線となっていることが分かる。また、有限要素法によるより厳密な解析結果との比較は文献5)に述べてある。

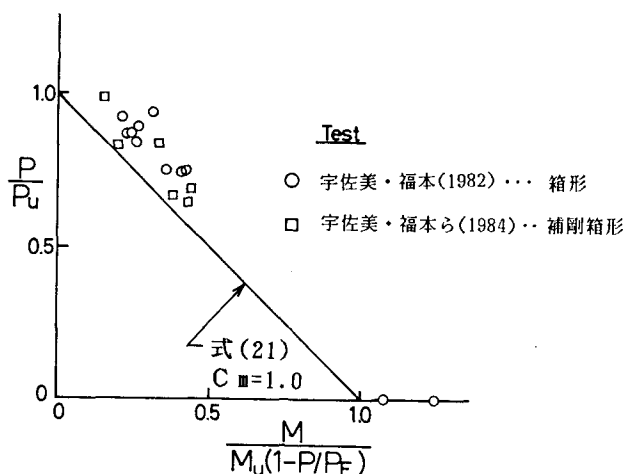


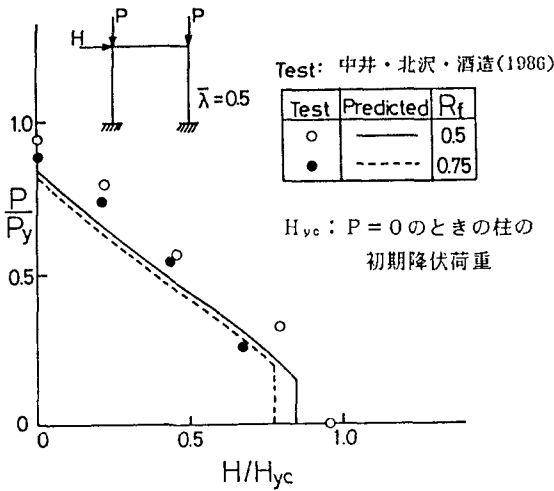
図-8 偏心圧縮柱(箱形, 補剛箱形断面)

4. 局部座屈を考慮したラーメンの極限強度評価法

前節で述べた手法を用いて、局部座屈の影響を考慮したラーメンの極限強度評価法について述べる。

有効座屈長法

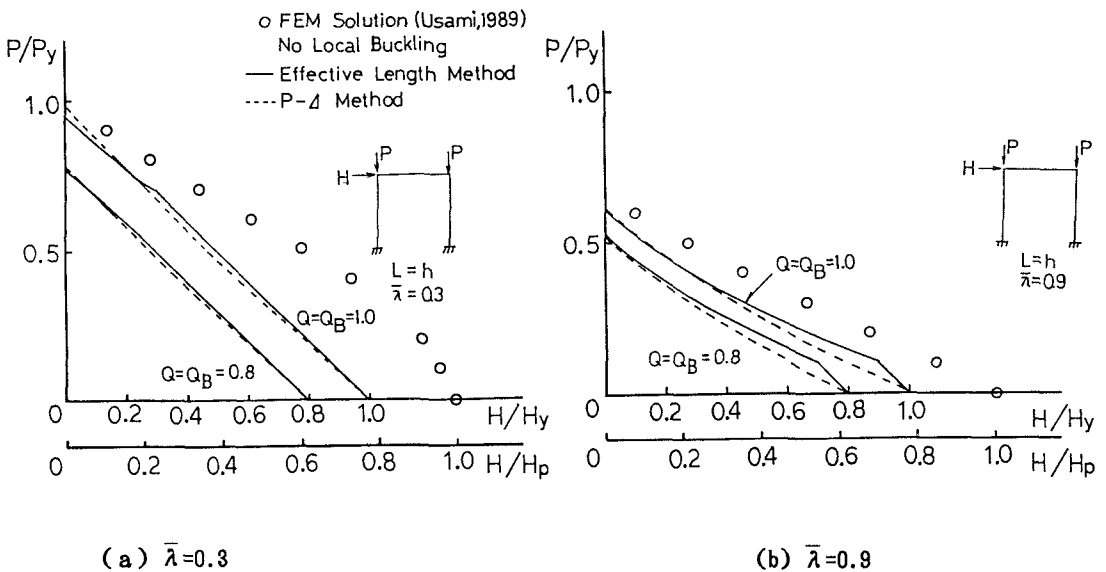
柱部材の強度照査式として式(21)、(22)、はり部材の強度照査式として式(22)を用い、有効座屈長として式(4)～(6)を用いる。局部座屈のない時は $Q=Q_B=1.0$ となって2.で述べた方法と同一である。この手法で求めた1層ラーメンの耐荷力相関式を実験結果²²⁾と比較したものが図-9である。1例を除き、式(21)、(22)は安全側にあることが分かる。また、有限要素法によるより厳密な解析結果との比較は文献6)に述べてある。



図一 9 有効座屈長法と実験の比較（箱形断面ラーメン）

P-Δ法

断面の強度照査式（2）の代わりに式（22）を用いる．計算方法は2．で述べた方法とまったく同一である． 図一10は正方形箱形断面（SM50材で、 $Q = Q_B = 1.0$ および 0.8 ）よりなる一層ラーメン（有効座屈長係数 $K=1.16$ ）について、有限要素法⁷⁾、有効座屈長法およびP-Δ法より求められた強度相関式を比較したものである。有効座屈長法およびP-Δ法の結果はほぼ一致することが分かる。なお、図中の H_y 、 H_p は、それぞれ、 $P = 0$ のときのラーメンの初期降伏水平力及び単純塑性理論による崩壊水平力である。



図一 10 有効座屈長とP-Δ法の比較（箱形断面）

5. 結言

鋼平面ラーメン構造物の極限強度照査式と、それらの実験結果による検証について述べた。提案した照査式は、2, 3の数少ない例をのぞき、実験より得られた耐荷力に対して安全側になっていることが分かった。ラーメン構造物に対する今後の研究課題として次の点が挙げられよう。

- (1) 実際のラーメンの設計に際しては面外荷重も当然受けるので、面内、面外荷重が同時に作用したラーメン（立体ラーメン）の極限強度照査式を検討する必要がある。理論的研究は、現在進行中²⁴⁾であるが、実験的研究は皆無である。
- (2) 耐震設計の観点からは、ラーメン構造物の靱性に関する研究も必要である。すなわち、破壊までのエネルギー吸収が大きい部材断面構成はどのようなものかを、実験的、理論的に検討する必要がある。それには、最適設計の概念の導入も必要となてこよう。
- (3) 次に重要な検討課題は隅角部の設計問題であろう。現在の設計方法では、複雑な隅角部は有限要素解析により局所的な応力を検出し、それが許容応力以内に収まるようにしているようである。しかし、このような設計方法は、耐荷力の観点から見れば過度に安全になっていると思われる。

この論文は、昭和63年度文部省科学研究費補助金（総合研究A—代表者 福本嘯士大阪大学教授）による、第2回鋼構造物の極限強度の統一評価に関するシンポジウム（平成元年1月27日開催）で発表し論文に、修正、加筆を行なったものである。シンポジウムに於て有益なご意見を寄せられた諸氏に深謝したい。なお、この論文を作成するにあたって、平成元年度文部省科学研究費補助金（総合研究A—鋼構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究）および（試験研究（1）—変断面鋼ラーメン構造物の設計基準の開発と最適設計に関する研究）の補助を受けた。

APPENDIX

ECCS¹³⁾では、初期部材回転角として1/200を採用しているが、本論文では、2で述べた有効座屈長とP-Δ法より求められる強度がほぼ等しくなる条件より求められた次式の初期部材回転角を採用する。詳細については、文献25)で述べる。

$$\Psi^0 = 0.25 \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} (\bar{\lambda} - 0.2) \quad (\text{A. 1})$$

ここで、 Ψ^0 はi層の柱の初期部材回転角、 $\bar{\lambda}$ はi層の柱の細長比パラメーター（式20）である。

参考文献

- 1) 宇佐美勉・福本嘯士・青木徹彦：溶接箱形断面柱の局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，第308号，1981年4月。
- 2) 宇佐美勉・福本嘯士：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，第326号，1982年10月。
- 3) 宇佐美勉・福本嘯士・青木徹彦・松川昭夫：補剛箱形断面偏心圧縮柱の強度に関する実験的研究，土木学会論文集，第350号／I-2，1984年10月。
- 4) 宇佐美勉・土屋信洋・大谷恭弘・福本嘯士：薄板集成短柱の弾塑性有限変位解析，土木学会論文集，No.362／I-4，1985年10月。
- 5) 宇佐美勉・土屋信洋・福本嘯士：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，No.362

／I-4, 1985年10月.

- 6) 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／I-10, 1988年10月.
- 7) 宇佐美勉・垣内辰雄・水野克彦：鋼ラーメン構造物の合理的設計式の一提案，土木学会論文集，第404号/I-11, 1989年4月
- 8) 宇佐美勉・青木徹彦・和田匡央・加藤正宏：鋼管短柱の圧縮および曲げ耐力実験，土木学会論文集へ投稿中.
- 9) 土木学会：鋼構造物設計指針，PART A 一般構造物，1988年.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980年2月.
- 11) AISC: Specifications for the Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel for Buildings, Nov., 1978.
- 12) T.V.Galambos ed.: Guide of Stability Design Criteria for Metal Structures, 4th. ed., John Wiley & Sons, 1988.
- 13) U.Vogel: Recent ECCS-Developements for Simplified Second-Order Elastic and Elastic-Plastic Analysis of Sway Frames, Stability of Metal Structures, Final Report, Paris, 1983.
- 14) 中井博・酒造敏広・大垣賀津雄：鋼薄肉ラーメン構造物の限界強度の近似計算法，土木学会論文集，No.380/I-7, 1987年4月.
- 15) G.Ballio, F.Mazzolani: Theory and Design of Steel Structures, Chapman and Hall, 1979.
- 16) H.Nakai, T.Kitada, T.Miki: An Experimental Study on Ultimate Strength of Thin-Walled Box Stub-Columns with Stiffeners Subjected to Compression and Bending, Proc.JSCE, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol.2, No.2, Oct.1985.
- 17) 山尾敏孝・崎元達郎：薄肉H形短柱の耐力挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，第380号／I-7, 1987年.
- 18) 青木徹彦・福本嘯士：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, 1988.
- 19) Chiew, S.P., Lee, S.L. and Shanmugam, N.E.: Experimental Study of Thin-Walled Steel Box Columns, J. Struc. Eng., ASCE, Vol.10, Oct. 1987.
- 20) 山尾敏孝・崎元達郎：溶接箱形断面柱の連成座屈強度実験，土木学会論文報告集，第335号，1983年.
- 21) 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，第380号／I-7, 1987年.
- 22) H.Nakai, M.Kitagawa and T.Miki: A Study on Critical Strength of Thin-Walled Steel Frames Subjected to Combinations of Vertical and Horizontal Loads, Proc. of JSCE, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol.3, No.1, 1986.
- 23) 福本嘯士編：座屈設計ガイドライン，第8章，土木学会，1988.
- 24) 小野弘泰・宇佐美勉：局部座屈を考慮した軸力と2軸曲げを受ける部材の強度と設計，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，1989年10月.
- 25) 宇佐美勉：P- Δ 法に関する1考察，土木学会45回年次講演会にて発表予定

(1989年10月2日受付)