

有効座屈長を用いた部材設計の 全体骨組耐荷力に関する精度

ACCURACY OF THE EFFECTIVE LENGTH BASED MEMBER DESIGN FOR THE OVERALL
STRENGTH OF STRUCTURES

井上純三* 竹中秀夫** 長谷川彰夫*** 西野文雄****

By Junzou INOUE, Hideo TAKENAKA, Akio HASEGAWA, Fumio NISHINO

In the present design, the safety of the structure is checked in terms of stresses in component members and cross sections rather than analyzing the whole structure. Particularly for the steel compression members and frames, an appropriate approximate design formula is used to account for the material and geometrical nonlinearities involved in the structural behavior. Although this practical design method is commonly used, it is necessary to re-examine the accuracy of the design formula including the evaluation of the effective length and to confirm the rationality of the present member-based design. In this paper, an ultimate strength analysis of the optimized structure is performed to compare the design strength with the theoretically exact ultimate strength.

1. まえがき

現在の構造物の設計では、限界状態に対する照査を構造物全体に対する照査に代え、各部材・断面における照査という形で行なうのがふつうである。この部材・断面単位の照査による設計法は、個々の部材・断面の安全を確保することにより構造全体の安全性の確保が可能であるという基本的な設計思想に基づいている。しかし、全体構造を弾性微小変位解析で、部材強度の評価を非弾性有限変位解析で行う現行の部材単位の設計法は、構造物全体に対する耐荷力解析の代替としての実用設計上の便法であるとも考えられ、構造物の持つ真の耐荷力を評価する精度という点に関しては検討の余地がある。

限界状態として骨組の耐荷力現象を取り上げ、現行の部材単位の設計法について考える。現行の設計基準における耐荷力規定では、構造全体の耐荷力解析のかわりに各断面における応力照査という形で耐荷力に対する照査が行なわれている。圧縮部材の強度は、単純支持の柱に対して与えられる細長比をパラメータとする耐荷力曲線から評価されるため、特に骨組中の圧縮部材に対してはこれを等価な単純支持の柱に置き換えた時の換算長、すなわち有効座屈長という概念を用いることにより設計上対処している。従って、部材単位の耐荷力設計を行なうとき、有効座屈長の正確な評価が重要な課題となる。

* 工修 建設省土木研究所 構造研究室 (〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭1)
** 東京大学大学院 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)
*** 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)
**** Ph.D. アジア工科大学副学長(タイ国バンコク市)。 (東京大学より海外派遣)

現行の道路橋示方書等では、圧縮部材の有効座屈長を構造物の形式、境界条件に応じて大まかに定めてはいるが、骨組部材の有効座屈長は本来、荷重条件や剛性分布にも依存するため、任意の荷重条件、構造、変断面部材に対しては、現行示方書での対応が難しい。より合理的で一般性のある有効座屈長を得るためにはこれを骨組全体の座屈解析により定めることが望ましい。また現在の発達したコンピュータを用いれば、大規模な線形固有値計算も容易である。この観点から、骨組全体の固有値解析により各圧縮部材の有効座屈長を定める手法についての研究が行なわれている¹⁾。

ここでは、現行の部材単位の設計法により最適設計された構造物に対して耐荷力解析を行なうことにより、有効座屈長による部材設計法の妥当性を検証する。また現行設計基準の有効座屈長を用いた設計法を現行法、固有値解析による有効座屈長を用いた設計法を固有値法と定義し、この両方法の比較を行ない実用設計への適用を含めた有効座屈長評価手法の合理化への道を探る。

2. 有効座屈長による部材設計

(1) 骨組部材の設計式

骨組の耐荷力に対する安全性は、骨組全体の形状・剛性分布の他、荷重分布にも依存するため、本質的には、構造全体として評価されるべきものである。しかし、個々の部材設計を基本として体系化されている現在の設計法では、骨組全体の耐荷力に対する安全性を特に検討するわけではなく、各部材断面における照査という形で設計が行なわれている。具体的には、圧縮部材の柱としての強度を細長比をパラメータとする耐荷力曲線より定め、作用応力と共に応力照査の設計式に代入して、これが満足されていることを確認するという手続きをとっている。

議論を簡単にするために面内にのみ変位する骨組を考え、局部座屈が生じないものと仮定する。このとき圧縮力と曲げを受ける部材の照査式は、道路橋示方書²⁾において次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} \frac{(1 - \sigma_c / \sigma_{oa})}{\sigma_{ba}} \leq 1 \quad (1)$$

ここに、 σ_c 、 σ_{bc} は、骨組を弾性微小変位理論により解析して求めた軸圧縮応力度、縁端曲げ圧縮応力度である。 σ_{ca} 、 σ_{ba} は、許容軸圧縮応力度、許容曲げ圧縮応力度、 σ_{oa} は、許容オイラー座屈応力度である。式(1)はいわゆる梁一柱と呼ばれる線形化有限変位理論の解に柱の非弾性座屈の影響を反映させたもので、軸圧縮力と曲げが同時に作用したときの骨組部材の限界状態を表現している。骨組全体の座屈は、有効座屈長を介して σ_{ca} に、付加曲げモーメントは σ_{bc} の補正項 $1 / (1 - \sigma_c / \sigma_{oa})$ によりそれぞれの影響を考慮している。また材料の非弾性的性質は σ_{ca} 、 σ_{ba} の耐荷力式で考慮している。

式(1)は、幾何学的非線形性と材料の非弾性的性質を取り込んだ形の設計式となっているが、このような近似的な照査式により構造全体の耐荷力照査は本当に可能か、また耐荷力を精度良く評価できるかは検証する価値がある。また式(1)の精度は有効座屈長の取り方に大きく依存するため、有効座屈長の評価法の合理化についても検討を行なう。

(2) 骨組部材の有効座屈長

圧縮部材の有効座屈長はその境界条件により変化する。単一部材に対してはその評価は容易であるが、骨組中の部材の有効座屈長は骨組全体から決まるため隣接部材の拘束効果を含めた境界条件の他、荷重条件に

も依存する。しかしながら、現行示方書においては荷重条件に合わせて骨組部材の有効座屈長を規定する煩雑さを避け、代表的な構造・境界条件に対して簡便な形で有効座屈長が定められている。従って任意の構造、荷重条件にある骨組部材や変断面部材に対する明確な規定はなく、設計上の対応は難しい。設計者の判断によって近似的な有効座屈長を用いたとき、場合によっては座屈に対する安全性が十分に確保されない事態も起こり得る。

骨組部材の有効座屈長は、骨組の座屈解析から求めることが望ましい。設計実務作業の中でのコンピュータの活用が日常化している現在、実用設計のレベルにおいても構造全体の固有値解析により有効座屈長の評価を行ない、設計の精度及び信頼性を高めることが検討されて良い。

(3) 固有値解析による有効座屈長の評価

構造物を構成する部材の座屈軸力 N_{cr} により有効座屈長 l_e は骨組線上の任意の断面 a において次のように定義される。

$$(l_e)_a = \pi \times \sqrt{(EI)_a / (N_{cr})_a} \quad (2)$$

ここに EI は曲げ剛性である。 l_e を断面で定義したのは、変断面部材に対してもこれを階段状に断面変化する部材に理想化し、断面変化するところに節点を設けその節点間での断面に対する有効座屈長を定義するときの便利を考えたためである。座屈軸力 N_{cr} を設計荷重作用下での各部材断面力が、骨組が弾性的に不安定になるまで比例的に増大したときの発生軸圧縮力であると仮定すると、 N_{cr} は設計荷重作用下の軸圧縮力 N により次式で与えられる。

$$N_{cr} = \lambda_g \times N \quad (3)$$

ここに λ_g は次の固有値方程式の最小固有値である。

$$(K_0 + \lambda_g K_g(N)) U = 0 \quad (4)$$

ここに K_0 は微小変位剛性行列、 $K_g = K_g(N)$ は設計荷重作用下の軸圧縮力 N により得られる幾何剛性行列、 U は変位ベクトルである。

この固有値解析による有効座屈長評価法にも次のような要因に起因する誤差が含まれている可能性がある。

- i) 座屈現象は本質的に有限変位問題、すなわち荷重による変位が無視できない問題と考えてよく、不安定状態が近づいたとき荷重と応答とは必ずしも比例関係にはない。
- ii) 実構造物では弾性的に座屈するようなスレンダーな構造はまずないといってよく、弾塑性座屈耐荷力が終局強度を支配すると考えられる。

これらの理由から、固有値解析により定められる有効座屈長をもとに算出されるところの設計で期待する構造物の設計強度が真に破壊時の耐荷力を近似するかどうかは難しい問題である。しかしながら、固有値法は、通常の構造解析に加えて特に煩雑な非線形繰返し計算を要するというわけではなく、1回の線形固有値計算で有効座屈長が算出できるという簡便さがある。また非弾性座屈荷重に対する有効座屈長を算定するのは実用上困難であると考えられ、非弾性効果は現行のように耐荷力式により反映させるのが实际的である。

3. 部材設計による設計強度と耐荷力

(1) 設計断面の決定と設計強度の評価

有効座屈長による部材設計法の妥当性を、全体構造の耐荷力解析を行なった結果としての理論的に厳密な耐荷力と設計強度との相関性という観点から検証することを考えた。有効座屈長の評価方法としては、現行法と固有値法との2通りを考え、それぞれの方法で最適設計して得られた設計断面に対して耐荷力解析を行なう。最適設計された構造物を対象とするのは、ユニークで同一レベルでの検証及び比較を行なうためである。

使用可能な一定材料を与えたとき、設計強度を最大化するように断面配分したときの部材断面をもって設計断面とする。部材単位的设计において骨組の設計強度は、各部材に対して評価された設計強度の最小値の部材断面配分に関する最大値によって決まる。骨組部材を等断面部材と仮定すると、与えられた一定の材料体積のもとで設計断面を決定する際のアロリズムは部材の断面積 A を独立変数として次式で与えられる³⁾。

$$\begin{aligned} & \text{find } A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\} \\ & \text{such that} \\ & P_{\max} = \max_A \{ \min_j P_j(A) \} \quad \text{subject to} \quad \sum_{i=1}^n A_i l_i = \text{const.} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに P は骨組の設計強度、 P_j は部材 j の設計強度、 l は部材長である。部材設計強度は、式(1)の左辺 = 1 を満足する適用荷重として与えられる。局部座屈や横倒れ座屈が生じないものと仮定すると式(1)中の許容応力度式は道路橋示方書により次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = \sigma_v / 1.7 \times \begin{cases} 1.0 & (0.0 < \lambda \leq 0.2) \\ 1.0 - 0.545(\lambda - 0.2) & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ 1.0 / (0.773 + \lambda^2) & (\lambda > 1.0) \end{cases} \quad (a)$$

$$\sigma_{ba} = \sigma_v / 1.7 \quad (b) \quad (6)$$

$$\sigma_{oa} = \sigma_v / 1.7 / \lambda^2 \quad (c)$$

ここに σ_v は降伏応力度、 λ は無次元化細長比である。

部材断面は2軸対称のI形断面とし、応力計算や後の耐荷力解析において必要な諸断面定数と断面積 A との関係をパラメータ ξ 、 η 、 ζ を導入することにより結びつけた。

$$\begin{aligned} A &= \xi I^{1/2} \\ A &= \eta W^{2/3} \\ A_w &= \zeta A \end{aligned} \quad (7)$$

ここに A は断面積、 I は断面二次モーメント、 W は断面係数、 A_w はウェブの断面積である。 ξ 、 η 、 ζ の値は2軸対称のI形断面柱及びはり一柱に対して得られた最適断面における値の一定近似値を用いることにした⁴⁾。

$$\xi = 0.85, \quad \eta = 0.95, \quad \zeta = 0.15 \quad (8)$$

(2) 耐荷力解析の方法と仮定

骨組構造の耐荷力を求めるに際しては、非弾性有限変位の耐荷力解析を行なう必要があるが、ここでは非弾性有限変位の耐荷力解析の精度良い近似値を得るために、平面骨組の非線形弾性有限変位解析を行なう。応力-ひずみ関係の経路は唯一とし、降伏前のヤング係数は $2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ であり、降伏後はゼロとする。材質は S S 4 1 ($\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$) とする。部材内において、応力は軸方向、断面方向共に変化し、その応力状態によってヤング係数も変化する。従ってこれらの変化を考慮に入れつつ剛性マトリクスを求めるために、部材断面中に網状の積分点を設定し、その位置でのひずみ、応力、ヤング係数を求めて数値的に体積積分を施した。これによって破壊に至るまでの部材軸及び断面方向への塑性域の広がり の追跡が可能となる。

断面は 2 軸対称の I 形断面であり、残留圧縮応力の最大値は、 $\sigma_r = 0.5 \sigma_y$ とし、上下フランジにおいては直線形の、ウェブにおいては 2 次曲線の分布形を描くものと仮定する。構造上避けることのできない初期たわみは、座屈モードを考慮し、部材長の $1/1000$ の半波正弦波カーブを仮定する。なおこの耐荷力解析においては、設計強度の評価のときと同様に局部座屈や横倒れ座屈は考慮していない。

(3) 骨組の設計強度と耐荷力

有効座屈長による部材設計の合理性を明らかにするために、基本的な骨組に対して設計強度と耐荷力との比較及び有効座屈長に関する現行法と固有値法との比較を行ない、有効座屈長評価手法の検討を試みる。

a) 2 径間連続柱

荷重条件による有効座屈長の差異が明白に現れる例題として Fig. 1 に示すような 2 径間連続柱を取り上げる。荷重条件は軸力比 α で与えられる比例荷重とする。現行示方書においてこのような 2 径間連続柱の有効座屈長に関する明確な規定はないため、現行法としては部材長 l を有効座屈長とする慣用の規定に従うものとする。

使用材料の総体積として $5.0 \times 10^4 \text{ (cm}^3\text{)}$ を与え、部材長 $l = 500 \text{ cm}$ とした。部材 1、2 を等断面に設計したときの無次元化細長比 λ は $\lambda = 0.646$ となり、弾塑性座屈する領域にある。現行法、固有値法による有効座屈長の評価法のそれぞれに対して最適設計を行なって得られた設計断面を Fig. 2 (a) に示す。 $\alpha = 0$ のときは両方法で等しい設計断面が得られているが、 $\alpha \neq 0$ のときは異なる設計断面が得られた。Fig. 2. (b) に設計断面において評価された各部材の有効長さ係数 $\beta = l_i / l$ と軸力比 α との関係を示す。現行法を用いたとき当然ながら、有効長さ係数 β は常に 1 となるが、固有値法を用いたときは、荷重条件、剛性分布の違いから 1 とは異なる、よ

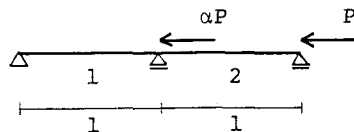


Fig.1 Two span continuous column.

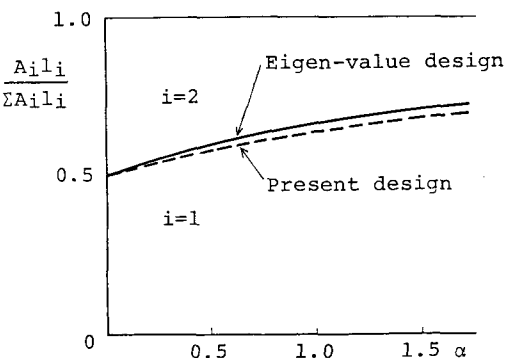


Fig.2(a) Design cross section.

り合理的と考えられる β 値が評価されている。

Fig. 2 (c) にこの構造物の持つ設計強度 $\times 1.7$ 及び耐荷力解析により計算された同じ構造物の耐荷力と軸力比 α との関係を示す。縦軸の $P_{max}/\sigma_y l^2$ は最適化された結果の最大荷重 P_{max} を降伏応力度 σ_y と部材長 l で無次元化したものである。両方法で設計断面に差異はあるものの、その差が小さいために設計強度と非弾性有限変位解析による耐荷力にほとんど差異が認められない。非弾性有限変位解析による耐荷力と設計強度との比は1.1程度であり、両者の相関が良いことに注目される。

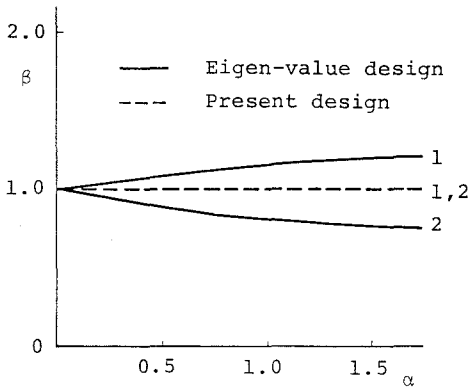


Fig.2(b) Effective length factor.

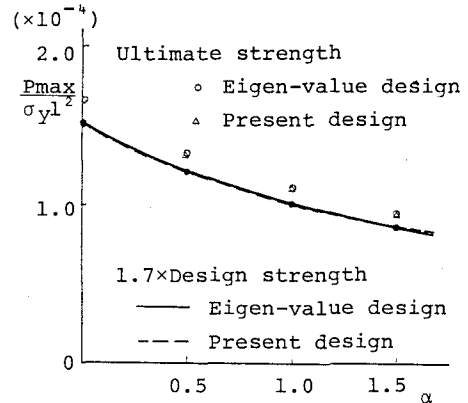


Fig.2(c) Design strength and ultimate strength.

b) 門型ラーメン

次に基本的な骨組構造として、Fig. 3に示すような門型ラーメンを取りあげる。荷重条件は、水平荷重の鉛直荷重に対する比率 α により与えられる。現行道路橋示方書では、ラーメン柱の有効座屈長は、均等ラーメン、すなわち、荷重条件、骨組形状が一樣であるようなラーメンに対して次に示す方法で算出された値が用いられている。

一般にラーメン柱の有効座屈長を、有効長さ係数 β を用いて、

$$l_e = \beta h \quad (9)$$

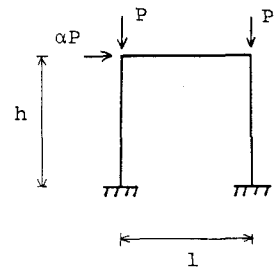


Fig.3 Rigid frame.

と表わしたとき、 β は、近似的に次式で評価される。⁵⁾

$$\frac{G_U G_L (\pi/\beta)^2 - 3.6}{6 (G_U + G_L)} = (\pi/\beta) \cot (\pi/\beta) \quad (10)$$

ここに G_U 、 G_L は格点 u 、 l に対してその格点に集まる部材についての剛比の総和である。

$$G = \sum (I_c/h) / \sum \mu (I_B/l) \quad (11)$$

ここに I_c は柱の断面二次モーメント、 I_B ははりの断面二次モーメントである。また、 h はラーメン柱材長、 l ははり部材長である。 μ はその格点での結合形式による補正係数であり、つぎの値をとる。

$\mu = 1.0$: 剛節点

$\mu = 0.5$: ヒンジ結合

$\mu = 0.67$: 固定

(12)

式(10)の β は、不均等な荷重条件(この例題では $\alpha \neq 0$ の場合)にあるラーメン柱に対しては、誤差を含むと考えられる。

現行法、固有値法による有効座屈長を用い、それぞれに対して最適設計を行なって得られた設計断面を Fig. 4 (a) に示す。ただし、ここでは、はり部材が圧縮部材としても機能するとき、はり部材の有効座屈長は格間長 l をとることにした。使用材料の総体積として 5.0×10^4 (cm³)を与え、部材長 $h = l = 5000$ cmとした。このとき、部材1, 2, 3を等断面に設計したときの無次元化細長比 $\bar{\lambda}$ は $\bar{\lambda} = 0.792$ となり、2径間連続柱の場合と同様に弾塑性座屈する領域にある。 $\alpha = 0$ のときは、両方法で等しい設計断面が得られているが、荷重条件が対称でない $\alpha \neq 0$ のときは異なる設計断面が得られている。しかし、その違いは小さく、最大でも $\alpha = 0.3$ のときの2.5%程度である。Fig. 4 (b) に設計断面において評価された柱部材の有効長さ係数 $\beta = l_e/l$ と軸力比 α との関係を示す。設計断面と同様に現行法と固有値法とでその差は小さい。

Fig. 4 (c) にこの構造物の持つ設計強度 $\times 1.7$ 及び耐荷力解析により計算された同じ構造物の耐荷力と軸力比 α との関係を示す。両方法で設計断面に差異はあるものの、その差が小さいために設計強度と非弾性有限変位解析による耐荷力にほとんど差異が認められない。非弾性有限変位解析による耐荷力と設計強度との比は1.2程度を保ち、2径間連続柱の場合と同様に両者の相関は良い。

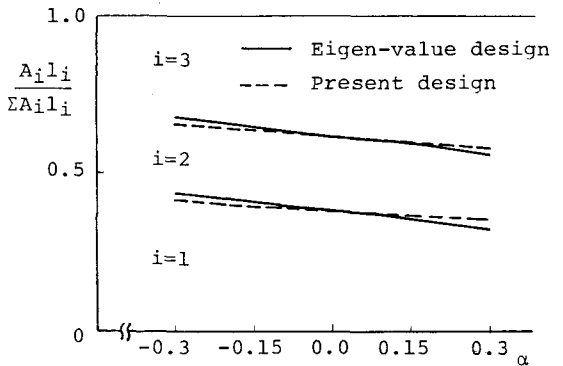


Fig.4(a) Design cross section.

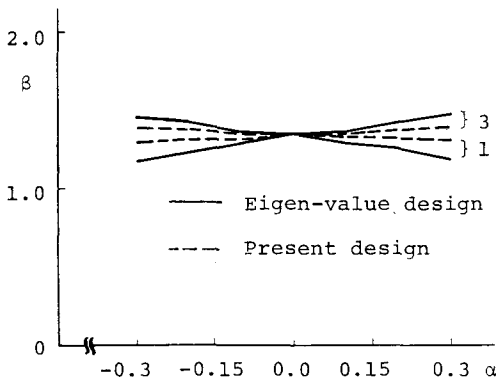


Fig.4(b) Effective length factor.

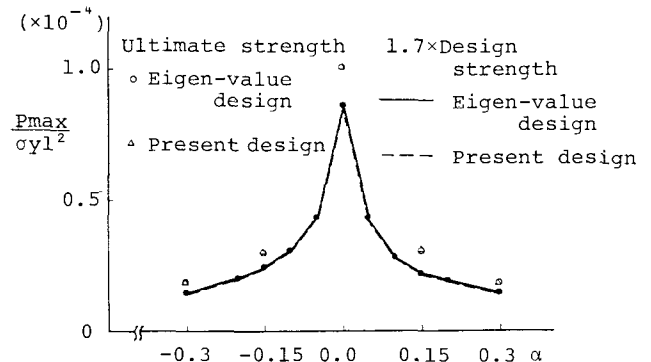


Fig.4(c) Design strength and ultimate strength.

4. 実用設計における固有値法の適用上の検討

(1) 微小軸圧縮部材の座屈設計

有効座屈長による部材設計を行なうとき、構造・部材の形式、荷重条件によっては、特に厳密な有効座屈長を用いなくても実用上問題がない場合があると考えられる。3.の(3)b)の例題で水平荷重パラメー

タ α の値が小さいときははり部材がこのような場合の一例として挙げられる。このとき、はり部材には小さい軸圧縮力しか作用しないため、本質的にははり部材としてのみ設計すれば良く、仮に柱としての設計を行なう場合でも、部材長を有効座屈長とする便宜的な方法で対処できると考えられる。同様なことが、山型ラーメンの斜めはり部材に対してもあてはまる。このときは、斜めはり部材の水平傾斜角がパラメータとなり、傾斜角の減少に応じて発生軸圧縮力が小さくなり、はり部材としての機能が卓越する。しかし、これらの場合、圧縮に対する便宜的な設計を行なって良いかを判定するためのパラメータである軸力値や傾斜角の値に関する条件は明らかではなく、経験に頼らざるを得ないであろう。

(2) 微小軸圧縮部材に対する固有値法の適用

一方、これらの微小な軸圧縮力が作用する部材の有効座屈長を式(2)～(4)の固有値法により評価するとき、式(2)の分母の N_{cr} の絶対値が小さいために算出有効座屈長が非現実的に過大な値となる可能性がある。このような場合、固有値法適用の除外または適用上の工夫が必要である。ここでは、固有値に関して安全側の評価を与えつつ、有効座屈長を適切に評価する方法として、微小軸圧縮部材に付加的な軸力を導入する手法を考案した。

次の固有値方程式において、軸圧縮力 N_1 、 N_2 が、

$$(K_0 + \lambda_g K_g(N_1, N_2)) U = 0 \quad (13)$$

$$N_1 \gg N_2$$

の関係にあるとき、 N_2 の代わりに $\bar{N}_2$ として (Fig. 5 参照)

$$\bar{N}_2 = N_2 + \text{付加軸力} = \text{Max}(k N_1, N_2) \quad (14)$$

を考える。ここに k は、最大発生軸圧縮力 N_1 に対する付加軸力比である。この $\bar{N}_2$ を用いて、固有値方程式

$$(K_0 + \bar{\lambda}_g K_g(N_1, \bar{N}_2)) U = 0 \quad (15)$$

$$N_1 > \bar{N}_2$$

を解き、 λ_g 、 N_2 の代わりに、 $\bar{\lambda}_g$ 、 $\bar{N}_2$ を用いて式(2)より有効座屈長を評価する。加えるべき付加軸力の値、具体的には k の値は、付加軸力の変化に対する修正固有値 $\bar{\lambda}_g$ 及び修正有効座屈長 $\bar{L}$ の変動性を目安に決めることができるであろう。

Fig. 6に示す、鉛直荷重に対する比率が0.1の微小な水平力を受ける各部材ともに同一のI形断面を有する両端固定の門型ラーメンを考える。このときラーメンのはり部材は微小軸圧縮部材となり、固有値法の適用が問題となる。このはり部材に付加軸力を与えたときの固有値 $\bar{\lambda}_g$ とはり部材の有効座屈長 $\bar{L}$ の変動をそれぞれFig. 7 (a)、(b)に示す。付加軸力の導入による固有値の減少はわずかであり (Fig. 7 (a))、その結果、式(1)からも明らかなように、柱部材の有効座屈長はほとんど変化しないものの、はり部材に対して算出される有効座屈長が過大なることを避けることが可能になる (Fig. 7 (b))。

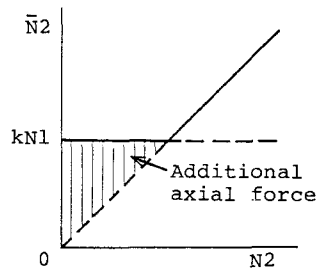


Fig. 5 Modified axial force.

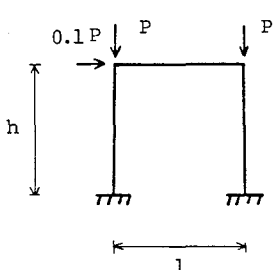


Fig. 6 Rigid frame.

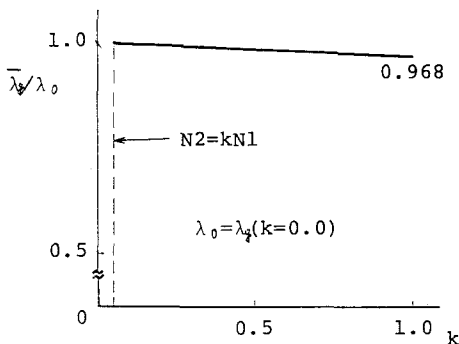


Fig.7(a) Modified eigen-value.

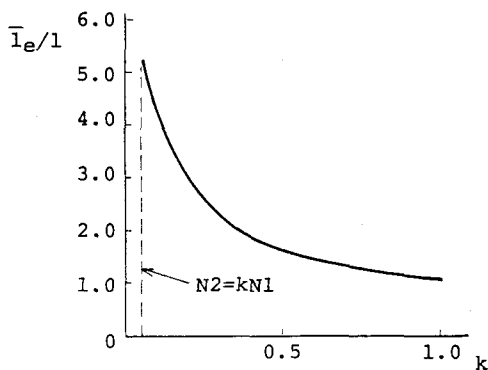


Fig.7(b) Modified effective length.

5. 考察

2 径間連続柱及びラーメンという基本的な骨組構造に対する数値計算結果において、耐荷力と設計強度との比は 1.1～1.2 程度であり、これはここでの計算で用いた骨組部材の断面形、すなわち I 形断面の形状係数に近い値になっている。圧縮力の他に曲げを受ける部材では、式 (1) による断面縁端部での照査から設計断面が決まるため、設計強度の評価においては断面の塑性性能が考慮されていない。これに対し、ここでの耐荷力解析においては、断面の局部座屈を考慮していないため、断面の塑性化が完全に期待され、断面の終局状態である全断面塑性状態に至るまでの耐荷力を評価している。従って、耐荷力と設計強度との違いは縁端降伏強度と全塑性強度の違いとしてこの差に現れたと判断できる。この差を除けば、構造物全体の耐荷力と部材照査を通して期待される設計強度とは、ほぼ等しくなる。このことから、経験を含め、何らかの形で実務設計において最適化の配慮がなされるとすれば、構造物の設計を部材単位の設計に置き換える現在の設計手法の合理性が認められる。

有効座屈長に関しては、現行法と固有値法とを用いて評価される有効座屈長値には差異が認められるものの、設計断面の違いは小さく、得られた構造物の有する耐荷力にも殆ど差はない。これは、ここでの数値計算で取り上げた例題が、それほど特殊な構造形式、荷重条件を持つものを対象としたものでないことによると思われる、この結果だけをもって現行の有効座屈長規定が十分な精度を持っていると結論づけるのは早計であろう。また固有値法に関しても、先に 2. の (3) で指摘したような誤差が実際に含まれることが耐荷力解析の過程で確認されている。これらの誤差が無視できなくなる程大きくなるのはどのような構造、荷重条件に対してかを把握しておく必要があるだろう。さらに、4. の (2) で指摘した微小軸圧縮部材に対する固有値法適用上の提案も、具体的な係数 \$k\$ の決め方について、さらに検討が必要であろう。これらを含めた実務設計に利用するための固有値法適用上の検討が待たれる。

6. 結論

固有値解析による有効座屈長評価の構造設計に対する適用について検討を加え、固有値法として具体的な提案を試みた。さらに、非弾性有限変位解析に基づいて骨組構造物の耐荷力を求め、現行設計法による部材設計の精度を検証すると同時に有効座屈長評価の手法としての現行法と固有値法との比較を試みた。以上の結果を次に要約する。

(1) 最適化された 2 径間柱、ラーメン等の基本的な骨組構造に対し、非弾性有限変位解析により求めら

れた耐力力は部材設計を通して期待される設計強度の1.1～1.2倍程度であり、構造物の設計を部材単位の設計で代用する現行の手法に特に問題は認められない。

(2) 耐力力と設計強度との差は、部材断面の形状係数の値に近く、塑性限界強度と弾性限界強度の差が現れたと判断できる。

(3) 有効座屈長に関する現行法と固有値法との比較を、算出有効座屈長値と耐力力という観点から行ったが、耐力力に関しては有意な差異は認められなかった。算出有効座屈長値に関しては、固有値法が現行法と比較して、荷重分布、剛性分布を考慮した合理性一般性のある値が得られており、より特殊な形状、荷重条件に対しては、固有値法の適用が望ましいと考えられる。

(4) 固有値法もまた誤差の原因となるいくつかの仮定を前提としているため、その適用にあたっては、実際の構造物の挙動との関連において問題点を説明しつつ、適切な運用を図る必要がある。

座屈現象は、非弾性による効果を含めるとかなり複雑な現象である。本報告では、曲げ座屈を取り上げ、骨組全体と部材との連成効果に着目したが、部材単位での局部座屈と全体座屈との連成問題等、設計レベルでこれらを合理的に取り扱うための研究がさらに進むことが期待される。

謝辞：本研究は文部省科学研究費による研究の一部として行われたものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) Nishino, F. and Hasegawa, A. : A PRACTICAL DESIGN FOR COMPRESSION MEMBERS AND FRAMES USING EIGEN-VALUE ANALYSIS. Third International Colloquium on Stability of Metal Structures held in Paris Nov. 16/17 1983.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II鋼橋編、丸善、昭和55年
- 3) 長谷川彰夫、阪上精希、松浦聖：最大荷重設計法による骨組構造の最適化、土木学会論文報告集、第321号、1982年5月。
- 4) 長谷川彰夫、岡崎光央、松浦聖：最大荷重設計法による柱およびはり一柱の最適設計、構造工学シンポジウム講演集、1981年2月。
- 5) T. V. Galambos：西野・福本共訳、鋼構造部材と骨組一強度と設計、丸善、1970年10月。