

弾性有限変位解析に基づく設計における 骨組構造の等価初期不整

ON THE EQUIVALENT INITIAL IMPERFECTION OF FRAMED COLUMNS
FOR THE DESIGN METHOD USING FINITE DISPLACEMENT ANALYSIS

野上 邦栄*・高木 真**・林 一輝***・成田信之****

By Kuniei NOGAMI, Makoto TAKAGI, Kazuki HAYASHI and Nobuyuki NARITA

This paper is a basic research to establish a verification procedure using elastic finite displacement analysis on the basis of the safety of the entire structure. The new design method is different from the conventional one in which safety of the structure can be obtained through securing the safety of individual members which make up the structure. In the new method which enables design of ultimate strength without the use of effective buckling length, a procedure which utilizes equivalent initial imperfection is introduced. The procedure for the determination of the magnitude and modes is presented for the case when the initial displacement are used as the equivalent initial imperfection.

Key Words : design, finite displacement, initial imperfection, frame

1. まえがき

鋼骨組構造物の実用的な座屈設計法として、現在有効座屈長法が規定に導入されている¹⁾。この設計法における終局強度解析は、材料および幾何学的非線形を考えた複合非線形問題となり、高度で幅の広い知識を必要とすること、客観性に欠けることなどの理由で設計者に委ねるのではなく、規定において陽に与えられている。このような設計法になったのは、過去の構造解析法に限界があったためではあるが、現在のように構造解析理論および電子計算機が著しく進歩していること、また設計技術者から有効座屈長の不合理性が指摘されていること^{3),4),5)}などを考え合わせる時、設計者に非線形解析を委ね²⁾、設計基準をわかりやすく、合理的なものに見直しを行い、より自由な設計へと進むことが考えられる。

安全性照査は、設計において重要な役割を果たすことになるが、中でも圧縮部材の座屈不安定に関する照査は重要である。しかし、多様化する構造幾何などの条件を的確に反映し得る平易な耐荷力相関式を誘導することはかなり困難であり、幅広に精度を高めようとするほど照査式は複雑になり、逆に簡易な照査式はその精度上適用範囲に自ずと限界が生じることになる。また、安全性照査に特に大きな影響を与えるのが有効座屈長であるが、この評価方法には種々の問題点を抱えている他、用いる設計式の精度を向上させるには限界がある⁷⁾。

このような状況において、国内外における許容応力度設計法から限界状態設計法^{6),19)}への移行の現況を踏まえ、設計上の観点から従来の有効座屈長を用いた耐荷力評価法に関する見直しが理論的および数値解析的に行わ

* 工博 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

** 清水建設土木東京支店技術部 (〒105-07 東京都港区芝浦 1-2-3-12)

*** NKK 津製作所鋼構造製造部 (〒514-03 三重県津市雲出鋼管町 1 番地)

**** 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

れており^{7),12)}、有効座屈長の概念にとらわれない新しい設計体系（非線形解析による設計法）の確立を考える時期に来ていえる。もちろん、その場合でも高度な理論による複雑な計算仮定を基礎にすることは適当ではなく、実務レベルに沿った設計法を考えるべきである。

本研究は、構造物を構成する個々の部材の安全性を確保することにより構造物全体の安全が確保できるとする従来の部材照査法に対して、強度に着目するかぎり全体系の耐荷力が確保できれば良いとする弾性有限変位解析による構造全体照査体系の確立を目指した基礎的研究である。特に、座屈設計が問題となるようなラーメン構造、およびその構成部材を対象にして、等価初期不整に初期たわみを用いた場合^{7),11)}のその形状および大きさを提示している。なお、ここでの等価初期たわみの大きさは道路橋示方書¹⁾における柱、およびはりの基準耐荷力曲線を厳密解と見なし、これらの値に一致するように決定している。

2. 弾性有限変位解析に基づく設計

現行の設計法は、部材単位の照査により構造物の安全性を保証する方法であるのに対して、弾性有限変位解析に基づく設計は、構造全体照査により安全性を保証する方法である。したがって、この設計法は構造物の終局強度に大きく影響する材料非線形特性、初期たわみ、局部座屈などを如何に考慮するかが重要な問題になる。本来、厳密な終局強度を求めるには弾塑性有限変位解析を行う必要があるが、この解析はまだ十分に精度が確認されている訳ではなく、汎用プログラムの整備も不十分なこと、さらには計算量の増大による経済性の問題から実設計に用いるのは時期尚早と考えられる。

そこで、現行設計と弾塑性有限変位解析を用いる設計の中間的な設計法として考えられた弾性有限変位解析に基づく設計法は、現行設計における線形解析からの急激な変化を避け、しかも弾塑性有限変位解析結果と同等の評価を可能にするように、構造物の初期たわみや残留応力などの複合非線形性を考慮した等価な初期たわみを導入して弾性有限変位解析を行う方法であり、照査荷重の基での弾性有限変位解析による設計断面力の終局限界状態の照査を行うことにより、構造物の安全性を確保することになる。

この設計法の具体的な手順は、表-1の流れ図にしたがって行うことになる。つまり、

- 1) 設計条件として構造物の形状、支持条件、荷重条件などを決定する。
- 2) 構造物の断面形状、寸法、材料などを仮定する。
- 3) 設計荷重、および照査のための安全係数 γ_f 倍した照査荷重を設定する。
- 4) 等価初期不整の形状や大きさを設定する。
- 5) 弾性有限変位解析により設計断面力 S_d を算出する。
- 6) 設計断面力 S_d と設計断面耐力 R_d の比較により限界状態の照査を行う。

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

もし、式(1)を満足しない場合断面を変更し、第2ステップに戻って繰り返し計算を行うことになる。

第3ステップにおいて、安全係数倍した照査荷重に対して構造解析を行うのは、構造の2次的変形や材料の非線形性の影響により断面に生じる応力と設計荷重との間の非線形性を配慮し、構造物を構成する部材が破壊に対して一様な安全率を満足させるためである。なお、安全係数は構造物の不確実性、構造物の重要度、限界状態に達した時の社会的影響、経済性などをも考慮して定められるものであり、構造物の施工中および耐用期間中の一定の安全性を保証する係数と考えられる。

第4ステップについては、設計技術者が、この段階で直接等価初期不整の形状・大きさを求めるのではなく、設計基準において構造物に対応して規定された形状・大きさを選択して用いれば良い。第3章は、この規定値を決定するための数値計算を行っている。

第5ステップでの弾性有限変位解析では、第4ステップにより仮定された等価初期不整を座標値として考慮することになる。設計断面力 S_d は、照査荷重の基、等価初期不整を考慮した弾性有限変位解析により算出するため、従来の設計荷重の組み合わせ荷重を用いて構造解析する場合よりも大きな非線形性の影響を考慮しているこ

表-1 弾性有限変位解析に基づく設計

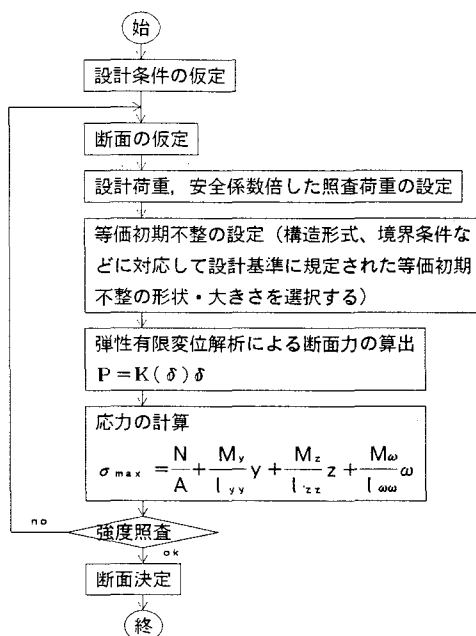
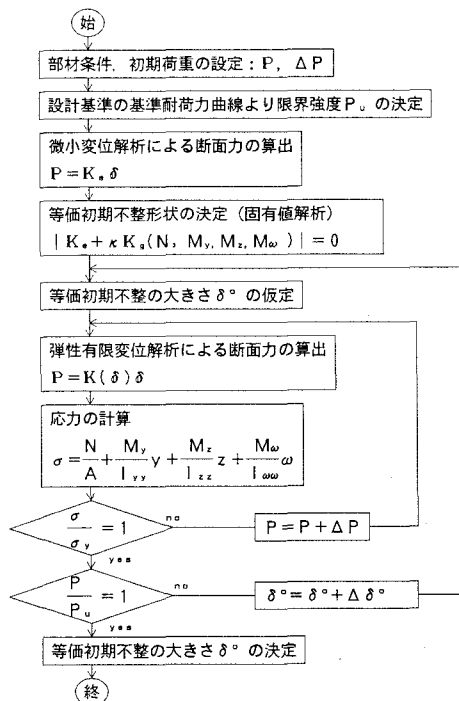


表-2 等価初期たわみの決定法



となる。一方で、非線形構造解析を行うため、従来のような各荷重ごとに算出した断面力の重ね合わせで、組み合わせ荷重状態の断面力を求めることはできない。なお、一般に非線形構造解析法は、基本となる理論により幾何学的非線形性の評価方法やその程度が異なる。しかし、これまでの実績、解析精度、経済性および汎用プログラムの整備等の面を考慮すると、鋼構造物の有限変位解析には線形化有限変位解析^{17),18)}が有効な計算法と考えられる。

設計断面耐力 R_d は、終局強度のレベルにより種々選択できることになる。具体的には、1) 弾性座屈強度や格点部耐力、2) 材料の降伏開始を限界とする弾性限界強度、3) 断面の塑性化により構造系が塑性ヒンジを形成する塑性限界強度、4) 構造物の崩壊という極限状態を限界とする終局限界強度などが考えられる。しかし、これらの目標とする終局限界状態については、不静定次数や変形能などの構造区分、厚肉、コンパクト、薄肉断面などの断面区分等を含んだ設計方針とも絡んでくる。

3. 等価初期不整の決定法

この設計法では、付加曲げモーメントなどの幾何学的非線形性は弾性有限変位解析において含まれることになるので、解析から求まる設計断面力と設計断面耐力を比較するだけで良く、照査は単純になる。しかし、たとえば軸方向力を受ける柱に対して弾性有限変位解析を行った場合、その耐力力は降伏軸方向力または弾性座屈荷重となるが、実際の耐力力は残留応力や初期たわみなどの影響により、弾性有限変位解析から求まる耐力力よりも小さくなる。したがって、骨組構造物あるいは部材の耐力力を求める場合に弾性有限変位解析を行うには何らかの配慮が必要になる。

従来は、初期たわみ、初期荷重偏心および残留応力等の不整要因の相乗作用やパラツキによる骨組構造の終局強度に与えるの影響を強度の側に安全率として考慮されているが、ここでは、等価な初期不整を全体構造系に

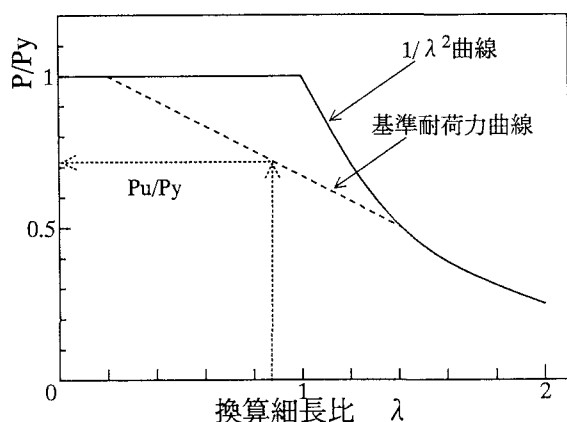


図-1 限界荷重

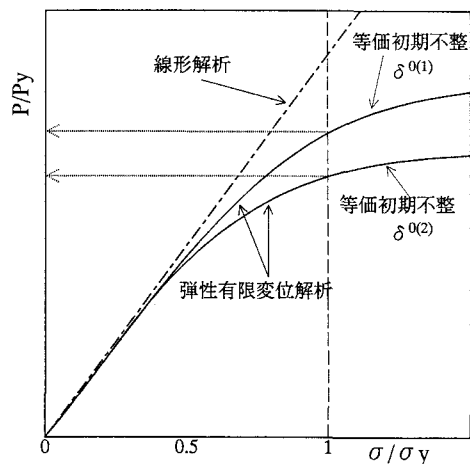


図-2 最大応力と初期降伏応力の関係

導入する方法により考慮している。等価初期不整を与えるということは、既存の設計体系において強度を低減することにより表している初期不整の影響を、構造解析に等価初期不整を導入して生じる付加曲げモーメントにより表すことを意味している。当然その際に与える等価初期不整は、様々な構造物に対して妥当な結果を与えるものでなくてはならない。

この等価初期不整には、(1) たわみ、(2) 荷重などを用いることが考えられる。特に、(1) の等価初期たわみについては、(a) 固有値解析による初期座屈モード形状を用いるか、(b) 架設、製作誤差としての初期変形モードを用いるか、(c) 設計荷重下での変形モードを用いるか、(d) さらには崩壊時の変形モードを用いるか、によりさらに区別できる。

ところで、前章の第4ステップの等価初期不整の形状および大きさを設計時に設定することは實際上困難であるため、規定において前もって陽な形で与えられていることが望ましい。そこで、ここでは座屈モード形状による(1)の等価初期たわみを用いた場合の決定方法について述べる。なお、設計における終局限界状態としては、初期降伏応力度 σ_y を考える。

いま、等価初期たわみの大きさと形状を決定する方法を示すと表-2のような手順になる。つまり

1. 初期条件の設定。

対象部材の断面諸元、材料特性 σ_y 、換算細長比 λ 、初期荷重 P 、増分荷重 ΔP を入力する。

2. 限界強度 P_u の決定。

対象構造および構成部材に対する終局強度 $P_u (= \sigma_{cr} A)$ は、厳密には弾塑性有限変位解析および耐力実験により明らかにする必要があるが、ここでは図-1のように設計基準などに定義された基準耐力力曲線に従う簡易法により定めるものとする。得られた耐力 P_u は、初期たわみや残留応力などの非線形性が考慮されていること、安全側の解であることから許容されるであろう。

3. 等価初期たわみ形状の決定。

等価初期たわみの形状は、式(2)の弾性固有値解析により得られる最小座屈荷重に対応する座屈モードに近い形状とする。

$$[K_E + \kappa K_G(N)] = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 K_E は微小変位理論における剛性行列、 K_G は基準状態における幾何剛性行列、 κ は最小固有値である。

4. 等価初期たわみの大きさの仮定。

初期たわみの大きさは第3ステップの座屈モードに対応する形状の最大振幅量(面内 w^0 、面外 v^0, ϕ^0)を仮定する。

5. 断面力の算出。

仮定された等価初期たわみを座標値として考慮した弾性有限変位解析により断面力を計算し、最大応力度 σ_{max} を求める。

$$K(\delta)\delta = P \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_{yy}}y + \frac{M_z}{I_{zz}}z + \frac{M_\omega}{I_{\omega\omega}}\omega \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 K は非線形剛性行列、 δ, P は変位、荷重、 M_y, M_z, M_ω は y, z 軸に関する曲げモーメント、そりモーメント、 y, z, ω は y 座標、 z 座標、そり関数である。

6. 最大応力と降伏応力の比較。

最大応力度 σ_{max} と降伏応力度 σ_y を比較し、もし σ_y に達していない場合、荷重 P を増加させ、第3ステップに戻って繰り返し計算をする。(図-2)

$$\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_y}\right) \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

7. 等価初期たわみ量の決定。

収束した時の荷重 P と第2ステップの限界強度 P_u を比較し、一致しない場合には等価初期たわみの大きさを修正して第3ステップに戻り繰り返し計算を行う。一致した時の等価初期たわみが求める解となる。

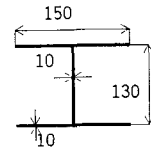
$$\left(\frac{P}{P_u}\right) \leq 1 \dots\dots\dots (6)$$

4. 骨組構造の等価初期たわみ

具体的な骨組構造として、I型および箱型断面を有する柱、一層ラーメン構造およびはりを取り上げ、前章の等価初期たわみの決定手順にしたがって各々の等価初期たわみの大きさを算出した。

(1) 柱

まず、柱の等価初期たわみ w^0 について数値計算を行うとともに、境界条件および基準耐荷力曲線の違いが等価初期たわみに与える影響について検討した¹³⁾。対象とした柱の断面形状は図-3に示すI型断面であり、柱の基準耐荷力曲線は、以下に示す道示およびECCS曲線¹⁴⁾を用いている。また、境界条件は単純支持、両端固定、および一端固定他端自由の3ケースを考慮している。



材質: SM41

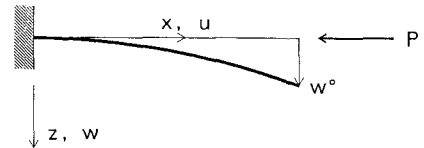


図-3 柱の断面諸元と座標

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq 0.2 \\ 1.109 - 0.545\lambda & 0.2 < \lambda \leq 1.0 \\ 1.0/(0.773 + \lambda^2) & \lambda > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

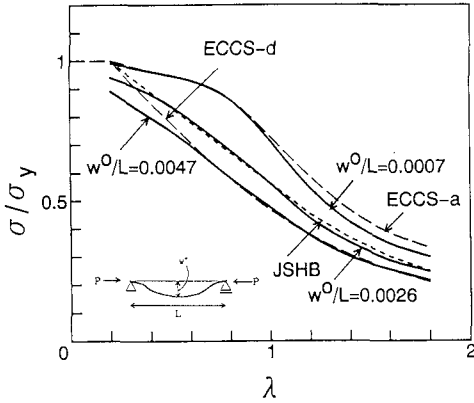


図-4 柱の限界強度曲線 (単純支持)

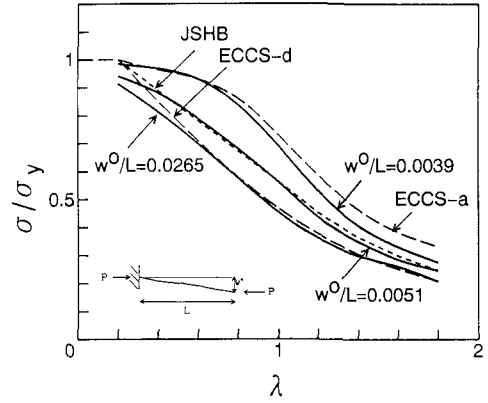


図-5 柱の限界強度曲線 (一端固定他端自由)

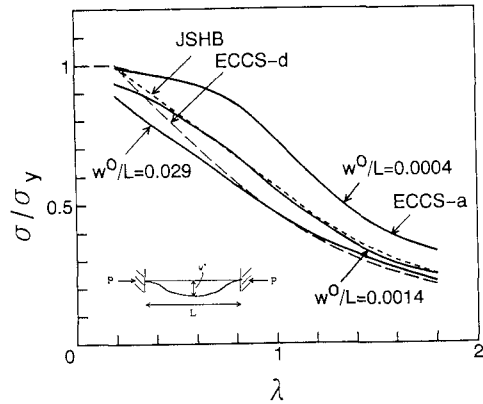


図-6 柱の限界強度曲線 (両端固定)

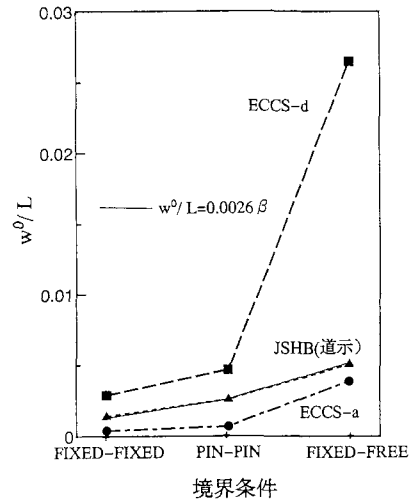


図-7 境界条件の等価初期たわみへの影響

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \left(\frac{\ell_e}{r} \right) \dots \dots \dots (8)$$

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq \lambda_0 \\ \frac{1}{2\lambda^2} \left[1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2 - \sqrt{(1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2)^2 - 4\lambda^2} \right] & \lambda > \lambda_0 \end{cases} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、ECCS-a 曲線の各係数は $\alpha = 0.206$, $\lambda_0 = 0.2$ 、ECCS-d 曲線は $\alpha = 0.756$, $\lambda_0 = 0.2$ である。

単純支持された $\lambda = 0.8$ の柱について、各基準耐力力曲線に対する等価初期たわみ w^0/L (L は部材長) を第 3 章の計算手順にしたがって求め、さらに、その w^0/L を一定にして λ の変化に対する限界強度曲線と厳密解としての基準耐力力曲線を比較したのが図-4 である。得られた等価初期たわみ w^0/L は、ECCS-a 曲線の場合 λ が長柱領域において、同様に ECCS-d 曲線の場合短柱領域で若干低めの値を示しているが全体として良い評価を示している。同様に、一端固定他端自由および両端固定の場合について解析した結果を示したのが図-5,6 であるが、単純支持の場合と同様の解曲線を得た。したがって、各境界条件において柱の等価初期たわみは、 λ の全領域に対して一定値で与えることができることが明らかになった。

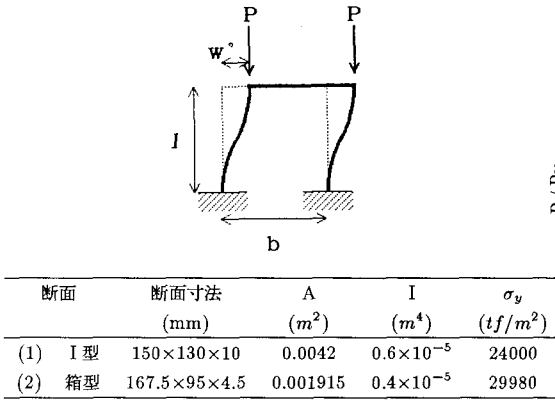


図-8 一層ラーメン構造の断面諸元

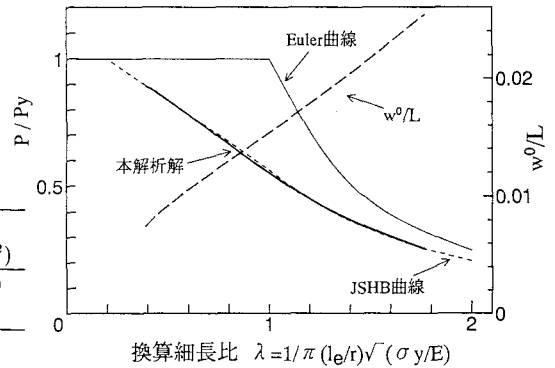


図-9 等価初期たわみと限界強度曲線

さらに、境界条件による等価初期たわみへの影響についてまとめたのが図-7である。最も低めの耐荷力曲線を表す ECCS-d 曲線の場合、一端固定他端自由の等価初期たわみは $w^0/L = 0.0265$ とかなり大きな値を示した。また、道示の基準耐荷力曲線 (JSHB) および ECCS-a 曲線では、境界条件による影響は少ないことが明らかになった。特に道示の基準耐荷力曲線を用いた場合の等価初期たわみは、有効座屈長係数を β と置くならば

$$w^0/L \doteq 0.0026\beta \dots\dots\dots (10)$$

の関係式により近似できる。

(2) 一層ラーメン構造

次に、鉛直荷重が作用する一層ラーメン構造の等価初期不整について数値計算を行った¹⁵⁾。用いた断面諸元は、図-8の一樣断面を有する両端固定の横拘束のない一層ラーメン構造である。断面には I 型断面と箱型断面の 2 種類の形状を用いた。なお、構造部材の耐荷力の厳密解には、道示の柱の基準耐荷力曲線を適用している。

まず、断面 (1) に対して柱およびはりの部材長が等しい ($b = L$) 場合の等価初期たわみを λ をパラメータにして計算した。その結果を示したのが図-9である。道示の基準耐荷力曲線に一致するような等価初期たわみは、換算細長比との間に線形関係があることがわかる。つまり、

$$w^0/L = 0.00253 + 0.0129\lambda \dots\dots\dots (11)$$

のように近似できる。

次に、本解析法により得られる耐荷力の有効性を明らかにするため、断面 (2) の箱型断面を有する一層ラーメン構造を対象にして、弾塑性有限変位解析による耐荷力との比較計算を行った⁹⁾。なお、文献 9) では断面 (2) において補剛材を有する箱型断面を対象としているが、ここでは補剛材を無視している。いま、 $b = 1.0m$ に固定して、柱高を $L = 1.0, 2.0, 3.0m$ に変化させた場合の等価初期たわみを示したのが図-10である。この場合、等価初期たわみは

$$w^0/L = -0.00053 + 0.025\lambda \dots\dots\dots (12)$$

と λ に関する線形式により近似できることがわかる。

この等価初期たわみを用いて得られた耐荷力と弾塑性有限変位解析の結果をまとめたのが図-11である。なお、横軸の換算細長比の有効座屈長には、弾塑性有限変位解析の場合弾性座屈理論による $\ell_e = 1.157L$ を用いているが、本解析では道示の表より得られる $\ell_e = 1.5L$ を用いた。図から明らかなように、式 (12) の等価初期たわみを用いた本解析結果は、弾塑性有限変位解析による耐荷力曲線⁹⁾より多少低めではあるが、安全側の精度の高い耐荷力を評価していることがわかる。

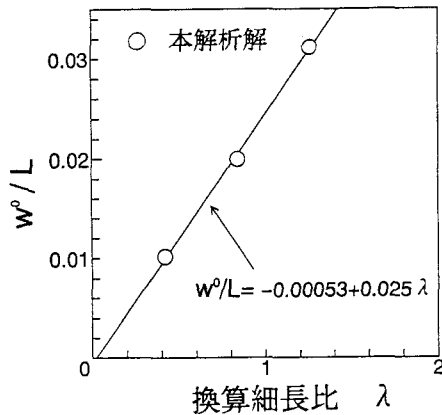


図-10 柱高の変化による等価初期たわみへの影響

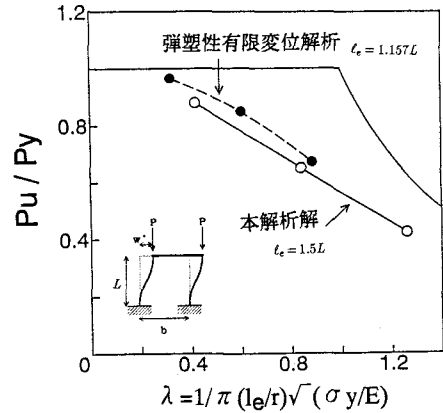


図-11 弾塑性有限変位解析との限界強度比較

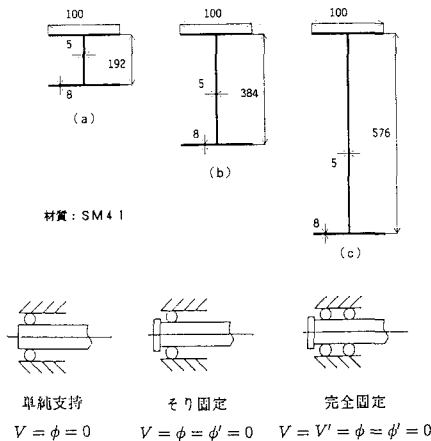


図-12 はりの断面諸元と境界条件

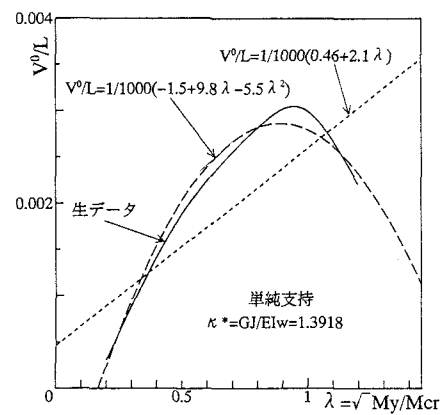


図-13 はりの等価初期たわみと換算細長比の関係

(3) はり

次に、等曲げを受けるI型断面はりを対象にして、その等価初期たわみを求める数値計算を行った¹⁶⁾。さらに、境界条件およびねじり剛性比が等価初期たわみに与える影響について検討した。

用いたはりの基準耐力曲線は、道示の曲線

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq 0.2 \\ 1.0 - 0.412(\lambda - 0.2) & 0.2 < \lambda \leq \sqrt{2} \end{cases} \quad \dots \quad (13)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_{cr}}{M_y}} \quad \dots \quad (14)$$

である。ここに、 M_{cr} は横座屈荷重である。断面形状は、図-12のように腹板高を変化させた3種類であり、ねじり剛性比をパラメータにしている。なお、材質はSM41、境界条件は単純支持、そり固定、完全固定の3条件である。

本来、3.の式(2)の固有値解析により得られる面外の座屈モードは v^0 と ϕ^0 が連成することになるが、ここでは設計上の簡便さを考えて、まず、等価初期たわみとしてy軸方向変位 v^0 を単独に導入した場合のその大きさについて式(14)の横座屈の換算細長比 λ をパラメータにして計算した。図-13は等曲げを受ける単純支持さ

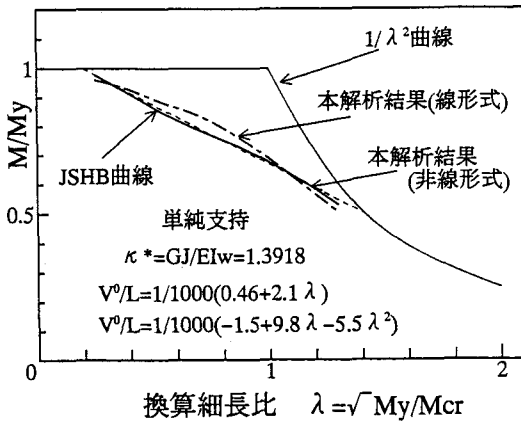


図-14 等価初期たわみ (v^0/L) を用いた限界強度曲線

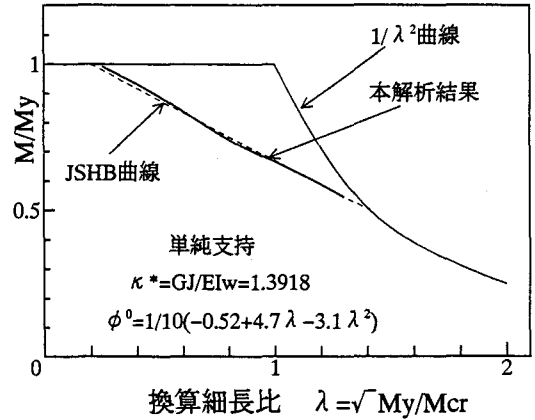


図-15 等価初期たわみ ϕ^0 を用いた限界強度曲線

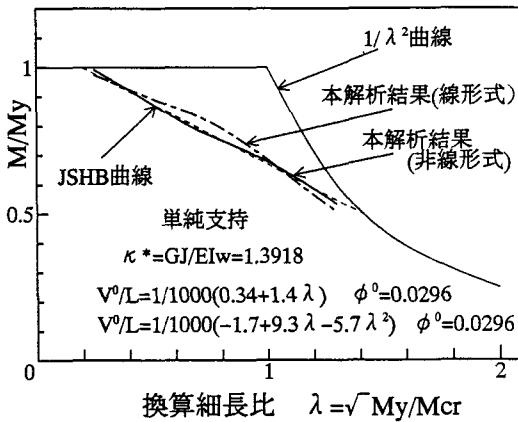


図-16 等価初期たわみ ($\phi^0 + v^0/L$) を用いた限界強度曲線

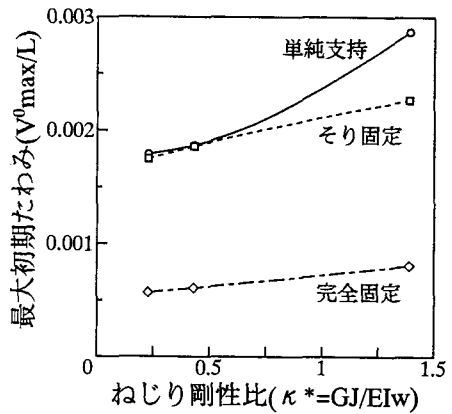


図-17 ねじり剛性の等価初期たわみへの影響

れた断面 (a) [$\kappa^* (= GJ/EI_{\omega\omega}) = 1.3918$] のはりについて、 λ の変化に対する等価初期たわみ v^0/L を前節の流れ図にしたがって求め、最小 2 乗法により λ の 1 次式及び 2 次式で近似した結果を表したものである。

$$v^0/L = \frac{1}{1000}(-1.5 + 9.8\lambda - 5.5\lambda^2) \quad \dots\dots\dots (15-a)$$

$$v^0/L = \frac{1}{1000}(0.46 + 2.1\lambda) \quad \dots\dots\dots (15-b)$$

ここに、横軸は横座屈の換算細長比 λ をとり、縦軸には等価初期たわみ v^0/L をとっている。図-14 はこれらの近似式の等価初期たわみを用いて得られる耐力曲線と道示の基準耐力曲線とを比較したものである。図から明らかに非線形形式の場合かなり良い一致を示している。

さらに、断面 (b) ($\kappa^* = 0.4315$)、断面 (c) ($\kappa^* = 0.2289$) の断面について計算した結果、同様に 2 次式で道示の基準耐力曲線とかなり良い一致を示した。また、そり固定および完全固定の等価初期たわみを計算した結果、単純支持の時と同様に 2 次式で良い精度の解曲線を得た。

次に、単純支持されたはり ($\kappa^* = 1.3918$) の等価初期たわみとしてねじり角 ϕ^0 を導入した場合について、これまでの計算法と同様に行った。この場合の等価初期たわみは

$$\phi^0 = \frac{1}{10}(-0.52 + 4.7\lambda - 3.1\lambda^2) \quad \dots\dots\dots (16)$$

となり、限界強度曲線を計算した結果を表したのが図-15である。 v^0 の等価初期たわみを導入した場合と同様の傾向を示している。

また、等価初期たわみとして横変位 v^0 とねじり角 ϕ^0 を同時に考慮した場合について計算した。その結果が図-16である。なお、 ϕ^0 は図-15における ϕ^0 のみを導入した場合の $\lambda=0.2$ における $\phi^0=0.0296$ に固定して、基準耐力力曲線に合う等価初期たわみ v^0/L を求めた。その結果、次のような近似式を得た。

$$v^0/L = \frac{1}{1000}(-1.7 + 9.3\lambda - 5.7\lambda^2) \quad \phi^0 = 0.0296 \quad \dots\dots\dots (17-a)$$

$$v^0/L = \frac{1}{1000}(0.34 + 1.4\lambda) \quad \phi^0 = 0.0296 \quad \dots\dots\dots (17-b)$$

図より明かなように全体的には各初期たわみ単独の場合による限界強度と同等の評価を示している。

以上の結果を基に、単純支持されたはりのねじり剛性比 κ^* が等価初期たわみへ与える影響についてまとめたのが図-17である。この図は、横軸にねじり剛性比 κ^* を、縦軸に最大初期たわみ v_{max}^0 をとって表したものである。ここに、最大初期たわみとは $\lambda-v^0/L$ 曲線における v^0 の最大値であり、その時の λ が λ_{max} である。この図より明かなように境界条件に関わらず、ねじり剛性比の増加とともに、つまり断面が小さくなるにしたがって最大初期たわみが増加していることがわかる。しかし、そり固定、完全固定の時は単純支持の時ほど大きな変化を生じない。 λ_{max} の値は単純支持、そり固定、完全固定の順に小さくなっている。さらに、最大初期たわみは $0.6 < \lambda < 0.9$ の範囲に生じており、その大きさはそり拘束が強くなるほど小さな値になる。

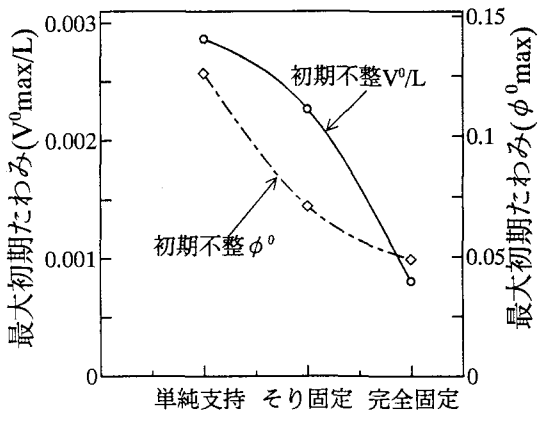


図-18 境界条件が等価初期たわみに与える影響

最後に、境界条件が等価初期不整に与える影響について、等価初期たわみ v^0 、 ϕ^0 をパラメータにしてまとめたのが図-18である。すべてのパラメータに共通して拘束が強くなるにともない等価初期たわみの値は減少している。

5. まとめ

弾性有限変位解析に基づく設計法における等価初期不整の決定法を提案し、柱、一層ラーメン構造、はりを対象にして各々の等価初期たわみの具体的な数値を求めた訳であるが、その結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 柱の等価初期不整の大きさは各境界条件に対して一定値で与えられる。また、基準耐力力曲線の違いによる等価初期たわみの大きさへの影響は当然の結果ではあるが耐力力曲線の低い曲線ほど大きな初期たわみとなり影響が大である。

(2) 対象とした一層ラーメン構造の等価初期不整の大きさは換算細長比との間に線形関係がある。また、弾塑性有限変位解析から得られた耐力力と本解析法による耐力力を比較した結果、柱の基準耐力力曲線を基礎に等価初期不整を決定したにも関わらず構造全体系の耐力力を精度良く評価しており、本決定法の有効性が確認できた。

(3) はりの最適な面外初期たわみの大きさは、等価初期不整の形状に横座屈モードを与えることを前提とした場合、横ねじれ座屈の換算細長比 λ の2次関数で与えられる。また、その初期たわみの大きさは、拘束条件が強くなるにしたがって減少していき、断面の腹板高が高いほど、すなわちねじり剛性比が小さいほど減少している。

(4) 実際のはりの設計では、 v^0/L または ϕ^0 のどちらかの等価初期たわみを単独に導入すれば良い。これは、 v^0/L と ϕ^0 を同時に考慮してもどちらか一方の時と精度はほとんど変わらなかったことによる。

なお、ここでは等価初期たわみの形状として弾性座屈モードを用いて耐荷力を評価しているが、實際上構造形式、境界条件、断面形状などに影響されるため、その形状および大きさを如何にシステマテックにしかも一義的に決定できるかが今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (I 共通編2 鋼橋編), 1990.2
- 2) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領・同解説, 1988
- 3) 倉方慶夫・西野文雄・長谷川彰夫・梶田順一：骨組構造物の座屈設計法に対する一提案, 土木学会論文集, No.459/I-22, pp.73-82, 1993.1
- 4) 宇佐美勉：鋼骨組構造物の座屈設計法の問題点.SGST 拡大研究論文集, 第1回, pp.107-120, 1991.11
- 5) 野上邦栄：鋼ラーメン構造物の座屈設計について, 土木学会鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会終局強度設計分科会資料, 1990.4
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針, PART A, PART B, 1987
- 7) 長谷川彰夫・西野文雄：線形化有限変位理論による構造物の設計法の提案, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, pp.108-109, 1989.10
- 8) 野上邦栄：鋼ラーメン柱の実用的座屈設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.459/I-22, pp.159-162, 1993.1
- 9) 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, pp.263-272, 1987.4
- 10) 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, No.404/I-11, pp.331-340, 1989.4
- 11) 西野文雄：土木学会鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会終局強度設計分科会資料, 終局強度設計分科会成果報告書(案), 1992.9
- 12) 平野邦昭・崎元達郎・結城浩紘：有効接線係数により定めた有効長さをを用いた鋼骨組の設計法について, 第47回土木学会年次学術講演会, pp.290-291, 1992.9
- 13) 野上邦栄・福田悦生：弾性有限変位解析に基づく設計における等価初期不整について, 第47回土木学会年次学術講演会, pp.372-373, 1992.9
- 14) 土木学会：座屈設計ガイドライン, 1987
- 15) 野上邦栄・林一輝・成田信之：平面骨組構造の等価初期不整について, 第48回土木学会年次学術講演会, pp.1532-1533, 1993.9
- 16) 野上邦栄・高木真・成田信之：はりの面外等価初期不整について, 第48回土木学会年次学術講演会, pp.194-195, 1993.9
- 17) A.HASEGAWA, K.LIYANAGE, T.ILEDA and F.NISHINO: A Concise and Explicit Formulation of Out-of-Plane Instability of Thin-Walled Members, Proc. of JSCE, No.356/I-3, pp.81-89, 1985
- 18) A.HASEGAWA, K.LIYANAGE and F.NISHINO: A Non-Iterative Nonlinear Analysis Scheme of Frames with Thin-Walled Elastic Members, Proc. of JSCE, No.380/I-7, pp.45-55, 1987
- 19) 土木学会構造工学委員会鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則, 土木学会論文集, pp.13-20, No.450/I-20, 1992.7

(1993年9月16日 受付)