

I-10

修正塑性ヒンジ法による骨組鋼構造物の弾塑性2次解析

北海学園大学 学生員 西端 紀次

北海学園大学 正員 当麻 庄司

National U. of Singapore J.Y.R. Liew

1. はじめに

構造システム設計とは、構造物全体を構造解析して断面力を求め、それを抵抗断面力と比較して構造物の安定性を照査する方法であり、大きく分類すると弾塑性2次解析法と塑性ヒンジ法の2つの解析法がある。この両者の中間的な解析法として修正塑性ヒンジ法が提案されている¹⁾²⁾。修正塑性ヒンジ法は、基本的には部材に作用するモーメントが全塑性モーメント M_p に達すると抵抗モーメントは M_p のままで曲率だけが增加するという従来の塑性ヒンジ法の考え方に基づいているが、それを塑性の広がりを実験的に考慮できるように修正したものである。本研究では、実験結果または他の解析法との比較・検討を行ない、修正塑性ヒンジ法の広範囲にわたる高い信頼性について確認するものである。

2. 修正塑性ヒンジ法の概要

修正塑性ヒンジ法の理論的背景の説明については他の文献1) 3) に譲るとして、ここでは簡単にその概略を記述する。塑性ヒンジ法では、断面が塑性モーメントに達した瞬間に塑性ヒンジが形成されるとし、断面における塑性域の徐々の広がりは考慮されていない。そこで修正塑性ヒンジ法では、従来の塑性ヒンジ法の簡便さを維持しながらこのような欠点を改善するために、基本的な定式化は塑性ヒンジ法に従いながら梁柱要素の弾性剛性方程式を弾塑性解析用に修正する。ここでとった修正は、次の2点である。

(1) 座屈関数低減係数 ϕ による修正

(2) 接線剛性理論による修正

ここで、(1)の修正は部材の端部における塑性域の広がりに対する考慮である。座屈関数低減係数 ϕ とは、要素端部における軸方向と曲げモーメントの相関曲線より導かれるパラメーターであり、断面における塑性域の広がりの指標である塑性度係数で関連づけられる³⁾。また、(2)の修正は軸力の増大による部材全体の軸方向剛性の低下についての配慮であるが、これは接線理論と同様にヤング率 E の低減で考慮することができる。ここで、接線剛性 E_t は $\zeta = E_t/E$ として定義し¹⁾、柱部材の基準耐荷力曲線より求められる。基準耐荷力曲線を用いることで初期不整の影響を考慮することになる。修正塑性ヒンジ法の特長は、一般に骨組構造物の解析では一部材を一つの梁柱要素として解析することができるので剛性マトリックスのサイズが小さくなり、他の弾塑性2次解析法と比べて大幅に計算が簡略化されより実用的であると考えられる。

修正塑性ヒンジ法では、通常の座屈関数を用いた剛性方程式を座屈関数低減係数を用いて次のように修正される。¹⁾

Second-Order Inelastic Analysis for Steel Frames by Refined Plastic Hinge Method

by Noritugu NISHIHATA, Shouji TOMA and J.Y.R. Liew

$$\begin{Bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \end{Bmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{bmatrix} \phi_A [S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_B)] & \phi_A \phi_B S_2 \\ \phi_A \phi_B S_2 & \phi_B [S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_A)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \end{Bmatrix}$$

ここに、 S_1 、 S_2 は梁柱の弾性座屈関数、 ϕ_A 、 ϕ_B は部材両端における座屈関数低減係数、また E_t は ζ 関数で与えられているみかけのヤング率である。

3. 解析結果と考察

修正塑性ヒンジ法の有用性をみるために、実験結果あるいは、他の解析結果と比較・検討を行なう。

3-1 梁柱の耐荷力曲線

修正塑性ヒンジ法の理論によって作成されたコンピュータプログラム”PHINGE”¹⁾によって求めた梁柱の耐荷力曲線を図-1に示す。比較のために道路橋示方書で採用されている基準耐荷力曲線、AISC-LRFD⁴⁾の耐荷力曲線、またニューマーク法で解析した厳密解⁵⁾も同時に示した。図の縦軸は座屈強度を降伏強度で無次元化し、横軸は換算細長比を取ったものである。結果として、修正塑性ヒンジ法は、換算細長比が小さい範囲では厳密解およびAISC-LRFDに一致した。しかし、換算細長比が大きい範囲では、修正塑性ヒンジ法が他の解析法よりも大きい値を与えている。これは、 ζ 関数(E_t/E)をLRFDの耐荷力曲線で求めているため、弾性域($P_y/P < 0.39$)の範囲で初期不整の影響が考慮されておらずこのような差が生じる。ここで、 ζ 関数をオイラー荷重に対する比として求めればこのような差がなくなり、弾性域でも初期不整を考慮した厳密解あるいはAISC-LRFDの曲線と一致するものと思われる。

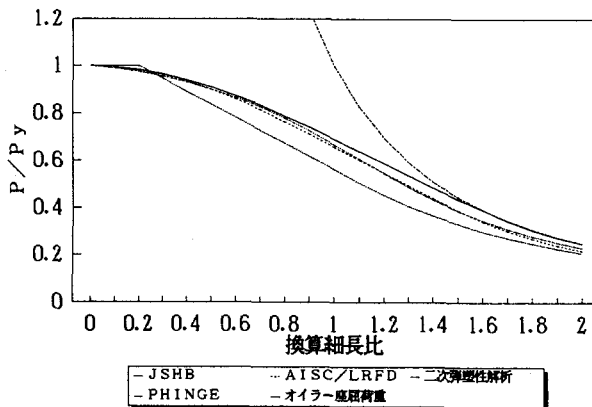


図-1 梁柱の耐荷力曲線

3-2 門型鋼ラーメン構造物の有限要素解析との比較

文献6)では、柱脚固定支持の門型鋼ラーメン構造物を有限要素法により弾塑性有限変位解析している。部材断面は、梁、柱ともに幅680mm 厚さ20mmの正方形箱型断面で、材質はSM50材である。この門

型ラーメンに鉛直荷重と水平荷重を受ける場合について、柱の細長比パラメータ λ をそれぞれ0.3、0.6、0.9と変化させて、修正塑性ヒンジ法による解析結果との比較・検討を行なう。図の縦軸は、軸力を降伏強度で、横軸は水平力を単純塑性理論で求めた水平力で無次元化したものである。また、白丸が有限要素法（文献6）で解析した結果で、実線が修正塑性ヒンジ法で解析した曲線である。図-2（a）は $\lambda=0.3$ の時の解析結果で、軸力が大きい範囲では、修正塑性ヒンジ法は厳密解と一致した結果を与えているが、軸力が小さい範囲では厳密解との差が大きく、修正塑性ヒンジ法が安全側の値を与える。図-2（b）は、 $\lambda=0.6$ の場合で図-2（a）と同様な傾向を示すもののその差は小さい。また、図-2（c）は $\lambda=0.9$ の時で軸力が小さい範囲で厳密解と一致したが、軸力が大きい範囲では厳密解との差が大きく修正塑性ヒンジ法は危険側の値を与える。

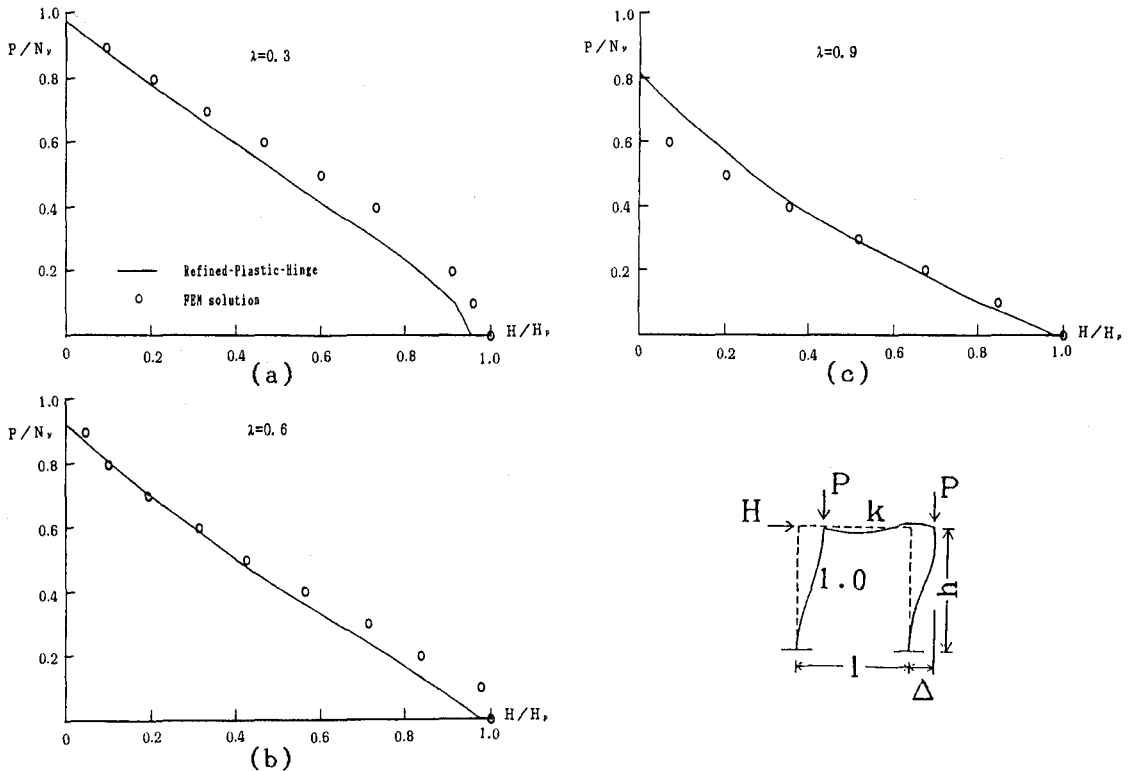


図-2 有限要素解析との比較

3-3 門型フレームの解析（小型模型）

文献7)では、矩形断面の柱脚固定1層1スパンラーメンの小型模型に対して行なった実験結果について述べられている。解析法としては、弾塑性解析および軸力を考慮したたわみ角法による完全弾塑性解析の2つについて、実験結果との比較をしている。本研究では試験体の柱の細長比、および梁と柱の剛比を変数とした実験結果のそれぞれに対し、PHINGE¹⁾を用いて解析した結果と比較を行ないその結果を図-3～5に示す。図の縦軸は、水平力を単純塑性理論より求めた水平力で、横軸は水平変位を骨組の階高でそれぞれ無次元化したものである。白丸の点が実験曲線、太い実線が弾塑性解析した曲線、そして細い実線は

軸力を考慮した完全弾塑性解析した曲線をそれぞれ表している。PHINGEの場合は最大荷重までのたわみを求めることができ、座屈後の挙動は得られない。そのPHINGEによる解析結果は破線で示されている。図-3は、柱の細長比 $h/r=100$ 、剛比 k （梁剛性を柱剛性で割った値） $=1.0$ の場合であり、これをみると修正塑性ヒンジ法は他の解析法と実験結果の中間にあることが分かる。図-4は細長比 $h/r=50$ 、剛比 $k=0.5$ の場合であり、軸力 $P/P_y=0.20$ の時は修正塑性ヒンジ法は若干小さい値を与えるが、他の軸力に対してはよく実験結果と一致している。また、図-5は、細長比 $h/r=50$ 、剛比 $k=1.0$ の場合でこのときは $P/P_y=0.20$ に対してよく一致しており他の軸力に対しては小さめの値を与える。

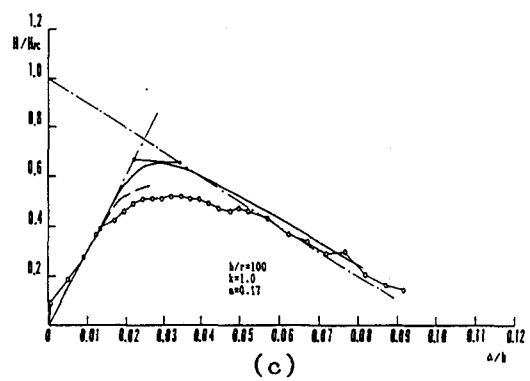
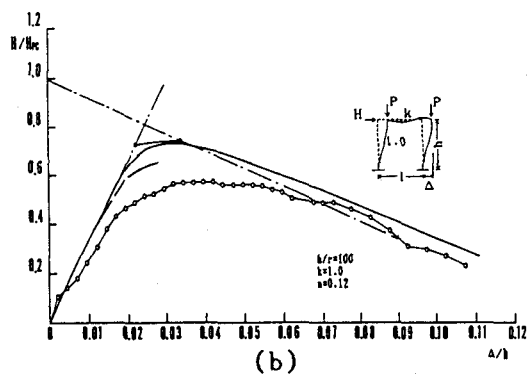
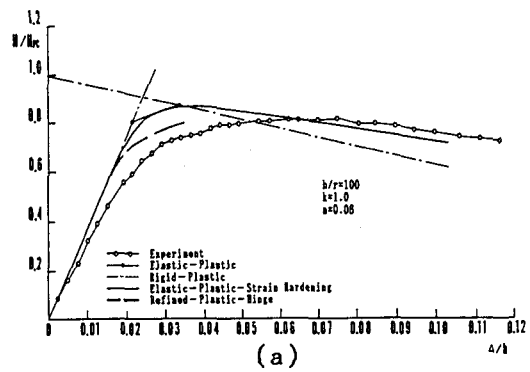


図-3 門型フレームの解析 (小型模型)
($h/r=100$, $k=1.0$)

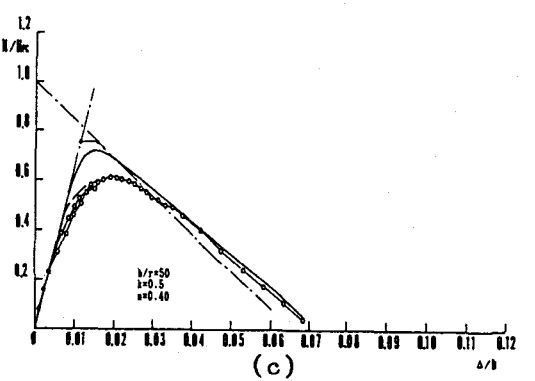
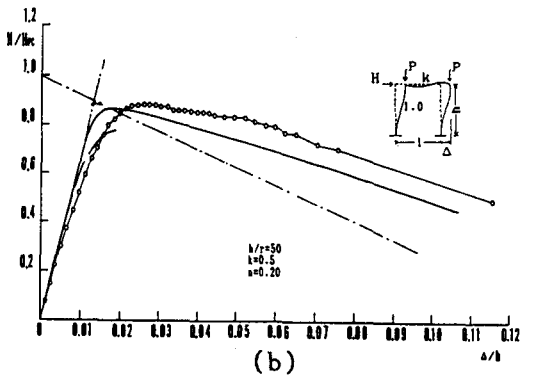
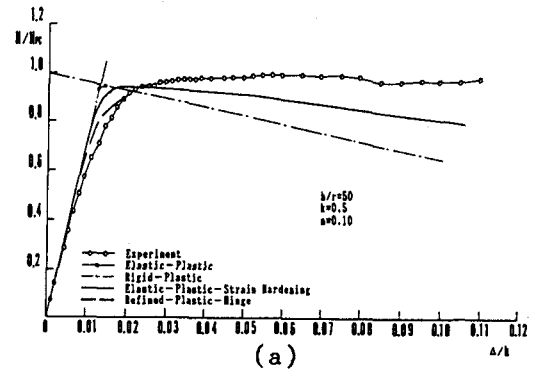


図-4 門型フレームの解析 (小型模型)
($h/r=50$, $k=0.5$)

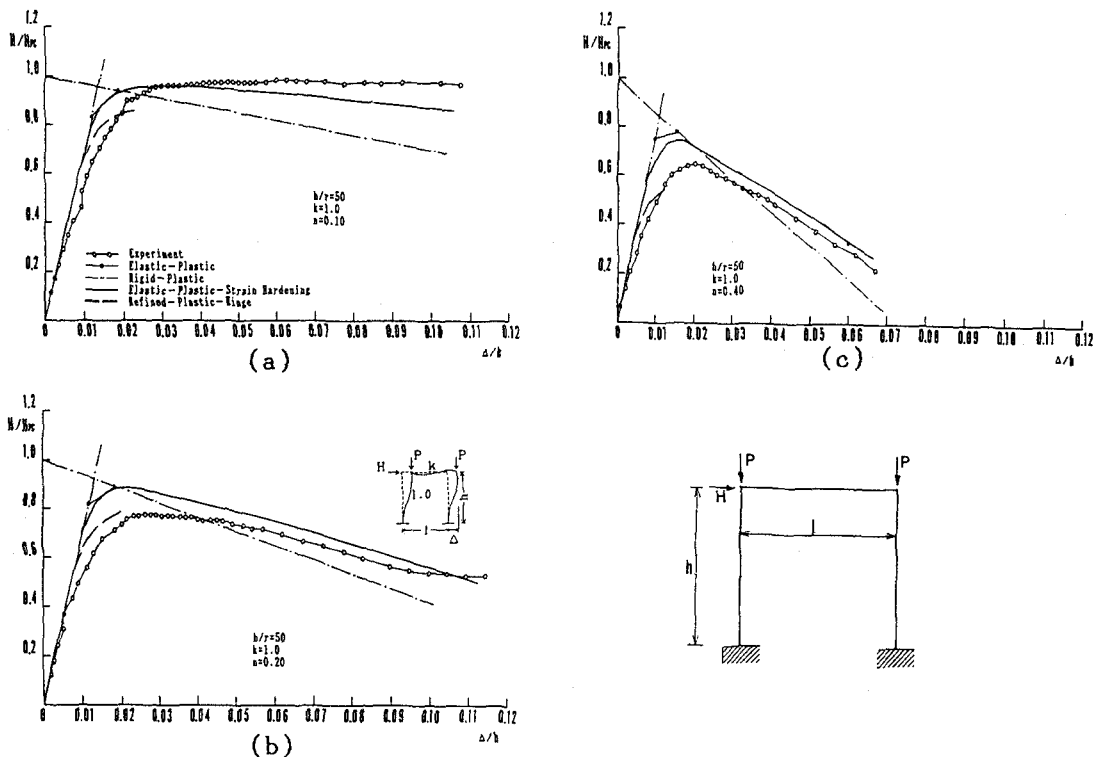


図-5 門型フレームの解析 (小型模型)
($h/r=50$, $k=1.0$)

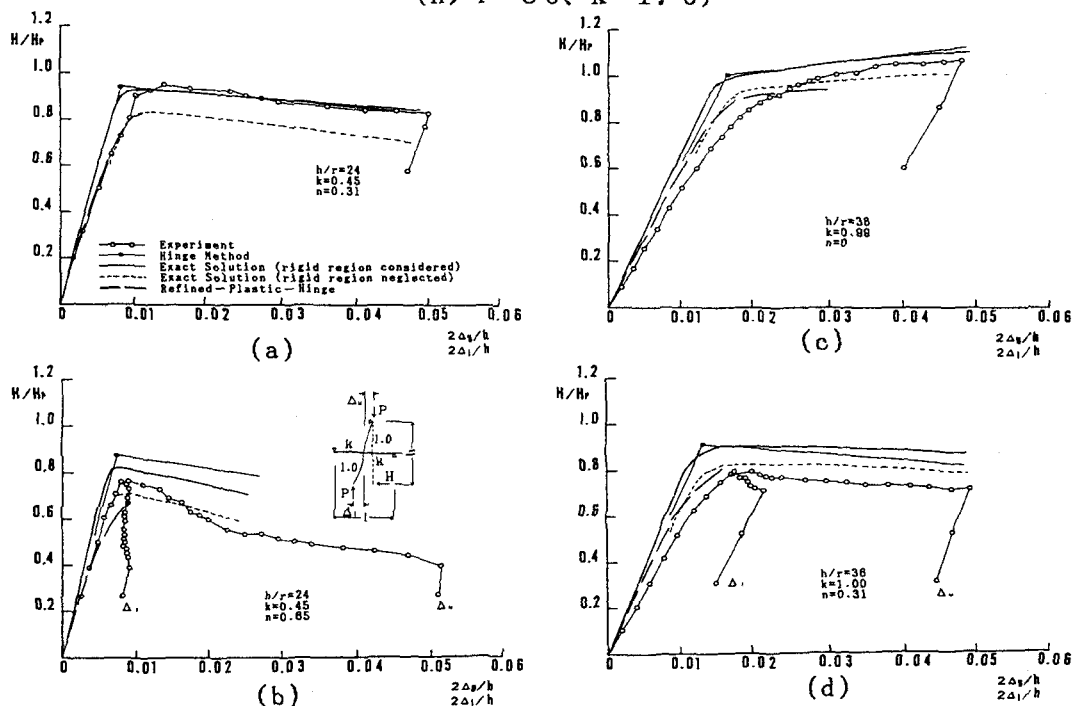


図-6 十字型フレームの解析

3-4 十字型フレームの解析

文献8)では、多層骨組構造物の一部を想定した十字型ラーメンの実験結果あるいは、解析結果との比較を行なっている。本研究では試験体の柱の細長比および梁と柱の剛比を変数とした実験結果に対し、PHINGEによる解析結果と比較を行ない図-6に示す。図の縦軸は水平力を剛塑性崩壊荷重で、横軸は水平変位を骨組の階高の半分で無次元化したものである。また、白丸の曲線が実験曲線、細い実線はひずみ硬化を考慮した塑性ヒンジ法による解析結果であり、太い実線は部材の断面内、軸方向の塑性域の広がりとせん断変形をそれぞれ考慮、さらに接合部分における剛域の影響をも考慮して弾塑性解析した曲線である。図-6に示した修正塑性ヒンジ法との比較をみるといずれの場合も、一般的により一致を与えているといえることができる。

4. まとめ

本論文では、修正塑性ヒンジ法を用いた骨組構造物の弾塑性2次解析について述べると共に、その解析結果を示した。修正塑性ヒンジ法では、従来の塑性ヒンジ法の考え方に塑性域の広がりを考慮することでより実際の構造物の挙動に近い値が得られる。修正塑性ヒンジ法は実験結果との比較においてかなりよい一致を示したと言える。実験結果には複雑な残留応力や初期不正の影響を含んでおり、それらが部材の挙動に複雑な影響を与え、一般的に、解析結果と実験結果の間に少しの誤差が生じるのはこのような点から避けられない問題である。他の解析法との比較においても修正塑性ヒンジ法は、一般的に良好な一致をみることができたと言える。結論として、厳密な弾塑性2次解析法の精密さと塑性ヒンジ法の簡便さを兼ね備えた修正塑性ヒンジ法は、十分に実用的であることが確認できた。

<参考文献>

- 1) J.Y.R. Liew and W.F. Chen, Chapter4 Second-Order Plastic Hinge Analysis of Frames, Advanced Analysis of Steel Frames: Theory, Software and Applications, Edited by W.F. Chen and S. Toma, CRC Press, 1993.
- 2) R.D. Ziemian, W. McGuire and G.G. Deierlein, Inelastic Limit States Design Part I, Part II, Jour. of Struct. Engrg, ASCE, Sept, 1992.
- 3) 西端、当麻、J.Y.R. Liew : 修正塑性ヒンジ法による骨組鋼構造物の解析、土木学会第48回年次学術講演会, 平成5年9月。
- 4) AISC, Load and Resistance Factor Design, 1986.
- 5) S.P. Zhou and W.F. Chen, Chapter5 Plastic-Zone Analysis of Beam-Columns and Portal Frames, Advanced Analysis of Steel Frames, edited by W.F. Chen and S. Toma, CRC Press, 1993.
- 6) 宇佐美、垣内、水野 : 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, 平成1年4月。
- 7) 若林、松井 : 鉄骨ラーメンの弾塑性安定に関する実験的研究 (その1) 矩形断面部材より成る門型ラーメン、日本建築学会論文報告集、第192号, 昭和47年2月。
- 8) 若林、松井、三谷 : 鉄骨ラーメンの弾塑性安定に関する実験的研究 (その3) H形鋼部材より成る十字形ラーメン、日本建築学会論文報告集、第194号, 昭和47年4月。