

修正塑性ヒンジ法における剛性低減係数の影響

北海学園大学 学生員 三田村大松
 北海学園大学 正員 当麻 庄司
 (株) サクラダ 西端 紀次

1. 序論

修正塑性ヒンジ法は、最近の鋼骨組構造物の設計が限界状態設計あるいは構造システム設計へと移行する中で、実用的な設計解析法として提案されている。著者らはこれまでこの修正塑性ヒンジ法を用いて梁柱と門形フレームの耐荷力を求め、厳密解とかなりよく一致することを示すと共に模型実験の結果との比較を行った²⁾。また、修正塑性ヒンジ法で用いられる2つの剛性低減係数、すなわち曲げ剛性低減係数と軸剛性低減係数の影響について検討を行った³⁾。その結果、曲げ剛性低減係数と軸剛性低減係数は剛性方程式の中で分離した形の方が精度が良いことが判明した。本論文では、このようなこれまでの研究成果の概要を述べると共に2つの剛性低減係数の分離型剛性方程式を用いた場合について、さらに詳しく検討することにする。

2. 修正塑性ヒンジ法の剛性方程式

修正塑性ヒンジ法では曲げ剛性低減係数 ϕ と軸剛性低減係数 $\zeta (=E/E_t)$ の2つの剛性低減係数を用いて式(1)のように剛性マトリックスを修正し、塑性域の徐々の広がりを考慮している。

$$\begin{Bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{Bmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{bmatrix} \phi_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_B) \right] & \phi_A \phi_B S_2 & 0 \\ \phi_A \phi_B S_2 & \phi_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_A) \right] & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 S_1, S_2 = 梁柱の弾性座屈関数、 ϕ_A, ϕ_B = 曲げ剛性低減係数、 E_t = 材料の接線剛性係数

上式の剛性マトリックスでは、曲げモーメントに対して剛性低減係数 ϕ と $\zeta (=E/E_t)$ の両方の影響が現れるようになってきている。これまでの検討では、このために軸方向力が大きい場合に構造物の変形挙動が大きくなり過ぎることが分かっている³⁾。そこで、構造物の変形挙動を厳密な塑性域拡大解析により近づけるために、曲げモーメントに対して $\zeta (=E/E_t)$ の影響を分離して式のように改良している。

$$\begin{Bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EI\phi_A}{L} \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_B) \right] & \frac{\phi_A \phi_B S_2}{L} & 0 \\ \frac{\phi_A \phi_B S_2}{L} & \frac{EI\phi_B}{L} \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_A) \right] & 0 \\ 0 & 0 & \frac{AE_t}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Proposal of Significant Load Method for Structural Design

by Shouji Toma, Daimatsu Mitamura

上式は式 (1) において、曲げ剛性低減係数 ϕ は同様であるが、曲げモーメントに対するヤング率には弾性係数 E を用い軸力に対するヤング率には接線係数 E_t を用いるようにしたものである。式 (2) では剛性低減係数 ϕ と ζ は分離された形となっているので、“分離型”と呼ぶことにする。

3. 梁柱の解析

3.1 梁柱の耐荷力と変形挙動

まず、式 (1) 中の2つの剛性低減係数 ϕ 、 ζ の影響について、梁柱の変形挙動を解析することにより調査した結果を図1に示す。梁柱部材は、換算細長比 $\lambda_e = 1.0$ のH形鋼で強軸に曲げを受けている。図1の解析では、塑性域拡大解析（厳密解）の方は部材の初期たわみ $L/1000$ (L =部材長) と残留応力 $0.3\sigma_y$ を含んでいるが、その他の曲線の修正塑性ヒンジ解析には初期たわみを直接含んでいない。柱部材には本来初期たわみが存在するものであるからそれを考慮して強度を求める必要があり、修正塑性ヒンジ解析で

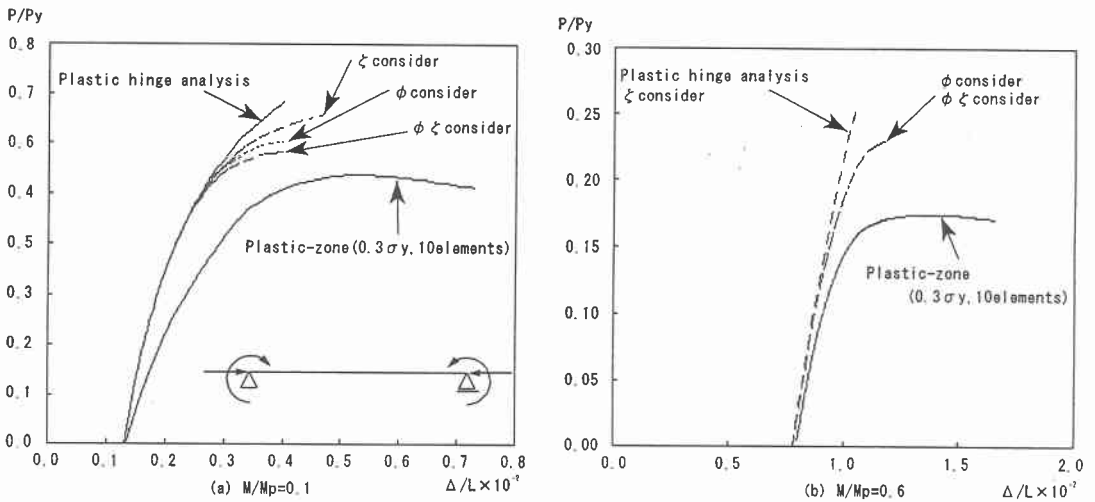


図1 梁柱における剛性低減係数の影響（修正塑性ヒンジ解析では初期たわみなし）

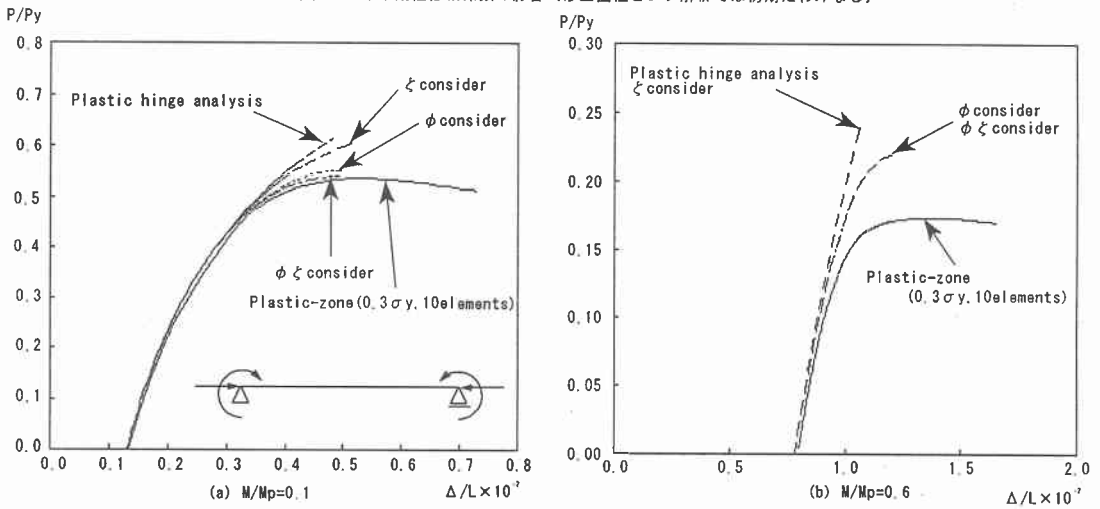


図2 梁柱における剛性低減係数の影響（両解析に初期たわみ考慮）

用いる柱の耐荷力曲線の中には、もともとその初期たわみを含んでいる。従って、ここでの修正塑性ヒンジ解析には部材形状としての初期たわみを含まないで解析した。しかしそのようにすると、モーメントが小さい場合(図1 a)耐荷力はよく一致しているが、モーメントが大きくなる(図1 b)と耐荷力は異なる。これはモーメントが小さい場合はより柱に近くなり、その柱の耐荷力曲線を用いている修正塑性ヒンジ解析も塑性域拡大解析(厳密解)に近くなるためである。

また、図1の変形挙動ではいずれの剛性も塑性域拡大解析の方が小さくなっているが、これは初期たわみの影響である。塑性ヒンジ解析は1部材を1要素で解析できることを最大の特長としており、これに初期たわみを考慮するためには部材を分割しなければならないのでそれが失われることになる。しかし、ここで剛性を一致させるため、修正塑性ヒンジ解析でも部材を10分割して塑性域拡大解析と同様な初期たわみ形状を考慮することにする。その解析結果を図2に示すが、この時には剛性はよく一致している。しかし、モーメントが大きい場合、やはり修正塑性ヒンジ解析の耐荷力は大きめとなる。これは修正塑性ヒンジ法ではモ

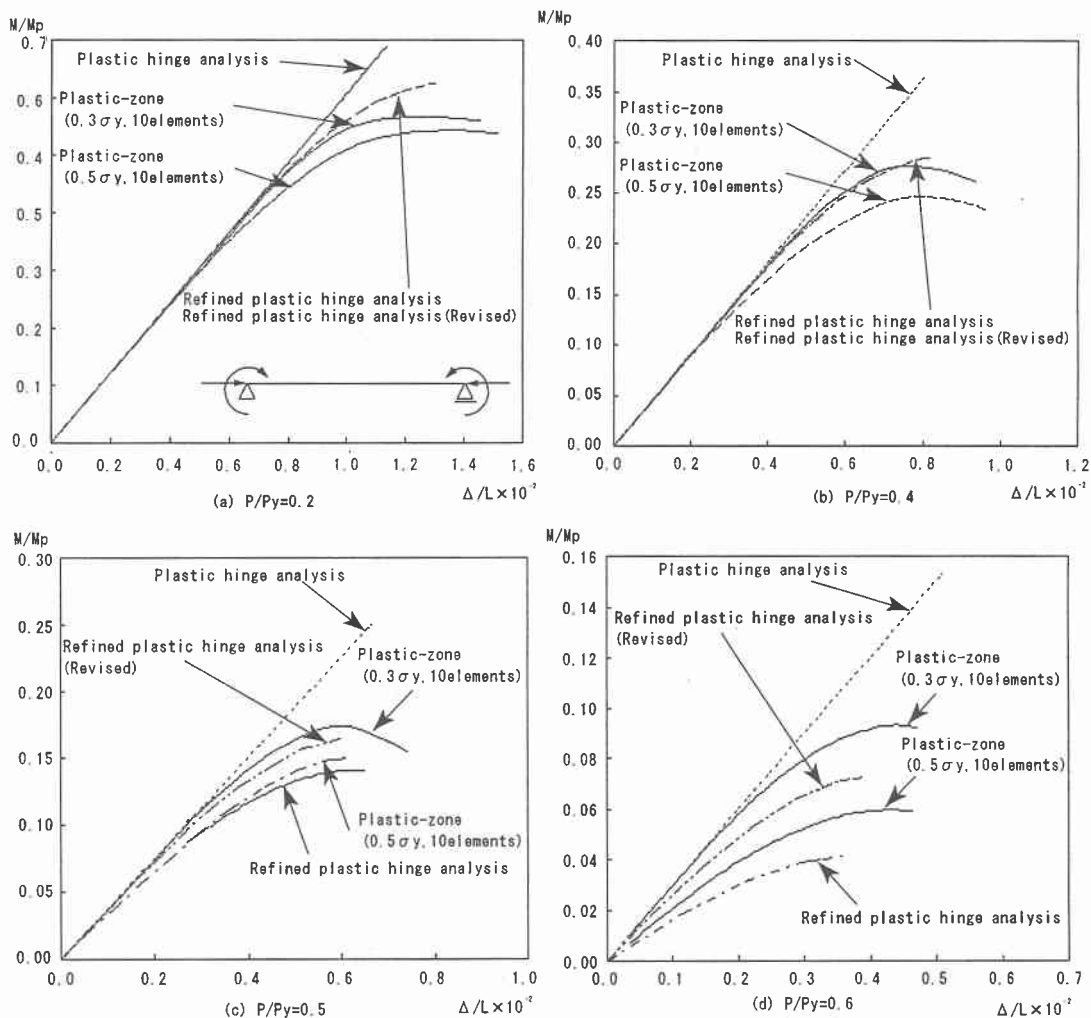


図3 分離型剛性低減係数を用いた修正塑性ヒンジ解析(梁柱)

ーメントによる塑性化の影響が部材端のヒンジの発生の程度によってのみ反映され、部材全体にわたってモーメントが大きくなる場合には剛性低下が過小に評価されることによる。従って、通常の骨組構造物ではモーメントの分布が2方向に曲率を持つようになるので問題がないが、1方向に大きなモーメントを受ける図2 bのような場合は修正塑性ヒンジ法の適用に注意を要する。

3.2 剛性低減係数の影響

式(1)を用いた解析の結果の図1および2を見ると、曲げ剛性低減係数 ϕ の影響がほとんどである。曲げモーメントが小さいときには軸剛性低減係数 ξ の影響が多少あるものの、曲げモーメントが大きくなるとその影響は非常に小さいことが分かる。また、軸力が大きい場合、ここでの梁柱の解析では ξ の影響については不明であるが、後節で説明するように門型フレームの検討によれば ξ の影響が大きく現れ過ぎることが分かっている。

3.3 分離型剛性低減係数の解析

軸方向力が大きい場合 ξ の影響が大きく現れるのは、式(1)をみると分かる通り軸剛性の低減のみではなく曲げ剛性の低減との積で表されているので、両者は重なり剛性を低くとりすぎることになっているものと思われる。そこで、この点を改良した分離型の剛性低減係数を用いた式(2)により解析を行った結果を図3に示す。同図では軸方向力の影響をより明確にするために、これを一定にして曲げモーメントを増加させている。また、ここではいずれの解析にも初期たわみを直接考慮していないが、これは軸力によって生じるたわみを除いて比較するためである。これらの図をみると軸方向力が小さいときは両式とも塑性域拡大解析(厳密解)に近くその間にあまり差がないが、軸方向力が大きくなると差が徐々に大きくなる。そして、 $P/P_y = 0.6$ の時には式(1)の場合は ϕ と ξ の重なりの影響から剛性が非常に低く現れ残留応力 $0.5\sigma_y$ を考慮した塑性域拡大解析よりもさらに低くなっていたが、式(2)の剛性は ϕ と ξ を分離したことによって式(1)ほど低く現れない。また図3によれば、塑性域拡大解析(厳密解)において軸方向力が大きくなると残留応力の大きさによって剛性がかなり低下することが分かる。

4. 側方移動門型フレームの変形挙動

4.1 剛性低減係数の影響

図4に側方移動門型フレームに対する式(1)を用いた解析結果を示す。門型フレームは強軸回りに曲げを受けるH形鋼から成り、柱と梁の剛比は $k=1.0$ 、柱の細長比は $L_e/r=40$ (座屈長換算係数 $K=2.37$ を含んだ換算細長比は $\lambda_e=1.06$)である。この解析にはいずれの場合も初期たわみを直接考慮していない。軸剛性低減係数の影響は鉛直荷重 P が小さいときはやはりほとんどないことが分かる。なお、同図の $P/P_y < 0.4$ では ξ のみ考慮した修正塑性ヒンジ解析は塑性ヒンジ解析の結果と一致している。また、このような場合は ϕ のみ考慮すれば剛性は塑性域拡大解析(厳密解)に非常に近くなることが分かる。しかし、 $P/P_y > 0.5$ の時には梁柱と同様に ξ の影響が大きく現れ剛性が非常に低くなる。また、軸力の大きさに関わらず塑性ヒンジ解析はオイラー荷重しか与えないため耐力が大き過ぎることになる。

4.2 分離型低減係数の解析

以上の検討から、式(1)において軸力が大きい場合に ξ の影響が大きく現れるのは、梁柱と同様に ϕ と ξ の影響が重なり剛性を低くとり過ぎていたためと思われる。よって、フレームに対しても梁柱と同様に分離型の剛性低減係数を用いた式(2)による解析を行い、その結果を図5に示す。式(2)を用いた解析結果は図中(Revised)で表示されている。また、これらの解析には先に述べた理由から初期たわみを考慮していない。ここでも梁柱の場合と同様な傾向が見られる。すなわち、軸方向力が小さい場合は式(1)と(2)の間にほとんど差はなく厳密解に近いが、軸方向力 $P/P_y = 0.6$ になると式(1)は低すぎる剛性を与え残留応力 $0.5\sigma_y$ とした塑性域拡大解析よりも低く現れていたのが、式(2)ではかなり改善されている。

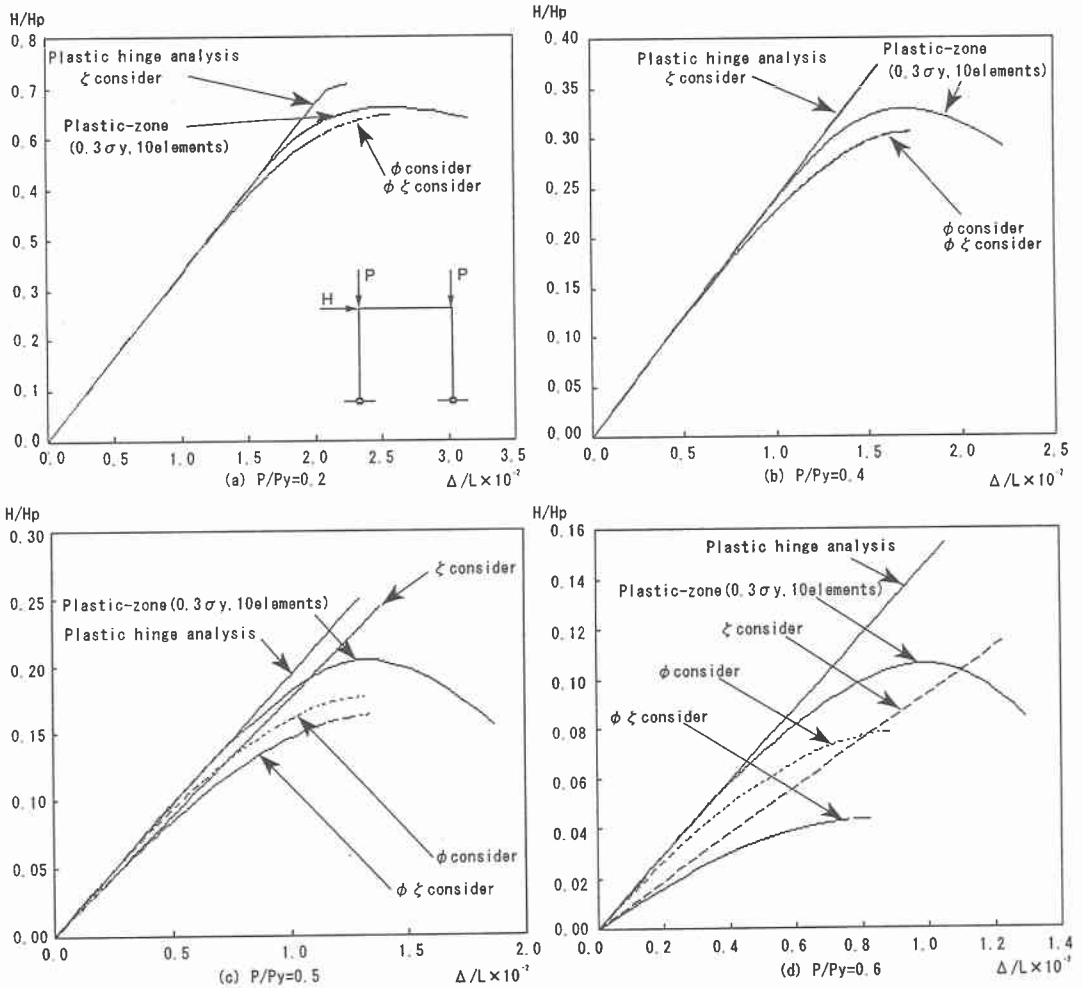


図4 側方移動門型フレームにおける剛性低減係数の影響

また、図5 (d)を見ると、塑性域拡大解析において残留応力の大きさによる影響が非常に大きくなるって
いることが分かる。

5. 結語

本論文での検討の結果、軸方向力が小さい場合は修正塑性ヒンジ法が厳密解とよく一致することが判明した。軸方向力が大きいときには分離型の剛性低減係数(式(2))を用いた方がより厳密解に近づく。一般的に側方移動の骨組構造物では軸方向力として $P/P_y = 0.6$ のような大きな力を受けることはないと思われるので、その範囲では式(1)と(2)のどちらでもよいと言える。しかし、側方拘束のフレームでは筋交い材が大きな軸力を受けることになるので、分離型の方が望ましい³⁾。

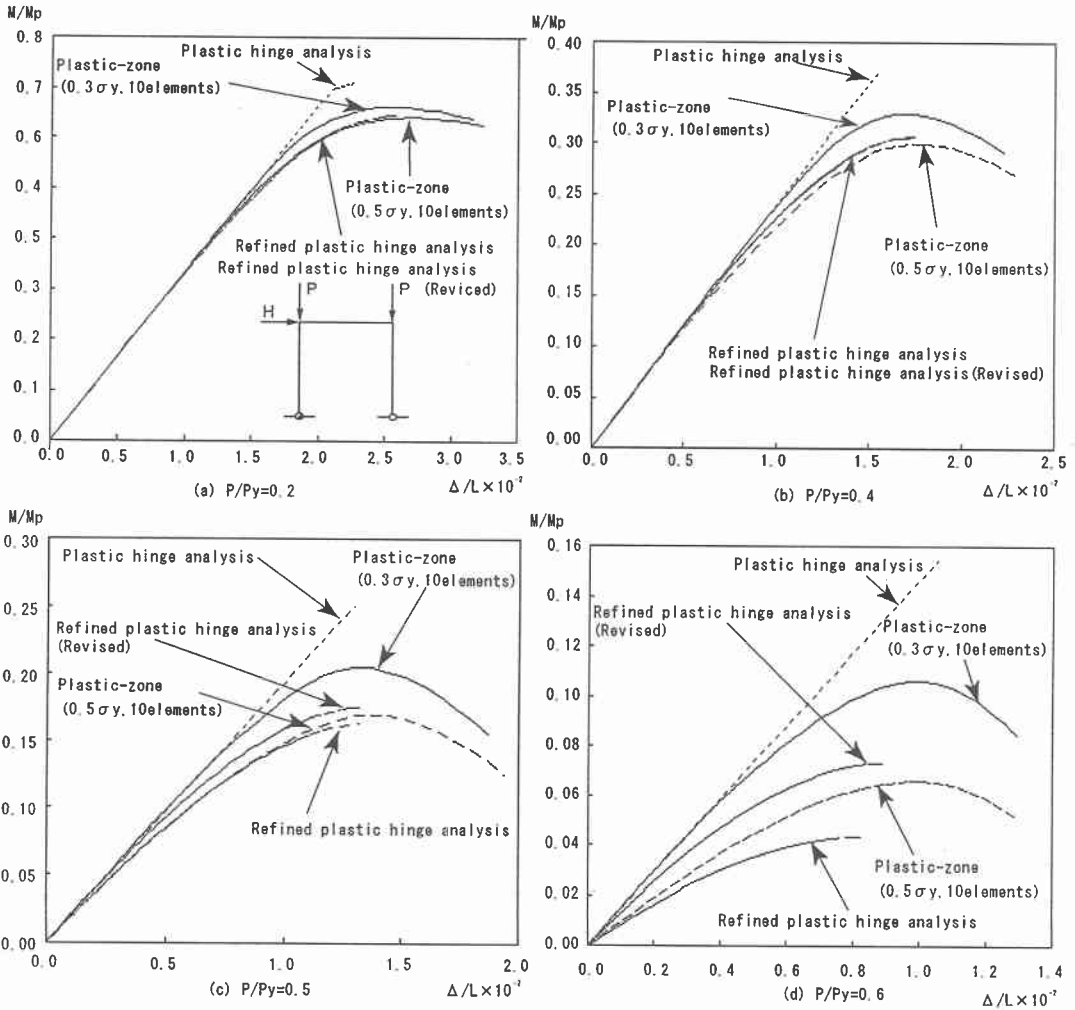


図5 分離型剛性低減係数を用いた修正塑性ヒンジ解析 (側方移動門型フレーム)

参考文献

- 1) J.Y.R. Liew, Chapter 4, Advanced Analysis of Steel Frames, edited by W.F. Chen and S. Toma, CRC Press, 1994.
- 2) 西端、当麻、Liew：修正塑性ヒンジ法による骨組構造物の弾塑性2次解析、土木学会北海道支部論文報告集、第50号、平成6年2月。
- 3) 三田村、西端、当麻：修正塑性ヒンジ解析における剛性低減係数の影響、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部(A)、平成7年9月。