

P- 効果を考慮した1質点系モデルの歪エネルギーの偏りと塑性率

山下 典彦¹・須山 翔太²

¹神戸市立工業高等専門学校都市工学科准教授 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp

²大阪大学工学部地球総合工学科学生 (元神戸高専学生) (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:osakau-suyama@yahoo.co.jp

重力に伴う復元力の低下をP- 効果と呼んでおり、水平復元力が弾塑性応答をする場合は重力の影響により負勾配の復元力特性が生じ、激震による構造物の倒壊原因の1つとも考えられる。本研究では、P- 効果の影響を推定するために山崎らの提唱した安定比を導入し、大変形を対象とした厳密な1質点系モデルを用いて弾塑性応答解析を行い、エネルギースペクトルから降伏強度を決定することで安定比に対する歪エネルギーの1方向への偏りと塑性率の増加現象について検討した。その結果、塑性勾配係数に関係なく1質点系モデルが異なっても歪エネルギーの偏りと塑性率は概ね等しくなったが、入力地震動加速度に依存することがわかった。

Key Words : P- effect, rocking SDOF model, elasto-plastic response analysis, stability ratio

1. はじめに

道路橋示方書の平成14年の改訂では、性能規定型の技術基準を目指し、要求性能を橋全体系の観点だけでなく構造部材ごとに明示するとともに、それを達成する従来からの耐震解析法も併記するという書式に改められた¹⁾。また、鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計基準を諸外国のものと比較した場合、日本で考慮されていないものの1つにP- 効果がある²⁾。わが国の橋梁の耐震設計は、塑性域の変形性能を期待しながらも、残留変位規定や慣性力の下限值規定によってある程度の変形性能とある程度の耐力を有するような橋脚が得られるようになっており、P- 効果の影響が無視できる領域で設計している。しかしながら、ひとたび設計外力を超える外乱が作用した場合には、P- 効果により地震時の塑性変形が片側に偏りやすくなり、倒壊原因の1つとも考えられることからP- 効果の影響を検討する必要性が生じる。さらに、これまでに、数々のP- 効果についての研究がなされてきたが、P- 効果が構造物の応答に及ぼす影響の定量的な評価はほとんどなされていないのが現状である。

本論文では、この影響を推定するために山崎ら³⁾の提唱した安定比 τ (振動系の特性と入力大きさからなる指標)を導入した。具体的には、大変形を対象とした厳密な1質点系モデル⁴⁾ (以下、回転厳密モデルという)と水平振動を扱った一般的な1質

点系モデル (以下、水平モデル)の復元力特性として歪硬化を考慮した履歴ループ⁵⁾ (以下、歪硬化ループという)とMasingの法則に従った一般的なバイリニア履歴ループ (以下、Masingループという)を用いて弾塑性応答解析を行い、エネルギースペクトルから降伏強度を決定し、安定比に対する歪エネルギーの1方向への偏りと塑性率の増加現象について違いを比較した。

2. P- 効果と安定比

大変形を対象とした回転厳密モデルにP- 効果を考慮したものが図-1である。

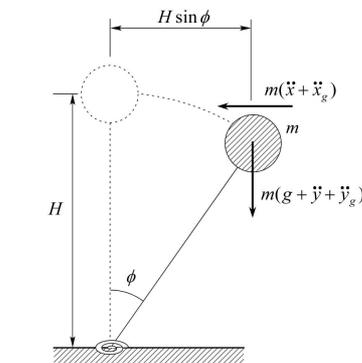


図-1 回転厳密モデルの座標系

このモデルの回転軸でのモーメントの釣り合いから、運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{\phi} + \frac{c_s}{m_s H^2} \dot{\phi} + \frac{M(\phi)}{m_s H^2} = -\frac{\ddot{x}_g}{H} \cos \phi + \frac{g + \ddot{y}_g}{H} \sin \phi \quad (1)$$

ここに、 m_s は 1 質点系の質量、 c_s は減衰係数、 $M(\phi)$ は復元モーメント、 ϕ は橋脚の回転角（橋脚を剛体と仮定しており部材角と等しい）、 H は橋脚高さ、 g は重力加速度、 \ddot{x}_g と \ddot{y}_g は水平及び鉛直方向の入力地震動加速度であり、地震動に水平成分に加え、鉛直成分を考慮できることが、この回転厳密モデルの特徴である。

式(1)を幾何学的近似 ($\cos \phi = 1$, $\sin \phi = \phi$) して表現すると、図-2(a)に示すような回転 1 自由度近似モデル（以下、回転近似モデル）の運動方程式が得られる。さらに、回転近似モデル及び水平モデルを支えているばねを k_R , k_s とし $k_s = k_R/H^2$ の関係を用いると図-2(b)に示すような水平モデルの運動方程式は次式で表される。

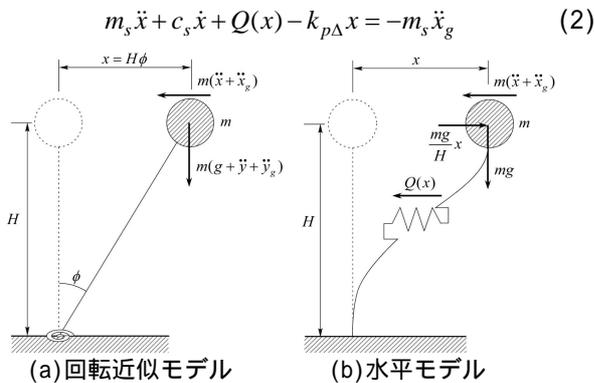


図-2 回転近似モデルと水平モデルの関係

ここに、 $Q(x)$ は k_s の復元力、 $k_{p\Delta}$ は P- 効果による剛性の低下量、 $Q(x) - k_{p\Delta}x$ がこのモデルの復元力であり、P- 効果による剛性の低下量を表した等価ばね剛性は $k_{p\Delta} = m_s g/H$ で表される。これらの関係は、回転厳密モデルにおいても同様である。

P- 効果を表す指標として、ばね剛性 k_s と等価ばね剛性 $k_{p\Delta}$ の比で表される安定係数 θ がよく用いられる。

$$\theta = k_{p\Delta}/k_s \quad (3)$$

しかし、安定係数は異なる地震入力エネルギー、すなわち想定する累積塑性変形倍率の影響を表現できない。山崎ら³⁾は、応答における累積塑性歪エネルギーが完全に 1 方向のみに累積し、地震終了時に復元力がゼロになり倒壊するような安定係数を θ_{cr} とし、 θ と θ_{cr} の比を安定比 τ と定義した。

図-3 に示すように、完全に 1 方向に偏った累積塑性歪エネルギーが図中の三角形の面積であることを考慮すれば、 θ_{cr} と安定比 τ は次式のように表される。

$$\theta_{cr} = \frac{2\eta\alpha + 1 - \alpha}{2\eta + 1 - \alpha}, \quad \tau = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{2\eta\alpha + 1 - \alpha}{2\eta + 1 - \alpha} \theta \quad (4)$$

ここに、 η は累積塑性変形倍率、 α は塑性勾配係数である。ここで、ある 1 つの地震動に対してこの系に入力するエネルギーのうち損傷に寄与する量を E_D とし、 E_D による累積塑性変形倍率 η を表すと

$$E_D = \frac{1}{2} Q_y x_y \frac{(1 - \theta_{cr})(1 - \alpha)}{\theta_{cr} - \alpha}, \quad \eta = \frac{E_D}{Q_y x_y} \quad (5)$$

ここに、 Q_y はばねの降伏強度、 x_y はばねの降伏変位である。

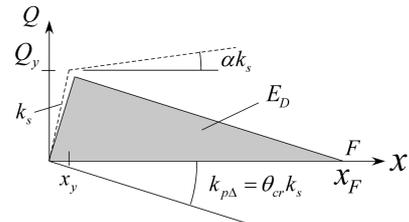


図-3 崩壊状態

3. エネルギースペクトル

エネルギースペクトルは、入力エネルギーの速度換算値 $V_E = \sqrt{2E/m_s}$ と固有周期 T の関係と定義されている。この関係を利用して、特定の固有周期における入力エネルギーの速度換算値 V_E と減衰定数 h を以下の式に代入する。

$$V_D = \frac{1}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} V_E, \quad C_B = \sqrt{\frac{2\pi^2 V_D^2}{\eta g^2 T^2}} \quad (6)$$

式(6)より、せん断係数 C_B の初期値を決定し、弾塑性応答解析において、特定の η に対するせん断係数 C_B を算出し、ばねの降伏強度 Q_y が決定できる。図-4 に減衰定数 0, 2, 5, 10, 20, 30(%), 固有周期 0.1 ~ 5.0(sec), 微小時間 0.001(sec) とした神戸海洋気象台の入力地震動(NS 成分)のエネルギースペクトルを示す。

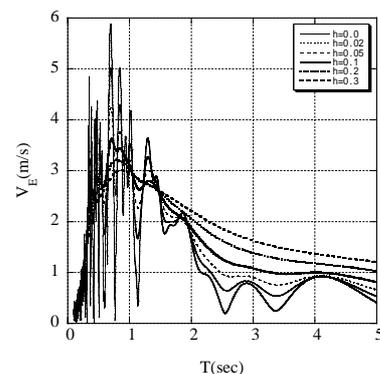


図-4 エネルギースペクトル (JMA 神戸)

4. 弾塑性応答解析

(1) 解析条件

弾塑性応答解析は線形加速度法により行い、微小時間を0.001(sec)とした。入力地震動加速度は、エルセントロと神戸海洋気象台のNS成分とし、入力の大さは $\theta=0$ (すなわち $k_{p\Delta}=0$)のときの累積塑性変形倍率 η が10,20になるような2種類とした。固有周期は、1~5(sec)で1秒刻みの5種類とし、減衰定数は0,2,5(%)とした。さらに、図-3の塑性勾配係数 α は、0,0.1とし、安定比 τ については、0~1.0の0.1刻みとした。

(2) 解析結果

図-5は η が10,減衰定数が2(%)の場合で、上段がエルセントロ、下段が神戸海洋気象台に対する結果を示しており、それぞれ左側2列は水平モデル、右側2列は回転厳密モデル、さらに、その上段が歪硬化ループ、下段がMasingループに対する結果を示しており、それぞれ左側は歪エネルギーの偏りを、右側は塑性率を表している。全ての図の横軸は安定比 τ である。

歪エネルギーの偏りを示す図の縦軸は、正側あるいは負側で吸収した歪エネルギーの大きい方の η' を全歪エネルギーの η で除した値である。塑性率を示

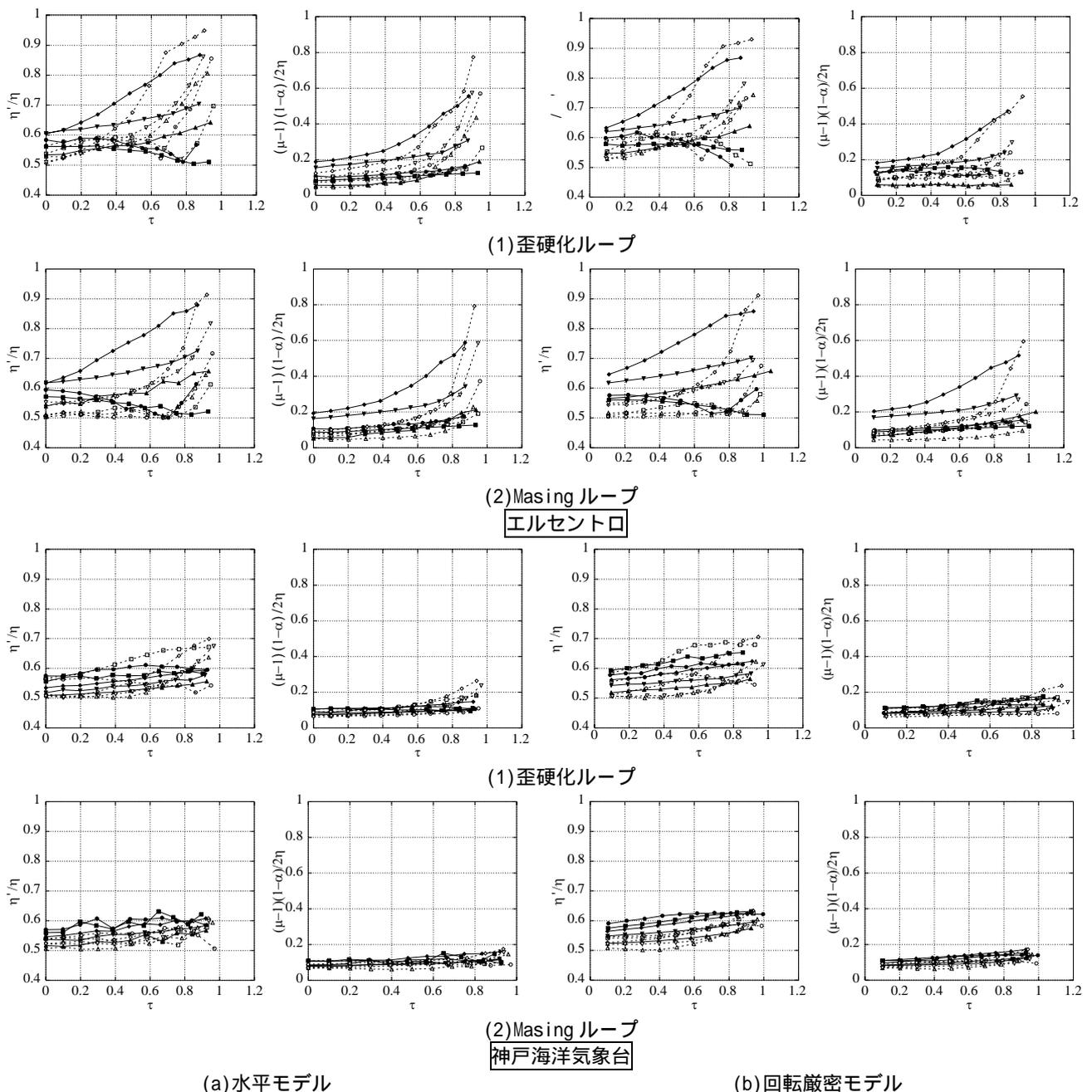


図-5 P- 効果を考慮した1質点系モデルの歪エネルギーの偏りと塑性率

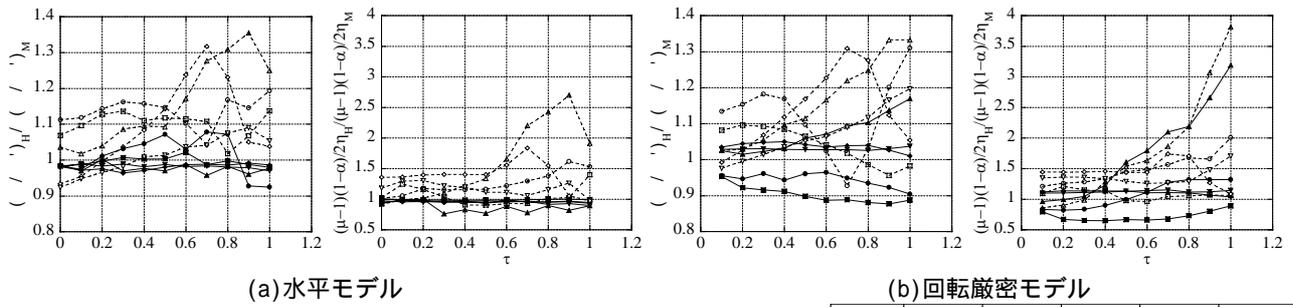


図-6 歪硬化ループと Masing ループの比率

す図の縦軸は、応答解析結果より塑性率 μ を求め、 $(\mu-1)(1-\alpha)/2\eta$ の値をプロットし、図-3 の F 点の場合は縦軸が 1 の値にプロットされる。

エルセントロでは、安定比の増加に伴い歪エネルギーの偏り、塑性率は共に増加傾向にある。固有周期が5秒の場合が、塑性勾配係数に関係なく、最も大きな値となった。神戸海洋気象台では、1 質点系モデルが異なっても両者は概ね等しくなった。

図-6の縦軸は、図-5のエルセントロの歪エネルギーの偏り、塑性率について歪硬化ループをMasingループで除したものである。横軸は両ループで安定比が異なるため、初期値の安定比を用いた。水平モデルでは、固有周期を問わず塑性勾配係数が0.0より0.1の場合に大きな差が生じている。回転厳密モデルでは、水平モデルと同様の傾向があるが、固有周期3.0秒、塑性勾配係数0.0で歪エネルギーの偏り、塑性率共に差が大きくなっている。

5. まとめ

水平モデルと回転厳密モデルの1 質点系モデルを用いて弾塑性応答解析を行い、安定比に対する歪エネルギーの1 方向への偏りと塑性率の増加現象につ

いて違いを比較した。これらの結果を以下にまとめる

- 1) 1 質点系モデルが異なっても歪エネルギーの偏りと塑性率は概ね等しくなったが、入力地震動加速度に依存することがわかった。
- 2) 塑性勾配係数0.1で、歪硬化ループの歪エネルギーの偏りと塑性率がMasingループより大きくなった。以上から、今後はさらに観測された地震動を用いてP- 効果が構造物の非線形性に与える影響についてさらに検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 日本地震工学会 性能規定型耐震設計法に関する研究委員会編：性能規定型耐震設計 現状と課題，鹿島出版会，2006。
- 2) 高橋雅裕，矢部正明：各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚のP- 効果の比較，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.349-355，1999。
- 3) 山崎真司，遠藤和明：弾塑性地震応答におけるP- 効果と安定比，日本建築学会構造系論文集，第527号，pp.71-78，2000。
- 4) 山下典彦，原田隆典：P- 効果が1自由度系の非線形応答に与える影響，土木学会地震工学論文集，CD-ROM，pp.1-8，2003。
- 5) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1987。

DEVIATION OF STRAIN ENERGY AND DUCTILITY FACTOR OF SDOF MODEL CONSIDERING P-DELTA EFFECT

Norihiko YAMASHITA and Syouta SUYAMA

Over the past few decades a considerable number of studies have been made on the issues of P-effect on structural performance of lumped mass model. The influence of P-effect is caused by the weight and lateral deformation of the structure. In this study, in order to establish the simple seismic design method considering the large deformation due to the P-effect, we investigate the nonlinear response characteristics using two types of nonlinear SDOF model. We introduce a new and reinterpretation for the stability ratio, which is an index for estimating the concentration of strain energy to one side and the increasing phenomenon of the ductility factor caused by the P-effect.