

P-Δ効果を考慮した1自由度モデルの 非線形応答に関する研究

山下典彦¹・秦 吉弥²・原田隆典³

¹正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

²学生会員 広島大学工学部第4類 環境工学課程学生 (元神戸高専学生) (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 工博 宮崎大学工学部 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

重力に伴う復元力の低下をP-Δ効果と呼んでおり、古くから層レベル、部材レベル、有限要素レベルにおいて、この重力の影響を考慮した研究が数多く行われている。さらに、この復元力の減少は橋脚高さが高く重い構造の場合には無視できないことがあり、激震による構造物の倒壊の原因の1つとも考えられる。しかし、現在までに行われてきた研究の多くは、そのほとんどが微小変形を扱ったもので上下動の構造物の応答に与える影響が詳細に加味されたものは少ない。本研究では、構造物の変形において近似を行わない大変形を考慮した1自由度系の非線形地震応答解析を行い、P-Δ効果の影響を考慮した構造物の非線形挙動に関する検討を行った。

Key Words : rocking sdof model, response spectrum, ductility factor, p-Δ effect

1. まえがき

兵庫県南部地震、鳥取県西部地震の観測地震記録から、これらの地震の特徴として上下動が大きかったことが挙げられる。しかし、今なお耐震設計指針においては鉛直地震動を考慮した設計は加味されておらず、それらを考慮した設計法の確立が必要不可欠であると考え。さらに、上部構造物の非線形解析については、現在まで多くの研究が行われているが、そのほとんどが微小変形を扱ったもので上下動の影響を詳細に加味したもの^{1),2),3)}は少ない。本研究では、大変形の解析を行うため、P-Δ効果を考慮した1自由度モデル(以下、回転1自由度モデルと呼ぶ。)について絶対加速度応答スペクトルおよび塑性率を算出し、水平1自由度モデル(1層構造物が紙面内で水平振動する場合)の解析結果と照らし合わせ、比較検討を行った。

2. 回転1自由度モデル

図-1に上下動を考慮、すなわちP-Δ効果を考慮した回転1自由度モデルを示す。大変形解析を行うため $\cos \phi = 1$, $\sin \phi = \phi$ の近似を行わず、座標を定め

ると運動方程式は次式のようなになる¹⁾。

$$\ddot{\phi} + 2\xi \frac{2\pi}{T} \dot{\phi} + \frac{M(\phi)}{mH^2} = -\frac{\ddot{X}}{H} \cos \phi + \frac{g + \ddot{Y}}{H} \sin \phi \quad (1)$$

ここに、 m は上部構造物の質量、 ξ は減衰定数、 T は固有周期、 $M(\phi)$ は復元力モーメント、 ϕ は橋脚の回転角、 H は橋脚高さ、 g は重力加速度である。

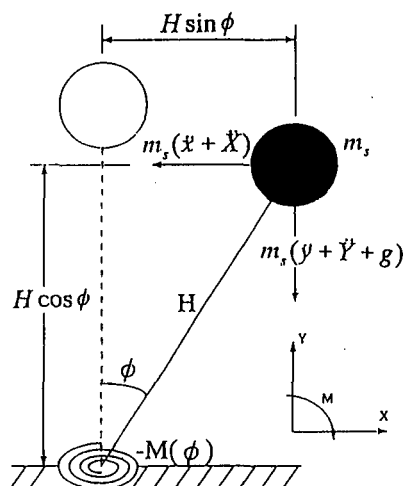


図-1 回転1自由度モデル

さらに、モデルの非線形復元力特性 $M(\phi)$ は、モデルの回転軸で生じる塑性ヒンジを想定したバネによって評価するものとし、図-2に示すようなモーメントと回転角の関係が完全弾塑性のモデルで表されるものとする。

3. 上下動を考慮した応答スペクトルと塑性率

回転1自由度モデルでは、回転軸のモーメントのつり合いから運動方程式を求めている。したがって、

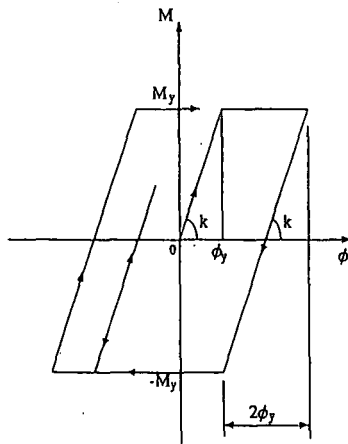


図-2 完全弾塑性の復元力モーメント

水平1自由度モデルの解析結果と比較する際には回転運動を水平運動に変換する必要がある。応答スペクトルについては $\ddot{X}$ を水平方向の地動加速度とし、次式で表せる水平方向最大絶対加速度 $\ddot{x}_{\max}$ から求めた。

$$\ddot{x}_{\max} = ABS. \left\{ \ddot{X} + \left(-H \sin \phi (\dot{\phi})^2 + H \cos \phi (\ddot{\phi}) \right) \right\}_{\max} \quad (2)$$

さらに、塑性率については

$$\mu = \frac{\sin \phi_{\max}}{\phi_y} \quad (3)$$

から求めた。また、両者の算出については、復元力特性において降伏震度 C_y (0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0)を決定し、各固有周期に対応する剛性を初期剛性とした上で降伏変位を決め、水平1自由度モデルはバイリニア型の復元力特性を持つものとし、第2剛性を初期剛性の1/10($r=0.1$)とした。

4. 数値計算例

非線形解析においては、微小時間 $\Delta t=1/1000$ (s)、減衰定数 $\xi=5\%$ 、橋脚高さ $H=15$ mとし、入力地震動は、神戸海洋気象台、日野およびエルセントロの

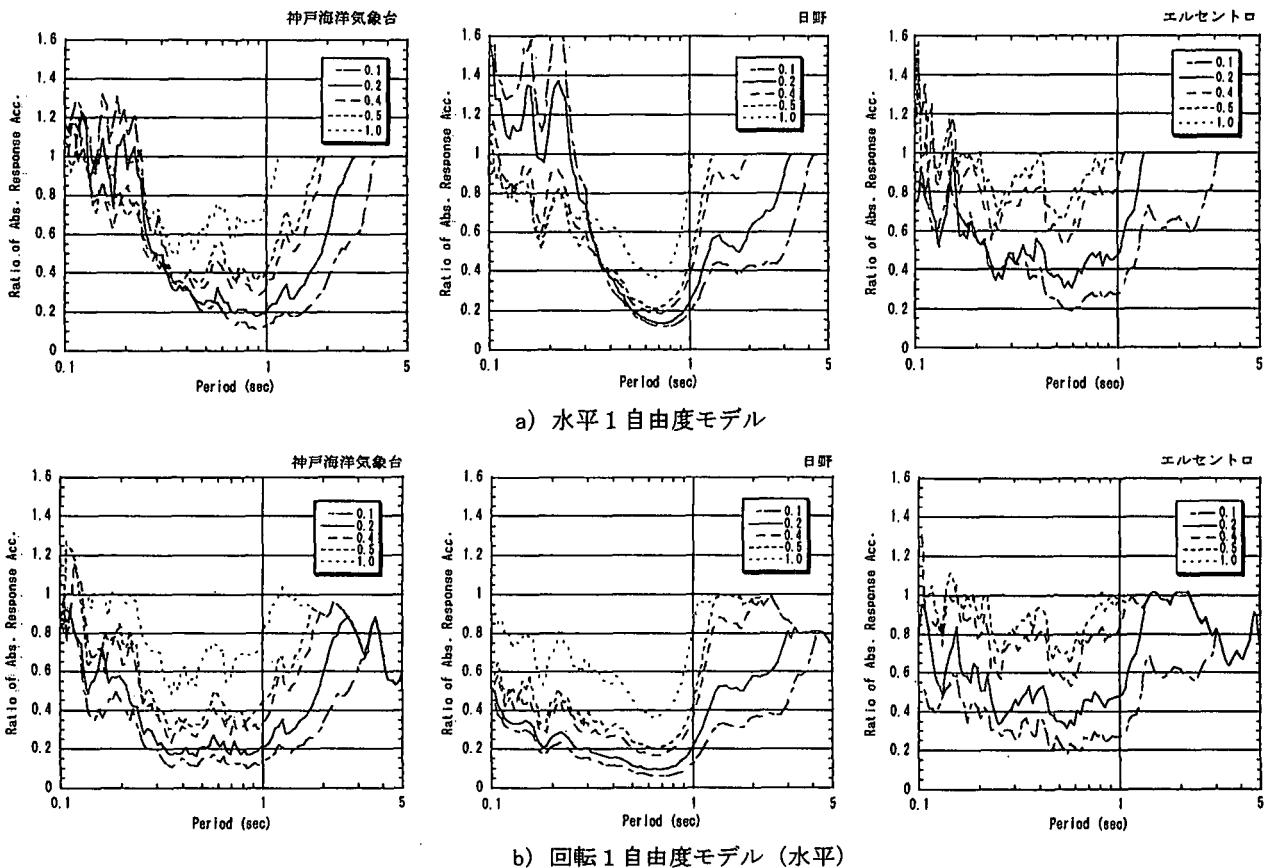


図-3 応答スペクトルの比率

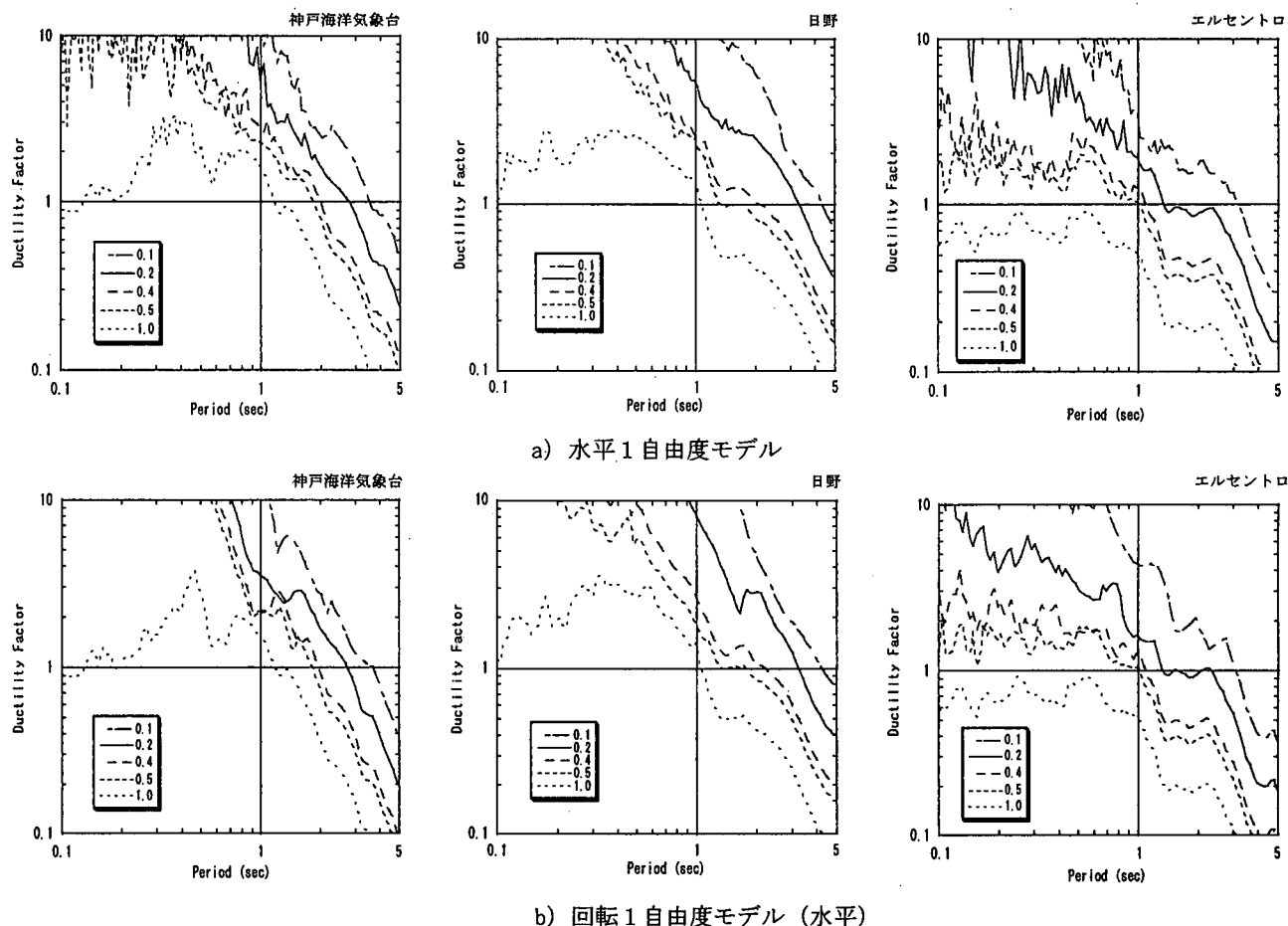


図-4 降伏震度による塑性率

観測地震記録のNS成分(水平)とUD成分(上下)を用いた。

図-3は水平および回転1自由度モデル(水平)の非線形の絶対加速度応答スペクトルを計算し、水平1自由度モデルの線形の絶対加速度応答スペクトルとの比率を水平1自由度と回転1自由度モデル(水平)についてとったものである。これより、すべての図の1秒付近で降伏震度が上より1.0から0.1となっているが、水平1自由度モデルの神戸海洋気象台と日野では0.3秒以下で反転している。特に日野の場合は、0.3秒以下で降伏震度が小さいほど応答スペクトルの比率が大きくなっている。また、すべての回転1自由度モデルでは、0.7秒以下で水平1自由度モデルと比較して応答スペクトルの比率が小さくなっている。さらに、1.0秒以上で水平1自由度モデルの応答スペクトルの比率が、すべての降伏震度において1.0に収束するが、回転1自由度モデルでは、降伏震度による比率の違いが1.0には収束せず低下している。

図-4は水平および回転1自由度モデル(水平)における固有周期と塑性率の関係を示したものである。すべての図で降伏震度が小さいほど、復元力特性が塑性域に入り大きな変形を生じることから、上より

降伏震度が0.1から1.0となっている。特に降伏震度が小さい場合は、短周期側のみならず長周期側でも10以上の大きな塑性率を示していることが読み取れる。また、エルセントロの場合は、神戸海洋気象台および日野と比較して塑性率の値が小さくなるとともに、水平および回転1自由度モデルによる塑性率の差はあまり見られない。

図-5は水平および回転1自由度モデル(水平)における降伏震度による塑性率の比率を示したものである。これより、神戸海洋気象台では0.7秒以下で最大9.5倍、日野では0.2秒以下と0.4から1.2秒の間で最大3倍の大きな比を示している。しかしながら、エルセントロの場合は、各固有周期にわたって比率に大きな差はみられないことがわかる。さらに、すべての場合で2秒以上の長周期では、比率が1.0前後となり降伏震度による違いがあまりみられないことから、水平および回転1自由度モデルの応答に差がないことがわかる。

図-6は入力最大加速度を50galから1000galまで50刻みずつ変化させたときの上部構造物の最大応答変位を示したものである。なお、UD成分の入力地震動については水平成分が入力最大加速度になるように乗じた係数と同じ係数に乗じたものを用いた。図は

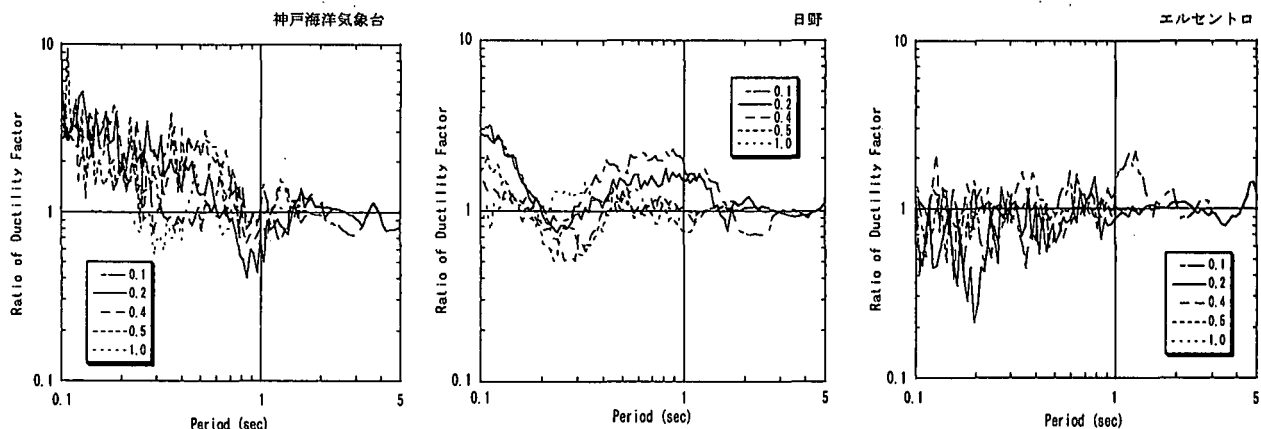


図-5 降伏震度による塑性率の比率

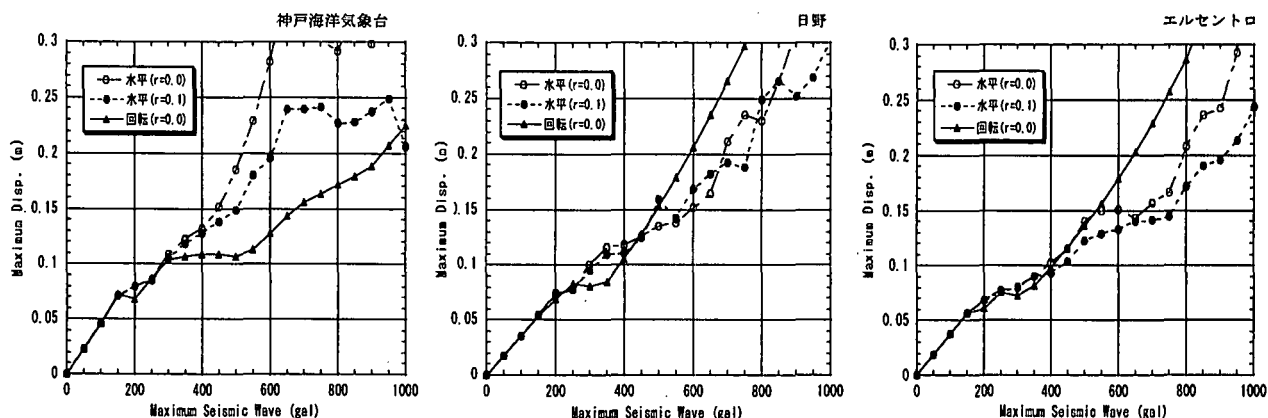


図-6 入力最大加速度と最大応答変位の関係（固有周期 1.0 秒）

固有周期が1.0(s)で降伏震度が0.2の場合であり、 $r=0.0$ のとき復元力特性が完全弾塑性となる。これより、すべての入力において150gal以上で水平1自由度モデルと回転1自由度モデル（水平）に違いが見られる。さらに、神戸海洋気象台では、水平1自由度モデルの最大応答変位が回転1自由度モデルと比較して大きくなっているが、日野およびエルセントロでは逆に回転1自由度の方が大きくなっている。これは、履歴によるエネルギーの吸収が大きくなり、入力エネルギーに対する分担率が増え応答加速度が比例的でなくなったためであると思われる。

5. まとめ

神戸海洋気象台、日野およびエルセントロの観測地震記録の水平および上下動成分を回転1自由度モデルの入力地震動とし、応答スペクトルおよび塑性率を求めることで以下の結果が得られた。

1. 入力地震動の最大値を変化させることで、水平と回転の1自由度モデルの応答に違いが見られ、固有周期によっては、上下動および大変形の影

響が無視できないことがわかる。

2. 神戸海洋気象台および日野を入力地震動とした場合、水平と回転の1自由度モデルにおける塑性率の比率より、主として短周期側で大きな比率を示していることがわかる。

今後は、都市直下地震で観測された地震波形を用いた数値計算を数多く行い、履歴ループについて比較検討を行うとともに、エネルギーの授受の観点からP- Δ 効果の影響を抽出し、構造物の破壊に与える影響について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 石山祐二, 麻里哲広, 井上圭一: 構造特性係数の極値についてP- Δ 効果を考慮した1自由度モデルの解析, 日本建築学会構造系論文集, 第520号, pp.29-35, 1999.
- 2) 麻里哲広, 井上圭一, 石山祐二: 倒壊ベースシア係数スペクトルによる地震動の破壊力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp.71-76, 2000.
- 3) 山下典彦, 秦吉弥, 原田隆典: P- Δ 効果を考慮した応答スペクトルに関する研究, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 土木学会技術推進機構, pp.153-158, 2001.