

P-Δ効果を考慮した1自由度モデルの動的非線形性に関する研究

山下典彦¹・秦 吉弥²・竹内 翔³・原田隆典⁴

¹正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市学園東町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 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³非会員 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科学生 (〒651-2194 兵庫県神戸市学園東町8-3)

⁴正会員 工博 宮崎大学工学部教授 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)

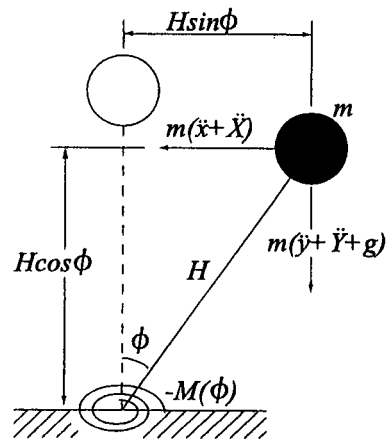
1. まえがき

1995年に発生した兵庫県南部地震における被害経験から、道路橋示方書が改訂された。その中には、線形域の構造物挙動の把握に重点を置いた従来の震度法の他に、構造物の非線形の効果も考慮した地震時保有水平耐力法が耐震設計法の主要な設計法として位置づけられるようになった。さらに、地震時の挙動が複雑な系に対しては動的解析を行うことが規定された。しかしながら、地震時保有水平耐力法や動的解析法を用いた構造物の耐震設計に際しては、コンピュータを用いた解析ソフトウェアの整備が必要なのは言うまでもないが、耐震解析手法が必ずしも設計技術者に十分普及していないのが現状である¹⁾。それに加え、兵庫県南部地震だけでなく鳥取県西部地震の観測地震記録の特徴として上下動が大きかったことが挙げられる。この上下動が土木構造物の破壊に与える影響についての検討は、あまり行われていないのが現状であり、耐震設計指針においても鉛直地震動を考慮した耐震設計は考慮されていない。

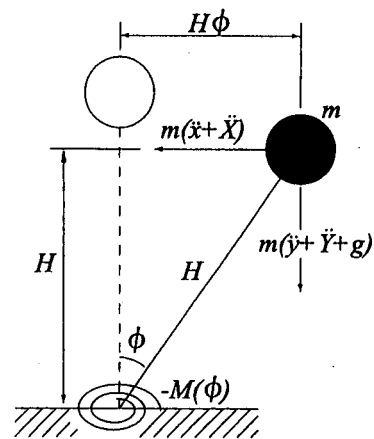
本研究では、上下動を考慮した設計法の確立が必要不可欠であると考え、対象モデルとして1自由度系を用い、大変形および上下動が構造物の応答にどの程度影響を与えるかについて調べた。上部構造物の非線形解析については、現在まで多くの研究が行われているが、そのほとんどが微小変形を扱ったもの^{2), 3), 4)}で上下動の影響を詳細に加味したもの^{5), 6), 7)}は少ない。ここでは、大変形の解析を行うため、P-Δ効果を考慮した1自由度モデル(以下、回転1自由度厳密モデルと呼ぶ。)と、微小変形を扱った1自由度モデル(以下、回転1自由度近似モデル)について絶対加速度応答スペクトルおよび塑性率を算出し、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

上下動を考慮、すなわちP-Δを考慮した回転1自由度モデルを図-1に示す。図-1a)は、大変形を扱った回転1自由度厳密モデル、図-1b)は、微小変形を扱った回転1自由度近似モデルを示している。



a) 回転1自由度厳密モデル



b) 回転1自由度近似モデル

図-1 回転1自由度モデル

回転1自由度厳密モデルでは、大変形解析を行うため、 $\cos \phi = 1$ 、 $\sin \phi = \phi$ の近似を行わず、図-1a)のように座標を定め、回転1自由度近似モデルでは、上記の近似を行い図-1b)のように座標を定めると運動方程式は各々次式のようになる。

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

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

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。

さらに、モデルの非線形復元力特性は、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($r=0.0$)のモデルで表されるものとする。

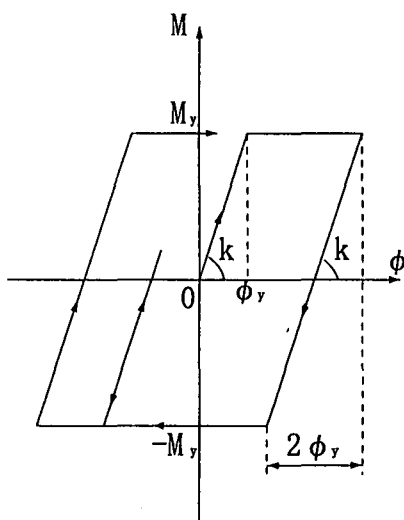


図-2 完全弾塑性の復元力モーメント

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、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、各固有周期に対応した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。回転1自由度厳密モデルおよび回転1自由度近似モデルについて水平方向最大絶対加速度の式を示すと各々次式のようになる。

$$\ddot{x}_{\max} = \left[ABS. \left\{ \ddot{X} + (-H \sin \phi (\dot{\phi})^2 + H \cos \phi (\ddot{\phi})) \right\} \right]_{\max} \quad (3)$$

$$\ddot{x}_{\max} = \left[ABS. \left\{ \ddot{X} + H \ddot{\phi} \right\} \right]_{\max} \quad (4)$$

さらに、塑性率については各モデルについて

$$\mu = \frac{\sin \phi_{\max}}{\sin \phi_y} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\sin \phi_{\max}}{\phi_y} \quad (6)$$

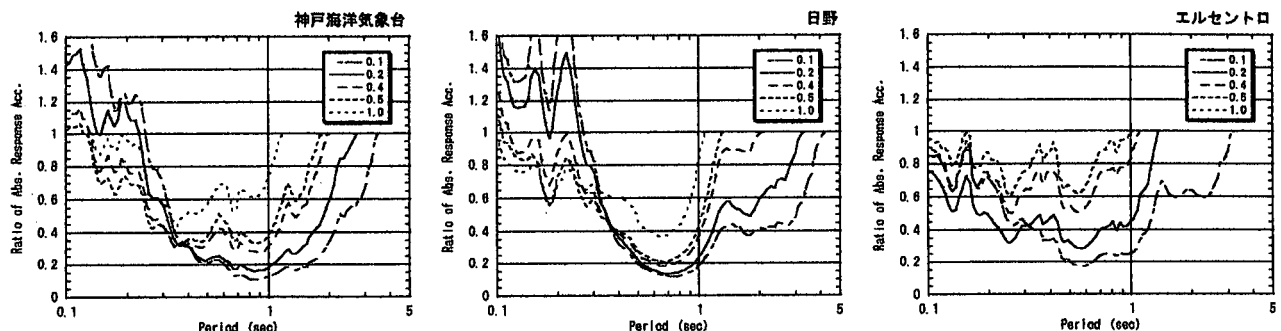
から求めた。

4. 数値計算例

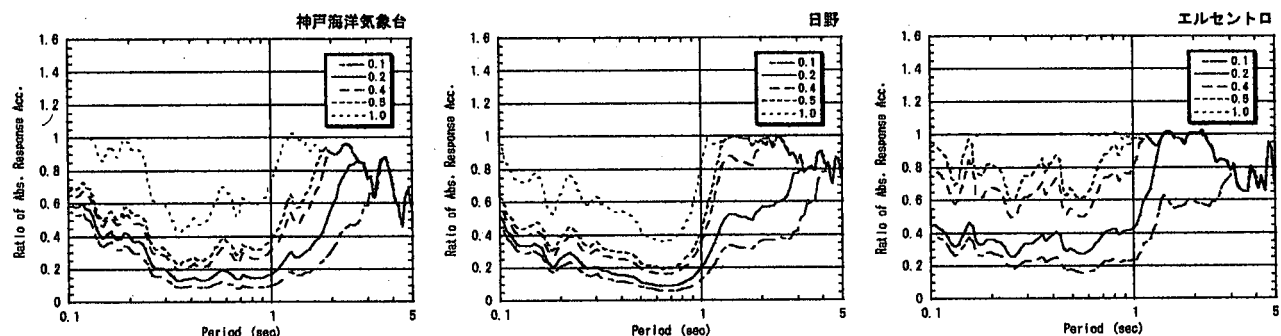
非線形解析においては、微小時間 $\Delta t=0.005(s)$ 、減衰定数 $\xi=5\%$ 、橋脚高さ $H=15m$ とし、入力地震動は、神戸海洋気象台、日野およびエルセントロの観測地震記録のNS成分(水平)とUD成分(上下)を用いた。

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、0.5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、全ての降伏震度において1.0に収束するが、鉛直地震動を作用させた厳密および近似の回転1自由度モデルでは、降伏震度による比率の違いが1.0には収束せずに減少している。逆に、鉛直地震動を作用させなかった厳密および近似の回転1自由度モデルでは、1.0より増加している。したがって、鉛直地震動の有無により長周期側においてのみ構造物の応答に差が生じることがわかった。

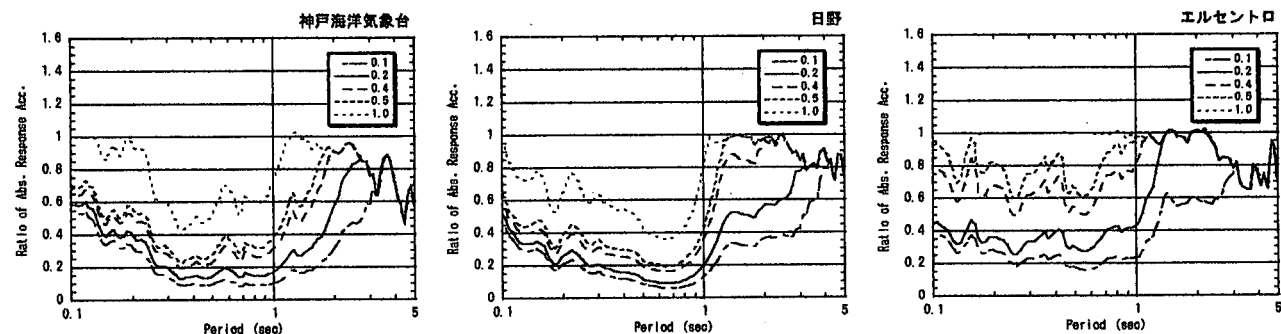
図-4は水平および回転1自由度モデル(水平)における固有周期と塑性率の関係を示したものである。すべての図で降伏震度が小さいほど、復元力特性が塑性域に入り大きな変形が生じることから、上より0.1から1.0となっている。特に降伏震度が小さい場合は、短周期側のみならず長周期側でも10以上の大き



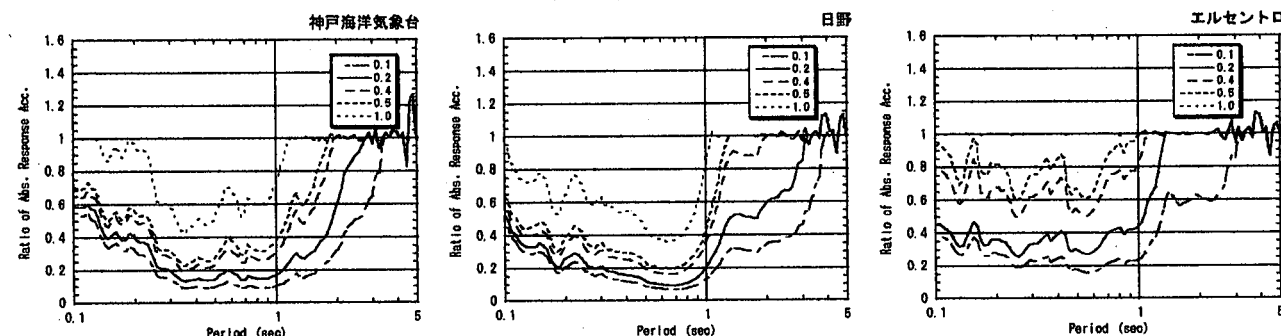
a) 水平1自由度モデル



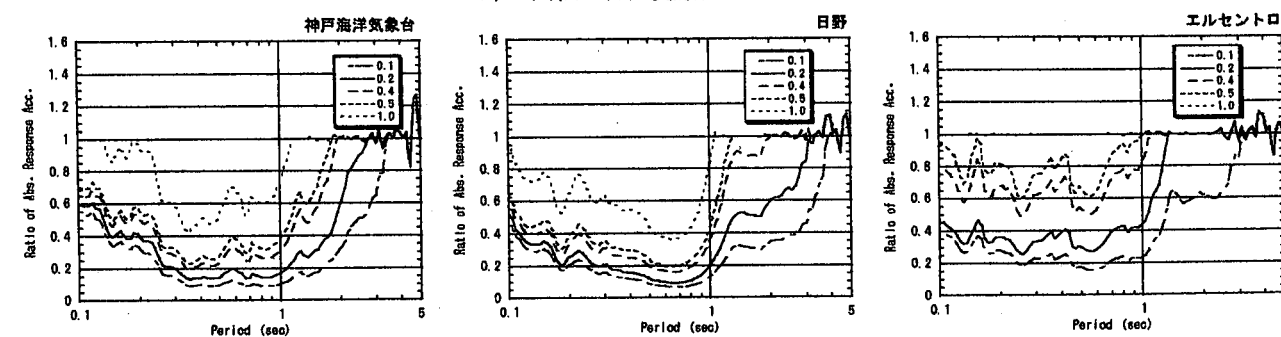
b) 回転1自由度厳密モデル



c) 回転1自由度近似モデル

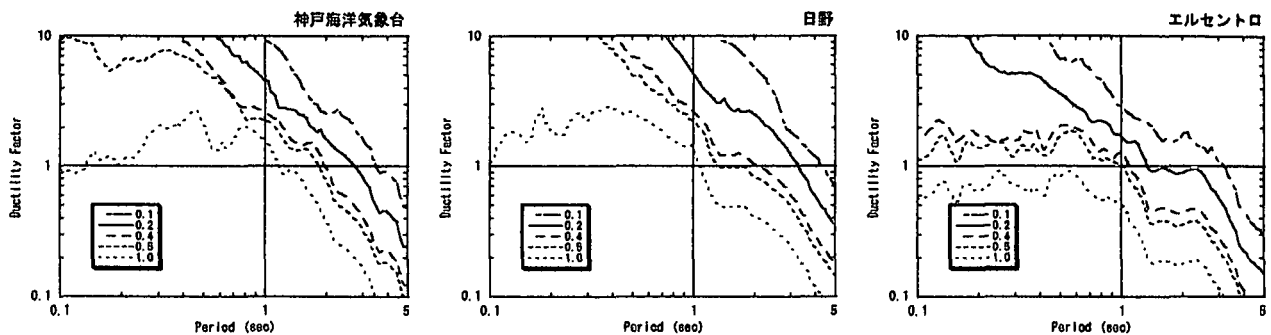


d) 回転1自由度厳密モデル (鉛直地震動無)

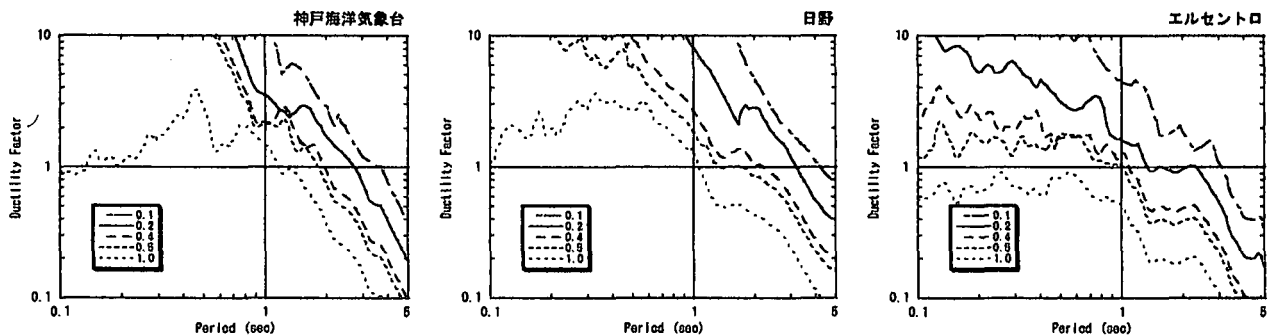


e) 回転1自由度近似モデル (鉛直地震動無)

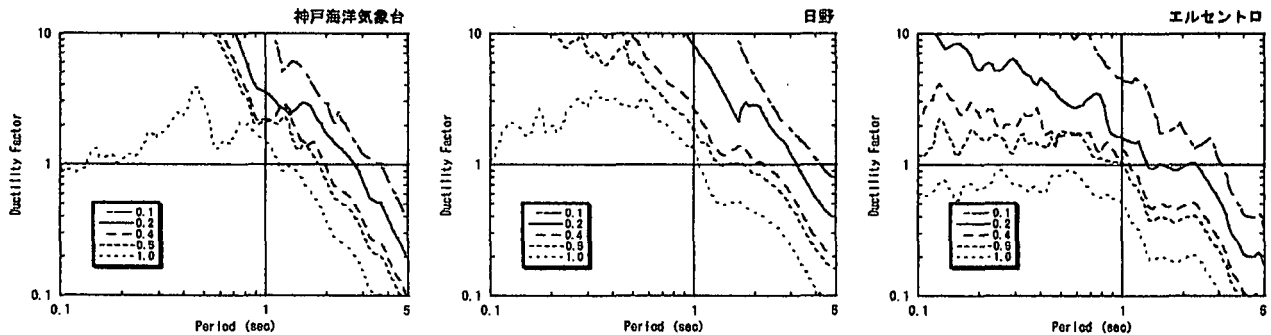
図-3 応答スペクトルの比率



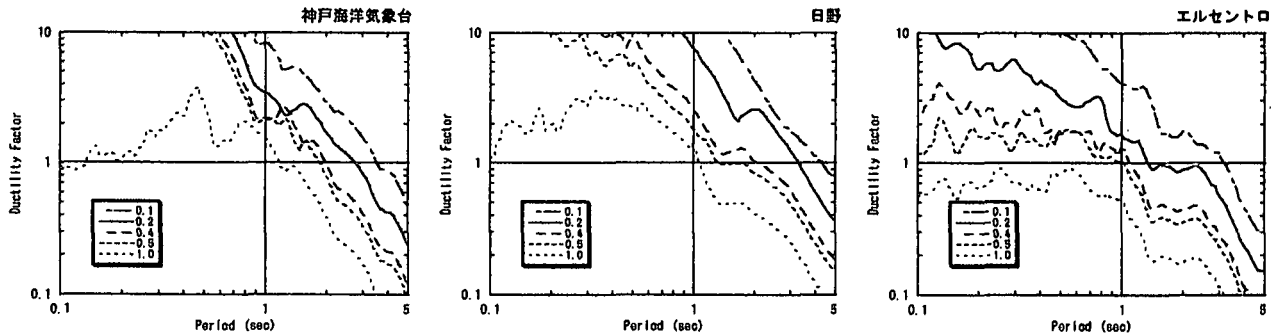
a) 水平1自由度モデル



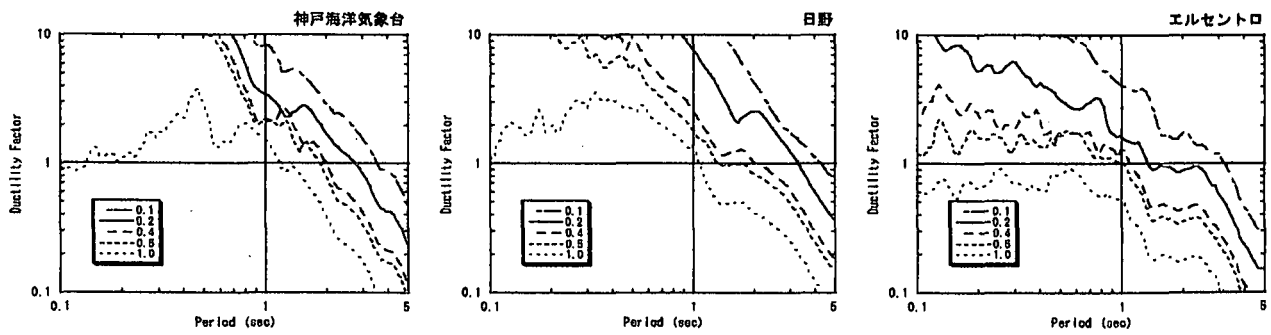
b) 回転1自由度厳密モデル



c) 回転1自由度近似モデル

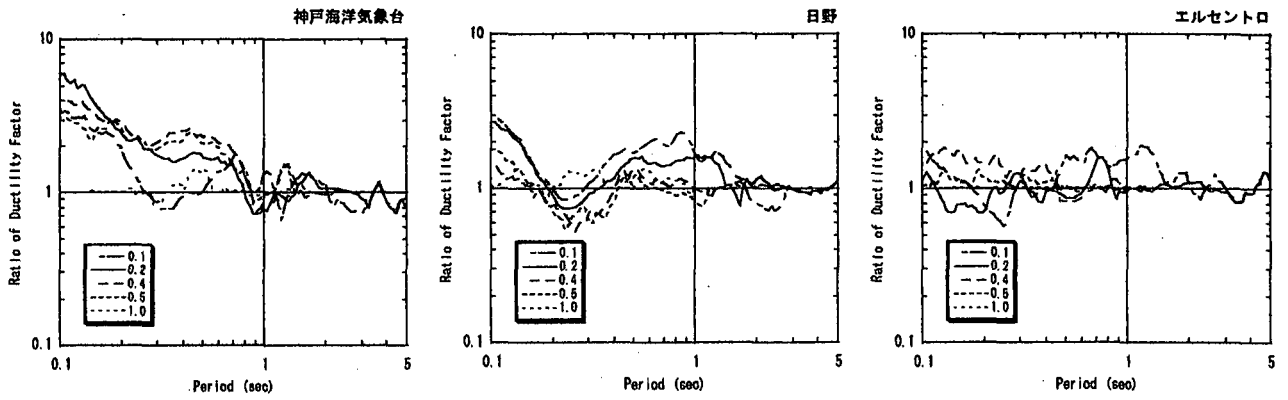


d) 回転1自由度厳密モデル (鉛直地震動無)

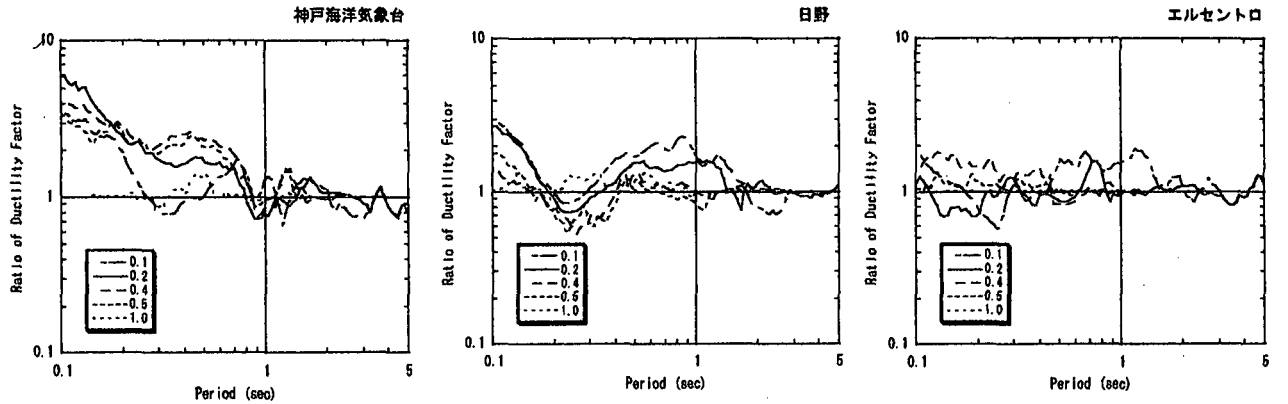


e) 回転1自由度近似モデル (鉛直地震動無)

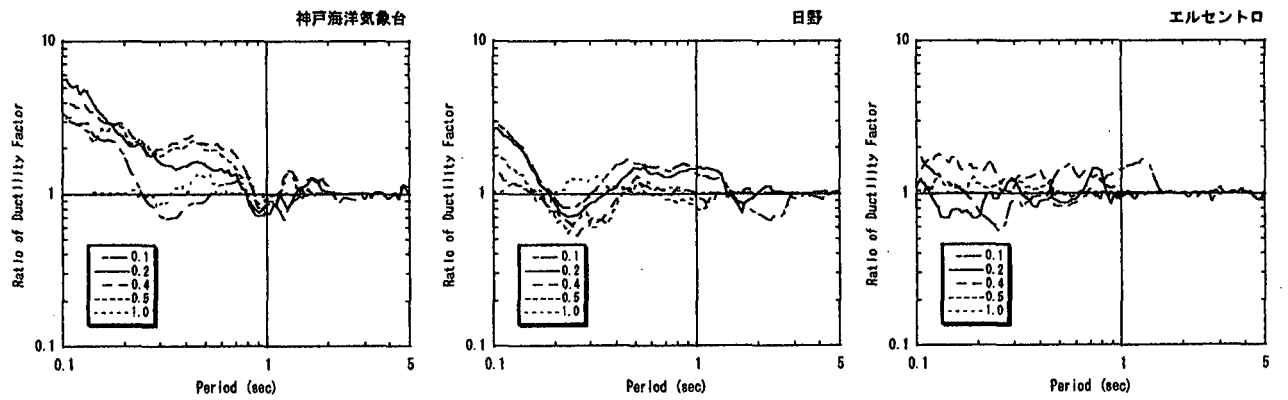
図-4 降伏震度による塑性率



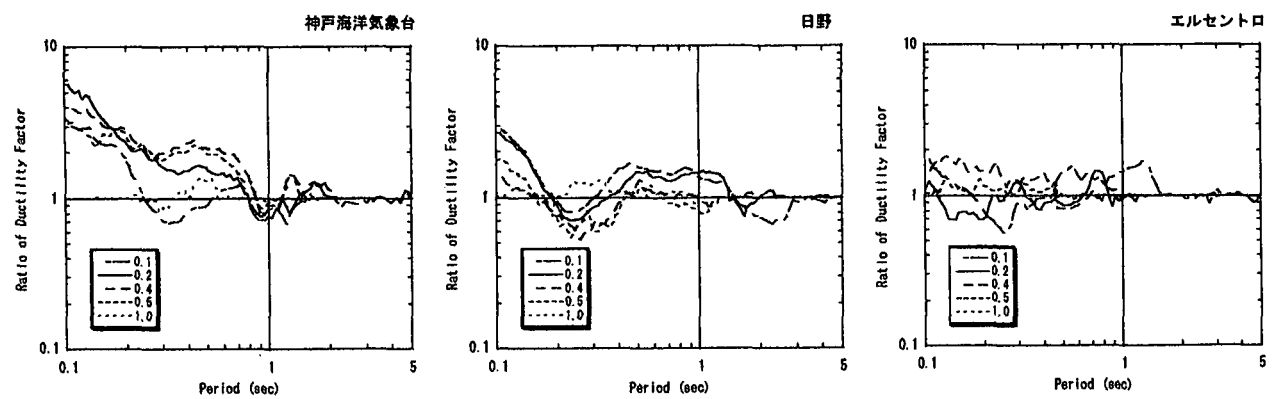
a) 回転1自由度厳密モデル



b) 回転1自由度近似モデル



c) 回転1自由度厳密モデル (鉛直地震動無)



d) 回転1自由度近似モデル (鉛直地震動無)

図-5 降伏震度による塑性率の比率

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。さらに、鉛直地震動の有無が塑性率に与える影響はほとんど無いことがわかった。

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6倍、日野では0.1秒付近と0.4秒から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、最大2倍で各固有周期にわたって比率に大きな差が無いことがわかる。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。

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厳密および近似の回転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、水平1自由度モデルと比較検討を行った。

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

1. 神戸海洋気象台および日野を入力地震動とした場合の、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、0.7秒以下の短周期側で大きな比を示していることがわかる。

2. 鉛直地震動を作用させた場合に、長周期側で応答スペクトルの比率が水平1自由度モデルと比較して減少することがわかる。

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、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) (財)土木技術センター：平成8年度 耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書，1997.
- 2) 秋山宏：鋼構造剛接骨組の耐震性におよぼす P- Δ 効果の影響，日本建築学会論文報告集，第340号，pp.11-16，1984.
- 3) Bernal, D. : Amplification Factors for Inelastic Dynamic P- δ Effects in Earthquake Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, pp635-651, 1987.
- 4) 曾我部博之，小高昭夫：強震を受ける弾塑性質点系の P- Δ 効果について，日本建築学会構造系論文集，第463号，pp.19-26，1994.
- 5) 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.
- 6) 麻里哲広，井上圭一，石山祐二：倒壊ベースシアー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.
- 7) 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.