

# P-Δ効果を考慮した応答スペクトル に関する研究

山下典彦<sup>1</sup>・秦 吉弥<sup>2</sup>・原田隆典<sup>3</sup>

<sup>1</sup>博(工) 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

<sup>2</sup>広島大学工学部第四類(元神戸市立高専学生) (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

It could be important to estimate influence of structural damage on system by vertical seismic waves, because Hyogoken-nanbu earthquake's UD component was very strong. However, the effect doesn't take into account sufficiently for the earthquake resistant design standard. In this study, we describe P-Δ effect of superstructure. Assuming the two types of non-linear model, horizontal SDOF and rocking SDOF model, we calculated response spectrum and ductility factor. In addition, we compared the results of these models with that of sway rocking model.

**Key Words :** Rocking SDOF Model, Response Spectrum, Ductility Factor, P-Δ effect

## 1. まえがき

1995年に発生した兵庫県南部地震は、土木構造物に甚大な被害を与えたことは言うまでもないが、観測地震記録からこ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考慮されておらず、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られる。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は<sup>1),2)</sup>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(一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になる<sup>1)</sup>。

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

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

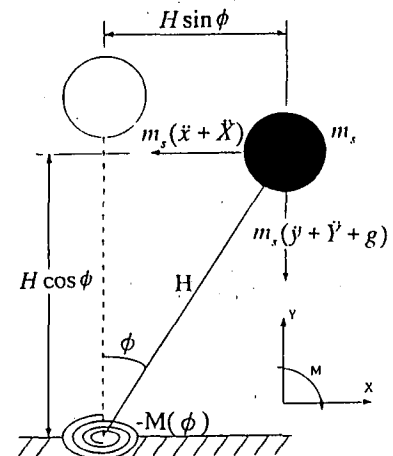


図-1 回転1自由度モデル

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。

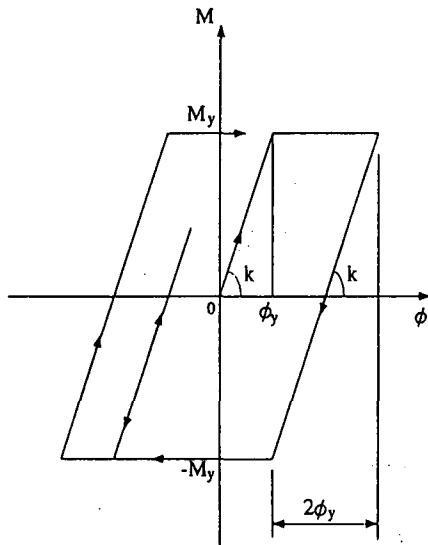


図-2 完全弾塑性の復元力モーメント

### 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。

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

さらに、塑性率については

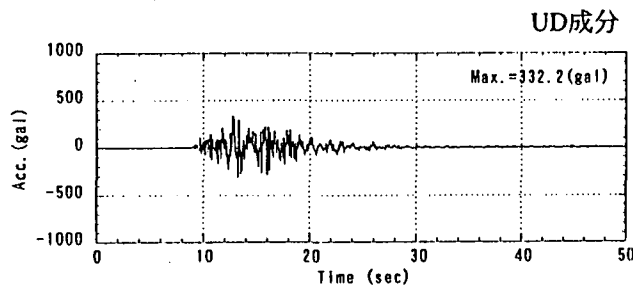
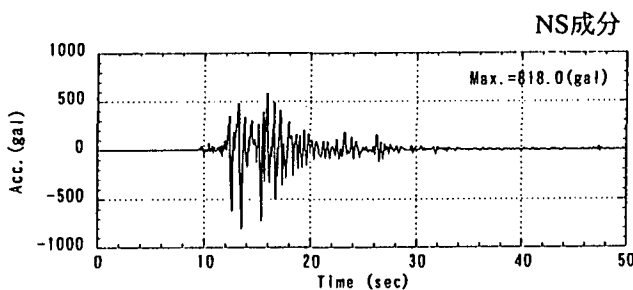
$$\mu = \frac{\sin \phi_{\max}}{\phi_y} \quad (3)$$

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。

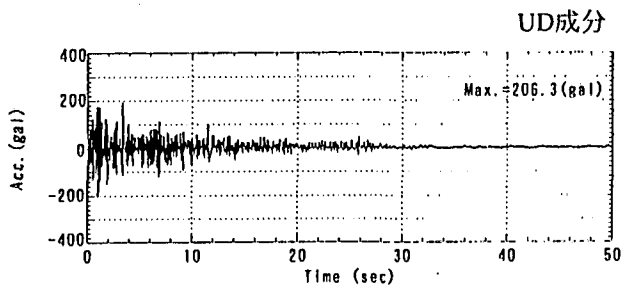
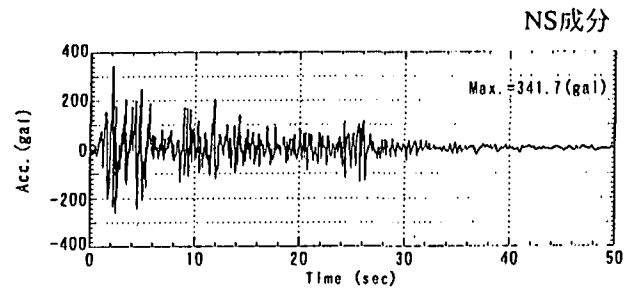
### 4. 数値計算例

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、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には、それぞれの波形の加速度成分を示す。

図-4は水平および回転1自由度モデル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、すべての図において0.25秒以上で降伏震度が上より1.0から0.1となっ

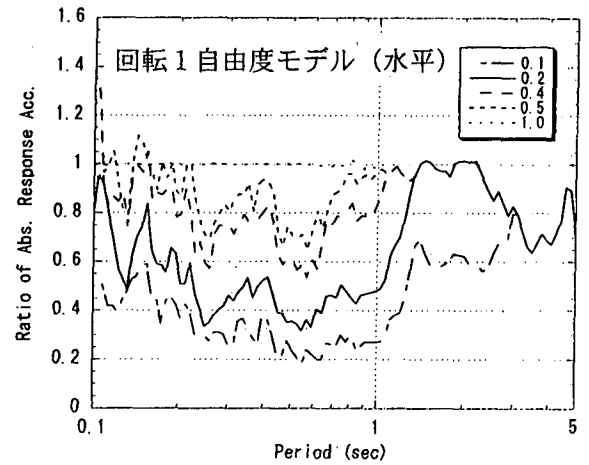
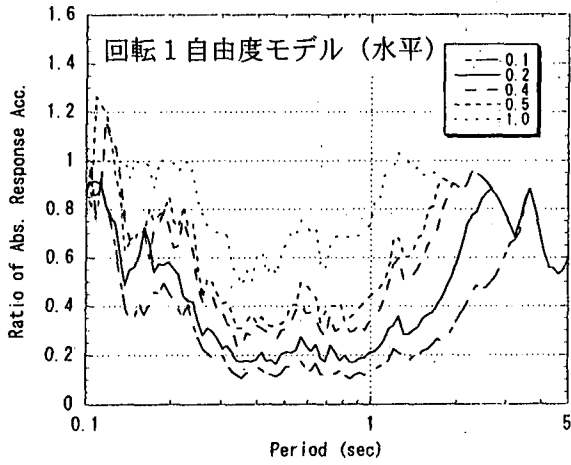
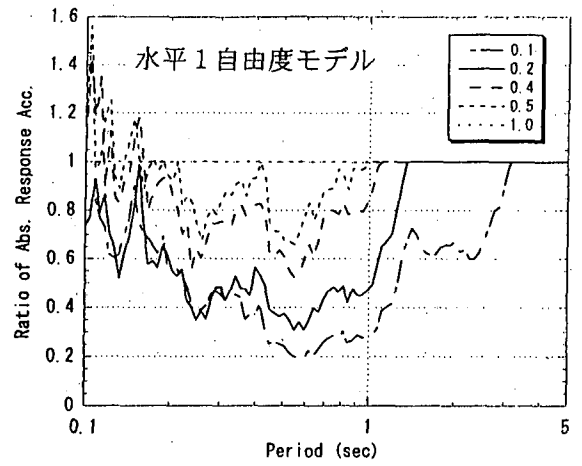
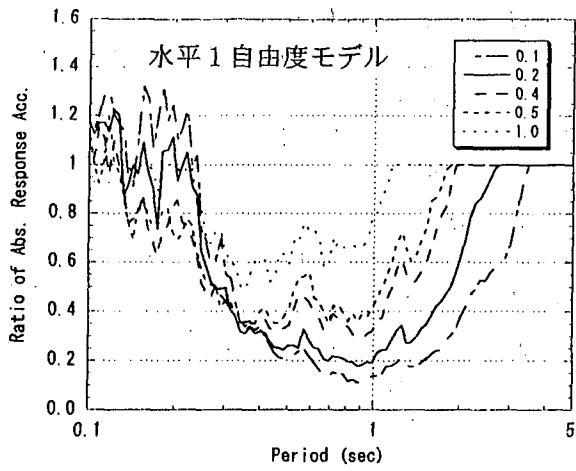


a) 神戸海洋気象台



b) エルセントロ

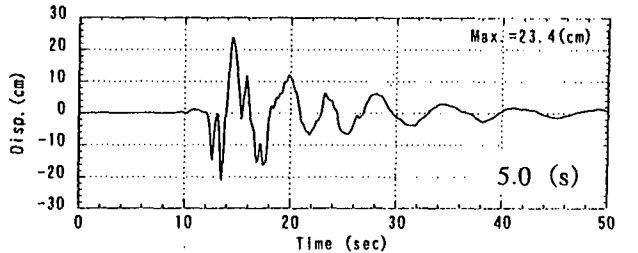
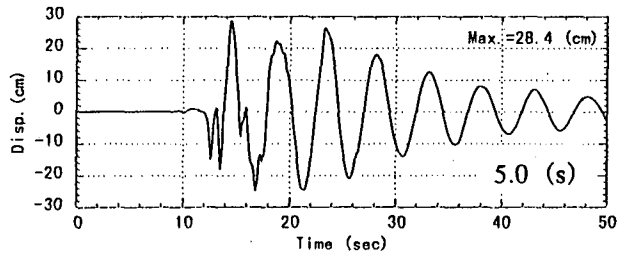
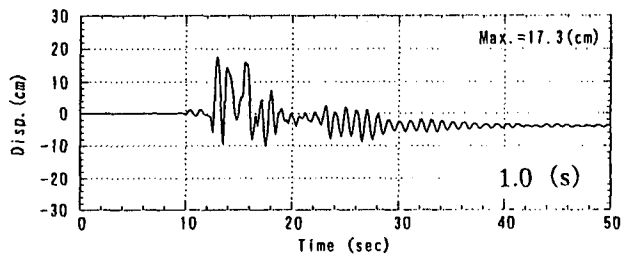
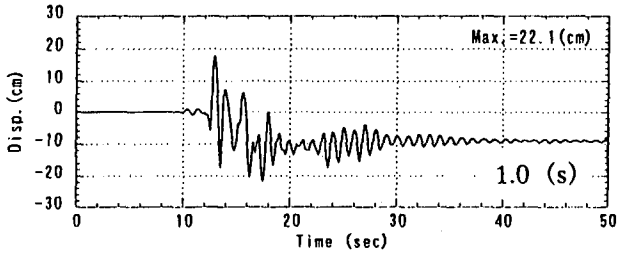
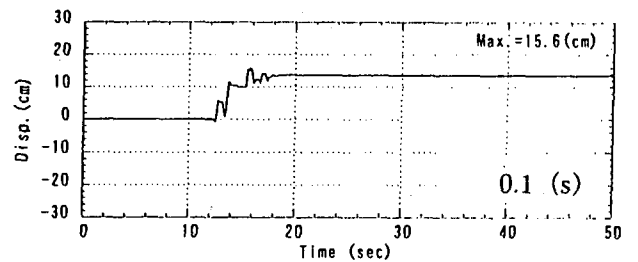
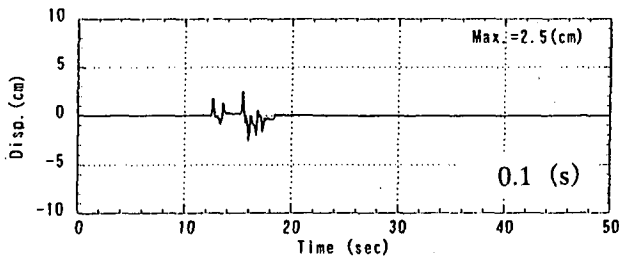
図-3 入力地震動の各成分



a) 神戸海洋気象台

b) エルセントロ

図-4 応答スペクトルの比率



a) 水平1自由度モデル

b) 回転1自由度モデル (水平)

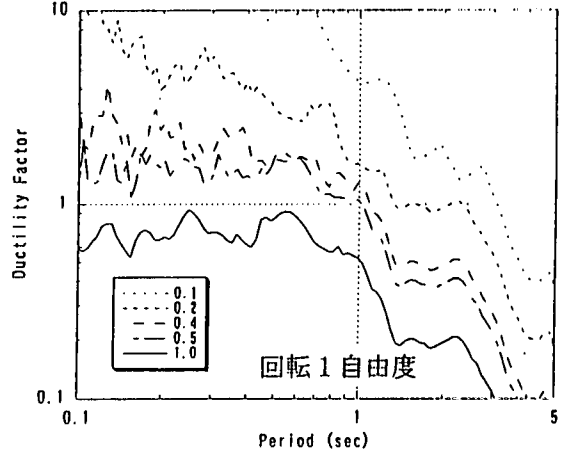
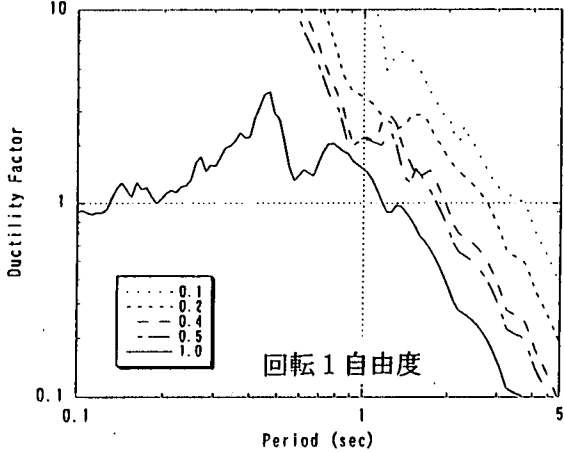
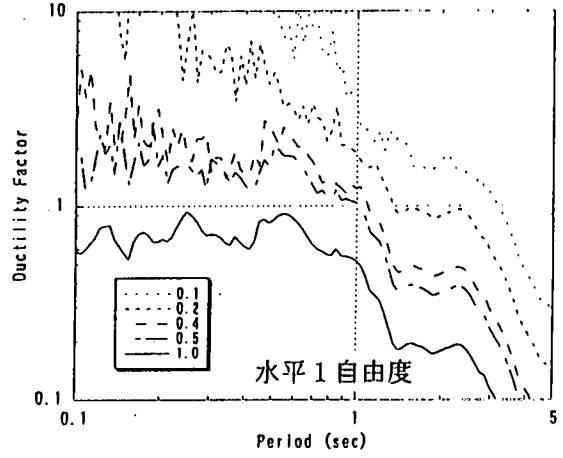
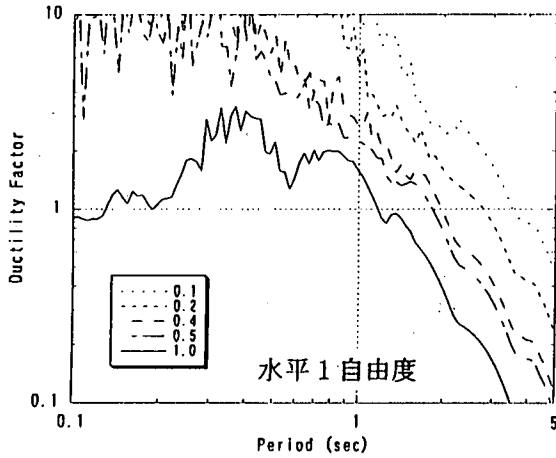
図-5 各固有周期に対応した変位波形 (神戸海洋気象台, 降伏震度 0.2)

ている。神戸海洋気象台の場合、水平1自由度モデルと比較して回転1自由度モデルが0.1~0.3秒付近と長周期側においてスペクトルの比率に差が生じている。さらに、エルセントロの場合、0.3~1.0秒の範囲内では降伏震度による両モデルの差はあまりなく、降伏震度が1.0については1.0秒以下で線形と非線形スペクトルが一致していることがわかる。

図-5は神戸海洋気象台の場合の各固有周期(0.1, 1.0, 5.0(s))に対応した水平変位波形を示したものであり、回転、水平1自由度モデルとも固有周期が長

くなるにつれて振幅が大きくなっていることがわかる。さらに、水平1自由度の1.0(s)、回転1自由度の0.1, 1.0(s)で残留変位が生じている。

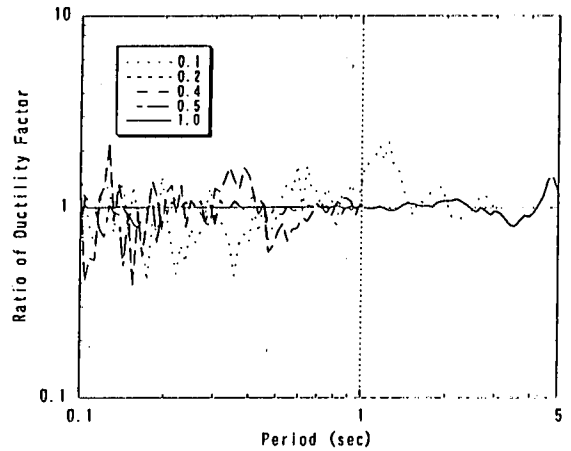
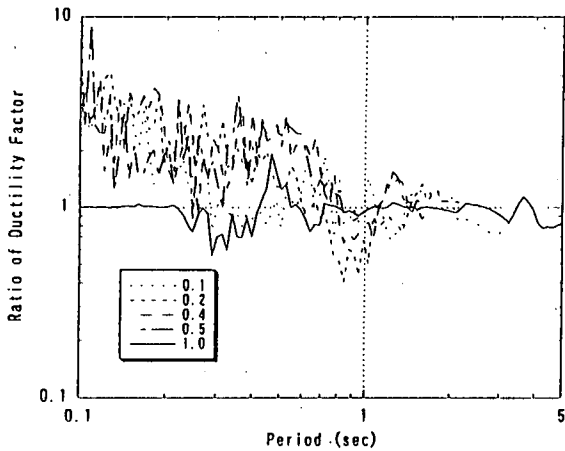
図-6は水平および回転1自由度モデルにおける固有周期と塑性率の関係を示したものである。すべての図で降伏震度が上より0.1から1.0となっている。エルセントロの場合、水平および回転モデルによる塑性率の差は大きくないが、神戸海洋気象台の場合、回転モデルにおいて短周期側で大きな塑性率を示していることが読みとれる。



a) 神戸海洋気象台

b) エルセントロ

図-6 降伏震度による塑性率



a) 神戸海洋気象台

b) エルセントロ

図-7 降伏震度による塑性率の比率

図-7は水平および回転1自由度モデルにおける塑性率の比率を示したものである。これより、神戸海洋気象台の場合、短周期側で降伏震度が小さい程、塑性率の比率が大きくなっているが、エルセントロの場合は大きな差はみられない。

図-8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応答に関する諸量を示したものである。ただし、UD成分の入力地震動については観測地震記録を用い、固有周期が1.0(s)、降伏震度0.2の場合である。すなわち、応答変位、応答加速度、塑性率を入力加速度との関係に

おいて示している。神戸海洋気象台、エルセントロの両方で、150gal以上で水平1自由度モデルと回転1自由度モデルに違いが見られる。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。

図-9は図-8の塑性率と入力地震動の関係に水平1自由度モデルの復元力特性の第2剛性を零とした場合の計算結果を加えたものである。これより、神戸海洋気象台の場合、第2剛性を0.1倍したものと比較して大きな塑性率を示していることがわかる。

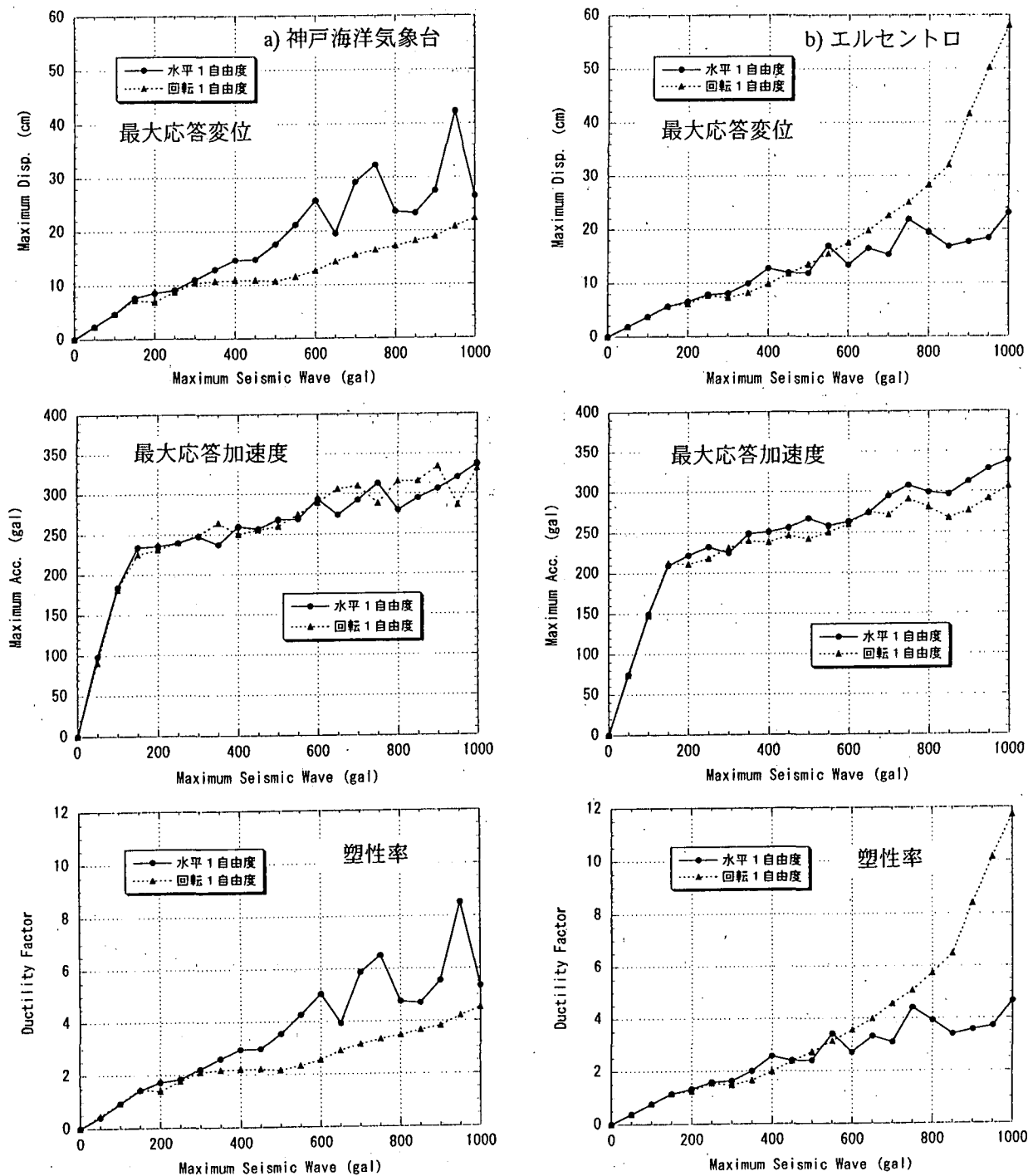


図-8 入力最大加速度と最大応答変位、最大応答加速度および塑性率との関係

## 5. まとめ

神戸海洋気象台、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て、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. 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、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. 入力地震動として神戸海洋気象台とエルセントロを対象としたが、水平と回転の1自由度の両モデルで150gal以上において非線形性の影響が生じることがわかる。

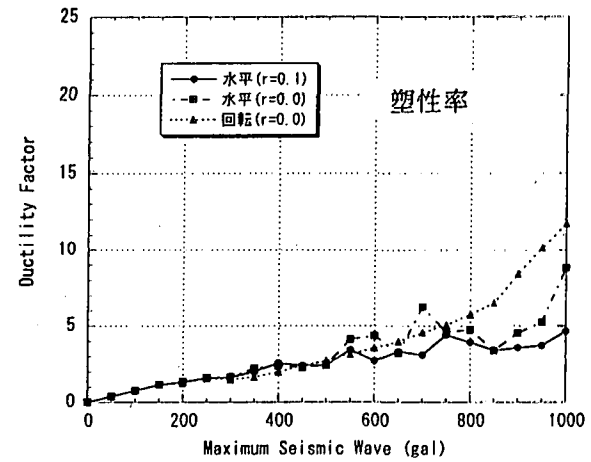
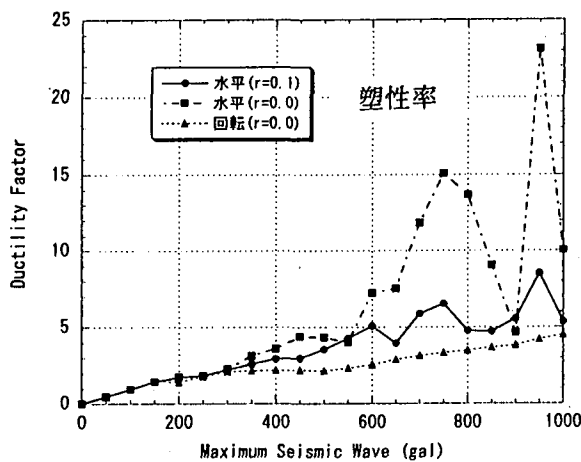
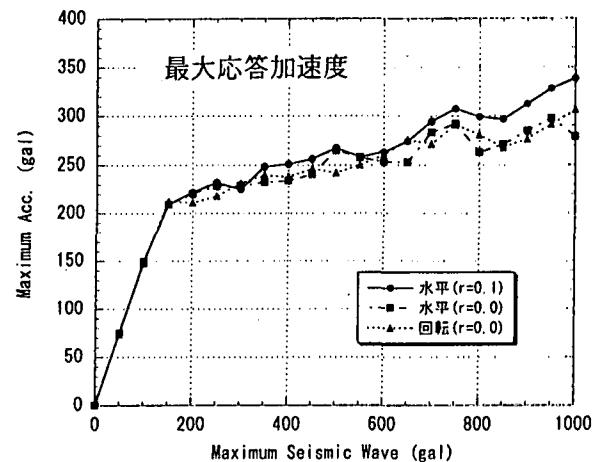
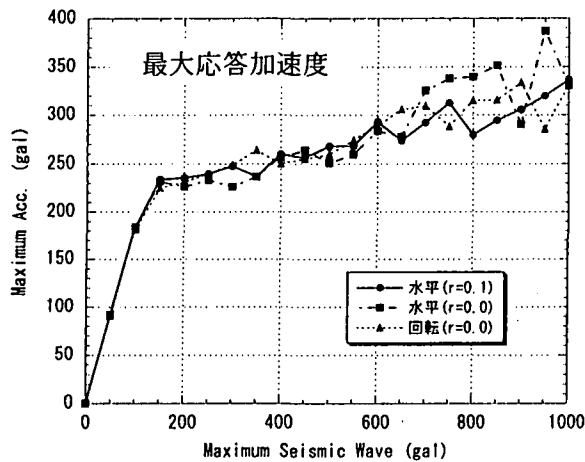
今後は、エネルギーの授受の観点からP- $\Delta$ 効果の影響を抽出するとともに、回転1自由度モデルに基

礎の並進および回転運動を考慮した多自由度モデルの運動方程式を確立し、応答スペクトルおよび塑性率を算出することで動的相互作用の影響を加味した検討を行う予定である。

謝辞：本研究を進める過程で、北海道大学大学院工学研究科麻里哲広助手には参考文献および貴重な意見を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 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- $\Delta$ 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.



a) 神戸海洋気象台

b) エルセントロ

図-9 入力最大加速度と最大応答加速度および塑性率との関係