

大変形を考慮した1自由度系の スペクトルに関する研究

山下典彦¹・竹内 翔²・秦 吉弥³・原田隆典⁴

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

²神戸市立工業高等専門学校 都市工学科学生 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

³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)

⁴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)

It could be important to estimate influence of structural damage on system by vertical seismic waves, because the 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 non-linear response of individual system. In addition, we examined the results viewpoint from individual natural period.

Key Words : rocking SDOF model, response spectrum, P- Δ effect, non-linear response analysis

1. まえがき

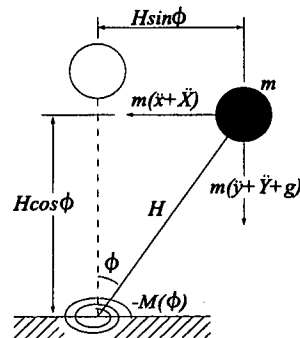
兵庫県南部地震だけでなく鳥取県西部地震の観測地震記録の特徴として上下動が大きかったことが挙げられる。この上下動が土木構造物の破壊に与える影響についての検討は、あまり行われていないのが現状であり、耐震設計指針においても鉛直地震動を考慮した耐震設計は含まれていない。

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^{1), 2), 3)}で上下動の影響を詳細に加味したもの^{4), 5), 6)}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非線形応答を算出し、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。

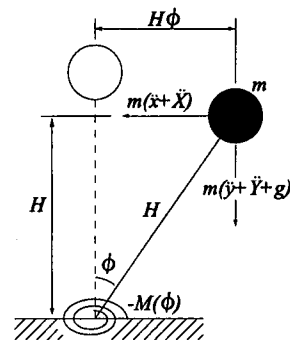
2. 回転1自由度モデル

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。

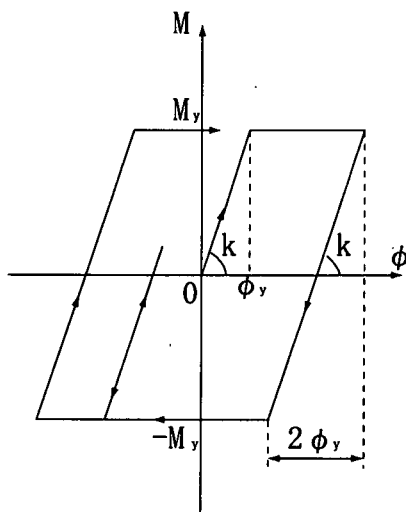


図-2 完全弾塑性の復元力モーメント

3. 上下動を考慮した応答スペクトル

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、回転1自由度の各モデルと水平1自由度モデルの絶対加速度応答スペクトルを比較する際には、回転1自由度モデルの回転運動を水平運動に変換する必要がある。そこで、水平方向の地動加速度 \ddot{X} とし、水平方向最大絶対加速度 \ddot{x}_{\max} を各固有周期により計算すれば応答スペクトルが求まる。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。

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

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

4. 数値計算例

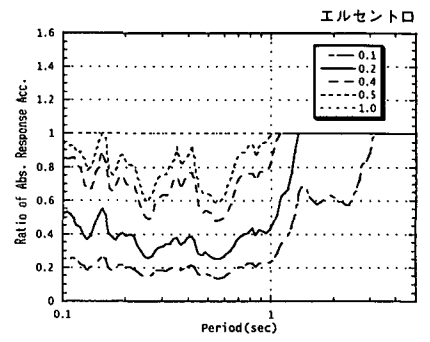
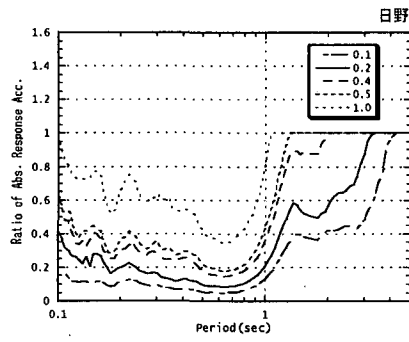
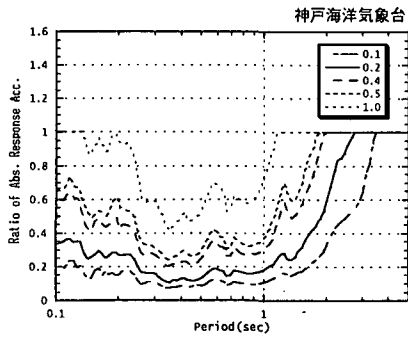
非線形解析においては、微小時間 $\Delta t=0.001$ (s)、減衰定数 $\xi=5\%$ 、橋脚高さ $H=15$ mとし、水平1自由度モデルの非線形復元力特性についても完全弾塑性で表されるものとした。さらに、入力地震動は、神戸海洋気象台、日野およびエルセントロの観測地震記録のNS成分(水平)とUD成分(上下)を用いた。

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。入力地震動による応答スペクトルの比率に差が生じることは言うまでもないが、神戸海洋気象台、日野の水平1自由度モデルの短周期側で降伏震度が0.1~0.5の場合、各回転1自由度モデルと比較して比率が小さくなっている。エルセントロにおいては、短周期側で降伏震度が0.1の場合、各回転1自由度モデルと比較して比率が小さくなっているが、降伏震度が0.2~0.4では逆に大きくなっている。

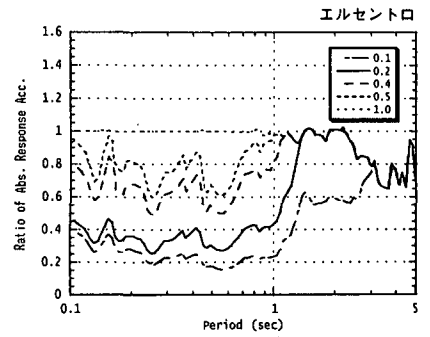
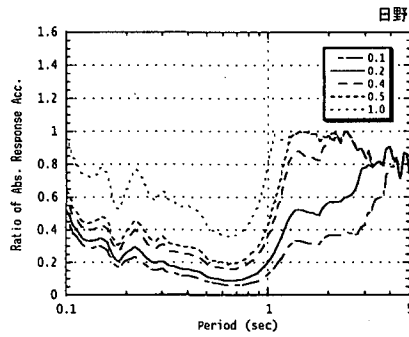
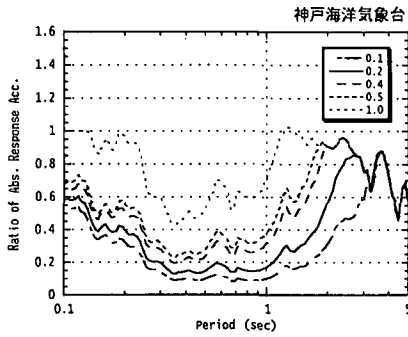
さらに、1.0秒以上で水平1自由度モデルの応答スペクトルの比率が、全ての降伏震度において1.0に収束するが、鉛直地震動を作用させた厳密および近似の回転1自由度モデルでは、降伏震度による比率の違いが1.0には収束せずに減少している。逆に、鉛直地震動を作用させなかった厳密および近似の回転1自由度モデルでは、1.0より増加している。したがって、鉛直地震動の有無により長周期側においてのみ構造物の応答に差が生じることがわかった。

図-4は水平および各回転1自由度モデル(回転運動を水平運動に変換)における変位応答の時系列を降伏震度0.2、固有周期1.0秒について示したものである。神戸海洋気象台では、水平1自由度モデルにおいて20.8cmの非常に大きな残留変位が生じていることがわかる。各回転1自由度モデルでは、鉛直地震動を作用させた場合が厳密、近似モデルにおいて3.9cm、鉛直地震動を作用させない場合が厳密、近似モデルにおいて6.1cmとなり鉛直地震動を作用させない場合の残留変位が作用させた場合の残留変位を上回った。

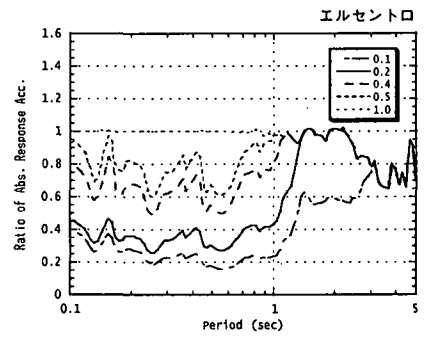
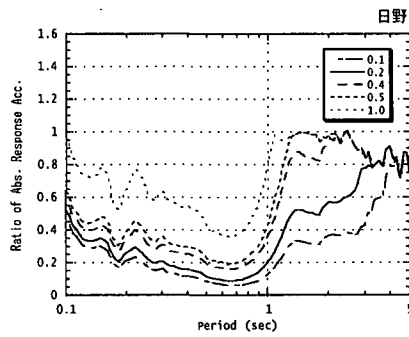
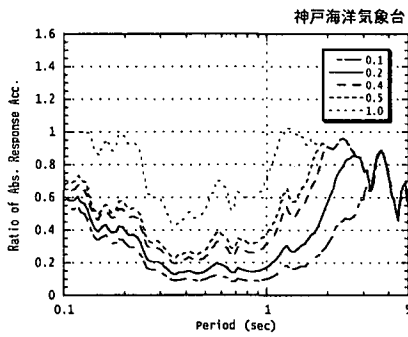
日野では、神戸海洋気象台とは逆に回転1自由度モデルが水平1自由度モデルの残留変位を上回った。水



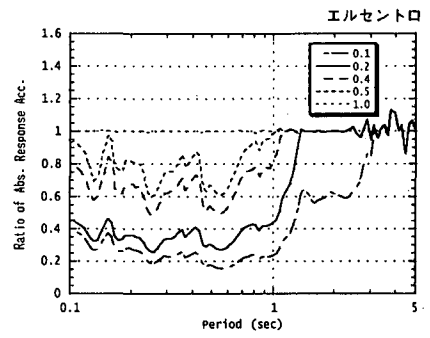
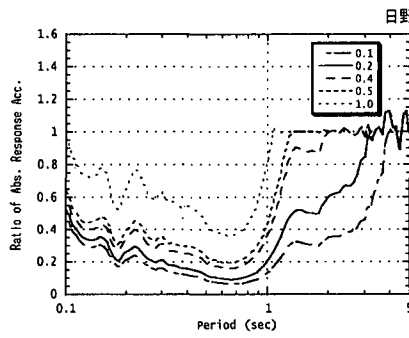
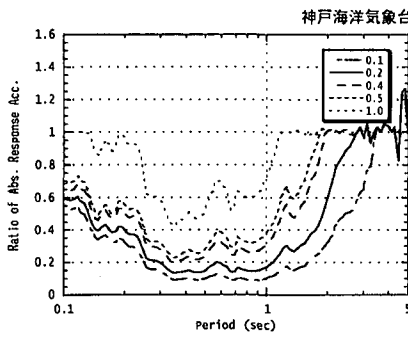
a) 水平1自由度モデル



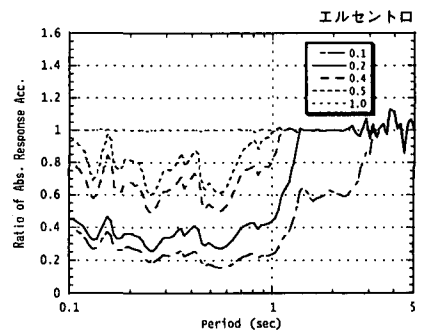
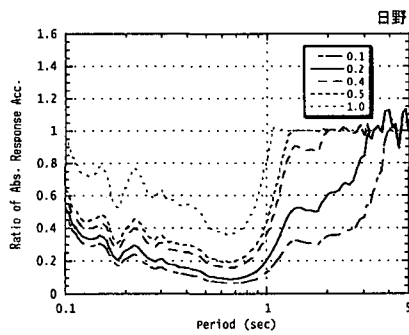
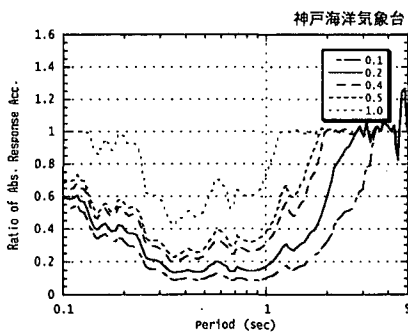
b) 回転1自由度厳密モデル



c) 回転1自由度近似モデル

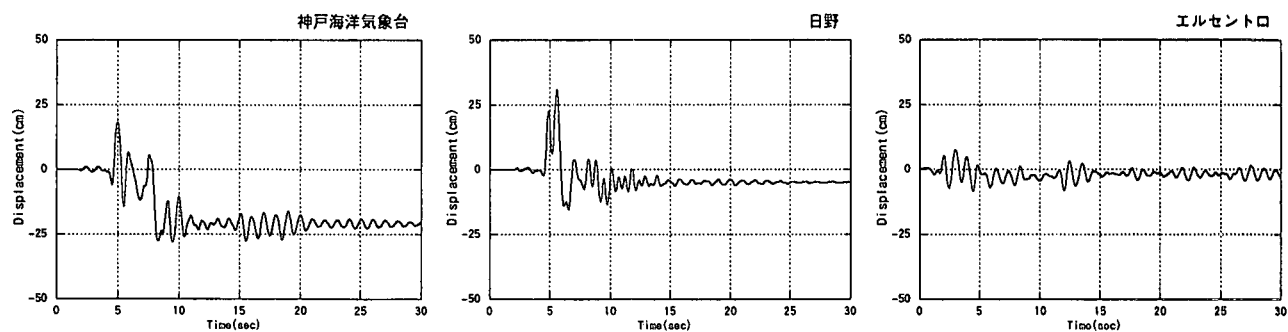


d) 回転1自由度厳密モデル (鉛直地震動無)

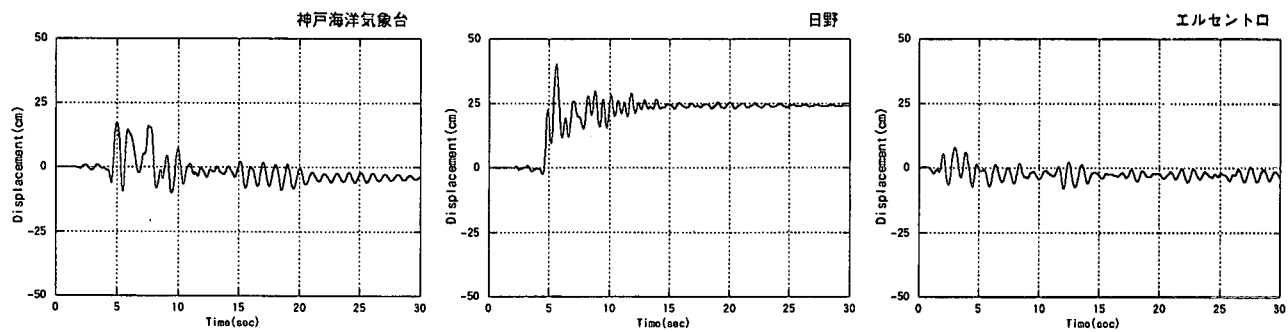


e) 回転1自由度近似モデル (鉛直地震動無)

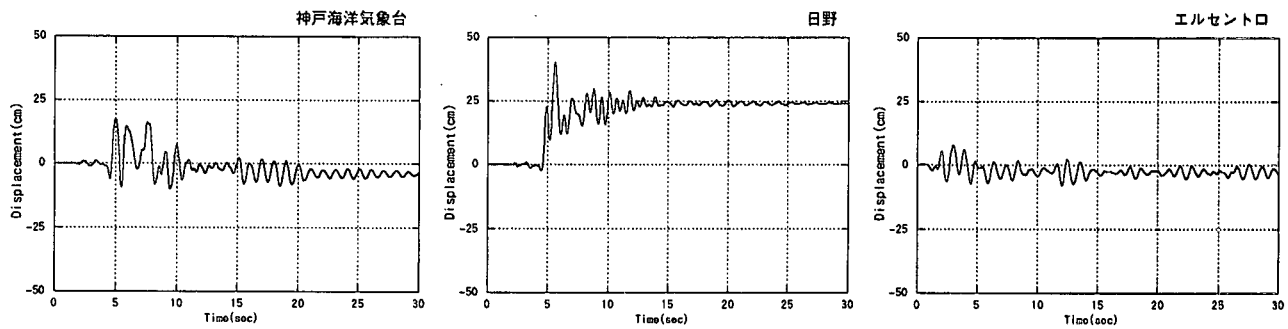
図-3 絶対加速度応答スペクトルの比率



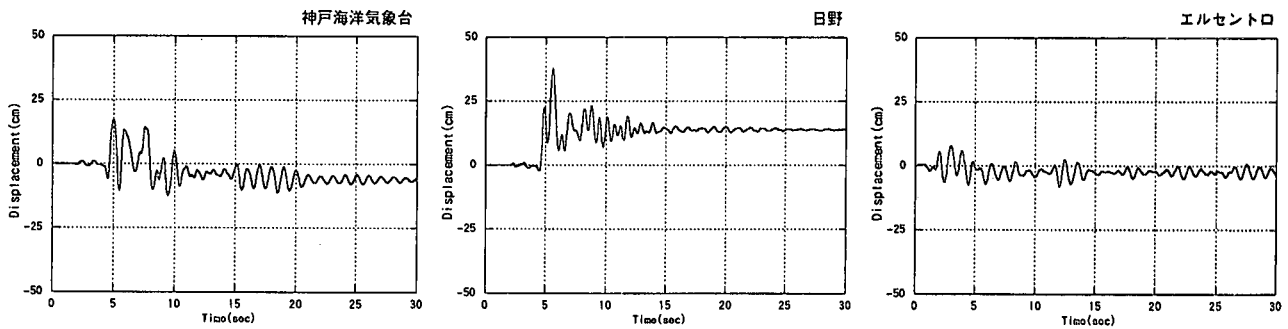
a) 水平1自由度モデル



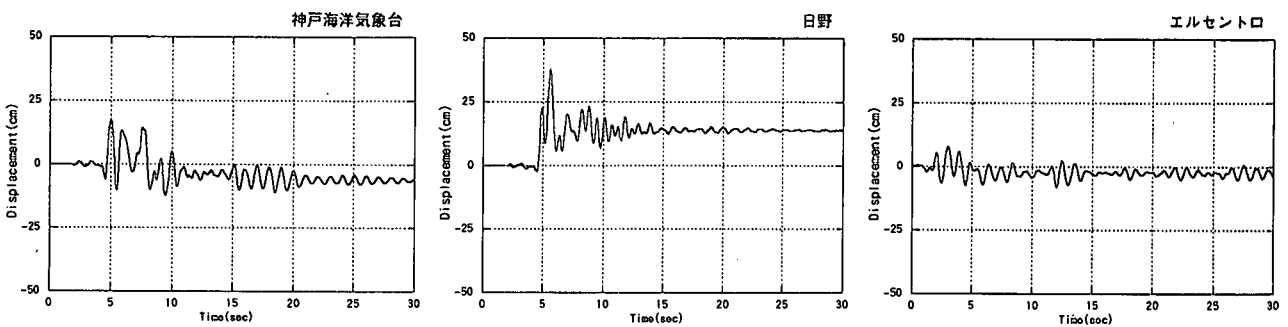
b) 回転1自由度厳密モデル



c) 回転1自由度近似モデル

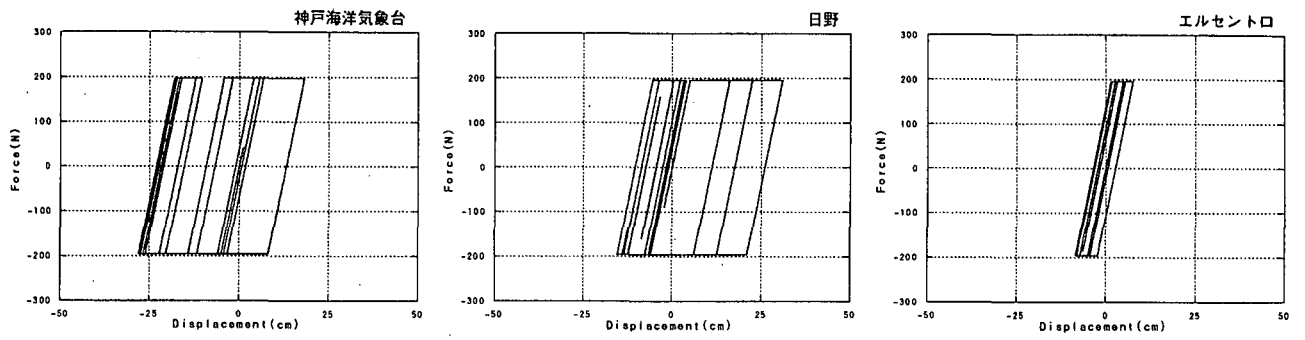


d) 回転1自由度厳密モデル (鉛直地震動無)

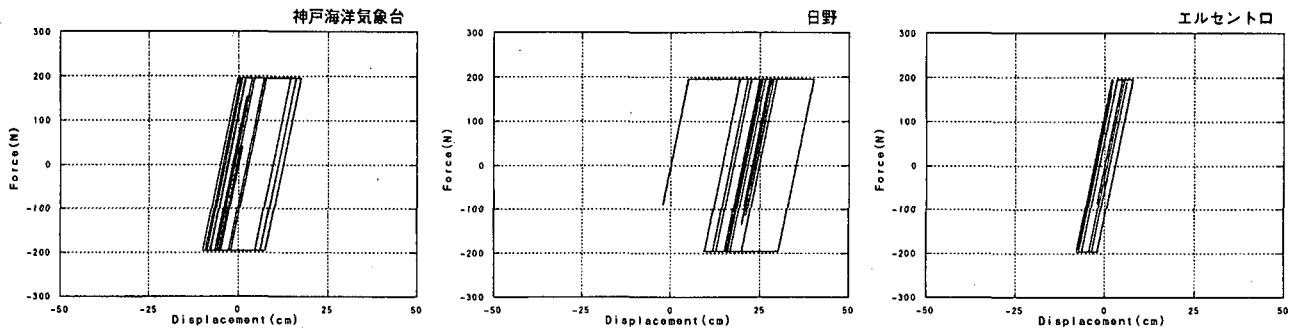


e) 回転1自由度近似モデル (鉛直地震動無)

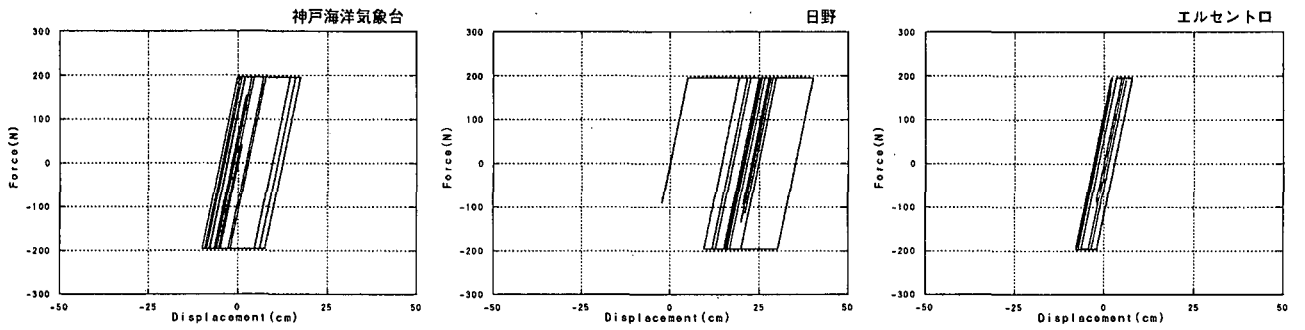
図-4 各1自由度モデルの変位応答



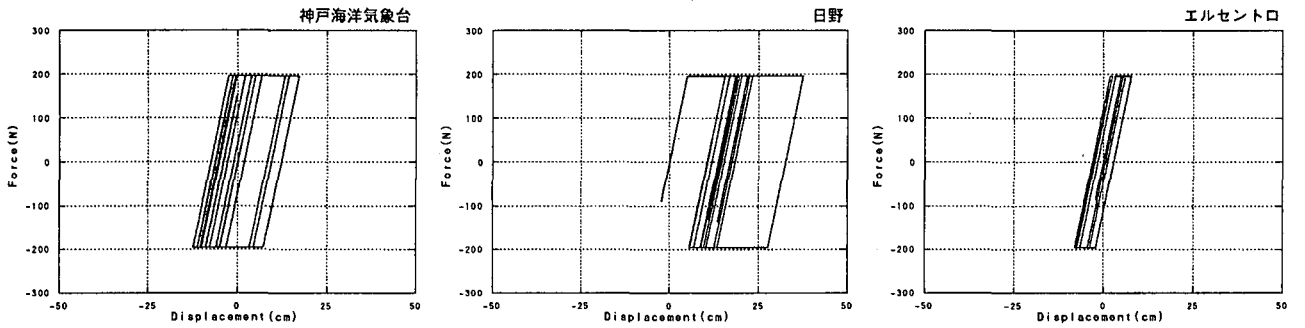
a) 水平1自由度モデル



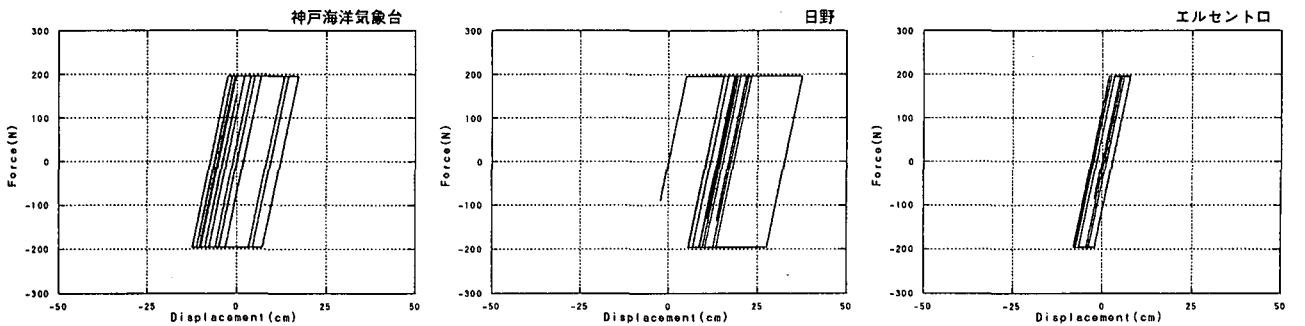
b) 回転1自由度厳密モデル



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-5 各1自由度モデルの履歴ループ

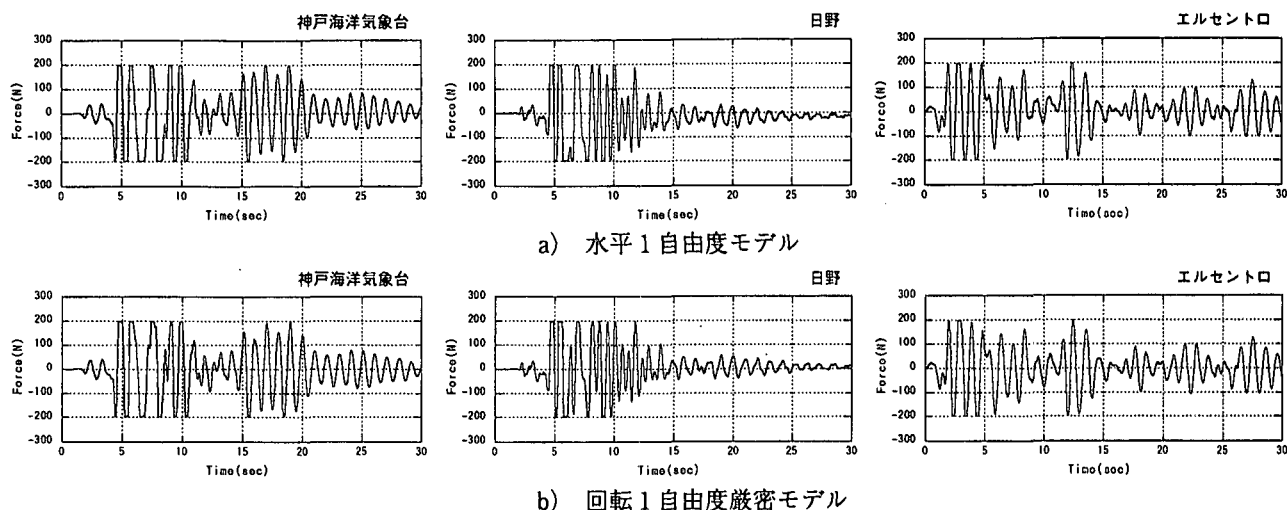


図-6 回転1自由度モデルの復元力の時刻歴応答

平1自由度モデルにおいて9.8cmの残留変位が生じ、各回転1自由度モデルでは、鉛直地震動を作用させた場合が厳密、近似モデルにおいて24.3cm、鉛直地震動を作用させない場合が厳密、近似モデルにおいて13.9cmとなり回転1自由度モデルで大きな残留変位が生じている。

エルセントロでは、入力地震動が小さいこともあり全てのモデルで大きな残留変位は生じていない。水平1自由度モデルにおいて1.3cm、各回転1自由度モデルにおいて2.6cmとなった。

図-5は水平および回転1自由度モデル(復元力モーメントを復元力に変換)における履歴ループを降伏震度0.2、固有周期1.0秒について示したものである。神戸海洋気象台および日野では、水平および回転1自由度モデルの履歴ループに差が生じていることがわかる。さらに、それらは厳密、近似のモデルによる差はあまり見られないが、鉛直地震動の有無により多少差が生じている。エルセントロでは、各モデルにおいて履歴ループに差は殆ど見られない。

図-6は水平および回転1自由度厳密モデルの復元力の時刻歴を降伏震度0.2、固有周期1.0秒について示したものである。これより、エルセントロではモデルの違いによる差は見られないが、神戸海洋気象台および日野においては、5~10秒において復元力に差が生じていることがわかる。

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、絶対加速度応答スペクトルおよび非線形応答を算出することで、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. 水平と各1回転自由度モデルの絶対応答加速度応答スペクトルを比較したところ短周期側で差が生じることがわかる。
2. 鉛直地震動を作用させた場合、残留変位に差が生じることがわかる。さらに、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1自由度モデルの残留変位に大きな差が生じることがわかる。
3. 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1自由度モデルの履歴ループに大きな差が生じることがわかる。

今後は、回転1自由度モデルに生じるP- Δ 効果の影響を具体的に抽出し、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) 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。
- 2) Bernal, D. : Amplification Factors for Inelastic Dynamic P- δ Effects in Earthquake Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, pp635-651, 1987.
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。