

埋設基礎構造物の基礎の滑り・剥離による非線形応答効果

山下典彦¹・原田隆典²

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 神戸市西区学園東町8-3)

² 正會員 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)

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震は、神戸市・淡路島およびその周辺地域に甚大な被害を生じさせた。その被害経験から、道路橋示方書が改定され構造物の非線形効果も考慮した地震時保有水平耐力法が主要な設計法として位置付けられるようになり、時刻歴応答解析による照査が義務付けられた。しかしながら、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した振動解析手法はかなり進んできてはいるものの、これを耐震設計に取り入れているのは極僅かの技術者に留まっている。この原因として、1)重要性については認識されているが、必ずしもその重要性が広く浸透し理解されていない。2)研究と設計実務との隔たりがあることなどが考えられる。

兵庫県南部地震の際、三宮駅周辺の被害が極めて著しかった地域において構造的に殆ど無被害であった建物が動的応答解析の結果、主として基礎の浮上り現象によって被害を免れたのではないかと推定される事例が報告されている^り。

本研究では、どのような場合に基礎の滑り・剥離による非線形応答の違いが生じるかを調べるために、基礎の浮上りを考慮した基礎・地盤・構造物系の動的相互作用モデルを想定し、絶対加速度および変位応答スペクトルについて検討を行った。

2. 動的相互作用モデル

基礎-地盤-構造物系²⁾を図-1(a)に示すような上部1自由度と基礎2自由度(水平および並進)の埋設基礎を有する3自由度とし、図-1(b)のように振動モデルの座標系を定めると振動方程式は次式のようになる。なお、振動方程式の誘導にあたっては、連成項を無視している。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + \{Q\} = -[M]\{I_1\}\ddot{u}_G - [M]\{I_2\}\ddot{\phi}_G \quad (1)$$

ここに、 $\ddot{u}_G$ 、 $\ddot{\phi}_G$ は有効入力地震動、 $\{Q\}$ は上部構造物と基礎の復元力特性を表しており、基礎周辺地盤の動

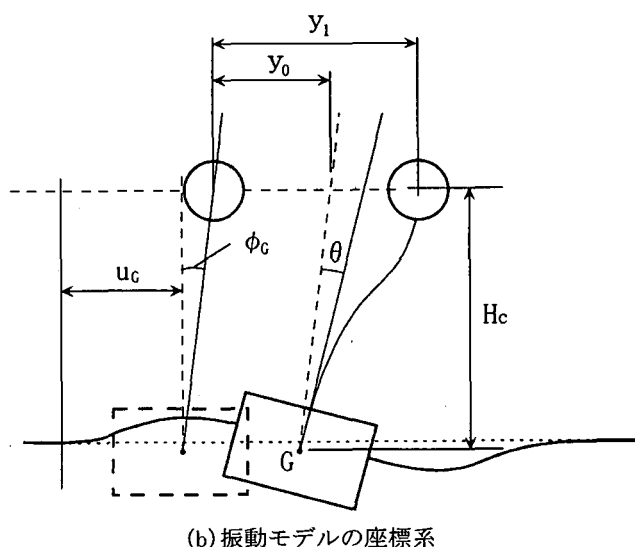
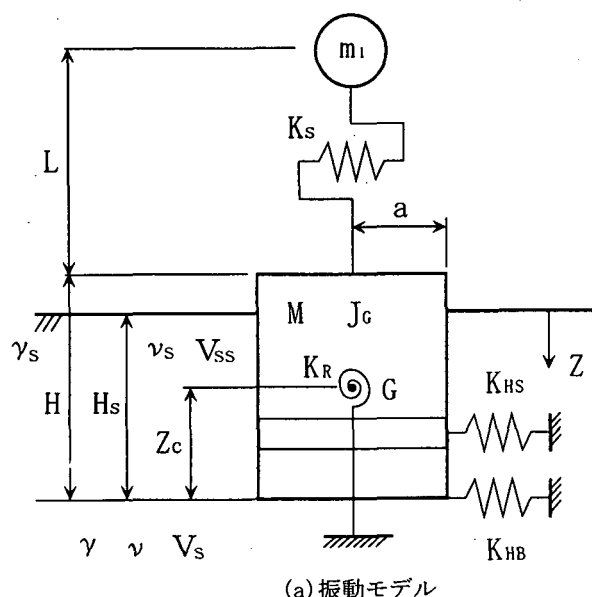


図-1 基礎-地盤-構造物系のモデル化

的復元力特性は、土は引張りに耐えないものとし、さらにモール・クーロンの破壊規準に従うものとした非線形スプリングを持つウィンクラーモデルの考え方³⁾を採用した。このモデルは、せん断波速度、ポアソン比、密度、強度定数および基礎寸法の関数として復元力特性が評価される。

3. 動的相互作用を考慮した応答スペクトル

応答スペクトルは、上述した3自由度系の動的相互作用モデルを用い、上部構造物の初期剛性に対応した各固有周期を横軸とし、絶対加速度応答スペクトルおよび変位応答スペクトルを計算することで、基礎の滑り・剥離による非線形応答効果について調べた。さらに、上部構造物の動的復元力特性については、図-2に示す復元力特性において降伏震度 q_y を決定し、各固有周期(0.1～5.0sec)に対する剛性を k_1 とした上で降伏変位 y_y を決め、第2剛性 k_2 を初期剛性の1/10とした。したがって、上部構造物の固有周期と降伏震度が決まれば初期剛性、降伏変位および第2剛性が決定される。

4. 数値計算例

非線形応答解析は増分法で行い、計算時間間隔を0.001秒とし、上部構造物の降伏震度について4ケース(0.2, 0.3, 0.5, 1.0)検討した。入力地震動としては、神戸海洋気象台(兵庫県南部地震)、日野(鳥取県西部地震)およびエルセントロ(インペリアル・バレイ地震)の観測地震記録のNS成分を入力最大加速度調整(400, 600,

800gal)したものをも基礎の重心位置に作用させた。図-3に観測地震記録の絶対加速度応答スペクトル($h=5\%$)、図-4にフーリエスペクトルを示す。さらに、数値計算モデルとしては、表-1に示したケーソン基礎を対象とした基礎-地盤-構造物系の諸定数を用いた。

図-5は入力地震動の最大加速度を3ケース、降伏震度を4ケース変化させた場合の絶対加速度応答スペクトルを示したものである。実線太線が基礎-地盤-構造物系全体の復元力特性を線形とした応答スペクトルを、他は系全体の復元力特性を非線形とした応答スペクトルを示している。上より降伏震度を1.0から0.2の場合の応答スペクトルで、入力最大加速度が大きくなるにつれて構造物の応答加速度が大きくなっていることがわかる。短周期側では線形が全ての非線形を上回り、長周期側では線形および全ての非線形で構造物の応答加速度が等しくなっている。さらに、入力最大加速度が大きいほど、非線形性の影響が大きくなり、線形と比較して非線形の応答スペクトルが長周期側で小さくなっていることが読み取れる。

図-6は図-5(c)の入力最大加速度を800galとしたときの固有周期0.2秒の線形および降伏震度0.2の非線形の絶対加速度波形を示したものである。全ての入力地震動において、非線形性の影響により降伏震度0.2が線形と比較して振幅が小さくなり、周期が伸びていることがわかる。

図-7は図-5に示した絶対加速度応答スペクトルと同じ条件での変位応答スペクトルを示したものである。実線太線が基礎-地盤-構造物系全体の復元力特性を線形とした応答スペクトルを、他は系全体の復元力特性を非線形とした応答スペクトルを示している。入力最大加速度が大きくなるにつれて構造物の応答変位が大きくなっていることがわかる。また、降伏震度が小さいほど非線形性が大きくなるので応答スペクトルも大きくなり、入力地震動が小さいほど長周期側で線形と非線形の応答スペクトルが一致している。さらに、エルセントロについては他の入力地震動と比較して2～3秒付近で大きな応答が生じていることがわかる。

表-1 基礎-地盤-構造物系の諸定数

m_i (kN sec ² /m)	1169.1	γ_s (kN/m ³)	14.7
M (kN sec ² /m)	4070.9	γ (kN/m ³)	17.6
JG (kN sec ² /m)	298713.8	V_{ss} (m/s)	100.0
L (m)	20.0	V_s (m/s)	500.0
H (m)	30.0	ν_s	0.45
Z_c (m)	15.0	ν	0.3
a (m)	5.0	h_1, h_2, h_3	0.05, 0.1, 0.1

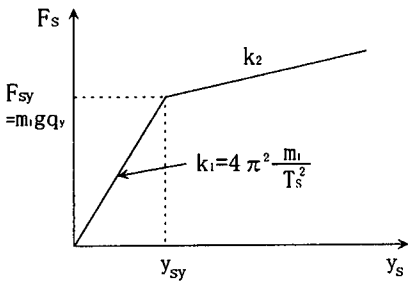


図-2 上部構造物の動的復元力特性

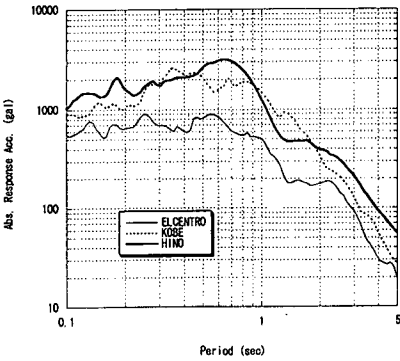


図-3 絶対加速度応答スペクトル

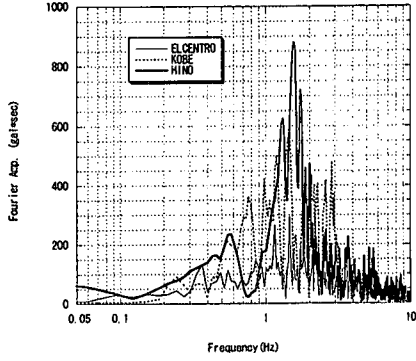
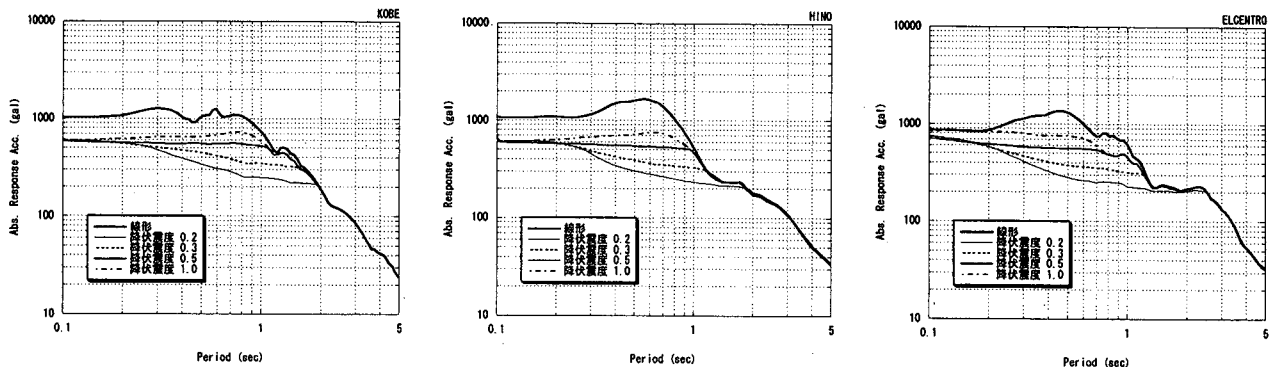
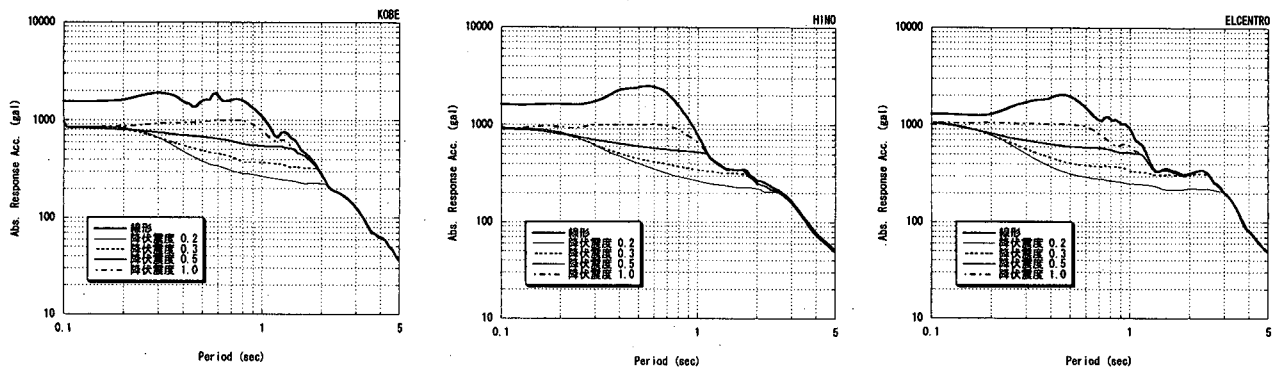


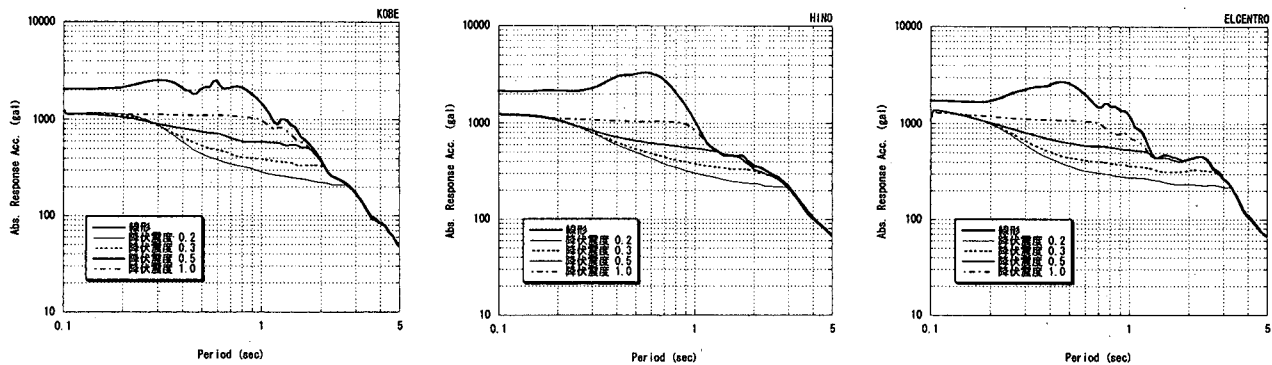
図-4 フーリエスペクトル



(a) 入力最大加速度 400 (gal)

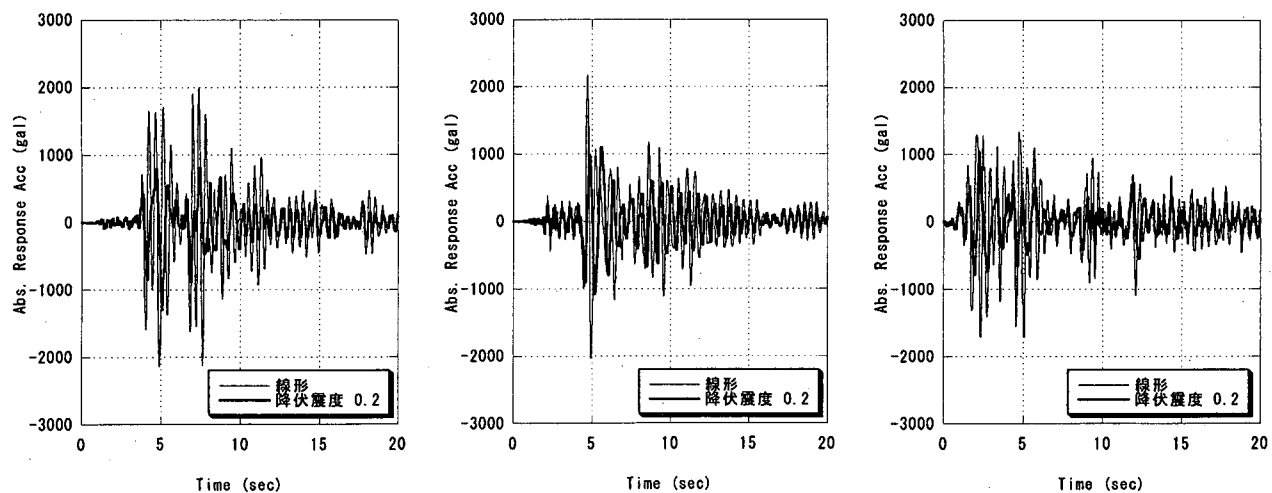


(b) 入力最大加速度 600 (gal)



(c) 入力最大加速度 800 (gal)

図-5 動的相互作用モデルの絶対加速度応答スペクトル

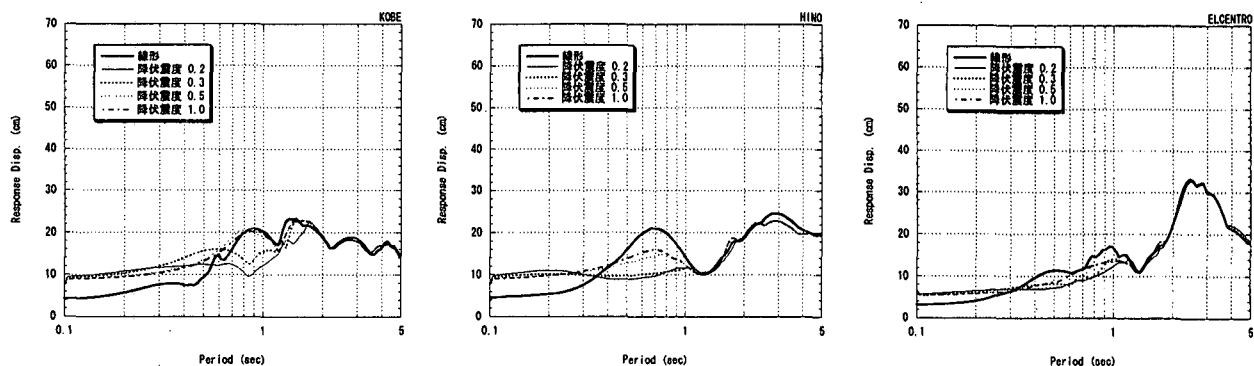


(a) 神戸海洋気象台

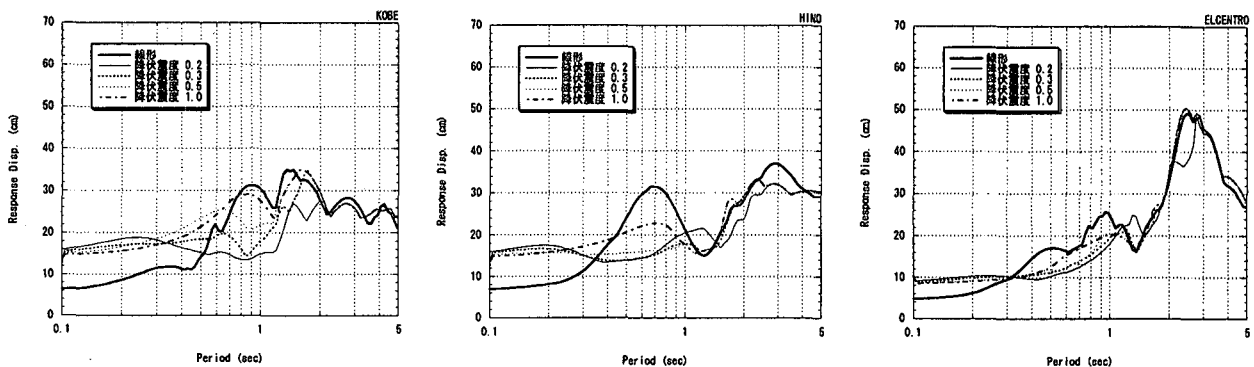
(b) 日野

(c) エルセントロ

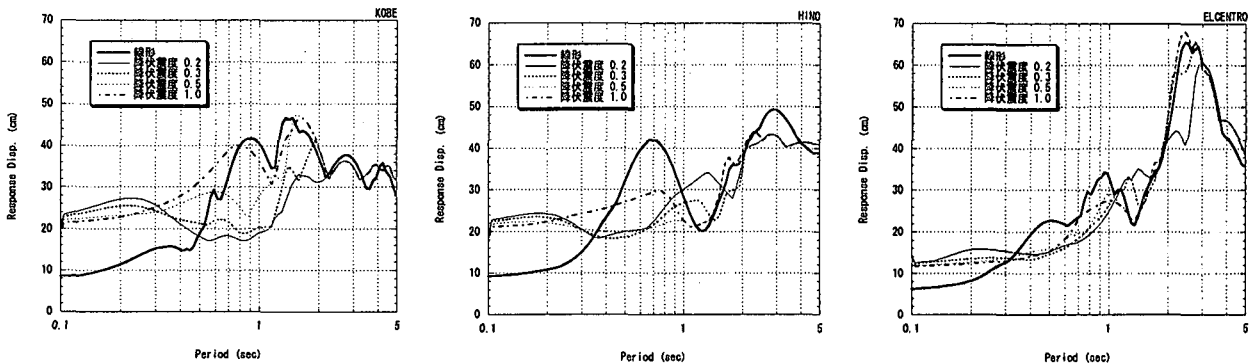
図-6 絶対加速度応答の比較 (固有周期 0.2 秒)



(a) 入力最大加速度 400 (gal)



(b) 入力最大加速度 600 (gal)



(c) 入力最大加速度 800 (gal)

図-7 動的相互作用モデルの変位応答スペクトル

5. まとめ

基礎の浮上りを考慮した基礎-地盤-構造物系の動的相互作用モデルを想定し、絶対加速度および変位応答スペクトルについて検討を行った。しかしながら、基礎の滑り・剥離による応答低減効果を整理するには至っていない。今後は、上部と下部のエネルギーのやり取りをどう設計体系に整理するかを踏まえ、都市直下地震で観測された地震波形を用いたパラメトリックスタディを行い、どのような場合に基礎の浮上り現象による応答低減効果が期待できるかについて詳細に検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 林康裕: 直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp. 53-62, 1996.
- 2) 山下典彦, 原田隆典: 基礎-地盤-構造物系の非線形動的相互作用を考慮した応答スペクトルに関する研究, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 591-598, 2001.
- 3) 原田隆典, 広瀬利光, 山田清朗: 基礎の動的非線形復元力評価におけるウィンクラーモデルの適用, 宮崎大学工学部研究報告, 第34号別冊, 1988.