

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

山下典彦¹・弓削輝之²・原田隆典³

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 神戸市西区学園東町8-3)

²学生会員 北海道大学工学部(元神戸市立高専学生) (〒060-0808 札幌市北区北13条西8)

³正会員 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. まえがき

基礎-地盤-構造物系の動的相互作用の問題が、耐震工学の分野で本格的に研究され始めて、もう数十年が経過している。しかし、この問題はなお難題の一つであり、解析モデルに依存して計算結果はかなりの幅をもつことが知られている。さらに、このような現状が影響してか、動的相互作用の効果が耐震設計指針の中に加味されにくいのが現状である。本研究では、このような耐震設計の現状を改良し、より合理的な耐震設計の方法を策定することを目的に基礎-地盤-構造物系の非線形動的相互作用の影響を考慮した応答スペクトルについて検討を行った。その際、地盤の動的復元力特性として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したが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¹⁾を採用した。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。

2. 動的相互作用モデル

基礎-地盤-構造物系を図-1a)に示すような上部1自由度および基礎の並進、回転の2自由度からなる3自由度系でモデル化した。図-1b)のように座標を定めると振動方程式は次式のようなになる²⁾。

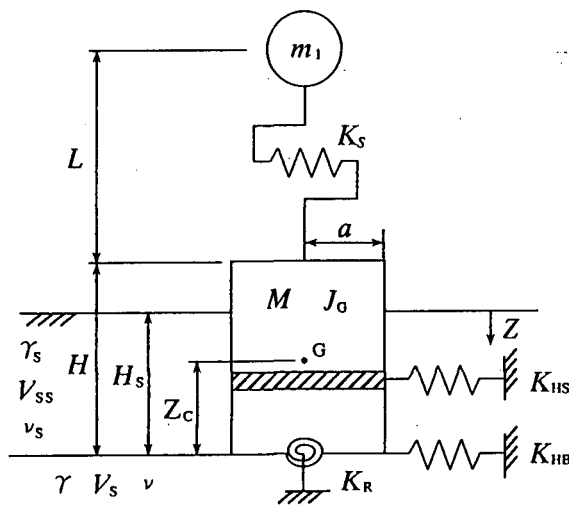
$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + \{Q\} = -[M]\{I_1\}\ddot{u}_G - [M]\{I_2\}\ddot{\phi}_G$$

ここに、

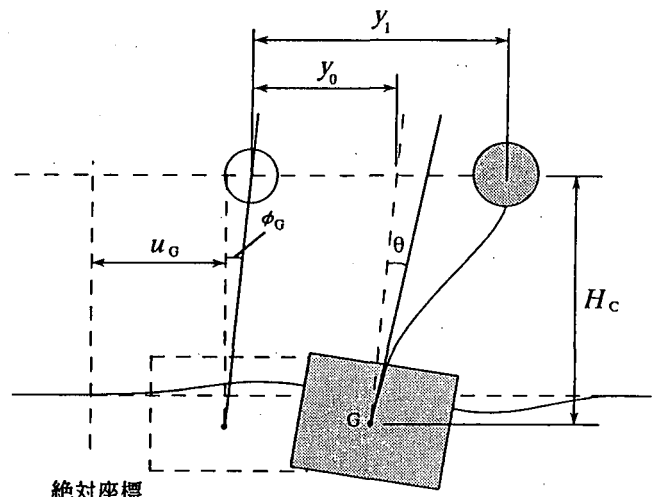
$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J_G \end{bmatrix} \quad \{I_1\} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \{I_2\} = \begin{bmatrix} H_c \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & -c_1 H_c \\ -c_1 & c_1 + c_2 & c_1 H_c \\ -c_1 H_c & c_1 H_c & c_1 H_c^2 + c_R \end{bmatrix} \quad \{y\} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_0 \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$\{Q\} = \begin{bmatrix} K_S & -K_S & -K_S H_c \\ -K_S & K_S + K_0 & K_S H_c + K_1 \\ -K_S H_c & K_S H_c + K_1 & K_S H_c^2 + K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_0 \\ \theta \end{bmatrix}$$



a) 振動モデル



b) 振動モデルの座標系

図-1 基礎-地盤-構造物系のモデル化

$H_c = H - Z_c + L$ と表せる。 \ddot{u}_G と $\ddot{\phi}_G$ は有効地震動加速度、 $\{Q\}$ は上部構造物および基礎の復元力を表しており、非線形応答解析においては該当するばねは図-2に示すバイリニア特性を持つものとする。

3. 動的相互作用を考慮した応答スペクトル

ここでは、上述した3自由度の動的相互作用モデルと1自由度の絶対加速度応答スペクトルを計算し、動的相互作用の影響について調べた。上部構造物については、図-2に示す復元力特性において降伏震度 q_y を決定し、各固有周期に対応する剛性を k_1 とした上で降伏変位 δ_y を決め、第2剛性を初期剛性 k_1 の1/10とした。

さらに、地盤の動的復元力モデルとしては、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したが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¹⁾を採用した。なお、この復元力モデルでは、地盤の弾性波探査より求められるせん断波速度、ポアソン比および密度、さらに土の粘着力、内部摩擦角および基礎寸法が与えられると復元力が求められるようになっている。

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0.01秒とし、降伏震度 q_y については1.0、表層地盤厚さ H_s については20mとして計算を行った。入力地震動としては、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台、葺合、神戸大学、神戸港工事事務所、ポートアイランドでの観測地震記録と構造物における加速度強震記録³⁾を用いた。さらに、それらをもとに有効入力地震動を算出した。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。

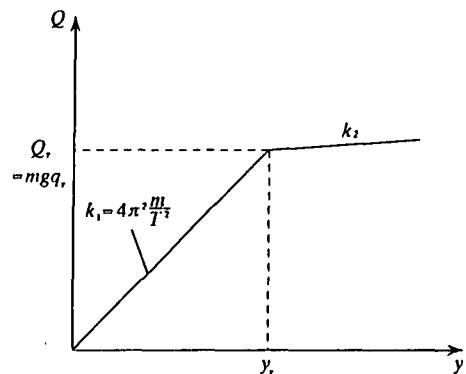


図-2 上部構造物の復元力特性

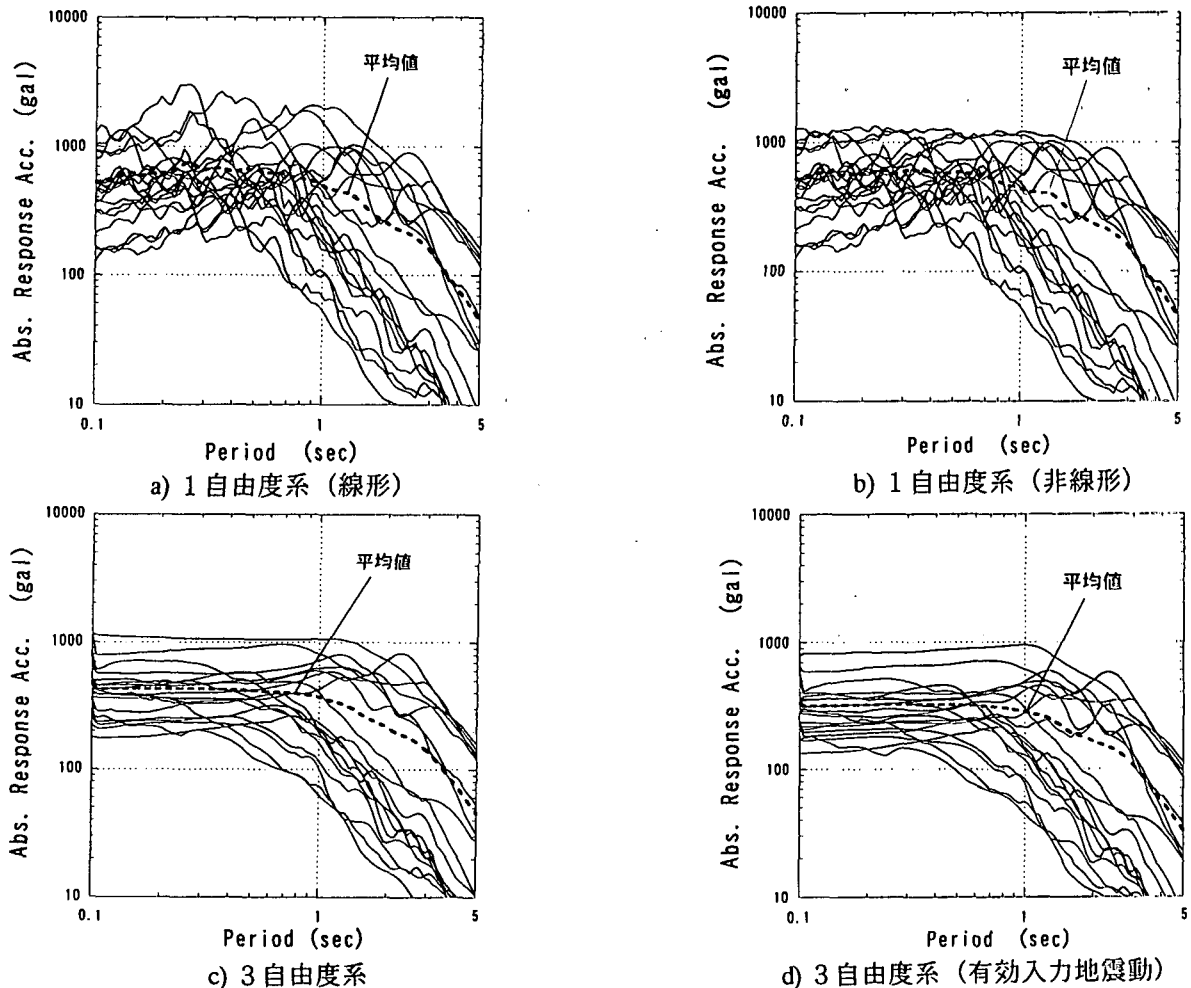
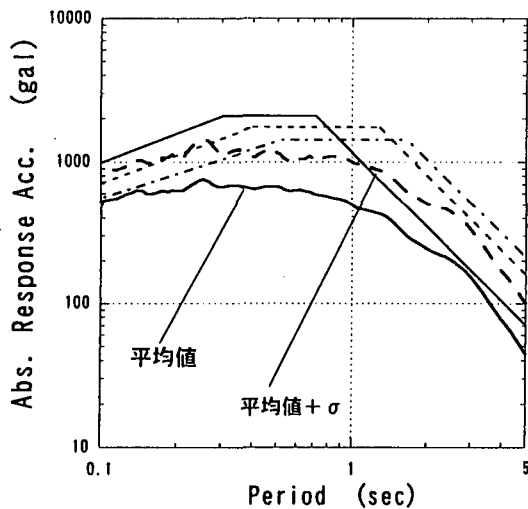


図-3 加速度応答スペクトルとその平均値

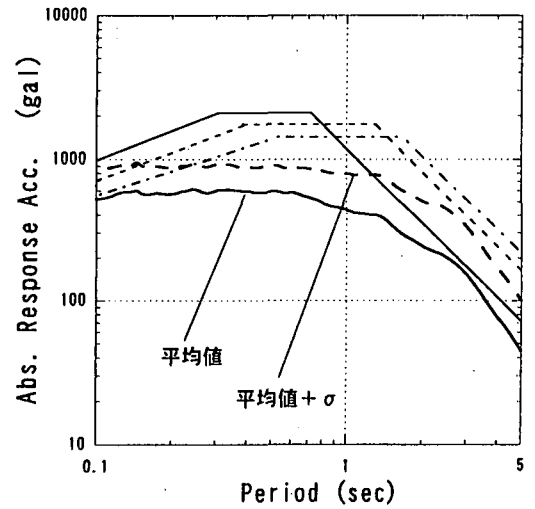
表-1 基礎-地盤-構造物系の諸定数

m_1 (tf sec ² /m)	119.3	γ_{ss} (tf/m ³)	1.5
M (tf sec ² /m)	415.4	γ_{ss} (tf/m ³)	1.8
J_0 (tf sec ² /m)	30481.0	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		

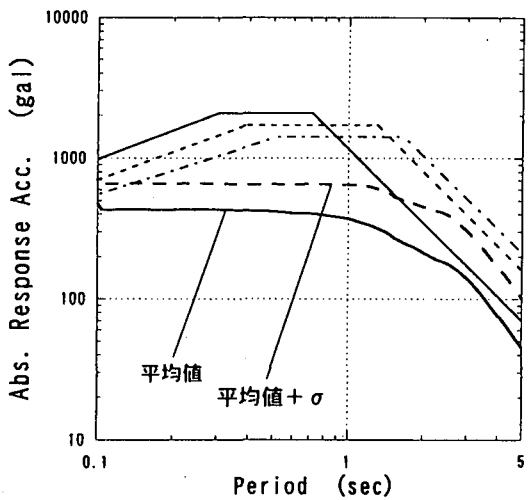
図-3には、有効入力地震動を評価した場合としない場合の3自由度モデルと1自由度モデルの絶対加速度応答スペクトルを実線で、各応答スペクトルの平均値を破線で示した。3自由度モデルは1自由度モデルと比較して固有周期0.1~1.0秒の周期領域で応答スペクトルの値が低減していることがわかる。また、有効入力地震動を評価した場合には、全周期で応答スペクトルの値が低減していることがわかる。



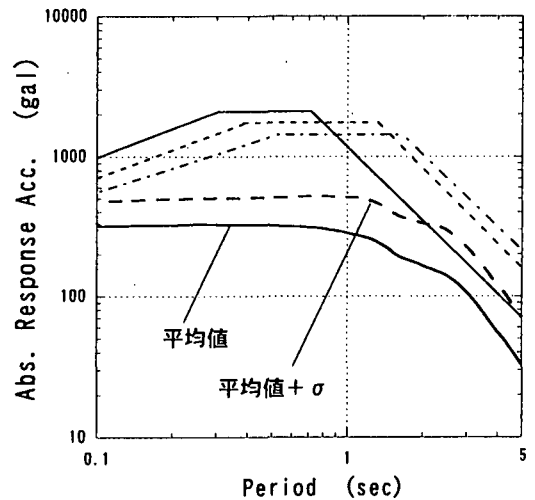
a) 1自由度系 (線形)



b) 1自由度系 (非線形)



c) 3自由度系



d) 3自由度系 (有効入力地震動)

図-4 タイプIIの標準加速度応答スペクトルとの比較

図-4には、3自由度モデルおよび1自由度モデルの応答スペクトルの平均値を実線で、平均値+標準偏差を破線で示した。図中の直線は、道路橋示方書で定められたタイプIIの標準加速度応答スペクトルで実線がI種地盤、点線がII種地盤、一点鎖線がIII種地盤を表している。これより、3自由度系の応答スペクトルの平均値は、各固有周期でI種地盤の許容範囲内に収まっていることがわかる。さらに、平均値+標準偏差は1.0秒以上の長周期側において上回っていることがわかる。有効入力地震動を評価した3自由度モデルでは、評価しないものと比較してほとんどの周期帯において小さくなっていることが読みとれる。

図-5は神戸海洋気象台の観測地震記録を入力とし、上部工の固有周期を1.0秒としたときの各ばねの相対変位、絶対加速度および履歴ループを示した。この場合、基礎の回転および並進で大きな塑性変形を示しており、動的相互作用の影響により上部構造物への入力の低下が生じていることがわかる。

5. まとめ

基礎-地盤-構造物系の動的相互作用を考慮したモデルを用いることで、絶対加速度応答スペクトルを算出し、1自由度モデルの解析結果と比較した。しかしながら、動的相互作用の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型に整理するかを踏まえ、塑性率をパラメーターとしてより詳細な検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 原田隆典, 山下典彦: 構造物の地震応答に及ぼす基礎と周辺地盤の剥離・滑りの影響, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp.1191-1196, 1990.12.
- 3) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録(No.21), 土木研究所彙報, 第64号

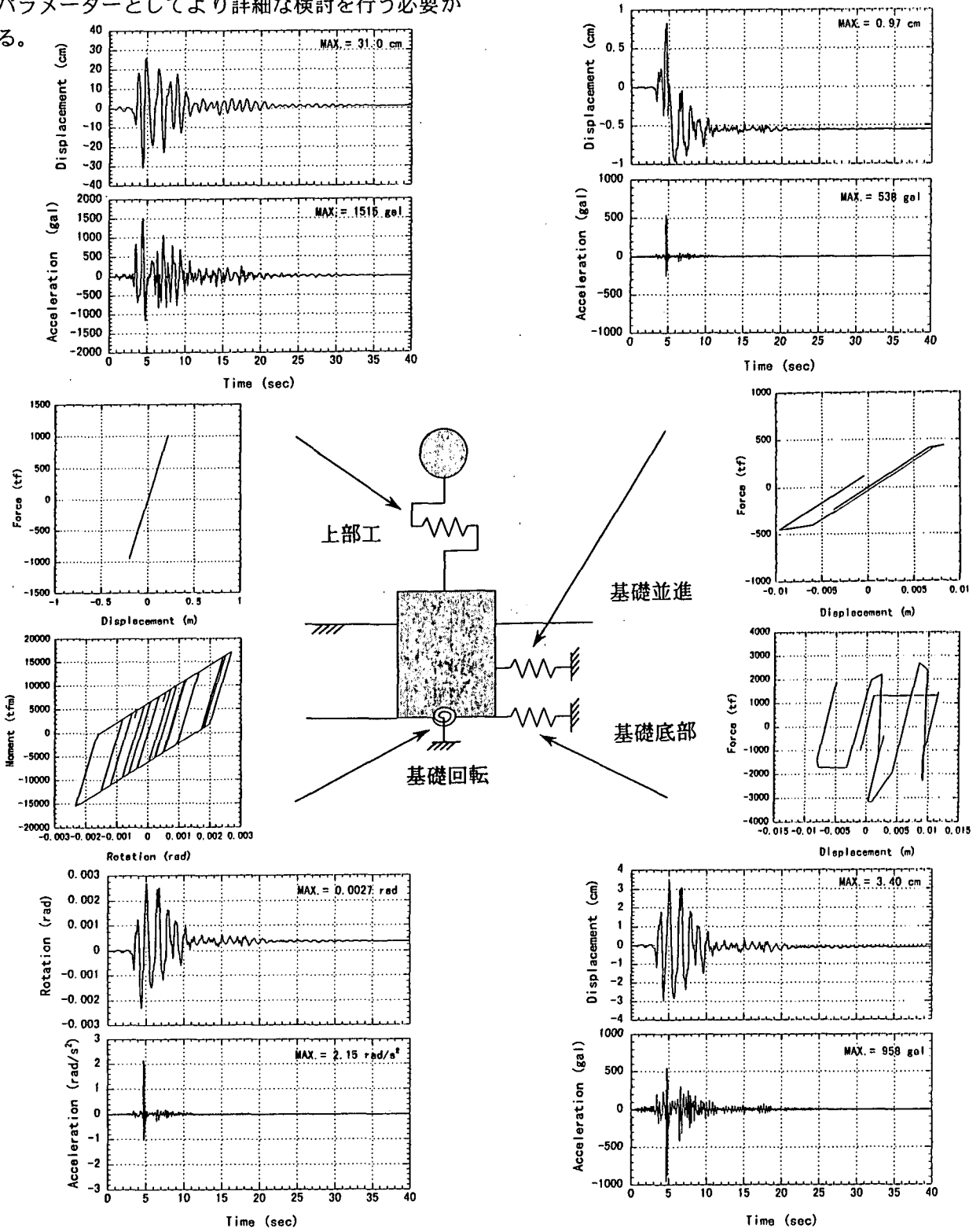


図-5 3自由度系の時刻歴解析結果