

基礎 - 地盤 - 構造物系の非線形動的相互作用に関する研究

山下典彦¹・原田隆典²

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

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少しでも改良し、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イ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

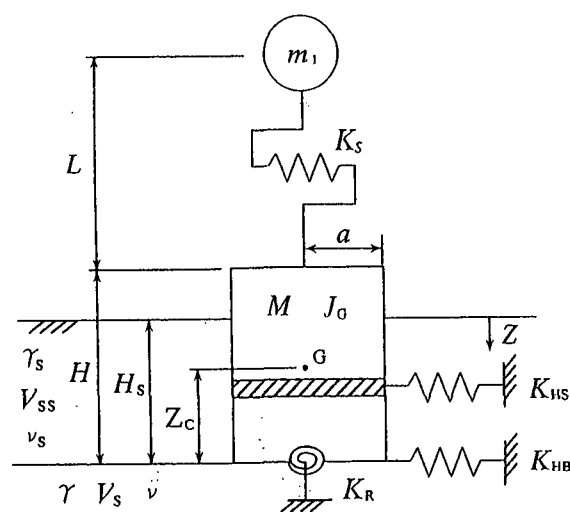
基礎-地盤-構造物系を図-1a)に示すような上部 1 自由度および基礎の並進、回転の 2 自由度からなる 3 自由度系でモデル化した。図-1b)のように座標を定めると振動方程式は次式のようになる²⁾。

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

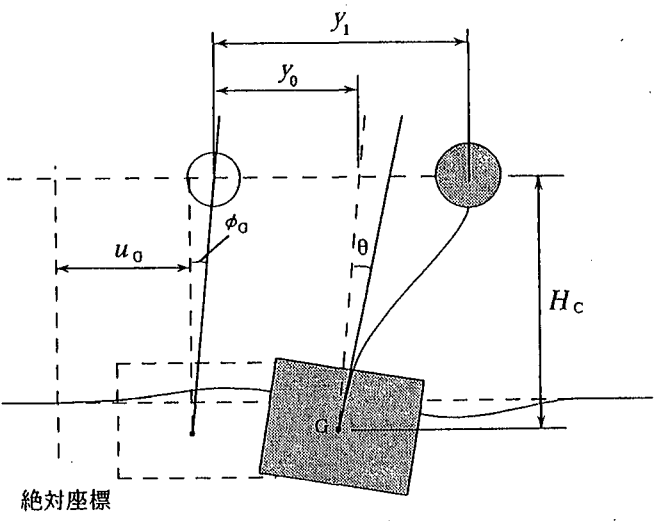
$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J_G \end{bmatrix} \quad \{I_1\} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \{I_2\} = \begin{bmatrix} H_c \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

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



a) 振動モデル



b) 振動モデルの座標系

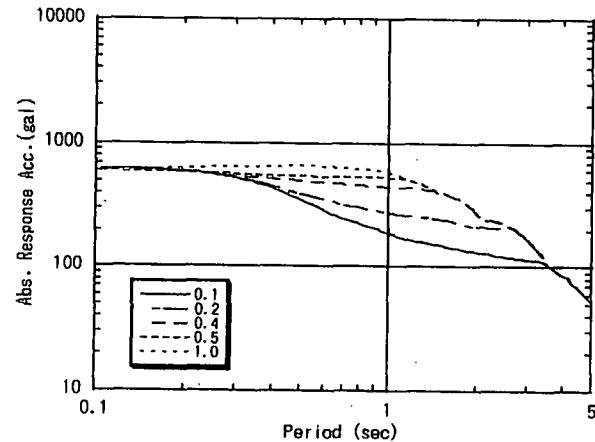
図-1 基礎 - 地盤 - 構造物系のモデル化

$H_c = H - Z_c + L$ と表せる。 $\ddot{u}_G$ と ϕ_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。

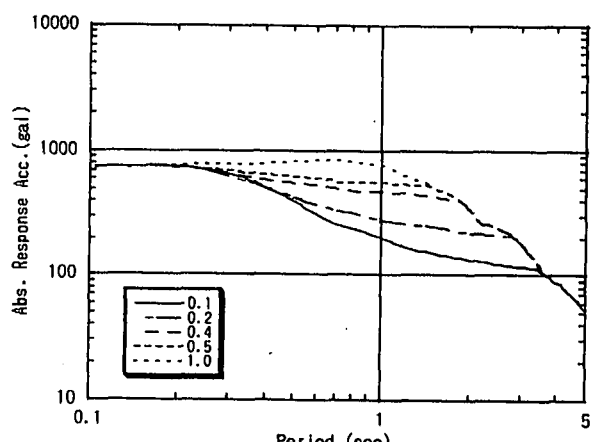
3. 動的相互作用を考慮した応答スペクトル

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 (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 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。

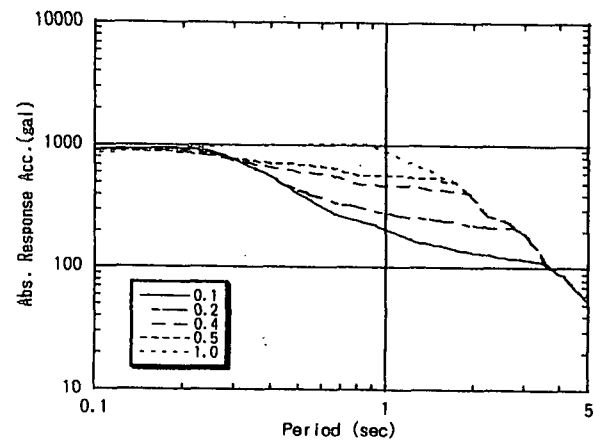
さらに、地盤の動的復元力モデルとしては、土は引張りに耐えないものとし、さらにモール・クーロンの破壊規準にしたがうものとした非線形スプリングを持つウインクラーモデルの考え方¹⁾を採用した。なお、この復元力モデルでは、地盤の弾性波探査より求められるせん断波速度、ポアソン比および密度、さらに土の粘着力、内部摩擦角および基礎寸法が与えられると復元力が求められるようになっている。



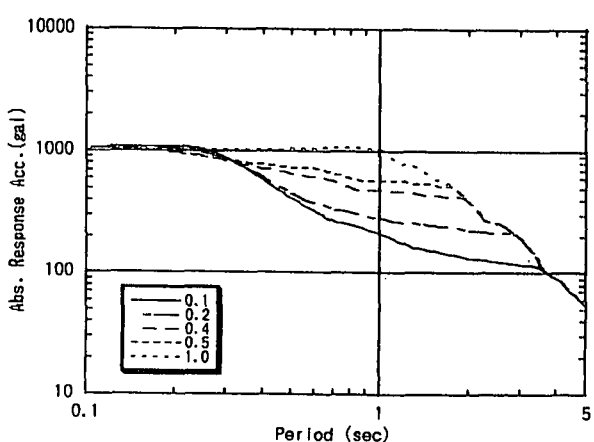
a) 質量比 1/2



b) 質量比 1/3



c) 質量比 1/4



d) 質量比 1/5

図-3 絶対加速度応答スペクトル (L=20m)

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0.005秒とし、表層地盤厚さ H_s については20mとして数値計算を行った。入力地震動としては、神戸海洋気象台の観測地震記録を用い、さらに、それらをもとに有効入力地震動³⁾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。

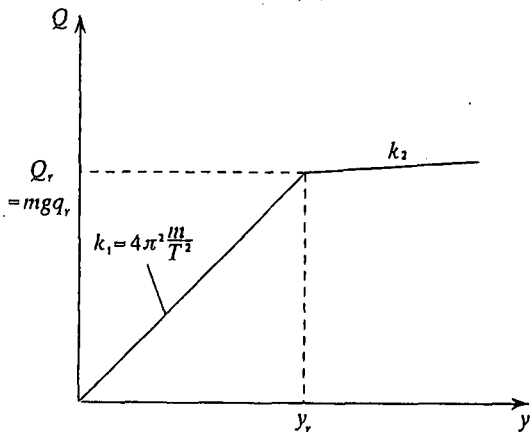


図-2 上部構造物の復元力特性

表-1 基礎-地盤-構造物系の諸定数

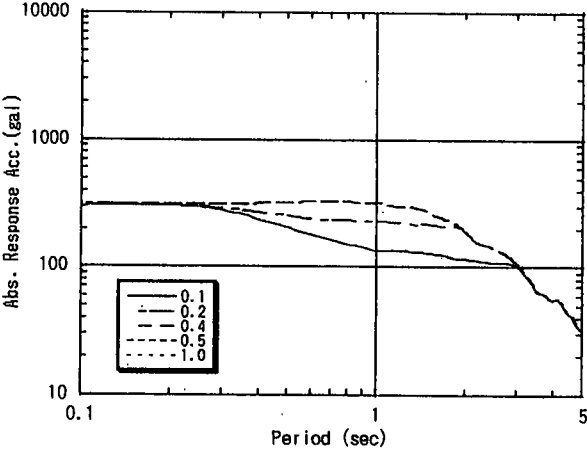
m_1 (tf sec ² /m)	119.3	γ_s (tf/m ³)	1.5
M (tf sec ² /m)	415.4	γ_{ss} (tf/m ³)	1.8
J_0 (tf sec ² m)	30481.0	V_{ss} (m/s)	100.0
L (m)	20.0	V_s (m/s)	500.0
H (m)	30.0	ν_s	0.45
Z_c (m)	15.0	ν	0.3
a (m)	5		

図-3には、基礎の質量に対する上部構造物の質量（以下、質量比と呼ぶ。）を変化（1/5～1/2）させた場合の3自由度系の絶対加速度応答スペクトルを示す。すべての図において上部構造物の固有周期1.0秒付近では、上より降伏震度が1.0から0.1の応答スペクトルとなっている。また、0.2秒以下および3秒以上の応答スペクトルについては、降伏震度による差がほとんどみられない。さらに、2秒以下では、質量比が小さいほど応答スペクトルが大きくなる傾向を示しているが、降伏震度が小さい場合は全周期においてあまり変化がみられない。

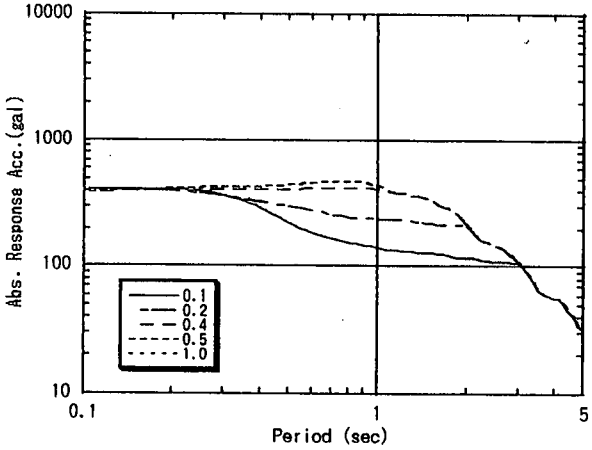
図-4には、図-3と同じ3自由度系に有効入力地震

動を考慮した場合の質量比による応答スペクトルを示す。図-3の場合と同様に、すべての図において上部構造物の固有周期1.0秒付近では、上より降伏震度が1.0から0.1の応答スペクトルとなっている。特に、質量比1/2の場合は、降伏震度が0.4から1.0の応答スペクトルが、質量比1/3の場合は、降伏震度が1.0と0.5の応答スペクトルが、全周期にわたって同じ値となっている。さらに、有効入力地震動を考慮した結果、全周期において応答スペクトルの値が低減していることがわかる。また、図-3の場合と同様に0.2秒以下および3秒以上の応答スペクトルについては、降伏震度による差がほとんどみられない。

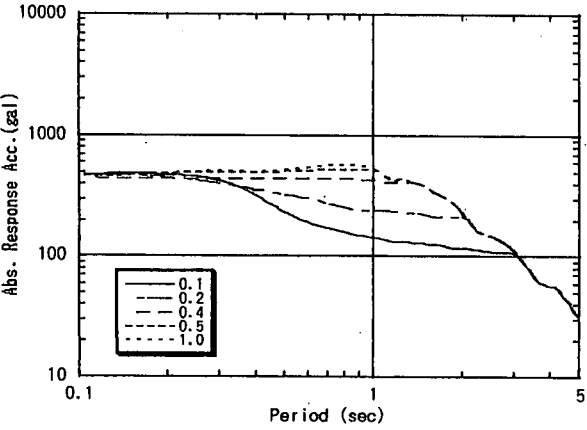
図-5は、基礎底面ばねの剥離・滑り現象を履歴ループの比較を示したものである。上より上部構造物の降伏震度が0.1、0.5および1.0の場合を示している。さらに、図-5b)はa)の上部構造物の高さを20mから30mに変化させたものであり、図-5c)はb)の上部構造物の固有周期を1.0秒から0.5秒に変化させたものである。これより、上部構造物の降伏震度が大きく、上部構造物の高さが高く、且つ固有周期が小さい場合には、基礎と地盤の間に生じる剥離・滑りの影響が大きくなることがわかる。



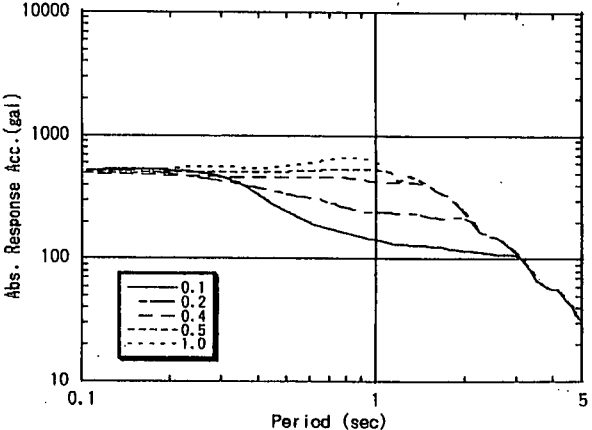
a) 質量比 1/2



b) 質量比 1/3



c) 質量比 1/4



d) 質量比 1/5

図-4 絶対加速度応答スペクトル(有効入力地震動, L=20m)

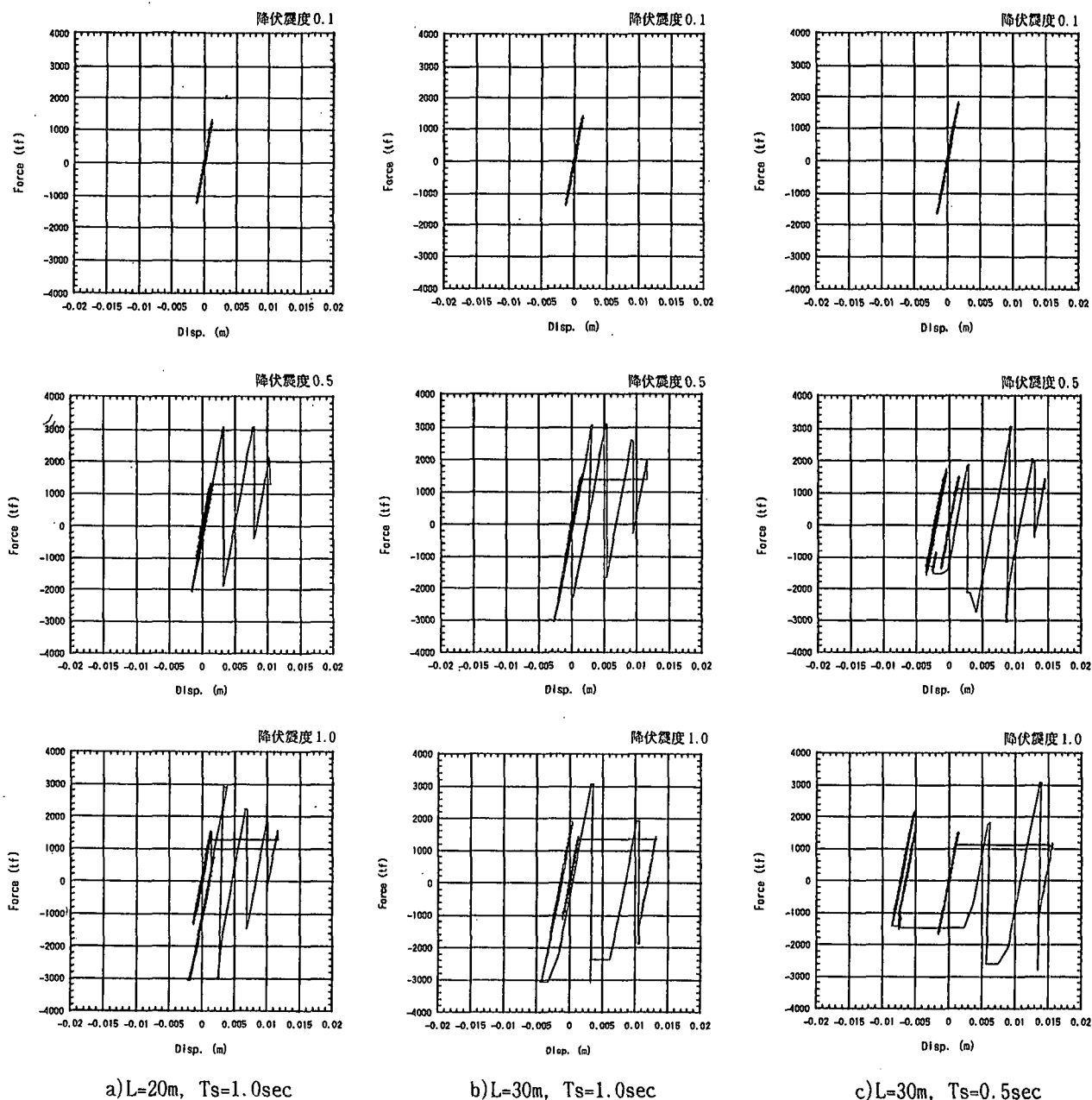


図-5 基礎底面ばねの履歴ループの比較

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、上部構造物と基礎の質量比および有効入力地震動を考慮した場合の応答解析結果を比較した。この結果、上部構造物の特性が基礎と地盤の間に生じる剥離・滑りに大きく影響していることがわかった。しかしながら、動的相互作用を取り入れた合理的な耐震設計法を策定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イ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) 土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会: 基礎・地盤・構造物系の動的相互作用 - 相互作用効果の耐震設計への導入 - , pp.II-56, 1992.9.