

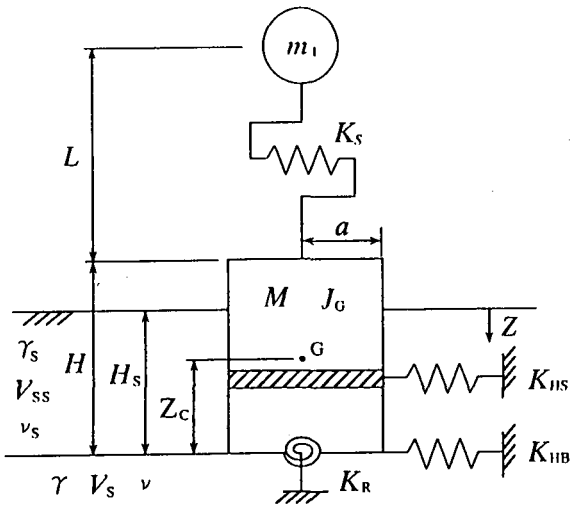
基礎-地盤-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究

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講師 都市工学科（〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3）
²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。



(a) 振動モデル

2. 動的相互作用モデル

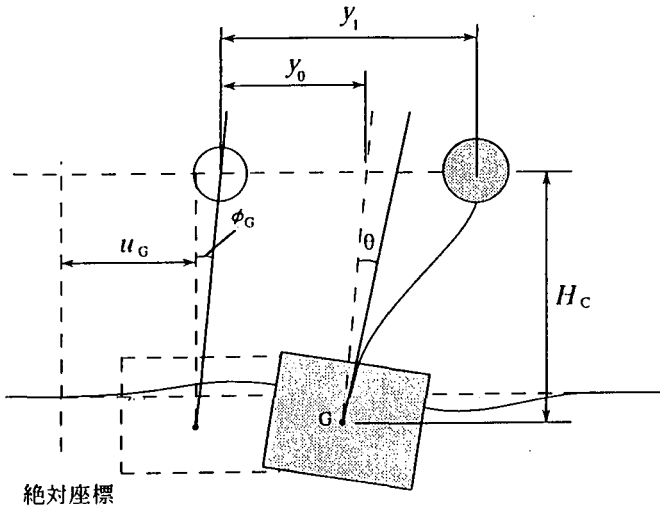
基礎-地盤-構造物系を図-1(a)に示すような上部1自由度および基礎の並進、回転の2自由度からなる3自由度系でモデル化した。図-1(b)のように座標を定めると振動方程式は次式のようになる²⁾。

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

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

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

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



(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自由度系の動的相互作用モデルと1自由度系の絶対加速度応答スペクトルを計算し、その比率をとることにより動的相互作用の影響を調べた。3自由度系の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、地盤の弾性波探索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

数値計算モデルとしては、表-1に示す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て計算を行った。解析は増分法を用い、有効地震動加速度として神戸海洋気象台の地震波を3自由度系の重心位置に作用させた。また計算時間間隔は0.01秒とし、降伏震度 q_Y は0.1, 0.2, 0.4, 0.5および1.0について、表層地盤厚さ H_s は0, 10, 20および30mについて計算を行った。図-3に3自由度系の応答スペクトルを示す。この図は、上より降伏震度 q_Y が1.0から0.1の場合の応答スペクトルを示しており、0.06~0.3秒の短周期側では設定した降伏震度による違いは明確ではないが、周期が長くなるにつれて違いが顕著に現れている。

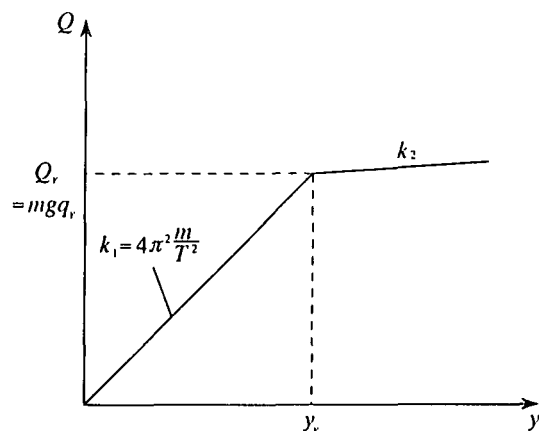


図-2 上部構造物の復元力特性

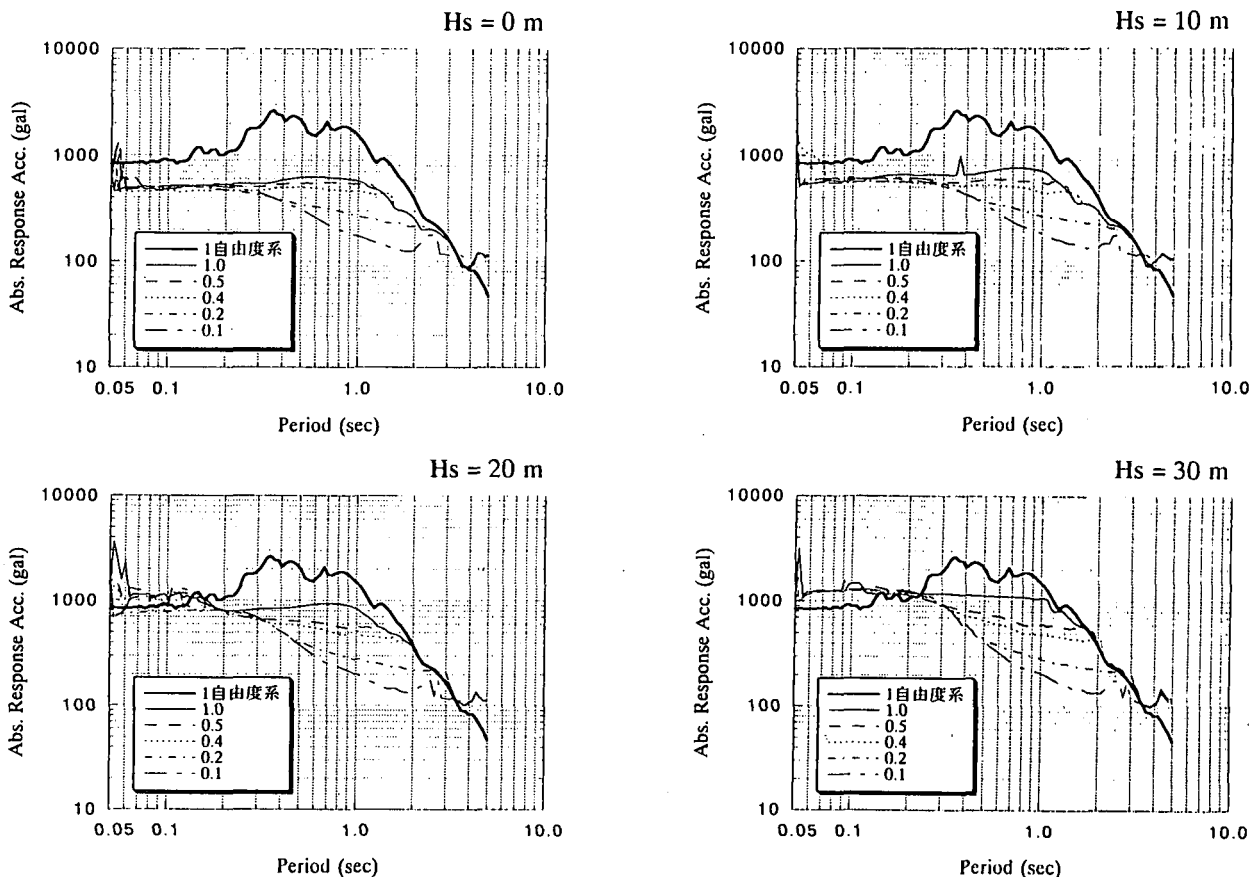


図-3 3自由度系の応答スペクトル

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_G (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-4は3自由度系と1自由度系の絶対加速度応答スペクトルの比率をとったものであるが、上より降伏震度 q_y が1.0から0.1の場合である。表層地盤厚さが大きくなるにつれて全体的に比率が小さくなっていることがわかる。

図-5は図-3の応答スペクトルの横軸の周期を上部構造物の最大絶対加速度が生じたときの周期としたものである。これより、長周期側にプロットがあることから構造物が塑性域にある場合に最大絶対加速度が生じていることがわかる。

図-6(a)は表層地盤厚さが20 mのときの上部構造物の塑性率を示したものである。上より降伏震度 q_y が0.1から1.0の場合で、降伏震度が小さいほど上部構造物の塑性率が大きくなっていることがわかる。さ

らに降伏震度が1.0の場合は短周期側で大きな塑性率を示している。図-6(b)は(a)の塑性率の横軸の周期を上部構造物の最大相対変位が生じたときの周期としたものである。これより、0.2秒あたりから初期剛性もしくは第2剛性で最大相対変位が生じていることがわかる。さらに、それは降伏震度が小さい場合ほど顕著である。

5. まとめ

基礎-地盤-構造物系を表現した3自由度モデルを用いることで、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を調べた。しかしながら、そ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系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.

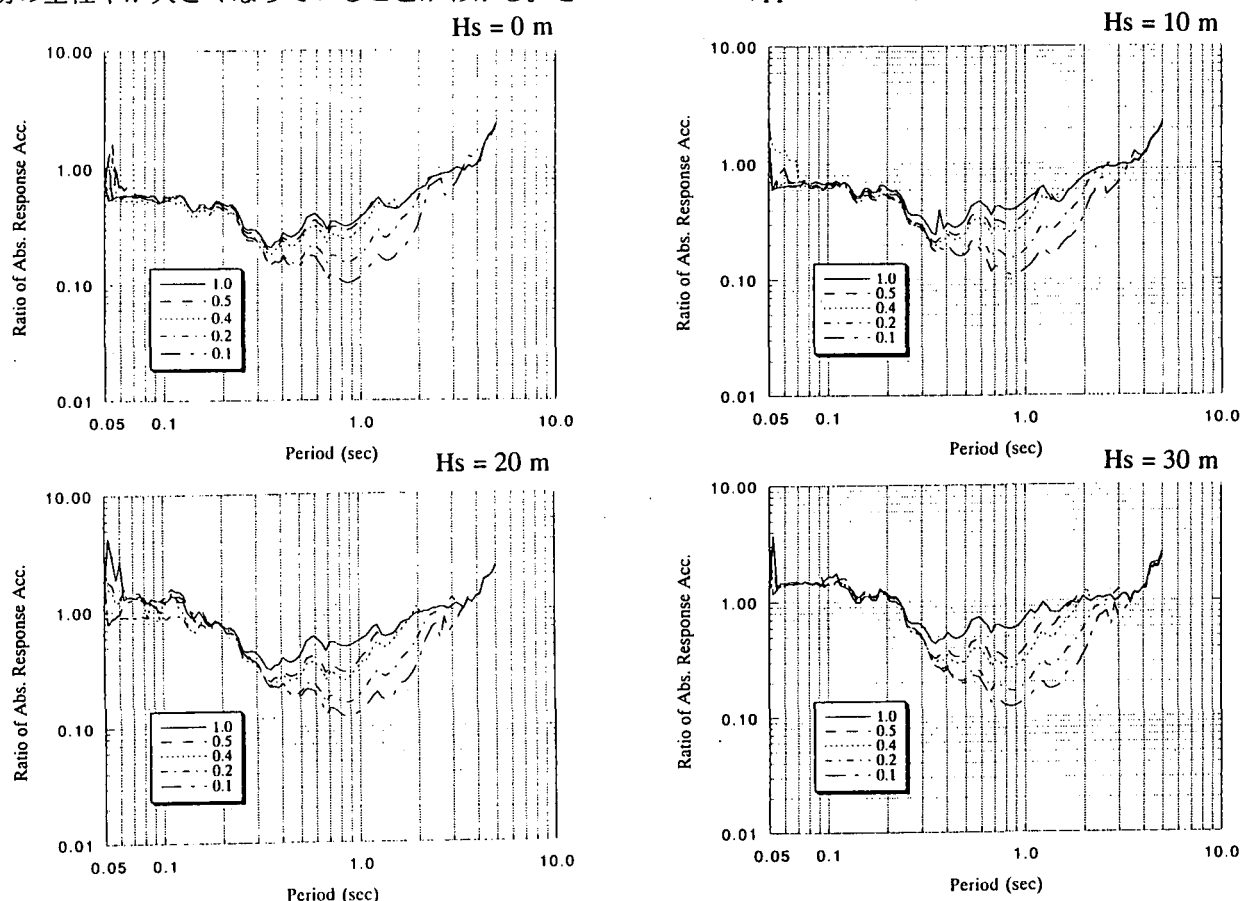


図-4 3自由度系の応答スペクトルの比率

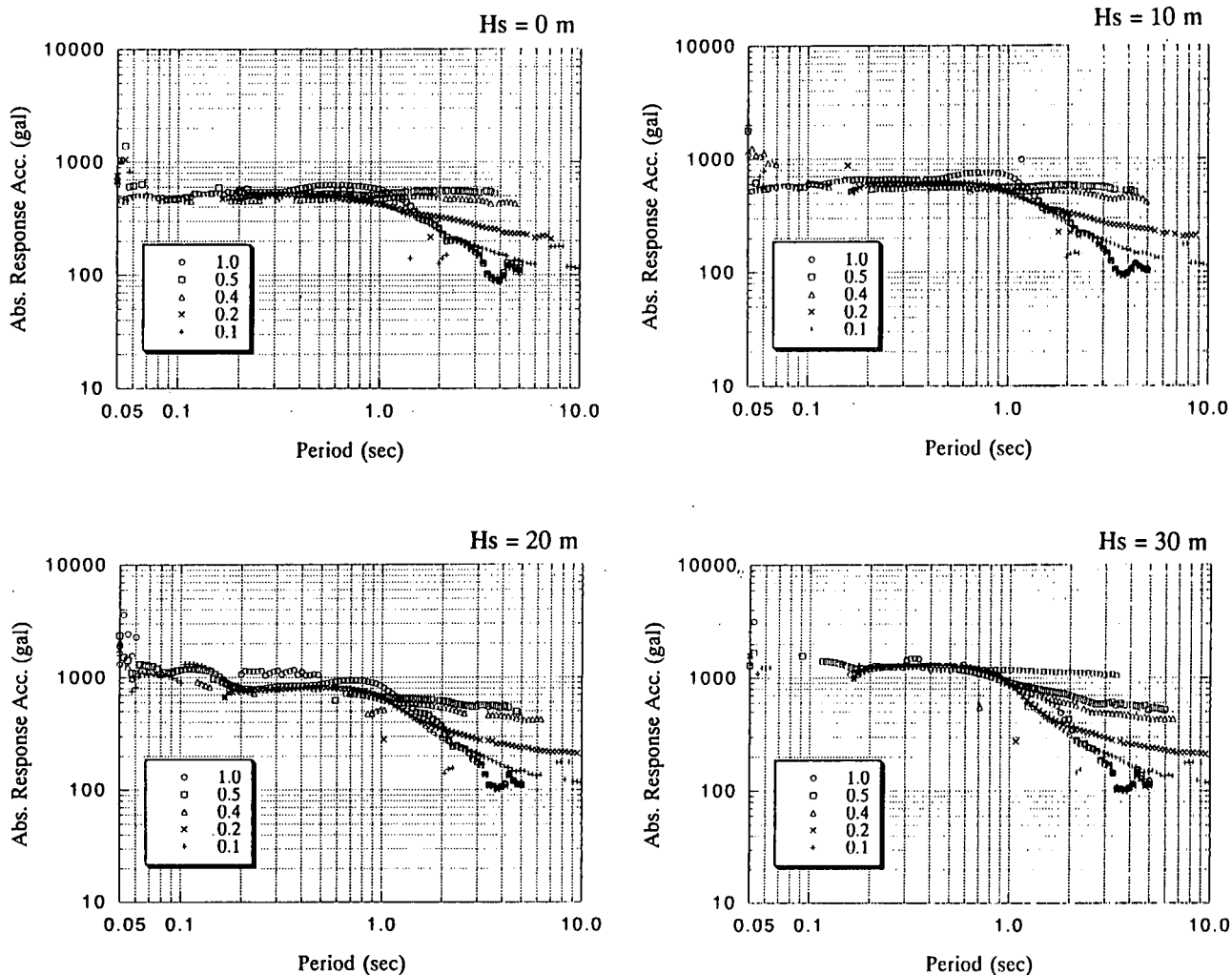
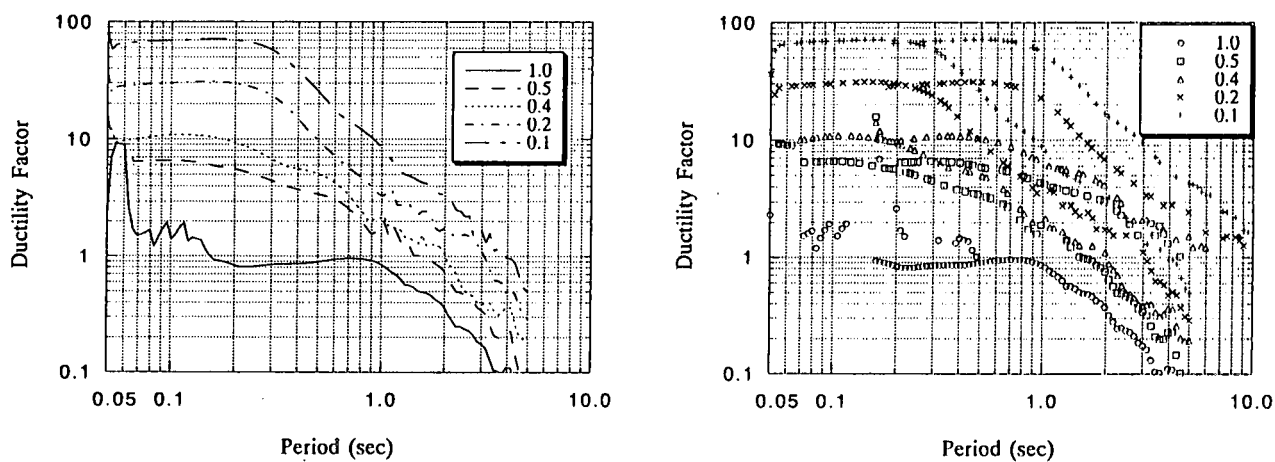


図-5 3自由度系の応答スペクトルの比率（上部構造物の周期を考慮）



(a) 表層地盤厚さ 20 m

(b) 表層地盤厚さ 20 m (上部構造物の周期を考慮)

図-6 3自由度系の上部構造物の塑性率