

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

山下典彦¹・原田隆典²

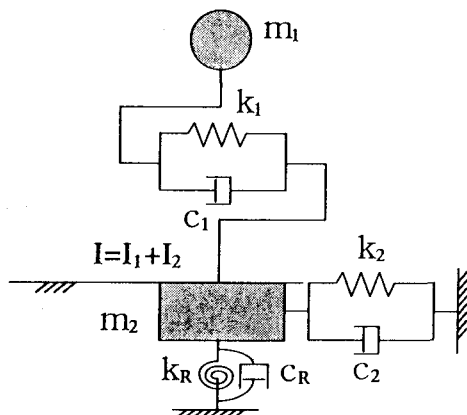
¹正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校講師 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

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。そこで、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。なお、振動方程式の誘導にあたっては、大型ケーソン基礎を対象とすることとし、連成項を無視している。

2. 動的相互作用モデル



(a) 振動モデル

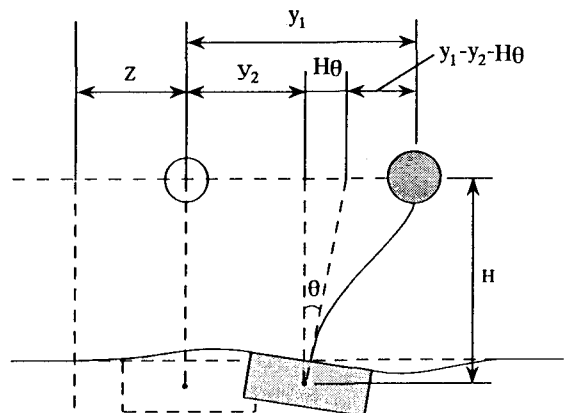
基礎-地盤-構造物系を図-1(a)に示すような上部構造物の水平1自由度と基礎の並進および回転の2自由度(基礎-地盤系はスウェイ-ロッキングモデル)からなる合計3自由度系でモデル化した。図-1(b)に示す基礎重心点を入力地震動の作用位置と考えた場合、その振動方程式は、構造物がないときの自由地盤の地表面の動きを z 、橋脚天端および基礎部の自由地盤の地表面に対する相対変位を y_1 および y_2 、基礎回転変位を θ とすると、振動方程式は次式のようになる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{I\}\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & -c_1 H \\ -c_1 & c_1 + c_2 & c_1 H \\ -c_1 H & c_1 H & c_1 H^2 + c_R \end{bmatrix}$$

$$[K(t)] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & -k_1 H \\ -k_1 & k_1 + k_2 & k_1 H \\ -k_1 H & k_1 H & k_1 H^2 + k_R \end{bmatrix}$$



(b) 振動モデルの座標系

図-1 基礎-地盤-構造物系

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \theta \end{Bmatrix} \quad \{I\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

と表せる。

式(1)においては、復元力特性が線形の場合を示しており、非線形応答解析においては該当するばねが図-2に示すバイリニア特性を持つものとする。上部構造物の非線形性はコンクリート、鉄筋あるいはスチールの降伏によって生じるものでバイリニア特性の降伏点の評価は、例えば建設省土木研究所の開発した方法¹⁾等によって評価することができる。さらに、地盤の非線形性は土は引っ張りに耐えないものとし、さらにモール・クーロンの破壊基準に従うものと仮定した復元力特性²⁾によって評価している。

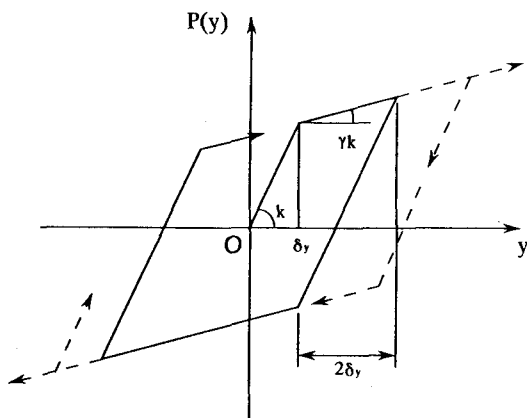


図-2 バイリニアモデル

さらに、入力地震動としては自然地盤の地表面の地震動だけでなく、地震動の空間的変動を考慮した有効入力地震動を以下の近似式³⁾により評価した。したがって、ここではキネマティックな相互作用の影響を考慮することとし、有効入力地震動は基礎の質量を零とした状態での地震応答を想定したものとなっており、水平変位振幅比に自然地盤の地表面での地震動を乗じて求める⁴⁾。

$$\frac{u(\omega)}{u_0(\omega)} = \begin{cases} \left\{ \frac{\sin(\omega H_s / V_{ss})}{\omega H_s / V_{ss}} \right\}^2 & : \omega < \omega_s \\ 0.405 & : \omega \geq \omega_s \end{cases} \quad (2)$$

ここに、

$$\omega_s = \frac{\pi V_{ss}}{2H_s}$$

3. 動的相互作用を考慮した応答スペクトル

ここでは、図-3に示すような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る。 S_{A0} は1自由度系の絶対加速度応答スペクトル、 $S_A^n (n=1, 1' \sim 4)$ は各3自由度系の絶対加速度応答スペクトルである。さらに、 u_{g0} は自然地盤の地表面の地震動、 u'_{g0} は地震動の空間的変動を考慮した有効入力地震動である。すなわち、3自由度系については、該当する復元力特性を線形および非線形とした場合、有効入力地震動を評価した場合としない場合を考慮している。

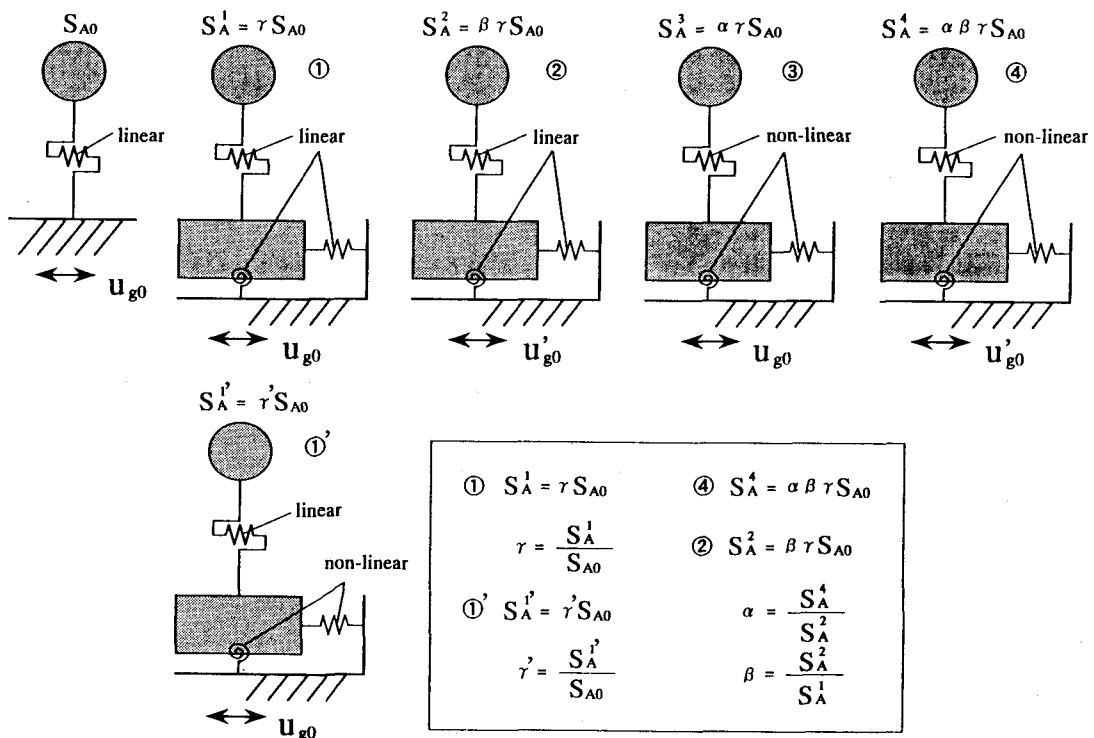


図-3 動的相互作用を考慮した応答スペクトル

4. 数値計算例

数値計算モデルは、表-1に示す大型ケーソン基礎を対象とした基礎-地盤系⁵⁾とし、上部構造物については、すべてにおいて橋脚高さ15.0m、橋桁重量300.0tf、橋脚重量412.5tfとして計算を行った。解析は増分法を用い、神戸海洋気象台、エルセントロの地震波を作用させた。有効入力地震動の影響を評価した場合は、表-1で示される基礎-地盤系のデータに基づき u_{g0} を求めた。図-4に地表面レベルにおける有効入力地震動に対する応答スペクトルを示す。図-4(a),(b)はそれぞれ、神戸海洋気象台、エルセントロの計算結果であるが、太線が自然地盤の地震動の応答スペクトルで細線が大型ケーソン基礎の応答スペクトルを表している。これより大型ケーソン基礎の応答スペクトルは、自然地盤の地震動の応答スペクトルと比較するとスペクトル値が1秒以下の短周期領域でかなり低減していることがわかる。

表-1 基礎-地盤系の諸定数

	寸法	地盤定数						
		a (m) (1)	Hs (m) (2)	H2 (m) (3)	Vss (m/s) (4)	ν_s (5)	Vs (m/s) (6)	ν (7)
大型ケーソン基礎	(1)	18.80	1.0	200.0	1000	0.30	1000	0.30
	(2)	41.10	10.0	70.0	1000	0.90	1000	0.30
	(3)	54.00	65.0	65.0	500	0.40	700	0.30
	(4)	24.00	25.0	45.0	500	0.40	500	0.40
	(5)	24.00	27.0	27.0	400	0.40	700	0.30
	(6)	54.00	54.0	54.0	400	0.40 <td 700	0.30	

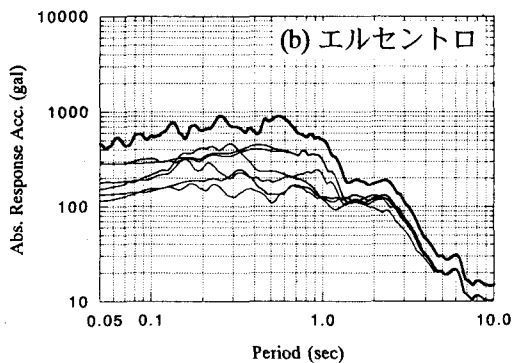
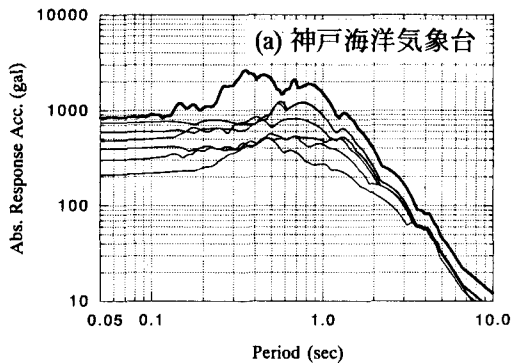


図-4 有効入力地震動の応答スペクトル

図-5は、図-3に基づき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の比率をとることにより、①から④の各係数について神戸海洋気象台の結果を比較したものである。この結果より有効入力地震動、解析モデルの非線形性を考慮することにより動的相互作用効果が大きくなり応答スペクトルの比率が減少していることがわかる。さらに、図-3の①において比率が短周期側で1.0以上になっている。これは図-6に示すように、一般に3自由度系の応答スペクトルは1自由度系のものと比較して減少することと、3自由度全体系の周期は1自由度系の周期より延びることに起因する。したがって、短周期側ではスペクトル比率は①となり、長周期側では②となることがわかる。

図-7は、 α (非線形係数)、 β (有効入力係数)、 γ' (基礎の慣性力係数)の係数を抽出した結果である。したがって、これらの係数を自然地盤の地震動の応答スペクトルに乗じることにより、各項を考慮した応答スペクトルを計算できることがわかる。

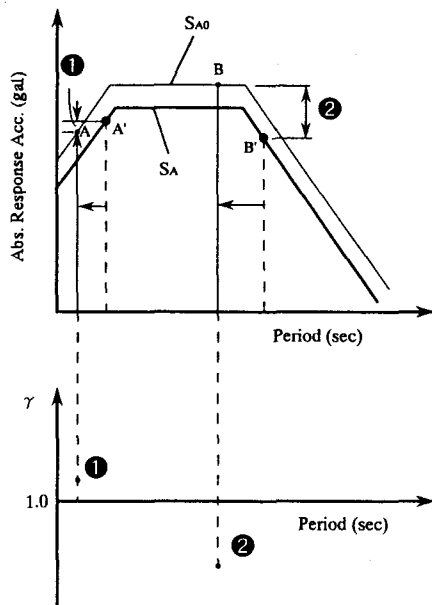


図-6 絶対加速度応答スペクトルの比率の解釈

5. まとめ

本研究では、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求めることにより、 α (非線形係数)、 β (有効入力係数)、 γ' (基礎の慣性力係数)の係数を抽出した。しかし、ここで使用した解析モデルは、地盤-基礎の動的相互作用を完全に考慮したものとはなっておらず、今後は有限要素法の計算結果等との比較を踏まえより詳細な検討を行い各係数をモデル化する必要がある。

参考文献

- 1) 太田 実：単一柱形式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究, 土木研究所報告, 第153号, 1980.
- 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.
- 3) 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-, 土木学会耐震工学委員会, 動的相

相互作用小委員会, 1992.

- 4) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄：有効地震動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, No.362/I-4, pp.435-440, 1985.

- 5) 原田隆典, 木下貴夫：地盤と基礎の動的相互作用を取り入れた応答スペクトル法の考え方, 宮崎大学工学部研究報告, 第31号, pp.79-86, 1985.

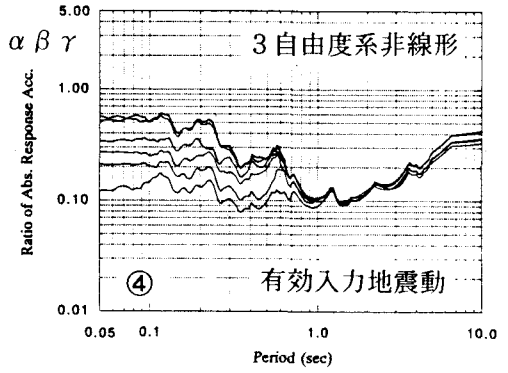
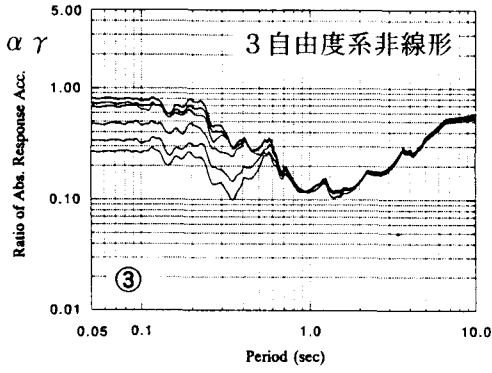
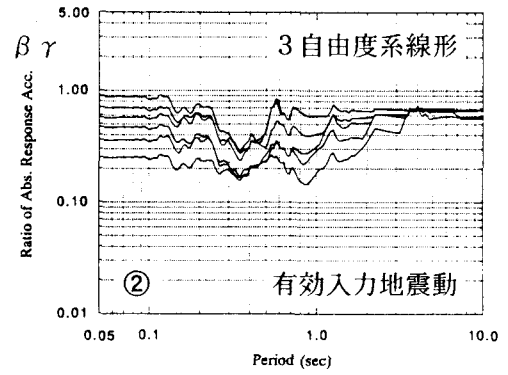
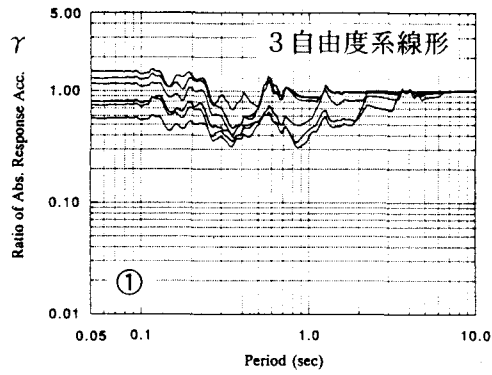


図-5 絶対加速度応答スペクトルの比率

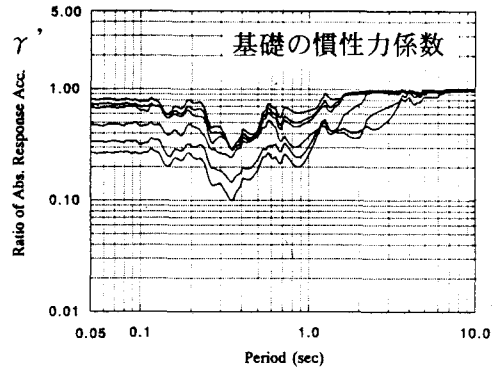
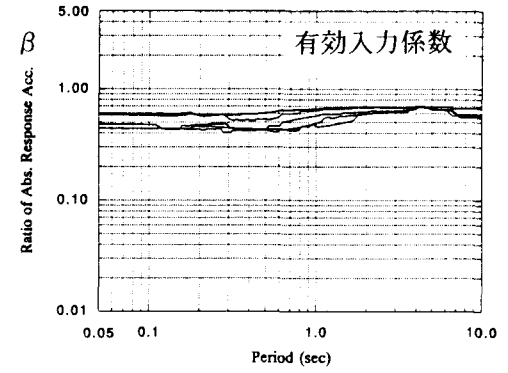
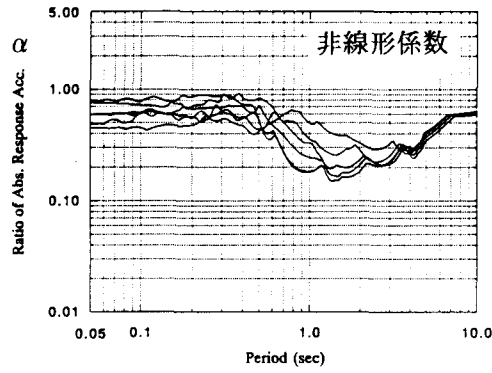


図-7 各係数の抽出