

(79) 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と試算例

本四公団〇加島延行, 建設省土木研究所 川島一彦, 宮崎大学工学部 原田隆典, 日本技術開発(株) 阪山龍二

1. まえがき 地震時の地盤と構造物の動的相互作用の問題は, 次の二つの問題に大別される。(1)基礎の寸法効果による地震動の拘束の問題(有効地震動の問題), (2)基礎の振動エネルギーが周辺地盤に消散したり, 地盤が基礎の運動に抵抗する問題(動的復元力の問題)。従来では, 第2番目の動的復元力の問題が中心テーマとしてよく研究されてきているが, 結局, この問題は基礎の固有周期と減衰定数を推定する問題となる。この問題に関しては, 設計指針等において, 一定の手順化された方法が示されている場合が多いが, ここでは, かなりの安全率と工学的判断が見込まれているのか一般的である。したがって, 指針等に示された手順による値と実験値との対応は必ずしもよくないのが現状である。他方, 第1番目の有効地震動の問題は, あまり研究されていないが, (1)と(2)の問題を同時に考慮することにより初めて地震時における地盤と構造物の相互作用を考慮したことになる。本文では, 第1番目の有効地震動の問題を応答スペクトルに組み込むことを考え, 別途, 第2番目の動的復元力等より求まる基礎の固有周期と減衰定数を用いて, 動的相互作用を考慮した地震力を算定する新しい応答スペクトル法の考え方を示し, 多自由度系の試算例により, 従来の応答スペクトル法との比較を行なったので, その概要を報告する。

2. 方法の概説 図-1は動的相互作用モデルを大別したものである。各モデルの概説は文献[1]に譲るが, 従来の地震応答解析では, 地盤の影響をバネ・ダッシュポットで置換して, これらの支点に地表面上の地震動あるいは, 地盤の1点における地震動を作用させるスプリングモデルB(図-1参照)が採用される場合が多く, より詳細なモデルとして, スプリングモデルCや有限要素法によるモデルが採用されている。しかし, 最近の研究

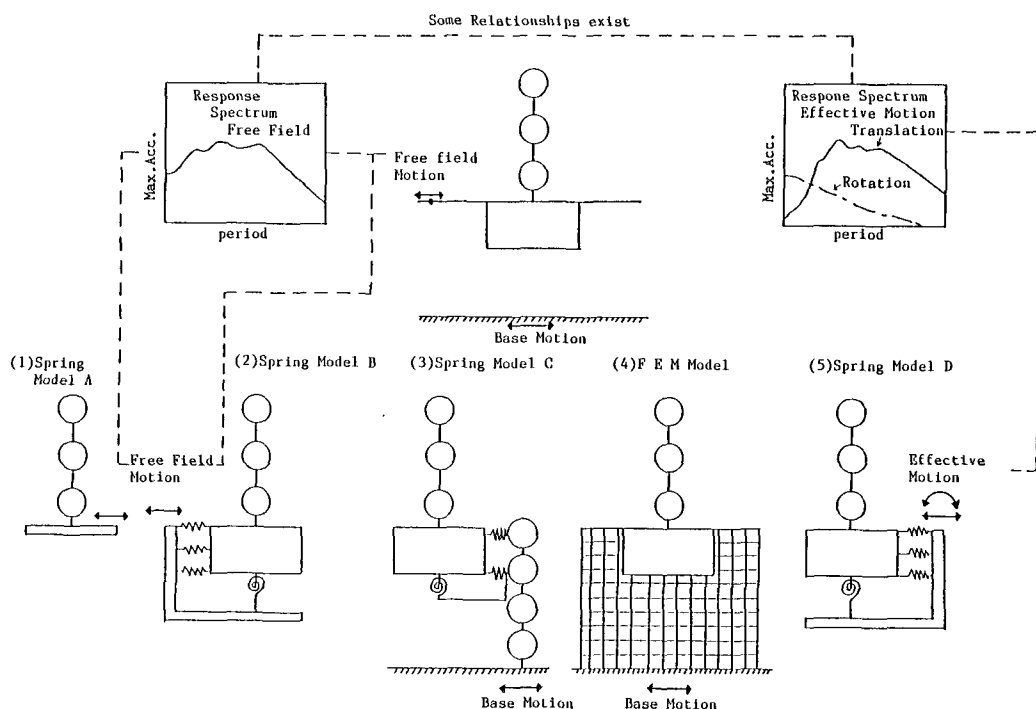


図-1 動的相互作用モデルの大分類

では、図-1のスプリングモデルBは、有限要素法モデルと同じ応答値を与えること、スプリングモデルBでは、本来、有限要素法モデルと同じ応答値は得られないこと（根入れ基礎の場合に限る）等が確かめられてきている[2]。ここで、スプリングモデルBの運動方程式は、マトリックス表示すれば次式で表わすことができる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{r_1\}\ddot{u}'(t) - [M]\{r_2\}\ddot{\varphi}'(t) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は質量、減衰係数、剛性マトリックス、 $\{y\}$ は各質点の相対変位ベクトル、 $\{r_1\}$ 、 $\{r_2\}$ は影響ベクトルである。 $\ddot{u}'(t)$ 、 $\ddot{\varphi}'(t)$ は有効地震動の加速度波形の水平成分、回転成分を表す。有効地震動とは、“自然地震の地震動とは異なり、剛体基礎の幾何学的条件により基礎周辺地盤の地震動が拘束され、変形されるために生ずる地震動”、物理的には、“質量が零の基礎の地震応答値”と定義される。この有効地震動は、図-2のように基礎周辺地盤での地震動の違いを考慮した入力地震動で、具体的な関数形は、上述した有効地震動の物理的意味にしたがって実験や有限要素法により決めなければならぬが、次のようなパラメータの関数を自然地震の地震動 $\ddot{u}_g(t)$ に乗じて求めることができる。

$$\ddot{u}'(t) = f(\text{基礎の寸法, 地盤材料定数等}) \ddot{u}_g(t), \quad \ddot{\varphi}'(t) = g(\text{基礎の寸法, 地盤材料定数等}) \ddot{u}_g(t) \quad \dots (2)$$

この有効地震動は、自然地震の地震動に比べ短周期成分の少ない波形となることが明らかになってきている[2]。従来、地震応答解析でよく用いられるスプリングモデルBの運動方程式は、式(1)において、 $\ddot{u}'(t) = \ddot{u}_g(t)$ 、 $\ddot{\varphi}'(t) = 0$ として、次式のように求められる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{r_1\}\ddot{u}_g(t) \quad \dots\dots (3)$$

式(3)では、図-1のように色々な地震波 $\ddot{u}_g(t)$ に対して応答スペクトルを作成しておいて、モーダル解析を用いると、通常の応答スペクトル法により応答の最大値を計算することができる[3]。これと同様に、スプリングモデルBの運動方程式(1)でも、以下に示すような理由で、地震波 $\ddot{u}_g(t)$ の代りに有効地震動 $\ddot{u}'(t)$ と $\ddot{\varphi}'(t)$ に対して応答スペクトルを作成しておけば、通常の応答スペクトル法により式(1)の応答の最大値を計算することができる(図-1参照)。

今、式(1)において、水平有効地震動 $\ddot{u}'(t)$ と回転有効地震動 $\ddot{\varphi}'(t)$ による応答を次のように分離する。

$$\{y\} = \{y^{(1)}\} + \{y^{(2)}\} \quad \dots\dots (4)$$

$\{y^{(1)}\}$ と $\{y^{(2)}\}$ はそれぞれ次式の運動方程式の解となる。

$$[M]\{\ddot{y}^{(1)}\} + [C]\{\dot{y}^{(1)}\} + [K]\{y^{(1)}\} = -[M]\{r_1\}\ddot{u}'(t) \quad \dots\dots (5)$$

$$[M]\{\ddot{y}^{(2)}\} + [C]\{\dot{y}^{(2)}\} + [K]\{y^{(2)}\} = -[M]\{r_2\}\ddot{\varphi}'(t) \quad \dots\dots (6)$$

式(5)と(6)は本質的にスプリングモデルBの運動方程式と同じであることがわかる。したがって、有効地震動 $\ddot{u}'$ 、 $\ddot{\varphi}'$ に対して応答スペクトルを作成することにより応答スペクトル法によって、 $\{y^{(1)}\}$ と $\{y^{(2)}\}$ の最大値が計算できる。応答 $\{y\}$ の最大値はそれぞれの2乗平均値として

$$\{y_{max}\} = \sqrt{\{y_{max}^{(1)}\}^2 + \{y_{max}^{(2)}\}^2} \quad \dots\dots (7)$$

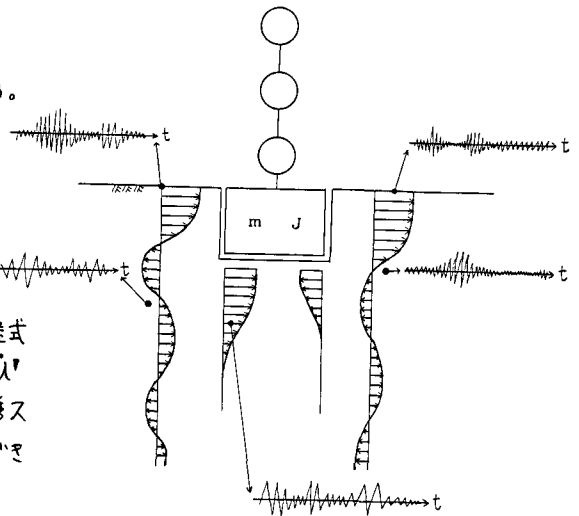


図-2 基礎周辺部での地震動の違いの概念図

3. 有効地震動の応答スペクトルの計算例

図-3と表-1に示す大型ケーソン基礎と一般道路橋ケーソン基礎を対象とした基礎-地盤系について、地表面レベルにおける自然地震動の地震動 $\ddot{u}_g(t)$ と有効地震動 $\ddot{u}'(t)$, $\ddot{\varphi}'(t)$ をまず初めに計算した。有効地震動の計算では、式(2)の関数として原田らによるものを用いた。次に、これらの波形に対する加速度応答スペクトルを5%減衰定数に対して求めた。回転成分 $\ddot{\varphi}'(t)$ に関しては、高さ10mの点の応答水平加速度による応答スペクトルを計算している。次に、自然地震動の地震動の応答スペクトル S_a と有効地震動の応答スペクトル S_a' と S_r' の比率を計算し、この比率 α , β の値を求める(図-4と5のよう)になった。(L=10mと仮定した)

$$S_a' = \alpha S_a, \quad S_r' = \beta S_a \quad \dots (8)$$

図-4と5のように比率 α , β は基礎-地盤系の諸定数や固有周期により変化するが、大型ケーソン基礎と一般道路橋ケーソン基礎では明らかに違った特性が認められる。この違いを特徴的に示すと、図-6と7のように比率 α , β を与えることができる。したがって、

α , β を通常の応答スペクトル S_a に集することにより有効地震動の応答スペクトルが求まることになる。この比率 α , β は、動的相互作用係数と呼ぶことができる。

4. 応答スペクトル法による計算例

基礎は表-1のケース4程度とし、応答スペクトル法により、図-8に示す橋梁物の応答最大値を計算してみる。自然地震動の地震動の応答

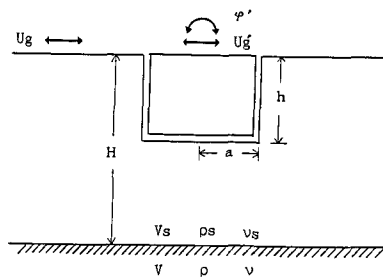


図-3 基礎-地盤モデル

表-1 計算に用いた基礎-地盤系の諸定数

	寸 法			地 盤 定 数						
	a	h	H	Vs	ρs	vs	Vs	ρ	v	
	m	m	m	m/sec	kg sec ² /m ³		m/sec	kg sec ² /m ³		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
大型 ケー ソン 基礎	(1)	18.80	1.0	200.0	1000	240	0.30	1000	240	0.30
	(2)	41.10	10.0	70.0	1000	220	0.30	1000	220	0.30
	(3)	54.00	65.0	65.0	500	200	0.40	700	210	0.30
	(4)	24.00	25.0	45.0	500	200	0.40	500	200	0.40
	(5)	24.00	27.0	27.0	400	200	0.40	700	210	0.30
	(6)	54.00	54.0	54.0	400	200	0.40	700	210	0.30
一般 道路 橋基 礎	(7)	2.00	17.5	17.5	100	150	0.43	280	180	0.47
	(8)	2.30	13.8	13.8	180	180	0.43	280	180	0.47
	(9)	4.60	21.0	21.0	288	190	0.43	330	200	0.47
	(10)	3.44	33.0	33.0	200	170	0.43	350	180	0.47
	(11)	4.70	15.0	15.0	200	180	0.43	300	180	0.47
	(12)	6.00	35.4	35.4	170	170	0.43	300	180	0.47

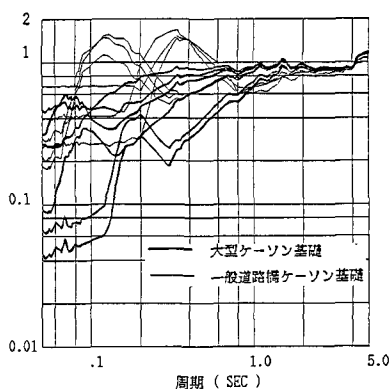


図-4 水平有効地震動のスペクトルの比率 α

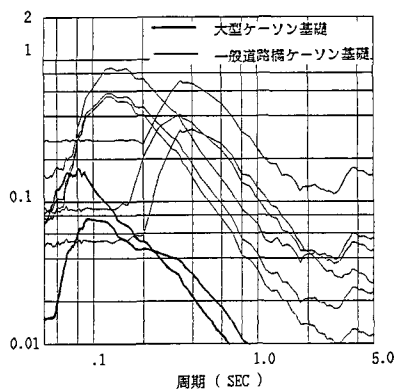


図-5 回転有効地震動のスペクトルの比率 β

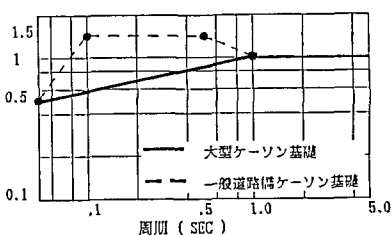


図-6 比率 α の近似

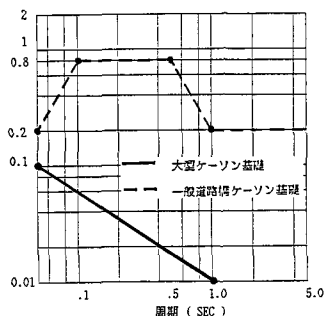


図-7 比率 β の近似

スペクトルを S_a とすると、有効地震動の応答スペクトル S_a^* , S_r^* は、図-6 の大型ケーソン基礎の比率 α , β を乗じて、図-9 の点線のように求められる。諸定数は

$$[M] = \begin{bmatrix} J_0 + J_1 & 0 \\ 0 & m_0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120 & 0 \\ 0 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} m_1, [K] = \begin{bmatrix} 300 & 5 & -10 \\ 5 & 1.5 & -1 \\ -10 & -1 & 1 \end{bmatrix} \frac{P_2}{l_2}$$

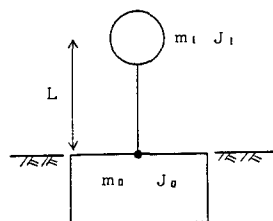


図-8 上部工-基礎-地盤系

とする。上部工の固有振動数 $\omega_0 = \sqrt{k_2/m_1} = 2\pi \times 4$ とすると、各次の固有周期は、 $T_1 = 0.67$, $T_2 = 0.17$, $T_3 = 0.12$ 秒となる。応答スペクトル法により各点の最大力と最大変位を求め、結果をまとめると表-2 のようになる。表-2 で第2列は、従来のように自然

地盤の地震動の応答スペクトル S_a による結果を、第3列は有効地震動のスペクトル S_a^* , S_r^* による結果を示す。第4と5列には、水平成分 S_a^* と回転成分 S_r^* のみの場合を示すが、この試算例より、有効地震動による応答値は低減されることや有効地震動の回転成分の影響は小さいこと等を読みとることかできる。今後より詳細な検討をする予定であるが、本方法により動的相互作用を取り入れた簡便な地震応答解析が可能になるものと考えられる。なお本研究は、土木学会本回連絡橋耐震・地盤に関する調査研究小委員会（委員長、久保慶三郎、埼玉大学教授、東京大学名誉教授）、耐震分科会（主査、栗林栄一、豊橋技術科学大学教授）で審議されているもので、委員および関係者に深く謝意を表する。

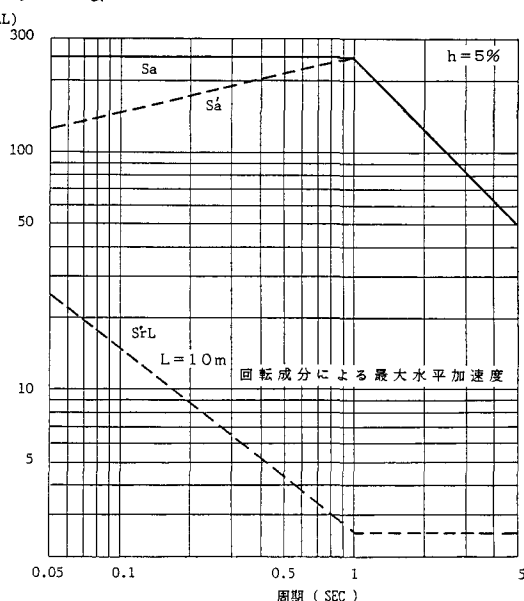


図-9 自然地盤の地震動と有効地震動の応答スペクトル

表-2 応答スペクトル法による3自由度モデルの応答値の比較

地震力、変位の最大値	自然地盤地震動 $\ddot{U}_g, S_a$	有効地震動 $\ddot{U}^*, \dot{\varphi}^*$ S_a^*, S_r^* $\sqrt{(\ddot{y}^{(1)\max})^2 + (\dot{\varphi}^{(1)\max})^2}$	水平成分 $\ddot{U}^*, S_a^*$ $\ddot{y}^{(1)\max}$	回転成分 $\dot{\varphi}^*, S_r^*$ $\dot{\varphi}^{(1)\max}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$M_{\max} \text{ (kg}\cdot\text{m)}$	11.4 m_1	8.9 m_1	8.90 m_1	0.85 m_1
$P_0 \text{ max (kg)}$	0.9 m_1	0.8 m_1	0.77 m_1	0.04 m_1
$P_1 \text{ max (kg)}$	2.6 m_1	2.4 m_1	2.40 m_1	0.03 m_1
$\theta \text{ max (rad)}$	6.90×10^{-4}	6.50×10^{-4}	6.50×10^{-4}	0.05×10^{-4}
$y_0 \text{ max (m)}$	1.78×10^{-2}	1.67×10^{-2}	1.67×10^{-2}	0.005×10^{-2}
$y_1 \text{ max (m)}$	2.90×10^{-2}	2.70×10^{-2}	2.70×10^{-2}	0.04×10^{-2}

m_1 = 質点1の質量

1) 原田隆典 宮崎大学研究報告 第31号, 1985

2) 土木学会・本回連絡橋耐震・地盤に関する調査研究小委員会, 調査研究報告書 昭59年3月, 昭60年3月

3) 片山恒雄, 宮田利雄, 国井隆弘: 構造物の振動解析, 技報堂出版, 1979年 pp. 189~193.