

地盤と基礎の動的相互作用を考慮した応答スペクトルとその耐震設計への応用

本州四国連絡橋公団 加島延行
 宮崎大学 工学部 原田隆典
 日本技術開発㈱ 磯山龍二

1. はじめに

最近の動的相互作用の研究成果によると、動的相互作用の問題は、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）および②基礎の振動エネルギーの地下逸散や基礎の変位に抵抗する地盤反力の問題（動的復元力の問題）に分けられる^{1)・2)}。従来は、②の動的復元力の問題を中心として相互作用の問題が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り、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。他方、①の有効地震動の問題は、最近その物理的意味や特性が明らかになりつつあるもので、この有効地震動の効果と動的復元力の効果と同時に考慮することにより、地盤と基礎の動的相互作用を完全に考慮しうる。従来の応答スペクトル法は、②の動的復元力の効果のみが考慮されていることになる。

本論文では、①の有効地震動の効果を検討した応答スペクトルを、基礎寸法—地盤系の関数として整理することにより、①の有効地震動と②の動的復元力と同時に考慮した新しい応答スペクトル法を提案し、試算例によりその特徴を検討している。

2. 動的計算の考え方

基礎周辺地盤の各点における地震動は一般的に異なるため、構造物の地震応答解析においては、このような地震動の空間的分布を考慮する必要がある。このような問題は有効地震動の問題として位置づけられるが、橋梁のケーソン基礎のように基礎を剛体としてモデル化できる場合には、有効地震動は質量=0の基礎の地震応答値として、ある一点の水平成分 $u_B(t)$ 、および回転成分 $\phi_B(t)$ により評価することができる²⁾。したがって、基礎—上部構造系の運動方程式は、マトリックス表示すれば次式で表現される⁴⁾。

$$[M] \cdot \{\ddot{y}\} + [C] \cdot \{\dot{y}\} + [K] \cdot \{y\} = - [M] \cdot \{r_1\} \cdot \ddot{u}_B - [M] \cdot \{r_2\} \cdot \ddot{\phi}_B \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{y\}$ は各質点の相対変位ベクトル、 $\{r_1\}$ 、 $\{r_2\}$ はそれぞれ u_B 、 ϕ_B の各質点への影響ベクトルである。剛体基礎の有効地震動は、上述の物理的意味に従って実験や有限要素法等による数値解析により求めることができる。

従来、地震応答解析でよく用いられる運動方程式は、有効地震動の代わりに地盤の一点における波形（例えば自然地震地表面の加速度波形 $\ddot{u}_A(t)$ ）を使うため、式(1)において、 $\ddot{u}_B(t) = \ddot{u}_A(t)$ 、 $\ddot{\phi}_B(t) = 0$ とにおいて、次式のようになる。

$$[M] \cdot \{\ddot{y}\} + [C] \cdot \{\dot{y}\} + [K] \cdot \{y\} = - [M] \cdot \{r_3\} \cdot \ddot{u}_A(t) \quad (2)$$

式(1)では、色々な地震波 $\ddot{u}_A(t)$ の応答スペクトルを作成すると通常の応答スペクトル法により応答の最大値が計算できる。これと同様に、有効地震動を考慮した式(1)においても、以下に示す理由で、地震波 $\ddot{u}_A(t)$ の代わりに、3で述べる手順に従って有効地震動 $\ddot{u}_B(t)$ 、 $\dot{\phi}_B(t)$ の応答スペクトルを準備しておけば、通常の応答スペクトル法のように式(1)の最大応答値を評価することができる。

今、式(1)において、 $\ddot{u}_B(t)$ と $\dot{\phi}_B(t)$ による応答を $\{y\} = \{y^{(1)}\} + \{y^{(2)}\}$ のように分離すると、 $\{y^{(1)}\}$ と $\{y^{(2)}\}$ は次の運動方程式の応答値となる。

$$[M] \cdot \{\ddot{y}^{(1)}\} + [C] \cdot \{\dot{y}^{(1)}\} + [K] \cdot \{y^{(1)}\} = - [M] \cdot \{r_1\} \cdot \ddot{u}_B(t) \quad (3)$$

$$[M] \cdot \{\ddot{y}^{(2)}\} + [C] \cdot \{\dot{y}^{(2)}\} + [K] \cdot \{y^{(2)}\} = - [M] \cdot \{r_2\} \cdot \dot{\phi}_B(t) \quad (4)$$

式(3)、(4)は式(2)と同じ形であるから、 $\ddot{u}_B(t)$ 、 $\dot{\phi}_B(t)$ の応答スペクトルから応答スペクトル法により式(3)、(4)の応答の最大値、 $\{y_{max}^{(1)}\}$ 、 $\{y_{max}^{(2)}\}$ が計算できる。応答 $\{y\} = \{y^{(1)}\} + \{y^{(2)}\}$ の最大値は、各々の2乗平均値として評価することができる。

$$\{y_{max}\} = \sqrt{\{y_{max}^{(1)}\}^2 + \{y_{max}^{(2)}\}^2} \quad (5)$$

3. 有効地震動の算定

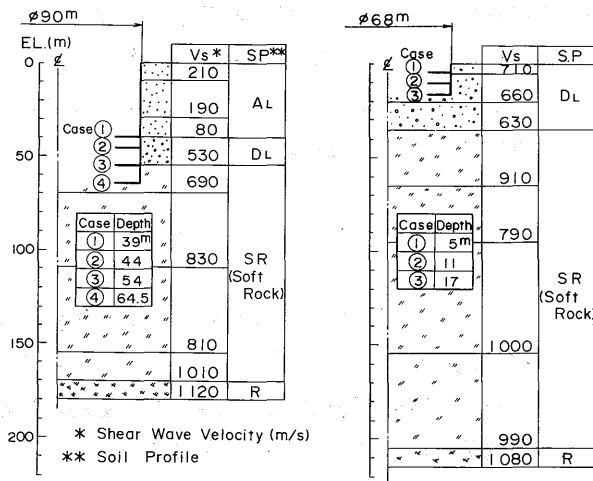
長大な吊橋のアカレイジおよび主塔のケーソン基礎を念頭において有限要素法により有効地震動を算定する。

(1) 解析モデルおよび手法

図1に解析モデルを示す。A基礎はアンカレイジ、P基礎は主塔基礎に対応する。A基礎は洪積砂レキ層(DL)または軟岩(SR)に、P基礎はDL層に支持される。各基礎では設計・施工から考えられる数種の根入れ深さを考える(図1)。

有効地震動は、軸対称有限要素法(以下FEMと呼ぶ)により以下の手順により求めた。基盤は固定とし、側面には、伝達境界を設けた。

①基礎のない場合の地表面(A点と



(a) A Caisson (b) P Caisson
Fig.1 Soil-Caisson Model for Evaluation of Effective Seismic Motion (E.S.M.)

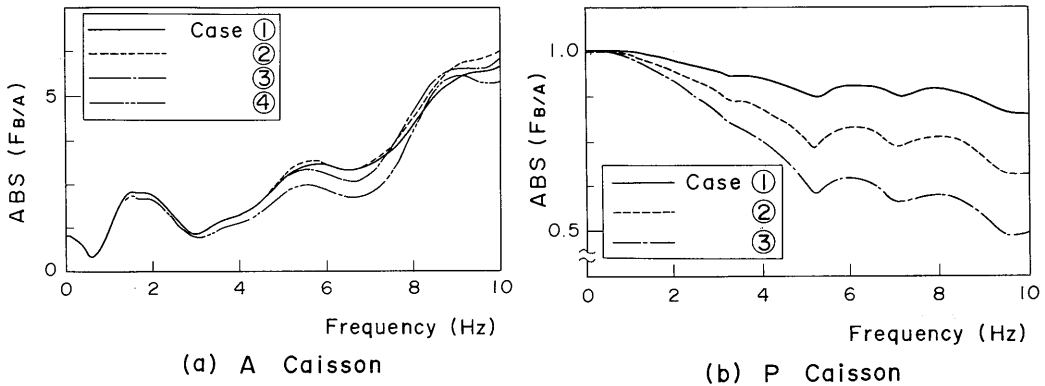


Fig.2 Transfer Function of E.S.M. (Horizontal Direction)

呼ぶ) の基礎に対する周波数応答; $F_A(\omega)$ を1次元波動理論により求める。

②質量ゼロの剛な基礎を含む地盤について、基礎底面中央(B点と呼ぶ)の基礎に対する周波数応答; $F_B(\omega)$ をFEMにより求める。

③ $F_{B/A}(\omega) = F_B(\omega) / F_A(\omega)$ を有効地震動フィルター(水平、回転の2成分がある)と定義し、これを①, ②から求める。

④A点の地震動; $A(\omega)$ を与え、 $F_{B/A}(\omega) \times A(\omega)$ で有効地震動を算出する。

(2) 解析結果

図2に水平方向に対する有効地震動フィルター; $ABS [F_{B/A}(\omega)]$ を示す。位相角および回転方向のフィルターは省略した。一般に、水平方向の有効地震動フィルターは、図2(b)のP基礎のように、周期が短くなるにつれて振幅のカットが大きくなること、また根入れが深くなるほどこの傾向が強いことがよく知られている。ところが、図2(a)のA基礎では、0.7~0.8 Hz付近まではP基礎同様の傾向にあるが、それ以上の周波数領域では、ほぼ増大していく傾向になっている。また、ここでは示していないが、回転方向のフィルターは、A基礎、P基礎とも、周波数とともに、増大する傾向にあるが、A基礎の方がはるかに大きい〔後出図3(b)参照〕。これは、A基礎が40~60mときわめて大きな根入れをされていること、根入れされている地盤が基礎底面以下の地盤に比べて剛性がおおよそ $1/3$ 程度と小さいことなどが原因と考えられる。

Table 1 Peak Value of E.S.M.

(a) A Caisson

Case Comp.	F.F. ^x	①	②	③	④
Horizontal Acc (gal)	113	201	208	192	160
Rotational Acc (rad/s ² × 10 ⁻²)	-	1.53	1.70	1.86	1.85

^x Free Field Motion at Ground Surface

(b) P Caisson

Case Comp.	F.F.	①	②	③
Horizontal Acc (gal)	251	231	211	192
Rotational Acc (rad/s ² × 10 ⁻²)	-	0.09	0.34	0.75

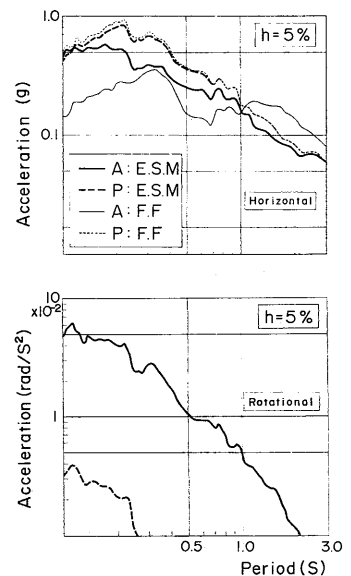


Fig.3 Response Spectra of E.S.M. (Case 1)

表1に基礎底面における有効地震動の最大値を示す。なお、これらは両基礎共通にSR層上面で設定された地震動(入射波としての最大加速度141gal)に基づき算定されたものである⁵⁾。A基礎では、水平方向最大加速度が根入れの増大とともに減少し、回転加速度が増大している。P基礎も同様の傾向にあるが、A基礎と比較して水平加速度の減少が大きいこと、回転加速度の根入れに対する増大比率は大きい絶対値は1オーダー小さいことがわかる。

図3に両基礎の最も根入れの浅いケース(ケース①)の有効地震動の加速度応答スペクトルを、自由地表面の地震動の応答スペクトルとともに示す。これらのスペクトルを S_1 とし、各根入れのケースのスペクトル S_i との比 S_i/S_1 をとった。これを図4に示す。図3~4からも先に述べた地盤、基礎形状の相違による有効地震動の特性がよくわかる。

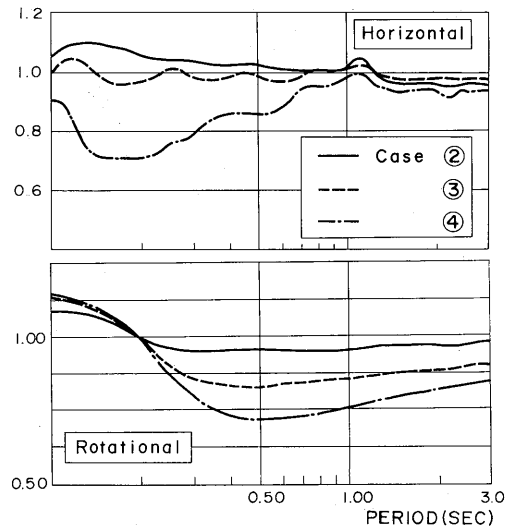
図3の基準となる応答スペクトルおよび図4の根入れに対する応答スペクトルの補正係数を規定することにより、基礎の設計計算で用いる入力地震動を求めることができる。

4. 剛体基礎に対する試算例

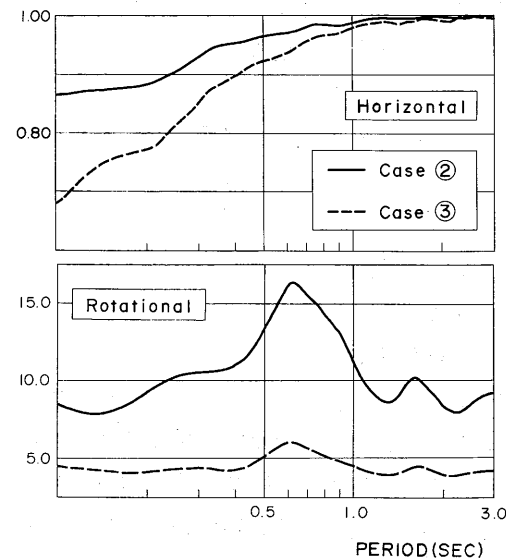
2で述べた考え方に従い、3の有効地震動応答スペクトル(および根入れ補正係数)を用いて、剛体2自由度系の動的応答を試算する。

表2に試算に用いた基礎諸元を示す。A、P基礎とも根入れの最も浅いケースおよび深いケースを想定する。なお、根入れの深さによっても基礎の形状、質量は不変とした。

剛体2自由度系に対する動的復元力は、原田他³⁾によって提案されている弾性波動論によるものを用いた。なお、応答スペクトル法の適用にあたっては、上記の周波数に依存する復元力をそのまま使うことができない。そこで、基礎の卓越振動数 ω_1 をまず求め、 $K = K(\omega_1) + iC(\omega_1)$ として周波数に依存しない復元力を求めた。また、減衰定数、非減衰固有周期は、複素固有値解析により求めた(表2)。



(a) A Caisson



(b) P Caisson

Fig.4 Response Spectrum Ratio when Case ① = 1.0

表3に解析結果を示す。表3の上段は根入れの最も浅いケース、下段は深いケースであり、各々について、(1)自由地表面の応答スペクトル、(2)有効地震動応答スペクトルの水平方向、(3)水平および回転方向を入力した場合の重心点での最大応答値を示している。根入れの深いA基礎では、自由地表面スペクトル入力と有効地震動入力では結果が大きく異なる。また、回転方向の入りの影響も比較的大きい。根入れが深くなると(ケース④)、応答はきわめて小さくなるが、これは、減衰定数の急激な増大のためと考えられる。一方、根入れの比較的浅いP基礎では、自由地表面入力と有効地震動入力との差はA基礎にくらべて小さく、また、回転動の影響もほとんどない。これは、根入れの深いケース③でも同様である。

5. まとめ

地盤と基礎の動的相互作用を考慮した応答スペクトル法を提案し、例題基礎について試算を行った。この結果、①根入れの深い基礎では、有効地震動の効果は無視できない、②提案手法によると、従来の応答スペクトル法(自由地表面入力)よりも大きい応答値が算出される場合もある、などのことがわかった。したがって、とくに根入れの深い大型基礎の動的解析においては本論文に示した手順により応答スペクトルを求め入力とすることが望まれる。なお、本研究は、土木学会本四連絡橋耐震-基礎に関する調査研究小委員会(久保慶三郎委員長)耐震分科会(栗林栄一主査)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。

参考文献

- 1) Kausel, E., Whitman, R.V., Elasabee, F., and Morray, J.P., : Dynamic Analysis of Embedded Structures, Proc. of 4th SMIRT, K₂/6, 1977, 2) Harada, T., Kubo, K., and Katayama, T. : Dynamic Soil Structure Interaction Analysis by Continuum Formulation Method, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.29, No 5, 1981, 3) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄, 広瀬利光 : 地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数, 土木学会論文報告集, 第339号, 1983. 4) 加島延行, 川島一彦, 原田隆典, 磯山龍二 : 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, 第18回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会, 1985. 5) 土木学会本州四国連絡橋耐震・基礎に関する研究小委員会, 昭和60年度報告書, 昭和61年3月

Table 2 Example Caisson

Caisson Case	A		P	
	①	④	①	③
Diameter (m)	90		68	
Height (m)	93		70.5	
$M^*(t-s^2mx10^5)$	1.045		7.566	
$J^*(t-s^2mx10^7)$	14.33		5.32	
Natural ** Period (sec)	0.65	0.40	0.47	0.40
Damping ** Const (%)	27.9	41.1	6.8	14.3

* M : Mass, J : Moment of Inertia of Mass
** Value of 1st Mode

Table 3 Result of Analysis

Caisson	Input	F. F. (1)	E. S. M (H) (2)	ESM(H+R) (3)
A	Horizontal	0.14	0.18	0.19
	Acc. (g)	0.07	0.08	0.08
Case④	Rotation	1.28	1.92	1.98
	(rad x 10 ⁻⁴)	0.90	0.96	1.03
P	Horizontal	0.30	0.29	0.29
	Acc. (g)	0.33	0.28	0.28
Case③	Rotation	2.92	2.84	2.84
	(rad x 10 ⁻⁴)	2.38	2.04	2.04

- (1) Free Field Motion at Ground Surface
- (2) Effective Seismic Motion - Horizontal Motion Only
- (3) Effective Seismic Motion - Horizontal + Rotational Motion

Response Spectra Including Dynamic Soil-Structure
Interaction Effects for Seismic Design

by

Nobuyuki KASHIMA*, Takanori HARADA** and Ryoji ISOYAMA***

ABSTRACT

For seismic design of structures with rigid foundations such as bridges, nuclear containments, and buildings, the present paper has developed a modified response spectrum method including dynamic soil-structure interaction effects. Dynamic soil-structure interaction effects are decomposed into the two effects; the effective seismic motions and the dynamic(complex) stiffnesses of foundation. This decomposition makes it possible to develop a modified response spectrum instead of the response spectrum for free-field ground motions usually used in conventional seismic design.

A numerical example has been worked out for seismic design of huge foundation structure of long suspension bridge. In order to construct the response spectrum for the effective seismic motions as a function of several design parameters(embedment depth of foundation, soil properties, etc.), a finite element method has been successively utilized. From the numerical example, followings have been found:

- (1) The response spectra for the effective seismic motions consist of the horizontal response spectrum and the rotational response spectrum associated with the horizontal effective motion and the rotational effective motion, respectively. The modified response spectrum method using the response spectra for the effective seismic motions usually gives small values of response, compared with those by the conventional response spectrum method using the response spectra for free-field ground motions.
- (2) However, for a special foundation with certain dimensions and soil properties, the conventional response spectrum method, where the effective seismic motions have not been taken into account, does not always predict the conservative responses.
- (3) Hence, it may be recommended for seismic design of large foundation structures to construct the response spectra for the effective seismic motions following the procedure described in this paper, and to use the modified response spectrum method indicated in this paper.

* Assistant Manager, Honshu-Shikoku Bridge Authority, Hiroshima, JAPAN.

** Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Miyazaki University, Miyazaki, JAPAN.

*** Assistant Manager, Japan Engineering Consultants Co., LTD., Tokyo, JAPAN