

地震応答スペクトルに及ぼす諸因子

建設省土木研究所

正員 栗林 栄一

同

同 ○岩崎 敏男

同

同 辻 勝成

まえがき

地震応答スペクトルは、地震動が構造物に与える動的な影響を測る一つの指標として広く用いられている。地震応答スペクトルを用いた耐震計算法は1942年 Biot によってはじめて提案され、柔構造に対する合理的な耐震設計の端緒が開かれた。その後1953年に Housner らは、数多くの地震動記録を用いて、減衰効果を考慮に入れた応答スペクトルを計算し、1959年には、Housner は平均スペクトル曲線を提案した。

一方、わが国においても、1955年に高橋は応答スペクトルの計算を試みており、また1965年には高田らは、わが国で得られた多数の強震記録を用いて一連の応答スペクトルの計算を行い、水平動20成分から平均応答スペクトル曲線を提案した。高田らが提案した平均応答スペクトル曲線は、わが国における多数の地震動の性質を包含するものとして、道路橋などの土木構造物の地震応答解析に使用されると共に、本州四国連絡橋の耐震設計指針に反映された。このように最近では地震応答スペクトルが、実施設計に取り入れられるまでに至ってきている。またごく最近では片山および林らによって、地震応答スペクトルの特性に及ぼす、地震・地盤などの各種の条件の影響が論じられている。

本小文においては、わが国で起こった、比較的大きな地震による水平方向の地震加速度記録4成分(20g以上)の地震応答スペクトルを計算し、地震および地盤の条件から各種に分類し、グループごとに平均化することによって、スペクトル曲線の特性に及ぼす、地震のマグニチュード、最大加速度、震央距離および地盤条件の影響を検討している。この結果から、地盤条件を4種に分類した場合について、各地盤ごとの平均スペクトル(1970)を提案している。

1. 地震応答スペクトルの計算法

この研究において用いた、地震応答スペクトルの計算法を概述する。線型なばね・粘性減衰をもつ1自由度の質点系が、地震動変位 $z(t)$ をうけた場合の運動方程式は、周知のごとく次式で表わされる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{z}(t) \quad (1)$$

ここに、 m は質点の質量、 c は粘性減衰係数、 k はばね係数、 y は質点と基礎との相対変位($\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ 、 $\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$)、 $\ddot{z}(t)$ は地震動の加速度、 t は時刻である。

式(1)の解 y (時刻 t における相対変位)は、つぎのDuhamel積分で与えられる。

$$y = -\frac{1}{p\sqrt{1-h^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-ph(t-\tau)} \sin p\sqrt{1-h^2}(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

ここに、 $p = \sqrt{k/m}$ (非減衰固有円振動数; 固有周期 $T = 2\pi/p$)、 $h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ (減衰定数)、 τ は時刻に関する積分変数である。

Housner の定義に従うと、変位スペクトル S_D 、速度スペクトル S_V 、絶対加速度スペクトル S_A は

$$S_D = y_{\max} = \frac{1}{\sin p \sqrt{1-h^2}} \left[\int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-ph(t-\tau)} d\tau \right]_{\max} \quad (3)$$

$$S_V = \left(\frac{2\pi}{T} \right) S_D$$

$$S_A = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 S_D$$

で表わされ、それぞれ変位、速度および加速度の単位を有している。スペクトルを無次元的に表示するものとして、次式で定義される加速度応答倍率 β

(加速度比、動的係数、復元力比などともいわれる)のスペクトルがある。

$$\beta = \frac{S_A}{\ddot{z}_{\max}} = \frac{k S_D}{m \ddot{z}_{\max}} \quad (4)$$

この β -スペクトルには、地震加速度の大きさが直接的には影響しないため、多数のスペクトル間の平均値がとれるという利点がある。以下では、地震および地盤の各種の条件によって、 β -スペクトルが、平均的にどのように変化するかを検討する。

2. 解析に用いた地震記録

解析の対象としたのは 44 成分の地震記録であり、最近わが国で起こった比較的大きい地震を対象とし、地盤上に設置された SMAO 型または DC 型の強震計による加速度記録である。数多くある強震記録の中から、この 44 成分を選出した基準としては、マグニチュードが 5 程度以上、最大加速度が 20 gal 以上、さらに各種の分類を行った場合に、グループ間の資料数に大きな差がないことなどを配慮した。また流動化現象や大きい地変が観察された地点での記録は除外している。

3. 影響因子による分類と平均スペクトル

表 1 は 44 成分の記録に関する、分類の種類を示している。地震応答スペクトルに及ぼす影響因子として、ここではマグニチュード、最大加速度、震央距離および地盤条件の 4 種を考え、これらについて 3~5 グループに分類した。ここで、地盤条件の分類別けは次の目安によっている。

GR 1 : 岩盤または岩盤までの表層の厚さが 3 m 程度以下の場合

TABLE 1 CLASSIFICATION OF 44 RECORDS

CLASSIFICATION	DEFINITION	NUMBER OF RECORDS	AVERAGE VALUES			FIGURE NUMBER	
			\ddot{z}_{\max} (gals)	M	Δ (Km)		
TOTAL		44	116.8	6.3	8.4	1	
MAGNITUDE (M)	MAG1	M=4.8~5.5	13	111.5	5.1	4.0	3
	MAG2	5.5~6.5	12	72.6	6.1	3.7	
	MAG3	6.5~7.5	9	178.3	6.9	10.7	
	MAG4	7.5~7.9	10	121.3	7.7	17.6	
ACCELERATION (\ddot{z}_{\max})	ACC1	$\ddot{z}_{\max}=20\sim 50$ gals	10	38.4	6.2	8.6	4
	ACC2	50~75	10	60.1	6.2	6.4	
	ACC3	75~120	9	92.6	6.3	9.1	
	ACC4	120~200	9	163.2	6.5	12.4	
	ACC5	200~438	6	308.6	6.3	4.2	
EPICENTRAL DISTANCE (Δ)	DIS1	$\Delta=5\sim 20$ Km	15	156.6	5.6	11.1	5
	DIS2	20~120	16	106.4	6.4	6.7	
	DIS3	120~322	13	83.9	7.0	18.9	
GROUND CONDITION	GR 1	ROCK	8	59.7	5.7	6.1	6
	GR 2	DILLUVIUM	12	104.9	6.0	8.8	
	GR 3	ALLUVIUM 1 (STIFF)	10	94.3	6.6	5.9	
	GR 4	ALLUVIUM 2 (SOFT)	14	175.7	6.7	8.9	
RANDOM	RAN1		14	103.0	6.3	9.3	7
	RAN2		15	108.5	6.2	8.7	
	RAN3		15	137.8	6.4	7.3	

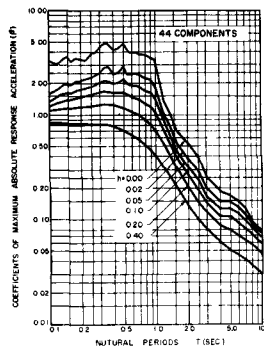


FIG 1 AVERAGE SPECTRA(1970)

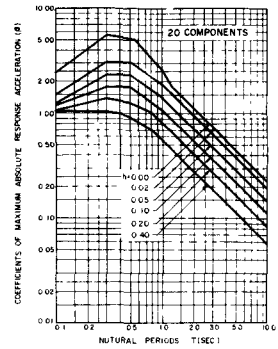


FIG 2 AVERAGE SPECTRA(1964)

GR 2 : 洪積層

GR 3 : 沖積層でGR 4 より良好な地盤。

GR 4 : 厚い沖積層で、しかも表層10 m以上にわたってN値が10程度以下である比較的軟弱な地盤。

4.4成分全体の平均スペクトルを図1に示している。また図2は高田らが提案した平均スペクトル(1964)である。次に表1の各グループについて減衰定数 $h=0.05$ の場合の平均応答スペクトルを図3~6に示す。以上の他、4.4という成分数がこのような細分類ごとの平均をとる上に適当であるかの判断資料とするため、4.4成分を無作為に3グループに分類し、それぞれの平均をとって見たのが図7である。この図から、3者がほぼ良好な一致を示しているため、4.4成分を用いての検討が有意義であるといえよう。

4. 全体の平均スペクトル

図2および3の比較から、今回の4.4成分全体の平均スペクトル(1970)は2.0成分の平均スペクトル(1964)に非常によく近似しているが、全体的にレベルがやや低下していることが判る。レベル低下の原因としては、今回の平均では、資料数が前回の2倍以上と多いこと、各種条件の地震記録がほぼ均等に含まれていること、大加速度の記録が多くなったこと等が考えられる。なお図8は資料のバラツキを示した一例であり、この種の平均には、かなりのバラツキが伴うものであることを示している。

5. 地震応答スペクトルに及ぼす各種因子の影響

まずマグニチュードの影響は図3から、マグニチュードが大きい地震では、 β 値が大きくなる傾向がうかがわれる。この傾向は長周期に対してははっきりと現われる。加速度の影響を示す図4からは、

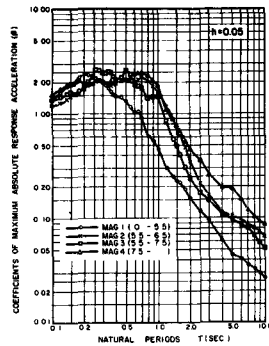


FIG 3 INFLUENCE OF MAGNITUDE

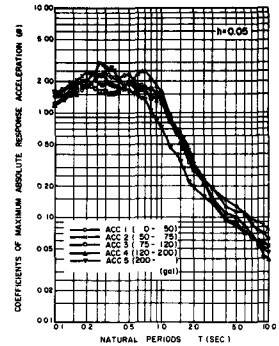


FIG 4 INFLUENCE OF ACCELERATION

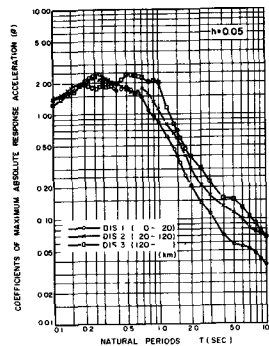


FIG 5 INFLUENCE OF EPICENTRAL DISTANCE

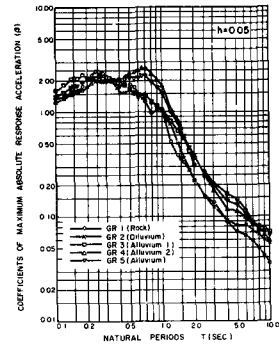


FIG 6 INFLUENCE OF GROUND CONDITION

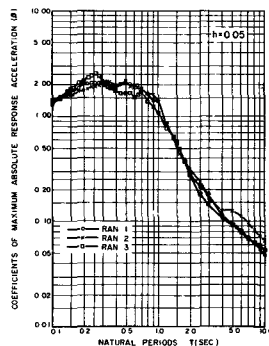


FIG 7 RANDOM SELECTION

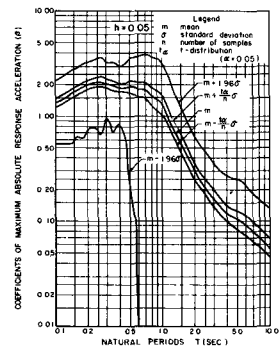


FIG 8 DEVIATION OF AVERAGE SPECTRA

特に明確な傾向は見出しにくい、周期1秒前後において、 200 gal 以上の大加速度に対する β 値が他と比較してやや低下していることが注目される。震央距離の影響を示す図5からは、0.5秒程度以上の長周期に対して、震央距離が大きいほど、 β 値が大きくなっている。次に地盤条件の影響を示す図6から0.5秒程度以上の長周期に対しては軟弱な地盤ほど β 値が大きくなる傾向がみられる。

6. 地盤条件別標準スペクトル

(1970)の提案

地震応答スペクトルに及ぼす影響因子の中、設計上不明な要素の多い地震の性質とは無関係である地盤条件が、構造物の耐震設計を考える上では最も重要な意義のあるものと判断される。しかも構造物の架設地点が定められれば、地盤条件は他の因子に比べ容易に工学的に判定されうるものである。このよ

うな背景を考慮して、地盤条件別の標準スペクトルを示したのが、図9～12である。これらの図は、

図6およびこれに類するスペクトルを基本にして、細かい凸凹は平滑化し、4グループをほぼ等間隔の差を設け、さらに長周期に対しては、 β 値が両対数紙上で $4/5$ の直線で低下する（速度スペクトル一定）という仮説のもとに、作成したものである。

7. 結 語

44成分の地震記録を解析し、地震応答スペクトル（加速度応答倍率 β ）に与える各種因子の影響を検討して、比較的長周期の構造物に対して、下記の傾向があることが判明した。

- 1) マグニチュードの大きい地震に対しては、 β が大きい。
- 2) 200 gal を越すような大加速度では、 β は低下する。
- 3) 震央距離が大きいほど、 β は大きい。
- 4) 硬い地盤ほど β が小さく、軟かい地盤ほど β が大きい。

これらの性質を明らかにするとともに、実用の便を考慮した、各種地盤条件別の標準スペクトル(1970)を提案した。しかしながら、今回の解析では、各因子が複合して、相互に作用し合っていることが考えられる。今後さらに強震時の資料が増大するのを待って、他の条件は出来る限り合致させた上で、ある特定の因子の影響を浮き彫りにしていく事が必要となると考えられる。

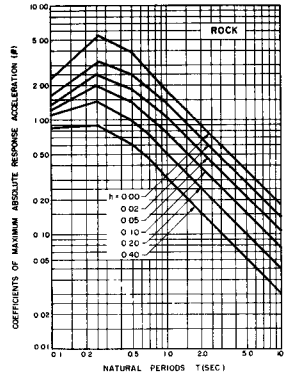


FIG 9 AVERAGE SPECTRA FOR ROCK

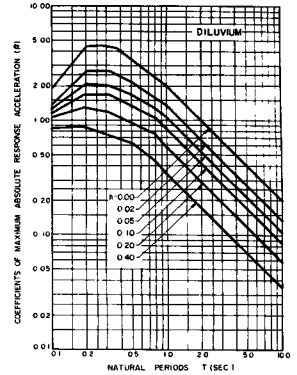


FIG 10 AVERAGE SPECTRA FOR DILLUVIUM

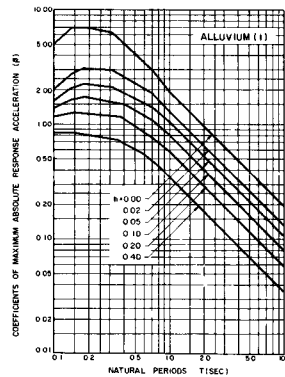


FIG 11 AVERAGE SPECTRA FOR STIFF ALLUVIUM

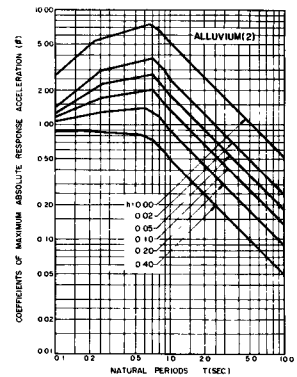


FIG 12 AVERAGE SPECTRA FOR SOFT ALLUVIUM