

1. まえがき

耐震設計においては、地震動の諸特性を正確に把握し、それらが構造物の応答に与える影響を解明することが重要な課題である。地震動特性は、強さ特性、スペクトル特性、および時間特性に大別されるが、それらは、地震のマグニチュード、震央距離、地盤条件などの影響を受け、強い不規則性を示す。地震動の個々の特性については、これまで多くの研究がなされ有益な成果が得られている。<sup>1)</sup>

本論の目的は、地震動記録から得られる諸特性の相互の関連性より、地震動の一般的特性を把握すること、および、それらが応答スペクトルに与える影響を検討することにある。とくに、地震動のスペクトル特性と継続時間が応答スペクトルのばらつきに与える影響を解明するため、相関分析と回帰分析を行った。

2. 地震動特性パラメーターの解析

2-1 パラメーターの説明 地震動特性を、強さ特性、スペクトル特性、継続時間に分類し説明する。

a. 強さパラメーター：地震動の加速度、速度、変位それぞれ絶対最大値、自乗和平方根、自乗和平均平方根を考え、それらを、 $A_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $D_{max}$ ,  $IA$ ,  $IV$ ,  $ID$ ,  $IA_{rms}$ ,  $IV_{rms}$ ,  $ID_{rms}$  で表わす。また、Housnerが定義した減衰スペクトル強度を  $SI_{0.2}$  で表わした。 $SI_{0.2}$  は減衰定数0.2の速度応答スペクトルの下側で周期0.1~2.5 secの間に含まれる部分の面積であり、構造物の応答を考慮した強さパラメーターと考えられる。 $SI_{0.2}$  は地震動の強さの指標として、これまで多くの研究者により用いられてきた。

b. スペクトル定数：地震動のパワースペクトル  $G(f)$  の最大値に対する振動数  $f_{QP}$ 、パワースペクトルの図心  $f_{Q1}$  と回転半径  $f_{Q2}$ 、および、パワースペクトルの帯域の広がり具合をよび形状係数  $q$  を用いた。本論では、解析の都合上、 $f_{QP}$ ,  $f_{Q1}$ ,  $f_{Q2}$  の逆数をとり、卓越周期として、 $T_{QP}$ ,  $T_{Q1}$ ,  $T_{Q2}$  で表わす。形状係数  $q$  は次式で与えられる。

$$q = \left\{ 1 - \left[ \int_0^\infty f G(f) df \right]^2 / \left\{ \int_0^\infty G(f) df \cdot \int_0^\infty f^2 G(f) df \right\} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

c. 継続時間：種々の定義があるが、本論では、地震動加速度波形の自乗の累積積分値が5%に達する時刻と95%に達する時刻との差を  $T_d$  とし、加速度波形がある設定レベル（ここでは最大加速度の1/8または1/4）を最初にこえる時間と最後にこえる時間との差で定義した継続時間を  $T_d(1/8)$ ,  $T_d(1/4)$  とした。

2-2 使用した地震動記録 本論では、多くの地震動の一般的特性を解明するという目的のため、地盤条件、マグニチュード、震央距離などによる地震動の分類は行わず、異なる条件下での記録を一括して取り扱う。使用した記録は、文献6~8に収録されている地震動のうち、最大加速度30 gal以上の127成分を選んだ。文献7と8の記録については、文献3による誤差補正を行った。これらのデータより得られた特性パラメーターの平均値(Mean)、変動係数(CV)、および範囲(Range)をTable 1に示す。

Table 1 Fundamental Statistics

	Mean	CV	Range
$A_{max}$	116.20	0.64	32.40 - 424.1
$V_{max}$	10.42	0.91	1.65 - 39.88
$D_{max}$	4.03	1.11	0.21 - 21.35
$IA$	108.20	0.82	24.00 - 453.8
$IV$	14.30	1.18	0.95 - 106.0
$ID$	8.48	1.20	0.14 - 53.37
$IA_{rms}$	25.57	0.68	5.09 - 108.7
$IV_{rms}$	2.91	0.95	0.34 - 12.60
$ID_{rms}$	1.54	1.04	0.09 - 7.69
$T_{QP}$	0.68	0.71	0.11 - 2.93
$T_{Q1}$	0.34	0.51	0.12 - 0.89
$T_{Q2}$	0.28	0.43	0.11 - 0.64
$q$	0.51	0.24	0.24 - 0.75
$T_d$	19.00	0.77	1.10 - 71.3
$T_d(1/8)$	27.70	0.75	1.40 - 79.9
$T_d(1/4)$	17.80	0.91	0.70 - 79.7
$SI_{0.2}$	32.90	0.90	3.60 - 132.7

2-3 特性パラメーターの分析 特性パラメーター相互の関連性を検討するため、相関分析を行った。Table 2に各パラメーター相互の相関係数を示す。Table 2より次のことがわかる。

- 1) 強さパラメーターのうち、速度群と変位群の相関は高い。 2) 絶対最大加速度  $V_{max}$  と減衰スペクトル

Table 2 Correlation Coefficient of Characteristic Parameters

	Intensity Parameters									Spectral Parameters				Durations			Res.	
	A <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	D <sub>max</sub>	IA	IV	ID	IA <sub>rms</sub>	IV <sub>rms</sub>	ID <sub>rms</sub>	T <sub>ap</sub>	T <sub>q1</sub>	T <sub>q2</sub>	q	T <sub>d</sub>	T <sub>d</sub> (%)	T <sub>d</sub> (1/4)		SI <sub>0.2</sub>
A <sub>max</sub>	1.00																	
V <sub>max</sub>	0.74	1.00																
D <sub>max</sub>	0.55	0.90	1.00															
IA	0.82	0.76	0.65	1.00														
IV	0.57	0.89	0.92	0.75	1.00													
ID	0.48	0.83	0.95	0.65	0.92	1.00												
IA <sub>rms</sub>	0.93	0.67	0.52	0.78	0.49	0.43	1.00											
IV <sub>rms</sub>	0.68	0.94	0.93	0.71	0.90	0.85	0.68	1.00										
ID <sub>rms</sub>	0.54	0.84	0.95	0.57	0.81	0.90	0.56	0.90	1.00									
T <sub>ap</sub>	0.05	0.48	0.58	0.21	0.60	0.55	0.03	0.58	0.51	1.00								
T <sub>q1</sub>	0.08	0.53	0.56	0.25	0.63	0.57	0.04	0.57	0.49	0.70	1.00							
T <sub>q2</sub>	0.05	0.48	0.50	0.22	0.57	0.51	0.03	0.52	0.44	0.63	0.99	1.00						
q	0.12	0.56	0.57	0.21	0.58	0.55	0.07	0.59	0.54	0.78	0.74	0.68	1.00					
T <sub>d</sub>	0.13	0.33	0.40	0.56	0.57	0.52	0.01	0.28	0.25	0.38	0.47	0.45	0.32	1.00				
T <sub>d</sub> (%)	0.10	0.31	0.36	0.53	0.53	0.48	0.03	0.27	0.23	0.38	0.49	0.48	0.35	0.94	1.00			
T <sub>d</sub> (1/4)	0.09	0.27	0.35	0.54	0.52	0.47	0.02	0.25	0.22	0.31	0.43	0.41	0.24	0.95	0.91	1.00		
SI <sub>0.2</sub>	0.74	0.97	0.85	0.77	0.90	0.79	0.67	0.94	0.79	0.51	0.58	0.54	0.58	0.36	0.34	0.29	1.00	

強度との相関は0.97であり、両者は密接に関連している。 3) 卓越周期と形状係数の間には0.7前後の正の相関がある。 4) 異なる定義から得られた継続時間の間には0.9以上の高い相関がある。

つきに、特性パラメーターを分類するため、主成分分析を行った。主成分分析とは、多くの特性値のもつ情報を少数個の総合特性値(主成分)に要約する手法である。 Fig. 1に、第1主成分Z1と第2主成分Z2に対する特性パラメーターの相関係数を図示した。図には半径1の円も描いてあるが、この円周に近い位置にある特性値は、Z1とZ2だけで、その変動のもつ情報のほとんどすべてが説明できるのである。この図より、地震動特性は強さ特性、スペクトル特性、継続時間に分類できる。

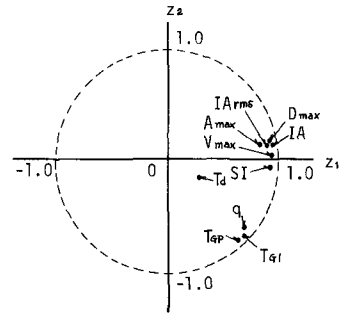


Fig. 1 Factor Loadings

### 3. 加速度応答スペクトルの解析

3-1 相関分析 地震動特性パラメーターが応答スペクトルに与える影響を検討する。応答スペクトルとしては加速度応答スペクトルを用い、減衰定数  $h=0.02, 0.10$ , 固有周期  $T_0=0.1 \sim 10.0$  sec について計算した。加速度応答スペクトル  $SA$  は、一般に、強さパラメーター  $\alpha$  で規準化して、 $S_\alpha = SA/\alpha$  として用いられることが多い<sup>2)</sup>。規準化パラメーター  $\alpha$  としては、地震動の加速度、速度、変位が考えられる。加速度、速度、変位は、それぞれ、高、中、低振動数領域で応答スペクトルと高い相関を示す<sup>4)</sup>。

本論では、強さパラメーター以外の地震動特性が応答スペクトルに与える影響を明らかにするため、以下の解析を行った。 Fig. 2に、加速度応答スペクトルの変動係数を示す。応答スペクトルのばらつきは中周期以上の領域で大きくなる。強さ特性以外の地震動特性としては、スペクトル定数として  $T_{ap}, T_{q1}, q$  を、継続時間として  $T_d$  を用いた。

$T_{q2}, T_d(\%), T_d(1/4)$  については、他のパラメーターとの相関が高いので除いた。 Fig. 3に、減衰定数  $h=0.02$  の場合について、 $SA$  と  $T_d, T_{ap}, T_{q1}, q$  との相関係数を示す。横軸には固有周期  $T_0$  を、縦軸には相関係数  $r$  を

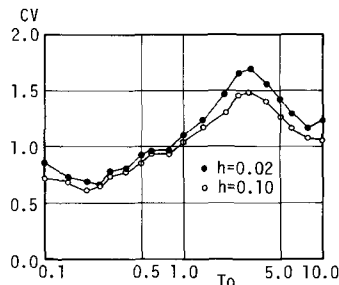


Fig. 2 Coefficient of Variation of SA

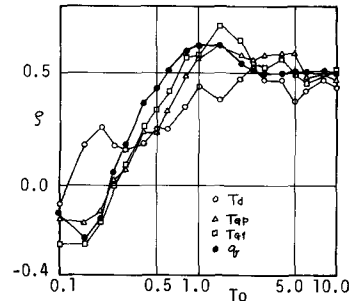


Fig. 3 Correlation Coefficient of SA (h=0.02)

った。各パラメータは、固有周期 $T_0=1.0$  sec 以上で、0.5 前後の相関を有する。この傾向をより顕著にとらえるため、応答スペクトルを強さパラメータで規準化した。規準化パラメータとしては、従来より用いられている最大加速度を採用した。加速度応答倍率の変動係数を Fig. 4 に示す。Fig. 5 には、加速度応答倍率  $S_A/A_{max}$  と  $T_d, T_{qp}, T_{gl}, \rho$  との相関係数を示す。この図より次のことがわかる。スペクトル定数と応答スペクトルとの相関は、短周期部で負であり、 $T_0=0.2 \sim 0.3$  sec で負から正にかわる。さらに、 $T_0=0.6 \sim 2.0$  sec で最大になり、それより長周期部では徐々に減少する。継続時間と応答スペクトルとの相関は、 $T_0=1.0$  sec 以上で 0.5 前後であり、 $S_A/A_{max}$  に何らかの影響を与えている。以上のことより、地震動のスペクトル定数は、応答スペクトルの中周期部に大きい影響を与えることがわかる。

3-2 重回帰分析 前節での傾向をさらに詳しく検討するため、応答スペクトルと地震動特性パラメータの重回帰分析を行った。地震動のスペクトル定数としては卓越周期  $T_{qp}$  のみを用いた。 $T_{gl}$  と  $\rho$  は、応答スペクトルに対し  $T_{qp}$  と同様な影響を与えることより、ここでの解析では考慮しなかった。重回帰モデルを設定するために、 $S_A/A_{max}$  と  $T_{qp}$ 、および  $T_d$  の散布図を描いた。

Fig. 6 に、 $S_A/A_{max}$  と  $T_0/T_{qp}$  の関係を両対数紙上にプロットして表わした。

横軸は、固有周期と卓越周期の比  $T_0/T_{qp}$  であり、縦軸は加速度応答倍率  $S_A/A_{max}$  である。Fig. 7 には、 $S_A/A_{max}$  と  $T_d/T_0$  の関係を両対数紙上に示した。これらの図より、ばらつきはかなり大きい。これらの図より、 $S_A/A_{max}$  と  $T_{qp}, T_d$  の間には、両対数紙上で直線的な関係があることがわかる。以上のことより、次のような重回帰モデルを設定した。

$$\hat{S}_A(T_0) = A_{max} \cdot a \left( T_0/T_{qp} \right)^b \times \left( T_d/T_0 \right)^c \quad (2)$$

両辺を  $A_{max}$  で除して、対数をとると

$$\log \left\{ \hat{S}_A(T_0)/A_{max} \right\} = \log a + b \log (T_0/T_{qp}) + c \log (T_d/T_0) \quad (3)$$

式(3)を用いて回帰分析を行った。Fig. 8 に、係数  $a$  の平均値を、Fig. 9 に、その変動係数を示した。

式(2)の係数  $a$  は、加速度応答倍率  $S_A/A_{max}$  から  $T_{qp}$  と  $T_d$  の影響を除去した基準化応答スペクトルと考えられる。Fig. 9 より、 $a$  の変動係数は中周期以上で大きくなるものの、Fig. 4 に比べてかなり小さく、 $T_{qp}$ 、および  $T_d$  を考慮することにより、応答スペクトルのばらつきが小さくなることわかる。

Fig. 10 には、式(2)の重回帰モデルの重相関係数を示す。これより、応答スペクトルの長周期部では重相関係数が小さくなることわかる。これは、地震動のパワースペクトルが長周期部で変動が大きく、応答のばら

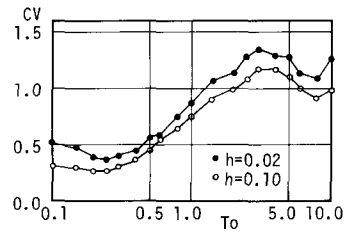


Fig. 4 Coefficient of Variation of  $S_A/A_{max}$

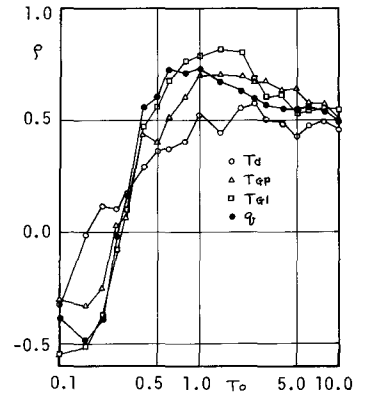


Fig. 5 Correlation Coefficient of  $S_A/A_{max}$  ( $h=0.02$ )

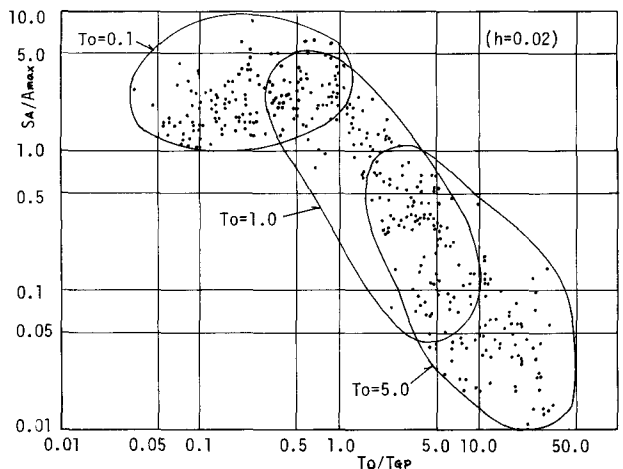


Fig. 6 Scatter Diagram of  $S_A/A_{max} - T_0/T_{qp}$  ( $h=0.02$ )

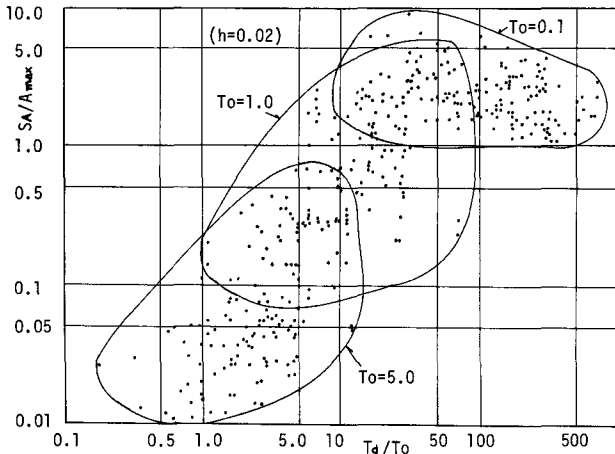


Fig.7 Scatter Diagram of  $S_a/A_{max}-T_d/To$  ( $h=0.02$ )

つきに影響しているためと思われる。つきに、 $T_{ap}$ 、および  $T_d$  が応答スペクトルに与える影響を検討するため、応答スペクトルに対する  $T_{ap}$  と  $T_d$  の偏相関係数を求めた。 $T_{ap}$  に関する偏相関係数は、式(2)の重回帰モデルにおいて、 $T_d$  の影響を除去した後の、 $S_a/A_{max}$  と  $T_{ap}$  の相関係数である。Fig.11 に結果を示す。この図は、Fig.5と同様の傾向を示し、卓越周期が応答スペクトルの中周期部で高い相関をもつこと、および、継続時間が応答に与える影響は、低減衰の場合の長周期部で、卓越周期と同程度になることがわかる。

#### 4. おまげ

以上、得られた結論を要約すると次のようになる。

- 1) 地震動の絶対最大速度は減衰スペクトル強度と密接に関連しており、地震動の強さパラメータとして有効である。
- 2) 地震動のスペクトル特性(卓越周期と形状係数)は応答スペクトルの中周期部に大きな影響を与える。
- 3) 継続時間の影響は応答スペクトルの中周期以上の領域に現れ、低減衰、長周期の構造物の応答に対しては、卓越周期と同程度の影響を与える。

#### 参考文献

1. 土木学会：構造物の安全性・信頼性，1976年10月，PP.108~114
2. 星谷，矢作，柴田，草野：平均応答スペクトル作成に関する一考察，土木学会論文報告集，No.212，1974年12月，PP.17~24
3. 後藤，鹿田，杉戸，今西：デジタルフィルターによるSMAG-B2加速度記録の補正について，土木学会論文報告集，No.277，1978年9月，PP.29~40
4. 鹿田，杉戸：地震応答スペクトルの不確定変動の解析，第14回地震工学研究発表会講演概要，1976年7月，PP.117~120
5. 片山，岩崎，佐伯：地震動加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，No.275，1978年7月，PP.29~40
6. Earth. Eng. Res. Lab.: Strong Motion Earth. Accel., C.I.T., 1971, 9.
7. 土田，倉田，須藤；港湾地域強震観測年報，港湾技研資料，
8. 建設省土木研究所資料；No.116，No.136

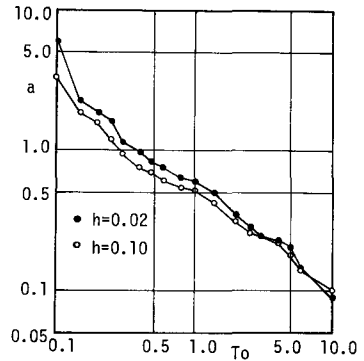


Fig.8 Mean of  $a$  in Eq.2

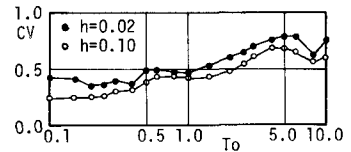


Fig.9 Coefficient of Variation of  $a$

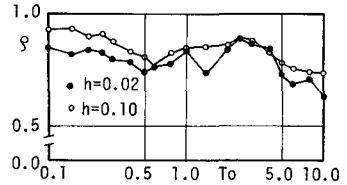


Fig.10 Multiple Correlation Coef. of Eq.2

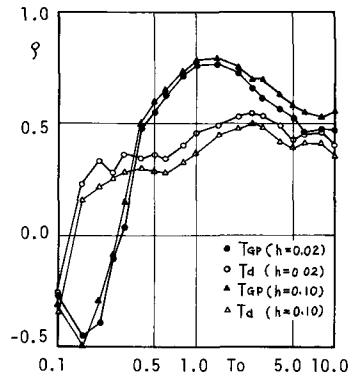


Fig.11 Partial Correlation Coef. of  $T_{ap}$  and  $T_d$