

擬似地震動の特性に関する研究

THE POSSIBILITY OF USING SIMULATED EARTHQUAKE MOTIONS IN SEISMIC ENGINEERING

片 山 恒 雄*

By Tsuneo Katayama

1. ま え が き

擬似地震動とは Simulated Earthquake Motion の意味であって、ある地点で測定された常時微動や実際の地震動から推定される地盤の性質を用いて、その地点に将来おこりそうな地震動を、一定の計算手順にそって求めたものを指す。

電子計算機の発達によって、複雑な数値計算が可能になった最近では、構造物に想定地震動を作用させて、その応答を調べることがさかんになってきた。この場合、構造物架設地点で記録された強震動を入力波形として用いるのが望ましいであろうが、このような記録の存在する地点はまだ数少ない。したがって、これまでの多くの重要構造物の耐震解析において、アメリカ合衆国西岸で得られた代表的な強震記録、El Centro (1940 年 5 月 19 日) や Taft (1952 年 7 月 21 日) などが入力波形として用いられてきた。しかしながら、地表面で観測される地震動の性質は、地盤の性質によって異なってくるものであるから、アメリカ合衆国西岸のように相当に硬い地盤上で得られた強震記録を、地盤の相異を無視して使用することには問題がある。

特定の想定地震動に対する構造物の応答から設計を検討する方法に対して、ランダム振動理論にもとづいて最大応答を統計的手法で定めようとする行き方もある。系が線型である場合には、入力 of 統計的性質から直接に応答の統計的性質を決めることができる。しかし、材料の塑性を考慮したり、系が非線型である場合には、そうはいかないのが普通である。このような時には、統計的な性質のわかっている 1 群の入力波形を用意し、このおのおのを系に作用させてその応答を独立に求め、これら 1 群の応答を統計的に研究して、その性質を定めるという手順が必要である。現在のところ、統計的性質が等しい

と見なしうる 1 群の地震動記録は存在せず、ここにも擬似地震動の必要性が生ずるのである。

本論文は、Housner ら¹⁾が提案した擬似地震動作成の方法に基づいて、地盤条件を表わすパラメータを広く変化させて得られた多くの擬似地震動の特性を常時微動および実地震動の性質と比較検討することにより、擬似地震動の実用性に関して基礎的な資料を提供しようとするものである。応答スペクトルを中心とした擬似地震動と実地震動の比較は、Housner ら¹⁾の論文でかなりくわしく論じられているので、本論文では、常時微動解析の際に用いられる簡単な周期一頻度曲線を中心に比較を行ない、ある種の地盤について、常時微動の観測結果を利用して擬似地震動を作成することの可能性を論じている。

2. 常時微動、地震動の性質および擬似地震動の作成方法

地震記録が観測地点の地盤の性質の影響を強く受けることはよく知られているが、地盤の振動的性質を推定する方法の 1 つに常時微動の測定がある。各種地盤上での常時微動の測定は、金井らを中心に日本各地で行なわれた。常時微動の解析結果と実際の振動の性質とを比較して、いくつかの一般的傾向が抽出されている¹⁾。

常時微動から得られた周期一頻度曲線が 1 つの顕著な山を示すような地盤上では、実地震動の周期一頻度曲線にもやはり山が現われ、その位置は、ある程度以上の規模の地震では一定とみなすことができる。そして、地震動の卓越周期は、常時微動から得られる地盤の固有周期とほぼ一致し、その値は通常 0.1 秒から 0.8 秒の間にある。

常時微動の周期一頻度曲線に 2 つ以上の山が現われる地盤では、地震動の周期一頻度曲線にも 2 つ以上の山ができる。これらの山の位置は、その 1 つまたは 2 つが大体一致していることもあるが、一般には地震ごとに異なる

* 正会員 Ph.D. 中央大学講師 理工学部土木工学科

り、常時微動測定から得られる山の位置との一致はあまりよくない。

常時微動については、その本性に関してもわかっていないことが多く、とくに Zero-Crossing 法による周期—頻度曲線の物理的な意味も必ずしも明らかではない。しかし解析方法が簡単であること、および相当数の実測結果から上述のような一般的傾向が抽出されていることなどを考慮すれば、その工学的価値は十分認めるべきであると考えられる。

スペクトル解析の方法を用いて地震動の性質を研究することが行なわれている。Bycroft²⁾ は、地震の加速度のスペクトル密度を 0~35 Hz の範囲で一定であると仮定した研究を行なった。しかし、実際の強震記録の1つずつについて、スペクトル密度関数 $G(\omega)$ を計算してみると、つぎのような性質が見出される^{3),4)}。

(1) ランダムな、しかも非常に凹凸のはげしい形を示す。

(2) これらの $G(\omega)$ をもとに、なめらかな曲線を引いてみると、周期が 0.2 秒から 1.0 秒の間で山を有する関数が得られる。

(3) (2) で得られたなめらかな関数 $G(\omega)$ は、振動数 ω の増大とともに急激に減少する。

上に述べたような性質から考えて、地表面における地震動の加速度 $\ddot{y}(t)$ のスペクトル密度 $G(\omega)$ を下式(1)で表現することは妥当であると思われる。

$$G(\omega) = \frac{a \left(1 + 4 \zeta_G^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + 4 \zeta_G^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \dots\dots\dots(1)$$

この式は多治見によって提唱された⁵⁾。ここで ω_0 はスペクトル密度関数のピーク位置に対応する円振動数、 ζ_G はピークの鋭さを示す数値、 a は定数である。

Housner および Jennings⁶⁾ は、地震加速度のスペクトル密度関数を式(1)で仮定し、図-1 に示される1自由度線型系が基部に外乱を受けるときの質量の加速度の

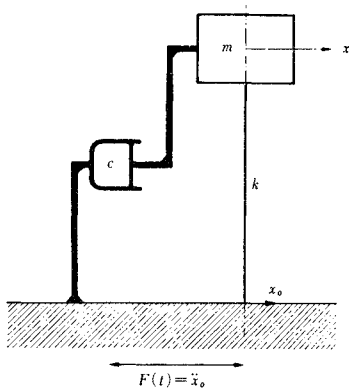


Fig. 1 Simple Spring-Mass System.

周波数応答関数と、ホワイト・ノイズ $N(t)$ を受けたときにスペクトル密度関数が式(1)となるような線型系の周波数応答関数との類似性から、擬似地震動の加速度 $\ddot{y}(t)$ を、微分方程式

$$\ddot{z} + 2 \zeta_G \omega_0 \dot{z} + \omega_0^2 z = -\sqrt{a} N(t) \dots\dots\dots(2)$$

を数値積分し

$$\dot{y}(t) = \dot{z}(t) + \sqrt{a} N(t) \dots\dots\dots(3)$$

で計算することを提案した。

3. 擬似地震動の作成

前節で説明した方法は、単純に地盤を1質点の振動系でおきかえたことによって得られたものではない。ホワイト・ノイズを入力としたとき、応答のスペクトル密度関数が式(1)となるような系が、図-1の1質点系の加速度応答を考えた場合と数学的な類似を示すことを利用したにすぎないのである。すなわち、前節のような計算によって $\dot{y}(t)$ を求めると、そのスペクトル密度関数が式(1)で表わされるのであるが、このことは、地盤が図-1のような1自由度系の物理的モデルで表現できることを意味しているわけではない。しかしながら、地震動に明らかな1つの卓越周期が認められるような地盤、常時微動の周期—頻度曲線が1つの顕著な山を示すような地盤においては、これに対応する振動数をもって式(2)の ω_0 と考えるのは妥当と思われる。そこで、本論文においては、 ω_0 に対応する周期 $T_0 (= 2\pi/\omega_0)$ を地盤の卓越周期、また ζ_G を地盤の減衰係数とあえて呼ぶことにする。

式(2)からわかるように、擬似地震動の作成に際しては、3個のパラメータ

- (1) 地盤の卓越周期 $T_0 (= 2\pi/\omega_0)$
- (2) 地盤の減衰係数 ζ_G
- (3) 定数 a

および

- (4) スペクトル密度が1のホワイト・ノイズ $N(t)$ が必要である。

擬似地震動は、CDC 3200 電子計算機を用いて、式(2)を数値積分して作成した。種々の地盤条件を考えるため、2つのパラメータ T_0 および ζ_G は広い範囲にわたって変化させた。定数 a は、地震動のスペクトル密度曲線が実際にわかっていないと推定できない値である。したがって、すべての擬似地震動は最大加速度が 0.1g となるようにした。すなわち、勝手な値 a を用いて $\dot{y}(t)$ を計算し、最大値が 0.1g となるように、一律に縮めるか引き伸ばすかした。微分方程式(2)の線型性によって、この操作が可能である。

スペクトル密度1のホワイト・ノイズを作り出すため

には、まず電子計算機で一定の計算順序にしたがい、実用上は区間 (0, 1) で一様とみなされる乱数を発生させた。このようにして求めた2つの独立の乱数 U_1, U_2 があるとき、

表一 擬似地震動の一覧

名前	T_0 (sec)	ζ_G (%)	最大速度 (cm/sec)	最大変位 (cm)
Aa 1	0.2	15	15.2	32.8
Aa 2			12.2	26.3
Aa 3			10.1	15.5
Aa 4			14.8	36.7
Aa 5			13.0	11.8
Ab 1	0.2	20	16.4	35.2
Ab 2			13.9	30.0
Ab 3			10.9	17.4
Ab 4			15.6	38.7
Ab 5			14.7	13.1
Ac 1	0.2	30	18.6	40.0
Ac 2			16.2	34.8
Ac 3			12.7	20.9
Ac 4			17.3	42.6
Ac 5			17.3	15.4
Ad 1	0.2	40	21.0	44.8
Ad 2			16.5	35.6
Ad 3			14.0	23.4
Ad 4			17.6	43.2
Ad 5			18.2	16.1
Ba 6	0.4	0	7.1	6.8
Ba 7			8.6	4.6
Ba 8			6.4	3.1
Ba 9			7.4	8.2
Ba 10			9.0	5.6
Bb 6	0.4	8.5	14.0	27.1
Bb 7			13.1	11.5
Bb 8			12.4	11.4
Bb 9			11.5	23.4
Bb 10			19.0	24.5
Bc 6	0.4	17.1	14.9	27.5
Bc 7			18.5	17.2
Bc 8			17.2	17.0
Bc 9			13.9	33.8
Bc 10			25.9	33.9
Bd 6	0.4	25.6	17.2	30.7
Bd 7			22.5	21.5
Bd 8			19.1	19.5
Bd 9			15.9	42.2
Bd 10			25.8	34.2
Be 6	0.4	51.2	19.8	34.0
Be 7			26.9	26.5
Be 8			21.2	22.5
Be 9			20.4	56.9
Be 10			25.9	35.0
Ca 11	0.6	20	26.2	40.4
Ca 12			19.4	25.1
Ca 13			27.4	37.7
Ca 14			23.2	20.0
Ca 15			26.3	61.7
Cb 11	0.6	30	28.5	44.4
Cb 12			24.3	33.9
Cb 13			30.5	44.7
Cb 14			25.3	20.8
Cb 15			28.1	65.7
Cc 11	0.6	50	28.7	46.3
Cc 12			25.8	39.6
Cc 13			32.3	50.1
Cc 14			28.1	22.1
Cc 15			31.0	72.7
Cd 11	0.6	60	27.9	45.5
Cd 12			27.4	41.1
Cd 13			31.8	50.1
Cd 14			28.1	22.4
Cd 15			31.7	74.6
Da 1	0.8	70	28.9	64.6
Da 2			28.9	65.6
Da 3			27.7	47.2
Da 4			34.4	83.4
Da 5			33.3	31.8
Ea 11	0.3	10	8.3	14.7

$$\begin{aligned} X_1 &= (-2 \ln U_1)^{-1/2} \cos 2\pi U_2 \\ X_2 &= (-2 \ln U_1)^{-1/2} \sin 2\pi U_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

が、平均 0、分散 1 の互いに独立な正規乱数 X_1, X_2 をあたえる⁷⁾。この正規乱数を時間間隔 ΔT ごとにあらべて、直線をつなぎ合わせれば、近似的なホワイト・ノイズができる。しかし、このホワイト・ノイズは $(\omega \cdot \Delta T)$ の小さな値に対して、スペクトル密度

$$G(\omega) = \frac{\sigma_N^2 \cdot \Delta T}{\pi} \left\{ 1 - \frac{(\omega \cdot \Delta T)^2}{6} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

を有しているから、スペクトル密度が 1 のホワイト・ノイズを得るためには、さきに得られた正規乱数のおおのに $\sqrt{\pi/\Delta T}$ を乗じて、その分散を $\sigma_N^2 = \pi/\Delta T$ にしてやればよい。

時間間隔 ΔT は 0.025 秒とした。式 (2) の数値積分にも同じ時間間隔 0.025 秒を用いた。これは、やや長すぎるかとも思われたが、ここでは、積分の結果得られた擬似地震動が実際の地震動にどれくらい似ているかがわかればよいのであるから、積分誤差は通常の問題におけるほど重要ではない。地震動の継続時間は 25 秒としたので、擬似地震動は 1000 本の直線からなる加速度記録である。また加速度記録は、Berg らの方法⁹⁾によって、1 回積分して得られた速度記録の自乗平均が最小となるように調整されている。このような地震動 1 つを発生させるのに、CDC 3200 で約 40 秒を要した。

総数 71 の擬似地震動を作成したが、それらは、パラメータ T_0 と ζ_G 、最大速度と最大変位の値とともに表一 1 に示されている。先に述べた理由によって、すべての擬似地震動の最大加速度は 0.1g である。また、地震動の名前のうち、はじめの大文字は T_0 の値の相異を示し

- A..... $T_0=0.2$ 秒 D..... $T_0=0.8$ 秒
- B..... $T_0=0.4$ 秒 E..... $T_0=0.3$ 秒
- C..... $T_0=0.6$ 秒

である。また小文字は減衰係数 ζ_G が異なっていることを示し、数字は積分に際して用いたホワイト・ノイズ $N(t)$ の違いを示す。たとえば、擬似地震動 Bb6 と Bd6 は、ともに $T_0=0.4$ 秒と同一のホワイト・ノイズ列 No. 6 を用いて発生させたものであるが、 ζ_G の値は両者で異なり、Bb6 に対しては 8.5%、Bd6 に対しては 25.6% である。

4. 擬似地震動の性質

Housner らは、Rosenblueth⁹⁾ の理論を拡張して、強震動のスペクトル密度と速度応答スペクトルとの関係を仮定し、アメリカ合衆国西岸の硬い地盤上で記録された 8 成分の強震動にもとづいて作られた Housner の標準速度応答スペクトルから、田治見の式 (1) の定数 a, ω_0 、

ζ_G を定めた。これらの定数を用いて、継続時間 30 秒の擬似地震動 8 個を作成し、それらの性質を、速度応答スペクトルを中心にして検討した。その結果、個々の擬似地震動の速度応答スペクトルが、定性的に実際の強震動の速度応答スペクトルによく似ていること、および擬似地震動 8 個の平均速度応答スペクトルは、継続時間の相異を考慮すると、Housner の標準速度応答スペクトルと定量的にもよい一致を示すことが確かめられた。

日本においては、各種地盤上の常時微動測定が数多く行なわれている。たとえば、金井らは、日本各地の強震計設置場所における常時微動を測定し、その結果を発表している¹⁰⁾。したがって、常時微動の測定結果を利用して擬似地震動の作成ができれば、きわめて便利であると思われる。このような見地から、周期-頻度曲線を中心に、擬似地震動の性質を調べてみた。

(1) 周期-頻度曲線

擬似地震動の加速度記録が零線を切る相隣る点の間の時間を 2 倍し、これを 1 つの周期と考える。そして、0.048 秒から 2.7977 秒の間を 20 の区間にわけ、各区間に含まれる波の数を求める。各区間の間隔は対数軸上で一定となるようにし、 i 番目の区間の上、下の限界を

$$\left. \begin{aligned} T_{i,U} &= 0.2 \times 1.225^{(i-1)} \\ T_{i,L} &= 0.2 \times 1.225^{(i-8)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$i=1, 2, 3, \dots, 20$

で定義し、この区間に含まれる周期を、その中間値

$$\left. \begin{aligned} T_i &= 0.2225 \times 1.225^{(i-8)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$i=1, 2, 3, \dots, 20$

で代表させた。

図-2 は、 $T_0=0.4$ 秒、 $\zeta_G=25.6\%$ を使い、異なる 5 つのホワイト・ノイズ列によって発生させた擬似地震動 Bd 6~Bd 10 およびこれら 5 つの地震動の和の周

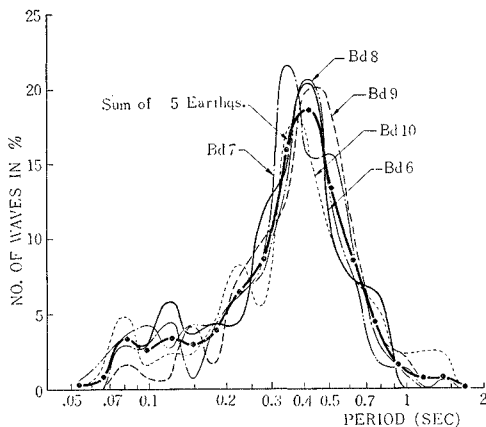


Fig. 2 Period Distribution Curves of the Simulated Motions with $T_0=0.4$ sec and $\zeta_G=25.6\%$

期-頻度曲線を示したものである。比較を容易にするため、頻度は全波数に対する百分率で表わしてある。5 つの擬似地震動のどれもが、周期 0.35 秒から 0.45 秒の間あたりで顕著な山を示し、その高さもほぼ 20% で一致している。また、それらの傾向は 1 つの地震動の和の曲線によく表わされている。このことは、顕著な山が 1 つだけあるような場合について、周期-頻度曲線が 2 つのパラメータ T_0 と ζ_G の影響を定量的に示す基準となりうることを表わしている。

図-3, 4, 5 には、 T_0 の値が 0.2 秒, 0.4 秒, 0.6 秒の擬似地震動の周期-頻度曲線を示した。それぞれの曲

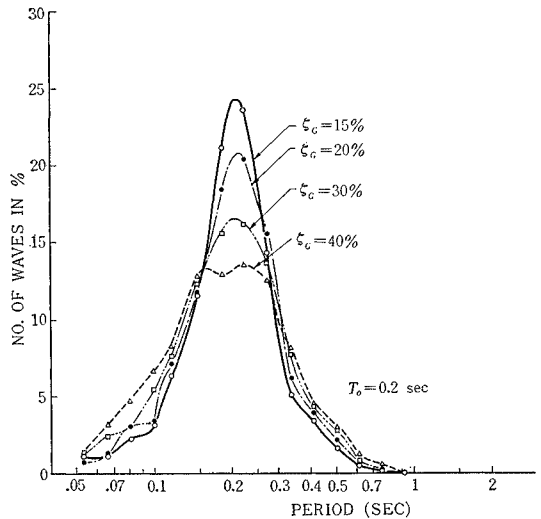


Fig. 3 Period Distribution Curves of A-Series Earthquakes.

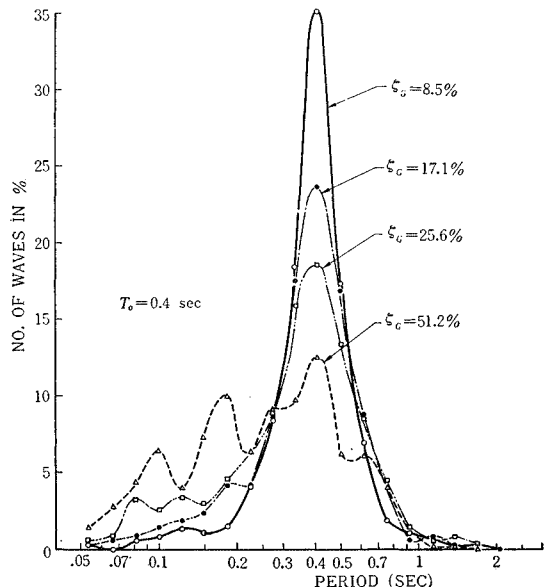


Fig. 4 Period Distribution Curves of B-Series Earthquakes.

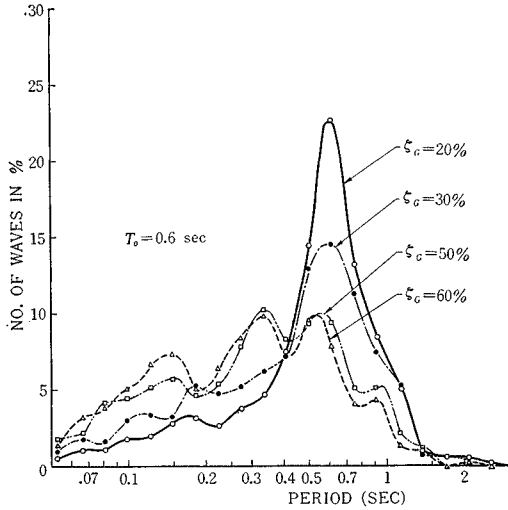


Fig. 5 Period Distribution Curves of C-Series Earthquakes.

表-2 周期-頻度曲線の山の高さと ζ_G の関係

周期-頻度曲線の T ₀ 付近における山の高さ	パラメータ ζ _G (%)		
	T ₀ =0.2 sec	T ₀ =0.4 sec	T ₀ =0.6 sec
30 (%)	9	11.5	16
25 (%)	14	15.5	18.5
20 (%)	22	22	22
10~15 (%)	30~40		

線は、5つの擬似地震動の和について求められたものである。パラメータ T₀ と ζ_G を変えることによって、種々の周期分布特性を有する擬似地震動を作成できることがわかる。

いま、ある地点で測定された常時微動または実際の地震動の周期分布特性に似た性質を有する擬似地震動を作成することを考えよう。このためには、周期-頻度曲線の形状から、パラメータ T₀ と ζ_G を推定しなければならない。周期-頻度曲線が T₀ の付近で顕著な山を示すような場合について、山の高さとパラメータ ζ_G との関係を図-3, 4, 5 から求めて表-2 に示した。たとえば、T₀=0.2 秒、ζ_G=9% を用いて作った擬似地震動の周期-頻度曲線は、0.2 秒の付近において約 30% の高さの山を示すことがわかる。さらに図-3~5 から、ζ_G の値が 50% を越えると、周期-頻度曲線には2つ以上の山ができ、それぞれの山の高さが 10% 前後となることも推測される。

つぎに周期-頻度曲線に2つ以上の同じ程度の山に生じる場合を考察しよう。図-6 は、パラメータ ζ_G が 50% 以上である 3 組の擬似地震動の周期-頻度曲線を示す。また、図-7 は、カリフォルニア州の3つの異なった場所で測定した常時微動の周期-頻度曲線を示す¹¹⁾。これら2つの図に示された曲線群は、定性的にきわめて

よく似た傾向を示しているが、図-7 の右端の部分を図-6 と比較してみると、図-7 の常時微動の性質は、T₀=0.4 秒、ζ_G=51.2% の擬似地震動の性質に最も近いことがわかる。前に述べたように、Housner らはアメリカ合衆国西岸で記録された強震動にもとづいて、田治見の式(1)の ω₀ と ζ_G を定めたが、彼らが出た値は T₀=0.404 秒、ζ_G=64% であった⁹⁾。アメリカ合衆国西岸といっても広大であるし、強震動が記録された場所は、図-7 の常時微動を観測した場所と違うので、結論的なことはいえない。しかし、2組の数値がかなりよく

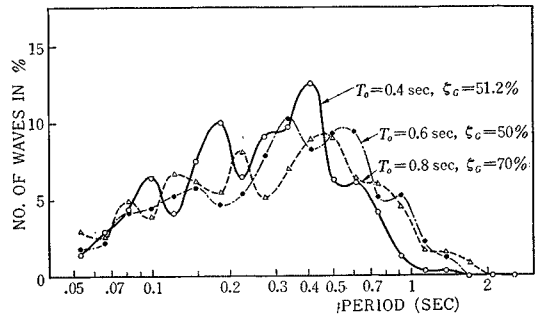


Fig. 6 Period Distribution Curves of the Grounds with Heavy Damping

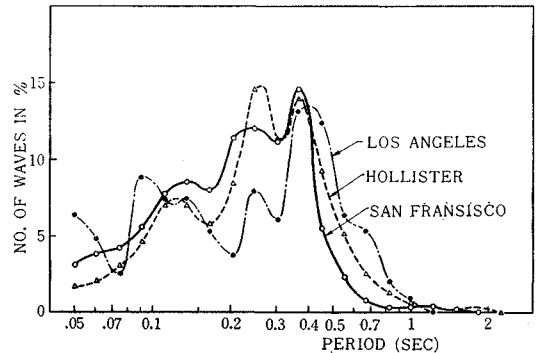


Fig. 7 Period Distribution Curves Obtained at 3 Places in California.

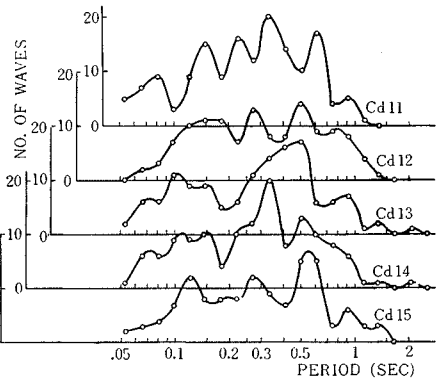


Fig. 8 Period Distribution Curves of 5 Simulated Earthquakes with T₀=0.6 sec and ζ_G=60%

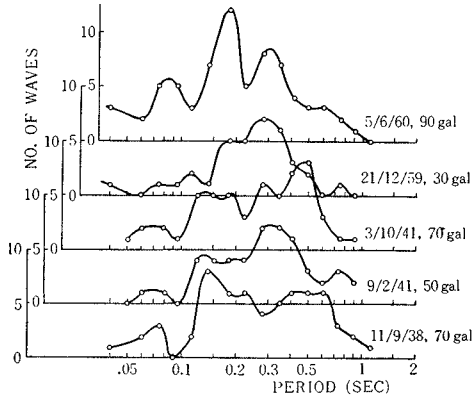
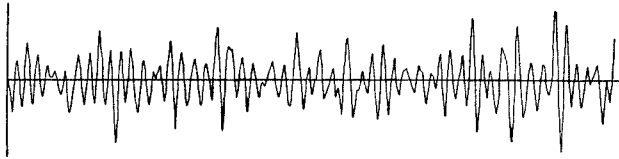


Fig. 9 Period Distribution Curves of 5 Actual Earthquakes Recorded at City Hall in Ferndale, California.

(a) SIMULATED EARTHQUAKE Ea 11 $T_0=0.3$ sec, $\zeta_G=10\%$



(b) HIROO-OKI EARTHQUAKE OF APRIL 23, 1962, EW COMPONENT

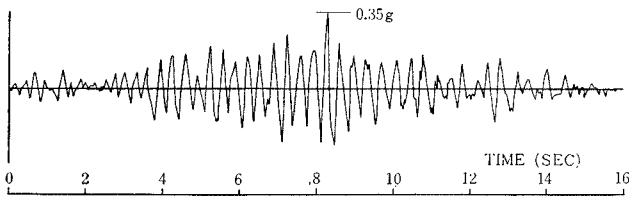
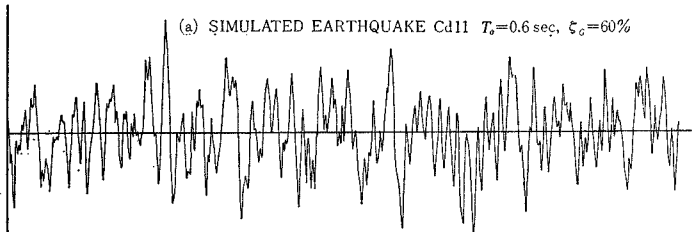


Fig. 10 Accelerograms of Simulated Earthquake Ea 11 and Hiroo-Oki Earthquake.

(a) SIMULATED EARTHQUAKE Cd11 $T_0=0.6$ sec, $\zeta_G=60\%$



(b) TAFT EARTHQUAKE OF JULY 21, 1952, S69E COMPONENT

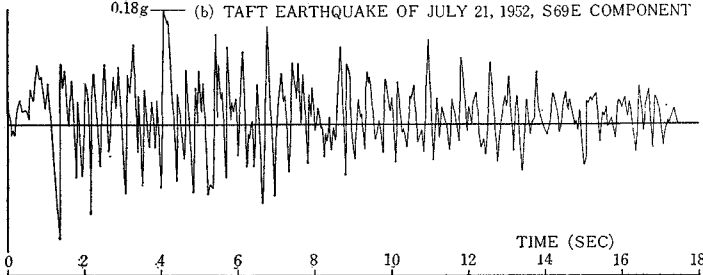


Fig. 11 Accelerograms of Simulated Earthquake Ca 11 and Taft Earthquake.

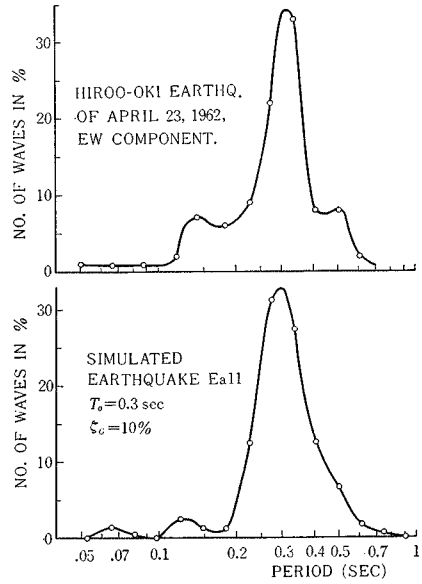


Fig. 12 Period Distribution Curves of Hiroo-Oki Earthquake and Simulated Earthquake Ea 11.

一致していることは注目される。

図-8 は、 $T_0=0.6$ 秒、 $\zeta_G=60\%$ を用いて作成した 5 つの擬似地震動の周期-頻度曲線であり、図-9 はカリフォルニア州 Ferndale で記録された 5 つの地震動の周期-頻度曲線である¹¹⁾。これらの図は 2 組の曲線群の顕著な類似性を示している。また、どちらの場合についても、山の位置がほとんどでたために変わっていることがわかる。

上に示した 2 つの例から、周期-頻度曲線に 2 つ以上の山が現われるような場合でも、パラメータ ζ_G の値を大きくすることにより ($\zeta_G > 50\%$)、実際の常時微動や地震動観測から得られた周期-頻度曲線に似た傾向の周期-頻度曲線を有する擬似地震動を作成することが可能であることがわかる。

(2) 加速度記録の外観

地震動の周期分布特性が地盤条件、すなわちパラメータ T_0 と ζ_G によって変化するのであるから、性質の類似していない地盤上で記録された地震動は、その外見上の形状にもかなりの差異があるものと想像される。

図-10 の下側 (b) に広尾沖地震 (1962.4.23) の釧路における強震記録

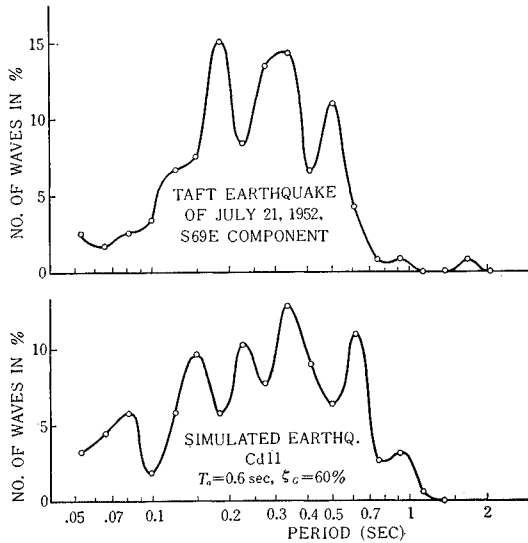


Fig. 13 Period Distribution Curves of Taft Earthquake and Simulated Earthquake Ca 11.

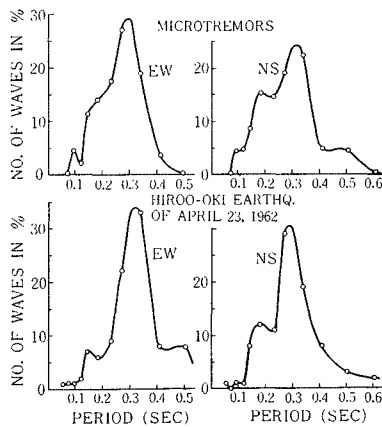


Fig. 14 Period Distribution Curves of Microtremors at Kushiro Meteorological Observatory.

を示した¹²⁾。図-11の下側(b)には Taft 地震(1952.7.21)の Taft における記録を示してある。これら2つの地震動の加速度記録は明らかに定性的に異なった傾向の形状を示している。図-12, 13の上側には、それぞれ広尾沖地震および Taft 地震の周期-頻度曲線があらわされている。これらの図から、2つの地震動の周期分布特性がきわめて異なっていることがわかる。

広尾沖地震の周期-頻度曲線は0.3秒付近に顕著な山を示しているが、Taft 地震の周期-頻度曲線はいくつかの低い山を有している。広尾沖地震の強震記録がとられた釧路気象台では、常時微動の測定も行なわれた¹²⁾。図-14

には、その周期-頻度曲線(NS, EW 両成分)が広尾沖地震の周期-頻度曲線とともに示されている。4つの曲線のどれもが0.3秒付近に30%くらいの高さの顕著な山を有している。このような釧路の周期分布特性を考え、表-2から $T_0=0.3$ 秒に対し $\zeta_G=10\%$ を推定し、これらのパラメータ値を用いて擬似地震動 Ea 11 を作成した。この擬似地震動の加速度記録を図-10の上側(a)に、また周期-頻度曲線を図-12の下側に示した。図-12は、2つの周期分布特性が非常によく似ていることを示している。

図-11には、Taft 地震の強震記録と擬似地震動 Cd 11 が示されている。この擬似地震動は $T_0=0.6$ 秒、 $\zeta_G=60\%$ を用いて作成されたもので、その周期-頻度曲線は図-13の下側に示されている。図-13から、擬似地震動の方が長周期の波を多く含んでいるが、全体的な傾向はよく似ていることが認められる。

図-10の2つの加速度記録は明らかに外観的に似ているし、同じことが図-11の2つの記録についてもいえる。また図-10と図-11を比較すると、これら2組の間には、曲線の形状について明瞭な差異が認められる。このことは、2つの擬似地震動 Ea 11 と Cd 11 が同じホワイト・ノイズ列を用いて作成されていることも

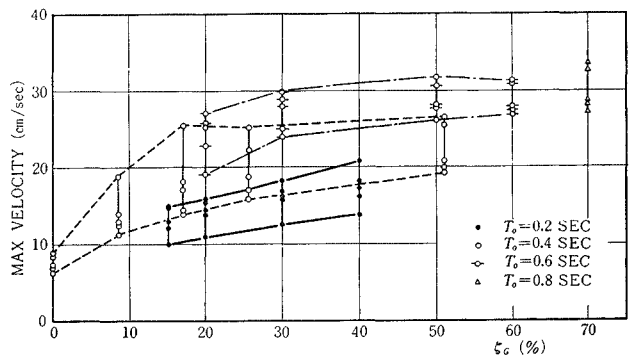


Fig. 15 Maximum Velocities of Simulated Earthquakes vs. Ground Damping ζ_G .

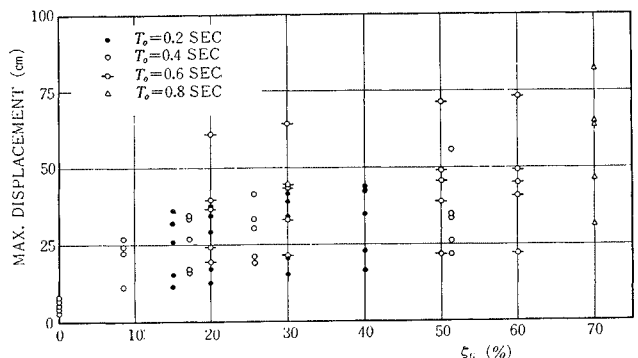


Fig. 16 Maximum Displacements of Simulated Earthquakes vs. Ground Damping ζ_G .

あわせて考えると興味深い。すなわち、パラメータ T_0 と ζ_G は地盤の性質を表わすものと考えられるから、2つの擬似地震動 Ea 11 と Cd 11 は、地盤の性質が地震動におよぼす影響を表わしているとみなされるからである。

(3) 最大速度および最大変位

擬似地震動の最大速度および最大変位は表-1 にあてえてあるが、図-15 および図-16 は、これらの値をパラメータ ζ_G に対してプロットしたものである。表-1

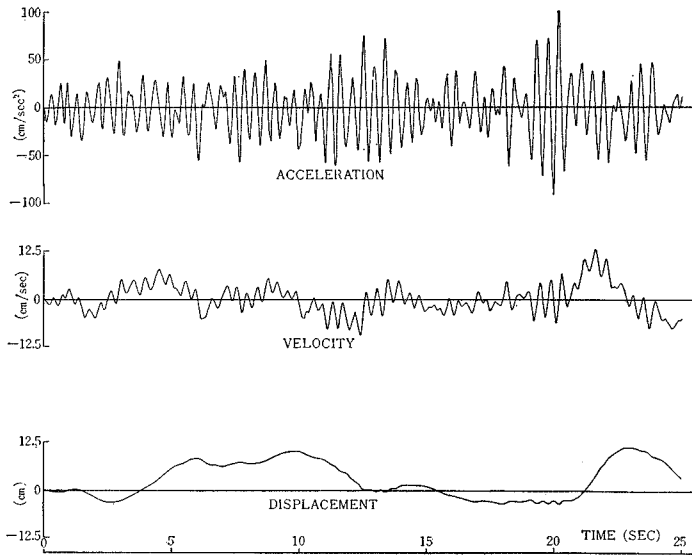


Fig. 17(a) Acceleration, Velocity and Displacement of Simulated Earthquake Bb 7.

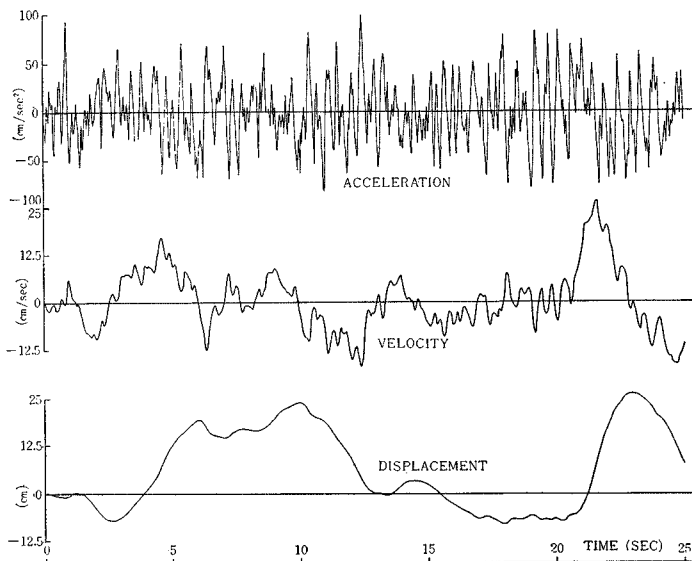


Fig. 17(b) Acceleration, Velocity and Displacement of Simulated Earthquake Be 7.

からわかるように、同じ T_0 を有する擬似地震動においては、パラメータ ζ_G を変えても、同じ1組のホワイト・ノイズを用いており、同一の T_0 を有する地震動に見られる傾向は、パラメータ ζ_G の影響を表わすものと考えてよい。

図-15 から、一定の最大加速度を有する擬似地震動の最大速度は ζ_G が大きくなるほど大きくなる傾向があることが認められる。この傾向を示す例として、2つの擬似地震動 Bb 7 と Be 7 の加速度、速度および変位曲線を図-17 a および図-17 b に示した。これら2つの地震動は同じ T_0 ($=0.4$ 秒) と同じホワイト・ノイズ列 (No. 7) を用いて作成されたものであるが、Bb 7 が $\zeta_G=8.5\%$ と小さいのに対し、Be 7 は $\zeta_G=51.2\%$ という高い値を用いている。図-17 a と図-17 b をくらべてみると、パラメータ ζ_G の値が小さい場合には、加速度記録は周期 T_0 における共振に近い現象をみせ、1つの波のすぐ後に、ほとんど同じ大きさで逆向きの波が続くことが多いのがわかる。したがって、加速度を積分して得られる速度記録では、曲線が基線の片方へ離れて行かず、速度の最大値はあまり大きくならない。これに対し、 ζ_G の値が大きい場合には、速度記録の曲線が一方へ積み重なって行く可能性が高く、最大速度が大きくなりやすいのである。

擬似地震動の最大変位についても、上にのべたのと同じような傾向があることが、図-16 から認められる。この傾向が、最大速度の場合と同じ理由で説明できることは、図-17 a および図-17 b の速度と変位の記録を参照すれば明らかであろう。

さらに図-15 から、 T_0 の値が大きいほど最大速度が大きくなる傾向がうかがわれる。図-16 によれば、最大変位については、このような傾向がほとんど認められない。

アメリカ合衆国西岸で記録された4つの強震動から得られた最大速度、最大変位を表-3 に示した¹³⁾。表-3 に示された平均の最大速度、最大変位を、表-1 の Be6~Be 10 の最大速度、最大変位と比較してみよう。前述のように、Be 6~Be 10 の作成に用いられた $T_0=0.4$

表—3 強震動の最大加速度、速度および変位

強 震 動	最 大 値		
	加速度 (g)	速 度 (cm/sec)	変位 (cm)
Ferndale, 54.12.21, N 45 E	0.205	26.7	21.0
Eureka, 54.12.21, S 11 W	0.178	31.8	25.4
Olympia, 49.4.13, S 40 W	0.210	21.0	23.6
El Centro, 40.5.18, NS	0.32	34.8	21.0
平 均	0.23	28.6	22.8

秒, $\zeta_G=51.2\%$ は, アメリカ合衆国西岸の地盤の状態をかなりよく表わしていると思われる。擬似地震動の最大加速度が $0.1g$ であることを考えると, 表—1 の最大速度, 最大変位は実際の地震動のそれらの値よりもかなり大きいことがわかる。

上のような相異は, 実際の地震動が本質的に非正常なランダム変動であることによるものと思われる。擬似地震動では, 25 秒の継続時間の全体にわたって, 加速度のピーク値の分布のようすがほとんど一定であるのに対し, 実際の強震記録におけるピーク値の分布は, その継続時間中一定とはみなしがたいことが多い。また, 地震動の速度, 変位記録は, 加速度記録における基線のとり方にきわめて敏感であることが知られている。たとえば, 表—3 にも示されている El Centro 記録を積分して求めた最大変化が, 基線のとり方を少し変えただけで $4.5m$ にもなったことが報告されているが, このような基線の位置の調整が動的応答値には比較的小さな影響しかあたえないことがわかっている¹⁴⁾。したがって, 擬似地震動と実際の地震動の最大速度や最大変位に差があることは, あまり重要ではないと考えられる。

(4) スペクトル強度 (Spectrum Intensity)

スペクトル強度とは, 地震動の速度応答スペクトルの下側で周期が 0.1 秒から 2.5 秒までの間にはさまれる部分の面積として定義される量で, 減衰係数の関数であり, 長さの単位を有する¹⁵⁾。とくに減衰係数を 20% としたスペクトル強度 $SI_{0.2}$ は, 地震動が構造物におよぼす平均の効果を表わす量と考えられ, 加速度記録の r.m.s. 値 (Root Mean Square Value) とともに, 地震動の激しさを推定するのに最も適した量とみなされている。

表—4 には, いくつかの擬似地震動について計算した 20% 減衰スペクトル強度 $SI_{0.2}$ の値を示した。この表から, あたえられた1組のパラメータ T_0 と ζ_G を用いて作成された, 最大加速度が一定で継続時間が 25 秒の擬似地震動は, ほぼ一定に近い $SI_{0.2}$ の値を示すことがわかる。また, パラメータ T_0, ζ_G が異なると, 20% 減衰スペクトル強度 $SI_{0.2}$ がかなり広い範囲で変化することもわかる。 $SI_{0.2}$ の値は地震動の激しさを示すめやすくなる量であるから, パラメータ T_0 と ζ_G があたえ

表—4 擬似地震動の 20% 減衰スペクトル強度

	擬似地震動	$SI_{0.2}$ (m)	$(SI_{0.2})_{Aver.}$	$\frac{SI_{0.2}}{(SI_{0.2})_{Aver.}}$
$T_0=0.2s$ $\zeta_G=15\%$	Aa 1	0.195	0.180	1.08
	2	0.183		1.02
	3	0.163		0.90
$T_0=0.4s$ $\zeta_G=17.1\%$	Bc 6	0.264	0.276	0.96
	7	0.242		0.88
	8	0.296		1.07
	9	0.255		0.92
	10	0.324	1.17	
$T_0=0.6s$ $\zeta_G=20\%$	Ca 11	0.363	0.368	0.99
	12	0.376		1.02
	13	0.399		1.09
	14	0.331		0.90
	15	0.371	1.00	
$T_0=0.4s$ $\zeta_G=51.2\%$	Be 6	0.297	0.312	0.95
	7	0.299		0.96
	8	0.339		1.09
$T_0=0.6s$ $\zeta_G=50\%$	Cc 11	0.365	0.406	0.91
	12	0.417		1.03
	13	0.429		1.06
$T_0=0.8s$ $\zeta_G=70\%$	Da 1	0.360	0.399	0.90
	2	0.406		1.02
	3	0.432		1.08

られれば, 25 秒位の継続時間を有する地震動の強さが最大加速度で表わしうるということであり, 擬似地震動作成の際にきわめて便利なことである。

アメリカ合衆国西岸で記録された4つの強震動の $SI_{0.2}$ の値を表—5 に示す¹⁶⁾。表—5 の右端の欄には, これらの地震動の最大加速度を $0.1g$ とした場合の $SI_{0.2}$ の値が示されている。前述のように, Housner らは, これら4つの強震動の平均的性質にもとづいて, $T_0=0.404$ 秒, $\zeta_G=64\%$ を推定している。表—4 に示された擬似地震動の中でこれに最も近い性質を有しているのは Be 6, Be 7, Be 8 であり, これらの $SI_{0.2}$ の値の平均は $0.312m$ である。表—5 の強震動については, 平均の $SI_{0.2}$ が $0.295m$ となる。これら2つの値の一致は良好である。

図—18 には, 20% 減衰スペクトル強度 $SI_{0.2}$ の値を, 地震の加速度記録中の長周期の波の割合に対してプロットした。長周期の波としては, 0.83 秒以上のものを考えた。図—18 から, 地震動の $SI_{0.2}$ 値は, 長周期波の

表—5 実際の強震動の 20% 減衰スペクトル強度

強 震 動	平均* $SI_{0.2}$ (m)	平均* 最大加速度	継続時間 (s)	平均最大加速度 を $0.1g$ とした ときの $SI_{0.2}$
El Centro, Calif. 1940. 5.19	0.83	0.28g	24	0.296
El Centro, Calif. 1934.12.30	0.64	0.23g	16	0.277
Olympia, Wash. 1949. 4.13	0.67	0.245g	23	0.274
Taft, Calif. 1952. 7.21	0.58	0.175g	17	0.332

* 水平方向2方向 (互に直交) の平均

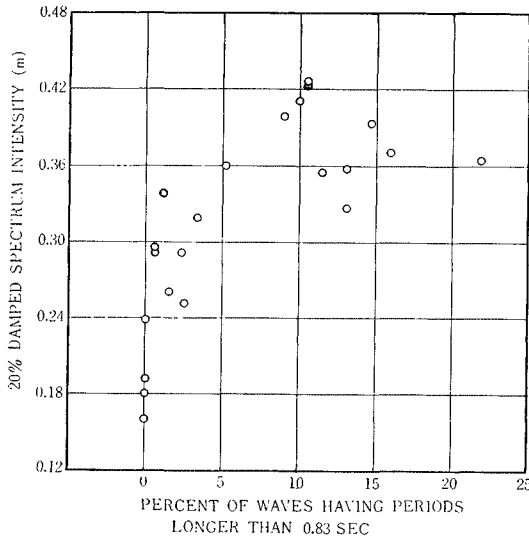


Fig. 18 Relation Between 20% Damped Spectrum Intensity and Percentage of Long-Period Waves.

割合の多い地震動ほど大きくなる傾向があるように見受けられる。

5. む す び

Housner らの方法⁵⁾によって、電子計算機を用いて多くの擬似地震動を作成し、その性質を、1) 周期—頻度曲線、2) 加速度記録の外観、3) 最大速度と最大変位、4) スペクトル強度について、実際の地震動および常時微動の性質と比較検討した。その結果を要約するとつぎの通りである。

(1) 実地震動や常時微動記録の周期—頻度曲線が顕著な1つの山を示すような場合、地盤の卓越周期 T_0 に対して、適当な減衰係数 ζ_G を選ぶことにより、実測されたものとはほとんど同じ周期分布特性を有する擬似地震動を作成することができる。

(2) 大きな減衰係数値 ζ_G を用いて作成された擬似地震動は、いくつかの低い山を有する周期—頻度曲線を示し、ある種の地盤上で観測された地震動や常時微動の周期分布特性とよく似ている。

(3) 擬似地震動の加速度記録を積分して得られた最大速度、最大変位は、実際の強震記録から計算された最大速度、最大変位より相当に大きな値を有する。

(4) あたえられた T_0 および ζ_G の組に対し、最大加速度が一定で継続時間が 25 秒の擬似地震動は、ほぼ一定の 20% 減衰スペクトル強度 $SI_{0.2}$ を有する。このことは、平均的な継続時間を有する擬似地震動の激しさが最大加速度で規定できることを示す。

(5) 異なった T_0 と ζ_G の値、すなわち異なった地

盤条件によって、 $SI_{0.2}$ は相当に大きな変動を示す。また $SI_{0.2}$ の値は、地震の加速度記録中の長い周期の波の割合が大きいにほど大きくなる傾向がある。

本研究の結果から、ある地点での常時微動測定の結果を利用して、将来その地点におこりそうな地震動と似た性質を持つ擬似地震動を作成することは、相当に現実的な問題であるといえる。このために、実地震動の性質と常時微動の性質の関係が、さらに詳細に解明される必要がある。

参 考 文 献

- 1) 金井 清 : 地震動, 地盤の振動特性, 建築物の動的解析, 彰国社, 1967
- 2) Bycroft, G.N. : White Noise Representation of Earthquakes, Proc. ASCE, No. EM 2, 1960
- 3) Ravera, A : Spectral Analysis of Seismic Actions, Proc. 3rd WCEE, 1965
- 4) Penzien, J : Applications of Random Vibration Theory in Earthquake Engineering, Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthq., Vol. 2, 1965
- 5) Tajimi, H : A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake, Proc. 2nd WCEE, 1960
- 6) Housner, G.W., and Jennings, P.C. : Generation of Artificial Earthquakes, Proc. ASCE, No. EM 1, 1964
- 7) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Appl. Math. Series 55
- 8) Berg, G.V., and Housner, G.W. : Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, 1961
- 9) Rosenblueth, E., and Bustamante, J.E. : Distribution of Structural Response to Earthquakes, Proc. ASCE, No. EM 3, 1962
- 10) 金井清ほか : 強震計設置場所の常時微動, 文部省特定研究, 強震動—構造物応答研究班, 1967
- 11) Kanai, K. : On the Spectrum of Strong Earthquake Motions, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 40, 1962
- 12) Kanai, K., Yoshizawa, S., and Suzuki, T. : An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motion II, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 41, 1963
- 13) Newmark, N.M. : Effects of Earthquakes on Dams and Embankment, Fifth Rankine Lecture given at the British Geotechnical Society on 17th May, 1965
- 14) Jennings, R.L., and Newmark, N.M. : Elastic Response of Multi-Story Shear Beam Type Structures Subjected to Strong Ground Motion, Proc. 2nd WCEE, 1960
- 15) Housner, G.W. : Vibration of Structures Induced by Seismic Waves, Shock and Vibration Handbook, Vol. III, McGraw-Hill, 1961
- 16) Housner, G.W. : Intensity of Earthquake Ground Shaking Near the Causative Fault, Proc. 3rd WCEE, 1965