

非定常強震地震動の統計的予測モデル*

PREDICTION OF STRONG EARTHQUAKE MOTIONS BY EVOLUTIONARY PROCESS MODEL

後藤 尚 男**・亀田 弘 行***・杉戸 真 太****
By Hisao GOTO, Hiroyuki KAMEDA and Masata SUGITO

1. 結 論

本研究は、非定常過程による強震地震動の合理的なモデル化の手法を提案するとともに、地震規模（マグニチュード）および震央距離が与えられた場合の地震動の予測モデルを作成することを目的としたものである。

想定された地震規模と震央距離に対して、ある地盤上にとどの程度の大きさの地震動が来襲するかを予測することは、構造物の合理的な耐震設計法を確立するうえできわめて重要な課題である。このような目的をもつ研究では、最大地動をマグニチュードと震央距離の関数として表わすことがよく行われ^{1)~5)}、強震記録の集積とともにその内容も充実してきてはいるが、最大地動のみでは構造物の耐震設計に関する十分な情報とはなり得ない。片山・岩崎・佐伯⁶⁾は、数量理論を用いて加速度応答スペクトルをマグニチュードと震央距離の従属変数として表わし、応答スペクトルの予測モデルを提案している。これは、応答スペクトルを地震荷重決定の根拠とする現在の耐震設計法の体系に、重要な統計的情報を提供するものである。一方、重要構造物の耐震設計では動的応答解析が行われることが多く、また、耐震工学の研究一般においても、応答解析は不可欠の方法論である。これらの場合には、入力地震動の波形そのものが必要であり、この意味でマグニチュードと震央距離から地震動波形を予測するモデルを提供することは、きわめて重要な研究課題である。しかも、構造物の応答には、地震動の継続時間やスペクトル特性の時間的変化が影響し、特に非弾

性応答に対してはその影響が顕著であるので、これらの情報を的確に考慮した予測モデルが是非とも必要である。このような予測モデルを得るためには、まず個々の地震動の諸特性をよく再現するシミュレーションモデルを設定し、しかる後モデルパラメーターとマグニチュードや震央距離との関係を求め、将来の地震動の予測モデルを作成するという2段階の作業が必要である。

従来の地震動のシミュレーション技法に関する研究の大部分はこれらのうちの第一段階に関するものであり、Housner⁷⁾による定常型モデル（実地震加速度記録8成分の平均スペクトルに合うように、波長および振幅の異なる多くの正弦波を重ね合わせたもの）に始まり、その後の強震記録の集積および電子計算機の発達により、地震動を確定時間関数と定常ガウス過程との積で表現する振幅変調型モデル^{8)~10)}、さらにはスペクトル特性の時間的変化をも考慮した非定常型モデル^{11)~15)}へと発展してきた。構造物の非弾性応答解析にも使用しうるシミュレーションモデルを作成するためには非定常スペクトル¹⁶⁾の重要なことが指摘され¹⁷⁾ており、工学的に有意義なモデルを得るためには非定常スペクトルを用いることが必要と考えられる。強震地震動の非定常スペクトル特性のモデル化を扱った研究^{18)~19)}はあまり多くないが、以下のようにいくつかのモデルが提案されている。Beaudet¹¹⁾は、地下爆発による地動の非定常スペクトル特性を非定常アナログフィルターによって再現することを試み、Saragoni・Hart¹²⁾や後藤・北浦¹³⁾は、強震記録を時間軸上で分割して各時間間隔ごとのパワースペクトルを振動数軸上でモデル化しスペクトル特性の時間的変化をモデルに取り入れ、また、星谷・磯山¹⁴⁾は、スペクトル定数を用いてスペクトル特性を振動数軸上でモデル化している。ところで、構造物の応答が地震動の振動数特性に大きく影響されることを考慮すれば、非定常スペクトルの振動方向の変動はあまり単純化せず、なるべく忠実にモデルに保存させることが望ましいと考えられる。この理

* U.S. Southeast Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection (Manila, 1977), 土木学会関西支部年次学術講演会 (I-41: 昭 53.5) および土木学会第 33 回年次学術講演会 (I-194: 昭 53.9) において一部を発表。

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

**** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

由から、亀田¹⁵⁾は地震動の非定常スペクトルの時間特性のみモデル化し、モデルパラメーターの振動数方向の特性は統計的に扱うべきことを論じた。本研究で扱うシミュレーションモデルも同様の考え方で組立てられている。以上の研究はいずれも上記の第一段階に属するものであり、これを基にして将来の地震（たとえばマグニチュード、震央距離のみが与えられる）による地動を予測する第二段階に進むべきものである。

本研究では、まず実地震動の非定常スペクトルの時間特性を、到着時間パラメーター $t_s(f)$ 、継続時間パラメーター $t_p(f)$ および強度パラメーター $\alpha_m(f)$ で表現した亀田¹⁵⁾によるモデルを用いて、日本の沖積地盤上で記録された45成分の加速度記録のシミュレーションモデルを作成した。この場合、強震時における構造物の応答が弾性領域を越えて非弾性領域に至ることを考慮して、モデル化の妥当性の検討では、地震動の最大加速度、全パワーのみならず弾塑性系の応答スペクトルと履歴エネルギーの再現性をも検証した。このようにしてシミュレーションモデルの妥当性を確認した後、上記3つのモデルパラメーターを各振動数についてマグニチュードおよび震央距離に対して回帰分析し、地震動の非定常スペクトルの諸特性とマグニチュード、震央距離との関係を求めた。また、これらの回帰結果におけるデータのばらつきと、異なるパラメーター間の相関特性をも算出した。以上の結果に基づいて、マグニチュードと震央距離を与えた場合の沖積地盤（解析に用いた強震記録がすべて沖積地盤上のものであることによる）における地震動の予測モデルを提案した。

回帰分析の結果や、予測モデルから得られるサンプル地震動の諸特性は、従来地震学的に認められてきた地震動の特性とも定性的によく合致しており、大局的に本研究の結果が妥当であることが確かめられたと考えている。ただ、この種の統計的予測モデルは、基礎となるデータの質が結果に与える影響が大きく、ここで用いた地震動のデータセットもいまだ十分なものとは言えない。この点で、さらに地震動ファイルの充実にも努めるとともに、将来の強震記録の集積に待つところも大きい。現段階でも地震動予測について一応の成果が得られ、方法的にも妥当であろうとの見通しを得たので、これまでの結果をとりまとめることとした。

2. 強震地震動の非定常シミュレーションモデル

本節では、妥当なシミュレーションモデルを得ることを目的として、強震地震動の非定常スペクトルの時間特性をモデル化する手法を提案し、得られたモデルが、最

大加速度、全パワーに加えて弾塑性系の応答量（応答スペクトル、履歴エネルギー）について実地震動の特性をよく再現することを確かめることにより、モデルの妥当性を確認する。

(1) 非定常パワースペクトルのモデル化とモデルパラメーター

非定常特性を有する模擬地震波 $x(t)$ を次式で表わす。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2 G_x(t, \omega_k) \Delta\omega} \cos(\omega_k t + \phi_k) \dots (1)$$

ただし、 $G_x(t, \omega_k)$ は非定常パワースペクトル、 $\omega_k = 2\pi f_l + (k-1)\Delta\omega$ 、 $\Delta\omega = 2\pi(f_u - f_l)/(m-1)$ 、 ϕ_k は $0 \sim 2\pi$ での一様乱数である。また、 f_u, f_l はシミュレーションモデルで考慮する振動数の上・下限で、本研究で参照する強震記録の振動数範囲を参考として $f_u = 10.03$ Hz、 $f_l = 0.13$ Hz とし、 $m = 166$ とする。これにより $\Delta\omega = 0.06$ Hz となる。以下における波形の分析・合成にはこれらの値を用いることとする。

さて、模擬地震波の非定常パワースペクトル $G_x(t, \omega)$ を次に示す関数で表現し、その概略図を Fig. 1 に示した。

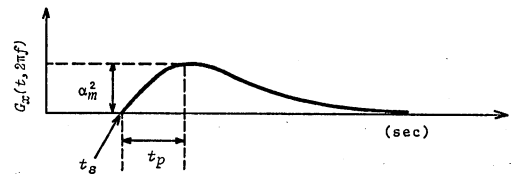


Fig. 1 Time-Varying Function

$$\begin{aligned} \sqrt{G_x(t, \omega)} &= \sqrt{G_x(t, 2\pi f)} \\ &= \begin{cases} 0 & ; 0 \leq t < t_s \\ \frac{\alpha_m(f) \{t - t_s(f)\}}{t_p(f)} \exp\left\{1 - \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)}\right\} & ; t_s \leq t \end{cases} \dots (2) \end{aligned}$$

この関数形は、これまで地震動の振幅特性の包絡線関数としてよく用いられたものであり^{9), 15)}、非定常スペクトルの立ち上がりから主要部、さらに減衰の過程を表現しうるものである。式(2)において、 $\alpha_m(f)$ は強度パラメーターで、 $\sqrt{G_x(t, 2\pi f)}$ の最大値を与える。また、 $t_s(f)$ は時間パラメーターで $\sqrt{G_x(t, 2\pi f)}$ の立ち上がり時刻を、 $t_p(f)$ も時間パラメーターで $t_s(f)$ から最大値 $\alpha_m(f)$ に至るまでの時間をそれぞれ与える。時間パラメーター $t_p(f)$ は、後に示すように別に定義される非定常パワースペクトルの等価継続時間¹⁵⁾ $t_d(f)$ と比例関係にある。したがって、非定常パワースペクトルの強度は $\alpha_m(f)$ 、立ち上がり時刻は $t_s(f)$ 、さらに継続時間の長短は $t_p(f)$ によってそれぞれ表現される。

一方、実地震動の非定常パワースペクトルに関する研

究^{16)~19)}は最近増えつつあるが、本研究では高振動数域においてもスペクトル特性の急激な時間的変化を検出できる亀田¹⁷⁾による方法を用いて非定常パワースペクトルを算出した。なお、フィルターの減衰定数¹⁷⁾は $h_0=0.05$ % とした。

さて、実地震動の非定常特性を上記の3つのパラメーターで表現する場合の条件として、実地震動の非定常パワースペクトル $G_y(t, 2\pi f)$ と式(2)に示したモデル関数とを、それぞれの時間軸とで囲まれる面積および時間の原点に関する1次モーメントが等しくなるように整合させる。すなわち、

$$\int_0^\infty \{G_x(t, 2\pi f)\}^{n/2} dt = A_0(f)$$

$$= \int_0^\infty \{G_y(t, 2\pi f)\}^{n/2} dt \dots\dots\dots (3)$$

$$\int_0^\infty t \{G_x(t, 2\pi f)\}^{n/2} dt = A_1(f)$$

$$= \int_0^\infty t \{G_y(t, 2\pi f)\}^{n/2} dt \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 n は任意の無次元パラメーターである。式(2)~(4)より、

$$\alpha_m(f) = \frac{n}{e} \left\{ \frac{\Gamma(n+2)}{\Gamma^2(n+1)} \cdot \frac{A_0(f)}{A_1(f)/A_0(f) - t_s(f)} \right\}^{1/n}$$

..... (5)

$$t_p(f) = n \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(n+2)} \left\{ \frac{A_1(f)}{A_0(f)} - t_s(f) \right\} \dots (6)$$

さらに、非定常スペクトルの等価継続時間¹⁵⁾ $t_d(f)$ は $t_p(f)$ を用いて、

$$t_d(f) = \frac{A_0(f)}{\alpha_m^n(f)} = \frac{e^n \Gamma(n+1)}{n^{n+1}} t_p(f) \dots (7)$$

任意パラメーター n は、 n が大きいほど非定常スペクトルの最大値付近を相対的に強調する効果をもつものであり、本研究では、これまでの検討¹⁵⁾から $n=4$ を採用した。また、モデル関数 $G_x(t, 2\pi f)$ の立ち上がり時刻 $t_s(f)$ は、実地震動の非定常パワースペクトル $G_y(t, 2\pi f)$ がその最大値の10%をはじめて越える時刻と定義する。 n および $t_s(f)$ が与えられると式(5)、(6)より強度パラメーター $\alpha_m(f)$ 、時間パラメーター $t_p(f)$ が得られる。

このようにして得られたモデルパラメーター $\alpha_m(f)$ 、 $t_p(f)$ 、 $t_s(f)$ により実地震動の非定常スペクトルの時間軸方向の特性を表現できる。一方、先に述べたように、振動数軸方向の特性は個々の地震動についてはモデル化はせず、後に示す地震動の予測モデルを作成する段階で統計的手法を用いて求めることとする。

Fig. 2に、実地震動の非定常パワースペクトル $G_y(t, 2\pi f)$ とモデル関数 $G_x(t, 2\pi f)$ の一例を示した。同図に見られるように、一般に2Hz以上の高振動数成分の非定常スペクトルは多峰性でモデル関数との整合性も

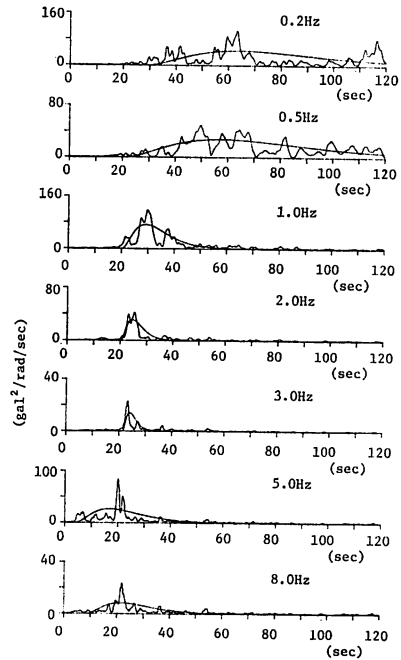


Fig. 2 Recorded and Simulated Evolutionary Power Spectra (S-235 EW, Aomori)

良好である。これに対し、低振動数成分の非定常スペクトルは多峰性となりモデル関数との整合性は必ずしも良くない。ただし、非定常スペクトルのモデルが時間軸上で原記録の特性に詳細に追従する必要は必ずしもなく、工学的には、このようなモデルから得られる模擬地震動に対する構造物の応答特性が、いかに原記録の特性をよく再現するかが重要であろう。後でこの点について弾塑性系の応答を含むシミュレーション誤差を十分に検討し、ここで用いた非定常スペクトルの時間特性のモデルで十分その目的を達しうることを示す。

Fig. 3に強度パラメーター $\alpha_m(f)$ 、Fig. 4に時間パラメーター $t_p(f)$ 、 $t_s(f)$ の一例を示した。強度パラメーター $\alpha_m(f)$ は、一般の地震動のパワースペクトルやその応答スペクトルのように、中振動数域にピークのある形状を示している。非定常スペクトルの継続時間の指標となる時間パラメーター $t_p(f)$ は、Fig. 4に見られるように低振動数域で比較的長く中振動数域で最も短い。また、立ち上がり時刻を表わす時間パラメーター $t_s(f)$ は、高振動数成分ほど小さな値をとる傾向にある。ただし、 $t_p(f)$ 、 $t_s(f)$ とともに0.3 Hz付近で最大値をとり、それ以下の振動数では低振動数ほど小さい値をとる傾向がある。ところで、時間パラメーター $t_s(f)$ は、実地震動の非定常スペクトルの初期のわずかな変動に大きく影響を受け、また式(6)からわかるように時間パラメーター $t_p(f)$ は $t_s(f)$ の増減に逆比例的に影響されることもある。そこで、個々の振動数成分のパワ

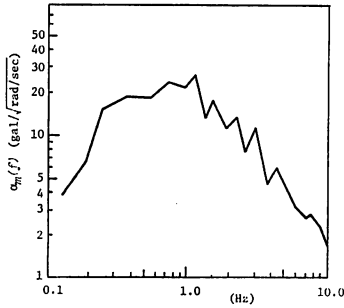


Fig. 3 Intensity Parameter $\alpha_m(f)$ (S-235 EW, Aomori)

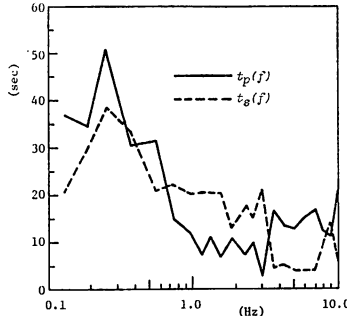


Fig. 4 Time Parameters $t_p(f)$ and $t_s(f)$ (S-235 EW, Aomori)

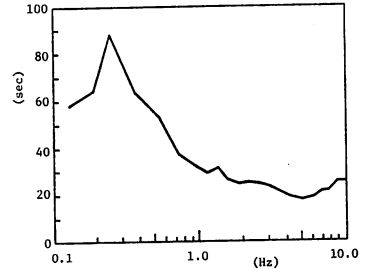


Fig. 5 Time Parameter $t_{\alpha_m}(f)$ (S-235 EW, Aomori)

一が最大となる時刻

$$t_{\alpha_m}(f) = t_s(f) + t_p(f) \dots\dots\dots (8)$$

に着目すると、 $t_{\alpha_m}(f)$ は Fig. 5 に見られるように、振動数軸上での変動が $t_p(f)$ や $t_s(f)$ に比較して小さく、個々の振動数成分の伝播速度の差異を示していると考えられる。0.3 Hz 程度より高い振動数域では振動数が高いほど $t_{\alpha_m}(f)$ が小さく、非定常スペクトルのピークが早く到着しているが、0.3 Hz より低い振動数域では振動数が低いほど $t_{\alpha_m}(f)$ が小さい。Fig. 3~5 は、強震記録の一例についてみたものであるが、他の記録についても定性的には $\alpha_m(f)$ 、 $t_p(f)$ 、 $t_s(f)$ に関して同様の傾向がみられる場合が多く、後に示す回帰分析の結果にもその影響が強く現れる。モデルパラメーターに現れるこれらの傾向は、従来地震学的に得られてきた地震動の特性に関する知見と

関連すると思われるが、この点については後で改めて考察する。

さて、これまでに得られたモデルパラメーターを使って、式 (1) により模擬地震動が得られる。Fig. 6 に、実地震動とその模擬地震動波形の一例を示した。模擬地震動は実地震動の全体的な強度および非定常特性をよく再現しているといえよう。

(2) 弾塑性系の応答からみたシミュレーションモデルの妥当性の検討

本研究では、モデル化の妥当性を、地震動の最大加速

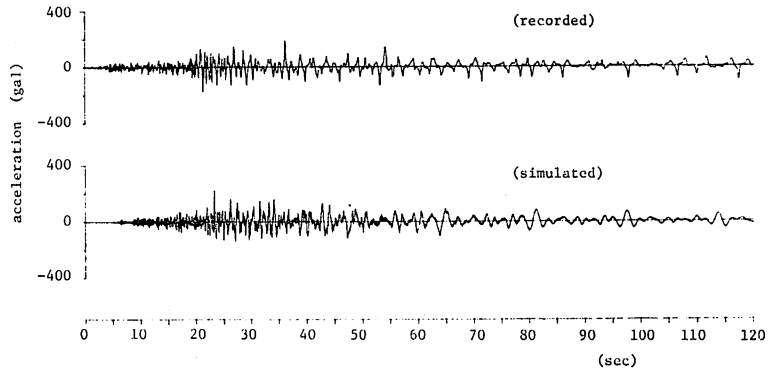


Fig. 6 Recorded and Simulated Accelerograms (S-235 EW, Aomori)

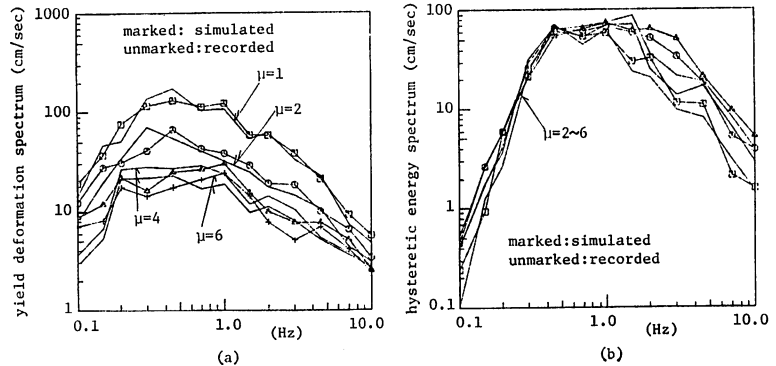


Fig. 7 Yield Deformation and Hysteretic Energy Spectra (S-235 EW, Aomori)

度、全パワーの再現性に加えて1自由度弾塑性系の非弾性応答の再現性の良否をも対象として検討を行った。系の履歴特性は完全弾塑性系であり、減衰定数はすべて0.02とした。また、系の応答特性としては、じん性率 $\mu=1, 2, 4, 6$ の4種に対する降伏変位および全履歴エネルギーを取り上げた。

Fig. 7 は、実地震動と模擬地震動の非弾性応答における降伏変形スペクトルおよび全履歴エネルギーの一例である。同図 (a) の降伏変位についてみると、おのおののじん性率において、模擬地震動による降伏変位が実地震動のそれに平均的に一致している。Fig. 7 (b) は

単位重量当りの履歴エネルギーに非減衰固有振動数を乗じた値が描かれており、降伏変形スペクトルと同次元で比較できるようになっている。実地震動および模擬地震動による全履歴エネルギーは、じん性率ごとに平均的に一致しており、特に履歴エネルギーの最大値を与える振動数より低い振動数域では、一般にじん性率によらず履歴エネルギーの値がほぼ等しい結果を示した。このことは Housner²⁰⁾ や加藤・秋山²¹⁾ の提案した外力のエネルギー入力を構造物の応答のもつエネルギーに等置して塑性変形を求める方法の妥当性を裏付けている。しかしながら、固有振動数の高い構造物では、じん性率の違いによる構造物のエネルギー吸収の違いに注意しなくてはならないことがわかる。

さて、ここで提案したシミュレーションモデルは、次式で定義されるシミュレーション誤差の絶対値が十分に小さい値をとれば妥当であると考える。

$$\left. \begin{aligned} r_a &= \ln(A_s/A_r) \\ r_p &= \ln(P_s/P_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} r_d &= \ln(D_s/D_r) \\ r_e &= \ln(E_s/E_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 A および P は、地震動の最大加速度および全パワーを、 D および E は、弾塑性系の降伏変位および全履歴エネルギーを表わす。また、添字の s および r は、模擬地震動および実地震動を表わしている。

本研究で対象とした地震記録は、

Table 1 に示した日本における沖積地盤（第3種地盤²²⁾）上の 13 地点で記録された 45 成分^{23), 24)}であり、いずれも最大加速度が約 50 gal 以上のもののみを採用した。これらのマグニチュードおよび震央距離の分布を **Fig. 8** に示した。ただし、これらの記録は、SMAC-B 2 型加速度記録計により記録されたものであり、本研究の数値計算には後藤・亀田・杉戸・西²⁵⁾ の提案による計器特性の補正法を適用した補正記録を使用した。実地震動 45 成分についての最大加速度および全パワーのシミュレーション誤差の平均値 \bar{r}_a, \bar{r}_p と、それぞれの

Table 1 Dataset of Accelerograms

Earthquake Number	Component	Site	Magnitude M	Epicentral Distance Δ	A_{max}^* (gal)	V_{max}^{**} (kine)	D_{max}^{***} (cm)
S-213	NS EW	Hososhima	7.5	110.0	213.4 282.2	16.1 27.5	6.9 6.8
S-235	NS EW	Aomori	7.8	247.0	252.0 191.9	39.1 31.6	20.1 18.0
S-264	NS EW	Aomori	7.4	193.0	80.8 98.6	9.8 9.2	2.7 2.0
S-266	NS EW	Wakayama	7.5	317.0	47.6 48.7	1.3 1.2	0.3 0.1
S-282	NS EW	Ofunato	5.1	205.0	86.5 61.0	13.9 6.3	2.2 1.1
S-340	NS EW	Shinagawa	6.1	49.7	87.1 130.9	7.8 9.0	1.6 1.5
S-453	NS EW	Hososhima	6.5	52.2	96.5 124.8	6.0 6.5	0.7 0.9
S-544	NS EW	Hososhima	6.7	53.2	145.8 143.5	8.8 14.0	1.2 2.4
S-585	NS EW	Kinuura	6.1	54.2	87.6 89.6	9.5 7.7	1.6 0.7
308-GR-2	LG. TR.	Itajima	7.5	103.0	194.0 209.3	13.5 19.0	2.4 3.2
1305-GR-1	LG. TR.	Horoman	7.9	154.0	115.6 82.8	5.7 5.4	2.6 2.6
1305-GR-3	LG. TR.	Horoman	7.5	129.0	94.5 62.9	4.2 5.1	1.5 1.6
308-GR-8	TR. LG.	Itajima	5.3	18.6	190.6 256.0	8.5 13.1	1.2 2.8
308-GR-4	TR. LG.	Itajima	6.6	18.6	543.5 600.6	38.0 22.8	6.2 4.4
1305-GR-11	HA HB	Horoman	6.7	87.9	160.1 159.2	8.0 8.2	1.9 2.5
301-GR-7	HA HB	Yuhei	6.2	24.1	244.6 157.2	9.2 12.7	2.0 2.7
311-GR-6	HA HB	Toyohama	6.1	42.3	194.8 142.2	8.6 5.7	1.4 0.9
1404-GR-8	TR. LG.	Tonegawa	6.1	53.5	124.1 161.4	12.3 16.6	3.6 2.6
905-B-264	LG. TR.	Ochiai	4.5	14.3	232.0 63.0	7.5 1.7	0.9 0.2
905-C-117	EW NS	Ochiai	4.5	15.1	72.3 94.4	2.7 4.7	0.3 0.6
905-B-269	LG. TR.	Ochiai	4.3	10.6	145.6 66.7	5.4 2.3	0.6 0.4
905-C-122	EW NS	Ochiai	4.3	11.2	126.8 149.4	3.5 3.2	0.3 0.3
904-GR-1	LG.	Shintenryu gawa	6.1	46.6	110.0	14.4	3.2

* A_{max} =peak acceleration, ** V_{max} =peak velocity, *** D_{max} =peak displacement

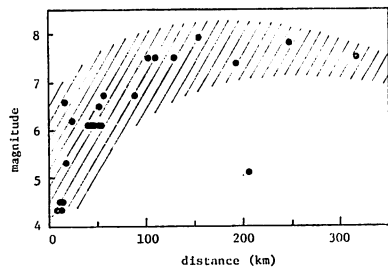


Fig. 8 Relation of Magnitude and Epicentral Distance

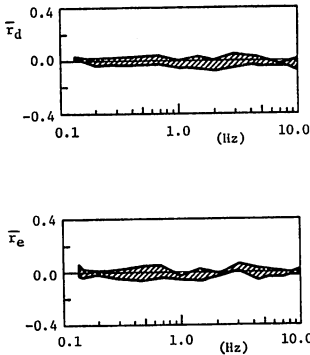


Fig. 9 Mean of Simulation Error in Deformation and Hysteretic Energy Spectra

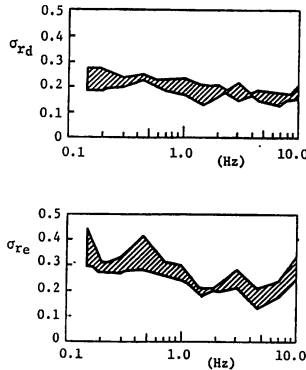


Fig. 10 Standard Deviation of Simulation Error in Deformation and Hysteretic Energy Spectra

Table 2 Mean and Standard Deviation of Simulation Error

peak acceleration	\bar{r}_a	0.063
	σ_{r_a}	0.333
total power	\bar{r}_p	0.018
	σ_{r_p}	0.247

標準偏差 $\sigma_{r_a}, \sigma_{r_p}$ を Table 2 に示した. この結果から, それぞれの平均値 \bar{r}_a, \bar{r}_p は十分に小さな値を示しており, 標準偏差 $\sigma_{r_a}, \sigma_{r_p}$ はそれぞれ 0.333 および 0.247 で比較的小さい.

Fig. 9 に, 弾塑性系の応答特性に対するシミュレーション誤差 r_d, r_e の平均値 \bar{r}_d, \bar{r}_e を, Fig. 10 に, これらの標準偏差 $\sigma_{r_d}, \sigma_{r_e}$ を示した. 平均値 \bar{r}_d, \bar{r}_e は, ここで考慮している振動数域で ± 0.1 の範囲にあり, 本研究のシミュレーションモデルは弾塑性系の応答の面からも実地震動の特性を平均的によく再現していることを示している. 一方, Fig. 10 にみられるように, $\sigma_{r_d}, \sigma_{r_e}$ が振動数軸上でほぼ一定の値を示していることから, 本研究で提案したモデルの応答誤差のばらつきが振動数によらずほぼ一定であると言える.

3. 強震地震動の統計的予測モデル

(1) 概 説

これまでに, 実地震動の非定常パワースペクトルを強度パラメーター $\alpha_m(f)$, 時間パラメーター $t_p(f), t_s(f)$ でモデル化する手法を示し, 最大加速度, 全パワーおよび弾塑性系の応答に対してシミュレーションモデルの妥当性を検証した. ここでは, 実地震動 45 成分に対して得られたモデルパラメーター $\alpha_m(f), t_p(f), t_s(f)$ を振動数ごとにマグニチュードおよび震央距離で回帰分析し, 各振動数レベルでのモデルパラメーターの統計的性質を求め, 設定されたマグニチュードおよび震央距離に対する非定常地震動の予測モデルを得ようとした. また, Fig. 8 でみたように, ここで用いた強震記

録は, マグニチュード M と震央距離 d がともに大きいまたはともに小さい場合の記録が大部分である. M が小さく d が大きい場合は地震動そのものが弱いから耐震工学上の意義は小さいと考えてここでは 50 gal を大きく下まわる記録は除外した. 工学的に重要な M が大きく d が小さい場合については将来の強震記録の集積をまつほかはなく, その意味で本研究の結果の適用に際しては, 用いたデータの M, d の範囲内 (たとえば Fig. 8 の斜線部) で議論するよう注意が必要である.

(2) モデルパラメーターのマグニチュードおよび震央距離に対する回帰分析とパラメーター間の相関分析

a) 強度パラメーター $\alpha_m(f)$

従来, 最大加速度等の地震動パラメーターのマグニチュードおよび震央距離に対する回帰分析¹⁷⁻¹⁹⁾ には, 式 (11) の回帰式がよく用いられてきたが, ここでも同式を用いて強度パラメーター $\alpha_m(f)$ の回帰分析を行った.

$$\log \hat{\alpha}_m(f) = B_0(f) + B_1(f)M - B_2(f) \log(d+c) \dots \dots \dots (11)$$

ここで, M : マグニチュード, d : 震央距離, C : 定数項で, C は震央付近のデータの回帰式への影響を調整するためのもので, 本研究で扱った地震記録の震源深さが 10~40 km 程度であることから $C=30$ km とした.

実際の波形の分析・合成には, 前述のように 166 個の振動数を用いるが, 式 (11) 右辺の回帰係数は, 振動数とともに激しく変動するとは考えられない (むしろこのような変動がないような十分な標本数を用いることが重要である) から, 本節における統計解析は, 166 個の振動数のうち対数軸上でほぼ等間隔にとった 14 個の振動数に対して行い, それ以外の振動数については適宜補完を行うこととした.

Table 3 および Fig. 11 に, 式 (11) の回帰係数 $B_0(f), B_1(f)$ および $B_2(f)$ を示した. $B_0(f)$ は, 低振動数域 (1 Hz 程度以下) で相対的に小さく中振動数域 (0.7~5 Hz 程度) から高振動数域 (4 Hz 程度以上) にかけて増加している. この $B_0(f)$ に M と d の影響が加算されて $\log \hat{\alpha}_m(f)$ が算出される.

マグニチュードの係数 $B_1(f)$ は, 振動数に対してあまり大きい変化はなく, マグニチュードの変化によって $\alpha_m(f)$ が全振動数域で比較的一様に増減するという結果となっている. また震央距離の影響を表わす $B_2(f)$ は, 低振動数域 (1 Hz 程度以下) で最も小さく, 中振動数域から高振動数域にかけて増加している. この結果

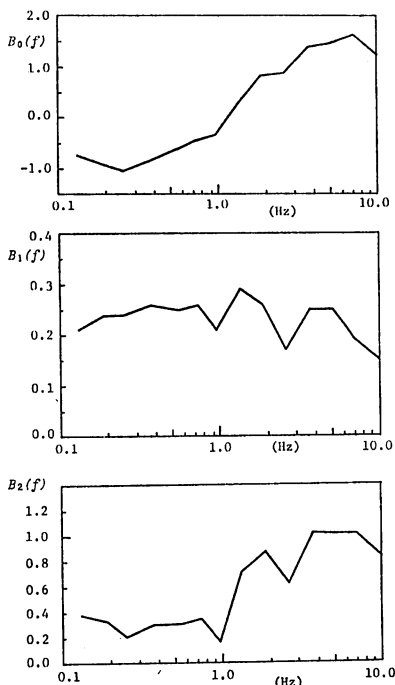


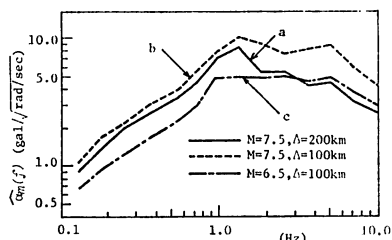
Fig. 11 Regression Coefficients $B_0(f)$, $B_1(f)$, and $B_2(f)$

は、振動数が高い成分ほど震央距離に対する強度の減衰が大きいという地震学上の知見と一致している。

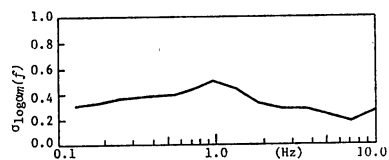
マグニチュードおよび震央距離を設定すると、Table 3 の値から $\hat{\alpha}_m(f)$ が得られる。Fig. 12(a) に、 $M=7.5$, $d=200$ km (実線 a), $M=7.5$, $d=100$ km (破線 b), $M=6.5$, $d=100$ km (1点鎖線 c) とした場合の強度パラメーター $\hat{\alpha}_m(f)$ を示し、同図 (b) には、データの回帰式からのばらつき $\sigma_{\log \hat{\alpha}_m}$ を示した。Fig. 12 (a) の $\hat{\alpha}_m(f)$ は、いずれも上述の回帰係数の傾向を反映した性状を示している。まず、破線 b ($M=7.5$, $d=$

Table 3 Regression Coefficients $B_0(f)$, $B_1(f)$, $B_2(f)$ and Standard Deviation $\sigma_{\log \hat{\alpha}_m(f)}$

frequency (Hz)	$B_0(f)$	$B_1(f)$	$B_2(f)$	$\sigma_{\log \hat{\alpha}_m(f)}$
0.13	-0.74	0.21	0.38	0.305
0.19	-0.93	0.25	0.33	0.321
0.25	-1.04	0.24	0.21	0.361
0.37	-0.87	0.26	0.30	0.378
0.55	-0.65	0.25	0.30	0.384
0.73	-0.47	0.26	0.35	0.430
0.97	-0.35	0.21	0.16	0.497
1.33	0.29	0.29	0.71	0.435
1.87	0.82	0.26	0.87	0.320
2.59	0.89	0.17	0.62	0.278
3.67	1.39	0.25	1.12	0.286
5.11	1.44	0.25	1.12	0.235
7.03	1.63	0.19	1.08	0.189
10.03	1.24	0.15	0.83	0.253



(a) Regression values of $\hat{\alpha}_m(f)$



(b) Standard deviation $\sigma_{\log \hat{\alpha}_m(f)}$

Fig. 12 Regression Values of $\hat{\alpha}_m(f)$ and Standard Deviation $\sigma_{\log \hat{\alpha}_m(f)}$

100 km) から実線 a ($M=7.5$, $d=200$ km) への変化は震央距離 d が 100 km から 200 km に増加することによるものであり、 d が増加したことによって $\hat{\alpha}_m(f)$ は全般に小さくなるが、高振動数での減少の度合いが大きい。また、破線 b ($M=7.5$, $d=100$ km) から1点鎖線 c ($M=6.5$, $d=100$ km) への変化は、マグニチュード M の減少によるものであるが、全振動数で比較的一様に $\hat{\alpha}_m(f)$ が減少している。次に、Fig. 12 (b) の回帰式からのばらつき $\sigma_{\log \hat{\alpha}_m}$ は、振動数軸上あまり大きく変動することはないが、1 Hz 付近で他の振動数に対する値よりややばらつきが大きくなっている。

b) 時間パラメーター $t_p(f)$

非正常パワースペクトルの継続時間の指標となる時間パラメーター $t_p(f)$ を、式 (12) を用いて回帰分析する。地震動の継続時間は、地震規模に大きく影響されるであろうし、また、伝播経路における反射・屈折・エネルギーの逸散により、震央距離にも依存すると考えられる。これより、 $t_p(f)$ の回帰分析に式 (12) の形を用いることとした。

$$\hat{t}_p(f) = P_0(f) + P_1(f) \cdot M + P_2(f) \log(d+c) \dots \dots \dots (12)$$

ここで、定数項 c は式 (11) と同様 $C=30$ km とした。

式 (12) 右辺の $\log(d+c)$ の代りに d を用いた回帰式についても検討したが、継続時間に相当する t_p が d に比例的に増加するより、大きい d の値に対しては t_p の増加率が鈍る方が合理的であろうこと、実際に上記2通りの場合について回帰分析を行うと $\log(d+c)$ を用いる方が重相関係数が大きくなったことから、式 (12) の形を用いることとした。

Table 4 および Fig. 13 に、式 (12) の回帰係数 $P_0(f)$, $P_1(f)$, $P_2(f)$ を示した。定数項 $P_0(f)$ は全

Table 4 Regression Coefficients $P_0(f)$, $P_1(f)$, $P_2(f)$ and Standard Deviation $\sigma_{t_p}(f)$

frequency (Hz)	$P_0(f)$	$P_1(f)$	$P_2(f)$	$\sigma_{t_p}(f)$ (sec)
0.13	-26.97	0.86	14.46	5.85
0.19	-30.93	1.15	16.36	6.92
0.25	-31.18	1.72	14.68	8.11
0.37	-26.40	0.63	14.86	5.76
0.55	-25.03	0.97	12.94	6.17
0.73	-14.06	0.98	6.79	3.71
0.97	-7.96	0.90	3.53	2.64
1.33	-7.78	1.33	1.81	1.87
1.87	-6.45	0.94	2.16	1.63
2.59	-7.30	1.22	1.72	2.18
3.67	-10.07	1.08	3.54	2.49
5.11	-9.83	0.20	6.08	2.48
7.03	-16.94	-1.25	14.85	3.67
10.03	-16.56	-1.94	17.12	4.56

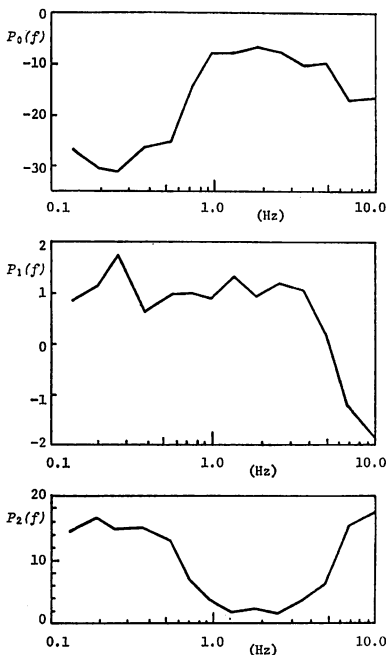


Fig. 13 Regression Coefficients $P_0(f)$, $P_1(f)$ and $P_2(f)$

体として負の値をとり、特に低振動数域 (0.7 Hz 程度以下) で大きく負の側に偏っているが、後述の $P_1(f)$, $P_2(f)$ との関連により、本研究で用いたデータの範囲では $\hat{\epsilon}_p(f)$ の値はすべて正となる。しかし、ここで得られた結果を式 (12) に用いた場合、 M , d が小さい場合には $\hat{\epsilon}_p(f)$ が負になることもあるから、3. (1) で述べたように、本解析の結果を適用する場合の M と d の範囲には注意を要する。次に、マグニチュードの係数 $P_1(f)$ は、5 Hz 程度以下の振動数域でほぼ一定値を示しており、この振動数域では非定常スペクトルの継続時間に対するマグニチュードの影響はほぼ一様と考えられ

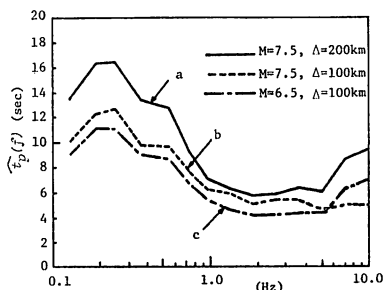
る。また、高振動数域 (6 Hz 程度以上) では $P_1(f)$ が負になっており、マグニチュードの影響としては矛盾しているようであるが、これについては $P_2(f)$ との関連で論ずる。

震央距離の係数 $P_2(f)$ は、低振動数域 (0.5 Hz 程度以下) で大きく、中振動数域 (0.5~6 Hz 程度) で小さいが、高振動数域 (6 Hz 程度以上) で再び大きな値をとる。低振動数域での $P_2(f)$ の大きな値は、地震波動では低振動数成分の分散性が大きいことを考慮すれば定性的にはうなずける。また、高振動数域で $P_2(f)$ が大きい値をとることはこの振動数域で $P_1(f)$ の値が小さいことと相補うものであり、モデル化の方法との関連で以下のような原因によるものと考えられる。

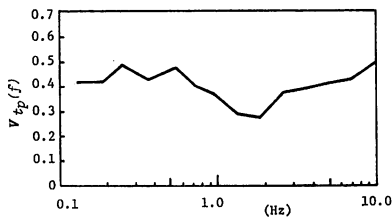
Fig. 2 の記録波形において、初期微動とみなせる部分は主として 5 Hz 以上の振動数の成分で構成されており、同図においても 5 Hz の成分の非定常パワースペクトルは、他の振動数成分より比較的早い時刻で立ち上がる。また、この振動数範囲の成分は、主要動に入っても勢力を保つ。これより、高振動数成分は、初期微動の影響によって、中振動数成分より実質上継続時間が長く評価される。初期の微動の継続時間は震央距離に支配されるから、高振動数域で $P_2(f)$ の値が大きくなったものと考えられる。このことと、上述のように、高振動数域で $P_1(f)$ が負の値をとることとは関連するものと思われる。すなわち、大きいマグニチュードに対しては、高振動数域に対する $P_2(f)$ の値が大きくなり過ぎ、これを補うために $P_1(f)$ の値が負になったものと考えられる。

以上の考察は、複雑な波動の集合である地震動の非定常スペクトルにおける時間特性を簡単な関数で表わすことの一つの限界を示すものと考えられる。その意味で、本研究の非定常スペクトルモデルにもなお改良の余地があるが、前節で、本シミュレーションモデルによって工学的に重要なパラメーターの再現性は十分であることが検証されているので、ここで明らかとなった問題点は今後の研究課題として、以下においてはこの回帰分析の結果をそのまま採用して議論を進めることとする。

Fig. 14 に、マグニチュードおよび震央距離を設定した場合の $\hat{\epsilon}_p(f)$ とデータのばらつき $V_{\hat{\epsilon}_p}(f)$ を示した。ただし、 $V_{\hat{\epsilon}_p}(f)$ は回帰式からの $t_p(f)$ の標準偏差を $M=7.5$, $d=100$ km としたときの $\hat{\epsilon}_p(f)$ で除した値である。**Fig. 14(a)** において、破線 b ($M=7.5$, $d=100$ km) と実線 a ($M=7.5$, $d=200$ km) とを比較すると、低振動数域 (0.5 Hz 程度以下) では震央距離の増加に対して $\hat{\epsilon}_p(f)$ が大きく増大し、また、一点鎖線 c ($M=6.5$, $d=100$ km) と破線 b とを比較すると、高振動数域 (5 Hz 程度以上) を除いてマグニチュードが 1.0 増加



(a) Regression Values of $t_p(f)$



(b) Coefficient of Variation $V_{t_p}(f)$

Fig. 14 Regression Values of $t_p(f)$ and Coefficient of Variation $V_{t_p}(f)$

することによって全般に $t_p(f)$ がほぼ 1 sec 程度増加することがわかる。また、Fig. 14(b) のばらつき $V_{t_p}(f)$ は、中振動数域で比較的小さいが、全体としては振動数によって大きな影響を受けない。

c) 時間パラメーター $t_s(f)$

シミュレーションモデルの非正常スペクトルの立ち上がり時刻 $t_s(f)$ は主として震央距離に支配されるものと考えられる。したがって、ここでは式 (13) に示されるように震央距離線と線形関係にあるとして時間パラメーター $t_s(f)$ の回帰分析を行った。

$$\hat{t}_s(f) = S_0(f) + S_1(f) \cdot d \dots\dots\dots (13)$$

ただし、各振動数成分の絶対的な立ち上がり時刻よりも相対的な時間差が重要であるから、各地震記録から算出

される 166 個の振動数に対する t_s の平均値との差を改めて t_s とし、これに対して回帰分析を行って式 (13) の \hat{t}_s を求めた。

Table 5 Regression Coefficients $S_0(f)$, $S_1(f)$ and Standard Deviation $\sigma_{t_s}(f)$

frequency (Hz)	$S_0(f)$	$S_1(f)$	$\sigma_{t_s}(f)$ (sec)
0.13	-0.15	0.009	2.68
0.19	-0.25	0.013	3.25
0.25	-0.88	0.027	5.12
0.37	-0.25	0.021	4.37
0.55	-0.12	0.019	2.77
0.73	-0.08	0.018	2.73
0.97	-0.07	0.028	3.14
1.33	0.23	0.023	3.09
1.87	0.14	0.020	2.69
2.59	-0.35	0.022	2.79
3.67	0.12	0.012	3.14
5.11	0.08	0.009	2.39
7.03	0.20	-0.009	2.20
10.03	-0.33	-0.015	2.94

Table 5 および Fig. 15 に、回帰係数 $S_0(f)$, $S_1(f)$ を示した。定数項 $S_0(f)$ は、振動数軸上での変動が小さくないが全体的に絶対値が比較的

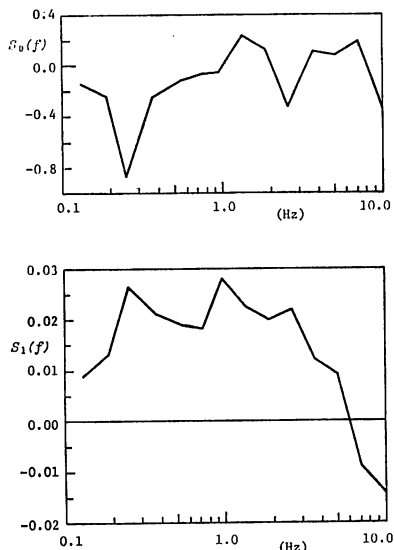


Fig. 15 Regression Coefficients $S_0(f)$ and $S_1(f)$

小さい。これは、 $\hat{t}_s(f)$ として 166 個の振動数成分の平均値からの時間差を対象としているためであり、厳密には $S_0(f)$ はすべて 0 となるべき性質のものである。一方、震央距離の係数 $S_1(f)$ は、全般的には中振動数域で大きく、低・高振動数域に向かって値が減少している。高振動数域 (6 Hz 程度以上) で $S_1(f)$ が負の値を示すのは、この振動数域での $t_s(f)$ が平均値より小さくなることを表わしている。Fig. 16 に、震央距離 d を 100 km および 200 km としたときの $\hat{t}_s(f)$ とデータの回帰式からの標準偏差 $\sigma_{t_s}(f)$ を示した。ただし、比較を容易にするため $\hat{t}_s(f)$ の最小値を両者とも 0 に移動させた値 $\hat{t}_s'(f)$ を示した。震央距離の増加に伴い各振動数成分の非正常スペクトルの立ち上がり時刻の差が増大する様子をはっきりわかる。データの回帰式からの標準偏差 $\sigma_{t_s}(f)$ は、0.2~0.4 Hz 程度の範囲で若干大きくなっているが、他の振動数域でほぼ一定値を示している。

立ち上がり時刻 $t_s(f)$ は、振動数 f なる成分の波動が到着する時刻とも考えられるが、非正常スペクトルを用いて強震記録の波動特性を論ずる場合には、注目する振動数成分のパワーがピーク値をとる時刻と地震波の位相速度の関係が論じられるのが普通である。そこで、非正常パワースペクトル $G_x(t, 2\pi f)$ が最大値 $\alpha_m^2(f)$ をとる時刻 $t_{am}(f)$ (式 (8)) に注目し、回帰式 (12), (13) から得られる。

$$\hat{t}_{am}(f) = \hat{t}_s(f) + \hat{t}_p(f) \dots\dots\dots (14)$$

について考察する。マグニチュード 7.5、震央距離 100 km および 200 km の場合について、 $\hat{t}_{am}(f)$ の値を Fig. 17 にプロットした。この結果によると、 $f > 0.25$ Hz

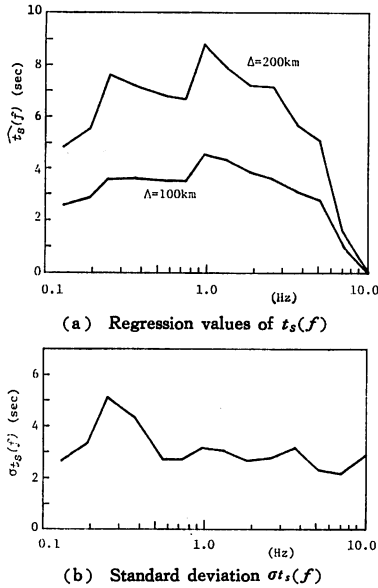


Fig. 16 Regression Values of $t_s(f)$ and Standard Deviation $\sigma_{t_s}(f)$

では振動数の増加とともに $t_{am}(f)$ は減少し、高振動数成分ほど速やかにピークに達するという通常観測される強震地震動の性質を反映している。また $f < 0.25$ Hz では逆に低振動数ほど $t_{am}(f)$ が小さく、表面波の分散性の特徴と合致している。強震記録から地震波の位相速度を求めた例としては、サンフェルナンド地震に関する土岐²⁷⁾ の計算結果があり、分散性表面波が卓越するとみられる振動数は $f < 0.3$ Hz と求められている。ただし、ここに得られた統計解析の結果が地震動の性質を説明するものではないことはもちろんで、むしろ、本研究で用いたモデルにおいて、非定常スペクトルの時間変動を比較的簡単な関数で置き換えたにもかかわらず、強震地震動がもつこれらの非定常特性が保持されていることが工学的に重要であろう。

d) モデルパラメーターの相関係数

モデルパラメーター $\alpha_m(f)$, $t_p(f)$, $t_s(f)$ は、Fig. 12, 14, 16 にみられるように回帰式のまわりでかなりばらついている。これら

のばらつきからその分布形を仮定し、乱数発生試行によりパラメーターのサンプル値を得る場合には、パラメーター相互の相関を考慮すべきであろう。このような理由からパラメーター間の相関係数 $\rho_{\log \alpha_m, t_p}$, ρ_{t_p, t_s} , $\rho_{t_s, \log \alpha_m}$ を求めた。これらの値を Table 6 および Fig. 18, 19, 20 に示した。図中の直線(破線)は、振動数軸(対数軸)上で最小自乗法により近似したもので、後に示すサンプル地震動の発生過程ではこれらの近似値を用いた。近似式は次のようになった。

$$\rho_{\log \alpha_m, t_p}(f) = 0.208 - 0.595 \log f \quad \dots\dots (15)$$

$$\rho_{t_p, t_s}(f) = 0.552 - 0.273 \log f \quad \dots\dots (16)$$

$$\rho_{t_s, \log \alpha_m}(f) = 0.334 - 0.531 \log f \quad \dots\dots (17)$$

それぞれの相関係数は、いずれも振動数軸上で減少する傾向をもっており、低振動数成分ほどモデルパラメーターの間で正の相関が強いことがわかる。

(3) マグニチュードと震央距離を与えた場合の地震動の予測

これまでの解析結果を基に、マグニチュードおよび震央距離を与えた場合の非定常地震動の予測モデルを作成

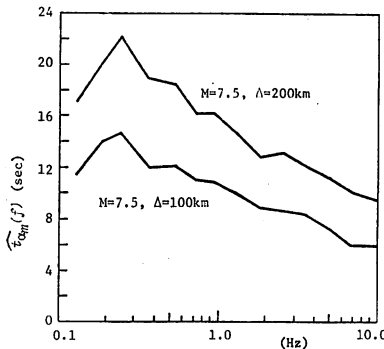


Fig. 17 Regression Values of $t_{am}(f)$

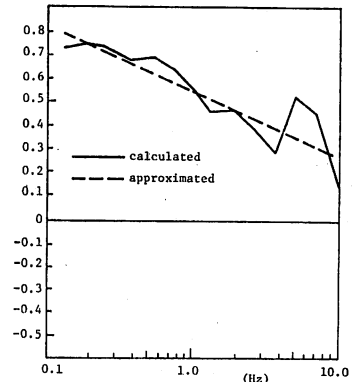


Fig. 19 Correlation Coefficient $\rho_{t_p, t_s}(f)$

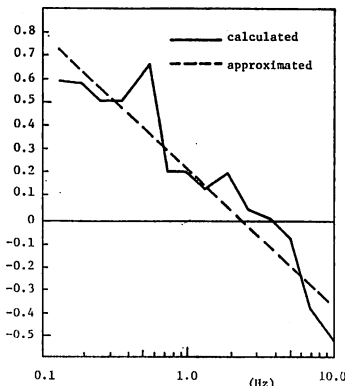


Fig. 18 Correlation Coefficient $\rho_{\log \alpha_m, t_p}(f)$

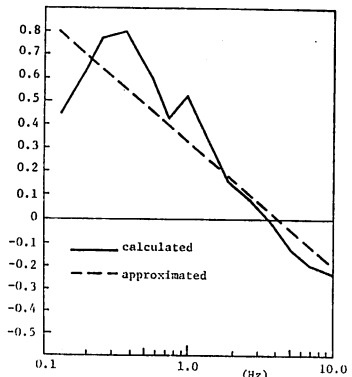


Fig. 20 Correlation Coefficient $\rho_{t_s, \log \alpha_m}(f)$

Table 6 Correlation Coefficients between Model Parameters

frequency (Hz)	$\rho_{\log \alpha_m, t_p}$	ρ_{t_p, t_s}	$\rho_{t_s, \log \alpha_m}$
0.13	0.60	0.73	0.45
0.19	0.58	0.74	0.61
0.25	0.50	0.73	0.77
0.37	0.51	0.68	0.79
0.55	0.66	0.69	0.60
0.73	0.21	0.65	0.42
0.97	0.21	0.58	0.52
1.33	0.14	0.45	0.35
1.87	0.20	0.47	0.16
2.59	-0.05	0.40	0.09
3.67	-0.09	0.29	-0.01
5.11	-0.18	0.53	-0.12
7.03	-0.38	0.45	-0.20
10.03	-0.52	0.11	-0.23

する。マグニチュードおよび震央距離を設定すると、式(11),(12),(13)より沖積地盤におけるモデルパラメータの平均的な値が得られる。しかし、実際の地震動では Fig. 12(b), 14(b), 16(b) でみたようにモデルパラメータが回帰式のまわりでばらついている。そこで、ここでは3つのパラメータはそれぞれ対数正規分布に従うと仮定して、パラメータ間の相関を考慮した地震動の予測モデルを作成した。このモデルを用いて、モンテカルロ法により、マグニチュードと震央距離を与えた場合に沖積地盤で予測されるサンプル地震動群を発生させることができる。

以下に、予測モデルを用いてサンプル地震動を発生させる手順を述べる。なお、対数正規確率変数を X とし、分布のパラメータを $\lambda = E(\ln X)$, $\zeta^2 = \text{Var}(\ln X)$ とおくと、 X の平均値 μ_X と標準偏差 σ_X の間には次の関係がある²⁰⁾。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \ln \mu_X - \frac{1}{2} \zeta^2 \\ \zeta^2 &= \ln \left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

また、 X, Y, Z が同時正規分布に従う場合、 $X=x$ が与えられた場合の Y , および $X=x, Y=y$ が与えられた場合の Z に関する条件付平均値と条件付分散は以下のように表わされる²⁰⁾。

$$\left. \begin{aligned} E(Y|X=x) &= \mu_Y + \rho_{X,Y} \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \right) (x - \mu_X) \\ \text{Var}(Y|X=x) &= \sigma_Y^2 (1 - \rho^2_{X,Y}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\left. \begin{aligned} E(Z|X=x, Y=y) &= \mu_Z + \rho_{Z,X} \left(\frac{\sigma_Z}{\sigma_X} \right) (x - \mu_X) \\ &\quad + \rho_{Z,Y} \left(\frac{\sigma_Z}{\sigma_Y} \right) (y - \mu_Y) \\ \text{Var}(Z|X=x, Y=y) &= \sigma_Z^2 (1 - \rho^2_{Z,X} - \rho^2_{Z,Y}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

以下のサンプル地震動作成のための乱数発生においては、これらの関係を用いる。

① パラメータのサンプル値は回帰分析で対象とした14個の振動数に対して乱数を用いて求めることとし、サンプル地震動の合成に必要な166の振動数については、適宜補完により求める。

② はじめに強度パラメータ $\alpha_m(f)$ を決定する。個々の地震動の $\alpha_m(f)$ は、その観測地点の地盤構成の影響を受けて振動数方向で変動し、平均値 $\hat{\alpha}_m(f)$ とは当然異なる形状を示す。個々の地盤条件を $\alpha_m(f)$ の値に反映することは重要な課題であるが、現段階では沖積地盤一般におけるサンプル地震動の発生を目標として、 $\alpha_m(f)$ の f 軸方向の変動は回帰式 $\hat{\alpha}_m(f)$ と同一と仮定して、その絶対値のみを乱数発生により決定する。

すなわち、Fig. 12 (b) の $\sigma_{\log \alpha_m}(f)$ を振動数軸(対数軸)上で平均した値 $\sigma'_{\log \alpha_m} = 0.303$ とし、 $\sigma'_{\log \alpha_m}$ および式(11)の $\log \hat{\alpha}_m(f)$ をそれぞれ式(18)の ζ, λ として対数正規乱数を1回発生させる。この乱数を各振動数一律に $\log \hat{\alpha}_m(f)$ に加算したものを $\log \alpha_m(f)$ のサンプル値として、これより $\alpha_m(f)$ のサンプル値を算出する。

③ 継続時間のパラメータ $t_p(f)$ のサンプル値を求めるため、はじめに式(19)において $\mu_Y = \hat{t}_p(f)$, $\sigma_Y = \sigma_{t_p}$, $\mu_X = \log \hat{\alpha}_m(f)$, $\sigma_X = \sigma_{\log \alpha_m}$, $\rho_{X,Y} = \rho_{\log \alpha_m, t_p}$, $x = \log \alpha_m(f)$ のサンプル値として得られる条件付平均および分散を式(18)右辺の μ_X, σ_X^2 に代入する。これより算出される λ, ζ をパラメータとする対数正規乱数を各振動数について独立に発生させ、これらの値を $t_p(f)$ のサンプル値とする。

④ 上記③と同様にして $t_s(f)$ のサンプル値を発生させる。ただし、 $t_s(f)$ に関しても異なる振動数での値は独立とする。また、この場合は、条件付平均と分散は式(20)から求められ、 x には $\log \alpha_m(f)$, y には $t_p(f)$ を対応させるものとする。

以上の乱数発生過程において、式(19),(20)は $t_p(f)$, $t_s(f)$ が正規分布に従う場合に相当するが、ここでは簡単のため、同式から得られる平均値と分散を、近似的に対数正規乱数の発生に用いるものとした。

上記の乱数発生試行および直線補間により得られたモデルパラメータのサンプル値 $\alpha_m(f)$, $t_p(f)$, $t_s(f)$ を用いて式(1)によりサンプル地震動を発生させることができる。

(4) サンプル地震動

マグニチュードおよび震央距離を設定して式(11)~(13)より得られるモデルパラメータの回帰値 $\hat{\alpha}_m(f)$, $\hat{t}_p(f)$, $\hat{t}_s(f)$ および 3.(3) で示した手順に従って得

られるそれらのサンプル値 $\alpha_m(f)$, $t_p(f)$, $t_s(f)$ の一例を Fig. 21 に示した. 設定したマグニチュードおよび震央距離はそれぞれ $M=7.5$, $\Delta=100$ km である. これらのパラメーターのサンプル値を用いて式 (1) により発生させた地震動を Fig. 22 に示した. 同図には, FFT を用いた積分による速度および変位波形をもあわせて示してある. 加速度波形では, 立ち上がり部分における高振動数成分の卓越, 主要動から減衰過程にいたる中・低振動数成分の漸増の様子がみられる. 速度および変位波形でも同様に時間の経過とともに高振動成分が減衰し波形の変化がしだいになめらかになっているのが認められる. 同じく $M=7.5$, $\Delta=100$ km について 6 個のサンプル地震動を発生させた場合に, 乱数発生により得られた強度パラメーター $\alpha_m(f)$ と回帰値 $\hat{\alpha}_m(f)$ との比 $\alpha_m(f)/\hat{\alpha}_m(f)$ と, サンプル地震動の最大加速度 A_{max} および全パワー T_P , さらに最大速度 V_{max} および最大変位 D_{max} との関係を Fig. 23 に示した. それぞれの

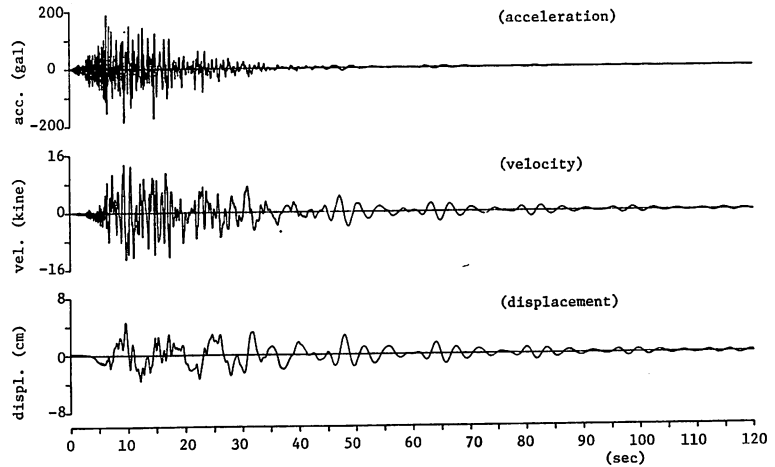


Fig. 22 Sample Accelerogram, Velocity and Displacement ($M=7.5$, $\Delta=100$ km)

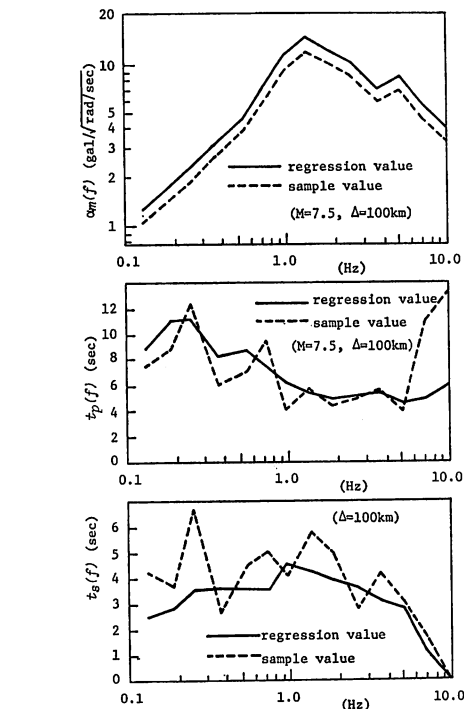


Fig. 21 Regression and Sample Values of Model Parameters

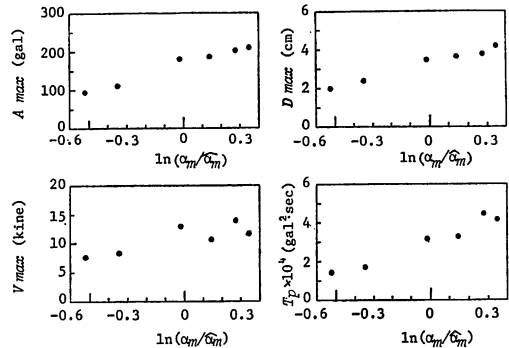


Fig. 23 Earthquake Intensity Parameters in Sample Accelerograms ($M=7.5$, $\Delta=100$ km)

値の範囲は,

$$\alpha_m(f)/\hat{\alpha}_m(f) = 0.59 \sim 1.42$$

$$A_{max} = 98.1 \sim 200.8 \text{ (gal)}$$

$$V_{max} = 7.6 \sim 13.7 \text{ (kine)}$$

$$D_{max} = 2.0 \sim 4.2 \text{ (cm)}$$

$$T_P = 1.42 \sim 4.49 \times 10^4 \text{ (gal}^2 \cdot \text{sec)}$$

であり, 沖積地盤 (第3種地盤) という条件のみでは, 地震動の性質にはこの程度のばらつきがあることになる. さて, Fig. 24 に $M=7.5$, $\Delta=200$ km に対するサンプル地震動とその速度および変位波形の一例を示した. 震央距離が 100 km の例 (Fig. 22) と比較すると, 振動数特性等の詳細な変化までは見出せないが全体的に強度の減少が認められる. さらに, Fig. 25 は $M=6.5$, $\Delta=100$ km の一例であるが, $M=7.5$, $\Delta=200$ km の例 (Fig. 24) よりもさらに全体的に強度が減少し, 継続時間も短くなっている.

次に, マグニチュードおよび震央距離の組合せとして上記の3組を設定し, それぞれに対して6成分のサンプル地震動を発生させ結果を比較する. それぞれのサンプ

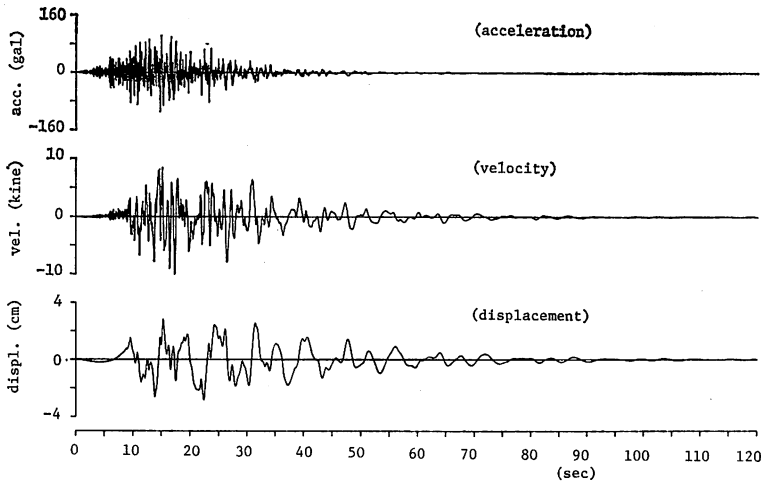


Fig. 24 Sample Accelerogram, Velocity, and Displacement (M=7.5, d=200 km)

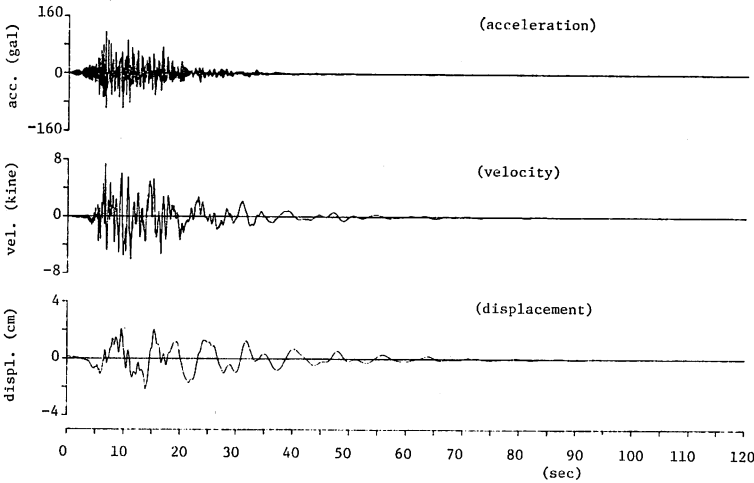


Fig. 25 Sample Accelerogram, Velocity and Displacement (M=6.5, d=100 km)

Table 7 Mean of Earthquake Intensity Parameters in Groups of Sample Accelerograms

	$E[A_{max}]$ (gal)	$E[V_{max}]$ (kine)	$E[D_{max}]$ (cm)	$E[T_P] \times 10^4$ (gal ² ·sec)
j=1 (M=7.5, d=100 km)	164.0	10.8	3.2	3.03
j=2 (M=7.5, d=200 km)	102.2	9.4	2.9	2.03
j=3 (M=6.5, d=100 km)	100.8	6.3	1.9	0.95

Table 8 Comparison of Earthquake Intensity Parameters in Groups of Sample Accelerograms

	$\frac{E_j[A_{max}]}{E_i[A_{max}]}$	$\frac{E_j[V_{max}]}{E_i[V_{max}]}$	$\frac{E_j[D_{max}]}{E_i[D_{max}]}$	$\frac{E_j[T_P]}{E_i[T_P]}$
j=2	0.517	0.629	0.635	0.380
	$\frac{E_2[T_P]}{E_1[T_P]} < \frac{E_2[A_{max}]}{E_1[A_{max}]} < \frac{E_2[V_{max}]}{E_1[V_{max}]} < \frac{E_2[D_{max}]}{E_1[D_{max}]}$			
j=3	0.517	0.502	0.453	0.240
	$\frac{E_3[T_P]}{E_1[T_P]} < \frac{E_3[D_{max}]}{E_1[D_{max}]} < \frac{E_3[V_{max}]}{E_1[V_{max}]} < \frac{E_3[A_{max}]}{E_1[A_{max}]}$			

ル地震動群を次のように表現する。

- グループ1：
M=7.5, d=100 km
- グループ2：
M=7.5, d=200 km
- グループ3：
M=6.5, d=100 km

各グループにおける最大加速度、最大速度、最大変位および全パワーの平均値を、jをグループの指標として(j=1, 2, 3), $E_j[A_{max}]$, $E_j[V_{max}]$, $E_j[D_{max}]$, $E_j[T_P]$ と表し、各グループのこれらの値およびグループ1に対するグループ2, 3の地震動強度パラメーター(A_{max} , V_{max} , D_{max} , T_P)の平均的減少率をTable 7, 8に示した。全パワーを除くと、震央距離の増減はグループの最大加速度、速度、変位の順に大きく影響し、マグニチュードの増減は逆に、最大変位、速度、加速度の順に大きく影響することがわかる。さらに、各グループの平均的な地震強度パラメーターの妥当性の検討のため、後藤・亀田・橋本⁵⁾の行った補正加速度記録から得られる地震強度パラメーターのM-d回帰分析結果と比較した。先の研究に

よれば、地震強度パラメーターは次のように与えられる⁵⁾。

$$A_{max} = 10^{(1.88+0.184M)/d^{0.525}} \dots\dots(21)$$

$$V_{max} = 10^{(0.20+0.194M)/d^{0.295}} \dots\dots(22)$$

$$D_{max} = 10^{(-1.26+0.300M)/d^{0.246}} \dots\dots(23)$$

$$T_P = 10^{(2.34+0.459M)/d^{0.653}} \dots\dots(24)$$

先に示した各グループのマグニチュードおよび震央距離を式(21)~(24)に代入して得られる地震強度パラメーターの回帰値をTable 9に示した。Table 7の値

Table 9 Regression Values⁵⁾ of Earthquake Intensity Parameters

	A_{max} (gal)	V_{max} (kine)	D_{max} (cm)	$T_P \times 10^4$ (gal ² ·sec)
M=7.5 d=100 km	162.2	11.4	3.2	5.55
M=7.5 d=200 km	112.7	9.5	2.7	1.89
M=6.5 d=100 km	106.2	7.3	1.6	1.04

と比較すると、本研究で得られたサンプル地震動の各グループの平均的な地震強度が回帰値と大差なく、本研究で提案した予測モデルの妥当性を裏付けるものと考えられる。

4. 結 語

本研究では、マグニチュードおよび震央距離が与えられた場合の、非弾性応答解析用非正常地震の予測モデルを得ることを目的として、強震地震動の非正常過程によるモデル化の手法を提案し、モデルパラメーターとマグニチュードおよび震央距離との関係を推定して予測モデルの作成法を提案した。得られた成果を列挙すると以下のとおりである。

(1) 強震地震動の非正常パワースペクトルの特性を、強度パラメーター $\alpha_m(f)$ 、時間パラメーター $t_p(f)$ 、 $t_s(f)$ でモデル化する非正常地震動のシミュレーションモデルを提案し、実地震動 45 成分と比較してシミュレーションモデルの妥当性を検討した。その結果、最大加速度および加速度全パワーは平均的に実地震動によく一致し、また、弾塑性系の降伏変位スペクトルおよび全履歴エネルギーも系の固有振動数にかかわらず平均的に実地震動によく一致することがわかった。

(2) わが国の沖積地盤で得られた主要な強震加速度波形に計器補正を施した記録 45 成分を用いて、強度パラメーター $\alpha_m(f)$ 、時間パラメーター $t_p(f)$ についてはマグニチュードおよび震央距離に対する回帰分析、時間パラメーター $t_s(f)$ については震央距離に対する回帰分析を行い、各振動数でのモデルパラメーターとマグニチュードおよび震央距離との関係を推定した。推定式の定性的傾向は、従来得られている地震学上の知見とよく対応している。

(3) 回帰式からのデータのばらつきおよびパラメーター相互の相関を考慮して、マグニチュードおよび震央距離が与えられた場合にわが国の沖積地盤上で予測される地震動を作成するための統計モデルを提案した。この結果を用いてマグニチュードおよび震央距離を具体的に設定し、サンプル地震動群を発生させ、実地震記録の統計解析の結果と比較して予測モデルの妥当性を確かめた。

従来、模擬地震波の研究は実地震動を再現するためのシミュレーションモデルの開発に重点があったようであるが、本研究ではこれを一歩進めてマグニチュードと震央距離を与えて将来の地震動を推定するための予測モデルを旨とした。本研究で提案したモデルは、非弾性応答解析にも用いるものである。ただし、本文中でも述べ

たように、本研究の結果は沖積地盤（第3種地盤）で得られる記録全般を論じたものであり、特定の地盤条件が与えられた場合の地震動予測については本研究の結果をさらに拡張する必要があり、現在この点について研究中である。また、ここで用いた強震記録はすべて沖積地盤上のものであり、他の種類の地盤における予測モデルを得るためにはそれらの地盤上での多数の記録に対して同様の解析をすべきであろう。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、波動の伝播特性について有意義な助言を賜った京都大学防災研究所 土岐憲三教授に深謝の意を表する次第である。さらに、本研究における数値計算は、京都大学大型計算機センターの FACOM M-190 によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Donovan, N.C. : A Statistical Evaluation of Strong Motion Data Including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake, Proc. 5 WCEE, Rome, Vol. 1, pp. 1252~1261, 1974.
- 2) Esteve, L. and Villaverde, R. : Seismic Risk, Design Spectra and Structural Reliability, Proc. of 5 WCEE, Vol. 2, pp. 2586~2596, 1974.
- 3) McGuire, R.K. : Seismic Structural Response Risk Analysis, Including Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance, Structures Publication No. 399, Dept. of Civil Engrg., Massachusetts Institute of Technology, Aug., 1974.
- 4) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭：わが国の地盤上で得られた加速度記録の特性，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第1部 (I-162)，pp. 304~305，昭和52年10月。
- 5) 後藤尚男・亀田弘行・橋本 修：地震加速度・速度・変位の $M-d$ 回帰分析，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第1部 (I-200)，pp. 386~387，昭和53年9月。
- 6) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭：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，第275号 pp. 29~40，1978年7月。
- 7) Housner, G.W. : Properties of Strong Motion Earthquakes, Bull. of Seism. Soc. of America, Vol. 45, No. 3, pp. 197~218, 1955.
- 8) Tajimi, H. : A Statistical Method of Determining the Maximum Response of Building Structure During an Earthquake, Proc. of 2 WCEE, Vol. II, Tokyo, pp. 781~797, 1960.
- 9) Shinozuka, M. and Sato, Y. : Simulation of Nonstationary Random Process, J. of Engrg. Mech. Dev., ASCE, No. EM 1, pp. 11~40, Feb. 1967.
- 10) Amin, M. and Ang, H.S. : Nonstationary Stochastic Model of Earthquake Motions, J. of Engrg. Mech. Dev., ASCE, Vol. 94, No. EM 2, pp. 559~583, Apr. 1968.
- 11) Beaudet, P.R. : Synthesis of Nonstationary Seismic Signals, Bull. of Seism. Soc. of America, Vol. 60, No. 5, pp. 1615~1624, Oct. 1970.
- 12) Saragoni, G.R. and Hart, G.C. : Simulation of Artificial Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 249~267, Vol. 2, 1974.
- 13) 後藤尚男・北浦 勝：地震動の非正常スペクトル密度と

- その模式化, 土木学会論文報告集, 第 236 号, pp. 47~58, 1975 年 4 月.
- 14) 星谷 勝・磯山龍二: 多次元非定常確率過程による地震動シミュレーション, 土木学会論文報告集, 第 269 号, pp. 41~52, 1978 年 1 月.
 - 15) Kameda, H.: Stochastic Process Model of Strong Earthquake Motions for Inelastic Structural Response, U.S. Southeast Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection, Manila, Sep. 1977.
 - 16) Trifunac, M.D.: Response Envelope Spectrum and Interpretation of Strong Earthquake Ground Motion, Bull. of Seism. Soc. of America, Vol. 61, pp. 343~356, April 1971.
 - 17) 亀田弘行: 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 235 号, pp. 55~62, 1975 年 3 月.
 - 18) 星谷 勝・千葉利晃・草野直幹: 地震加速度波の非定常特性とシミュレーション, 土木学会論文報告集, 第 245 号, pp. 51~58, 1976 年 1 月.
 - 19) 若菜弘之・吉田 裕・澤 正: 実地震記録の非定常パワースペクトル分析と再構成, 土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (I-165), pp. 310~311, 昭和 52 年 10 月.
 - 20) Housner, G.W.: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of 1WCEE, 5-1~5-13, 1956.
 - 21) 加藤 勉・秋山 宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第 235 号, pp. 9~18, 昭和 50 年 9 月.
 - 22) 日本道路協会: 道路橋耐震設計指針・同解説, 昭和 47 年 4 月.
 - 23) 建設省土木研究所: 土木研究所資料, 317 号, 318 号, 461 号, 876 号, 877 号, 1072 号, 昭和 43 年 3 月~昭和 50 年 12 月.
 - 24) 運輸省港湾技術研究所: 港湾技研資料, 80 号, 98 号, 100 号, 116 号, 136 号, 160 号, 181 号, 202 号, 236 号, 250 号, 昭和 44 年 6 月~昭和 51 年 12 月.
 - 25) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西直人: デジタルフィルターによる SMAC-B 2 型加速度計記録の補正について, 土木学会論文報告集, 第 277 号, 昭和 53 年 8 月.
 - 26) 伊藤 学・亀田弘行訳: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 昭和 52 年 6 月.
 - 27) 土岐憲三: 強震加速度記録による位相速度の検出, 第 4 回地震工学シンポジウム概要集, pp. 265~273, 1975 年. (1978.10.23・受付)
-

Prediction of Strong Earthquake Motions by Evolutionary Process

Hisao GOTO*, Hiroyuki KAMEDA** and Masata SUGITO***

Published in the Proc. of JSCE, No. 286, June 1979, pp. 37-51 (In Japanese).

*Dr. Eng., Professor, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto

**Dr. Eng., Associate Professor, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto

***M. Eng., Research Associate, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto

Introduction

This study deals with a prediction model of strong earthquake motions for given values of magnitude and epicentral distance.

First the simulation model is introduced by representing the time variation of the evolutionary spectra of earthquake motion by a simple time function characterized by three frequency-dependent model parameters representing the intensity, duration and starting time for each frequency component. Using 45 accelerograms recorded on alluvial grounds in Japan, validity of the model for the purpose of seismic design is demonstrated for the peak acceleration, total power, as well as for the deformation spectra and hysteretic energy of elastoplastic systems. Then the frequency-dependent model parameters are estimated from regression on magnitude and epicentral distance. The prediction model is proposed from which sample accelerograms and corresponding velocity and displacement for given magnitude and distance can be generated.

Modeling of Strong Earthquake Motions by Evolutionary Process

Using the evolutionary process, the earthquake acceleration is represented by

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2G_x(t, \omega_k)} \Delta\omega \cos(\omega_k t + \phi_k) \dots (1)$$

in which $G_x(t, \omega_k)$ =evolutionary power spectrum of $x(t)$ for time t and frequency ω , ϕ_k =independent phase angle distributed randomly over $0 \sim 2\pi$.

The time varying function as illustrated in Fig. 1 is adopted for the model of $G_x(t, \omega_k)$. The parameters $t_s(f)$, $t_p(f)$, and $\alpha_m(f)$ are determined in the following manner so that the model spectrum maintain the basic properties of the evolutionary power spectrum of the recorded accel-

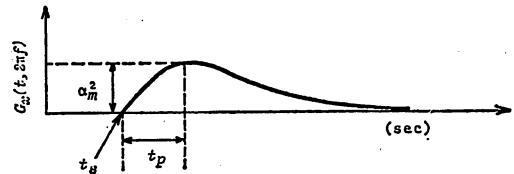


Fig. 1 Time-varying function.

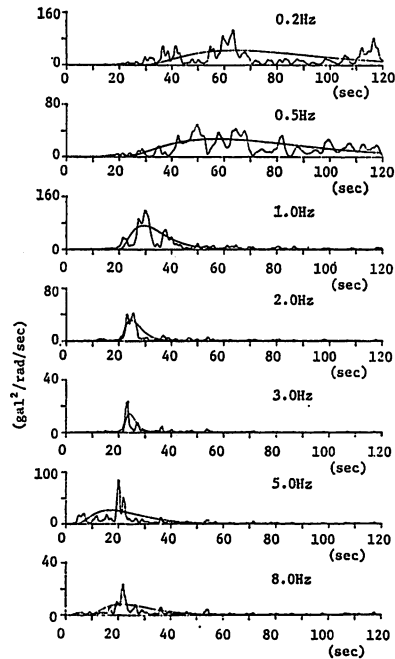


Fig. 2 Recorded and simulated evolutionary power spectra (S-235EW, Aomori).

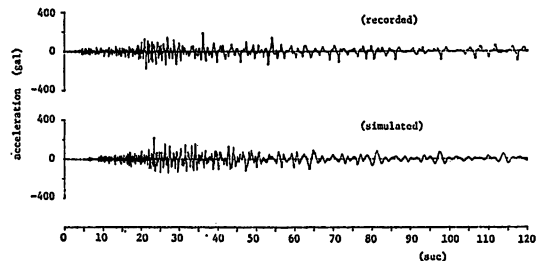


Fig. 3 Recorded and simulated accelerograms (S-235EW, Aomori).

elogram. The starting time $t_s(f)$ is defined as the time at which the evolutionary spectrum $G_y(t, \omega)$ of the corresponding recorded accelerogram $y(t)$ exceeds 0.1 times its peak value for the first time. In determining $t_p(f)$ and $\alpha_m(f)$, equate the areas under $\{G_x(t, \omega)\}^{1/2}$, and $\{G_y(t, \omega)\}^{1/2}$ and also equate their first moments about the

time origin.

Typical example of recorded and simulated evolutionary spectra are shown in Fig. 2. Using these parameters, simulated accelerograms are obtained from Eq. 1. In Fig. 3 examples of recorded and simulated accelerograms are shown.

Simulation Error

The following parameters may be used as a measure of error in the simulation model.

$$\left. \begin{aligned} r_a &= \ln(A_s/A_r), & r_p &= \ln(P_s/P_r), \\ r_d &= \ln(D_s/D_r), & r_e &= \ln(E_s/E_r). \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

in which A_s and A_r are the peak acceleration of simulated and recorded accelerograms, P_s and P_r are their total powers. The yield deformation and the hysteretic energy of elastoplastic systems with 2% viscous damping corresponding to various values of the ductility factor μ for simulated and recorded accelerograms are denoted, respectively, by $D_s, D_r, E_s,$ and E_r . Mean simulation errors \bar{r}_a, \bar{r}_p and their standard deviations

$\sigma_{r_a}, \sigma_{r_p}$ are as follows.

$$\begin{aligned} \bar{r}_d &= 0.063, & \bar{r}_p &= 0.018, \\ \sigma_{r_d} &= 0.333, & \sigma_{r_p} &= 0.247. \end{aligned}$$

Fig. 4 shows the mean simulation errors \bar{r}_d and \bar{r}_e . Their standard deviations σ_{r_d} and σ_{r_e} are shown in Fig. 5. Note that the mean simulation error \bar{r}_d and \bar{r}_e do not depend very much on the ductility factor and they are fairly close to zero along the frequency axis.

Regression of Frequency- Dependent Model Parameters on Magnitude and Epicentral Distance

Using the following equations, the model parameters are estimated by means of regression on magnitude M and epicentral distance Δ for developing a statistical prediction model of earthquake motion.

$$\log \hat{\alpha}_m(f) = B_0(f) + B_1(f)M - B_2(f) \log(\Delta + c) \dots\dots\dots (3)$$

$$\hat{t}_p(f) = P_0(f) + P_1(f)M + P_2(f) \log(\Delta + c) \dots\dots\dots (4)$$

$$\hat{t}_s(f) = t_s(f) - \bar{t}_s = S_0(f) + S_1(f)\Delta \dots\dots\dots (5)$$

in which the constant term c is fixed as $c=30$ km; \bar{t}_s is the average of $t_s(f)$ over the frequency axis. Figs. 6, 7, and 8 show examples of the model parameters for some combinations of the magnitude and distance. The standard deviations $\sigma_{\log \alpha_m}(f)$, the coefficient of variation $V_{t_p}(f)$, and the standard deviation $\sigma_{t_s}(f)$ are also shown in these figures.

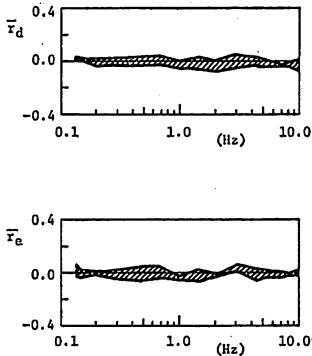


Fig. 4 Mean of simulation error in deformation and hysteretic energy spectra.

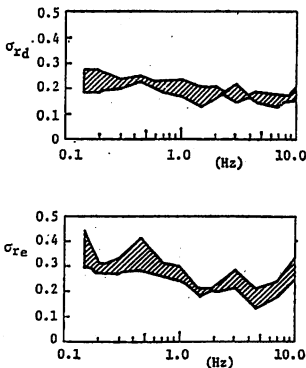
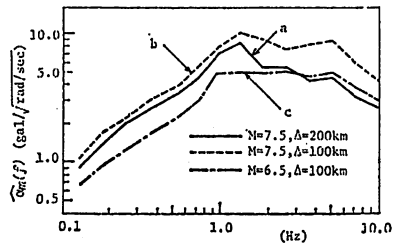
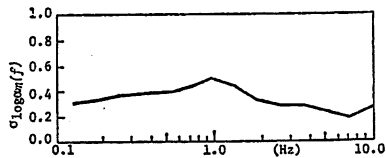


Fig. 5 Standard deviation of simulation error in deformation and hysteretic energy spectra.



(a) Regression values of $\alpha_m(f)$



(b) Standard deviation $\sigma_{\log \alpha_m}(f)$

Fig. 6 Regression values of $\alpha_m(f)$ and standard deviation $\sigma_{\log \alpha_m}(f)$.

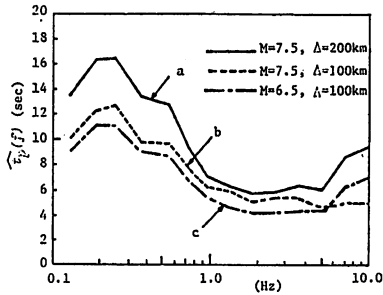
Statistical Prediction of Nonstationary Earthquake Motion

The procedure for generating sample ground motion is as follows.

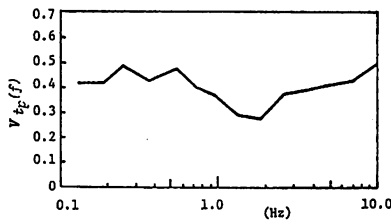
(1) Sample values of $\alpha_m(f)$ for each frequency are determined using a single lognormal random number to be multiplied by the result of regression in Eq. (3).

(2) Sample values of $t_p(f)$ are determined for each frequency using lognormal random numbers with consideration of correlation coefficient between $\log \alpha_m(f)$ and $t_p(f)$.

(3) Sample values of $t_s(f)$ are determined for each frequency using lognormal random numbers with consideration of correlation coefficients between $\log \alpha_m(f)$ and $t_s(f)$, and also between $t_p(f)$ and $t_s(f)$.



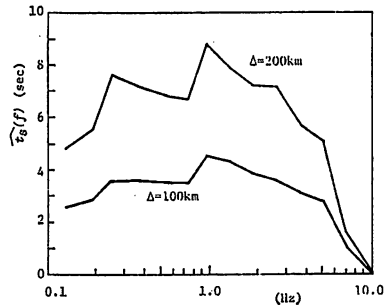
(a) Regression Values of $t_p(f)$



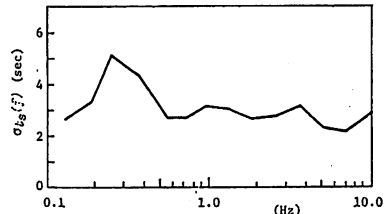
(b) Coefficient of Variation $V_{t_p}(f)$

Fig. 7 Regression values of $t_p(f)$ and coefficient of variation $V_{t_p}(f)$.

Fig. 9 shows a sample accelerogram and corresponding velocity and displacement for magnitude $M=7.5$ and distance $\Delta=100$ km.



(a) Regression values of $t_s(f)$



(b) Standard deviation $\sigma_{t_s}(f)$

Fig. 8 Regression values of $t_s(f)$ and standard deviation $\sigma_{t_s}(f)$.

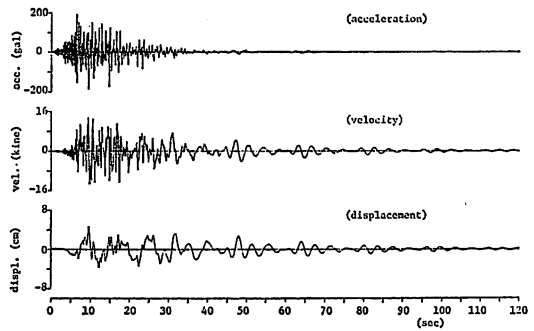


Fig. 9 Sample accelerogram, velocity and displacement ($M=7.5$, $\Delta=100$ km).