

(株) 大林組
京都大学防災研究所
京都大学防災研究所

江尻譲嗣
土岐義三
佐藤忠信

1. まえがき

本研究は、強震動を、自動制御の分野で用いられる自己回帰-移動平均 (AR-MA) 過程によりモデル化することにより、強震動の諸特性を表現するモデルパラメータを抽出し、それらを地盤種別ごとに、マグニチュード (M)、震央距離 (Δ) に対し、回帰分析し、強震動の統計的予測モデルを作成することを目的としたものである。

2. 時系列理論の概念

図-1に示すように、観測された強震記録 y_t が、非定常白色雑音 ε_t が入力する線形フィルターの出力とみなせるとし、解析を行う。これは、震源から観測点までの地震波の伝播経路を一種の線形フィルターと考えることに相当する。このフィルターをAR-MA過程で表わす。本研究では、次式で表わされるような2次のAR-MA過程を用いる。



図-1 線形フィルター

$$y_t = -\alpha_1(t)y_{t-1} - \alpha_2(t)y_{t-2} + \varepsilon_t + \beta_1(t)\varepsilon_{t-1} + \beta_2(t)\varepsilon_{t-2} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha_i(t)$, $\beta_i(t)$ ($i=1,2$) は、非定常なモデルパラメータである。ここでは、観測記録データに周期 T_m (1秒) の長方形ウィンドウを乗じて、求めたデータ列に定常時系列理論を適用しモデルパラメータを求め、これをウィンドウの中央点時刻 t_m における非定常なモデルパラメータの推定値として採用した。

また、 $\alpha_i(t)$ ($i=1,2$) に関しては、線形1自由度形の固有振動数 f , ならびに、減衰定数 ζ との間に次式のような関係が成立することから、 $\alpha_i(t)$ をこれらの非定常特性で表現することにした。

$$\lambda^2 + \alpha_1\lambda + \alpha_2 = 0 \quad \lambda^* = \exp(-2\pi f T_s \pm i 2\pi f T_s \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (2)$$

ここに、 $i = \sqrt{-1}$, λ^* は λ の共役複素数, T_s (0.02秒) はデータサンプリング間隔である。

3. モデルパラメータの非定常特性とそのモデル化

図-2には、San Fernando地震の際に、沖積層地盤上で観測された記録のうち震央距離 30~40 km の範囲内の18地点の記録から、AR-MA過程により推定された卓越振動数 f の非定常特性を示している。各時刻における18個の振動数の平均値を○印付の実線で、また、2本の実線は標準偏差の値に対応する。卓越振動数 f は、時間とともに緩やかに減少するが、これは、実地震動の後半部において、表面波などの長周期成分が卓越している傾向を表現するものと考えられる。このように実地震記録を基に、各パラメータの非定常特性を調べて、それを簡単な関数形で表現したものが、表-1に示してある。

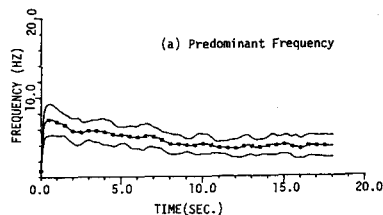


図-2 18個の強震記録の卓越振動数 f

表-1中の $\sigma(t)$ は、入力強度の非定常特性を示す関数形であり、 σ_m はその最大値を、 t_p は最大値の発生する時刻を表わしている。また、強震動の継続時間 T については、各地震記録に対して同一の規準で定めてある。⁽²⁾

4. 強震動予測モデルの作成

1933年から1971年までの38年間に、アメリカのカリフォルニアおよびその周辺で発生した13個の地震から得られた加速度記録のうち18地点の地盤上で得られた記録を対象として、表-1に示した各モデル

パラメータの非定常特性を規定するパラメータを求め、それら各パラメータの震央距離やマグニチュードとの関係を調べた結果、一般的に次式で表わされる回帰式を設定した。³⁾

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_m, f_A, h_A \text{ については } \log P = B_1 + B_2 \cdot M + B_3 \cdot \log(\Delta + C) \\ \text{その他については} \quad P = B_1 + B_2 \cdot M + B_3 \cdot \log(\Delta + C) \end{array} \right\} (3)$$

表-1 非定常特性を表現する関数形

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_m(t/t_p) \cdot \exp(-t/t_p) \\ f(t) &= f_A \cdot \exp(-f_B t) \\ h(t) &= h_A \cdot \exp(-h_B t) \\ B_1(t) &= \bar{B}_1 \text{ (const.)}, B_2(t) = \bar{B}_2 \text{ (const.)} \end{aligned}$$

上式において、 P は任意のパラメータを、また B_1, B_2, B_3 は回帰係数を表わしている。 C は震源の空間的な広がりがデータにおよぼす影響を調整するために与えられるものであるが、物理的に明確な意味をもつ定義が困難なために、 σ_m の回帰式に対するばらつきが最小となる C を求めて用いることにした。表-2には式(3)の回帰式により、沖積層地盤上でのデータを用いて回帰分析を行なった結果求めた回帰係数を示した。また、同時に、データの回帰式に対するばらつき σ_p を示してある。

表-2 沖積層地盤における回帰係数

	B_1	B_2	B_3	σ_p
$\log \sigma_m$	2.5454	0.3870	2.1422	0.3516
t_p	-21.2477	1.0849	9.9054	2.6788
$\log f_A$	0.8590	0.0976	0.4007	0.1472
f_B	0.0495	0.0046	0.0253	0.0299
$\log h_A$	-0.8191	0.0532	-0.0631	0.2170
h_B	0.0665	0.0042	0.0335	0.0503
B_1	-0.1617	0.2004	0.2814	0.2794
B_2	-0.0595	0.0395	0.0202	0.1093
T	-65.1381	2.1087	41.0481	12.2636

5. 応答スペクトルによる考察及び結果

4. で作成した強震動予測モデルにより、シミュレーション波形を発生させ、応答スペクトルを求めることにより、震央距離、マグニチュード、地盤条件の差によるシミュレーション波形の特性を考察する。ただし、応答スペクトルの減衰はすべて5%である。

図-3には、沖積層地盤上で、マグニチュードを6.5とした時の平均応答スペクトルを震央距離30, 50, 100, 150kmについて示している。震央距離が長くなるにつれて、加速度応答値は全体的に小さくなり、しかも、応答スペクトルのピーク値も長周期の方へ移動することがわかる。

図-4には、沖積層地盤において震央距離を50kmとし、マグニチュードを5.5, 6.5, 7.5と変化させた時の平均応答スペクトルを示している。マグニチュードの増加とともに、全周期にわたりほぼ一様に、加速度応答値は増加する。

図-5には、マグニチュードを6.5とした時の震央距離50kmにおける各地盤種別ごとの平均応答スペクトルを示している。全地盤、沖積層、洪積層においては、ほとんど応答スペクトルに差は見られないが、岩盤においては、0.2秒付近の応答値は他の地盤のものと同じだが、それ以外の周期では、応答値が小さくなる。

以上のことから、本研究で作成した強震動予測モデルは、強震動の一般的な特性をうまく表現していると考えられる。

参考文献

- 1) 土岐憲三, 佐藤忠信; 京都大学防災研究所年報, 第22号B-2, PP25-36, 1978. 4
- 2) Trifunac, M.D., A.G. Brady; Bulletin of the Seismological Soc., Vol. 65, No. 3, PP381-426, 1975
- 3) 後藤尚賢, 亀田弘行, 杉戸真太; 土木学会論文報告集, PP27-51, 1979. 6

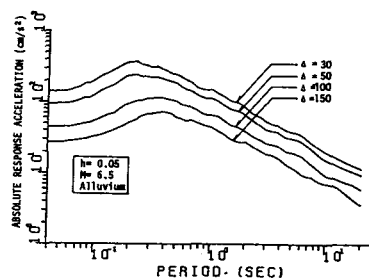


図-3 震央距離別平均応答スペクトル

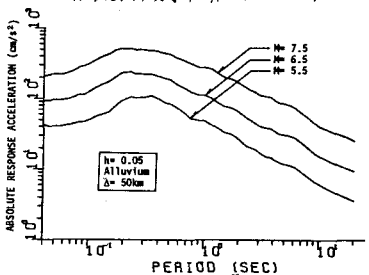


図-4 マグニチュード別平均応答スペクトル

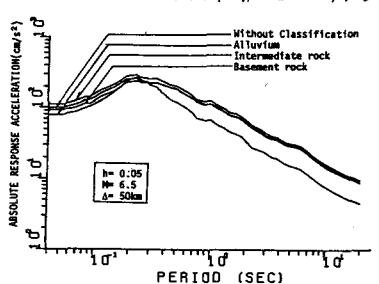


図-5 地盤種別平均応答スペクトル