

(9) 断層破壊過程を考慮した地震基盤での応答スペクトルについて

京都大学防災研究所 正員 清野純史
 京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信

1. まえがき

本研究の目的は、地震基盤 ($v_s=3\text{km/sec}$ 程度) での応答スペクトルを理論的に作成すると共に、この応答スペクトルのアテニュエーション式を活断層データと歴史地震データを用いた地震危険度解析に適用し、ある再現期間に対する対象地点での一様リスクスペクトルを算出することである。

本研究では、まず断層の破壊過程を考慮して小地震の震源スペクトルを重ね合わせることによって大地震の震源スペクトルを理論的に作成し、これに伝播経路の影響を考慮して地震基盤レベルでの地震動パワースペクトル $P_i(\omega | M_i, \Delta_i)$ を計算する。これに線形1自由度系の応答関数(固有周期 T_j , 減衰定数 h_k) を乗じ、そのスペクトルモーメントから最大応答の期待値を求め、これを近似的に基盤レベルでの応答スペクトル $S_i(T_j, h_k)$ とした。この $S_i(T_j, h_k)$ をマグニチュード M , 震央距離 Δ で回帰分析することにより地震基盤での応答スペクトルの推定式を求めた。そして、この各固有周期ごとの応答スペクトルのアテニュエーション式と活断層データ、歴史地震データを用いて、大阪を対象とした一様リスクスペクトルを算定した。

2. 断層破壊過程を考慮した大地震のパワースペクトルと応答スペクトル

高周波成分をも考慮した大地震の地動 $g_L(t)$ は、小地震の地動 $g_S(t)$ を用いて次式で表される¹⁾。

$$g_L(t) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} g_S(t - t_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{1}{n'} g_S(t - t_{ijk}) \quad (1)$$

ただし、 t_{ij} と t_{ijk} は重ね合わせに起因する時間遅れ、 n_L, n_W, n_D はそれぞれ断層の長さ方向、幅方向そしてくいちがいがい量に関する重ね合わせ数である。

式(1)をフーリエ変換し、これに共役複素数を乗ずることによって大地震のパワースペクトル $P_i(\omega)$ が求められる。さらに、ここでは日本の各地域のS波減衰やSコード波減衰を調べ、その平均的なQ値を用いることにより伝播経路の影響を取り入れている²⁾。

ある M_i, Δ_i に対し、基盤レベルでの地震動のパワースペクトル $P_i(\omega | M_i, \Delta_i)$ が求めれば、固有周期 T_j , 減衰定数 h_k なる線形1自由度系の応答関数 $H_{jk}(\omega | T_j, h_k)$ を用いることにより、応答のパワースペクトルが以下のように求められる。

$$R_{ijk}(\omega) = P_i(\omega) H_{jk}(\omega) H_{jk}^*(\omega) \quad (2)$$

表-1 周期ごとの回帰係数 (減衰5%)

c \ T	0.10	0.20	0.50	0.80	1.00	2.00	5.00
c_1	6.16	5.41	4.01	3.34	3.08	2.59	1.28
c_2	0.24	0.25	0.30	0.37	0.37	0.38	0.48
c_3	3.06	2.76	2.32	2.24	2.17	2.05	1.95

基盤レベルでの線形1自由度系 (T_j, h_k) の応答のパワースペクトルが求めれば、次式にしたがってこのパワースペクトルのスペクトルモーメント $\lambda_m (m=0,1,2)$ を用いて最大地動の期待値を求めることができる。この値を応答スペクトルの近似値として用いる。

$$S(T_j, h_k) = p\sqrt{\lambda_0} \quad (3)$$

ここに、 p はピーク係数で m 次のスペクトルモーメント $\lambda_m (m=0,1,2)$ の関数として表せる³⁾。

次に乱数発生によって M_i, Δ_i をランダムに与え、この各々に対して $T_j (0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0 \text{sec})$ 、 $h_k (0.02, 0.05, 0.10)$ を変化させて最大応答加速度 S_A を求めた。そして、次式の回帰式を用いて M, Δ に関する回帰分析を行った。

$$\log \bar{S}_A(T_j, h_k) = c_1 + c_2 M - c_3 \log(\Delta + 30) \quad (4)$$

$h=0.05$ に対する周期ごとの係数の値を示したものが表-1である。また、 $M=7$ に対する各固有周期ごとの最大応答加速度のアテニュエーションを図-1に示す。ただし、減衰定数は5%である。

3. 一様リスクスペクトルの算定

(1) 歴史地震データに基づく地震発生率

図-2は近畿地方の歴史地震の分布である。対象とした地震は宇佐美リスト⁴⁾が主体であり、Katayama⁵⁾の区分に従って1600年以降に発生したマグニチュード5.0以上の地震である⁶⁾。ある地域内で t 年間に n 個の歴史地震データが得られているとき、このデータを基にした地域内(対象地点から半径300km以内)での地震の年平均発生率 ν'_h と、2. で求めた基盤レベルでの最大応答加速度のアテニュエーション式を考える。このアテニュエーション式のばらつき U_{S_A} を考慮すると、ある固有周期に対してある地点での最大応答加速度 S_A があるレベル S_A^* を超えるような地震の年平均発生率 ν_h は次式で与えられる。

$$\nu_h = P(S_A \geq S_A^*) \cdot \nu'_h \quad (5)$$

ここに、 $P(S_A \geq S_A^*)$ はばらつきを表す指標 $U_{S_A} = \log(S_A/\bar{S}_A)$ の分布形を正規分布として S_A^* を与えれば算定できる。また、 ν'_h は N/T で与えられる。

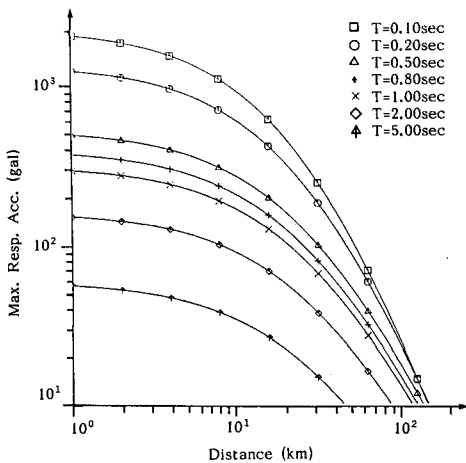


図-1 応答スペクトルのアテニュエーション

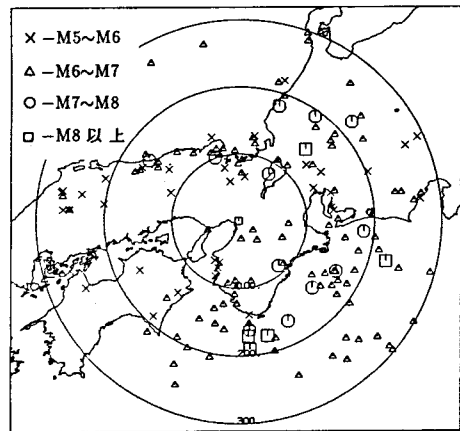


図-2 近畿地方の歴史地震の分布

(2) 活断層データに基づく地震発生率

活断層データは「日本の活断層」⁷⁾より确实度 II 以上の活断層を 1 本の直線で近似したもの⁸⁾を用いた。図-3 は近畿地方の活断層を示したものである。

断層長さ l と地震モーメント M_0 の間には、過去の震源断層が判明している地震について以下の式が成り立つ。

$$\log \bar{M}_0 = 2.619 \log L + 22.445 \quad (6)$$

ここで、図-4 に示すような正規分布に従う関係式のばらつきを表す指標 $U_{M_0} = \log(M_0/\bar{M}_0)$ を考慮すれば、最大モーメントモデルから得られる地震発生率 ν_f^* と、前述のアテニュエーション式を考慮することにより、断層で地震が起こったときの、ある固有周期に対するある地点での最大応答加速度 S_A がある値 S_A^* 以上となる地震の年平均発生率 ν_f が対数正規分布 (ξ, ζ^2) として次式で与えられる。

$$\nu_f = P(S_A \geq S_A^*) \cdot \nu_f^* \quad (7)$$

(3) ベイズの定理による歴史地震データと活断層データの組合せ

地震の発生を年平均発生率 ν のポアソン過程でモデル化する。歴史地震データから ν_h 、活断層データから対数正規分布 (ξ, ζ^2) として地震発生率が得られるので、ベイズの定理を用いてこれらを組み合わせる。この場合の尤度関数 $L(\nu)$ は、歴史地震データの解析から $1/\nu_h$ 年間に 1 回の地震が起こるとして次式で与えられる。

$$L(\nu) = (\nu/\nu_h) \exp(-\nu/\nu_h) \quad (8)$$

事前分布 $f'(\nu)$ は活断層データから得られた対数正規分布で与える。

この事前分布 $f'(\nu)$ と尤度関数 $L(\nu)$ を用いて事後分布 $f''(\nu)$ を求めることにより、両者を組み合わせた年平均発生率 ν_c が求められる (図-5)。したがって、地震発生をポアソン過程とし、ある固有周期に対する最大応答加速度 S_A があるレベル S_A^* を超える年平均発生率を用いると、対象地点での基盤レベルでの再現期間が得られる。大阪 (34.7°N, 135.5°E) での固有周期 $T=0.80\text{sec}$ 、減衰定数 $h=5\%$ に対する歴史地震データ、活断層データそしてその組合せから求めたハザード曲線が図-6 である。また、各周期に対して両データの組合せから求めたハザード曲線が図-7 である。種々の固有周期に対するハザード曲線をもとに作成した一様リスクスペクトルを図-8 に示す。再現期間は 100 年、非超過確率は 0.366 である。

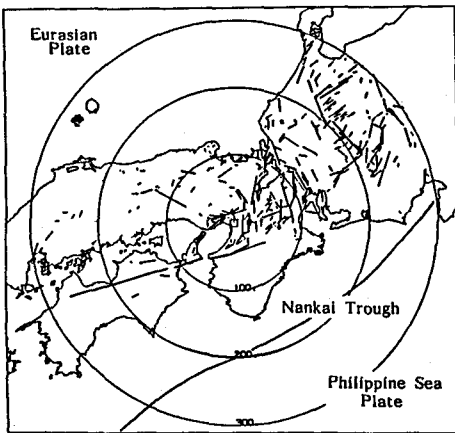


図-3 近畿地方の活断層の分布

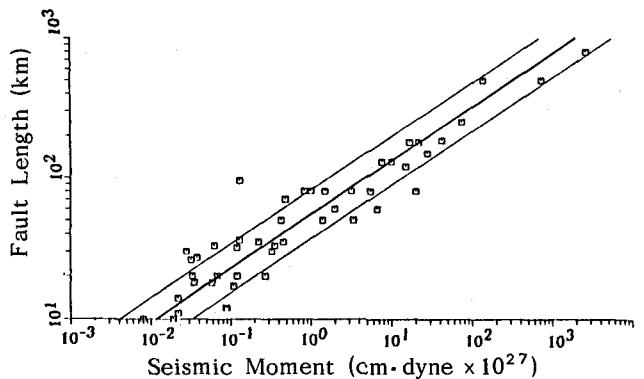


図-4 断層長さと地震モーメントの関係

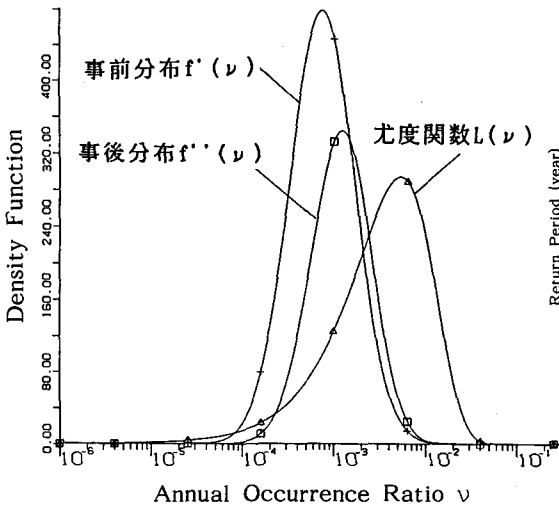


図-5 事前分布、尤度関数、事後分布の関係

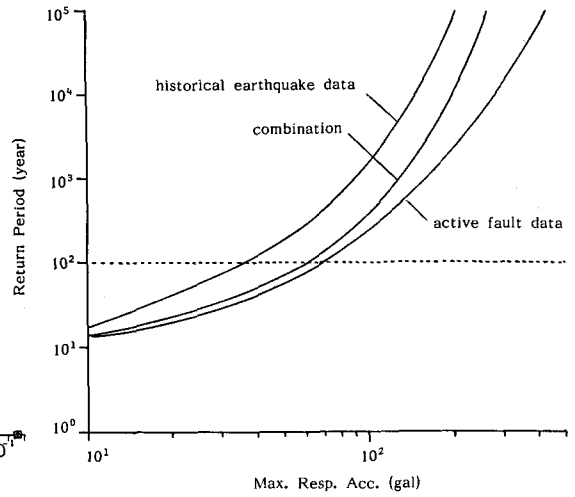


図-6 歴史地震データ、活断層データおよび両者の組合せに基づく大阪でのハザード曲線

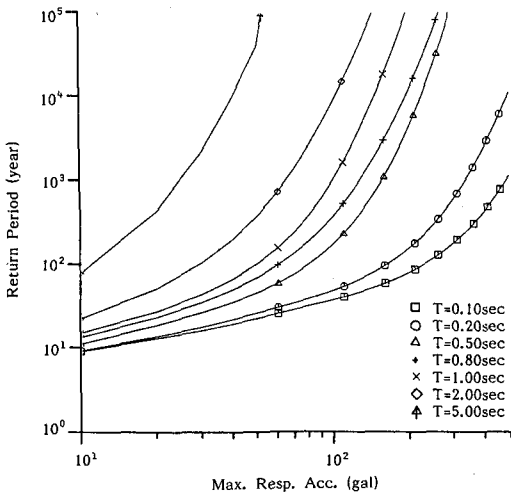


図-7 各周期ごとのハザード曲線

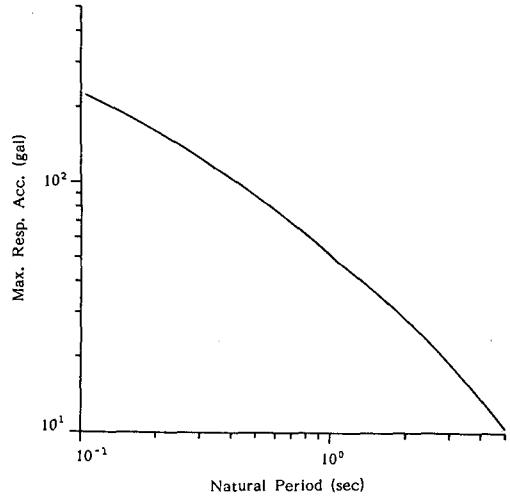


図-8 大阪での一様リスクスペクトル (再現期間 100 年)

参考文献：1)Irikura,K.:Semi-empirical Estimation of Strong Ground Motion during Large Earthquake, Bull. of D.P.R.I., Kyoto Univ., Vol.33, Part.2, No.297, pp.63-104, 1983. 2)Sato,T.,J.Kiyono and T.Matsuoka: Attenuation of Peak Ground Motion Taking into Account the Fault Extent, Proc. 7JEEES, pp.541-546, 1986. 3)kiureghian:Structural Response of Stationary Excitation, Jour. of Eng. Mech. Dev., ASCE, EM6, pp.1195-1213, 1980. 4) 宇佐美:資料日本地震被害総覧, 東京大学出版会,1981. 5)Katayama,T.: Seismic risk analysis interms of acceleration response spectra, Proc. 2nd U.S. National Conf. on Earth. Eng., pp.117-126, 1979. 6) 亀田・奥村:活断層データと歴史地震データを組み合わせた地震危険度解析, No.362,pp.407-414,1985. 7) 活断層研究会：日本の活断層、東京大学出版会、1982. 8)(株)大林組:地震情報・地震波データベース, 技術研究所振動研究室,1990.