

I-496

地震危険度解析と適合する模擬地震動の発生

京都大学大学院 学生員 能島 暢呂

京都大学工学部 正 員 亀田 弘行

1. はじめに 本研究では、地震危険度解析の手法を有効に取り入れた入力地震動選定法として、地震動強度を年平均発生率 p_0 から定め、継続時間、卓越振動数、スペクトルの形状パラメータは p_0 によって規定される地震群に対する条件付期待値として求めて、これにより任意の p_0 に対して模擬地震動を発生させる方法を開発した。ここではS波速度 700~800 m/sec 程度の工学的基盤面における有理関数型スペクトルモデルを用いた非正常地震動予測モデルを考え、これをスペクトル特性が時間的に変化しない振幅変調型モデルに変換し、更に地震動スペクトルを有理関数により地表へ変換したモデルを用いる。

2. 有理関数型スペクトルモデルを用いた地震動予測モデル¹⁾

非正常特性を有する地震動 $x(t)$ を次式で表現する。

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

$G(t, \omega)$; 非正常パワースペクトル, ω ; 円振動数

$\Delta\omega$; 円振動数のきざみ幅, m ; 振動数の分割数

$G(t, \omega)$ は、有理関数により次式でモデル表示する。

$$G(t, 2\pi f) = \alpha_f(t) \frac{2\beta_g(t)}{\pi^2 f_p(t)} \frac{\{f/f_p(t)\}^2}{[1 - \{f/f_p(t)\}^2]^2 + 4\beta_g^2(t) \{f/f_p(t)\}^2} \quad (2)$$

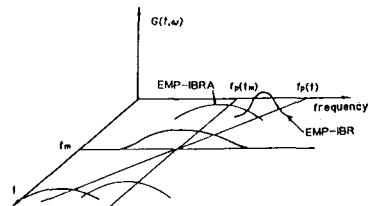


図1 EMP-IBR, EMP-IBRA の非正常パワースペクトルの概略図

非正常型モデルにおいては $\alpha_f(t)$, $f_p(t)$, $\beta_g(t)$ を時間 t の関数として表わす。(EMP-IBRモデル)

$$\begin{cases} \alpha_f(t) = \gamma^2 (t/t_m)^2 \exp\{2(t/t_m)\} & ; \text{時刻 } t \text{ での二乗平均パワーを表わす。} (gal^2) \\ f_p(t) = A_1(t - t_m) + A_2 & ; \text{時刻 } t \text{ での卓越振動数を表わす。} (Hz) \\ \beta_g(t) = B_1(t - t_m) + B_2 & ; \text{時刻 } t \text{ でのスペクトルのピークの鋭さを表わす。} \end{cases} \quad (3)$$

γ ; peak R.M.S. 加速度。(gal)
 t_m ; γ を与える時刻。(sec)

モデルパラメータの推定式は、EMP-IB²⁾によるシミュレーションデータを用いて、マグニチュード m 、震央距離 r による回帰分析を行なうことにより得た。さて、実際の耐震設計においてはスペクトル特性が時間的に変化しない、簡単な振幅変調型モデルが用いられることが多い。式(3)において $A_1 = B_1 = 0$ とすることによりEMP-IBRを振幅変調型モデル(EMP-IBRA)に変換する。EMP-IBR, EMP-IBRAの非正常パワースペクトルの概略図を図1に示す。

3. 地表面における地震動予測モデル 工学的基盤面と沖・洪積地盤面の非正常パワースペクトルの平方根の比を変換係数 $\beta_n(f)$ と定義し、有理関数により次式で表わす。

$$\beta_n^2(f) = \frac{1 + 2\alpha^2(f/f_s)^2}{[1 - (f/f_s)^2]^2 + 4h_s^2(f/f_s)^2} \quad (4)$$

パラメータ f_s, a, h_s は $f_1=0.55, f_2=2.53, f_3=10.03$ Hzにおける変換係数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ を(4)式が通るという条件により求める。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ は地盤の非線形増幅特性を考慮した地震動スペクトルの変換係数 $\beta_n(f)$ ³⁾により算出する。このような条件により、パラメータ f_s, a, h_s は次のように表わされる。

$$f_s = \left[\frac{f_1^2 f_2^2 f_3^2 (f_1^2 \beta_1^2 (\beta_2^2 - \beta_3^2) + f_2^2 \beta_2^2 (\beta_3^2 - \beta_1^2) + f_3^2 \beta_3^2 (\beta_1^2 - \beta_2^2))}{f_1^2 f_2^2 (1 - \beta_3)(\beta_1 - \beta_2) + f_2^2 f_3^2 (1 - \beta_1)(\beta_2 - \beta_3) + f_3^2 f_1^2 (1 - \beta_2)(\beta_3 - \beta_1)} \right]^{1/2}, \quad a = \sqrt{\frac{\beta_1^2 \beta_2^2}{\beta_1^2 - \beta_2^2} (X_1 - X_2)} \quad (5)$$

$$h_s = \sqrt{\frac{\beta_1^2}{2(\beta_1^2 - \beta_2^2)} (X_1 - \frac{\beta_2^2}{\beta_1^2} X_2)} \quad \text{ただし,} \quad X_i = 1 - \frac{1}{2} (1 - \beta_i^2) \frac{f_s^2}{f_i^2} - \frac{f_s^2}{2f_i^2} \quad ; \quad i=1, 2$$

基盤面におけるパワースペクトル $G_r(t, 2\pi f)$ は変換係数 $\beta_R(f)$ により次式で地表面の非定常パワースペクトル $G_s(t, 2\pi f)$ に変換される。

$$G_s(t, 2\pi f) = \{\beta_R(f)\}^2 \cdot G_r(t, 2\pi f) \quad (6)$$

以上述べた手法により有理関数型モデルの利点を失わずに地震動スペクトルを地表面に変換できる。

4. 地震危険度解析によるモデルパラメータの算出 ここで用いるEMP-IBRAモデルのパラメータについてはマグニチュード m 、震央距離 r による回帰モデル $\gamma(m, r)$ 、 $\bar{t}_m(m, r)$ 、 $\bar{f}_P(m, r)$ 、 $\bar{\beta}_s(m, r)$ が得られている。以後これらの回帰モデルを用いた解析を行なう。まず、年平均発生率 p_0 と peak R.M.S. 加速度 γ の関係を表わすハザードカーブから目標とする γ_0 を決定する。 p_0 と γ_0 の関係は次式のように表わされる。

$$p_0 = 1 - \exp\left[-\sum_{k=1}^n \nu_k A_k q_k(\gamma_0)\right] \approx \sum_{k=1}^n \nu_k A_k q_k(\gamma_0) \quad (7)$$

ただし、添字 k は解析対象地点に影響を及ぼす地域を分割した震源域 k を表わし、 A_k は震源域 k の面積、 ν_k は震源域 k での年平均地震発生回数、 $q_k(\gamma_0)$ は震源域 k に 1 回の地震が生じた時に、解析対象地点で地震動強度 Γ が γ を超過する確率であり、次式で計算される。

$$q_k(\gamma_0) = \int_{m_{lk}}^{m_{uk}} \int_{r_{lk}}^{r_{uk}} P\left[U > \frac{\gamma_0}{\gamma(m, r)}\right] f_{Rk}(r) f_{Hk}(m) dr dm \quad (8)$$

ここに m_u と m_l は考慮するマグニチュードの上限と下限、 r_u と r_l は震央距離の上限と下限、 $f_R(r)$ 、 $f_m(m)$ は震央距離 r 、マグニチュード m の確率密度関数である。式(7)、(8)よりハザードカーブが得られると、再現期間 $T_r = 1/p_0$ を設定すれば、これに対応する γ の推定値 γ_0 が得られる。次に m 、 r の関数 $\hat{a}(m, r)$ として表わされる変数（実際には $\bar{t}_m$ 、 $\bar{f}_P$ 、 $\bar{\beta}_s$ のいずれか）については $\Gamma > \gamma_0$ となる地震という条件下での条件付期待値 $\bar{a}$ を次式より求める。

$$\bar{a}(p_0) = \sum_{k=1}^n \nu_k A_k \bar{a}_k(p_0) / \sum_{k=1}^n \nu_k A_k \quad (9)$$

ただし、 $\bar{a}_k(p_0)$ は震源域 k に対応する a の期待値で、 $\gamma(m, r)$ の不確定性を表わす確率変数 U を用いて、

$$\bar{a}_k(p_0) = \frac{1}{q_k(\gamma_0)} \int_{m_{lk}}^{m_{uk}} \int_{r_{lk}}^{r_{uk}} \hat{a}(m, r) P\left[U > \frac{\gamma_0}{\gamma(m, r)}\right] f_{Rk}(r) f_{Hk}(m) dr dm \quad (10)$$

と算出される。こうして求めたモデルパラメータを式(1)に代入すれば地震動スペクトルが得られる。

5. 東京・大阪に対する適用例 東京・大阪周辺の過去の地震資料を参考にすることにより、地震危険度解析および模擬地震動の発生を試みた。図2にアテニュエーション式のパラツキを表わす変動係数 $\delta_r = 0.0$ 、0.20、0.427の3例のハザード曲線を示す。また以上の手法を用いて、 $T_r = 100$ 年として得られた標準的な地盤における加速度波形を図3に示す。

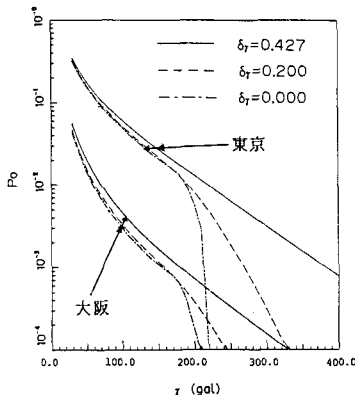


図2 peak R.M.S. 加速度 γ のハザード曲線

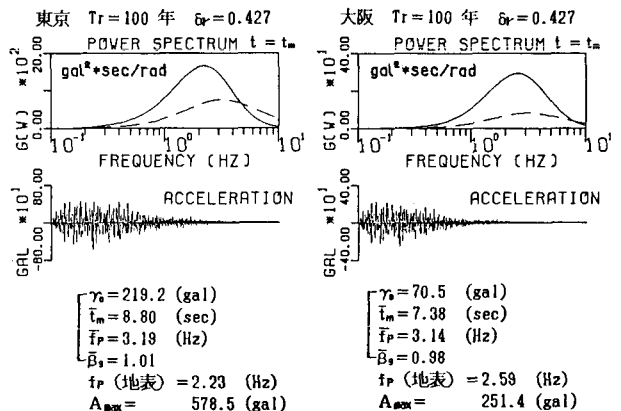


図3 $T_r = 100$ 年の非定常パワースペクトルと地表面における加速度波形 (-----工学的基盤 ————地表)

- 参考文献 1) 上田：有理関数型スペクトルモデルを用いた非定常地震動予測モデル，京大修士論文，昭61。
2) Sugito, Kameda: Proc. JSCE, Vol. 2, 1985. 3) 杉戸・亀田・後藤・廣瀬：土木学会関西支部，昭61.5.