

1 概説

構造物には常に自重が作用しており、鉛直方向の力に強く設計されている。そのため従来の耐震設計において鉛直方向の地震荷重はあまり考慮されず、強震動の上下動挙動については水平動に比較してあまり検討されていない。ところが、兵庫県南部地震においては強い上下動が観測され、片持ちばり構造を持つ構造物が損傷した例が報告されており、上下動についても水平動と同様、強震動の予測式が必要であると思われる。

著者¹⁾らはこれまでに工学的基盤における水平動に関する地震動データベースに基づいて、断層の広がりや破壊伝播方向を考慮した非定常パワースペクトルの合成による地震動予測モデル (EMPR) を開発している¹⁾。本研究では、工学的基盤における上下動に関する地震動データベースを構築し、これに基づき EMPR と同様の手法を用いて、上下動に関する地震動予測モデルの構築を試みた。

2 上下動の強震動データベース

神山ら²⁾は、ポートアイランドにおける兵庫県南部地震の上下動を P 波によると仮定して、鉛直アレー観測記録の逆解析により P 波速度 (V_p) を求め、PS 検層による結果と矛盾しないことを確認している。ここでは、工学的基盤における強震波形の鉛直成分のデータベースを作成するため、上下動は鉛直下方から伝わる P 波から構成されると仮定し、観測された記録より重複反射理論に基づいて、解放基盤波形を算出した。

このとき、土の圧縮応力 (σ) とひずみ ($\partial u_z / \partial z$) の関係は式 (1) に基づくとし、減衰定数 (h) は兵庫県南部地震のアレー観測点における逆解析結果により土質に関係なく 10% とした。

$$\sigma = \rho V_p^2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{2h}{\omega} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t} \right) \quad (1)$$

図 1 には、このようにして上下動に関する解放基盤波形データベースを作成するにあたり、使用した地震記録 (45 成分) のマグニチュードと震源距離の分布を示す。

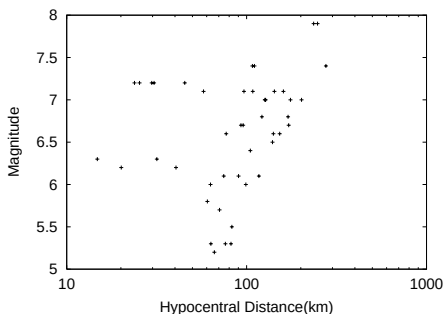


図 1. 基盤波形データベース (上下動成分)

3 鉛直方向の強震動予測モデル

3.1 非定常パワースペクトルによる基盤波形のモデル化

非定常性を有する地震動は、式 (2) のように時刻 t 、周波数 f_k における非定常パワースペクトル ($\sqrt{G_x}$) を用いて表現できる³⁾。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{4\pi \cdot G_x(t, 2\pi f_k) \cdot \Delta f} \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (2)$$

ここに、 Δf : 振動数の刻み幅、 ϕ_k : $t=0$ における初期位相角 ($0 \sim 2\pi$ の一様乱数) である。さらに、非定常パワースペクトルは式 (2) によりモデル化することができ、強度 (α_m)、立ち上がり時刻 (t_p)、継続時間 (t_s) を表す 3 つのモデルパラメータを得る (図 2)。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \alpha_m(f) \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \exp \left\{ 1 - \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \right\} \quad (3)$$

(ただし、 $t_s < t.0 \leq t \leq t_s$ では 0.)

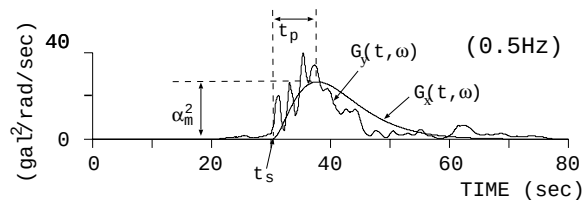


図 2. 非定常パワースペクトルのモデル化

こうして上下動に関する解放基盤波形データベースについてモデルパラメータを算出した。ついで、これらをマグニチュード (M) と震源距離 (R) に対して周波数ごとに重回帰分析することにより、与えられた M , R に対する解放基盤波形の予測式を得た (式 4~6)。

$$\log \alpha_m(f) = B_0(f) + B_1(f) \cdot M - B_2(f) \cdot \log R \quad (4)$$

$$\log t_p(f) = P_0(f) + P_1(f) \cdot M + P_2(f) \cdot \log R \quad (5)$$

$$t'_s(f) = t_s(f) - t_m = S_1(f) \cdot R \quad (6)$$

さらに、周波数ごとに得られるモデルパラメータの回帰係数を周波数の関数としてモデル化し、回帰係数を周波数により与える式として、表 1 を得た。

3.2 非定常スペクトルの合成による地震動予測

断層の広がりや破壊方向、破壊伝播速度などを考慮した震源近傍における地震動波形は、大規模な断層破壊を $M=6$ 相当の小規模断層破壊の重ね合わせとしてとらえ、分割された各小規模断層からの非定常パワースペクトルを時間軸上で重ね合わせるにより予測することができる (図 2,3)。このとき、重ね合わせによる断層近傍の非定常パワースペクトルは次式により得られる。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \frac{A_p(f)}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f)} \quad (7)$$

ここに、 $\sqrt{G_{ij}}$ は、M=6 相当の小規模断層破壊による非定常パワースペクトルであり、前述の予測式から震源距離に応じて求められる。 N_x, N_y は、断層の長さおよび幅方向の分割数を表している。 $A_p(f)$ は、周波数ごとに与えられる大規模断層破壊に対する小規模断層破壊の重ね合わせ数であり、次式のように重ね合わせ数 N_G とその周波数軸方向の補正係数 $\beta(f)$ で表される。

$$A_p(f) = N_G \cdot \beta(f) \quad (8)$$

$N_G, \beta(f)$ は、解放基盤波形データベースから、地震モーメント (M_0) により、次のように回帰式が得られる。

$$\log N_G(M_0) = -10.927 + 0.439 \cdot \log M_0 \quad (9)$$

$$\log \beta_0(f, M_0) = d_0(f) + d_1(f) \cdot \log M_0 \quad (10)$$

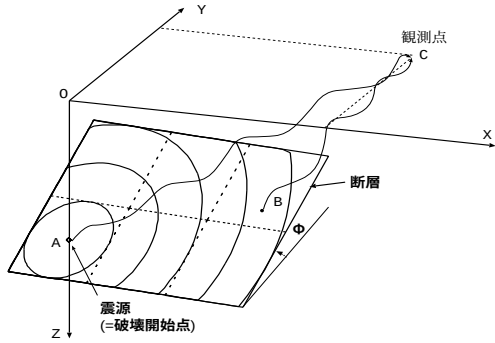


図 3. 大規模断層破壊による地震動伝播

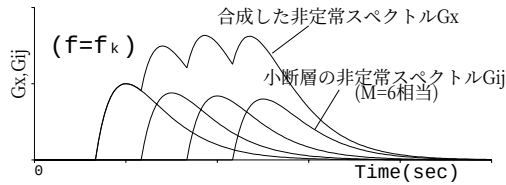


図 4. 非定常スペクトルの合成

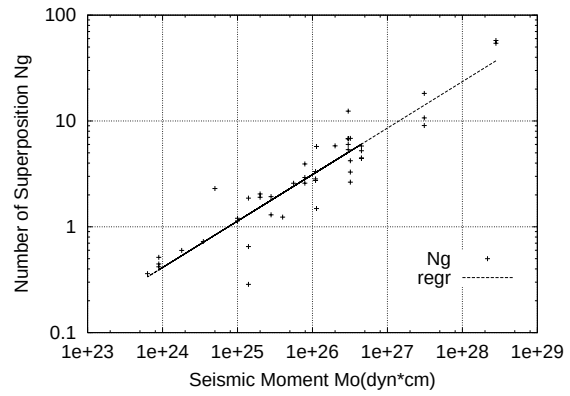


図 5. 非定常スペクトルの重ね合わせ数 N_G と地震モーメント M_0 の関係

4 断層近傍の強震観測点における兵庫県南部地震のシミュレーション例

菊地⁴⁾によるメカニズムを参考に震源パラメータを決定し、兵庫県南部地震のシミュレーションを行った。表 2 には、兵庫県南部地震において神戸ポートアイランド、関西電力総合技術研究所、関西電力新神戸変電所ならびに気象庁神戸海洋気象台において得られた記録から算出した解放基盤波形と、強震動予測モデルによるシミュレーションそれぞれについて、鉛直方向成分の最大加速度、実効加速度、最大速度を示した。いずれの観測地点においても、ある精度で観測値を再現しているが、シミュレーションでは高周波数成分がやや卓越している。

謝辞 本研究では、気象庁神戸海洋気象台、神戸市港湾整備局、関西電力の強震記録を使わせて頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sugito, M., Furumoto, Y., Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, in Auckland, New Zealand, (CDROM), 2000.2.
- 2) 神山真, 吉田勝: 鉛直アレー強震記録による地盤剛性ならびにダンピングの非定常変動の解析, 土木学会論文集, 2000.4. (掲載予定)
- 3) 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, 1977.
- 4) 菊地正幸: 日本建築学会兵庫県南部地震災害調査緊急報告会, 社団法人日本建築学会, 1995.

表 1. モデルパラメータの回帰係数を与える式

強度パラメータ α_m の回帰係数	$B_0(f) = -1.751 + 0.848 \cdot \log f - 0.244 \cdot (\log f)^2$ $B_1(f) = 0.617 - 0.024 \cdot \log f - 0.062 \cdot (\log f)^2$ $B_2(f) = 1.115 + 0.130 \cdot \log f - 0.034 \cdot (\log f)^2$
継続時間パラメータ t_p の回帰係数	$P_0(f) = -0.470 - 0.792 \cdot \log f$ $P_1(f) = 0.075 + 0.089 \cdot \log f$ $P_2(f) = 0.406 + 0.022 \cdot \log f$
時間パラメータ t_s の回帰係数	$S_1(f) = 0.01822 - 0.00599 \cdot \log f + 0.02974 \cdot (\log f)^2$
重ね合わせ数 N_G の補正係数 β の回帰係数	$d_0(f) = 0.0949 - 0.5554 \cdot \log f + 0.0942 \cdot (\log f)^2$ $d_1(f) = -0.0056 + 0.0197 \cdot \log f$

表 2. シミュレーションと観測値の比較 * (工学的基盤相当の地震動に変換した波形による)

地点名	神戸海洋気象台		ポートアイランド		新神戸変電所		総合技術研究所	
強度指標	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax
単位	(cm/s ²)	(cm/s)	(cm/s ²)	(cm/s)	(cm/s ²)	(cm/s)	(cm/s ²)	(cm/s)
観測値 (UD)	342 (241)	41	327 (106)	29	417 (172)	25	273 (110)	19
模擬地震動 (UD)	448 (157)	19	421 (151)	18	576 (154)	19	334 (94)	11