

(15) 近畿地域の微小地震活動度に基づく設計地震被動の予測

京都大学防災研究所 土岐 憲三  
 京都大学防災研究所 佐藤 忠信  
 京都大学防災研究所 ○清野 純史

1. まえがき

本研究は京阪神地方における微小地震の特性と活動度を明らかにし、これに基づいて設計用地震被動を予測することを目的としている。上賀茂, 阿武山, 妙見, 六甲の4つの観測所において、1980年5月から1981年12月の間に観測された微小地震の波形から震源の特性を抽出する。各観測点で推定された微小地震の震源特性を相互比較することにより、観測点の相違によって推定される震源パラメータがどの程度変動するかを明らかにし、その原因について考察を加える。さらに、こうした波形のデータベースを基にして、設計用地震動をシミュレートするための方法論を提示する。断層の運動機構をモデル化することによって設計用地震動を模擬する手法については他の機会に発表予定<sup>1)</sup>であるので、こうした解析に必要な統計的グリーン関数が観測点ごとにどの程度異なるかを明らかにする。

2. 各観測点における微小地震記録の性質

上賀茂(KGM)での122の地震記録、阿武山(ABU)での30の地震記録、妙見(MYO)での30の地震記録、六甲(RKO)での15の地震記録を用いて解析を行なった。図-1は、上賀茂で観測された記録の震源分布を示したものである。○印は観測点、●印は震源を示している。図-2はその記録のマグニチュードと震央距離を示したものである。これらの記録は1980年5月から1981年12月にかけて発生した数千の微小地震記録の中から抽出したものである。抽出に際しては微小地震の分布特性を損なわず、かつまたマグニチュードも1.2~1.8の間でほぼ一様に分布するように選んだ。他の3つの観測点(阿武山, 妙見, 六甲)の記録も同様の基準で抽出している。

図-3は、阿武山, 妙見, 六甲で記録された同一地震の変位スペクトルにハンギングウィンドウを10回かけて平滑化し、それを重ねて描いたものである。一般に、変位スペクトルは臨界周波数を境に、低周波側のフラットな部分と高周波側の減少部分に分けることができる。図からわかるように、臨界周波数はどの観測点も1~3Hzの間に位置しているが、観測点ごとに多少異なっていることがわかる。これは、有効断層半径や応力降下量などの震源特性を表わす臨界周波数が、観測地点近傍の地盤構成や伝播経路に影響されることを意味している。

各々の記録の変位スペクトルからフラットレベル $\Omega_0$ と臨界周波数 $f_c$ がわかれば、地震モーメント $M_0$ 、有効断層半径 $r$ 、応力降下量 $\Delta\sigma$ が計算できる。地震モーメントは次式で表わされる。

$$M_0 = \frac{\Omega_0}{R_{\theta\phi}} (4\pi R \rho c^3) \quad (1)$$

ここに、 $R$ は震源距離、 $\rho$ は密度、 $c$ はP波またはS波の伝播速度、 $R_{\theta\phi}$ は radiation pattern を表わす。有効断層半径 $r$ は、破壊速

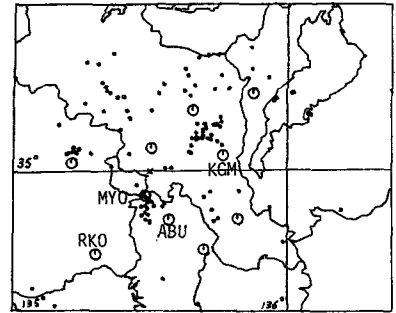


図-1 微小地震の震央 (KGM 122記録)

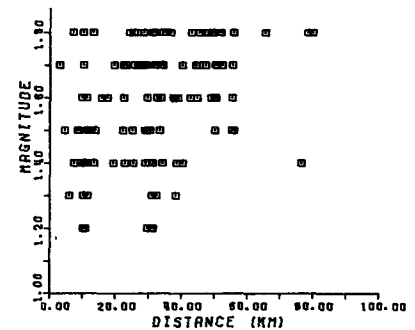


図-2 震央距離とマグニチュードの関係

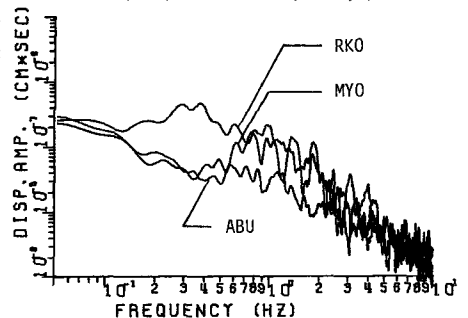


図-3 変位スペクトルの比較

度  $V_r$  を  $V_r = 0.9 V_s$  ( $V_s$ は S波速度) とした場合、次式で表わされる。<sup>3)</sup>

$$r_p = 0.21 V_s / f_p \quad (2)$$

$$r_s = 0.32 V_s / f_s$$

ここに、 $r_p, r_s$  はそれぞれ P波と S波から求めた有効断層半径、 $V_s$ は S波速度、 $f_p, f_s$  はそれぞれ P波と S波の臨界周波数である。本研究では式(2) からおのおのの有効断層半径を求め、平均することによってその地震の有効断層半径  $r$  とした。さらに、応力降下量  $\Delta\sigma$  は破壊形状を円形と仮定すると次式で表わされる。

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3} \quad (3)$$

以上の式を用いて、上賀茂、阿武山、妙見、六甲の記録からそれぞれ求めた臨界周波数と地震モーメントの関係を示したものが図-4である。図から、どの観測点のデータも  $f^{-3}$  の勾配に沿って分布していることがわかる。しかしながら、各観測点の平均的な傾向には相対的に差のあることがわかる。

いま、無限に広がる弾性体の中に長さ  $L$ 、幅  $W$  の断層面を想定して、くいちがい断層の幅方向、長さ方向に様に伝播する破壊を考える。くいちがいの時間的な変化を簡単な傾斜関数で与えると、この地震波の遠方での変位スペクトルは Geller<sup>2)</sup>により次式で表わされる。

$$U(f) = \frac{\mu R_{op}}{4\pi R C^3} D L W \left| \frac{\sin(2\pi f X_\tau)}{2\pi f X_\tau} \right| \left| \frac{\sin(2\pi f X_L)}{2\pi f X_L} \right| \left| \frac{\sin(2\pi f X_W)}{2\pi f X_W} \right| \quad (4)$$

ここに、 $X_\tau, X_L, X_W$  は

$$X_\tau = \tau/2, \quad X_L = L/(2V_r), \quad X_W = W \cos \delta$$

なる継続時間、 $\delta$  は dip angleを表わす。したがって、スペクトルの包絡線を引くと  $f$  は

$$f_1 = 1/(2\pi X_L), \quad f_2 = 1/(2\pi X_\tau), \quad f_3 = 1/(2\pi X_W)$$

で交点をもつ。これが臨界周波数であるが、 $X_L, X_\tau, X_W$  は相似則によって  $L$  に比例し、また  $D, W$  も  $L$  に比例する。いま、臨界周波数  $f_1$  が  $a$  倍になる地震動を考えると、これは  $X_L$  が  $1/a$  倍になることであるから、 $D, W, L$  もそれぞれ  $1/a$  になる。地震モーメント  $M_0$  は  $D \cdot W \cdot L$  に比例していたから、結局地震モーメントと臨界周波数の関係を両対数軸上で表現すると  $-3$  の傾きをもつ関係式が現れることになる。

以上より、本研究で微小地震記録を用いて求めた臨界周波数と地震モーメントの関係は、どの観測点においても断層モデルによる変位スペクトルの理論的な傾きと良く一致している。これは微小地震も断層運動の結果として表現できることを裏づけている。

図-5は、式(1),(3)からそれぞれ求めた地震モーメント  $M_0$  と応力降下量  $\Delta\sigma$  を両対数軸に表わしたものである。●印は Geller (1976)<sup>2)</sup> が解析に用いた41個の地震の応力降下量である。これに対して○、△、□、+印は本研究で用いた微小地震の応力降下量である。+印は上賀茂でとれた記録の応力降下量、□印は阿武山でとれた記録の応力降下量、○印は妙見でとれた記録の応力降下量、そして△印は六甲でとれた記録の応力降下量を表わしている。図から明らか

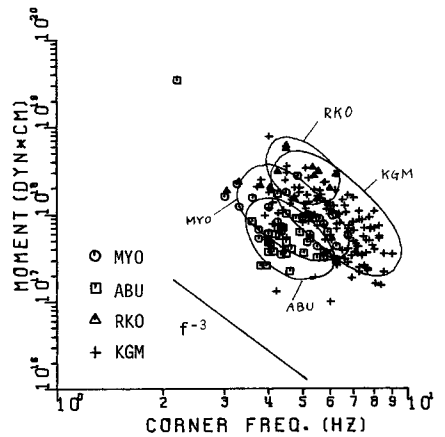


図-4 臨界周波数と地震モーメントの関係

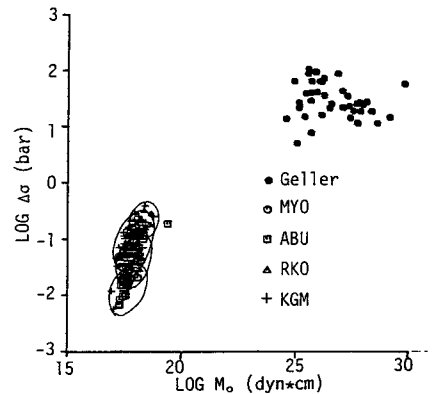


図-5 地震モーメントと応力降下量の関係

なように、微小地震と大地震との間には平均的に見ただけでも数百倍の差があることがわかる。これは、マグニチュードが比較的大きな地震の場合、応力降下量は地震の規模によらず一定であるという仮定がよく使われているが、微小地震の応力降下量は大地震のそれとはかなり異なることを示唆している。

さらにこの図を観測点別に注目してみると、観測点ごとに応力降下量に違いが出ていることがわかる。平均値で見ると六甲、上賀茂が大きく、次いで妙見、阿武山の順になっている。阿武山、妙見、六甲の記録は同じ震源をもつ地震記録であるので、抽出した応力降下量などの震源特性は同じ値とならなければならない。こうしたばらつきがあるのは変位スペクトルから求められるフラットレベルや臨界周波数が震源の特性そのものだけでなく観測点近傍の地盤構造の効果や伝播経路の影響を含んでいることを示している。

### 3. AR-MA過程を用いた統計的グリーン関数の作成

各観測点の変位記録波形を統計的に解析するために自己帰帰-移動平均過程を用い、微小地震記録の対する非定常特性を抽出してこれをモデル化した。そして、非定常性を規定するパラメータのマグニチュードと震源距離に対する回帰分析を行ない統計的グリーン関数を作成した。



図-6 線形フィルター

まず、図-6に示すように、観測された微小地震動をホワイトノイズを入力とする線形1自由度形の出力と考えて解析を行なう。これは、震源から観測点までの伝播経路を一種の非定常線形フィルターとみなすことに相当する。本研究では、フィルターを1自由度線形系としているのでAR-MA過程は(2,2)次となり次式のように表わされる。

$$Y_t = -d_1(t)Y_{t-1} - d_2(t)Y_{t-2} + E_t + \beta_1(t)E_{t-1} + \beta_2(t)E_{t-2} \quad (5)$$

表-1 非定常性と表わす関数形

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma \max(t/tp) \exp(1-t/tp) \\ f(t) &= fA \exp(-fB t) \\ h(t) &= hA \exp(-hB t) \\ \beta 1(t) &= \beta 1 \quad (\text{const.}) \\ \beta 2(t) &= \beta 2 \quad (\text{const.}) \end{aligned}$$

表-2 時系列パラメータの回帰係数 (上賀茂, 阿武山, 妙見)

観測点	パラメータ	回帰式
上賀茂	$\log \sigma \max$	$-4.91 + 0.859M - 1.48 \log R$
	$tp$	$-6.58 - 0.408M + 7.85 \log R$
	$\log fA$	$0.366 + 0.895M + 0.0301 \log R$
	$fB$	$0.0632 + 0.0193M - 0.0396 \log R$
	$\log hA$	$0.234 - 0.137M - 0.132 \log R$
	$hB$	$0.0448 + 0.126M - 0.0203 \log R$
	$\beta 1$	$0.0442 + 0.286M + 0.00092 \log R$
阿武山	$\log \sigma \max$	$-5.23 + 0.872M - 1.27 \log R$
	$tp$	$2.40 - 2.85M + 4.08 \log R$
	$\log fA$	$-0.526 + 0.378M + 0.253 \log R$
	$fB$	$0.0521 + 0.0244M - 0.0422 \log R$
	$\log hA$	$0.712 + 0.200M - 0.488 \log R$
	$hB$	$0.0124 - 0.0433M + 0.0302 \log R$
	$\beta 1$	$-0.0942 - 0.138M + 0.203 \log R$
妙見	$\log \sigma \max$	$-5.19 + 0.440M - 1.13 \log R$
	$tp$	$1.13 - 4.24M + 7.38 \log R$
	$\log fA$	$-0.872 + 0.434M + 0.260 \log R$
	$fB$	$0.0812 + 0.0206M - 0.0490 \log R$
	$\log hA$	$1.20 - 0.501M - 0.375 \log R$
	$hB$	$-0.0891 + 0.0497M + 0.0290 \log R$
	$\beta 1$	$-0.277 - 0.106M + 0.381 \log R$
$\beta 2$	$0.0344 - 0.0270M + 0.0358 \log R$	
$T$	$10.4 - 11.0M + 27.0 \log R$	
$T$	$42.2 - 8.29M + 3.98 \log R$	
$T$	$37.9 - 4.66M + 4.82 \log R$	

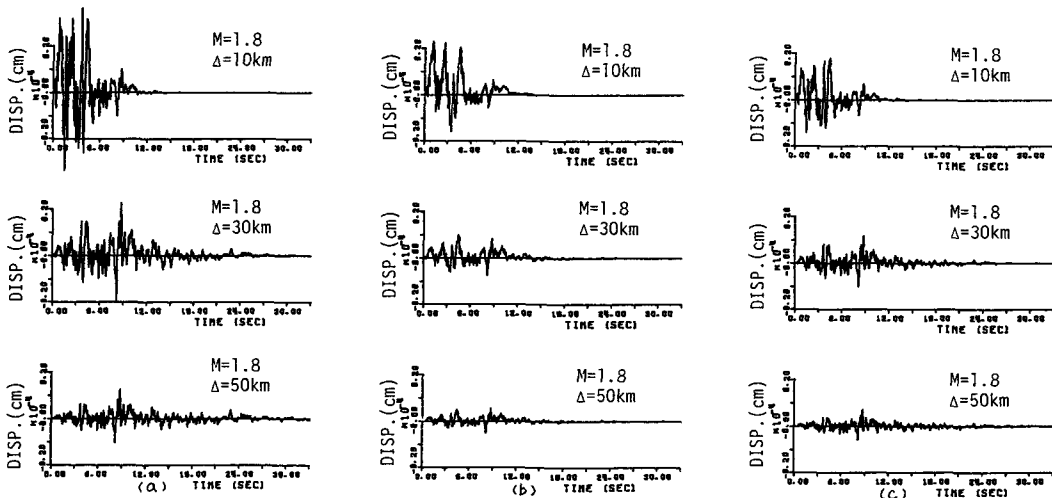


図-7 統計的に予測されたグリーン関数 (変位波形)

ここに  $\alpha_i, \beta_i$  ( $i=1,2$ ) は非定常なモデルパラメータであり、これは入力をホワイトノイズと仮定すると出力値だけから決定できる。さらに、 $\alpha_i$  は次式のように系の固有振動数  $f$  と減衰定数  $h$  とのよって表わされる。

$$\lambda^2 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2 = 0, \quad \left. \begin{matrix} \lambda \\ \lambda^* \end{matrix} \right\} = \exp(-2\pi f T_m \pm i 2\pi f T_m \sqrt{1 - R^2}) \quad (6)$$

したがって、 $f, h, \beta_i$  そして  $\sigma(t)$  がわかれば、統計的グリーン関数がシミュレートできるわけである。表-1はパラメータの非定常性を表わす関数形を示したものであり、表-2は上賀茂、阿武山、妙見の微小地震記録のパラメータを震源距離  $R$ 、マグニチュードに対して回帰分析した結果である。この結果を用いてシミュレーション波形を発生させたのが図-7 (a),(b),(c)である。(a),(b),(c)はそれぞれ上賀茂、阿武山、妙見に対応している。これらの波形は、震源や伝播経路の影響を含む、統計的に予測されるグリーン関数と考えることができる。いずれも震央距離が長くなるにつれて変位振幅は小さくなり、継続時間は長くなる傾向がわかる。また、どの震央距離に対してもすべてピークの現れる位相が一致している。これは、入力となるホワイトノイズのサンプル関数を同一としたためであり、これを変化させれば当然それぞれ異なる波形がシミュレートできるはずである。このグリーン関数を観測点別に見ると、高周波成分や最大振幅にかなりの違いが見られる。これも観測点下の地盤や経路の影響を反映しているものと思われる。

#### 4. 設計地震波動への応用

微小地震波形から統計的に求めたグリーン関数を用いて設計地震波動を作成するには、この統計的グリーン関数を相似則に従って断層面上で多数重ね合せねばならない。しかし、先に述べたように応力降下量一定という仮定が成立しないため、従来の相似則では矛盾が生ずる。この応力降下量の差をくいちがい量に結びつけた相似則を構成し、これを用いて阿武山のグリーン関数を基にして作成した設計地震波動が図-8である。この相似則ならびに設計地震波動のシミュレーション法は、文献 に詳しく述べてあるのでここでは省略した。また、観測点別の設計地震波動の相互比較は当日発表の予定である。

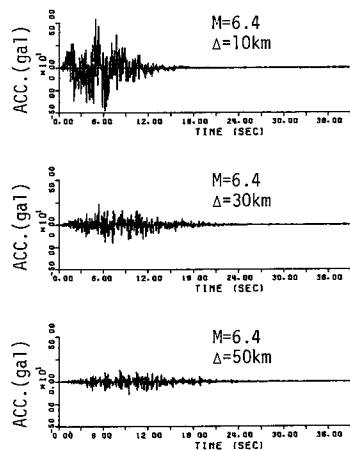


図-8 設計用地震波動の一例

- 1) 変位スペクトルから求められる臨界周波数は、震源の特性だけでなく当該地点の影響をも含んでいる。
- 2) 地震モーメントと臨界周波数の関係は観測点にかかわらず  $f^{-3}$  の傾きをもつ。これは断層モデルから導かれる理論的な傾きとも一致し、微小地震も断層運動の結果として表現できる。
- 3) 応力降下量が一定という仮定は微小地震と大地震の間では成立しない。

#### 謝辞

本研究で用いた微小地震記録は、すべて京都大学理学部阿武山地震観測所から頂いたものである。渡辺助教授をはじめとする観測所の皆様に心からお礼を述べる次第である。

#### 参考文献

- 1)土岐・佐藤・清野；微小地震波形による耐震設計地震波動の予測，第38回年次学術講演会講演概要集
- 2)Geller,R.J.; Scaling Relation for Earthquake Source Parameters and Magnitudes ,Bull. Seism. Soc. Am.,Vol.66, No.5, pp1501-1523,1976.
- 3)Madariaga, R; Dynamics of Expanding Circular Fault, Bull. Seism. Soc. Am.,Vol.66, No.3 pp.639-666, 1976.