

断層モデルに基づく地震動応答スペクトル予測法と  
予測結果のばらつきに関する検討STUDY ON PREDICTION METHOD OF GROUND MOTION RESPONSE SPECTRUM AND  
VARIABILITY IN PREDICTION RESULTS BASED ON FAULT MODELS

引田智樹\*, 池浦友則\*\*, 友澤裕介\*, 石田 寛\*\*\*

Tomoki HIKITA, Tomonori IKEURA, Yusuke TOMOZAWA  
and Hiroshi ISHIDA

It is important to investigate the effect of the uncertainty of the condition of a fault model to the results of the ground motion prediction for scenario earthquake. In such investigation, many case studies of the ground motion prediction are required. In order to calculate the ground motions efficiently, we proposed the simple evaluation method of seismic response spectrum using a fault model. The proposed method using the simplification which assumed the random vibration can obtain easier the mean response spectrum than the calculation of a large number sample by the statistical Green's function method.

Then, the effect of the uncertainty of the fault parameters to the result of the ground motion prediction for the scenario earthquake was investigated by the simulation based on many samples of fault model using the proposed method. Although the spatial distribution of the mean response spectrum was simple, the standard deviation of response spectrum showed complex spatial distribution. The standard deviation of response spectrum was large near a fault edge and at the points on the extension of a fault strike. Since the variability of the predicted response spectrum changes with locations of a calculation point, when evaluating the seismic hazard in consideration of the uncertainty of the fault parameters for the scenario earthquake, it is necessary to scrutinize the effect of the uncertainty for every target calculation point.

**Keywords :** Fault model, Strong ground motion, Response spectra, Variability, Random vibration, Crustal earthquake

断層モデル, 強震動, 応答スペクトル, ばらつき, ランダム振動, 地殻内地震

## 1. はじめに

特定の地震を対象とした地震動予測の一つとして、断層破壊のシナリオを仮定した断層モデルに基づく地震動予測が行われている<sup>1)</sup>など。このような予測では、断層面上のすべりの不均質性や破壊指向性の効果を考慮して、断層近傍において実現性のある地震動を予測することができるため、その結果は特定の地震に対する構造物の耐震安全性や防災対策を考える上で重要な情報となり得る。ただし、将来発生する地震の断層破壊の特徴を予め把握できるわけではなく、仮定した断層モデルの通りに断層が破壊するとは限らないことと、仮定する断層モデルによっては地震動予測結果が大きく変わる場合があることから、一つのシナリオに基づいた予測のみでは十分とは言えず、断層モデル設定における不確かさを考慮して、複数ケースのシナリオに対する予測を行うことが推奨されている<sup>2)</sup>。

近年、断層モデルの設定方法については、標準的な方法が整理されており<sup>3),4)</sup>など、このような設定方法を前提とした上で、断層モデ

ルの設定条件の不確かさが地震動予測結果に及ぼす影響について検討が行われている<sup>5)~9)</sup>。これらの研究では、断層パラメタの不確かさとして、断層面上のアスペリティの位置<sup>6)~9)</sup>、破壊開始点の位置<sup>6)~9)</sup>、破壊伝播速度<sup>7),8)</sup>、アスペリティの大きさ<sup>7),8)</sup>や背景領域に対するすべり量の比<sup>9)</sup>などの不確かさを対象とし、それらのパラメタの変動によって地震動予測結果がどの程度ばらつくかを、統計的グリーン関数法などによる地震動シミュレーションに基づいて検討している。これらにより、断層パラメタの不確かさに起因する地震動予測結果のばらつきの特徴が明らかになりつつあるが、仮定する不確かさの条件を変えた場合に結果がどのような影響を受けるかなど、明らかでないことも多いため、今後の更なる検討が必要である。なお、これらの検討<sup>6)~9)</sup>は基本的にモンテカルロ法による多数サンプルの計算に基づいており、断層モデルによる地震動の計算を多数回行う必要がある。このとき、十分なサンプル数の計算を、多数の評価地点について行うことは簡単とは言えない。特に統計的グリー

本論文の一部は文献 22), 23) で発表している。

\* 鹿島建設(株) 技術研究所 修士(工学)

\*\* 鹿島建設(株) 技術研究所 博士(工学)

\*\*\* 樹小堀錫二研究所 博士(工学)

Kajima Technical Research Institute, M.Eng.

Kajima Technical Research Institute, Dr.Eng.

Kobori Research Complex Inc., Dr.Eng.

関数法では、通常は乱数サンプルを用いて計算を行うことから、平均的な応答スペクトル予測結果を得るために複数の乱数サンプルを用いた計算が必要となり、計算量はさらに増える。計算環境にもよるが、断層パラメタの不確かさが予測結果に及ぼす影響を検討するために、多数のケーススタディを試みようとした時、計算量の多さは障害となる。今後、断層パラメタの不確かさの影響を詳細に検討していくためには、検討方法の工夫が望まれる。

地震動の計算において、計算が簡単という点では距離減衰式を用いた評価が便利である。通常距離減衰式は、断層上の破壊伝播の影響や、すべりの不均質性の影響などを考慮することが難しいため、上記のような検討にそのまま適用することはできないが、距離減衰式のような計算の簡便さがあり、かつ統計的グリーン関数法と同様に断層モデルの特徴を反映した評価が可能な計算法があれば、断層パラメタの不確かさの影響について、より詳細な検討が可能になる。そこで、本論文では、断層パラメタの不確かさが地震動予測結果に及ぼす影響の詳細検討に活用するための、地震動応答スペクトルの簡易な予測法を提案する。そして、マグニチュード7程度の想定地殻内地震に対する地震動予測を例として、提案法を利用した多数サンプルのシミュレーションによって、断層パラメタの不確かさが地震動応答スペクトル予測結果に及ぼす影響を調べ、その特徴について考察した。

## 2. 地震動応答スペクトルの評価方法

短周期地震動は不確定なランダム性を示し、全てを物理的なモデルに基づいて決定論的に評価することは難しい。統計的グリーン関数法 (Stochastic Green's Function Method, SGFM) では、通常は要素となる地震波の作成において、乱数を用いてランダム波のサンプルを作成し、波形合成を行う。このとき、用いるサンプルによって評価結果に違いが生じることから、サンプルを変えた複数ケースの評価を行うといった手段がとられるため計算量が増える。

一方、ランダム波による応答スペクトルの統計的性質は Cartwright and Longuet-Higgins<sup>10)</sup> などによる、極値統計の理論に基づいて評価することができる。Boore<sup>11), 12)</sup> は地震波のフーリエ振幅特性、経時特性を仮定し、その特性に従うランダム波の平均応答スペクトルを周波数領域で直接的に求めている。また、岡野・他<sup>13)</sup> は同様の方法を断層モデルによる地震動評価に適用し、平均応答スペクトルを評価する方法を提案している。

本検討では、仮定した断層モデルによる地震動の平均応答スペクトルを評価するにあたり、これらと同様の考え方により、SGFM による多数ケースの計算を行うことなく、平均応答スペクトルを直接評価する方法の適用を考える。このとき、岡野・他<sup>13)</sup> は SGFM との整合性を重視して、断層面上の各小領域の寄与の重ね合わせを SGFM と同様に処理しているのに対し、本検討ではより簡略化した手法の構築を試みるとともに、ランダム波による最大応答のばらつきを考慮し、平均応答スペクトルだけでなく、その確率分布を評価の対象とする。

提案する応答スペクトル評価のフローを図1に示す。以下、2.1~2.4に図1中の各ステップの内容を示す。評価法の妥当性については2.5および3章で、SGFMによる評価結果との比較を行い確認した。

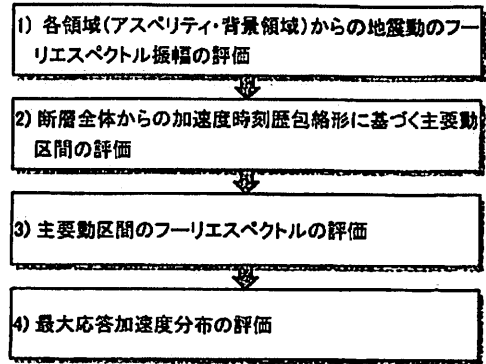


図1 応答スペクトル評価のフロー

### 2.1 各領域からのフーリエスペクトル振幅

断層内の領域  $i$  (単独のアスペリティまたは背景領域) による評価地点における地震動の加速度フーリエスペクトル  $F_i(\omega)$  が以下により表されると仮定する。

$$F_i(\omega) = \frac{R_i}{4\pi\rho\beta^3} \cdot S_i(\omega) \cdot E(\omega) \cdot \frac{1}{r_i} \cdot \exp\left[-\frac{\omega r_i}{2Q\beta}\right] \cdot G(\omega) \quad (1)$$

$R_i$  はラディエーションパターン係数、 $\rho$ ,  $\beta$  は媒質の密度と S 波速度である。 $r_i$  は領域  $i$  の重心から評価地点までの距離、 $Q$  は S 波の Q 値を表す。また、 $S_i(\omega)$  は加速度震源スペクトル、 $E(\omega)$  は高周波数の振幅を低減させるハイカットフィルタ、 $G(\omega)$  は地盤応答特性を表す。

加速度震源スペクトル  $S_i(\omega)$  は、ディレクティビティを表現するために Savage<sup>14)</sup> のモデルを利用して以下のように仮定した。

$$S_i(\omega) = \frac{\omega^2 M_{0i} D_i}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{0i}^2}} \cdot I_i(\omega) \quad (2)$$

式(2)の  $I_i(\omega)$  は後述する高周波数側の振幅を補正するための関数であり、 $I_i(\omega)$  を除いた項が Savage<sup>14)</sup> のモデルを表す。 $M_{0i}$  は領域  $i$  の地震モーメントである。 $T_{0i}$  は  $T_{0i} = 1/(1.078\omega_{0i})$  により与えられる。コーナー周波数  $\omega_{0i}$  は Brune<sup>15)</sup> に基づいて計算した。 $D_i$  はディレクティビティを表す関数であり、破壊形式がユニラテラルの場合は、

$$D_i = \left| \frac{\sin(\omega r_i/2)}{\omega r_i/2} \right|, \quad r_i = \frac{L_i \{(\beta/v) - \cos\theta_i\}}{\beta} \quad (3)$$

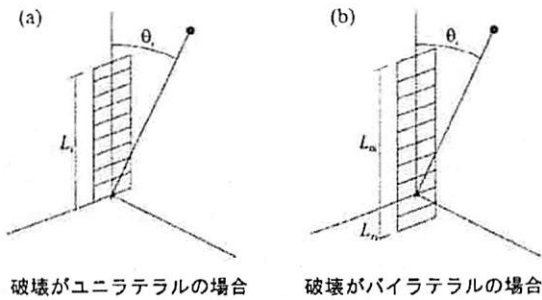
バイラテラルの場合は、

$$D_i = \left| \left[ (L_{0i} D_{0i})^2 + (L_{ni} D_{ni})^2 + 2L_{0i} L_{ni} D_{0i} D_{ni} - \cos\{\omega(r_{0i} - r_{ni})/2\} \right]^{1/2} / (L_{0i} + L_{ni}) \right| \quad (4)$$

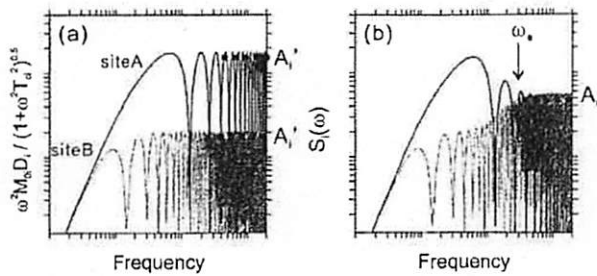
$$D_{0i} = \left| \frac{\sin(\omega r_{0i}/2)}{\omega r_{0i}/2} \right|, \quad r_{0i} = \frac{L_{0i} \{(\beta/v) - \cos\theta_i\}}{\beta} \quad (5)$$

$$D_{ni} = \left| \frac{\sin(\omega r_{ni}/2)}{\omega r_{ni}/2} \right|, \quad r_{ni} = \frac{L_{ni} \{(\beta/v) + \cos\theta_i\}}{\beta} \quad (6)$$

となる<sup>14)</sup>。 $v$  は破壊伝播速度、 $\theta_i$  は破壊方向に対する評価地点の方位、 $L_i$ ,  $L_{0i}$ ,  $L_{ni}$  は領域  $i$  の長さに関するパラメタである (図2)。本検討では、断層面上の破壊開始点から同心円状に破壊が広がると仮定するが、破壊開始点が領域  $i$  の外側にある場合は、破壊が領域  $i$  に到達する最初の点を領域  $i$  の破壊開始点とみなし、領域  $i$  の破壊開始点から領域内部の破壊が進むことをイメージして、領域  $i$  に対する  $L_i$  または  $L_{0i}$ ,  $L_{ni}$  を見積もった。具体的には、領域  $i$  の破壊開始点



破壊がユニラテラルの場合 破壊がバイラテラルの場合  
図2 評価地点方向と破壊域の長さ



式(2)右辺の  $I_i(\omega)$  を除いた項 式(2)による  $S_i(\omega)$   
図3 震源スペクトルモデル化の模式図

が領域  $i$  の端部にある場合には図 2(a)のユニラテラルの場合を、領域  $i$  の内部にある場合には図 2(b)のバイラテラルの場合を当てはめ、破壊開始点と領域  $i$  の重心を通る直線が領域  $i$  を横切る長さを便宜的に図 2 における破壊域の長さとしみなして計算した。

Savage<sup>14)</sup>のモデルは式(2)右辺の  $I_i(\omega)$  を除いた項により表されるが、このとき、コーナー周波数よりも高周波数側の RMS 振幅  $A_i'$  は、破壊形式がユニラテラルの場合には、

$$A_i' = \frac{\sqrt{2}M_{0i}}{\tau_i T_{wi}} \quad (7)$$

と求められ、 $\tau_i$  の逆数に比例した方位による振幅レベルの違いが現れる。同じくバイラテラルの場合も、

$$A_i' = \frac{\sqrt{2}M_{0i}}{T_{ci}(L_{0i} + L_{0a})} \left( \frac{L_{0i}}{\tau_{0i}} + \frac{L_{0a}}{\tau_{0a}} \right) \quad (8)$$

となり、同様に方位性が現れることになる。ただし、統計的グリーン関数法では要素地震のコーナー周波数  $\omega_c$  よりも高周波数側では波形はインコヒーレントに足し合されるため、 $\omega_c$  よりも高周波数側における振幅の方位性は不明瞭になる。その効果を疑似的に表現するために、式(2)では二次のパワースペクトル特性を利用した補正関数  $I_i(\omega)$  によって高周波数側では方位によらず一定の振幅レベル  $A_i = \omega_{ci}^2 M_{0i}$  となるように振幅を補正した。

$$I_i(\omega) = \exp \left[ \ln \left( \frac{A_i}{A_i'} \right) - \frac{(\omega/\omega_c)^2}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^4}} \right] \quad (9)$$

式(2)による震源スペクトルの模式図を図 3 に示す。図 3 は方位の異なる 2 地点に対する震源スペクトルの例を示したもので、図 3(a)が式(2)右辺の  $I_i(\omega)$  を除いた項に対応し、図 3(b)が  $S_i(\omega)$  に対応するスペクトル振幅を示している。

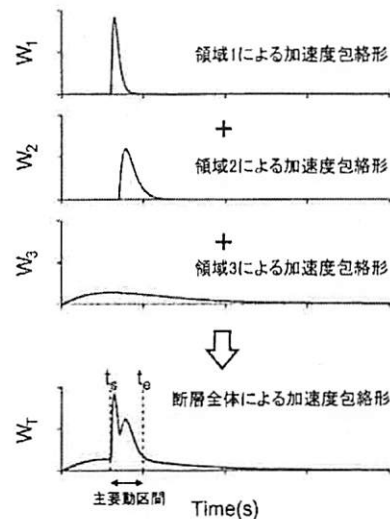


図4 加速度包絡形状モデル化の模式図

## 2.2 加速度時刻歴包絡形に基づく主要動区間の評価

断層内の領域  $i$  からの加速度時刻歴波形の包絡形状を、Boore<sup>11)</sup>と同じ形状  $w_i(t)$  により仮定する。

$$w_i(t) = a \cdot t^b \cdot \exp(-ct) \cdot H(t) \quad (10)$$

$$a = \left( \frac{e}{\varepsilon T_{wi}} \right)^b, \quad b = \frac{-\varepsilon \ln \eta}{1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)}, \quad c = \frac{b}{\varepsilon T_{wi}} \quad (11)$$

ここで、 $H(t)$  は単位ステップ関数を表す。係数  $\varepsilon$  および  $\eta$  は Boore<sup>11)</sup> に倣い  $\varepsilon=0.2$ 、 $\eta=0.05$  と仮定した。継続時間を表す  $T_{wi}$  は、以下を仮定した。

$$T_{wi} = \frac{\xi_i}{v_i} + \frac{(r_{ei} - r_{ri})}{\beta} + t_{ri} \quad (12)$$

$\xi_i$  は領域  $i$  の破壊開始点から破壊が最後に到達する点までの距離を表す。 $r_{ei}$  は破壊が最後に到達する点から評価地点までの距離、 $r_{ri}$  は破壊開始点から評価地点までの距離を表す。 $v_i$  は破壊伝播速度、 $t_{ri}$  はライズタイムを表す。なお、破壊が最後に到達する点は、本検討では便宜的に領域  $i$  の上端のうち破壊開始点から最も遠い点とみなして計算した。式(10)の包絡形状は最大振幅が 1 に規準化されたものであるため、これに最大加速度  $A_{max,i}$  を乗じて領域  $i$  による加速度包絡形  $W_i(t)$  を計算した。

$$W_i(t) = A_{max,i} \cdot w_i(t) \quad (13)$$

この  $A_{max,i}$  は後述する式(29)を用いて評価した周期 0.02 秒の最大応答加速度値を与えることとした。

各領域からの加速度包絡形を、各領域の破壊開始時刻の差を考慮して重ね合わせて断層全体からの加速度包絡形を評価する。短周期地震動の評価を主目的として各領域からの加速度包絡形の二乗平方根 (SRSS) により断層全体からの加速度包絡形  $W_T(t)$  を評価した。

$$W_T(t) = \left[ \sum_{i=1}^K \{W_i(t - dt_i)\}^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$K$  は領域の数、 $dt_i$  は領域  $i$  の破壊開始時間遅れを表す。図 4 にこの

加速度包絡形のモデル化の模式図を示す。

式(14)により求められる断層全体からの加速度包絡形  $W_T(t)$  について、次式で与えられる累積値  $P(t)$  が全時間長から計算される値の5%となる時刻を  $t_5$ 、95%となる時刻を  $t_{95}$  とし、 $t_5 \sim t_{95}$  の区間を主要動の継続時間  $T_d (=t_{95}-t_5)$  と定義した。

$$P(t) = \int_0^t \{W_T(t)\}^2 dt \quad (15)$$

ただし、このような評価方法だと、同程度の振幅を持つ2つの包絡形が時間軸上で大きくずれて重なるような場合は、継続時間が過大に評価されてしまい、後の最大応答加速度の評価に悪影響を及ぼす。そこで、式(13)によって加速度包絡形を評価する際に次の条件を加えて評価を行った。まず、地震動の加速度応答に対する寄与が大きいと思われる領域として、各領域からの加速度包絡形  $W_i(t)$  のうち最大振幅  $A_{max,i}$  が最も大きい領域を調べる。仮にその領域を  $j$  とし、領域  $j$  からの包絡形  $W_j(t)$  と、その他の領域  $i$  からの包絡形  $W_i(t)$  の時間差が一定以上の場合には、最大応答に対する領域  $i$  の寄与は小さいと考え、 $W_i(t)=0$  と置き換えることとした。具体的には、 $W_i(t)$  の最大振幅生起時刻  $t_{mi} = \epsilon T_{wi} dt_i$  と  $W_j(t)$  の最大振幅生起時刻  $t_{mj}$  が  $|t_{mi} - t_{mj}| > \epsilon T_{wj}$  となる場合には、領域  $i$  の寄与を無視して  $W_i(t)=0$  と置き換えた。

### 2.3 主要動区間のフーリエスペクトルの評価

主要動区間における地震動のフーリエスペクトル振幅  $F_T(\omega)$  は、岡野・他(2012)<sup>13)</sup>を参考にして以下のように評価した。

$$F_T(\omega) = \left[ \sum_{i=1}^k \alpha_i |F_i(\omega)|^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$\alpha_i = \frac{\int_{t_5}^{t_{95}} \{W_i(t-dt_i)\}^2 dt}{\int_0^{T_d} \{W_T(t)\}^2 dt} \quad (17)$$

ここで  $\alpha_i$  は各領域からのフーリエスペクトルの二乗振幅のうち、主要動区間に寄与する比率を表す。

### 2.4 最大応答加速度分布の評価

フーリエスペクトル振幅が  $F_T(\omega)$  で与えられるランダム波による一質点系加速度応答の最大値を文献 10)の方法によって評価する。加速度応答波形のRMS振幅  $\sigma$  に対する最大値  $S_o$  の比を  $\eta$  と表す。

$$\eta = \frac{S_o}{\sigma} \quad (18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{m_0}{T_{ms}}} \quad (19)$$

$m_0$  は加速度応答の0次のスペクトルモーメントであり、次数を  $k$  と表すと以下で表される。 $H_o(\omega, \omega_0, h)$  は固有周波数  $\omega_0$ 、減衰定数  $h$  の一質点系加速度応答伝達関数である。

$$m_k = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \omega^k \cdot |H_o(\omega, \omega_0, h)|^2 \cdot |F_T(\omega)|^2 \right\} d\omega \quad (20)$$

$$|H_o(\omega, \omega_0, h)|^2 = \frac{\omega_0^4 + 4h^2 \omega_0^2 \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega_0^2 \omega^2} \quad (21)$$

式(19)ではBoore<sup>12)</sup>、Liu and Pezeshk<sup>16)</sup>に倣い、長周期成分の最大応答の評価精度を向上させるために補正した継続時間  $T_{ms}$  を用いた。

$$T_{ms} = T_d + T_0 \left( \frac{\gamma^n}{\gamma^n + \zeta} \right) \quad (22)$$

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0 h}, \quad \gamma = \frac{T_d}{T_0} \quad (23)$$

$$\zeta = \left[ 2\pi \left( 1 - \frac{m_1^2}{m_0 m_2} \right) \right]^{1/2} \quad (24)$$

式(22)の  $n$  は文献により異なる値を適用した事例が見られる。本検討では、SGFM との比較検討に基づいて  $n=1$  と仮定して適用した。

文献 10)によれば、最大値に対応する  $\eta$  の累積確率分布関数  $U(\eta)$  は以下によって求めることができる。

$$U(\eta) = [1 - q(\eta)]^{N_s} \quad (25)$$

$$q(\eta) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\eta}{\sqrt{2}\mu} \right) + \sqrt{1-\mu^2} \cdot \exp \left( -\frac{1}{2}\eta^2 \right) \cdot \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\eta\sqrt{1-\mu^2}}{\sqrt{2}\mu} \right) \right\} \right] \quad (26)$$

$$\sqrt{1-\mu^2} = \frac{N_s}{N_e} \quad (27)$$

$$N_s = \frac{T_d}{\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \quad N_e = \frac{T_d}{\pi} \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (28)$$

ここで、 $N_s$  は応答加速度波形の時間  $T_d$  におけるピーク数の期待値、 $N_e$  はゼロ線を正の勾配で横切る回数期待値である。式(26)の  $\operatorname{erf}$  は誤差関数である。式(25)に基づいて最大値  $S_o$  の累積確率分布を数値計算する。なお、 $N_e$  が大きい高周波数成分については  $\eta$  の期待値は近似的に以下となる<sup>10)</sup>。

$$E[\eta] = \left[ \sqrt{2 \ln N_s} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln N_s}} \right] \quad (29)$$

### 2.5 評価結果の確認

以上の提案手法(以降ではRandom Vibration Theory Method, RVTMと表す)の妥当性を確認するために、例題を用いてRVTMとSGFMによる評価結果の比較を行った。図5、表1に示す2通りの断層モデルを仮定し、図5に示す2地点での評価結果の比較を行った。どちらも評価対象はS波振幅としてラディエーションパターン係数は0.63と仮定した。 $Q=100f^{0.7}$ を仮定し、 $f_{max}=10\text{Hz}$ よりも高周波数側はハイカットフィルタ [ $E(\omega)=1.0/(1+(\omega/(2\eta f_{max}))^2)$ ]により振幅を低下させた。SGFMによる評価では、各小断層に対応する要素地震波をBoore<sup>11)</sup>の方法に従い乱数を用いて作成した。また、SGFMの評価では断層分割数による影響を排除するために、入倉<sup>17)</sup>に従い各小断層の破壊時刻に乱数による揺らぎを導入するとともに、アスペリティ内部の小断層の地震モーメント、ライズタイムの設定に引田<sup>18)</sup>によるモデル化方法を適用した。

2地点における加速度応答スペクトル評価結果を図6、図7に示す。それぞれ実線が対数平均、点線が対数平均±対数標準偏差を示している。SGFMについては、乱数を変えた要素地震波50サンプルに対し、小断層の破壊時刻の揺らぎを変えた5ケースの計算を行い、計250波を計算した上で、それらの応答スペクトルの対数平均と対数

表1 検討用断層モデルのパラメータ一覧

	パラメータ	単位	case0-1	case0-2
全体	地震モーメント	Nm	1.47E+19	
	断層長さ	km	32	
	断層幅	km	16	
	断層面積	km <sup>2</sup>	512	
	平均応力降下量	MPa	3.1	
	平均すべり量	m	0.9	
	剛性率	N/m <sup>2</sup>	3.12E+10	
	S波速度	km/s	3.4	
	破壊伝播速度	km/s	2.4	
アスペリティ1	面積	km <sup>2</sup>	96	64
	地震モーメント	Nm	5.53E+18	4.09E+18
	平均すべり量	m	1.8	2
アスペリティ2	面積	km <sup>2</sup>	-	36
	地震モーメント	Nm	-	1.44E+18
	平均すべり量	m	-	1.4
背景領域	応力降下量	MPa	16	16
	面積	km <sup>2</sup>	416	412
	地震モーメント	Nm	9.13E+18	9.13E+18
	平均すべり量	m	0.7	0.7
	応力降下量	MPa	2.8	2.8

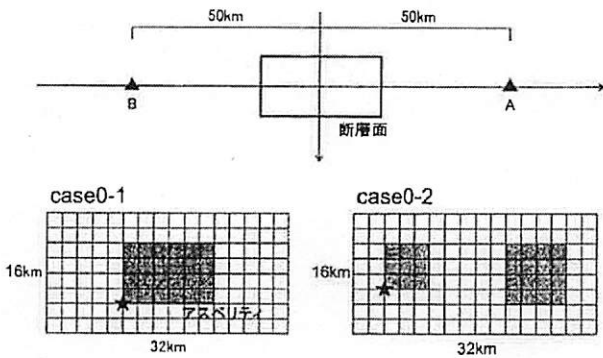


図5 検討用断層モデルと評価位置

標準偏差 (自然対数, 以下全て同じ) を求めている。RVMTM は式(25) によって得られる確率分布の対数平均と対数標準偏差を数値的に求めたものである。なお, SGFM の評価結果のばらつきは, 要素地震波のランダム性と小断層の破壊時刻のランダム性によって生じているが, 後者の影響については小断層サイズに依存し, SGFM の計算条件によって変わるため, RVMTM との比較にあたっては, 要素地震波のランダム性によるばらつきの標準偏差のみを評価し, 図6, 図7 で比較している。図6, 図7 より, いずれのケースについても短周期成分については両者の評価結果が良く一致している。SGFM では破壊伝播の効果により2地点の応答スペクトル振幅に違いが現れているが, RVMTM でもその違いが表現されている。一方で, 長周期成分については, 評価手法によって多少の違いが現れている。

短周期成分の評価に限ると, RVMTM を用いた計算結果は, SGFM の多数サンプルの計算結果とほぼ一致しており, 簡易な計算ながら十分な精度を持つと考えられる。長周期成分の評価精度については課題があるといえるが, 目的とする断層パラメータの不確かさの影響検討にあたり, この点の影響が大きいかどうかを3章において確認する。

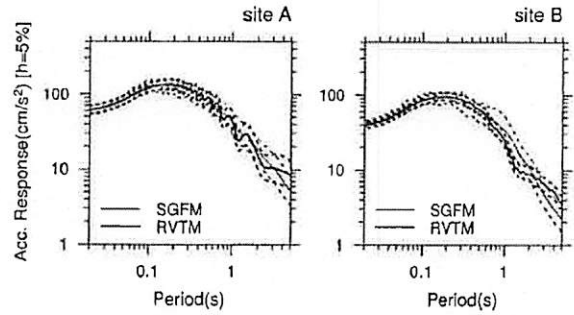


図6 応答スペクトル評価結果 (case0-1)

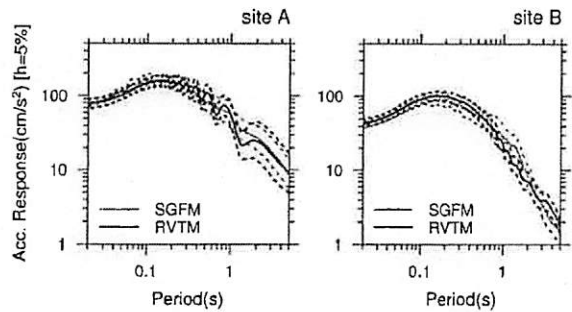


図7 応答スペクトル評価結果 (case0-2)

### 3. 断層パラメータの不確かさの影響検討

以降では, 提案手法を利用して断層モデルパラメータの不確かさが地震動予測結果に及ぼす影響を検討する。例題として, マグニチュード7クラスの横ずれ断層の地震を想定し, 長さ32km, 幅16km, 上端深さ2km, 傾斜角90°の既知の断層面が存在すると仮定する。この断層面に対し, 仮定した断層パラメータの確率分布に従う500サンプルの断層モデルを作成し, 全サンプルによる加速度応答スペクトルの分布を2章に示した方法で評価することによって検討した。

#### 3.1 計算条件

本検討において不確かさを考慮した断層パラメータを表2にまとめて示す。一般的な断層モデル設定方法<sup>19)</sup>などでは, 主要な断層パラメータである地震モーメント  $M_0$  と短周期レベル  $A$  を, 与えられた断層面積  $S$  から,  $S-M_0$ ,  $M_0-A$  の経験式<sup>20)</sup>などに基づいて設定する。しかし, 将来発生する地震の  $M_0$ ,  $A$  が, 必ずしも経験式の平均と一致するとは限らないため, 経験式のばらつきを考慮した検討を行うことは重要である。本検討では  $S$  に対する  $M_0$ ,  $A$  の経験的關係の不確かさを, 壇・他<sup>19)</sup>による12個の内陸地殻内地震に対する,  $S$ ,  $M_0$ , 断層の非一様すべり破壊モデルから算定した  $A$  の値を参考にしてモデル化した。まず, パラメータ間の平均的な關係が  $M_0 \propto S^{1/2}$ ,  $A \propto M_0^{1/3}$  の比例關係に従うと仮定した上で, 回帰分析によって  $S-M_0$ ,  $S-A$  の平均的な關係式を求めた。

$$\ln M_0 = 1.5 \ln S + 34.3 \quad (30)$$

$$\ln A = 0.5 \ln S + 40.8 \quad (31)$$

これらの式における  $S$ ,  $M_0$ ,  $A$  の単位は  $\text{km}^2$ ,  $\text{Nm}$ ,  $\text{Nm/s}^2$  である。 $M_0$ ,  $A$  は式(30), (31)で与えられる平均値を持つ二次元対数正規分布

表2 不確かさを考慮した断層パラメタ

	パラメタ	不確かさの仮定
主要な断層パラメタ	地震モーメント $M_0$	二次元対数正規分布
	短周期レベル $A$	
破壊パターンに係るパラメタ	アスペリティ位置	断層面上に一様分布
	破壊開始点	断層面上の断層中央より深部に一様分布
	平均破壊伝播速度 $v$	$v/\beta$ が正規分布

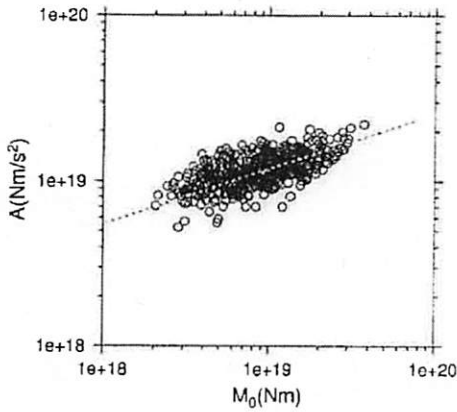


図8 作成した500サンプルの $M_0$ と $A$ の関係 (点線は両者の平均的關係)

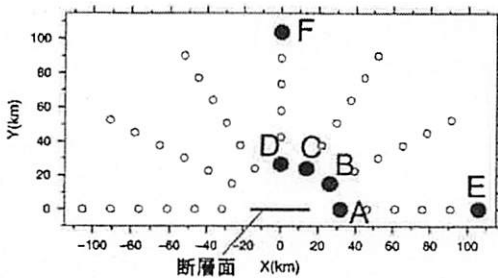


図9 断層面と評価地点の分布

に従うと仮定した。また、この場合も $M_0$ ,  $A$ は $A \propto M_0^{1/3}$ に従う相関性を持つという条件を仮定し、 $A$ の対数標準偏差は $M_0$ の対数標準偏差の1/3倍と設定した。具体的には、データから求めた式(30)に対する $M_0$ の対数標準偏差が0.74であったので、 $A$ の対数標準偏差を $M_0$ の対数標準偏差の1/3倍(=0.25)と仮定した。また、 $\ln M_0$ と $\ln A$ の相関係数はデータより0.63とした。この不確かさのモデル化の妥当性については、今後、詳細に検討していく必要があるが、まずは上記の条件に基づいて検討を行い、震源パラメタの不確かさが予測結果に及ぼす基本的な特徴を把握する。

例題に対して、仮定した分布に従う500サンプルの $M_0$ ,  $A$ を、乱数を用いて計算した結果を図8に示す。このとき、各サンプルの計算結果からレシビ<sup>4)</sup>に従って求めたアスペリティ面積が、全断層面

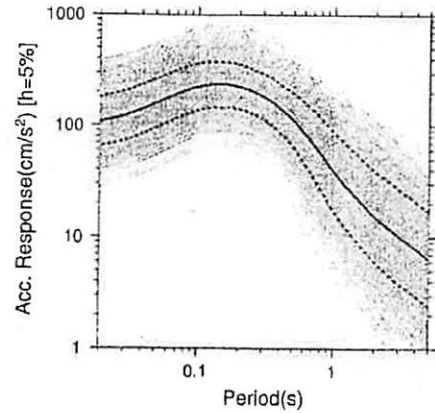


図10 加速度応答スペクトル予測結果の例(地点A)

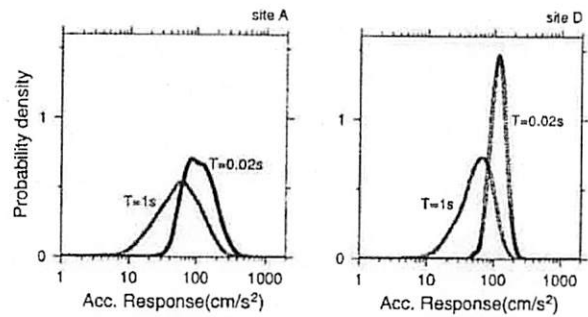


図11 加速度応答振幅の確率密度関数の例(地点A, D)

積の50%を超える場合は、背景領域のすべり量が負の値になってしまうため、そのサンプルは採用しないこととした。図8中の点線は式(30)と式(31)から得られる $M_0$ - $A$ の平均的關係を示したものであるが、この関係は壇・他<sup>20)</sup>の關係に概ね一致している。

この他に、断層面上の破壊パターンに関するパラメタとして、アスペリティ位置、破壊開始点、平均破壊伝播速度の不確かさを考慮した。アスペリティ位置は、アスペリティが断層面内に収まる範囲で一様ランダムに、破壊開始点位置は、断層中央よりも深部の範囲で一様ランダムに配置した。平均破壊伝播速度 $v$ は、S波速度 $\beta$ に対する比 $v/\beta$ が正規分布に従うと仮定し、平均値はGeller<sup>21)</sup>より0.72、標準偏差は山田・他<sup>8)</sup>より0.078と設定した。

破壊パターンに関わる各パラメタの分布と、主要な断層パラメタの分布はそれぞれ独立とした。その他の断層パラメタ(アスペリティおよび背景領域の面積、地震モーメント、応力降下量、ライズタイム)はレシビ<sup>4)</sup>に従って、主要な断層パラメタに連動させて設定した。なお、簡単のためアスペリティ数は1個で、形状は正方形と仮定した。媒質はS波速度3.4km/s、密度2.7g/cm<sup>3</sup>の半無限媒質とし、Q値は $Q=100f^{0.7}$ とした。ラディエーションパターン係数は方位、周波数に依らず0.63とし、 $f_{max}=10$ Hzとして計算を行った。仮定した断層面と評価地点を図9に示す。

### 3.2 計算結果と考察

計算結果の例として、500サンプルの断層モデルに対して、地点Aにおける加速度応答スペクトルをRVTMによって評価した結果を図10に示す。断層サンプル $j$ に対して、式(25)によって最大加速

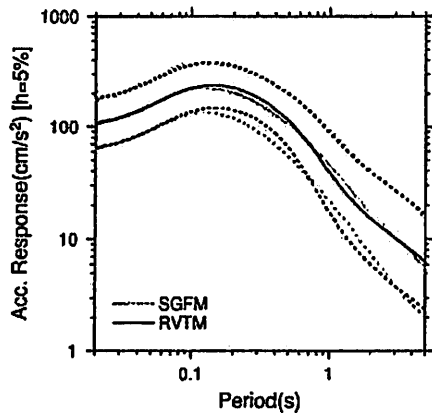


図 12 手法による評価結果の比較 (地点 A)

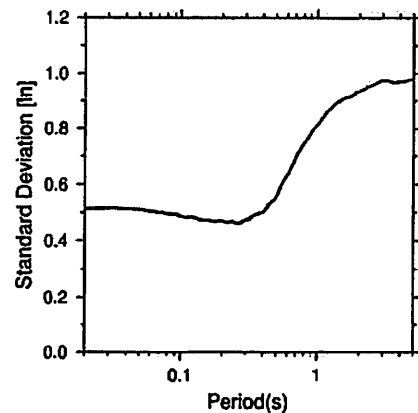


図 13 評価結果の対数標準偏差 (地点 A)

度応答の累積確率分布関数  $U_j(\eta)$  を求め、それらから計算した対数平均を図 10 の細線で 500 サンプル分示している。これらから、全断層サンプルによる最大加速度応答の累積確率分布関数  $\bar{U}(\eta)$  を以下により評価した。

$$\bar{U}(\eta) = 1 - \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} \{1 - U_j(\eta)\} \quad (32)$$

図 10 の黒実線と黒点線は  $\bar{U}(\eta)$  から計算した対数平均と対数平均 ± 対数標準偏差である。このときの、周期 0.02 秒と周期 1 秒の加速度応答値に対する  $\bar{U}(\eta)$  から計算した確率密度関数を図 11 に示す。図 11 には参考として地点 D における評価結果も示している。確率密度関数は周期 0.02 秒については対数正規分布に近い形状を示しているが、周期 1 秒では異なった形状を示しており、長周期成分ではやや複雑な分布形状となる傾向が見られた。

図 10 の RVTM によって評価した加速度応答スペクトルの対数平均を、同じ断層サンプルに対して SGFM によって評価した平均応答スペクトルと比較して図 12 に示す。SGFM の評価では、各断層サンプルに対して、乱数を変えて作成した要素地震波 20 波を用いた評価を行い、それを全ての断層サンプルに対して計算した上で、全ての応答スペクトル評価結果から対数平均と対数平均 ± 対数標準偏差を求めた。RVTM はランダム振動を仮定した近似的な評価法であるが、評価結果の対数平均と対数標準偏差は SGFM による評価結果を概ね再現している。個々の断層サンプルに対する評価結果を比較すると、特に長周期成分については手法による評価結果の違いが目立つケースもあったが、それらの違いは、断層パラメタの不確かさによる評価結果の変動に比べて小さく、全サンプルの評価結果の統計的性質には大きな違いを生じさせていないと考えられる。断層パラメタの不確かさの影響を検討するという目的に対して、RVTM は十分に適用可能と判断できる。以降では、RVTM による評価結果に基づいて、その特徴を整理した。

#### (1) 応答スペクトル評価結果のばらつきの周期特性

地点 A における評価結果のばらつきの対数標準偏差を図 13 に示す。定性的には、ばらつきは短周期成分で小さく、長周期成分で大きい特徴を示している。例題の断層モデルでは震源スペクトルのコーナー周波数が、周期 2~5 秒程度に対応すると考えられ、この帯域では破壊パターンの違いによってスペクトル振幅の変動が大きく

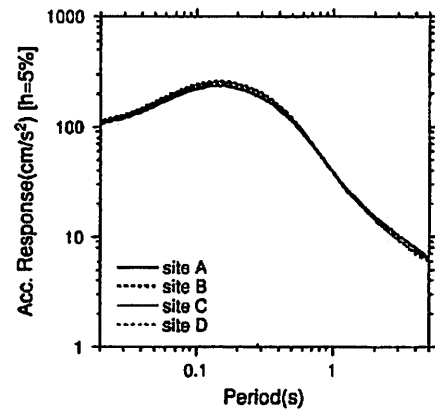


図 14 各地点の対数平均振幅の比較

なることから、応答スペクトル評価結果のばらつきも大きくなっていると考えられる。一方、短周期側については式(2)、(9)で表される通り、短周期地震波のランダム性によって破壊伝播効果による地震動振幅の方位性が小さくなる効果をモデル化しているため、相対的にばらつきが小さくなっている。また、これに加えて、仮定した地震モーメントと短周期レベルの不確かさの関係が、震源スペクトルの長周期側と短周期側の振幅のばらつきの違いを与えていることも影響している。

#### (2) 評価結果の空間分布特性

断層からの方位が異なる 4 地点 (A, B, C, D) の応答スペクトル評価結果の対数平均振幅を図 14 に、対数標準偏差を図 15 に示す。4 地点は、断層面上ですべりが一様と考えた場合の等価震源距離が等しい場所にあり、これらの 4 地点では評価結果の平均振幅はほぼ同じとなっている。一方、対数標準偏差の大きさには違いがあり、断層走向の延長線上にあたる地点ほどばらつきが大きくなっている。また、断層からの方位が同じで距離が異なる 2 地点 (A と E, D と F) の対数標準偏差を比較して図 16 に示す。断層に直交する方向の 2 地点 (D と F) の差は小さいが、断層走向方向にある 2 地点 (A と E) では断層に近い地点 A の方がばらつきは大きい。これらの地点による評価結果の違いを分かりやすくするため、周期 0.02 秒の応答スペクトル振幅に着目して、より密な評価地点に対して対数平均

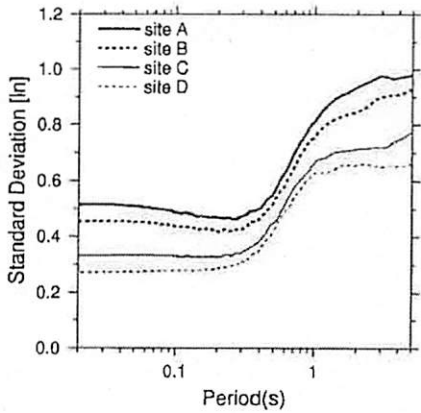


図 15 各地点の対数標準偏差の比較

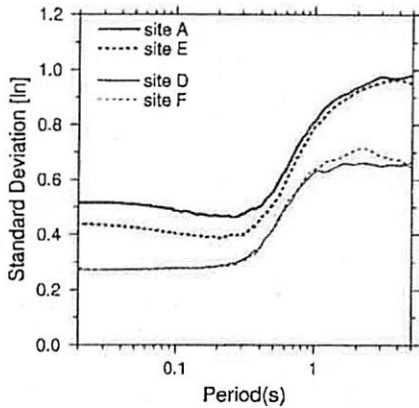


図 16 各地点の対数標準偏差の比較

振幅と対数標準偏差を、式(29)を用いて近似的に評価した。評価結果を図 17 と図 18 にコンターで示す。

図 17 の対数平均振幅(最大値で規準化)は、断層(図中白線)からの距離に応じてほぼ同心円状に分布している。非常に単純な分布であり、断層パラメタの不確かさを考えた場合の平均的な応答スペクトル振幅は、断層からの距離を説明変数とした比較的単純な距離減衰関数でも表現が可能と考えられる。

一方、図 18 の対数標準偏差は断層端部付近で局所的に大きな値を示す領域があり、全体的には断層走向の延長線上に近い領域で値が大きく、断層に直交する方向で小さい値となっている。断層走向方向にあたる地点では、破壊開始点とアスペリティの位置関係に応じて、断層破壊の指向性効果により地震動が非常に大きくなる場合とそうでない場合が発生するため、地震動振幅のばらつきが大きくなる。また、断層端部に近いほどアスペリティ位置の変動によるアスペリティからの距離の変化の影響が相対的に大きくなるため、ばらつきが大きくなると考えられる。これに対して、断層に直交する方向では、破壊方向に対する観測点方向角の変化が少ないため、破壊指向性効果の変動の影響を受けにくい。また、断層走向方向の地点と比較してアスペリティ位置の変動によるアスペリティからの距離の変化も小さくなるため、ばらつきが小さいと考えられる。

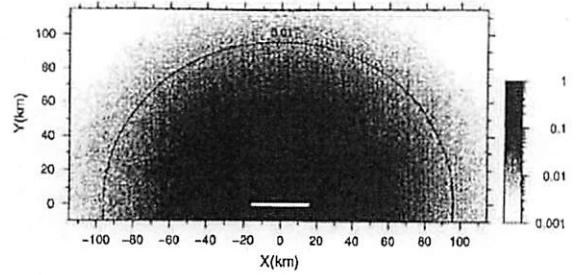


図 17 周期 0.02 秒の規準化対数平均振幅の空間分布

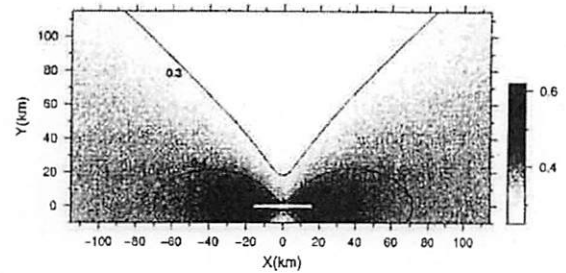


図 18 周期 0.02 秒の対数標準偏差の空間分布

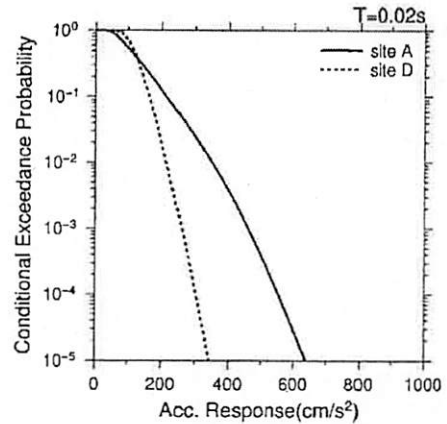


図 19 周期 0.02 秒の応答加速度振幅の条件付き超過確率

このように、応答スペクトル予測結果のばらつきは、断層面に対する評価地点の位置関係に強く依存している。このことは地点毎の強震動予測結果に基づく地震ハザードを考える場合には重要である。例として、地点 A と地点 D について、応答スペクトル分布から求められる、周期 0.02 秒の加速度応答振幅の条件付き超過確率を図 19 に示す。地点 A と地点 D では、図 14 に示したように加速度応答振幅の平均値はほぼ同じであるが、超過確率が低い低頻度の事象ほど地点による違いが大きく、断層の走向方向にあたる地点 A では、より大きな振幅が生じる危険性が高いことを示している。このように、特定の断層を対象とした地震ハザードを考える場合に、断層からの距離が同等の 2 地点でも、断層面に対する評価地点の位置関係によって地震ハザードに違いが生じる可能性があるため、対象となる評価地点毎にその影響を精査する必要があるといえる。



### (3) 断層パラメタの不確かさの寄与

仮定した断層パラメタの不確かさのうち、応答スペクトル予測結果のばらつきに対して、大きな影響を与える要因を把握することは重要である。本検討で仮定した断層パラメタの不確かさは大きく分けると、主要な断層パラメタ ( $M_0$ ,  $A$ ) の不確かさと、破壊パターンに係るパラメタ (アスペリティ位置, 破壊開始点位置, 破壊伝播速度) の不確かさに分けることができる (表 2)。それぞれの不確かさが応答スペクトル評価結果に及ぼす影響を確認するために、表 2 の不確かさのうち、主要な断層パラメタの不確かさについて、 $M_0$  と  $A$  を平均値で固定し、主要な断層パラメタの不確かさの影響を除くことで、破壊パターンに係るパラメタの不確かさの影響を評価し、結果を比較した。

評価地点 A と D における評価結果の対数標準偏差を図 20, 図 21 に示す。図中の  $\sigma$  は破壊パターンに係るパラメタの不確かさと主要な断層パラメタの不確かさの両方を考慮した場合の評価結果、 $\sigma_r$  は破壊パターンに係るパラメタの不確かさのみを考慮した場合の評価結果を示す。 $\sigma_p$  は主要な断層パラメタの不確かさの影響を

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_r^2} \quad (33)$$

により概算した結果である。図 20 と図 21 を比較すると、2 地点の

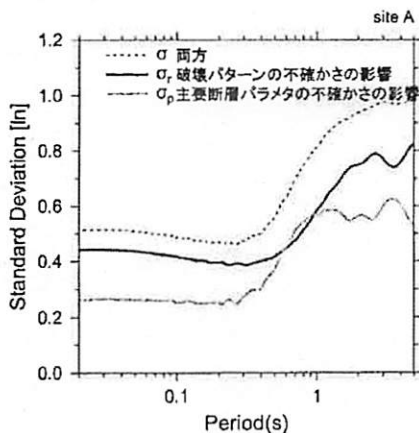


図 20 断層パラメタの不確かさの影響 (地点 A)

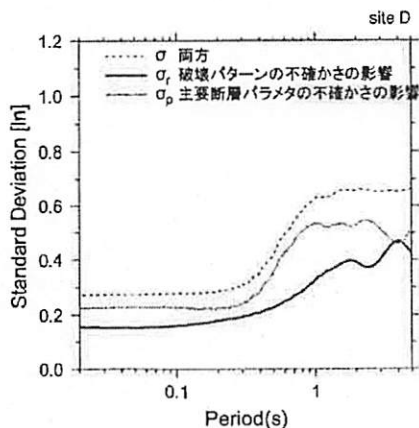


図 21 断層パラメタの不確かさの影響 (地点 D)

$\sigma_p$  はほぼ同じ値であるが、 $\sigma_r$  は大きく異なっている。主要な断層パラメタの変動は、主に震源から励起される地震動強さを変動させ、全地点の地震動振幅に対して同等に作用することから、主要な断層パラメタの不確かさの影響を表す  $\sigma_p$  は地点毎にほぼ同じ値である。一方、破壊パターンに係るパラメタの変動は、主に断層破壊の指向性効果に影響を与え、地震動の空間分布の変動に大きな影響を及ぼす。地点 A では、破壊指向性効果により地震動が非常に大きくなる場合とそうでない場合が発生するため、地震動振幅のばらつきが大きい。地点 D では、破壊方向に対する観測点方向角の変化が少ないため、破壊指向性効果の変動の影響を受けにくく、ばらつきが小さい。

このとき、各地点における  $\sigma_r$  と  $\sigma_p$  の大きさを比較すると、断層走向方向にあたる地点 A では破壊パターンに係るパラメタの不確かさの影響が、主要な断層パラメタの影響に比べて大きい。断層直交方向にあたる地点 D では、破壊パターンに係るパラメタの不確かさの影響が小さく、相対的に主要な断層パラメタの影響の方が大きくなっており、断層面と評価地点の位置関係によって、予測結果のばらつきに大きな影響を与えるパラメタに違いがあることがわかる。

図 18 と同様、周期 0.02 秒の予測結果の対数標準偏差を近似計算した結果から、 $\sigma_r$  と  $\sigma_p$  の空間分布を求め、それらの比を図 22 に示す。図 22 の点線は  $\sigma_r$  と  $\sigma_p$  が等しくなる場所に対応している。断層付近と断層走向の延長線上にあたる領域では  $\sigma_r > \sigma_p$  となっており、この領域では破壊パターンに係るパラメタの不確かさの影響が大きい。その他の領域では、逆に主要な断層パラメタの不確かさの影響が大きいといえる。このように、断層面と評価地点の位置関係によって、予測結果のばらつきの大きさが異なるとともに、ばらつきの主要因となる断層パラメタが異なる。断層パラメタの不確かさの影響検討にあたっては、評価地点によって重視すべき断層パラメタの不確かさに違いがあるため注意が必要である。

### 4. まとめ

本論文では、まず、多数の断層サンプルによる地震動応答スペクトル予測を効率的に行うための応答スペクトル予測法を提案した。次に、提案法を用いて、マグニチュード 7 程度の内陸地殻内地震を想定し、断層パラメタの不確かさが地震動応答スペクトル予測結果に及ぼす影響を、多数の断層サンプルに基づくシミュレーションによって検討した。結果を以下にまとめる。

#### (1) 地震動応答スペクトル予測法

提案法は、ランダム振動を仮定した単純化によって、統計的グリ

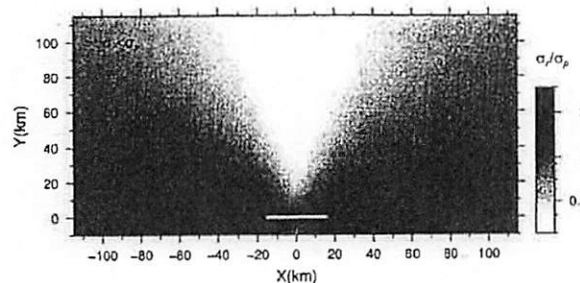


図 22  $\sigma_r$  と  $\sigma_p$  の比較 (周期 0.02 秒)

関数法による多数のサンプル計算の平均応答スペクトルを、少ない計算量で再現することができ、断層モデルの条件を変えた大量のケーススタディを行う場合などに適した方法である。この方法によって、特に短周期成分について統計的グリーン関数法による予測結果を十分な精度で再現できることを確認した。

### (2) 断層パラメタの不確かさの影響検討

表2に示す断層パラメタの不確かさが地震動応答スペクトル予測結果に及ぼす影響について以下の知見を得た。

- 多数の断層サンプルによる応答スペクトル予測結果の平均値の空間分布は、断層からの距離に応じて小さくなる傾向を示し、断層走向に対する方位依存性はあまり無い。
- 応答スペクトル予測結果の対数標準偏差は、断層に対する評価地点の位置によって大きく異なり、断層端部付近や断層走向の延長線上の地点で大きな値となる。断層面に対する評価地点の位置関係によって予測結果のばらつきが異なる。
- 断層走向の延長線上の地点では、破壊パターンに係るパラメタ（アスペリティ位置、破壊開始点位置、破壊伝播速度）の不確かさが予測結果のばらつきに及ぼす影響が大きい。一方、断層に直交する方向の地点では、主要な断層パラメタ ( $M_0$ ,  $A$ ) の不確かさの影響が相対的に大きい。

断層面に対する評価地点の位置関係によって予測結果のばらつきが異なることから、特定の断層を対象として断層モデルの不確かさを考慮した地震ハザードを考える場合には、対象となる評価地点毎にその影響を精査する必要があると考える。

### (3) 課題

実際の強震動予測の場面において、一つの断層破壊のシナリオに基づく予測のみでは不十分であり、複数のシナリオを考えた予測を行うことが重要であるが、今後は、予測に伴う不確かさの影響をより定量的に示すことが求められるであろう。本検討では、震源のモデル化における不確かさのうち、予測結果に及ぼす影響が大きいと考えられる一部の不確かさに着目して検討を行ったが、強震動予測の不確かさの要因はそれらが全てではないため、更に検討を進める必要がある。今後は、提案法を適用して、その他の不確かさの影響についても検討していく予定である。

また、本検討では既往の知見に基づいて  $M_0$ ,  $A$  の不確かさを仮定して検討を行ったが、現状ではその妥当性が十分に確認されているとは言えない。今後は、それらの不確かさの特徴をより詳細に把握していくとともに、強震動予測において考慮すべき不確かさについての十分な議論が必要であると考える。

### 謝辞

図の作成に Generic Mapping Tools<sup>24</sup>を利用しました。記して感謝いたします。

### 参考文献

- 地震調査研究推進本部：“強震動評価”，地震調査研究推進本部 Web site, [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka03.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka03.htm). (参照 2014.06.02)
- 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2012.4
- 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 2009.3

- 地震調査研究推進本部：付録3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシビ」）, 2009.12. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yoso\\_kuchizu/g\\_furoku3.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yoso_kuchizu/g_furoku3.pdf). (参照 2014.06.02)
- 入倉孝次郎, 三宅弘志：シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol.110, No.6, pp.849-875, 2001.
- 野津厚, 盛川仁：特定活断層の影響が卓越する場合のハザード曲線の特徴, JCROSSAR2003 論文集, pp.659-664, 2003.11
- 奥村俊彦, 佐藤俊明, 石井透, P. Somerville, R. Graves, N. Collins：断層パラメタの変動に伴う地震動のばらつきに関する基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, pp.1-6, 2005
- 山田雅行, 先名重樹, 藤原広行：強震動予測レシビに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメタのバラツキについて～, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.1, pp.43-60, 2007.2
- 糸井達哉, 翠川三郎, 鬼頭順三, 三浦弘之, 内山泰生, 坂本成弘：統計的グリーン関数法で評価した地殻内地震の応答スペクトルのバラツキ, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.1, pp.128-142, 2009.2
- Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins：The statistical distribution of the maxima of a random function, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol.237, No.1209, pp.212-232, 1956.10
- Boore, D. M.：Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.12
- Boore, D. M.：Simulation of ground motion using the stochastic method, Pure and Applied Geophysics, Vol.160, pp.635-676, 2003.
- 岡野創, 加藤研一, 森川淳：統計的グリーン関数法による平均的応答スペクトルの直接評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.673, pp.351-360, 2012.3
- Savage, J. C.：Relation of corner frequency to fault dimensions, Journal of Geophysical Research, Vol.77, No.20, pp.3788-3795, 1972.6
- Brune, J. N.：Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.75, No.26, pp.4997-5009, 1970.9
- Liu, L. and S. Pezeshk：An Improvement on the estimation of pseudoresponse spectral velocity using RVT method, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.89, No.5, pp.1384-1389, 1999.10
- 入倉孝次郎：震源のモデル化と強震動予測, 地震, 第2巻, 第46巻, pp.495-512, 1994.
- 引田智樹：矩形クラックモデルを利用した統計的グリーン関数法による地震動評価, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.1, pp.62-79, 2012.2
- 塚一男, 渡辺基史, 宮腰博一：既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティの実効応力と断層タイプおよび深さとの経験的關係, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 第2回シンポジウム論文集, pp.99-108, 2003.
- 塚一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.51-62, 2001.7
- Geller, R. J.：Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.66, No.5, pp.1501-1523, 1976.10
- 引田智樹, 池浦友則, 友澤裕介：断層モデル設定の不確かさによる予測地震動応答スペクトルのばらつき, 日本地震工学会第10回年次大会要覧集, pp.385-386, 2013.11
- 引田智樹：断層モデル設定の不確かさによる応答スペクトル予測結果のばらつき, 第42回地盤振動シンポジウム(2014), 東北地方太平洋沖地震後の想定巨大地震と予測地震動を考える—巨大地震に備えるための地盤震動研究(その4)—, 日本建築学会地盤震動小委員会, pp.77-84, 2014.11
- Wessel, P. and W. H. F. Smith：New improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, pp.679, 1998.

# STUDY ON PREDICTION METHOD OF GROUND MOTION RESPONSE SPECTRUM AND VARIABILITY IN PREDICTION RESULTS BASED ON FAULT MODELS

*Tomoki HIKITA* \*, *Tomonori IKEURA* \*\*, *Yusuke TOMOZAWA* \*  
and *Hiroshi ISHIDA* \*\*\*

\* Kajima Technical Research Institute, M.Eng.  
\*\* Kajima Technical Research Institute, Dr.Eng.  
\*\*\* Kobori Research Complex Inc. Dr.Eng.

The ground motion prediction using the fault model which assumed the characteristics of fault rupture gives important information to the evaluation of seismic safety of structures and disaster management planning to the scenario earthquake. However, we cannot know in advance the characteristics of fault rupture of the earthquake which will occur in the future. Moreover, since the results of the ground motion prediction may change by the condition of a fault model, it is important to investigate the effect of the uncertainty of the condition of a fault model to the results of the ground motion prediction. In such investigation, many case studies of the ground motion prediction are required. In order to calculate the ground motions efficiently, the prediction method needs to be improved.

In this paper, we proposed the evaluation method for performing efficiently seismic response spectrum prediction by many samples of fault model. The proposed method using the simplification which assumed the random vibration can obtain easier the mean response spectrum than the calculation of a large number sample by the statistical Green's function method. It is suitable method when performing many cases of ground motion prediction which changed the conditions of a fault model. About the response spectrum at the short period, it was checked that the proposed method can simulate the prediction result by a statistical Green's function method in sufficient accuracy.

Then, the effect of the uncertainty of the fault parameters to the result of the ground motion prediction for the scenario earthquake was investigated by the simulation based on many samples of fault model using the proposed method. The mean of predicted ground motion response spectra by many samples of fault model became small according to the distance from a fault, and the azimuthal dependency to a strike was not clear. The mean response spectrum in consideration of the uncertainty of the fault parameters can be expressed approximately by the simple ground motion prediction equation which uses the distance parameter as an explanatory variable. Although the spatial distribution of the mean response spectrum was simple, the standard deviation of response spectrum showed complex spatial distribution. The standard deviation of response spectrum was large near a fault edge and at the points on the extension of a fault strike. It is because the predicted ground motion changes by the asperity location or the direction of rupture propagation near a fault edge and at the points on the extension of a fault strike. On the other hand, the effect of the uncertainty of these rupture patterns is small at the points of perpendicular direction with a fault, and the variability of predicted response spectrum is also small. The effect of the uncertainty of a seismic moment and a short period level is relatively large at these points. Since the variability of the predicted response spectrum changes with locations of a calculation point, when evaluating the seismic hazard in consideration of the uncertainty of the fault parameters for the scenario earthquake, it is necessary to scrutinize the effect of the uncertainty for every target calculation point.

(2015年3月10日原稿受理、2015年6月5日採用決定)