

地表断層が不明瞭な地殻内地震の地震動の バラツキに関する一考察

福島 康宏・末富 岩雄・尾茂 淳平

正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ

(〒164-8601東京都中野区本町5丁目33番11号)

E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp, suetomi-i@ej-hds.co.jp, oshige-ju@ej-hds.co.jp

地表断層が不明瞭な $M_w6.8$ の地殻内地震を対象とした場合の震源断層近傍の地震動が、震源パラメータのバラツキによりどの程度バラツキが生じるのか検討を行った。平均的な震源パラメータは強震動予測レシピに基づき設定し、断層傾斜角、アスペリティと破壊開始点の位置、アスペリティ強度(平均すべり量比)、アスペリティ強度(短周期レベル)、破壊伝播速度のばらつきを考慮した。そして、レシピとは異なる枠組みで設定されている内閣府「首都直下地震モデル検討会」での地殻内の浅い地震での震源パラメータを考慮した場合の地震動と比較した。その結果、内閣府の震源パラメータによる地震動は、周期0.6秒程度以下の短周期領域ではレシピに基づきバラツキを考慮した地震動の90%非超過確率の地震動よりやや小さく、周期2秒以上の周期帯では大きくなった。

Key Words : Predicted Ground Motions, Recipe for Strong-motion Prediction, Source Parameters, Stochastic Green's Function Method

1. はじめに

近年、設計用入力地震動を設定する際に、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法といった半経験的手法による強震動予測がしばしば行われている。この際、強震動予測手法の標準化を目指して提案されている「強震動予測レシピ」^{1,2)}(以下、「レシピ」と呼ぶ)が用いられることが多い。「レシピ」では、震源断層の面積と地震モーメントなど、主なパラメータ間の関係には過去の観測データの回帰分析によって求められている経験式が多いことから、「レシピ」に従って設定された震源パラメータは平均的な値となり、予測される地震動も平均的な値となる。しかし、現時点で、強震動予測を行うための詳細な震源パラメータ設定には、多くの不確定性が存在するため、予測される地震動にもバラツキが生じることとなる。

一方、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)による東日本大震災以降、「想定外をなくす」という表現がしばしば用いられ、国などの行政機関による被害想定においても、この観点から最大クラスの地震・津波が発生した場合の想定が行われるようになってきている。地震動に関しても、内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」³⁾や「首都直下地震モデル検討

会」⁴⁾のように、従来考慮されてきたより大きな地震規模を考慮した策定がなされているが、考えるバラツキの中でどの程度の地震動であるのかは明確になっていない。

そこで、本検討では、地表断層が不明瞭な地殻内地震を対象とし、レシピに基づき震源パラメータのバラツキを考慮した地震動を評価し、内閣府「首都直下地震モデル検討会」⁴⁾での地殻内の浅い地震での震源パラメータを考慮した場合の地震動と比較する。

2. 地表断層が不明瞭な地殻内地震の地震規模

2000年6月に公表された土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会による「土木構造物の耐震基準等に関する提言『第三次提言』解説」⁵⁾では、レベル2地震動の下限基準として、「対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合でも、レベル2地震動の設定に当たってはマグニチュード6.5 ($M6.5$)程度の直下地震が起きる可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。」と記されている。これは、武村⁶⁾により調べられている内陸地殻内地震のデータより、 $M \leq 6.5$ の小地震では被害ランクが小さく、 M

≧6.8の大地震では非常に大きな被害をもたらす地震があること、 $M \leq 6.5$ の地震は地表に活断層として痕跡を残していないものが多く、活断層データから地震の発生を予測することが難しいことによる。地震動の下限基準を $M6.5$ の直下地震とすることについては、「土木構造物共通示方書」⁷⁾や、2007年7月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁸⁾でも踏襲されている。

一方、2005年7月に公表された中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会による「首都直下地震対策専門調査会報告」⁹⁾では、地殻内の浅い地震のうち、活断層で発生する地震以外の地震の地震規模として、 $M6.9$ を考慮しており、2005年3月に公表された内閣府(防災担当)による「地震防災マップ作成技術資料」¹⁰⁾においても、「全国どこでも起こりうる直下の地震」として、 $M6.9$ の地震を想定することとされている。これは、 $M6.5$ より地震規模が大きくなると、例えば1925年北但馬地震($M6.8$)など、活断層が認められることが多くなるが、1984年長野県西部地震($M6.8$)のように地表で活断層が認められないものもあることを根拠に、防災上の観点から、 $M6$ 台の最大である $M6.9$ の地震を「全ての地域で何時地震が発生するか分からない」として想定されているものである。

さらに、2013年12月に公表された内閣府 首都直下地震モデル検討会による「首都の $M7$ クラスの地震及び相模トラフ沿いの $M8$ クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書」¹¹⁾では、「地震の発生場所の想定が難しく、都区部及び首都地域の中核都市等の直下に想定する地震」のうち、地殻内の浅い地震として、さいたま市直下地震と横浜市直下地震の地震規模を $M_W 6.8$ としている。これは、地震断層が不明瞭な規模の大きな地震のうち、繰り返し発生による変位の累積を示す変動地形及び地質学的証拠が認められていない2000年鳥取県西部地震の地震規模より決められている。なお、内閣府では、気象庁マグニチュード M とモーメントマグニチュード M_W の関係式として、気象研究所による次式

$$M_W = M - 0.3 \quad (1)$$

を用いており、 $M_W 6.8$ の地震は $M7.1$ 相当としているが、地震調査研究推進本部などで用いられている武村¹²⁾による次式

$$M_W = 0.78M + 1.08 \quad (2)$$

を用いると、 $M7.3$ 相当となる。

以上のように、地表断層が不明瞭な地殻内地震の地震規模については議論の余地があるが、本検討においては、最大の $M_W 6.8$ を考慮することとする。

3. 震源パラメータのバラツキの設定

(1) 震源パラメータのバラツキに関する既往の研究

(旧)原子力安全基盤機構¹³⁾では、各震源パラメータの不確実さについて、「現状の知識不足によって、十分にモデル化できないために生じる不確実さ」と「現象の不確実性として存在するランダムな不確実さ」に分類を行い、強震動予測に必要な各種パラメータ間の相関の有無について分析した結果、アスペリティ位置と破壊開始点位置の相関が強く、それらの設定によるバラツキが大きいことを示している。

山田ほか^{14), 15)}では、強震動予測におけるバラツキを偶発的バラツキと認識論的不確実性に分類し、さらに、それぞれをモデル化とパラメータ設定に分類している。その上で、パラメータ設定における偶発的バラツキの評価を対象として、アスペリティの位置と破壊開始点、アスペリティの強度(平均すべり量の比)、アスペリティの強度(短周期レベル)、破壊伝播速度についてバラツキを設定し、LHS(Latin Hypercube Sampling)法¹⁶⁾によるサンプリングによりバラツキが考慮された震源パラメータから予測される地震動のバラツキの評価を行っている。

土木学会地震工学委員会 地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震力に関する研究小委員会による「地震動研究の進展を取り入れた土木構造物の設計地震動の設定法ガイドライン(案)」¹⁷⁾では、山田ほか¹⁵⁾で考慮されている4つのパラメータとライズタイムのバラツキを考慮して、2007年新潟県中越沖地震を対象とした地震動のバラツキの評価事例が示されている。

土木学会地震工学委員会 耐震基準小委員会 性能照査事例集作成WGによる「性能設計体系における土木構造物の耐震設計事例集」¹⁸⁾においても、断層パラメータを確率的に扱う方法として、山田ほか¹⁵⁾を参考にした、震源パラメータのバラツキを考慮した地震動の算出例が示されている。

(2) 本検討でバラツキを考慮する震源パラメータ

本検討では、地表断層が不明瞭な $M_W 6.8$ の地殻内地震の震源パラメータを設定する。ここでは、平均的な震源パラメータ(基本震源パラメータ)は、地震調査研究推進本部によるレシピ²⁾を参考に表-1のように設定する。また、山田ほか^{14), 15)}を参考に、表-2に示す震源パラメータについて、バラツキを考慮することとする。

以下、震源パラメータのバラツキの設定方法について示す。

a) 断層傾斜角

山田ほか^{14), 15)}では、横ずれ断層の場合と逆断層の場合と分け、それぞれについて検討しているため、バラツキを考慮するパラメータとはなっていない。本検討では、

表-1 本検討での基本震源パラメータ

震源特性		設定値			備考
		アスベリ ティ1個	アスベリ ティ2個	単位	
巨視的 震源特性	傾斜角 δ	60.0		deg	
	モーメントマグニチュード M_W	6.8			
	地震モーメント M_0	2.00E+19		Nm	Kanamori (1977) $\log M_0 = 1.5M_W + 9.1$
	気象庁マグニチュード M	7.3			武村 (1990) $\log M_0 = 1.17M + 10.72$
	断層面積 S	598.9		km ²	Wells and Coppersmith (1994) $S = 4.24 \times 10^{-11} M_0^{1/2}$
	長さ L	34.0		km	$S = LW$
	幅 W	18.0		km	(地震発生層深さを2~20kmとし、2km単位に丸める)
	静的応力降下量 $\Delta\sigma$	3.32		MPa	Eshelby (1957) $\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0/S^{3/2}$
	S波速度 V_S	3.5		km/s	
	密度 ρ	2.8		g/cm ³	
	剛性率 μ	3.43E+10		N/m ²	$\mu = \rho V_S^2$
微視的 震源特性	平均すべり量 D	0.97		m	$M_0 = \rho DS$
	断層全体の短周期レベル A	1.47E+19		Nm/s ²	本検討 $A = 2.52 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$
	全アスベリティの面積 S_a	137.2		km ²	壇ほか (2001) [円形クラック]
	全アスベリティの平均すべり量 D_a	1.94		m	Somerville et al. (1999)、石井ほか (2000) $D_a = D \times 2$
	全アスベリティの地震モーメント M_{0a}	9.14E+18		Nm	$M_{0a} = \rho D_a S_a$
	全アスベリティの静的応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.79		MPa	Madariaga (1979) $\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma$
	第1アスベリティの面積 S_{a1}	137.2	99.8	km ²	入倉・三宅 (2001) $S_1:S_2 \approx 16:6$ を参考
	第1アスベリティの平均すべり量 D_{a1}	1.94	2.17	m	$D_{a1} = (\gamma_1/\Sigma\gamma_i^3) \cdot D_a$
	第1アスベリティの地震モーメント M_{0a1}	9.14E+18	7.44E+18	Nm	$M_{0a1} = \rho D_{a1} S_{a1}$
	第1アスベリティの実効応力 σ_{a1}	14.79	14.79	MPa	$\sigma_{a1} = \Delta\sigma_a$
	第2アスベリティの面積 S_{a2}	—	37.4	km ²	入倉・三宅 (2001) $S_1:S_2 \approx 16:6$ を参考
	第2アスベリティの平均すべり量 D_{a2}	—	1.33	m	$D_{a2} = (\gamma_2/\Sigma\gamma_i^3) \cdot D_a$
	第2アスベリティの地震モーメント M_{0a2}	—	1.71E+18	Nm	$M_{0a2} = \rho D_{a2} S_{a2}$
	第2アスベリティの実効応力 σ_{a2}	—	14.79	MPa	$\sigma_{a2} = \Delta\sigma_a$
	背景領域の面積 S_b	461.7		km ²	$S_b = S - S_a$
	背景領域の平均すべり量 D_b	0.68		m	$M_{0b} = \mu D_b S_b$
	背景領域の地震モーメント M_{0b}	1.08E+19		Nm	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
その他の 震源特性	背景領域の実効応力 σ_b	2.89		MPa	壇ほか (2002) $\sigma_b = (D_b/W_b) / (D_a/W_a) \cdot \sigma_a$
	破壊伝播速度 V_r	2.58		km/s	本検討 $V_r = 0.737 \times V_S$
	第1アスベリティのライズタイム τ_{a1}	0.97	0.97	sec	片岡ほか (2003) $\tau_{a1} = 0.25 \cdot W_{a1}/V_r$
	第2アスベリティのライズタイム τ_{a2}	—	0.58	sec	片岡ほか (2000) $\tau_{a2} = 0.25 \cdot W_{a2}/V_r$
	背景領域のライズタイム τ_b	1.74		sec	片岡ほか (2000) $\tau_{a2} = 0.25 \cdot W_b/V_r$
その他の 震源特性	高周波遮断周波数 f_{max}	6.0		Hz	鶴来ほか (1997)

(参考)内閣府¹¹⁾によるさいたま市直下地震と横浜市直下地震の震源パラメータ

震源特性		設定値		備考
		アスベリティ1個	単位	
巨視的 震源特性	傾斜角 δ	60	deg	中央防災会議 (2004)
	モーメントマグニチュード M_W	6.8		地表断層が不明瞭な地震の規模の上限
	地震モーメント M_0	2.00E+19	Nm	$\log M_0 = 1.5M_W + 9.1$
	気象庁マグニチュード M	7.1		気象研 $M_W = M - 0.3$
	断層面積 S	275	km ²	武村 (1998) $\log S = (1/2) \log M_0 - 10.71$
	長さ L	23	km	松田 (1975) $\log L = 0.6M - 2.9$
	幅 W	12	km	$W = S/L$
	静的応力降下量 $\Delta\sigma$	3	MPa	中央防災会議 (2004)
	S波速度 V_S	3.5	km/s	中央防災会議 (2004)
	密度 ρ	2.8	g/cm ³	中央防災会議 (2004)
	剛性率 μ	3.4E+10	N/m ²	$\mu = \rho V_S^2$
微視的 震源特性	平均すべり量 D	2.11	m	$M_0 = \rho DS$
	SMGAの面積 S_a	54	km ²	中央防災会議 (2006) 0.2Sよりやや大きな値
	SMGAの平均すべり量 D_a	4.22	m	$D_a = D \times 2$
	SMGAの地震モーメント M_{0a}	7.77E+18	Nm	$M_{0a} = \rho D_a S_a$
	SMGAの応力パラメータ $\Delta\sigma_a$	15.40	MPa	$\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma$
	背景領域の面積 S_b	222	km ²	$S_b = S - S_a$
	背景領域の平均すべり量 D_b	1.60	m	$M_{0b} = \mu D_b S_b$
	背景領域の地震モーメント M_{0b}	1.22E+19	Nm	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	背景領域の応力パラメータ $\Delta\sigma_b$	3.08	MPa	$\Delta\sigma_b = 0.2 \cdot \Delta\sigma_a$
	破壊伝播速度 V_r	2.5	km/s	$V_r = 0.72 \times V_S$
	高周波遮断周波数 f_{max}	6	Hz	中央防災会議 (2006) 兵庫県南部地震から推定された値

表-2 本検討でバツキを考慮する震源パラメータ

パラメータ	記号	平均値の設定方法	バツキの設定方法
断層傾斜角	—	30度~90度の範囲と仮定	一様分布
アスベリティ	—	活断層で発生する地震の場合、活断層の変位量の分布をもとに「推定」または「仮定」	一様分布
アスベリティの強度 (平均すべり量の比)	D_a/D	$D_a/D = 2.0$ (石井ほか, 2000)	正規分布、標準偏差0.6 (石井ほか, 2000)
アスベリティの強度 (短周期レベル)	$\log(A/M_0^{1/3})$	$\log(A/M_0^{1/3}) = 17.401$ (本検討)	正規分布、標準偏差0.211 (本検討)
破壊伝播速度 (V_R と V_S の比)	V_R/V_S	$V_R/V_S = 0.737$ (本検討)	正規分布、標準偏差0.068 (本検討)
破壊開始点	—	アスベリティ下端とすることが多い	アスベリティの位置と連動 (アスベリティ下端中央に固定)

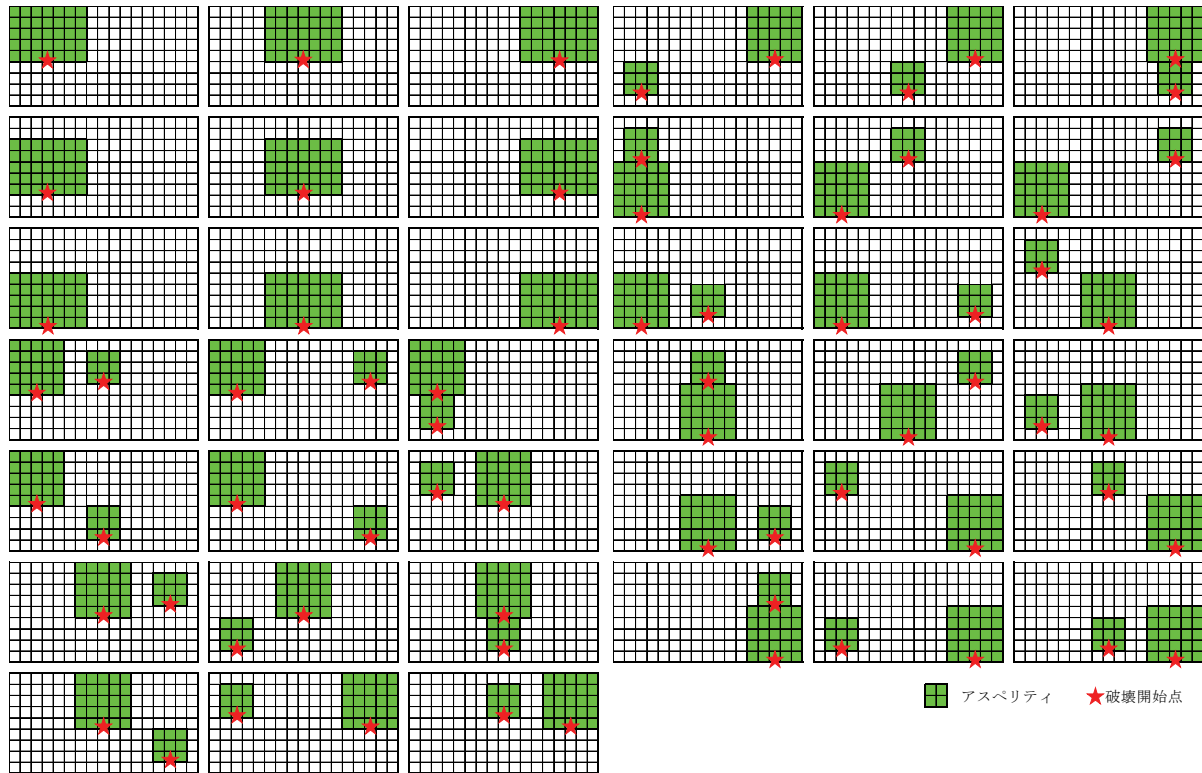


図-1 アスペリティ・破壊開始点の配置69通り

地表断層が不明瞭な地殻内地震を想定していることから、断層傾斜角についてもバラツキを与えることとした。レシピ²⁾では、横ずれ断層の場合90度、逆断層の場合45度を標準としており、低角の場合30度以下、高角の場合60度以上としている。ここでは、30度から90度の範囲と仮定し、バラツキは一様分布とした。

b) アスペリティと破壊開始点の位置

山田ほか^{14), 15)}では、森本・富樫断層帯を想定し、アスペリティ1個のモデルを考慮している。一方、土木学会地震工学委員会 地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震力に関する研究小委員会¹⁷⁾や、土木学会地震工学委員会 耐震基準小委員会 性能照査事例集作成WG¹⁸⁾では、M7クラスの地震規模を想定しているが、アスペリティは2個として検討している。本検討では、「レシピ」に従い、アスペリティの数は1個または2個とし、アスペリティ1個の場合のアスペリティの配置として9通り、アスペリティ2個の場合の配置として30通り設定した。破壊開始点については、山田ほか^{14), 15)}と同様に、アスペリティと連動するとして、アスペリティ下端中央に設定した。よって、アスペリティ・破壊開始点の位置の組合せは、アスペリティ1個の9通りと、アスペリティ2個の30×2通りで計69通りとした。これを図-1に示す。

c) アスペリティ強度(平均すべり量比)

山田ほか^{14), 15)}では、石井ほか¹⁹⁾に基づき、断層面全体の平均すべり量に対するアスペリティの平均すべり量比

D_a/D について、平均2.0、標準偏差0.6の正規分布でバラツキを設定している。本検討においても同様の設定とした。

d) アスペリティ強度(短周期レベル)

レシピ²⁾では、地震モーメントと短周期レベルの関係式として、1995年兵庫県南部地震までの国内外の内陸12地震(国内1地震、海外11地震)のデータに基づく壇ほか²⁰⁾による次式が用いられている。

$$A = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (3)$$

これに基づき、山田ほか¹⁵⁾では、 $\log(A/(M_0^{1/3}))$ について、平均17.391、標準偏差0.254の正規分布としてバラツキを設定している。

その後、短周期レベルについては、佐藤²¹⁾により、国内で発生した近年の内陸地震13地震に関するスペクトルインバージョン結果に基づき、以下の式が提案されている。

$$A = 3.00 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{逆断層}) \quad (4)$$

$$A = 1.80 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{横ずれ断層}) \quad (5)$$

佐藤²¹⁾の検討では、異なる地震に対して、同様のスペクトルインバージョン(佐藤²¹⁾および佐藤・岡崎²²⁾による)がされているが、参照している地震モーメントの値は、各研究者の値となっている。

表-2 内陸地殻内地震の短周期レベルと地震モーメントの一覧

地震	タイプ	短周期レベル A ($\text{dyne} \cdot \text{cm/s}^2$)	A の文献	地震モーメント M_0 ($\text{dyne} \cdot \text{cm}$)	M_0 の 文献	$\log(A/M_0^{1/3})$
1995年兵庫県南部地震	横ずれ	1.48E+26	佐藤(2010)	2.43E+26	HARVARD	17.375
1997年3月鹿児島県北西部の地震	横ずれ	3.42E+25	佐藤(2010)	1.40E+25	F-net	17.152
1997年5月鹿児島県北西部の地震	横ずれ	2.89E+25	佐藤(2010)	1.22E+25	F-net	17.099
1997年山口県北西部の地震	横ずれ	1.97E+25	佐藤(2010)	5.66E+24	F-net	17.044
2000年鳥取県西部地震	横ずれ	8.15E+25	佐藤(2010)	8.62E+25	F-net	17.266
2005年福岡県西方沖地震	横ずれ	1.08E+26	佐藤(2010)	7.80E+25	F-net	17.403
1998年岩手県内陸北部の地震	逆断層	4.54E+25	佐藤(2010)	7.53E+24	F-net	17.365
2003年宮城県北部の地震	逆断層	6.97E+25	佐藤(2010)	1.53E+25	F-net	17.448
2004年新潟県中越地震	逆断層	1.36E+26	佐藤・岡崎(2008)	7.53E+25	F-net	17.508
2004年留萌支庁南部の地震	逆断層	9.43E+25	佐藤(2010)	4.44E+24	F-net	17.759
2007年能登半島地震	逆断層	2.48E+26	佐藤(2010)	1.36E+26	F-net	17.683
2007年新潟県中越沖地震	逆断層	1.44E+26	佐藤・岡崎(2008)	9.30E+25	F-net	17.502
2008年岩手・宮城内陸地震	逆断層	2.66E+26	佐藤(2010)	2.72E+26	F-net	17.613
全地震平均						17.401
全地震標準偏差						0.211

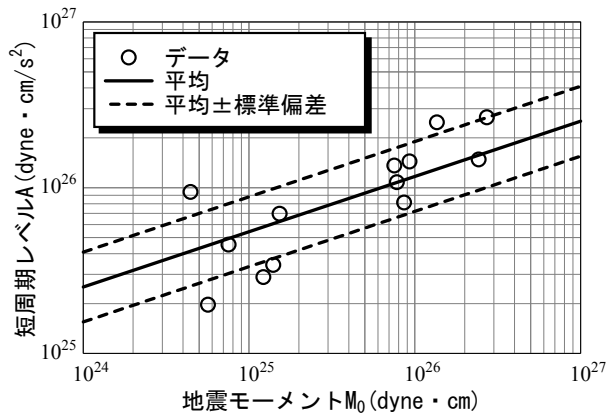


図-2 短周期レベルと地震モーメントの関係

一方、構造計画研究所²³⁾では、佐藤²¹⁾が対象としているのと同様の地震を対象に、フォワードモデリングより得られた特性化震源モデルによる短周期レベルと地震モーメントとの関係を検討し、以下の式を得ている。

$$A = 2.77 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{逆断層}) \quad (6)$$

$$A = 2.71 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{横ずれ断層}) \quad (7)$$

ここで、地震モーメントは、兵庫県南部地震についてはHarvard大学のCMT解、それ以外の地震はF-net²⁴⁾による値が参照されている。

本検討では、短周期レベル、地震モーメントとも地震によらず同様の方法で評価された値を用いることとし、表-3に示すように、短周期レベルは佐藤²¹⁾および佐藤・岡崎²²⁾による値を、地震モーメントはF-net²⁴⁾による値(兵庫県南部地震はHarvard大学のCMT解)を用いて、両者の関係を求めた。佐藤²¹⁾や構造計画研究所²³⁾では、逆断層と横ずれ断層それぞれに対して関係式を求めているが、本検討では、地表断層が不明瞭な地殻内地震を想定しており、事前に横ずれ断層か逆断層か分からないことから、両者を分けずに関係式を求めた。その結果を図-2に示す。既往の研究と同様に、短周期レベルが地震モーメントが

地震モーメントの1/3乗に比例するとすると、下式

$$A = 2.52 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (8)$$

が得られた。得られた関係式は、壇ほか²⁰⁾による式(3)と同程度となっている。これより、 $\log(A/M_0^{1/3})$ の平均は17.401、標準偏差0.211の正規分布によりバラツキを設定した。

e) 破壊伝播速度

レシビ²⁾では、S波速度に対する破壊伝播速度の比 V_R/V_S について、Geller²⁹⁾による0.72が用いられている。一方、山田ほか^{14), 15)}では、国内外の12地震(国内4地震、国外8地震)のデータから求められた宮腰ほか²⁶⁾に基づき、 V_R/V_S について平均0.694、標準偏差0.078と求められている。

本検討では、近年の国内の地震のデータを加え、再検討を行った。その結果を表-4、図-3に示す。複数の震源モデルが提案されている地震については、地震内で平均をとっている。これより得られる V_R/V_S について平均0.737、標準偏差0.068の正規分布としてバラツキを設定した。

4. 震源断層近傍での地震動とそのバラツキ

前章で示した条件を用いて、統計的グリーン関数法²⁷⁾による震源断層近傍での地震基盤における地震動を算定した。震源断層と計算サイトの位置関係は図-4に示す通りである。また、バラツキを考慮した震源パラメータは、既往の研究^{17), 18)}で用いられているLHS法により、全部で345ケース(アスペリティ・破壊開始点の位置69通り×バラツキを考慮するパラメータ5通り)である。

多数の変数があり、それぞれのバラツキも小さくないので、発生確率が低い組み合わせを逃さないためには、モンテカルロ法では大量の計算を行う必要があり、時間と大容量HDDを必要とする。少ない試行回数で効率よ

表-3 内陸地殻内地震のS波速度と破壊伝播速度の一覧

地震	文献	V_s (km/s)	V_R (km/s)	V_R/V_s	
				データ	平均
Landers	山田ほか(2007)の表3	3.6	2.41	0.670	0.669
Tabas	山田ほか(2007)の表3	3.52	2.5	0.710	0.710
Nahanni (12/23)	山田ほか(2007)の表3	3.57	2.52	0.710	0.706
Northridge	山田ほか(2007)の表3	3.6	2.46	0.680	0.683
Nahanni (10/05)	山田ほか(2007)の表3	3.57	2.52	0.710	0.706
Imperial Valley	山田ほか(2007)の表3	3.0	2.37	0.790	0.790
Superstition Hills 3	山田ほか(2007)の表3	3.2	2.36	0.740	0.738
Kagoshima (3/26)	山田ほか(2007)の表3	3.41	2.11	0.620	0.619
Whitter Narrows	山田ほか(2007)の表3	3.13	2.56	0.820	0.818
兵庫県南部地震	山田ほか(2007)の表3 (Kobe sekiguchi)	3.5	2.31	0.660	0.722
	山田ほか(2007)の表3 (Kobe wald)	3.5	2.47	0.706	
	Kamae and Irikura (1998)	3.5	2.8	0.800	
	山田ほか(2007)の表3	3.5	1.8	0.514	
鳥取県西部地震	池田ほか(2001)	3.5	2.5	0.714	0.729
	アスベリティ1	3.5	3.0	0.857	
	アスベリティ2	3.5	2.3	0.657	
	地震調査研究推進本部(2002)	3.5	3.15	0.900	
新潟県中越地震	Kamae et al. (2005)	3.5	2.0	0.571	0.636
	佐藤ほか(2007)	3.47	2.43	0.700	
留萌支庁南部の地震	Maeda and Sasatani (2009)	3.0	2.7	0.900	0.900
福岡県西方沖の地震	Suzuki and Iwata (2006)	3.5	3.15	0.900	0.781
	Miyake et al. (2006)	3.5	3.1	0.886	
	地震調査研究推進本部(2009) Kobavashi et al. (2006)ベース	3.4	3.0	0.882	
	地震調査研究推進本部(2009) Asano et al. (2006)ベース	3.4	2.1	0.618	
	地震調査研究推進本部(2009) Sekiguchi et al. (2006)ベース	3.4	2.1	0.618	
能登半島地震	釜江ほか(2007)	3.5	2.5	0.714	0.757
新潟県中越沖地震	Maeda et al. (2008)	3.5	2.8	0.800	0.798
	入倉ほか(2008)	3.4	2.7	0.794	
	芝(2008)	3.4	2.3	0.676	
	断層全体	3.4	3.1	0.912	
	アスベリティ1	3.4	2.8	0.824	
	アスベリティ2	3.4	2.5	0.735	
	アスベリティ3	3.4	2.7	0.794	
	山本・竹中(2009)	3.4	2.8	0.824	
	アスベリティ1	3.4	2.8	0.824	
	アスベリティ2	3.4	2.8	0.824	
岩手・宮城内陸地震	釜江(2008)	3.5	2.7	0.771	0.771
				平均	0.737
				標準偏差	0.068

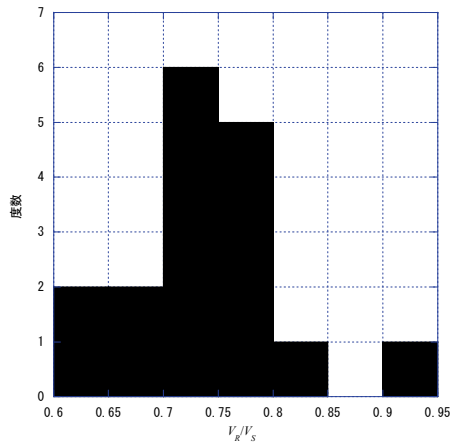


図-3 V_R/V_s の頻度分布

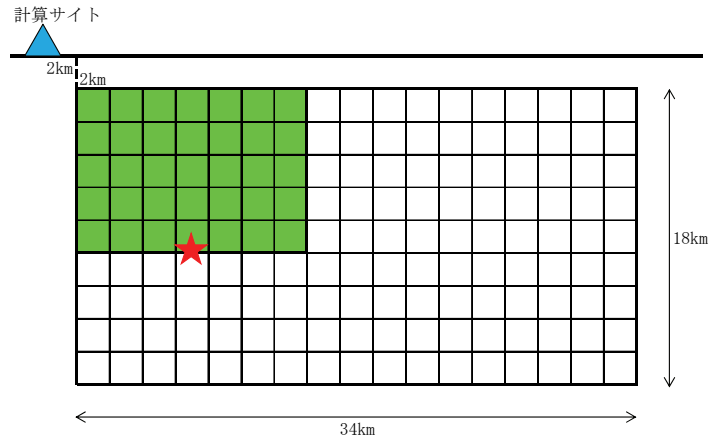


図-4 断層面と計算サイトの位置関係(アスベリティ配置はケース1の場合)

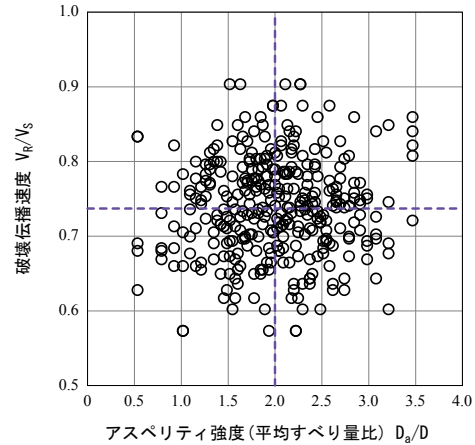
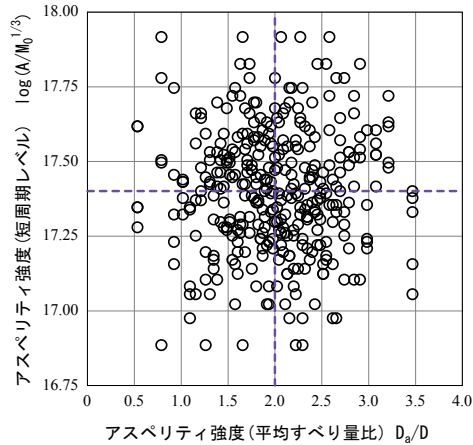


図-5 設定した震源パラメータのバラツキ (紫色の破線は平均値)

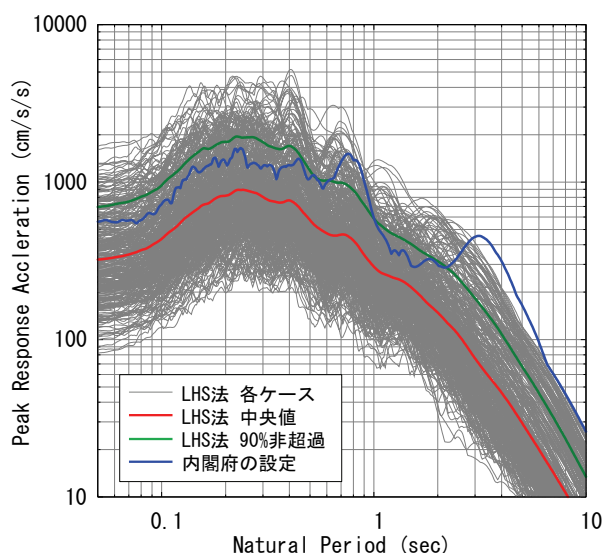


図-6 予測地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)

く結果を得るために実験計画法がある。LHS法はそのひとつであり、低頻度の確率分布の裾野部分も効率よく扱える。層別サンプリングによる領域分割のみでは、効率化は十分でなく、ラテン方格法と組み合わせることで大幅に計算可能となる（例えば、3個の変数を、5分割で計算する場合、層別サンプリング法では $5^3=125$ であるのに対し、ラテン方格サンプリング法では $5 \times 3=15$ である）。ラテン方格とは、一辺が n マスの正方形のマス目に n 種類の異なる記号を、各列および各行に同じ文字が現れないように配置したものである。

LHS法により設定した震源パラメータのバラツキを図-5に示す。LHS法はモンテカルロ法などと比べて少ない試行回数で効率よく計算できることが知られているが、図-5においても、低頻度のパラメータまで考慮できている。LHS法による震源パラメータのバラツキを考慮した345ケースの予測地震動(断層走向直交方向)の加速度応答スペクトルを図-6に示す。図には、中央値と90%非超過確率スペクトルを示している。既往の研究^{17), 18)}と比べると、応答スペクトルのバラツキが大きくなっているが、本検討では、断層傾斜角を30~90度の範囲でバラツキを与えていることが影響していると考えられる。また、図には、表-1に示した内閣府¹¹⁾の震源パラメータを用いた場合の予測地震動のスペクトルも併せて示している。予測地震動の応答スペクトルと比較すると、周期0.6秒程度以下の短周期領域では、レシピに基づきバラツキを震源パラメータのバラツキを考慮した地震動の90%非超過確率スペクトルのほうが内閣府設定のケースより大きくなり、周期2秒程度以上の長周期領域では、90%非超過確率スペクトルよりも内閣府設定のケースのほうが大きい結果となった。本検討と内閣府との震源パラメータを比較すると、地震モーメントは同じであるが、断層面積は本検討のほうが大きいため、断層面全体の平均すべり

量は内閣府のほうが大きくなり、アスペリティの平均すべり量、アスペリティの地震モーメントも内閣府のほうが大きい設定となっている。これが、周期帯による傾向の違いに影響していると考えられる。

5. おわりに

地表断層が不明瞭な $M_{\text{f}}6.8$ の地殻内地震を対象とした場合の震源断層近傍の地震動が、震源パラメータのバラツキによりどの程度バラツキが生じるのか検討を行った。以下にその結果をまとめる。

- ① 平均的な震源パラメータはレシピに基づき設定し、断層傾斜角、アスペリティと破壊開始点の位置、アスペリティ強度(平均すべり量比)、アスペリティ強度(短周期レベル)、破壊伝播速度のばらつきを考慮した。
- ② アスペリティ強度(短周期レベル)、破壊伝播速度のバラツキについては、近年の地震でのスペクトルインバージョン結果やフォワードモデリングによる特性化震源モデルから得られる値を用いて再検討を行った。
- ③ LHS法により設定した震源パラメータのバラツキを考慮した345ケースについて、震源断層近傍の地震基盤における地震動を算定したところ、断層傾斜角をバラツキとして考慮したことにより、既往研究と比べて応答スペクトルのバラツキが大きくなった。
- ④ 345ケースの地震動と、レシピと異なる枠組みで設定されている内閣府「首都直下地震モデル検討会」での地殻内の浅い地震での震源パラメータを考慮した場合の地震動と比較した結果、内閣府の震源パラメータによる地震動は、周期0.6秒程度以下の短周期領域ではレシピに基づきバラツキを考慮した地震動の90%非超過確率の地震動よりやや小さく、周期2秒以上の周期帯では大きい結果となった。

本検討では、図-4に示す断層面との位置関係にある計算サイトで算定したが、他の位置関係についても検討する予定である。さらに、プレート境界地震やスラブ内地震を対象とした検討に取り組む予定である。また、本検討では考慮していないが、伝播経路特性やサイト特性のバラツキを考慮することも今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: 予測のための震源のモデル化, 月刊地球号外, No.37, pp.62-77, 2002.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2009. http://jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf
- 3) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>

- 4) 内閣府：首都直下地震モデル検討会
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/choubou/senmon/shutochokkajishinmodel/>
- 5) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説，2000.
<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3/>
- 6) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連，地震第2輯，第51巻，pp.211-228，1998.
- 7) 土木学会：土木構造物共通示方書Ⅱ(作用・荷重)
- 8) (社)日本港湾協会 監修，国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2009.
- 9) 中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会：首都直下地震対策専門調査会報告，2005.
<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/houkoku.pdf>
- 10) 内閣府(防災担当)：地震防災マップ作成技術資料，2005.
<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050513siryou.pdf>
- 11) 内閣府 首都直下地震モデル検討会：首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書，2013.
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/choubou/senmon/shutochokkajishinmodel/pdf/dansoumodel_01.pdf
- 12) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震第2輯，第43巻，pp.257-265，1990.
- 13) (独)原子力安全基盤機構：断層モデルの高度化に関する検討，JNES/SAE07-063，07 解部報-0063，2007.
- 14) 山田雅行，先名重樹，藤原広行：強震動予測レシピに基づく予測結果のパラツキ評価の検討 ～震源パラメータのパラツキについて～，日本地震工学会論文集，第7巻，第1号，pp.43-60，2007.
- 15) 山田雅行，先名重樹，藤原広行：強震動予測レシピに基づく予測結果のパラツキ評価の検討 ～逆断層と横ずれ断層の比較～，土木学会地震工学論文集，第29巻，pp.104-113，2007.
- 16) McKay, R. L., W. J. Conover, R. J. Beckman : A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, Technometrics, Vol.21, pp.239-245, 1979.
- 17) 土木学会地震工学委員会 地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震力に関する研究小委員会：地震動研究の進展を取り入れた土木構造物の設計地震動の設定法ガイドライン(案)，2009.
- 18) 土木学会地震工学委員会 耐震基準小委員会 性能照査事例集作成 WG：性能設計体系における土木構造物の耐震設計事例集，2014.
<http://committees.jsce.or.jp/eec201/system/files/good%20practice-wg-report.pdf>
- 19) 石井透，佐藤俊明，Paul G. Somerville：強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出，日本建築学会構造系論文集，第527号，pp.61-70，2000.
- 20) 壇一男，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合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，第545号，pp.51-62，2001.
- 21) 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則，日本建築学会構造系論文集，第651号，pp.923-932，2010.
- 22) 佐藤智美，岡崎敦：2007年新潟県中越沖地震と2004年新潟県中越地震の短周期レベル及びアスペリティ総面積のスケーリング，The 2008 Fall meeting of Seismological Society of Japan, Y1-202, pp.305, 2008.
- 23) (株)構造計画研究所：内陸地殻内地震における短周期レベルの地域的な整理・分析業務，原子力安全委員会平成21年度業務委託報告書，2010.
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinkojo/pdf/ukeoi_3.pdf
- 24) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網 F-net
<http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/top.php>
- 25) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, pp.1501-1523, 1976.
- 26) 宮腰研，A. Petukhin：内陸地震の震源インバージョン結果に基づいた破壊伝播速度の不均質性に関する検討，地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会，CD-ROM，2005.
- 27) 釜江克宏，入倉孝次郎，福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測：統計的波形合成法による予測，日本建築学会構造系論文集，第430号，pp.1-9，1991.

(2015. ?? ?? 受付)

A STUDY OF VARIATIONS ON GROUND MOTIONS OF CRUSTAL EARTHQUAKE CAUSED BY CONCEALED FAULTS

Yasuhiro FUKUSHIMA, Iwao SUETOMI and Jumpei OSHIGE

We study variations on predicted ground motions of Mw6.8 crustal earthquake caused by concealed faults.

In this article, while we evaluate basic source parameters based on the Recipe for Strong-motion Prediction, we consider variations on dip angle, position of asperities and rupture point, average slip of asperities, short-period source spectrum and rupture velocity.

The estimated near-fault ground motion using the above parameters is compared with the ground motion using the parameters established by the committee of cabinet office in Japan.