

多数の断層破壊シナリオによる 強震動のばらつき分布

香川 敬生¹

¹正会員 鳥取大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
E-mail:kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

同じ断層の異なる破壊シナリオによる地震動のばらつきと、個々の破壊による地震動の空間的なばらつきを比較検討するため、横ずれ断層と逆断層のそれぞれについて300通りの断層破壊シナリオを設定し、断層を取り囲む200km×200kmの領域内2kmメッシュ毎(10,201点)の強震動(サイト特性は共通)を詳細法(統計的グリーン関数法)で計算した。その結果を用いて、サイトを固定した場合の断層破壊シナリオ毎のばらつきと、個々の破壊シナリオで断層から同じ距離のサイト群から導かれるばらつきを比較した。その結果、一般的な距離減衰式の基本データと共通する後者のばらつきの方が、現実の問題に対応する前者のばらつきよりも大きいことが示唆され、確率論的な地震動評価をおこなう場合のばらつきの与え方の参考となるものと思われる。

Key Words : *fault rupture, multiple scenarios, strong ground motion, variability, spatial distribution*

1. はじめに

一般的な強震動評価では、対象地点および対象震源断層がまず特定される。断層破壊には不確定性があり、予測される地震動にもばらつきが含まれる。その際に評価したいのは、対象断層の破壊シナリオが変動することによるばらつきであり、詳細法を用いた強震動評価では、強震動生成域や破壊開始点などのパラメータを変動させてこれを考慮する。

しかし、簡便法(距離減衰式)でばらつきを評価する場合、その経験式を構築する際に用いられた観測記録のばらつきに結果が依存する。この時のばらつきは、複数の異なる断層で発生した地震による、それぞれ異なる観測点で得られたばらつきであり、本来評価すべき上記のばらつきとは異なるものである。簡便法を用いた確率論的な地震動評価では¹⁾、この空間的なばらつきと長期間にわたって発生する複数のシナリオによるばらつきが等価であると仮定する(エルゴード性)ことになる。特に低確率(低頻度)の事象を扱う場合、誤差分布関数の裾野が対象となり、標準偏差値が大きい場合には過大な地震動を与えることになる。このように、低確率の場合にはエルゴード仮定の妥当性が課題であるが、観測データによる定量的な検討は困難である。そこで、断層破壊シナリオのばらつきを考慮した地震動分布を詳細法で計算

することでその検討を試みた。

ここでは、横ずれ断層と逆断層のそれぞれについて300通りの断層破壊シナリオをランダムに生成し、地震被害に影響が大きい周期1~2秒の帯域まで適用可能な統計的グリーン関数法²⁾を用いて断層周辺の地震動分布を計算した。内陸の活断層地震で活動度の高いものでも1,000年以上の再来期間を持つことを考えれば、ひとつの震源断層で300通りのシナリオを想定することは、30万年以上の期間を扱うことに相当する。得られた結果を用いて、サイトを固定した場合の断層破壊シナリオ毎のばらつき(繰り返し発生する地震の時間的な変動)と、個々の破壊シナリオで断層の距離が同等のサイト群から導かれるばらつき(同じ地震を異なる位置関係で観測する空間的な変動)を比較する。

2. 計算の概要

設定した横ずれ断層および逆断層の大きさは、それぞれひとつに固定した。具体的には、横ずれ断層は長さを26km、幅を16km、断層傾斜を90度とした。逆断層は長さを22km、幅を20km、断層傾斜を50度とした。いずれも断層上端深さを3kmに設定した。断層面積から評価される標準的な地震規模は横ずれでMw6.6弱、逆断層の方

がやや断層面積が大きいため、地震規模もやや大きく Mw6.6強程度となっている。次に、断層面積のみを固定し、地震モーメント、強震動生成域の面積と個数および配置、応力パラメータ、破壊開始点位置、破壊伝播速度などの諸パラメータについて、標準値^{3), 4)}にばらつき^{5), 6)}を与えてランダムに生成し、それぞれ300通りの断層破壊シナリオを設定した。

図-1に逆断層の設定例を示す。図中、断層面は2kmメッシュに分割され、濃いメッシュが強震動生成域、その下端の星印が破壊開始点を示している。断層の幾何形状は固定であるが、強震動生成域の位置および大きさ、破壊開始点位置に加えて、諸パラメータにばらつきが与えられて変化していることが分かる。

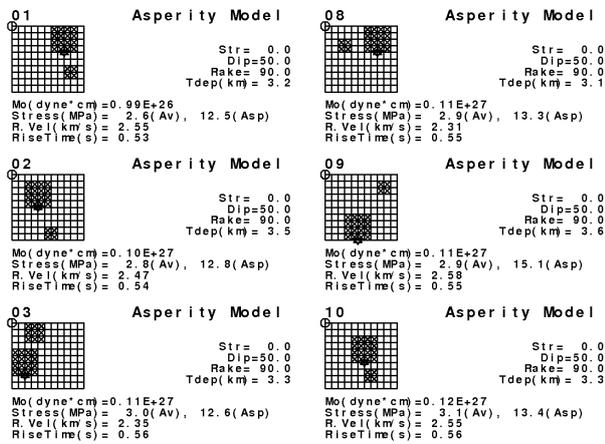


図-1 断層破壊シナリオの例 (逆断層)

これらの断層に対して、図-2に示す200km×200km (2kmメッシュで101×101=10,201点) の計算範囲を設定した。図-1の各断層左上の丸印 (基準点) が、図-2の断層下側に対応する。この結果、横ずれ断層と逆断層のそれぞれについて、震源断層を囲む3,060,300通りの波形を計算することになる。

表-1 想定した地盤構造モデル

Parameters					
Vp (km/s)	Vs (km/s)	ρ	Q_0	Q_f	Depth (km)
1.60	0.35	1.70	35	0.5	0.000
1.80	0.55	1.80	55	0.5	0.092
2.50	1.00	2.10	100	0.5	0.599
5.40	3.20	2.70	63.8	1.0	1.101
6.00	3.50	2.80	63.8	1.0	2.000

Depth of Layer Top

地盤構造については既往研究⁷⁾に倣って一般的な堆積平野・盆地を想定して全計算地点で同じとし、表-1のようなモデルを設定した。地表面としては工学的基盤面 ($V_s=350\text{m/s}$) を設定している。本来、観測地点毎に地下構造が異なり、観測地震動もその影響を強く受ける。

距離減衰式のばらつきにはこの影響が含まれているが、ここでおこなう計算には含まれていない。そのため、純粹に断層破壊シナリオの違いのみによるエルゴード性の検討をおこなうことができる。

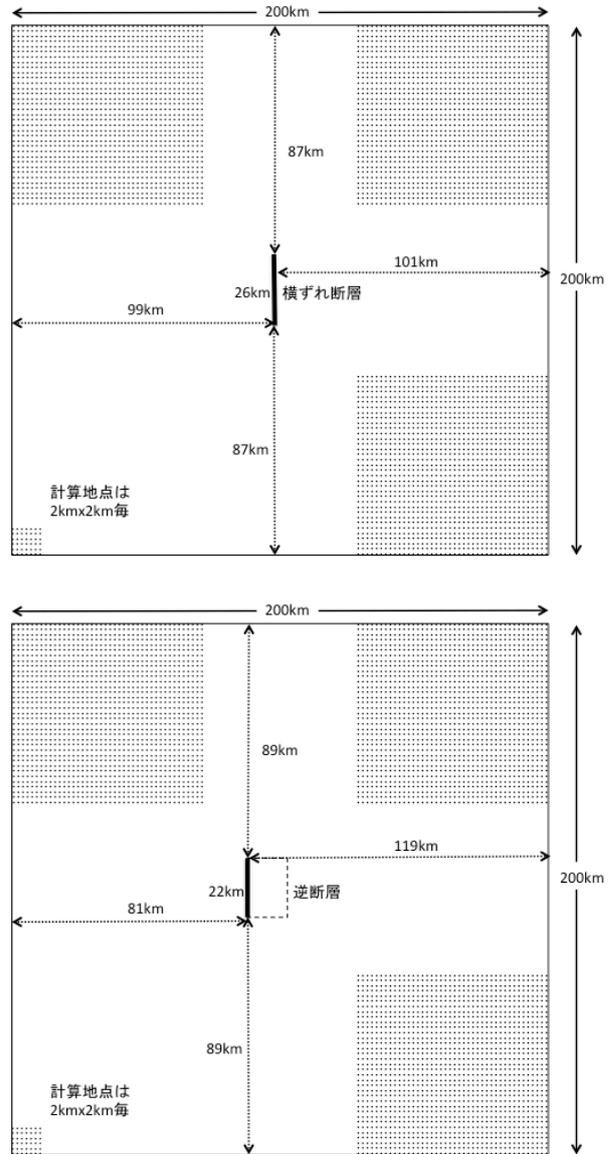


図-2 地震動計算範囲と断層位置 (上: 横ずれ断層, 下: 逆断層)

3. 計算結果

前述の断層破壊シナリオ毎に、設定範囲各点における3成分地震動を統計的グリーン関数法²⁾で計算した。用いた手法は、周波数依存のラディエーション係数 (低周波数では理論通りで高周波数では等方, 低周波数ではコヒーレント位相), 水平多層地盤への斜め入射による地盤応答を考慮しており、震源断層破壊進行による特徴的な地震動を効率的に表現することができる。このため、

地震被害に影響が大きい周期1～2秒の帯域まで適用でき、計測震度を評価することも可能である。

横ずれ断層の破壊シナリオで計算された各メッシュにおける300通り最大速度平均値と、標準偏差値を平均値で除した変動係数を求めた分布を図-3に示す。同様に、逆断層による結果を図-4に示す。個々の計算結果では断層破壊シナリオに応じたフォワード・ディレクティビティの影響が見られ、それぞれに特徴的な分布となっているが、いずれの場合も平均値はほぼ断層距離に対応した距離減衰特性に、ややフォワード・ディレクティビティの影響が見られる特徴を有している。

値の分布に関しては、既往の距離減衰式に簡便な補正（ラディエーションのみ）を施すことで詳細法と対応した結果を得ることができるとも期待される⁹⁾。

変動係数の分布を見ると、それぞれの断層傾斜とすべり方向の違いが明瞭に見られる。図-3下図に示される横ずれ断層の場合、ばらつきが大きくなるのはフォワード・ディレクティビティの影響が大きい断層延長方向であり、変動係数で0.3～0.4となっている。断層斜め45度方向にも断層近傍でばらつきの大きい領域が見られるが、これらは横ずれ断層によるS波放射のノードに対応するものと考えられる。

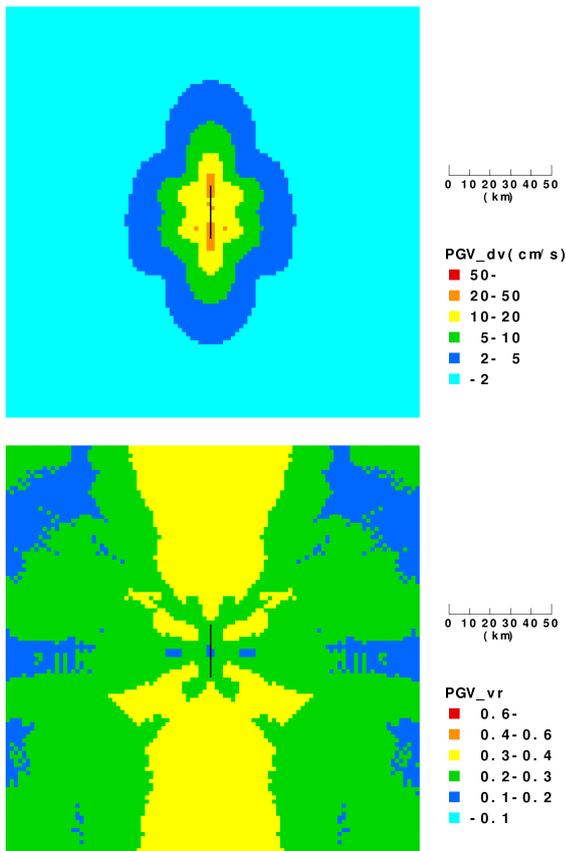


図-3 最大速度平均値（上）とその変動係数（下）の分布（横ずれ断層）

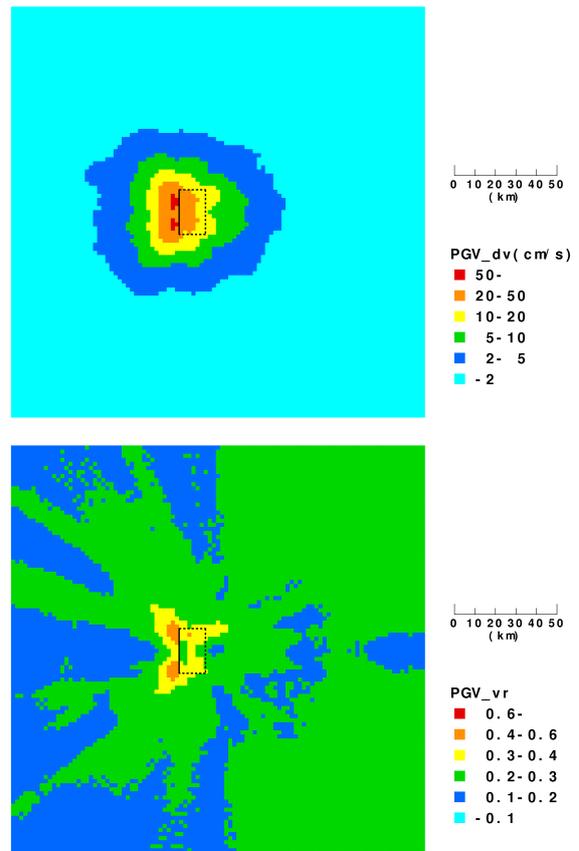


図-4 最大速度平均値（上）とその変動係数（下）の分布（逆断層）

参考までに、全サイトにおいて全300ケースの平均最大速度値を距離減衰式⁸⁾の平均値およびその $\pm 1\sigma$ （標準偏差）分と比較した横ずれ断層の事例を図-5に示す。震源近傍でやや過大となっているのは、フォワード・ディレクティビティの影響が断層近傍で大きくなるためと考えられる。この傾向は逆断層の場合でより顕著に見られた。一方、遠方でやや過小となっているのは、統計的グリーン関数法において伝播経路の幾何減衰を $1/R$ とし、表面波を考慮していない影響と考えられる。これらの違いを考慮すれば、平均的な地震動の特徴は詳細法も簡便法もほぼ共通であることが分かる。このため、平均

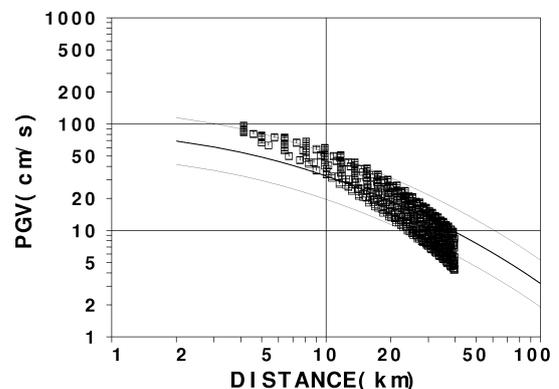


図-5 最大速度距離減衰式⁸⁾との比較（横ずれ断層）

また、図4下図の逆断層の場合も、断層深部から浅部へのフォワード・ディレクティビティの影響により、断層の地表延長部でばらつきが大きくなっているが、横ずれ断層と同様に断層両端部付近でばらつきがより大きくなっていることが分かる。

いずれの場合も、平均値に比べて対称性にやや欠ける傾向があり、300通りの計算は平均値の把握には十分であっても、ばらつきの値を正確に評価するにはまだ少ないことを示唆しているものと思われる。統計的に有意なデータベースとするためには、これらが対称となる程度までケース数を増やしたデータセットを作成する必要があるが、ばらつき分布の傾向は十分に示せているものと考えている。

4. 考察

計算した地震動のばらつきについて、各サイトにおける断層破壊シナリオの違いから評価したもの（時間的変動）と各シナリオで断層距離がほぼ等価なサイト群で評価したもの（空間変動）を比較する。

図-6に横ずれ断層の結果を示すが、上の図は時間変動を表しており、計算地点毎に全300通りのシナリオから標準偏差（自然対数）を評価し、それを断層距離に対してプロットしたものである。距離によらずほぼ0.1程度の値を示しており、既往距離減衰式⁸⁾の標準偏差（図中で一定値を示す線）の半分以下となっている。図-6の下は空間変動に対応し、ひとつのシナリオ毎に、断層距離が5km以内、5～10km、10～15kmと5km刻みの輪の中に存在する計算点で標準偏差を評価し、断層距離の重心に対してプロットしたものである。つまり、各距離群における標準偏差が300通り評価されていることになる。シナリオによって標準偏差値が異なり、特に震源距離が15km以内の場合には倍半分程度になっている。標準偏差が大きいのはフォワード・ディレクティビティの影響が大きいケースであり、距離減衰式を構築する際、その記録がどのような条件で得られたかも影響することを示唆している。全シナリオの重心レベルは、図の上にした時間変動で評価した場合よりも大きい。それでも距離減衰式によるものよりは小さいが、サイト特性のばらつきを加えることにより、同程度になることが考えられる。なお、上図と下図の距離依存特性は良く似ている。

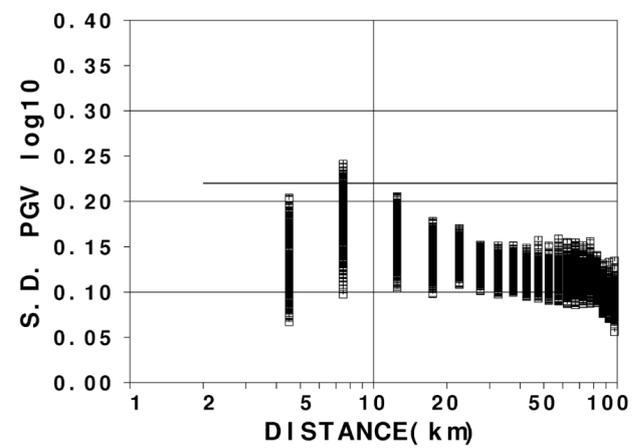
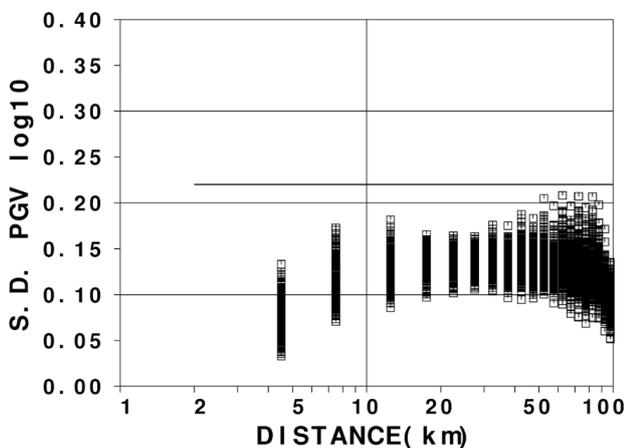
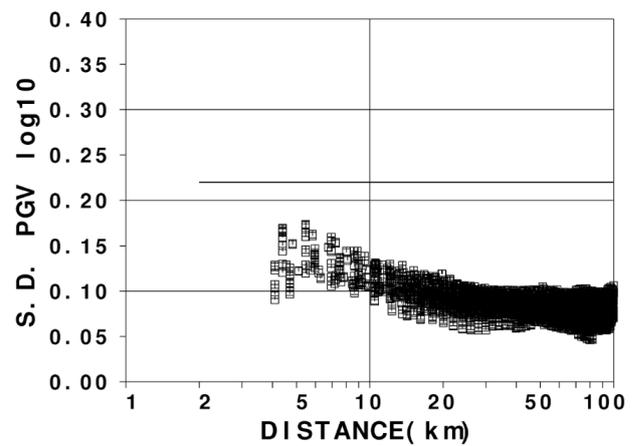
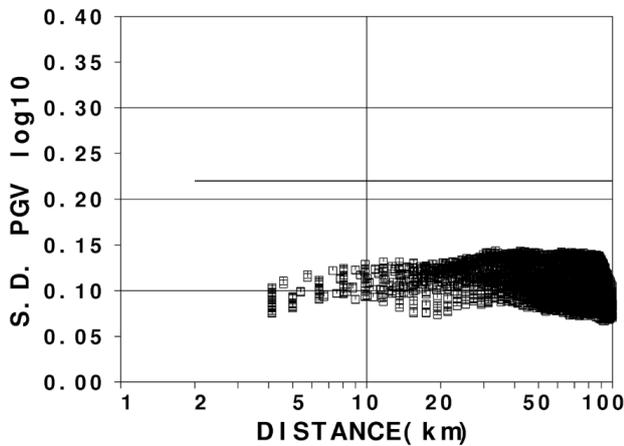


図-6 時間変動（上）と空間変動（下）による標準偏差の距離による違い（横ずれ断層）

図-7 時間変動（上）と空間変動（下）による標準偏差の距離による違い（逆断層）

次に、同様の検討を逆断層でおこなった結果を図-7に示す。空間変動を示す上の図は、震源距離が近いほど標準偏差が大きく、遠い場合は横ずれの場合よりもやや小さい傾向を示している。平均的な値が0.1程度であることは横ずれ断層の場合と同様である。空間変動を示す下の図も、傾向は上の図と似ているものの、その値は時間変動で整理したものよりも有意に大きい。震源距離が15km以内の場合には、標準偏差値は倍半分以上異なり、特に震源距離5~10kmの値には、距離減衰式の標準偏差よりも大きいシナリオが見られる。この場合も、サイト特性のばらつきを考慮すれば、より大きな標準偏差が評価されるものと考えられる。

以上の結果から、サイトと対象断層が特定されており、その断層破壊シナリオが未知の場合、多くのシナリオで評価した地震動のばらつき（時間変動）は距離減衰式で評価したばらつきよりも有意に小さいことが示唆される。このことは対象サイトの増幅特性が変わっても同様であると期待されるが、非線形地盤応答が顕著な地盤の場合には地震動によってサイト増幅特性が変化するため、より大きなばらつきになる傾向は見られよう。一方で、ひとつの地震で複数地点の観測記録が得られた場合のばらつき（空間変動）は、たとえサイト特性の影響が無い場合でも、断層との位置関係の影響などを受けて、上記のばらつき（時間変動）よりも大きいことが懸念される。

したがって、確率論的地震動評価に距離減衰式を用いる場合には、用いたデータ全てによるばらつきではなく、空間的な変動の影響を取り除いたばらつきを用いることが望ましい。これについては、サイトを固定したばらつきの評価などが近年実施されている¹⁰⁾。あるいは、確率論的地震動評価といえども、詳細法によって複数のシナリオを想定した評価⁷⁾をおこなうことで、低確率（低頻度）の地震動をより合理的に評価できることが期待される。

5. おわりに

横ずれ断層と逆断層について、断層の幾何形状と地震の規模を固定してそれぞれ300通りの断層破壊シナリオを設定し、断層を取り囲む200km×200kmの領域内で2kmメッシュ毎（10,201）の強震動波形を、地震被害に影響の大きい周期1~2秒まで適用可能な統計的グリーン関数法で計算し、シナリオの違いによるばらつき（時間変動）と断層との幾何的な位置関係による空間的な変動を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 計300通りのシナリオによる結果を平均した強震動分布は、ほぼ断層からの距離に応じて減衰する単純な分

状を示し、距離減衰式による予測結果に近いものとなった。

- 2) 変動係数の分布はフォーワード・ディレクティビティの影響を反映した特徴的なものとなった。ただし、平均値に比べて対象な形状を呈しておらず、ばらつきの値を正確に評価するにはまだケース数を追加する必要があると思われる。
- 3) 上記1), 2)の結果を反映して、距離減衰式の平均値分布を補正し、対象地点と想定断層との位置関係に応じたばらつきを導入することで、簡便法による予測の高精度化が期待される。
- 4) 横ずれ断層、逆断層とも、シナリオの違いによるばらつき（時間的な変動）よりも、個々のシナリオで断層から同じ距離のサイト群のばらつき（空間的な変動）が、サイト特性を共通とした条件であっても大きいことが示された。
- 5) 空間的な変動にサイト特性の違いによる影響を含んだ距離減衰式によるばらつきは、実際の課題として設定すべき断層破壊シナリオの違いによるばらつき（時間的な変動）よりも過大となっていることが示唆される。

本論では最大速度値のみに着目したが、得られた全6,120,600通りの計算波形からは様々な地震動特性値やスペクトルを算出することができる。サイト特性は全計算値点で共通であるため、別の計算地点の結果は、同じサイトにおいて想定断層との位置関係を変えたケースとも見なすことができる。また、地盤の違いによるサイト補正を施すことでその影響を考慮することも可能である。このような計算をいくつかの断層規模で実施しておくことにより、簡便にハザード解析を試行できるデータベースとして、観測記録を補って活用することも期待される。

謝辞：「本論文の横ずれ断層に関する計算の一部は、(公社)土木学会リスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同研究小委員会（委員長：多々納裕一・澤田純男）の一環として実施したものである。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Cornell, C. A. : Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 58, pp.1583-1606, 1968.
- 2) 香川敬生：ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集(<http://www.jaee.gr.jp/>), Vol. 4, No. 2, pp.21-32, 2004.
- 3) 入倉孝次郎, 三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol.110, pp.849-875, 2001.
- 4) Irikura, K, Miyake, H., Iwata, T., Kamae, K. Kawabe, H.,

- and Dalguer, L. A. : Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake, *Proceedings of the 13WCEE*, 1371, 2004.
- 5) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological. Research. Letters.*, Vol. 70, pp.59-80, 1999.
 - 6) Kagawa, T., Irikura, K., and Somerville, P. G. : Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes, *Earth, Planets and Space*, Vol. 56, pp.3-14, 2004.
 - 7) 香川敬生：広域応力場を反映した断層モデルによる確率論的地震ハザード評価の試み，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM, 2010.
 - 8) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，Vol. 523, pp. 63-70, 1999.
 - 9) 香川敬生：断層モデルとの比較に基づく震源破壊進行を考慮した経験的距離減衰特性の補正について，土木学会地震工学論文集，第30巻，pp.59-64, 2009.
 - 10) 池浦友則，野田静男：同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき-地震規模と震源距離がそれぞれ等しい強震記録ペアの分析-，日本地震工学学会論文集，Vol. 5, No. 3, pp. 12-30, 2005.

A STUDY ON SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITIES OF STRONG GROUND MOTIONS BASED ON MULTIPLE FAULT RUPTURE SCENARIOS

Takao KAGAWA

Three hundreds of fault rupture scenarios considering uncertainties are generated for both strike slip and reverse faults with magnitude around Mw 6.6, in this paper. Ground motions are simulated by stochastic Green's function method at 10,201 sites in 200 km x 200km area with 2km grids. Very simple distribution of average ground motion is derived from the results, however, distribution of standard deviation is rather complex but accountable from radiation pattern and forward directivity effect.

Applying fault rupture model on PSHA, it is expected to get over an intrinsic problems of general PSHA based on empirical attenuation formulae. The formulae are based on data set of observed ground motions at various sites due to limited number of earthquakes; i.e. spatial variation, although required design basis ground motions should be defined at a target site from an assuming source fault with uncertainties of repeating fault ruptures; i.e. temporal variation. In probabilistic earthquake hazard analysis, this problem is supplemented by ergodic property. Using the calculated data sets above, ergodic property of uncertainties are examined. Through the study, it is assumed that temporal variations are remarkably smaller than spatial variations.