

断層パラメータの変動に伴う 地震動のばらつきに関する基礎的検討

奥村俊彦¹・佐藤俊明²・石井 透³

Paul SOMERVILLE⁴・Robert GRAVES⁵・Nancy COLLINS⁶

¹(株)大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

E-mail:oku@shimz.co.jp

²(株)大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

E-mail:toshiaki.sato@shimz.co.jp

³(株)大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

E-mail:tokyo@shimz.co.jp

⁴URS Corporation (566 El Dorado Street, Pasadena, CA 91101, USA)

E-mail:Paul_Somerville@URSCorp.com

⁵URS Corporation (566 El Dorado Street, Pasadena, CA 91101, USA)

E-mail:Robert_Graves@URSCorp.com

⁶URS Corporation (566 El Dorado Street, Pasadena, CA 91101, USA)

E-mail:Nancy_Collins@URSCorp.com

本研究では、地震動予測に関わる種々のばらつきのうち、震源断層のパラメータの変動に伴うばらつきに着目し、それらのうちの代表的なものを変動させたシミュレーションに基づき、地震動強さの中央値とばらつきの解析領域内での分布性状を検討した。この結果、特に長周期帯域においては、震源断層からの距離が同一であっても評価地点と震源断層の位置関係によって値が変化することが明らかとなった。この傾向は、距離減衰式を用いた評価では容易に表現し得ないものであり、今後の確率論的な地震動予測において、詳細な強震動予測手法を導入していくことの重要性を示している。最後に、これを踏まえ、詳細な強震動予測手法の確率論的地震動予測への応用のメニューを示した。

Key Words: Strong Ground Motion, Probabilistic Seismic Hazard, Variability, Spatial Distribution

1. はじめに

確率論的地震ハザード評価では、地震の諸元が与えられた場合の着目地点における地震動の強さの確率分布が必要とされ、一般的には、距離減衰式による推定値とそのまわりのばらつきを用いて確率分布が表現されている。このように、簡便な距離減衰式を用いて地震動強さの確率分布を評価する場合には、震源断層からの距離が同じ地点であれば地震動の強さの平均値は同一と評価され、また、地震動強さのばらつきの大きさは震源断層との位置関係によらず同一の値となる。しかしながら、距離減衰式では深部地下構造による影響を考慮することが困難であることに加えて、特に震源断層の近傍においては、断

層の破壊過程の影響が地点での地震動特性に強く影響すると考えられるために、震源断層のまわりでの地震動強さの値やそのばらつきの空間分布は、より複雑な性状を示すことが予想される。したがって、地震ハザード評価の高精度化を図る上では、地点に対する影響の強い地震に対して、距離減衰式ではなく、詳細な強震動予測手法を適用していくことが今後の方向として考えられており¹⁾、実際にいくつかの提案や試み^{2),3),4)}が行われ始めている。

さらに、構造物の耐震設計においても、構造物に求められる多面的な要求性能に基づく意思決定に資するためには、今後は、設計用入力地震動のばらつきについての情報が求められる機会が多くなるものと予想される。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、詳細な強震動予測手法を確率論的な地震動予測に応用することを念頭に実施したものである。このために、断層パラメータの変動が強震動の予測結果に対して及ぼす影響についての検討を行った。同種の検討は、Takeo and Kanamori⁵⁾や大塚・他⁶⁾をはじめとしてこれまでも行われているが、本研究では、解析対象領域内における空間的な分布性状に着目した検討を実施した点で既往の研究と異なる。

2. 検討方法の概要と条件

(1) 検討の概要

地震動の評価結果に含まれるばらつきの要因としては、震源断層の破壊過程の不確定性に起因するもの、震源断層から対象地点までの伝播経路に関する不確定性に起因するもの、および表層付近の地盤による地震動の増幅特性に関する不確定性に起因するものが考えられる。密な観測網で十分な数の地震観測記録が蓄積されているような理想的な状況を考えると、伝播経路と表層地盤の特性については、ほぼ確定的なグリーン関数として表現されることが期待されることから、ここでは、震源断層に関わる不確定性が強震動予測結果に及ぼす影響に着目し、複数の断層パラメータを変化させて多数のケースの強震動予測を行った。その結果に基づき強震動予測結果のばらつきを評価し、地震動強さの中央値とばらつきの大きさ、およびそれらの空間的な分布性状について検討した。

表－1 シミュレーションに用いた断層パラメータ

パラメータ	内 容	備考 (算定根拠等)
断層の長さ	40km	
断層の幅	16km	上端深さ1km、下端17km
傾斜角と断層タイプ	90度、横ずれ	
地震モーメント	1.5×10^{19} (Nm)	断層面積より算定
アスペリティの個数	2	大小のアスペリティの面積比は8 : 3に固定
アスペリティの総面積	(変動考慮)	断層面積との関係式 ⁹⁾ (ばらつき考慮、標準偏差の範囲は1.34倍と1/1.34)
アスペリティの位置	(4ケース)	図－1 参照
破壊開始点	(3ケース)	図－1 参照
応力降下量	(従属変動)	地震モーメントおよびアスペリティの面積との関係式 ⁸⁾ (固定)
短周期レベル	(従属変動)	応力降下量との関係式 ⁸⁾ (固定)
破壊伝播速度	(変動考慮)	せん断波速度との関係式 ¹¹⁾ (ばらつき考慮、標準偏差の範囲は1.12倍と1/1.12と仮定) すべり量との相関性も考慮

(2) 検討条件

1995年兵庫県南部地震を念頭に、長さ40kmの鉛直横ずれの内陸活断層で発生する地震を想定し、断層端から60kmの範囲（160km×120km）における地震動を評価した。地下構造は、水平成層構造とし、川瀬・松島⁷⁾による神戸地域のパラメータを参考に設定した。最上層のせん断波速度は400m/sで、神戸地域における大阪層群最上層に相当する。

断層パラメータは、活断層で発生する地震の強震動評価のレシピ⁸⁾に基づいて設定した。使用した断層パラメータのうち主なものを表－1に示す。

レシピにおける断層パラメータのいくつかは、理論あるいは過去のデータに基づく式で関係付けられている。このうち、データに基づくパラメータ間の関係にはばらつきが認められるが、これらのばらつきを全て独立に変動させることは、ばらつきを過大評価するものと考え、それらのうち以下に示す4項目（表－1では太字で記載）については互いに独立に変動しうるものとみなした。それ以外の関係式については、今回は全て固定した。

1) 断層面積(S)とアスペリティ総面積(S_a)の関係

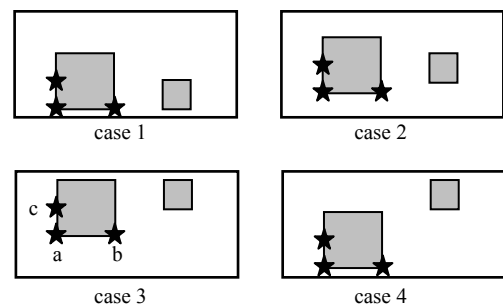
入倉・三宅⁹⁾に基づき、標準偏差の範囲を1.34倍～1/1.34とした。

2) アスペリティの位置

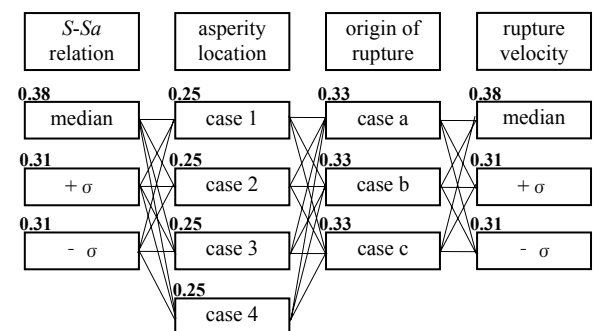
図－1に示すように、大小2つのアスペリティの深さの組合せで4ケースを想定した。

3) 破壊開始点

図－1に示すように、Somerville, *et al.*¹⁰⁾に基づき、大きい方のアスペリティの周辺から破壊が開始



図－1 アスペリティと破壊開始点の位置



図－2 変動させたパラメータの組合せと重み

するものとし、3ケースを想定した。

4) 破壊伝播速度

平均値をせん断波速度の0.72倍 (Geller¹¹⁾) とし、標準偏差の範囲は1.12倍～1/1.12と仮定した。さらに、要素断層ごとにすべり量との相関を考慮した。

上記に示した以外の多くのパラメータは、変動させたパラメータに従属して変動する。例えば、短周期レベルや応力降下量は、アスペリティの大きさの変動に伴い変化し、ライズタイムは破壊伝播速度の変動の影響を受ける、といったものが挙げられる。なお、筆者らが以前実施した検討¹²⁾においては、断層面積から地震モーメントを算定する経験式のばらつき (標準偏差の範囲で概ね倍・半分) も考慮していたが、距離減衰式のばらつきと比較する上では地震規模を固定することが望ましいとの判断から、本検討では固定している。

上記の4つのパラメータあるいは関係式は互いに独立に変動するものとして組み合わせた上で合計108組の断層パラメータを生成し、図-2に基づいてそれぞれのケースに対する重みを付与した。例えば、図-2において、4つともに最上段のパラメータを選択したケースの重みは、

$$0.38 \times 0.25 \times 0.33 \times 0.38 = 0.0119$$

となる。このようにして生成された108ケースの断層パラメータに対する地震動を解析領域内の多数の地点について計算した上で、各ケースの重みを考慮して結果の統計処理を行った。この際、アスペリティの位置と破壊開始点が断層の片側に偏っていることによる影響をなくすために、断層中央を中心に180度回転させた結果を加えて、最終的には合計で $108 \times 2 = 316$ ケースを対象とした。なお、用いた地震動の推定手法は、周期1.5秒を接続周期とするハイブリッド合成法¹³⁾であり、長周期側は三次元有限差分法、短周期側は統計的グリーン関数法を用いている。

以下に示す結果では、地震動強さの指標のうち、短周期と長周期の例としてそれぞれ周期0.1秒と2.0秒における減衰定数5%の加速度応答値を対象とする。地震動は、断層の走向に平行する成分と直交する成分とに分けて評価されているが、ここでは、両者の平均値を用いた。

3. 地震動強さの中央値とばらつきの空間分布

図-3 (a) は、評価地点ごとの地震動強さの中央値の分布を示す。上段左側に示した周期0.1秒の結果は、断層を中心とした滑らかな楕円状の等値線となっているのに対して、右側の周期2.0秒では、凹凸のある等値線となっている。周期2.0秒の場合には、短周期成分と比較して地震波の放射特性の効果が強く現れ

るため、直交する2成分で地震動強さの分布の性状が大きく異なっており、図示した結果は両成分の特徴を平均したような傾向を示す。

図-3 (b) は、シミュレーションによる地震動予測結果のばらつきを自然対数の標準偏差で表し、その分布を示したものである。統計的グリーン関数法の結果が支配的な短周期では、場所によるばらつきの大きさの変化が小さく、ばらつきの値がほぼ一様であるのに対して、理論計算の結果が支配的な長周期では顕著な空間変動が認められ、予測結果のばらつきは断層に沿った方向で特に大きいことがわかる。

なお、ばらつきの値 (自然対数の標準偏差) は、周期0.1秒で0.15前後、周期2秒で0.2～0.3程度であり、一般的な距離減衰式のばらつきよりも顕著に小さい。これは、震源特性のばらつきのみが考慮されていることに加えて、パラメータの変動を一部のものに限定していることに起因していると推測される。

4. 個別のパラメータの影響

前章3.で対象とした4つのパラメータあるいは関係式が、それぞれ全体のばらつきに対してどの程度の寄与をしているのかを、以下の手順で検討した。

まず、アスペリティの位置は case 2 を、残りの3

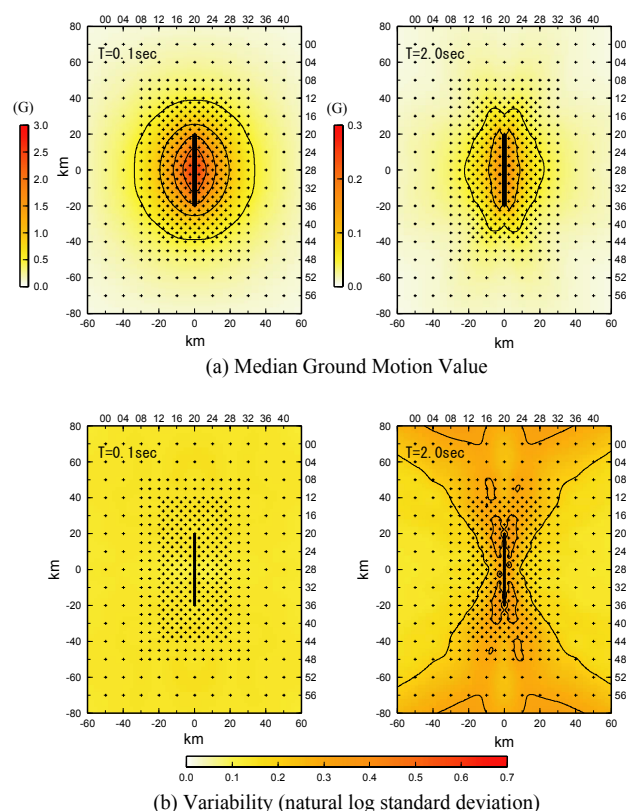


図-3 地震動強さの中央値及びばらつきの空間分布

つは図-2の最上段のケースをそれぞれ標準のケースとした。その上で、着目する項目のみを変化させ、残りは標準ケースに固定した場合の地震動の予測結果に基づき、当該パラメータの変動に起因するばらつきを算定した。したがって、ここでの検討は、ごく限られた数の結果に基づくものとなっている。

図-4は、解析領域内の5地点において評価された、変動項目ごとの加速度応答スペクトルのばらつきの値を、周期に対して示したものである。図中には、全ての組合せに基づいて算定されている全体のばらつきの値も併せて示してある。

まず、各図に共通する特徴として、理論計算の結果が支配的な周期2秒以上では、短周期帯域よりもばらつきが大きいことが指摘できる。また、全体のばらつき（黒い実線）は、各項目のばらつきを概ね包絡するような関係にあるものの、周期によっては、個別の項目に起因するばらつきの値が、全体のばらつきを上回る場合があることがわかる。後者については、ごく少数の結果に基づいた検討であることも原因の一つとして考えられるが、各パラメータの変動の影響が、結果に対して独立ではないことを強く示唆している。このことは、例えば、破壊開始点の違いの影響がアスペリティの位置に依存するであろうことを考えれば、容易に想像される。

個々の要因の影響の度合いについて見てみると、アスペリティの位置の変化に伴うばらつきは5地点

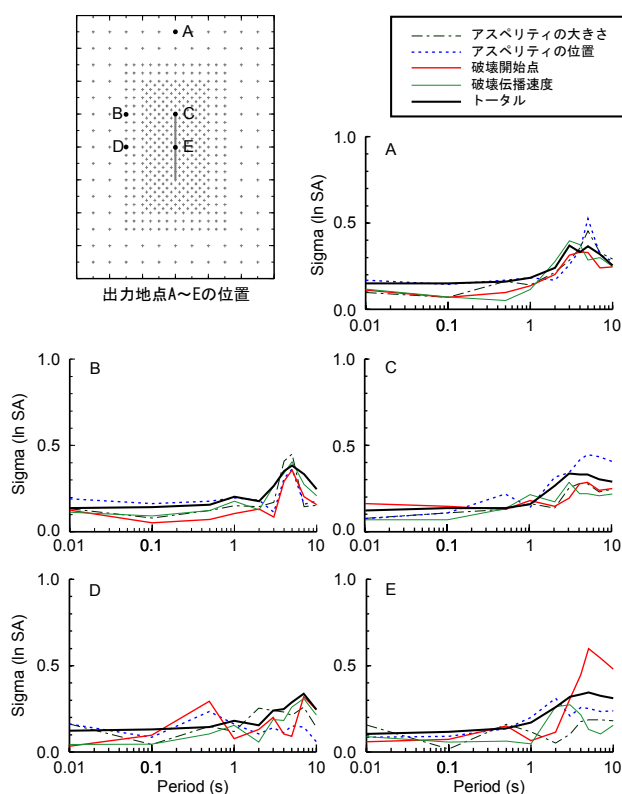


図-4 代表的な地点における個別パラメータによるばらつきと全体のばらつき

ともに総じて大きくなっており、逆に、破壊伝播速度の影響は全般に小さい。また、破壊開始点の影響の大きさは、地点によって様々である。

変動させているパラメータや条件が異なるために直接の比較はできないが、以上の結果は、全体のばらつきの大きさや長周期帯域でばらつきが大きくなる点などにおいて、大塚・他⁶⁾によるものと整合していることが確認できる。

なお、本研究の結果は、先に述べたとおり限られたケース数の結果に基づいたものであるが、個別の変動要因の影響を定量的に分析するためには、より詳細な検討を実施していく必要があると考えており、今後の課題としたい。

5. 確率論的地震動予測への応用のメニュー

ここでは、詳細な強震動予測手法に基づく地震動評価結果を、確率論的な地震動予測に応用するためのメニューを、2種類の利用形態に分けて整理するとともに、今後の課題を整理する。

(1) 構造物の耐震安全性検討用地震動としての利用

土木・建築分野における地震動の利用として最も多いのが、構造物の耐震安全性の検討を目的としたものである。地震動の時刻歴波形を用いた耐震安全性の検討自体は、従来から行われているが、多くの場合には、代表的な条件下で作成された1つの地震動波形を用いることが多いようである。しかしながら、想定する条件によって地震動の予測結果がかなり変動することを考えれば、本来は、複数の異なる断層破壊シナリオによる地震動が予測されていることが望ましい。特に、構造物の持つ耐震性能を明示する上では、想定を上回る地震動が来襲した場合の構造物の挙動を把握しておくことも重要である。そのためには、多数のシナリオを想定し、それぞれの条件が現時点での知見に照らしてどのような位置づけにあるのかを明示していく必要がある。実際の利用の便を考えると、変動させるパラメータの種類とその変動範囲について、何らかの標準化がされていることが望ましく、本研究で実施したような検討をさらに積み重ねる必要がある。

(2) 確率論的地震ハザード評価への応用

冒頭にも述べたように、確率論的地震ハザード評価では、ある地震が発生した場合の着目地点における地震動の強さの確率分布が必要であり、通常は、距離減衰式による推定値とそのばらつきによる評価が行われている。

先に例示したように、原理的には、地震動評価に必要な種々のパラメータを変動させることにより、

地震動の強さの確率分布を評価することが可能である。最終的に確率分布として提示する際には、大別して以下の2種類が考えられる。ただし、以下のいずれの場合においても、本来は、本研究で対象とした断層パラメータの変動に関わる不確定性に加えて、伝播経路や表層地盤の特性の評価・モデル化に関わる不確定性が別途考慮される必要がある。

a) 分布形状を仮定する場合

最大加速度や最大速度、応答スペクトル等の地震動指標の分布形状は、観測データの分析から、概ね対数正規分布に従うことが知られている。地点に対して影響の強い特定の地震による地震動を多数計算し、その結果に基づいて分布形状を表現するパラメータ（対数正規分布の場合には中央値と対数標準偏差）を算定することにより、確率論的地震ハザード評価に結果を展開することが可能である。

着目する周期帯域によっては、地震動強さの確率分布が震源断層との位置関係に応じて変化する可能性があることは、先の検討から示唆されたとおりであるが、これに加えて、震源近傍での地震動の強さのばらつきが、中・遠距離の場合とどのように異なるのかといったことは、距離減衰式に基づく現在の方法では取り入れることができない情報であり、詳細な強震動評価手法に寄せられる期待が大きい部分である。

b) 分布形状も含めて評価する場合

震源断層の近傍においては、地震動の強さの確率分布が対数正規分布に従わない可能性も考えられる。破壊開始点が異なるケースを例に取れば、特に断層線の延長に位置する地点では、確率密度が複数のピークをもつことが容易に想像できる。一つの震源断層で繰り返し発生する大地震の観測記録を短期間に蓄積することが困難な状況においては、これを観測から直接検証することは不可能であり、地震動の分布形状、とりわけ分布の裾の形状や地震動の上限値の評価などは、詳細な方法によるシミュレーションに頼らざるを得ない。これらは、低い確率レベルの地震ハザード、特に地震発生確率が高い地震の影響が強い場合のそれに対して重要であり、今後の大きな課題と認識されている。

(3) 今後の課題

以上のように、確率論的な地震動予測の分野においても、詳細な強震動予測手法の果たす役割は今後ますます大きくなっていくと考えられ、その枠組みや受け入れの体制は整いつつある。一方で、実際の応用を考えた場合には、まだ取り組むべき課題も多く残されている。一部は上記の(2)とも重複するが、例えば、以下のようなものが挙げられる。

- 1) 確率論的地震ハザード評価においては、「一つの地震による一つの地点での地震動の強さの確率

分布」が必要とされる。現時点での観測記録に基づく分析では、地震と地点とを、ともに一つに限定することは困難であり、多地震・多地点の記録に基づく結果が流用されるが、この状況を打破するためには、今後、強震動シミュレーションを併用した検討をさらに進める必要がある。

- 2) 上記に関連して、特に強震動域における地震動の分布形状（形状そのものの妥当性ととも、ばらつきの値の振幅依存性の有無、地震動の上限値の設定の可否など）に関する検討を望む声強い。これらについても、観測記録の活用だけでは限界があり、今後、強震動シミュレーションを併用した検討をさらに進める必要がある。
- 3) 上記のような検討を実施するために必要な震源のパラメータの変動に関する情報は、過去の地震のデータに基づいて急速に整理されつつある。ただし、これらはあくまで発生場所や規模の異なる複数の地震のデータに基づくものであり、本来必要な「一つの震源断層を対象とした場合の変動」を表したものではないことに注意が必要である。本研究で用いたパラメータの変動も多種多様な地震のデータに基づいたものであり、今後改善の余地がある。
- 4) 多数の断層パラメータを独立に変動させると、地震動評価結果のばらつきが非常に大きくなることが予想される。すなわち、パラメータの変動の相関を考慮する必要があると考えられる。

兵庫県南部地震以後、K-NETやKiK-netに代表される強震観測網が整備され、地震時には膨大な数の観測機録が蓄積されるようになってきている。これらの貴重な観測記録の活用とともに、理論的な方法も含めた解析とを併用することで、今後、これらの問題を解決していく必要がある。

6. おわりに

詳細な手法に基づく強震動予測に対しては、確率論的地震ハザード評価や耐震設計用の入力地震動評価の分野からも大きな期待が寄せられている。特にこれらの分野が抱える課題のいくつかは、詳細な強震動予測手法に基づいた検討を抜きには解決できないと考えられる。

一方で、これまで、地震動評価に関するばらつき・不確定性については、必ずしも十分な検討がされてこなかった側面がある。このため、本研究では、確率論的地震動予測への応用を念頭に、震源パラメータの変動が地震動予測の結果に対して及ぼす影響に関して、基礎的な分析を行った。さらに、今後の利用形態と課題についても整理した。

これらの課題の解決と強震動予測の分野の更なる発展のためには、これまでに蓄積されてきた膨大な観測記録の分析とともに、理論、解析を含めた検討をさらに進めることが不可欠であると考えられる。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費による「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」の一環として行われたものです。

参考文献

- 1) 奥村俊彦 (2003) : 高度な強震動予測手法を用いた確率論的地震ハザード評価の実現に向けて、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.83-86, 2003.3.
- 2) 壇 一男・金子美香 (2001) : 地震危険度解析の基礎－断層モデルによる地震動の予測結果を地震危険度解析に組み込むために－, ORI研究報告, 01-01, 大崎総合研究所.
- 3) 長尾 毅・山田雅行 (2002) : 地震ハザードにおける統計的グリーン関数法適用の試み, 第11回地震工学シンポジウム, 12, pp.59-64, 2002.
- 4) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・能島暢呂・杉戸真太・久世益充 (2003) : 地震動予測マップの活用－その1 : ハザード情報の利用－, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, 論文No. 36.
- 5) Takeo M. and H. Kanamori (1992): Simulation of Long-Period Ground Motions for the 1923 Kanto Earthquake (M=8), Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo, 67, pp. 389-436.
- 6) 大塚久哲・P.G. Somerville・佐藤俊明 (1998) : 断層パラメータの予測誤差を考慮した広帯域地震動の評価, 土木学会論文集, No. 584/I-42, pp. 185-200.
- 7) 川瀬博・松島信一 (1998) : 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp. 111-118, 1998.12.
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003) : 活断層で発生する地震の強震動評価のレシピ, 平成15年3月12日.
- 9) 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001) : シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol. 110, No. 6, pp. 849-875.
- 10) Somerville, P.G., et al. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., 70, 56-80.
- 11) Geller, R.J. (1976): Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1501-1523.
- 12) 佐藤俊明・ほか (2004) : 確率論的地震動予測への応用, 平成15年度科学技術振興調整費 地震災害軽減のための地震動予測マスターモデルに関する研究 平成15年度研究成果報告書, 京都大学防災研究所・ほか12機関, pp. 217-225.
- 13) Graves, R. and A. Pitarka (2004): Broadband time history simulation using a hybrid approach, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 1098.

(2005. 3. 14受付)

STUDY ON VARIABILITY OF EARTHQUAKE GROUND MOTION DUE TO VARIATION OF SOURCE PARAMETERS

Toshihiko OKUMURA, Toshiaki SATO, Toru ISHII,
Paul SOMERVILLE, Robert GRAVES and Nancy COLLINS

This study deals with variability of seismic source parameters and its influence on simulated ground motions. First, based on the set of earthquake ground motions calculated using a 'recipe' considering the variation of some of the fault parameters, the spatial distribution of the median values and the standard deviations of the simulated ground motions are evaluated and studied. Then, at selected sites we compare the global variability with the variability due to the individual source parameter variations. Finally, a menu for the use of probability-based earthquake ground motions is presented as well as future directions for strong ground motion evaluation.