

確率論的地震危険度評価のための 潜在断層地震の発生確率設定法

香川敬生1・壇一男2・大塚康弘3・本橋章平4

 ¹(財)地域地盤環境研究所 主席研究員 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2) E-mail: kagawa@geor.or.jp
 ²(株)大崎総合研究所 研究部長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル27階) E-mail: dan@ohsaki.co.jp
 ³(株)小堀鐸二研究所 構造部 部長 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30) E-mail: yohtsuka@kajima.com

⁴独立行政法人原子力安全基盤機構 解析評価部 調査役(〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20) E-mail: motohashi-shohei@jnes.go.jp

地表の情報からは震源断層を事前に特定できない潜在断層地震に着目し、その地震動を評価するために 必要となる、特定地震規模で潜在断層として存在できる確率を合理的にモデル化する手法を提案した.具 体的には、潜在断層に関する地震規模の相似則(断層面積、すべり量)に基づいて断層破壊モデルを設定し、 それによる地表変形量を評価することにより、潜在断層として存在できるアスペリティの上限深さを地震 規模毎に求めている.なお、設定した仮定および得られた結果が既往の知見と矛盾しないことを確認して いる.ここで提案した潜在断層地震のパラメター設定法は、確率論的な地震動評価のみならず、特定サイ トにおける確定論的地震動評価に寄与することが期待される.

Key Words : Probablistic Hazard Analysis, Buried Rupture Earthquake, Earthquake Scaling

1. はじめに

同じ規模の地表断層地震と潜在断層地震による地 震動を比較した場合,特に周期1秒付近において潜 在断層地震で平均的なものよりも大きく,地表断層 地震で小さい傾向のあることが報告され¹⁾,その要 因が考察されている²⁾.このことは,地表断層を伴 う被害地震において,大きな断層変位が現れたごく 近傍でも,脆弱と思われる構造物が倒壊していない 事例など,地表断層近傍の地震動が必ずしも大きく なかったと評価されることとも整合する.このため, 地震断層の種別(地表断層か潜在断層か)によって 異なった地震動の評価をおこなうことが必要と考え られる.

震源を特定できない潜在断層地震による地震動は, 単純に影響度の大きい設定によって確定論的に評価 するのではなく,いろいろな可能性を考慮した確率 論的な地震危険度評価をおこなうことが望ましい. 地震危険度評価における地震発生確率は地震活動

(b 値)から設定されるが、その中には震源が特定 できる活断層による地震も含まれている.震源を特 定できない地震を独立に評価するためには、地表に 過去の地震の痕跡が無く発震時にも地表に影響を及 ぼさない地震(潜在断層地震)の特徴を反映した, 合理的な震源断層モデルの設定法を構築しておく必 要がある.

本研究では、潜在断層に特有の相似則を適用して 地震発生層厚さに応じた断層モデルを地震規模毎に 構築し、それによって静的に計算される地表面変形 に閾値を仮定し、それを越えるか否かによって潜在 断層として存在できる確率を評価する方法を提案す る.この方法を用いれば、地震規模に応じた断層破 壊モデルが満たすべき断層およびアスペリティの上 限深度を設定することが可能であり、地表断層地震 ではそれよりも浅く設定される必要がある.このよ うに、本研究による成果は潜在断層地震による確率 論的地震ハザード評価にとどまらず、地表断層地震 を確定論的なシナリオ地震で評価することにも応用 することができる.

2. 潜在断層地震の確率評価法

本研究では、震源断層のスケーリング則およびそ れから設定した断層による地表面の変形量を用いて、



図-1 地震断層の規模に応じて潜在断層から地表断層に移行していく模式図

ある地震断層が潜在断層として存在できる確率の評価を以下のような仮定と手順で試みる. 図-1 に示 すように,地震規模が大きくなるとともに断層長さ と幅が等しい震源断層が大きくなり,それが地震発 生層全体に広がることで地表に影響を及ぼし始める. それよりも規模の大きな地震は地震発生層全体を破 壊して水平方向に広がり,断層変位量が大きくなる ため地表に及ぼす影響も大きくなる.なお,既往の 検討との比較のため,ここでは地震規模の指標を気 象庁マグニチュードMJとしている.また,地表に及 ぼす影響が最も大きいと考えられる,最大アスペリ ティを主な評価の対象とする.

まず、地震発生層の上限深度(D_k km)と下限深度 (D_k km)を仮定する.これらについては、微小地震 分布や $V_p=6$ km/s層深度(上限)、キュリー点深度 (下限)による検討がおこなわれている³⁾.実用 に際しては、対象地域の特性を考慮して設定すべき 値であるが、ここでは平均的な値としてそれぞれ3 km、20kmと仮定する.次に、以下の1)~7)のプロ セスを各対象マグニチュード(M_p)で繰り返す.

 各マグニチュードに対応する地震モーメント (dyne・cm)を設定する⁴⁾.

$$\log M_0 = 1.17 M_1 + 17.72$$
 (1)

 潜在断層地震のスケーリング則^{2),5)}を用いて、地 震モーメントから、最大アスペリティ面積(A₁)、 アスペリティ部のすべり量(D₂)を想定する.

$$A_1 (km^2) = 2.70 \times 10^{-16} \times M_0^{2/3}$$
(2)
$$D_a (cm) = 1.96 \times 1.78 \times 10^{-7} \times M_0^{1/3}$$
(3)

- 最大アスペリティ面積から、長さと幅が等しい 矩形(一辺L_akmの正方形)の最大アスペリティ を設定する.
- 4) 最大アスペリティが地震発生層D₁~D₂(km)の範囲内に存在するという条件でその深さを設定する.下端が地震発生層を逸脱しないためには,上端の存在できる深度はD₁~D₂-L_a·sin(*dip*)(km)の範囲となる.ここに,dipは断層傾斜角である.
- 5) 設定した最大アスペリティに 2)で想定したすべ り量を与え,地表変形量を評価する.
- 6) 計算された変形量が予め設定した基準値を越え ないための,最大アスペリティ上端深度(D_a)を

得る.

7) 6)で得た上端深度が 4)に示した存在範囲のどこ にあたるかにより、地表非出現率(P(M_f))を以下 の式により評価する.

$$P(M_{J}) = \frac{[D_{2} - L_{a} \cdot \sin(dip)] - D_{a}}{[D_{2} - L_{a} \cdot \sin(dip)] - D_{1}}$$
(4)

なお、 D_a が D_1 よりも浅ければ非出現率は 100%と なり、 D_2 - L_a ・sin(*dip*)よりも深ければ 0%である.

横ずれ断層の場合は断層傾斜を鉛直(dip=90 度)と仮定することができるが、縦ずれ断層を想定 する場合は断層傾斜にばらつき(例えば 30~60 度)を与えた方が現実的である.そのような場合に は、傾斜を乱数で与えて多数回試行し、試行回数に 対して潜在断層となった回数から地表非出現率を評 価することが考えられる(Monte-Carlo 法).その ような場合、スケーリング則にばらつきを与えるこ とも可能であろう(例えば、平均値に対して 1/2~ 2倍の範囲を乱数で設定).

この検討プロセスを実施するにあたって重要とな るのは、ステップ 5)、6)における地表変形量の評 価法と地表断層地震と潜在断層地震を分ける地表変 形量の閾値となる.この点について以下で検討をお こなう.

3. 地表変形量の条件設定

3.1 動的シミュレーションによるクラック

想定した断層破壊モデルによる変形が地表に及 ぶか否かの閾値を設定するためには,動的破壊過程 を追跡したシミュレーションを実施することが最も



確実である.Dalguerら^{6,7}は,矩形断層と矩形アス ペリティでモデル化した鉛直横ずれ断層にすべりに よる応力降下を想定し,その影響によって新たに生 じる開口型クラックの分布をシミュレーションして いる.**図-2**に,M₄6.5に相当する断層モデルで計算 された,アスペリティ上限深度(図中のD)毎のク ラックの分布を示す⁶⁾.このときの相似則は本検討 で用いている潜在断層地震のものと同じである.ア スペリティ上端が約5kmの場合に,初めてクラック が地表に及んでいることが分かる.この結果,動的 な断層破壊シミュレーションを通じて,設定された 断層モデルによる変形が地表に及ぶか否かを評価で きることが示唆される.

ただし,計算ケース数の多くなる確率論的地震 動予測問題では,設定する断層モデル毎にこのよう な動的断層破壊シミュレーションを実施して潜在断 層であることの可否を確認することは,現実的に困 難である.そこで,動的断層破壊シミュレーション の結果を参照しつつ,静的な地表変形量を指標とし たより簡便な条件の設定を,既往地震による観測事 例に基づいて検討する.

3.2 静的解析による既往地震の地表変形量

一様な断層すべりによる地表面の静的変形を評価 する手法⁸⁾を、断層面を小断層要素に分割すること により非一様すべりによる影響を評価できるように 拡張した.この手法を震源インバージョン解析結果 に基づく既往の内陸地震の非一様すべりモデル⁹⁻¹²⁾ に適用し、地表面における変形量を計算した.一例 として、1995 年兵庫県南部地震(淡路島側)のす べりによる地表変形を図-3 に示す.図の一番下は 断層設定およびすべりの深さ分布を、断面図として



Kobe,	Japan	strike= 0.0			
		dip= 82.5			
		rake= 0.0			
		Poisson Ratio=0.2294			
		L(km)= 20.00			
		W(km)= 20.00			
		top dep.(km)= 0.2			
		Max. Slip(m)= 2.15			

図-3 静的な地表変形の計算例 (兵庫県南部地震の淡路島側断層)



3

示している.断層走向方向(Y軸)は紙面に垂直で あり,計算点は断層直交方向(X軸)に地表面に並 んでいると仮定している.また,鉛直上向きをZ軸 としている.図の上から変位およびひずみの分布を 示している.この場合は純粋な横ずれ断層としてす べりを計算しているので,変位とひずみはY軸方向 のみに生じている.地表変位量の両側振幅(P-P) は約1.7mに及ぶことが分かる.この値は,兵庫県 南部地震時の野島断層部で実際に見られた変位量と ほぼ対応する.

一方,ひずみの最大値は断層直上で生じ,320% と岩盤の破壊レベルを遙かに越えた値となっている. 用いた手法⁸⁾は連続体を仮定したものであるため, 破壊に至る大変形域でもひずみが解放されず,断層 直上で極端に大きな値が計算される.そこで,合理 的なひずみの評価法として,断層を挟んで最大変位 量が生じている地点間の平均ひずみを検討する. 図-3 の場合,平均ひずみは 1.7×10⁻³となり,岩盤 の破壊レベルと対比できるオーダーになる.

3.3 静的地表変形を利用した潜在断層の指標

このような検討を震源インバージョンが実施されている内陸地殻内地震⁹⁻¹²⁾に適用し,浅いアスペリティの有無²⁾と地表断層の出現の有無¹³⁾の四象限に分類してその特徴について検討する.

図-4には、各断層分類と地表変形量の計算結果を 示している.図の右半分は地表断層が認められるも の、左半分は認められないものである.また、上半 分は浅い(深さ 5km以浅)アスペリティのある地震、 下半分は無い地震である.ここでは、右上(地表断 層を生じ浅いアスペリティが有る)を狭義の地表断 層地震、左下(地表断層を生じずに浅いアスペリテ ィも無い)を狭義の潜在断層地震と定義し、それぞ れの特徴を評価する.図中、SSは横ずれ断層、RVは 逆断層、NMは正断層、OBは斜めずれ断層をそれぞれ 示している.浅いアスペリティがあるものの地表断 層の確認されていない地震(図の左上)や地表断層 を生じたか否かについて議論の分かれる地震につい ては、敢えてどちらかに分類することをせず、以降 の解析から外している²⁰.

また図-4 には,静力学的な地表変形量(断層を 挟んだ変位,平均ひずみ)を計算した結果を併せ て示している.なお物性については,それぞれの 震源インバージョンで用いられている地震発生層 の値を用いている.狭義の潜在横ずれ断層地震の 平均変位量3.8cm に対して狭義の地表横ずれ断層 地震の変位量は301cm,狭義の潜在縦ずれ断層地震 の平均4.7cm に対して狭義の地表縦ずれ断層地震 は165cmと,計算上の変位量に2桁程度の明瞭な 差が認められる.また,平均ひずみにも同様に2 桁から4桁の差が見られる.このため,地表断層 と潜在断層の地表変形量に着目して何らかの基準 を設けることができそうである.

まず,最大アスペリティによる計算地表変位量の 基準として,横ずれ断層地震の平均+1 σ程度の 5cmを仮定してみる. 図-5 には, 図-2 に示した動的 シミュレーション例⁶⁾と同じ, M₄6.5 (M₅6.8) に相 当する鉛直横ずれ断層モデルの最大アスペリティで 上端深度を変えた場合の静的な手法⁸⁾による計算例 を示す. 断層を挟んだ地表変位が基準とした 5cmを 超えるアスペリティの上端深度は 4km程度と考えら れ,動的シミュレーション結果にほぼ対応している ことがわかる.



図-5 最大アスペリティによる静的な地表変形計算例 (M₄6.5)



図-6 地表変位による提案基準から推定される断層出現率 と既往事例による地表断層出現率

そこで、横ずれ潜在断層地震による断層変位が地 表に及ぶか否かの簡易基準を、静的な手法⁸⁾で計算 される最大アスペリティによる地表変形量が 5cmを 越えるか否かと仮定する.これは地表踏査による地 表断層の最小変位量¹⁴⁾にも概ね対応しているが、こ の 5cmという値はあくまで仮想的な出力値であり、 現実の地表変位量と直接に対応するものではない. また、提案手法による検討をデータ数が少ない上で 先に進めるための仮説であり、今後の資料の充実に よって継続的な検討をおこなうことが望まれる.

4. 潜在断層地震の確率

以上の検討結果を基に,潜在断層地震の発生確率 評価を実施してみる. ここでは,最大アスペリティ による断層を挟んだ地表面の最大変位(P-P)を静 的な方法⁸⁾によって計算し、それが設定した閾値 (5cm)を越えるかどうかを判断材料とする. 前述 の評価手順に従い、各マグニチュードで1万回の Monte-Carlo法を実施した. その結果を図-6 に示す. その際、スケーリング則の平均に対して倍半分(図 中のD=2.0, 0.5 倍から2倍)の範囲の一様乱数で ばらつきを持った値として与え,縦ずれ断層の傾斜 を 30~60 度の範囲の一様乱数で設定した.また、 縦ずれ断層による地表変位の基準は、横ずれと同じ く 5cmと仮定した. ここでは, 地震発生層を 3~ 20kmの範囲としている. 図-6 の基図は、日本にお ける既往地震の地表断層出現率である¹⁴⁾.図には, 横ずれ断層のみの場合(SS=100%)と、基図のデー タに準じて縦ずれ断層(逆断層)を3割含むとした 場合(SS=70%)を示している.計算結果は基図によ る既往地震の事例と良く対応したものとなっており, M.6.5 から急激に確率が高くなることを良く表現し ている.この結果から、ここで用いた考え方の妥当 性が示唆される.縦ずれ断層で仮定した閾値も概ね 良好であろうと考えられる.

次に、図-6 と同様の検討を平均ひずみ量で実施 してみる.平均ひずみの閾値として、5×10⁻⁶と1× 10⁻⁵を設定した結果を図-7 に示す.図中の破線は断 層を挟んだ最大変位を 5cmとした場合である.ここ では横ずれ断層のみを対象とし、Monte-Carlo法で はなく式(4)に基づいて解析的に確率を評価してい る.平均ひずみの平均値に近い 5×10⁻⁶とした場合 が、地表変位を用いた検討に近い結果を与えている. 地下深部の花崗岩などの破壊ひずみが 10⁻⁵オーダー であることとも絶対値として整合し ており、平均ひずみを用いた検討も 可能であると考えられる.

地震活動に基づく地震発生率に, ここで得た潜在断層として存在し得 る確率を掛け合わせることにより, 確率論的地震ハザード評価に必要な, 潜在断層地震の発生率を設定するこ とができる.

また、ここで用いた地表面変形量

の閾値を用いれば,確定論的な潜在断層地震のモデ ルを設定する際にアスペリティを設定し得る限界の 上端深さを規定することもできる.表-1には,鉛直 横ずれ断層について,いくつかのマグニチュードで 検討した結果を示す.このような設定法により,規 模の小さい地震のアスペリティは浅くまで設定する ことができ,アスペリティも小さいために地震発生 層内で自由な深さにアスペリティを置くことができ る.その結果,非出現率が高くなる.一方,地震規 模が大きくなると大きなアスペリティを深く設定せ ざるを得なくなり,設定の自由度は小さくなる.し たがって,非出現率が低くなる.

5. おわりに

地表の情報からは震源断層を事前に特定できない 潜在断層地震に着目し,その地震動を確率論的に評 価するために必要な,特定地震規模で潜在断層とし て存在できる確率(非出現率)を合理的にモデル化 する手法を提案した.具体的には,地震規模に関す る潜在断層の相似則(断層面積,すべり量)を用いて, 潜在断層として存在できる地震規模毎のアスペリテ ィ上限深さを,地表変形の数値計算値から評価する ことを基準としている.設定した仮定および得られ た結果は,既往の知見とも矛盾しないことが示唆さ れた.

ここで提案した潜在断層地震のパラメター設定法 により、これまでマグニチュード 6.5 程度を境にな ど不明確かつ不連続な経験量として与えられてきた



図-7 平均ひずみを基準として推定される断層出現率

表-1 断層種別毎のスケーリング則(香川・他, 2001)

MJ	5.5	6.0	6.5	6.8	7.3
最大アスペリティ面 積(km ²)	2×2	3×4	5×6	7 × 7	11×11
最大アスペリティ平 均変位(cm)	45	71	113	149	236
最大アスペリティ上 端深さ(km)	3	3	3	5	9

マグニチュードと地表出現率の関係を、物理的に説 明可能な連続関数として示すことができるようにな った.このことにより、確率論的な地震動評価のみ ならず、特定サイトに置ける確定論的地震動評価や 地表断層が出現する現象の理解と表現に寄与するこ とが期待される.

参考文献

- Somerville, P. G.: Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137, 201-212, 2003.
- 2) Kagawa, T., K. Irikura, P. G. Somerville: Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 56, 3-14, 2004.
- Ito, K.: Seismogenic layer, reflectivelower crust, surface heat flow and large inlandearthquakes, *Tectonophysics*, 306, 423-433, 1999.
- (4) 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 2,43,257-265,1990.
- 5) 香川敬生・宮腰研・入倉孝次郎・Somerville, P.
 G.:伏在断層による地震動と断層破壊の特徴,第一回 日本地震工学研究発表・討論会梗概集,27p.,2001
- 6) Dalguer, L. A and Irikura, K.: Generation of Tensile Cracks during a 3D Dynamic Shear Rupture Propagation, *Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting*, S042-P017 (CD-ROM), 2002.
- 7) Dalguer, L. A., Irikura, K., and Riera, J. D.: Simulation of tensilr crack generation by threedimensional dynamic shear rupture propagation

during an earthquake, *J. Geophys. Res.*, 108(B3), 2144, doi:10.1029/2001JB001738, 2003.

- Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154, 1985.
- 9) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A.: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80, 1999.
- 10) Miyakoshi, K., Kagawa, T., Sekiguchi, H., Iwata, T., and Irikura, K. : Source characterization of inland earthquakes in Japan using source inversion results, *12WCEE*, 1850 (CD-ROM), 2000.
- 11) Iwata, T., Sekiguchi, H., and Pitarka, A.: Source and site effects on strong ground motions in near-source area during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *AGU Fall Meeting*, S72-P05, 2000.
- 12) Sekiguchi, H. and Iwata, T.: Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake estimated from strong-motion waveforms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 300-311, 2002.
- 13) Wells, D. L. and Coppersmith, K. J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002, 1994.
- 14) 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2,51,211-228,1998.

(2005. 3. 14 受付)

A TECHNIQUE SETTING PROBABILITY OF BURIED RUPTURE EARTHQUAKE FOR PROBABLISTIC EARTHQUAKE HAZARD ESTIMATION

Takao KAGAWA, Kazuo DAN, Yasuhiro OHTSUKA, and Shohei MOTOHASHI

This paper proposes a technique to set occurring probability of buried rupture earthquakes. It is required for probabilistic hazard estimation. As the earthquake magnitude is getting larger, the rupture area and the dislocation of the fault is getting larger following the self-similar scaling law. Estimated surface deformation due to the fault dislocation is also getting larger according to earthquake magnitude. Setting a threshold of surface deformation whether it is able to be or not to be detected, we can evaluate probability of a surface rupture earthquake at a given magnitude. Proposing moderate threshold of the surface deformation is a main aim of this paper. After introducing earthquake occurrence probability derived from local seismicity, we can evaluate occurring probability of a buried earthquake. The technique proposed in this paper will contribute for accurate estimation of earthquake hazard with treating earthquakes due to buried faults and earthquakes due to active faults separately.