

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

香川 敬生¹

¹鳥取大学大学院工学研究科
(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)
E-mail:kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

経験的地震動評価法に断層破壊およびその進行による影響の導入を試みた。経験的手法は平均的な地震動を効率的に与えることができ、情報の少ない地域での強震動予測や短時間で地震動分布を推定する必要のある緊急地震速報などにおいて効果的な手法である。また、等価震源距離の概念によって断層の非一様破壊の影響が導入されるなど、その高度化が図られている。しかし、震源近傍地震動に影響の大きいForward Directivity, Radiation Patternといった効果を十分に表現することはできない。ここでは、より現実的な地震動分布を表現するために、経験的地震動評価法のパラメータに破壊開始点を導入し、断層破壊による地震動放射と破壊進行による影響の補正を試みた。その際、上記の効果を含んだ断層モデルによる地震動分布との比較を通じて、各効果の重み付けを検討した。結果その結果、従来よりも現実的な地震動分布を得ることができた。

Key Words : Empirical attenuation, Radiation pattern, Forward directivity, Fault rupture model

1. はじめに

簡便法として用いられる経験的地震動評価法に、断層破壊およびその進行による影響を導入することを検討している¹⁾。経験的手法は平均的な地震動を効率的に与えることができ、情報が少ない地域への適用や短時間で広範囲の地震動分布を推定する必要のある緊急地震速報の分野など、詳細法である断層モデルの適用が困難な場合において効果的な手法である。経験的手法においても、等価震源距離²⁾によって断層面の広がりや非一様破壊導入が導入され、一様破壊ではあるが断層破壊の伝播効果の導入³⁾も検討されている。また、逆断層の上盤効果⁴⁾や、表層地盤増幅⁵⁾が考慮されるなど、実現象を再現するための高度化がおこなわれている。しかし、震源破壊伝播によるForward Directivity効果や、震源近傍における地震動分布への影響が大きいRadiation Patternの効果は十分に配慮されていない。

ここでは、より現実的な地震動分布を表現するために、経験的地震動評価法のパラメータに破壊開始点を考慮し、断層モデルによる地震動分布との比較を通じて、断層破壊による地震動放射と破壊進行による影響の導入について検討をおこなった。

2. 断層モデルによる地震動分布

まず、鉛直横ずれ断層と逆断層（傾斜45度）について、 M_0 6.5（地震モーメント 7.6×10^{18} Nm）の標準的な断層破壊モデル⁶⁾を設定した。想定する地震断層の大きさは20km×20kmの正方形とし、断層上端深さを2km、アスペリティの面積比を0.16と仮定し、面積8km×8km、応力降下量14.4MPaのアスペリティをひとつ設定した。地震発生層のS波速度を3.5km/s、破壊伝播速度を2.52km/sとした。破壊継続時間は、アスペリティ幅を破壊が伝播する速度の4分の1に相当する、0.79秒とした。

両断層について図-1, 2 に示す9通りのアスペリティ（濃い網掛け）および破壊開始点（星印）を設定し、同心円状の破壊進行を仮定した。これらの断層を中心とした50km×50kmの範囲で、1kmメッシュで3成分の地震動波形を計算した。

計算にあたっては、統計的グリーン関数法を用いた⁷⁾。なお、震源近傍の地震動を評価するにあたり、近地項・中間項の影響補正をおこなっている^{8), 9)}。各点で計算された波形から計測震度を計算した¹⁰⁾。

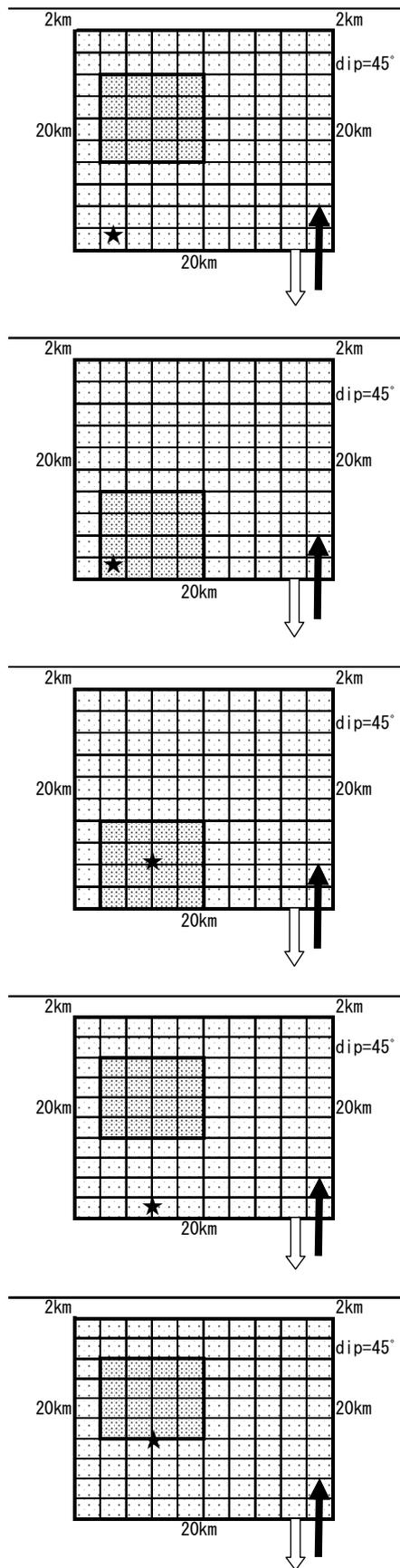


図-1 逆断層で想定した断層破壊シナリオ (上からケース REV1~REV5)

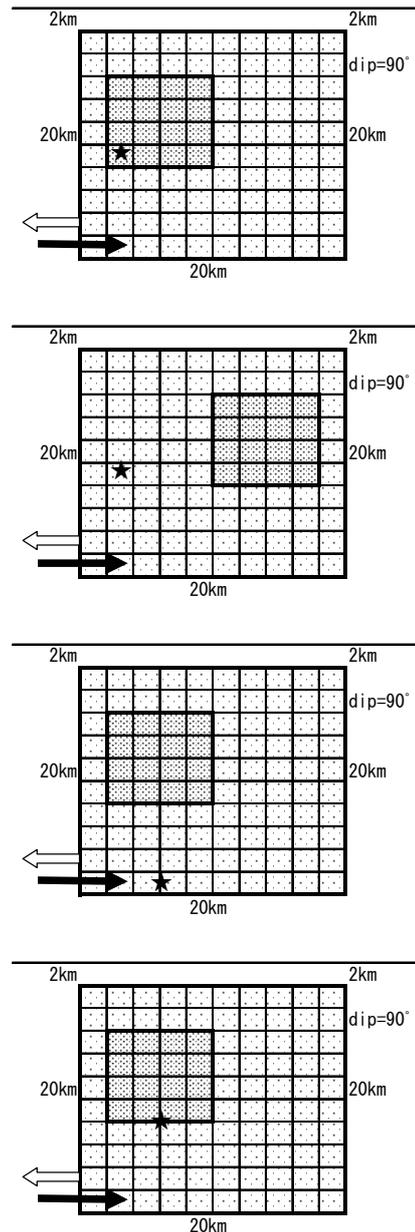


図-2 横ずれ断層で想定した断層破壊シナリオ (上からケース STR1~STR4)

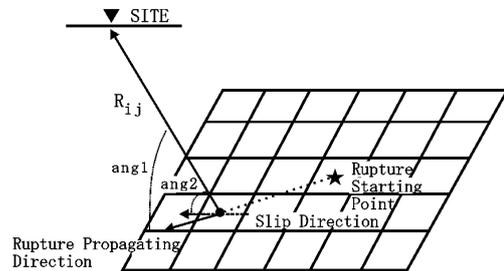


図-3 破壊伝播効果に関するパラメータ

3. 震源破壊伝播効果の表現

本検討では、断層モデルによる地震動評価と同様に、断層面を小断層に分割して非一様破壊（アスペリティ・モデル）を表現する。その上で、小断層毎

に断層破壊伝播の効果 (Radiation Pattern と Forward Directivity) を評価し、対象サイトにおける断層面全体の影響を考慮する。図-3 に示すように、ang1 は要素断層からサイトへのベクトルと要素断層を破壊が伝播する方向へのベクトルのなす角であり、ang2 は要素断層からサイトへのベクトルとすべり方向のベクトルのなす角である。これらふたつの角度について、Forward Directivity の影響を以下のように評価する。

$$e_{rup} = \frac{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}} \cos(ang1)}{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}}} \quad (1)$$

$$e_{rake} = \frac{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}} \cos(2 \times ang2)}{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}}} \quad (2)$$

$$E_{rup} = 2.0^{e_{rup}} \quad (3)$$

$$E_{rake} = 2.0^{e_{rake}}$$

ここで、 R_{ij} および m_{0ij} は長さ方向 i 、幅方向 j 番目の要素断層における震源距離と地震モーメントを、 M_0 は全地震モーメントを示す。ang1 による破壊伝播方向の影響 (e_{rup}) は、ang1 が 0 度で 1 (最大)、90 度で 0 (影響なし)、180 度で -1 (最小) となる。ang2 で表現されるすべり方向の影響 (e_{rake}) は、ang2 が 0 度で 1 (最大)、45 度で 0 (影響なし)、90 度で -1 (最小) となる。結果として、式(3)に示したふたつの項 (E_{rup} と E_{rake}) はそれぞれ 0.5~2.0 の値を取るようになる。これは、既往の補正項³⁾大きさを考慮したものである。これら 2 項を式(4)に示すように重み a を導入して合成し、断層破壊伝播効果の補正項と考える。

$$E_{rup\&rake} = E_{rup}^a \times E_{rake}^{(1-a)} \quad (4)$$

次に、Radiation Pattern の影響については、以下のように表現する。

$$E_{rad} = \frac{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}} \cdot \frac{\sqrt{SH_{ij}^2 + SV_{ij}^2}}{0.63}}{\sum_{(i,j)} \frac{m_{0ij}/M_0}{R_{ij}}} \quad (5)$$

ここで、 SH_{ij} および SV_{ij} は、要素断層 (i, j) からサイトへのベクトルとすべり方向のベクトルで評価される SH 波と SV 波の放射係数であり、式(5)はサイトで期待される S 波の放射係数を等方的な S 波の放射係数¹¹⁾で正規化したものである。式(4)と式(5)の補正項を、式(6)に示す重み b を導入して合成し、断層破壊シナリオ全体による影響の補正項とする。

$$E_{total} = E_{rup\&rake}^b \times E_{rad}^{(1-b)} \quad (6)$$

ここで提案した補正項はいずれも 1 を平均値とした分布を持つため、距離減衰式全体の平均値には影響を及ぼさない。非一様破壊の影響は上記の効果における重みとして導入されているため、経験的評価法の適用にあたっては、等価震源距離ではなく、断層最短距離の式を用いた。

3. 断層モデルによる計算結果との対応

経験的な距離減衰式⁴⁾に上記の補正を施して、図-1, 2に示した断層破壊シナリオで地震動分布を計算した。計測震度は最大速度から換算¹²⁾したものをを用いている。その際、断層モデルによる各点の計測震度との差の二乗和が全ケースで最小となるように、式(4)および(6)の重み a, b を設定した。値はそれぞれ、 $a=0.9, b=0.9$ となり、破壊伝播方向とサイトの位置関係および Radiation Pattern の影響が支配的であることが示唆される結果となった。なお、断層モデルによる地震動は地震基盤 ($V_s=3500\text{m/s}$) で計算されているが、距離減衰式による表層地盤増幅の補正⁵⁾の適用範囲外と考え、両者の結果のバイアスを最も良く説明する値として、 $V_s=850\text{m/s}$ を仮定して計算をおこなった。

その分布例を断層モデルの結果と比較して図-4, 5に示す。断層モデルの結果図中、細線および太線が断層面およびアスペリティの地表投影を、星印が震央を示している。逆断層については、アスペリティおよび破壊開始点を断層面に垂直に地表まで伸ばした投影面を付記している。

経験的な距離減衰式を補正して計算した計測震度の分布は、断層モデルによる分布に比べてまだまだ様相は単純だが、いずれの断層でも Radiation Pattern の影響が見られる。また、断層モデルの計算結果で特徴的な、横ずれと逆断層の震度分布パターンが概ね表現されている。横ずれ断層では、断層からの距離が等しい断層線上であっても、破壊伝播の効果によって地震動が異なることも表現されており、現実的な地震動分布が指向されている。ただし、地震動の大きくなる領域は断層モデルと異なり、断層モデルの方がよりシャープな分布形状を示す。

4. おわりに

アスペリティおよび破壊開始点の位置によって、断層モデルで計算される地震動分布は複雑な様相を示す。一方で、経験的な距離減衰式では断層からの距離に応じて単純な地震動分布となる。これに断層破壊伝播による効果を導入することで、横ずれ断層の断層線上でも地震動の大きさが大きく異なるなど、より現実的な地震動を表現し得る可能性が示された。

しかし、特に地震動の大きくなる位置に違いがあり、特に逆断層では破壊進行による影響が十分に表現できていない。実地震による震度分布の再現とともに、検討を続けるべき課題となろう。

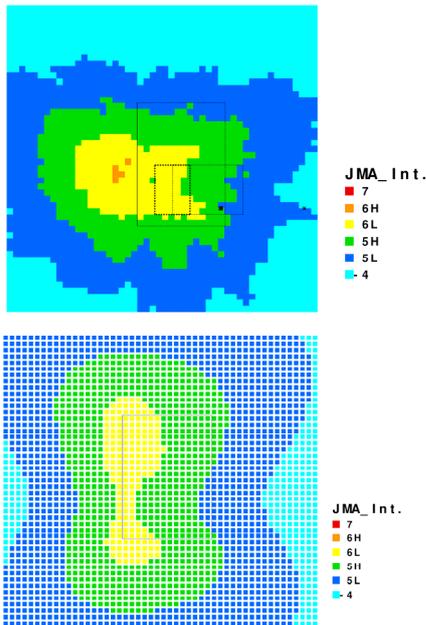


図-4 断層モデル（上）と提案手法（下）を用いた逆断層による計測震度分布例（REV1）

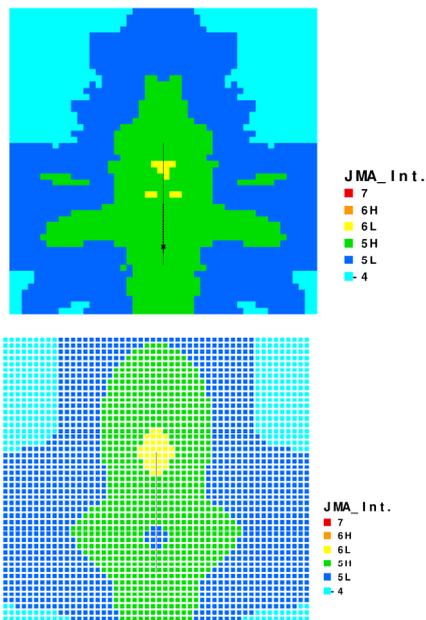


図-5 断層モデル（上）と提案手法（下）を用いた横ずれ断層による計測震度分布例（STR1）

参考文献

- 1) 香川敬生：断層破壊伝播効果を導入した経験的強震動評価の試み，*物理探査学会学術講演会講演論文集*，Vol. 116，pp. 9-12，2007.
- 2) Ohno, S., Ohta, T., Ikeura, T., Takamura, M.: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, Vol. 218, pp. 69-81, 1993.
- 3) Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., Abrahamson, N. A.: Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 68, pp. 199-222, 1997.
- 4) 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.
- 5) 翠川三郎・松岡昌志・昨川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度に見られる地盤特性の評価，*日本建築学会構造系論文報告集*，Vol. 422，pp. 72-78，1992.
- 6) 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*，特集号「地震災害を考える—予測と対策」，Vol. 110，pp. 849-875，2001.
- 7) 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*，Vol. 4，pp. 21-32，2004.
- 8) 野津厚：統計的グリーン関数に近地項と中間項を導入するための簡便な方法，*第12回日本地震工学シンポジウム論文集*，pp. 190-193，2006.
- 9) 佐藤智美：3成分広帯域統計的グリーン関数の生成方法に関する研究，*日本地震学会 2007 年秋季大会予稿集*，B32-05，2007.
- 10) 香川敬生：破壊開始点とアスペリティ位置が地震動分布に及ぼす影響，*日本地震工学会大会 -2008 梗概集*，pp. 250-251，2008.
- 11) Boore, D. M., Boatwright, J.: Average body-wave radiation coefficients, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, pp. 1615-1621, 1984.
- 12) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，*地域安全学会論文集*，Vol. 1，pp. 51-56，1999.

A study on empirical ground motion estimation introducing fault rupture propagating effects comparing with ground motions by fault rupture model

Takao Kagawa

Fault rupture propagating effects; i.e. radiation pattern and forward directivity, are introduced into empirical attenuation relationship of ground motion. Rupture heterogeneity is also considered as weight of the effects introduced for each small portion of the target fault. Contole parameters of the effects are adjusted to give seismic intensity distributions around fault area that agree well with the distribution calculated from waveforms by fault rupture model. The proposing compensation gives more realistic ground motion distribution than the average ground motion by empirical attenuation formulae.