

強震動シミュレーションによる基盤地震動の補間推定精度に関する一考察

岐阜大学大学院 久世益充
 岐阜大学工学部 杉戸真太
 岐阜大学工学部 能島暢呂

1. はじめに

地震被害想定の際には、想定地震による地震動強度の分布を精度よく推定することが不可欠である。このとき、地盤の影響が比較的少ないとされる基盤レベルでの地震動分布を予測した後、局所的な地盤条件の影響を考慮して地表面地震動分布を算定することが望ましい。ここで、県レベルの広域被害想定においては地震動予測地点が膨大な数となるため、例えば著者ら¹⁾は、岐阜県地震被害想定において、工学的基盤での地震動強度分布の推定を、数値計算時間を短くするために 5km の大メッシュ每で行った後、この大メッシュ内での基盤地震動は等しいと仮定して地表面における最大加速度分布、最大速度分布の推定を 500m の小メッシュ每で行っている。こうした効率化は、震源パラメータが地震直後に得られた場合の即時的な地震動強度分布推定では、特に重要となる。この場合、大メッシュで得られた結果から、小メッシュの地震動強度を精度よく推定できることが要求される。従って精度と計算効率の両方が考慮された適切なメッシュサイズについて考察する必要がある。

そこで本研究では、断層の広がりや破壊方向などの震源特性を考慮可能な非定常地震動予測モデル EMPR²⁾を用いて粗いメッシュにおける地震動波形を算定し、最大加速度、計測震度などの地震動強度を求め、その結果を基に形状補関数³⁾を用いて 1km メッシュでの地震動強度を推定することで、推定に要する計算の効率化を図る方法を検討する。また、形状補関数より推定された地震動分布と、EMPR により個々の点で独立に行った地震動予測結果を比較し、補間精度の検証を行うと共に、計算効率とあわせて適切なメッシュサイズについて考察する。

2. 工学的基盤における地震動強度の予測とその補間法

断層長さや幅、地震モーメントなどの震源断層を想定し、それによる工学的基盤における地震動波形を、EMPR を用いて 1km メッシュの各格子点位置でシミュレーションし、各波形の最大加速度・最大速度・最大変位・計測震度分布を真値と仮定する。次に EMPR によるシミュレーション結果が 2km, 4km, 8km, 16km, 32km メッシュで得られた場合を想定し、形状補関数により 1km メッシュの地震動強度分布を推定する。形状補関数は、有限要素法において離散点の間の値を補って連続関数として扱うための技法であり、地震動強度の空間的補間法としても利用されつつある⁴⁾。

EMPR による地震動予測結果が図 1 の 4 点または 9 点で得られている場合の、任意地点 (\mathbf{x}, \mathbf{h}) での形状補関数による地震動強度の推定値は、式(1)により求めることができる。

$$X_e(\mathbf{x}, \mathbf{h}) = \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}, \mathbf{h}) X_{oi} \quad (1)$$

ここに、 X_e は形状補関数による推定値、 X_{oi} は EMPR によるシミュレーション結果、 n は節点数 (4 もしくは 9)、 i は図 1 に示す節点番号、 f_i は 4 節点・9 節点それぞれの形状補関数で、次式で表される。

$$4 \text{ 節点形状補間: } f_i = \frac{1}{4}(1+x_i)(1+h_i) \quad (i=1,2,3,4)$$

$$9 \text{ 節点形状補間: } f_i = \frac{1}{4}x_0h_0(1+x_i)(1+h_i) \quad (i=1,2,3,4), f_i = \frac{1}{2}x_0(1+x_i)(1-h^2) \quad (i=5,7),$$

$$f_i = \frac{1}{2}h_0(1-x^2)(1+h_i) \quad (i=6,8), f_i = (1-x^2)(1-h^2) \quad (i=9)$$

ここに、 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_i \mathbf{x}$ 、 $\mathbf{h}_0 = \mathbf{h}_i \mathbf{h}$ であり、 \mathbf{x}_i 、 \mathbf{h}_i はそれぞれ節点番号 i の \mathbf{x} 軸、 \mathbf{h} 軸の座標値を示す。

形状補関数により推定を行った結果について、式(2)・式(3)により推定誤差を求める。

(a) 最大加速度・最大速度・最大変位の場合

(b) 計測震度の場合

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (I_{rj} - 1)^2}{m}} \quad \left(\text{ここに } I_{rj} = \frac{X_{ej}}{X_{oj}} \right) \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m I_{dj}^2}{m}} \quad \left(\text{ここに } I_{dj} = X_{ej} - X_{oj} \right) \quad (3)$$

ただし、 m は補間を行った地点の総数を示す。

3. 推定結果と誤差評価

岐阜県を対象として、八幡断層を震源とする $M=7.13$ を想定し、約 161km × 193km の地域での 31073 地点 (1km メッシュ) について、地震動強度分布の推定を行った。形状補関数による地震動強度分布の推定結果の一例として、16km メッシュ、4 節点形状補間により推定された最大加速度分布を図 2 に示す。EMPR により得た 1km メッシュの最大加速度分布 (図示は省略) の傾向をよく捉えていることが確認された。これより細かなメッシュサイ

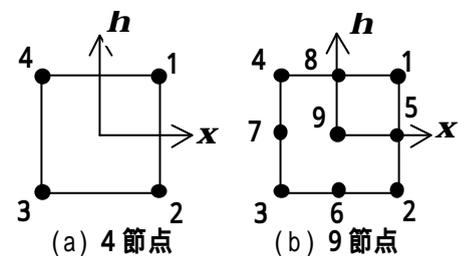


図 1 節点要素

ズについてもほぼ同様の結果が得られたが、32km メッシュでは断層近傍の分布形状を的確に捉えていなかった。4 節点と9 節点の違いを詳細に考察するため、EMPR による地震動推定結果と形状補間関数による補間結果の地震動強度の比 I_r について、地震動強度や断層最短距離との関係を図3 に示す。地震動強度と I_r の関係を見ると(図3 (a)・(b)左), 4 節点の場合、200gal を超えると補間結果が過小評価となる傾向が見られたが、9 節点の場合では見られない。この過小評価の傾向は 32km メッシュではさらに顕著である一方、8km 以下のメッシュでは改善されていることが確認された。また、断層最短距離と I_r の関係では(図3 (a)・(b)右), 断層最短距離がおおむね 70km より離れた地点での誤差は小さく、断層に近づくに従い誤差が大きくなっている。これは断層近傍の距離減衰の急激な変化を補間形状が的確に表していないことに原因があると考えられる。特に4 節点では、 x 、 h それぞれの一次関数の積で補間形状が決めるため、過小評価の傾向が顕著に見られる。9 節点では二次関数の積で表されており、少なくとも過小評価は改善されているが、かえって過大評価となっている傾向が見られる。

メッシュサイズ毎に I_r の平均値と最大・最小値を見ると(図4), 32km メッシュでは誤差が 30~40%以上に及ぶのに対し、メッシュサイズが 2km の場合では、5%以内の誤差で補間による地震動強度が推定可能である。また I_r の範囲は4 節点に対して9 節点による推定結果が相対的にやや大きい傾向を示している。

メッシュサイズと推定誤差、およびシミュレーション点数の関係を図5 に示す。計算効率の向上と推定誤差の低減は、相容れない要求であることがわかる。4 節点と9 節点の場合の推定誤差はほぼ同じ傾向を示すものの、図3 に示したように I_r の分布形状が異なっていることに注意が必要である。ところで、EMPR の波形シミュレーションに要する時間は一地点あたり約3秒 (CPU: Pentium - 500MHz) で、1km メッシュで全ての地点に対して計算を行うには、約 26 時間、2 km メッシュで約6時間半、32km メッシュの場合では約2分必要である。図5 に示す関係から、8km メッシュでEMPR による計算を行うことが計算効率と推定精度の両面から妥当であると思われる。このときの計算時間は約 26 分である。

4. おわりに

本研究では、震源パラメータが得られた場合の高密度・高精度な地震動強度分布を即時推定するために、粗いメッシュで算定された地震動波形より地震動強度を求め、その結果を形状補間関数により 1km メッシュの地震動強度分布を推定した。また、補間精度について検証を行い、計算時間と推定誤差の関係より、最適なメッシュサイズについて検討した。今後は、距離減衰を考慮して、断層近傍ではメッシュサイズを小さく、断層遠方では大きくすることで推定誤差を減少させるなど、補間のためのメッシュ形成方法について検討する必要がある。

参考文献

1) 杉戸真太・福岡淳也・洞谷元司: GIS の技術を取り入れた地震防災システムに関する基礎的検討, 第 32 回地盤工学研究発表会概要集, 1997.7, pp.917~918. 2) 洞谷元司・杉戸真太・古本吉倫・杉山武: 非定常スペクトルの重ね合わせによる強地震動予測手法の再検討, 土木学会第 53 回学術講演会論文集 (B), 1998.10, pp.550~551. 3) O.C.ツイエンキーヴィッツ 著, 吉識雅夫・山田嘉昭 共訳: マトリクス有限要素法, 培風館, 1984.9, pp.144~158. 4) 高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二: モニタリングシステムにおける地震動補間法と精度の検証, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994.3, pp.1151~1160.

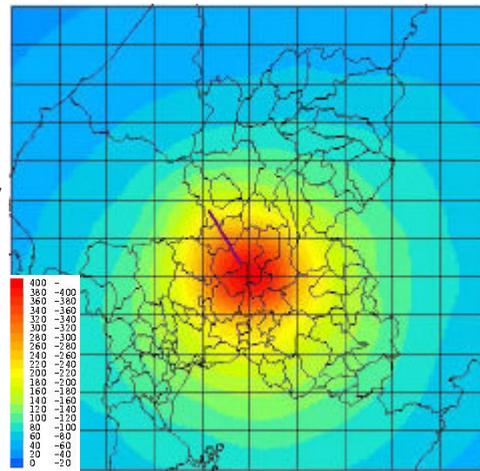
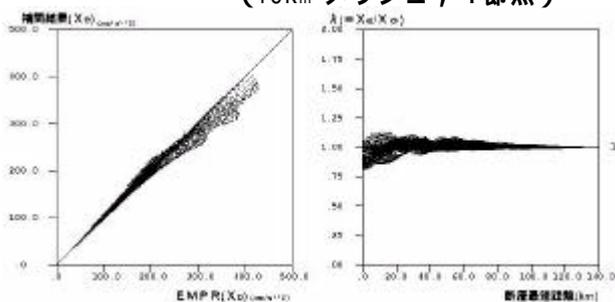
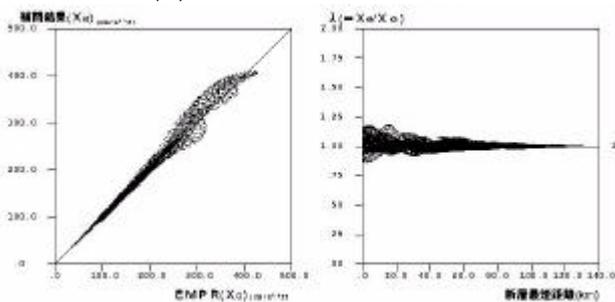


図2 最大加速度分布推定結果
(16km メッシュ, 4 節点)



(a) 16km メッシュ, 4 節点



(b) 16km メッシュ, 9 節点

図3 最大加速度比分布

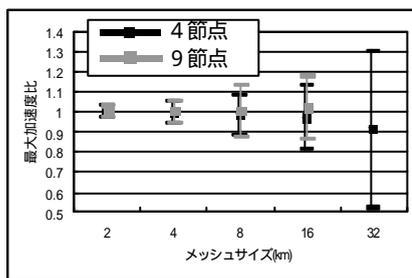


図4 最大加速度比 I_r の
平均値と最大・最小値

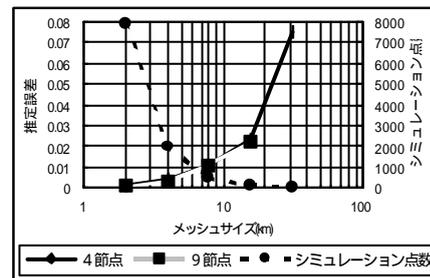


図5 推定誤差と
シミュレーション点数