

階層型解析手法を用いた強震動予測手法の開発

市村 強¹・堀 宗朗²

¹正会員, 工博, 助手, 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

²正会員, Ph. D., 助教授, 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

強震動分布情報を工学的に必要とされるレベルで高分解能・高精度でシミュレーションすることの意義は大きいと考える。このシミュレーションをおこなうためには、膨大な計算量と地盤情報の不確実性という二つの難点がある。この二つの難点を克服するための方法としてマクロ-ミクロ解析手法を提案している。本論文ではこの手法によって実際に強震動をシミュレーションし、実測データと比較をおこなった。また、現実的なモデルをもちいて強震動のシミュレーションをおこなうためには波動場計算手法についても検討が必要である。ここでは、有限要素法の計算法に検討をくわえ大規模な波動場計算ができるようにした。これらの方法によって2[m]という高い分解能で強震動分布をもとめることができた。地下の三次元構造とこの強震動分布の比較から、地表付近の三次元構造によって強震動分布は大きな影響を受け、100×100[m]という狭い範囲でも、顕著な偏りが生じることがわかった。このことから、工学的に必要とされるレベルで高分解能・高精度でシミュレーションするためには、このような三次元シミュレーションを適用することの意義が大きいことがわかった。

Key Words : Macro-Micro Analysis, Finite Element Method, Strong Motion, High-resolution

1. はじめに

合理的・効率的な震災対策には、工学的に必要とされるレベルでの高分解能かつ高精度の強震動予測が重要である。定量的に強震動予測をおこなうためには、三次元でモデル化し、震源過程-波動伝播過程-サイトエフェクトをシミュレーションすればよい。しかし、工学的に必要とされるレベルで強震動をシミュレーションするには膨大な計算資源が要求される。また、モデル化に際し、地盤・地殻構造が正確にはわかっていないことも考慮しなければならない。

以上の問題を解決するため、著者らは階層型数値解析手法である、マクロ-ミクロ解析手法を提案している¹⁾。この解析手法は、粗い分解能のマクロ解析と高い分解能のミクロ解析の組み合わせたものである。解析の手順は以下のように整理される。

1. 地盤・地殻構造情報の不確実性を考慮して、物性の上限と下限を設定する (1m オーダーの分解能)。
2. 1) で作成したモデルから等価な低分解能なモデルを作成する (階層型解析の導入: 100m オーダーの分解能)。
3. 2) で作成したモデルを用いて断層から地表までをふくむ領域で強震動シミュレーションをおこなう (マクロ解析: 100m オーダーの分解能)。
4. 高分解能で強震動をシミュレーションしたい地点において、1) で作成した高分解能な地盤構造と3) でえられた粗い分解能な強震動を用いて高分解能な強震動シミュレーションをおこなう (ミクロ解析: 1m オーダーの分解能)。

5. 3) ~4) を物性の上限の場合・下限の場合についてそれぞれおこない、高分解能で上限・下限の強震動をシミュレーションする。

マクロ-ミクロ解析は階層型解析であるため、各解析の必要最大メモリを抑えることが可能である。また、地盤情報の不確実性に対応した物性の上下限を用いることで、起こりうる強震動を挟む上下限の強震動を求めるところに特徴がある。

2. 数値解析手法

マクロ-ミクロ解析手法によって計算量が軽減されたとはいえ、マクロ解析とミクロ解析で必要とされる計算量は依然として膨大である。そのため、シミュレーションのためにはシミュレーション手法に関しても検討をくわえる必要がある。

三次元の不整形地盤・地質構造内での波動伝播シミュレーション手法として、差分法・有限要素法などのさまざまな方法が提案されている。ここでは、任意の三次元構造を取り込むことができる拡張性、自由表面の影響を容易に取り込むことができることなどから、有限要素法をもちいて波動伝播シミュレーションをおこなうことを考える。

有限要素法では、要素ごとに要素剛性マトリクスとよばれる各ノードの影響を評価するためのデータを作成し、それをすべての要素に関して組合せ全体剛性マトリクスとよばれる全ノードの影響を評価するデータを構築する。通常、この全体剛性マトリクスをメモリ上に保持しなければならないので大規模な自由度の間

題をシミュレーションする場合には膨大なメモリが必要とされる。

この問題点を解決する方法としてボクセル要素（立方体の要素）による離散化を適用する方法がある。この要素をもちいてモデルを離散化し、さらに反復法などの方法により方程式を解く場合には、全体剛性マトリクスを陽にメモリ上に保持する必要がない。つまり、必要な要素剛性マトリクスをメモリ上に保持しておけばそれをソルバーの中で組み合わせることにより、陰的に全体剛性マトリクスを構築することができる。このことにより大幅に必要メモリを減らすことができ、大規模な自由度の問題を解くことができるようになる。また、この方法は計算が要素ごとの計算を基本としているので高い並列化効率も容易にえることができる。

このボクセル要素で領域を離散化する方法をもちいて、本論文ではマクロ解析、ミクロ解析をおこなう。ここでは、無限媒体中での爆破震源の解析解²⁾との比較により、この方法の精度検証をおこなう。検証のためのモデルとして、 $24000 \times 24000 \times 24000$ [m] の立方体の領域を考える（縦波速度 5000 [m/sec]）。これを $240 \times 240 \times 240$ [m] のボクセル要素で離散化する。爆破震源としてモデルの中心で 1 秒の $\sin$ 半波を入力した。逸散境界条件としてパラキシアル条件³⁾をすべての表面に適用した。時間積分には *Wilson* の θ 法をもちいた。有限要素法における逸散境界条件はまだ解決されていない問題であり、ここで適用したパラキシアル条件も完全なものではない。一方で波の逸散を表現するために境界要素法を境界領域に接合するという考え方があり、この適用を目指している。時間領域の境界要素法の精度は時間積分の手法に鋭敏であるため、中心差分法などの適用は難しい⁴⁾。そのため、ここでは *Wilson* の θ 法を適用した。

図-1 に中心から 3360 [m] の地点での解析解と計算結果の比較をしめす。解析解の最大振幅により正規化をした。図-1a) は時間領域での比較をしめしている。両者とも位相、振幅が一致しており良好な結果がえられている。パラキシアル条件を適用した境界からの反射波もないことから、無反射境界が良好に再現されていることがわかる。図-1b) は周波数領域での比較をあらわしている。 $0 \sim 2$ [Hz] の範囲では良好な一致をしているものの、 $2 \sim 5$ [Hz] の範囲ではあまり一致していない。精度保証の閾値を相対誤差で 5% と定義して比較をおこなうと精度は 2 [Hz] まで保証できる。 2 [Hz] のときの波長は 2500 [m] であり、 $240 \times 240 \times 240$ [m] の要素をもちいている。このことから精度を保証するためには、波長の $\frac{1}{10}$ より小さなボクセル要素を使う必要があることがわかる。この検証を中心から 5760 [m] の地点でもおこない、同様な結果がえられた。

3. シミュレーション例

マクロ-ミクロ解析手法とボクセル要素をもちいた有限要素法をもちいて実際に観測された地震をシミュレーションし、シミュレーション結果と実測データの比較

をおこなう。シミュレーションの対象は、横浜市近郊でおきた地震で、地震のパラメータは表-1 のようである。

断層と観測点をふくむ $40 \times 30 \times 70$ [km] をシミュレーションの領域として考える。まず、地下深部での三次元の地殻構造⁵⁾や地表付近の地質構造から分解能 1 [m] 程度の高分解能なモデルを構築する。地盤情報がいまいしさをもつことを表現することとして物性が確率的に変動するとした（ここでは、推定されている物性値を平均として標準偏差を平均の 10% としてあたえた）。この確率モデルから上・下限の構造を推定する。

推定された上・下限の高分解能な構造から、上・下限の構造それぞれについて 100 [m] オーダーの粗い分解能のモデルを構築する。このマクロ解析のモデルにおいて上限・下限の構造で、大きな差が見られなかった。下限のモデルをもちいてのみマクロ解析をおこなった。このモデルを図-2 にしめす (α , β , ρ はそれぞれ縦波速度、横波速度、密度をあらわしている)。マクロ解析では、断層から地表までの波動場の数値シミュレーションをおこなう。地表面以外に逸散境界条件としてパラキシアル条件を導入した。断層が深く遠いので、断層として点震源を導入した。震源関数としてランプファンクションを仮定し、立ち上がり時間は⁶⁾を参考に、 0.35 [sec] とした。この解析の概要を表-2 にまとめる。図-2 にしめす $40 \times 30 \times 70$ [km] の領域を一辺 40 [m], 60 [m], 120 [m], 240 [m] のボクセル要素をもちいて離散化した。その結果、自由度としては 57012396 となった。必要メモリは 4.4 [GB] であった。この離散化では、2 の精度保証の結果より、 1.2 [Hz] までの精度が保証されている。

マクロ解析でえられた解と 1 [m] オーダーでえられた高分解能な地盤構造をもちいてミクロ解析をおこなう。ここではサイト *hd01d* でえられた強震動を再現する。*hd01d* 近傍 $160 \times 160 \times 40$ [m] での地盤構造は図-3 のようになっている (β は横波速度)。この領域を一辺 2 [m] のボクセル要素で離散化する。この離散化では、2 の精度保証の結果より、 2.5 [Hz] までの精度が保証されている。この解析の概要を表-2 にまとめる。土の履歴減衰を考慮するため、周波数領域で計算している⁷⁾。 0.098 [Hz] ごとに 2.5 [Hz] まで 27 ステップ計算し、FFT をもちいて時間領域の結果をえる。ミクロ解析では、マクロ解析でえられた解をもちいて高分解能な結果をえるが、マクロ解析では 1.2 [Hz] までの成分しか精度保証されていない。そのため、 1.2 [Hz] 以上の成分を補間する必要がある。ここでは、⁸⁾の方法によって、 1.2 [Hz] 以上の成分のスペクトルを実測データから推定し補間にもちいた。

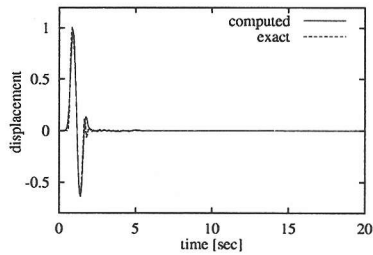
マクロ-ミクロ解析によってえられた結果を実測データと比較する。図-4 に比較の結果をしめす。主要動付近 8 [sec] の東西方向の波形である。この解析では、 2.5 [Hz] までの精度が保証されているので、 2.5 [Hz] のローパスフィルターを実測データ計算結果の双方にかけている。波形位相とも良好な一致を示しており、他のサイトにおいてもほぼ同様な結果がえられた。しかし、いくつかの観測点では良好な一致がみられなかった。断層を

表-1 地震のパラメータ.

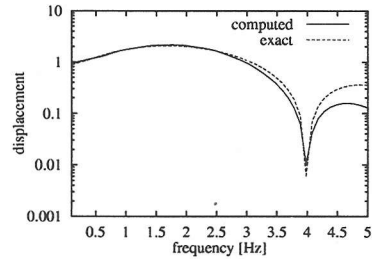
Date	Lat.	Long.	Depth	Strike	Dip	Rake	Mag.	Quality
08/11/1999	35.4N	139.8E	53km	62°	85°	73°	4.0Mw	90.34%

表-2 シミュレーションの諸元.

element	40 × 40 × 40[m] ~ 240 × 240 × 240[m]	2 × 2 × 2[m]
D.O.F.	57012396	413343
step	6000 (0.01[sec])	27 (0.098[Hz])
memory	4.4[Gb]	200[Mb]

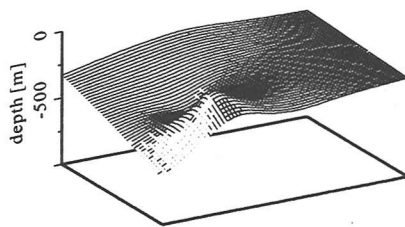


a) 時間領域

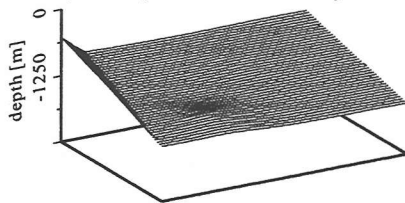


b) 周波数領域

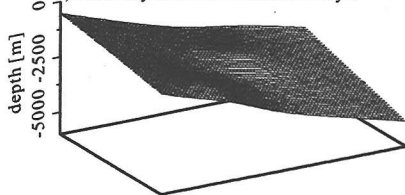
図-1 解析解と計算結果の比較.



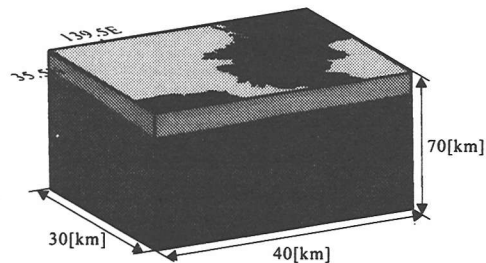
a) boundary between 1st and 2nd layer



b) boundary between 2nd and 3rd layer



c) boundary between 3rd and 4th layer



	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer
α [m/sec]	1040	1730	2950	5200
β [m/sec]	600	1000	1700	3000
ρ [kg/m ³]	1800	2000	2300	2500

図-2 マクロ解析でのシミュレーションモデル.

巨視的モデルであらわしていること、高周波数成分を統計的な方法によって付加していること、ミクロ解析で三次元的な地下構造を考慮しているものの地表面を平面として扱っていること、土の非線形を考慮していないことなどによるものと考えられる。これらは今後

の検討課題である。

つぎに複雑な三次元構造をもつサイト *kz07s* での強震動分布をもとめる。*kz07s* 近傍の地盤構造は図-5 にしめすようである (β は横波速度)。これを *hd01d* と同様に離散化し、強震動分布をシミュレーションした。2×2×2[m]

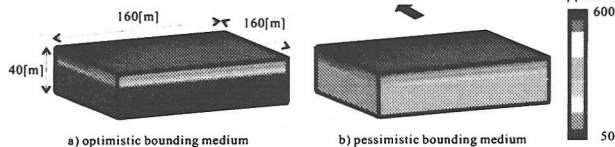


図-3 hd01d での上限と下限の地盤構造.

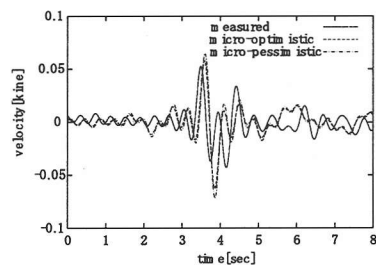


図-4 hd01d での実測データとの比較.

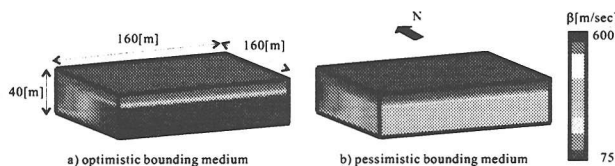


図-5 kz07s での上限と下限の地盤構造.

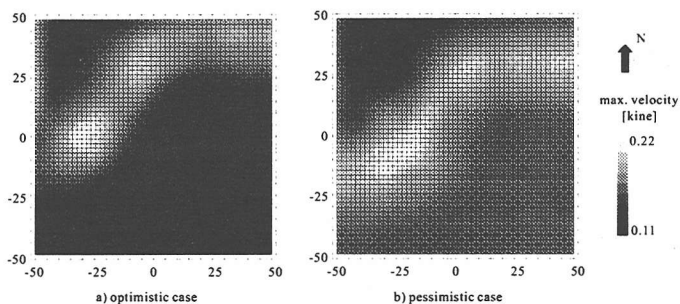


図-6 kz07s における最大速度分布.

のボクセル要素でシミュレーションをおこなったので空間分解能は2[m]であり、時間分解能は2.5[Hz]までである。そのため計算結果にはすべて2.5[Hz]のローパスフィルターをかけた。サイトkz07sを中心とする100×100[m]の領域の最大速度分布を図-6にしめす¹。100×100[m]という狭い範囲内でも、図-5との比較から、顕著な三次元構造がある付近では大きな偏りが起こることがわかった。この例では、顕著に偏った部分とそうでない部分では最大速度で倍程度の差が生じている。このような強震動の大きな偏りまでもを定量的にシミュレーションして情報を提供することは震災対策を考える上で大きな意味をもつと考える。また、この大きな偏りを生じることから、工学的に必要とされるレベルで高分解能・高精度でシミュレーションするためには、このような三次元シミュレーションを適用することの意義が大きいことがわかった。

4. まとめ

本論文では、1) 提案しているマクロ-ミクロ解析手法の概略を説明し、2) 有限要素法により大規模波動問題を解くための方法を提案し、3) 1) と2) を組み合わせで現実的なモデルをもちいて強震動のシミュレーションをおこなった。

その結果、大規模な波動の問題を有限要素法によりシミュレーションすることができ、また、精度も十分に保証できることをしめした。また、マクロ-ミクロ解析手法によって良好に強震動をシミュレーションする

ことができることがわかった。さらに、2[m]の分解能で最大速度分布をもとめた。この分布から地表付近の三次元的な地盤構造の影響を受けて、狭い領域でも非常に大きな偏りが生じることがわかった。また、この大きな偏りを生じることから、工学的に必要とされるレベルで高分解能・高精度でシミュレーションするためには、このような三次元シミュレーションを適用することの意義が大きいことがわかった。

本論文では、ボクセル要素を適用して有限要素法解析をおこなったが、三次元的な構造を取り入れるために、構造の変化が大きい箇所においては適合要素を導入することを考えている。また、高周波成分の補間についてもより精度の良い手法を適用することを検討している。さらに、地表付近の強震動に大きな影響を及ぼす土の非線形についてもシミュレーションできるように解析ツールを開発中である。

参考文献

- 1) Ichimura, T. and M. Hori : Macro-micro analysis method for strong motion distribution, *J. Struct. Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, I-52, 654, 51-62, 2000.
- 2) Aki, K. and Paul G. Richards : Quantitative Seismology Theory and Methods volume 1, W. H. Freeman and company, 1980.
- 3) J.P. ウォルフ (動的解析研究会訳) : 構造物と地盤の動的相互作用解析 : 時間領域処理法, 鹿島出版会, 1996.
- 4) 田中正隆, 松本敏郎 : 時間差分スキームに基づく非定常動弾性境界要素法解析, 日本機械学会論文集 (A 編), 55 巻 515 号, pp.1577-1583, 1989.
- 5) 山中浩明ら : 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測, 地震第 2 輯, pp.355-365, 第 51 巻, 1999.
- 6) Kikuchi, M. and M. Ishida : Source Retrieval for Local Earthquakes with Broadband Records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp.1885-1870, 1993.
- 7) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1995.
- 8) 年縄 巧, 渡部 義之, 小林 孝至, 内山 泰生 : 震源域毎に分類した首都圏南西部における工学的基盤からの入射波スペクトルの特性, *J. Struct. Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, I-47, 619, 121-130, 1999.

¹ 1次元波動論との比較により100×100[m]の領域では精度が保証できることを確認した。