

I - B 95

都市強震動予測のためのマクロ-マイクロ解析手法

学生会員 東京大学地震研究所 市村 強

正会員 東京大学地震研究所助教授 堀 宗朗

1. 研究の背景と目的

阪神大震災で露呈されたように、都市部での大地震による被害は著しいものがある。この被害を防ぐことを考えるときに、都市部に於ける広域かつ高密度な「どこがどれくらいゆれるのか」という情報、すなわち、広域・高密度・高精度な強震動分布の情報が提供されることの社会的意義・工学的意義は大きいものと考えられる。従来、強震動分布をもとめる方法は三つのものが知られている。それはスペクトラム法などに代表される経験的手法、経験的グリーン関数をもちいる半経験的手法、計算機による波動場計算である。実際に震災対策に用いるためには、強震動分布情報は定量的かつ精度保証されることが必要である。そのため、第三の手法である計算機による波動場計算がとるべく手法として望まれる。しかし、計算機による手法には大きな難点があるため、定性的な部分のある経験的手法・半経験的手法が実際には用いられることが多い。

計算機による手法の大きな難点とは強震動分布をもとめるためのモデルを設定することにより理解することができる。第一の難点を考える。ひとつの都市域の大きさは $10[\text{km}] \times 10[\text{km}]$ のオーダーであり、また、断層の深さは $10[\text{km}]$ である。一般に強震動データに求められる精度は周波数領域で $10[\text{Hz}]$ のオーダーなので、上記の $10[\text{km}] \times 10[\text{km}] \times 10[\text{km}]$ オーダーの領域を $1[\text{m}]$ メッシュ程度で離散化した波動場計算が実際の強震動問題と等価であると考えられる。波動場計算に用いられる手法として、FDM（差分法）、FEM（有限要素法）、BEM（境界要素法）がある。これらのおおのについて、この波動場計算に必要とされるメモリと計算量の概要を整理すると表-1 のようになる（計算量の n は要素数を表している）。

	必要メモリ	計算量
FDM	$5.0 \times 10^3 [\text{MB}]$	$\propto n$
FEM	$5.0 \times 10^3 [\text{MB}]$	$\propto n$
BEM	$1.0 \times 10^4 [\text{MB}]$	$\propto n^2$

表-1

FDMやFEMのような体積型の計算様式ではメモリが、現在、現実的でないレベルまで必要とされる。BEMのような面積型の計算様式では計算量が表面要素数に敏感に反応して増加してしまうため高密度な波動場計算をおこなうことは難しい。また、大地震時の地表付近での非線型現象を再現するにはさらなる膨大な計算量が必要とされるため、現在の計算機による前述の波動場計算の実現は難しいと考えられる。第2の難点は地盤情報が低分解能であることに起因する。強震動分布は地表付近の不整形形成層の影響を強く受けることが知られているが、地盤情報が低分解能であるため不整形形成層の詳細なモデル化が困難となるのである。

本研究では以上の二点の難点を克服することを目指したあたらしい解析手法であるマクロ-マイクロ解析手法をしめし、適用事例をしめす。

2. マクロ-マイクロ解析手法

マクロ-マイクロ解析は、バウンディングメディアと特異振動による階層型解析を組み合わせた手法である¹⁾²⁾。具体的なこの解析手法は以下のように整理される。

①地盤情報の低分解能である問題を解決する。浸透問題などでよく用いられるように、地盤情報の不確実性を確率的に評価しなおす。②バウンディングメディアの手法により、ひずみエネルギーの期待値をはさみこむ上限（pessimistic）と下限（optimistic）の構造を設定する。③②で設定した構造はまだ計算力学的な制約をうける。そのため、階層型解析を導入する。100[m]

キーワード：高密度，計算量，不確実性

連絡先：〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所 03-3814-5751(ex.5740)

オーダーのマクロ・スケールの座標と 1[m]オーダーのマイクロ・スケールの座標を導入する。④真の解を特異振動により、マクロ・スケールの座標のみに依存する部分とそれ以外にわけると、⑤バウンディングメディアの手法により、マクロ・スケールでの有効物性をもとめ上記の真の解でのマクロ・スケールの座標のみに依存する部分を計算する（マクロ解析）。⑥②で設定したモデルから取り出してきた狭領域に対して⑤でもとめた解を特異振動の関係にしたがってインシデントな解として導入して、スキヤタリングされた解をもとめる（マイクロ解析）。このマイクロ解析とマクロ解析でえられた解を特異振動の関係によりあわせたものが真の解の近似値をあたえることが期待される。以上が、マクロ・マイクロ解析の概要である。

3. 数値シミュレーション概要

2.のマクロ・マイクロ解析をもちいて横浜市内の観測点で実測された小地震の加速度データの再現シミュレーションを試みる。再現シミュレーションのモデルの概要についてのべる。断層はポイント・ソースとし、すべり量はすべり速度のステップ関数として入力される。地表付近深さ 50[m]までの地盤情報は横浜市により提供されたものを持ち、その空間分解能は 10[m]と仮定した。それ以下の深さでの物性は表-2 のように設定した。

密度	せん断波速度	ポアソン比
2100[kg/m ³]	3500[m/sec]	0.27

表-2

マクロ解析では表層とそれより深部の水平二層構造としてモデル化し、周波数領域の三次元動弾性境界要素法をもちいて計算をおこなった。表面、境界はそれぞれ50[m]×50[m]正方形メッシュをもちいて16×16要素で離散化した。先述のように境界要素法の計算量は要素数の二乗に比例する。この計算量を軽減するために多重極展開法を組み込んだ。また、表層ともう一層の物性値が大きく異なるため、境界要素法の代数方程式の解の収束性が著しく悪化する。これを改善するために各層に注目してサブストラクチャー法を導入した。マイクロ解析では有限要素法をもちいて計算をおこなった。観測点を中心として 40[m]×40[m]×40[m]の

領域を取り出し、2[m]×2[m]×2[m]立方要素をもちいて離散化した。境界面からの無意味な反射波を除くため Rayleigh ダンパーを効率的に境界面に配置した。

4. 数値シミュレーション結果

数値シミュレーションによってえられた観測点での主要動から 1.0[sec]間の東西方向の加速度波形と実測データを比較したものを図-1 として図示する（5Hz まで精度保証可能）。図中の upper, lower は期待される挙動の上限と下限をそれぞれあらわしている。

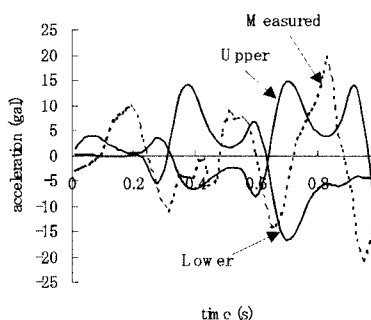


図-1

5. 結論

本研究では、定量的な強震動分布計算のための障害となっている計算量と地盤情報の低分解能という二つの難点を克服できると考えられるマクロ・マイクロ解析をしめし、数値計算例をしめした。観測点での加速度は東西、上下方向については図-1 でしめしたような比較的良好な一致をみたが、南北方向では計算波形が実測より過小となった。さらなる精度の向上のため、より現実を反映したモデル化、より大要素数での数値計算をおこなう予定である。

参考文献

- 1) 市村 強, 都市強震動予測のためのマクロ・マイクロ解析, 1999
- 2) M. Hori and S. Munasighe, Generalized Hashin-Shtrikman variational principle for boundary-value problem of linear and non-linear heterogeneous body, 1998