

都市強震動予測のためのマクロ・ミクロ解析

市村 強¹・堀 宗朗²¹学生会員, 工修, 博士一年, 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)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)

都市域での強震動分布の情報を高分解能・高精度で予測することの意義は大きいと考える。この予測には、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。これを解決するために、1) 階層型解析をおこなうための特異摂動と 2) バウンディング・メディアの方法に基づいて地盤情報の不確実性に応じた起こりうるオブティミスティックな挙動とペンシスティックな挙動を推定する、という二つの方法を組み合わせたマクロ・ミクロ解析を提案している。本論文では、実際の地震について簡単なモデル化をし、シミュレーションをおこない、実測データと比較した。時間分解能 5[Hz]、空間分解能 2[m] という高分解能までを保証した計算条件で良好な結果を与えることができた。これはマクロ・ミクロ解析の基礎的な適用妥当性を示しているものと考えられる。

Key Words : Macro-Micro Analysis, Singular Perturbation, Bounding Media

1. はじめに

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。この被害を防ぐ具体的な手段を考えるときに、都市部における高密度な「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。それはスペクトル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、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計算す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[km] × 10[km] のオーダーであり、また、断層の深さは 10[km] のオーダーである。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[Hz] のオーダーなので、上記の 10[km] × 10[km] × 10[km] オーダーの領域を 1[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。これらのおのおのについて、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 は表面要素数の数を表している)。FDM や FEM のような体積型の計算様式ではメモリが、

表-1 必要とされるメモリ

	メモリ[MB]
FDM	5×10^3
FEM	5×10^3
BEM	1

現在、現実的でないレベルまで必要とされる¹⁾。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・地殻情報が低分解能でしかあたえられていないことに起因する。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・ミクロ解析手法をしめし、適用事例をしめす。

2. マクロ・ミクロ解析の概要

マクロ・ミクロ解析は、バウンディング・メディアと特異摂動による階層型解析を組み合わせた手法である²⁾³⁾¹²⁾¹³⁾。具体的なこの解析手法は以下のように整理される。①地盤情報が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⁷⁾。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

さみこむベシミスティックな構造とオプティミスティックな構造を設定する。③②で設定した詳細な構造をもちいた計算は計算量が膨大となる。そのため、階層型解析を導入する。100[m] オーダーのマクロ・スケールの座標と1[m] オーダーのミクロ・スケールの座標を導入する。④解を特異摂動により、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摂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、解をもとめる（ミクロ解析）。以上が、マクロ・ミクロ解析の概要である。

3. 数値シミュレーション例

マクロ・ミクロ解析の基本的な妥当性を検証するために、プロトタイププログラムを作成し、実際の地震をシミュレートした。このプログラムでは、境界要素法⁴⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾、有限要素法⁶⁾をマクロ解析、ミクロ解析にそれぞれもちいている。

シミュレートの対象となる地震の性状は表-2のようである。震源はランプ・ファンクションの点震源としてモデル化した。断層面積は2.19[km²]、断層面での食い違い量は0.3[m]、ライズ・タイムは0.64[sec]とした⁵⁾。比較のための強震動データは横浜市内千歳公園、(35.4338N, 139.6372E)、でえられたものをもちいる。観測点近傍の全体の地盤構造のモデルとして、図-1のような水平二層構造をもちいた。表-3は最下層の物性をしめしている。地表の層については、図-2、図-3と表-4が地盤構造と物性をしめしている。図-2の番号は図-3中の柱状図の番号をしめしており、また、図-3の英字はそれぞれ表-4の材料物性と関連づけてしめしてある。

表-2 震源パラメータ

Lat.	Long.	Depth	Strike	Dip	Rake	Mag.
35.6N	140.0E	75km	10°	62°	100°	4.7Mw

表-3 最下層の材料物性

ρ [kg/m ³]	C_2 [m/s]	ν
2500.	3500.	0.27

表-4 表層の材料物性

	ρ [kg/m ³]	C_2 [m/s]	ν
Ac ₁	1500.	100.	0.27
Ac ₂	1600.	140.	0.27
As ₂	1800.	210.	0.27
T	2100.	700.	0.27

まず、観測点近傍において表層のみが不確実性をもつと考え、表層を統計的不均一性をもつ領域としてモ

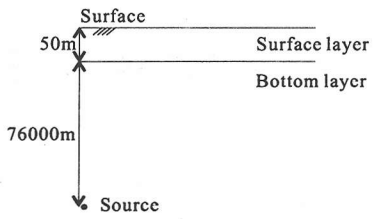


図-1 地殻構造

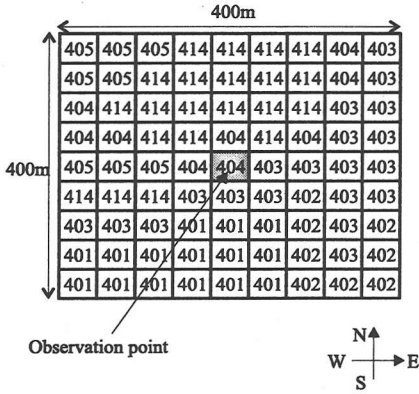


図-2 表層の地盤構造

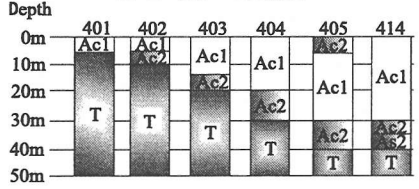


図-3 土質柱状図

表-5 バウンディング・メディアの物性

	ρ [kg/m ³]	C_2 [m/s]	ν
V ⁺	1807.5	645.8	0.27
V ⁻	1770.5	197.5	0.27

デル化する。この領域は図-4のように観測点を中心とした400×400×50[m]の範囲である。つぎに、バウンディング・メディアの方法に基づき、この領域についてのオプティミスティックな構造とベシミシティックな構造を計算すると物性は表-5のようになる。マクロ解析では、このバウンディング・メディアを表層の物性としてモデル化し、全体での波動場計算をおこなう。マクロ解析では、断層破壊から40.96[sec]間を0.32[sec]間隔で計算した。マクロ解析でもちいたモデルは図-5のようであり、0.8×0.8[km]の地表と境界面は16×16要素に分割した。ミクロ解析のモデルは図-6のように観測点を中心として40×40×40[m]の範囲である。この領域を2×2×2[m]の要素で離散化し0.02秒間隔で計算した。

図-7はマクロ・ミクロ解析により計算された加速度波形と実測加速度波形を主要動開始から1.0[sec]間で図示したものである。このマクロ・ミクロ解析の解は、

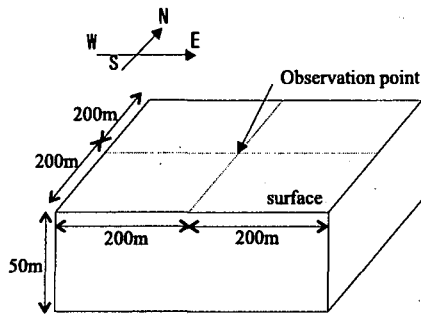


図-4 対象領域

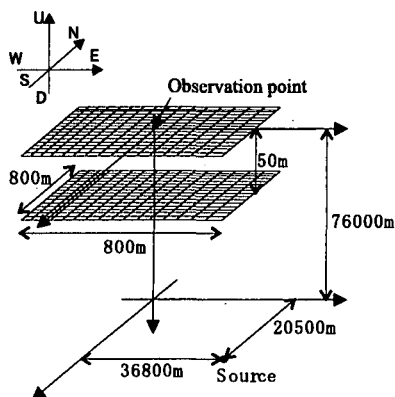


図-5 マクロ解析のためのモデル

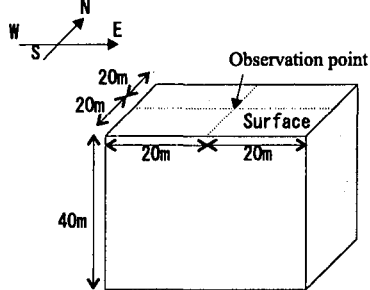
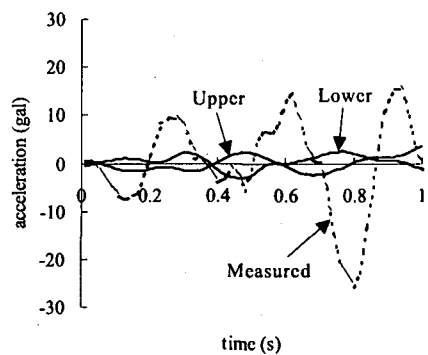


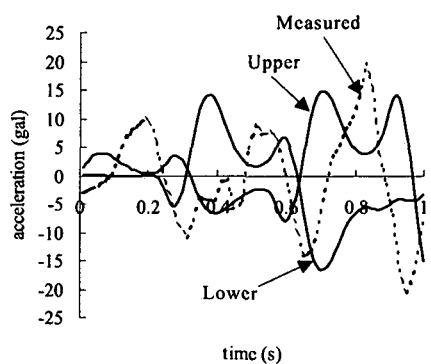
図-6 ミクロ解析のためのモデル

マクロ解析の解と比較すると、ミクロ解析によって地下の不整形成層構造の影響を反映した解に改善されていることがわかる。この解析では5[Hz]までの精度の保証が可能であるので、計算波形と実測データをともに5[Hz]まででカットしてある。計算波形は実測された波形とは異なっている。この原因の主なものは、①断層モデルを単純化し過ぎたこと、②マクロ解析の対象領域がせまかったこと、③ミクロ解析の対象領域がせまかったことなどが考えられる。しかしながら、計算波形は実測データとはほぼ同じオーダーの振幅であり、振幅の意味では実測のデータをはさみこむことができていると考えられる。これは、マクロ-ミクロ解析の基本的な妥当性をしめしていると考えられる。

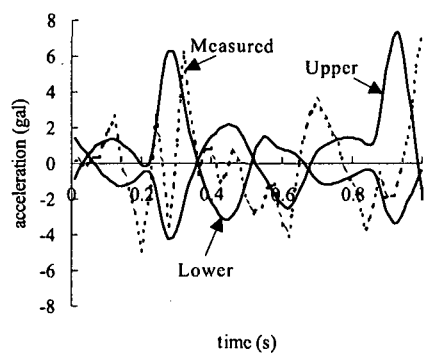
最後に、観測点近傍の20×20[m]の範囲での最大加速度分布を計算した(図-8, 9)。この計算では、空間分解能2[m]、時間分解能0.2[sec]までが保証されている。マクロ解析では、このスケールではほぼ一様な最大加速度分布になる。しかし、ミクロ解析を介すること



a) north/south



b) east/west



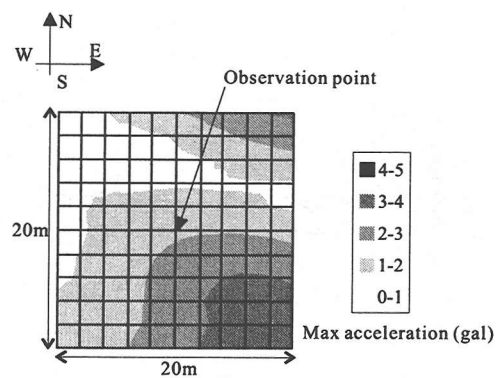
c) up/down

図-7 マクロ-ミクロ解析による加速度波形

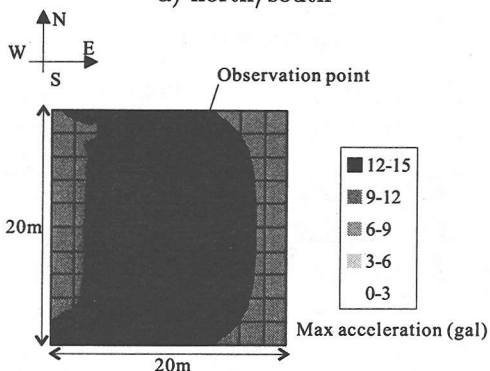
によって、地下での複雑な不整形成層構造の影響を受けた局所的な偏りをもつ最大加速度分布となっている。

4. 結論

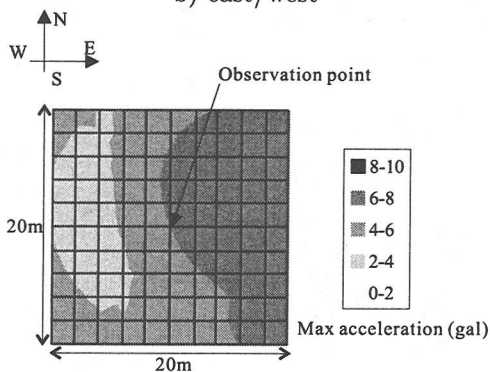
本論文では、提案しているマクロ-ミクロ解析の基本的な妥当性を検証するため、実際の地震をシミュレートした。本手法により、5[Hz]までの領域で実測データと同じ振幅の計算波形をえることができた。また、空間分解能2[m]・時間分解能0.2[sec]という高分解能を高精度に数値計算することによって、20×20[m]とい



a) north/south

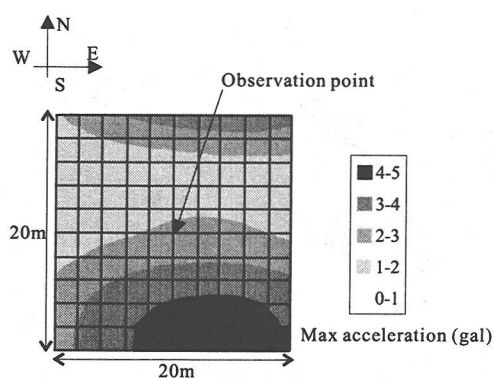


b) east/west

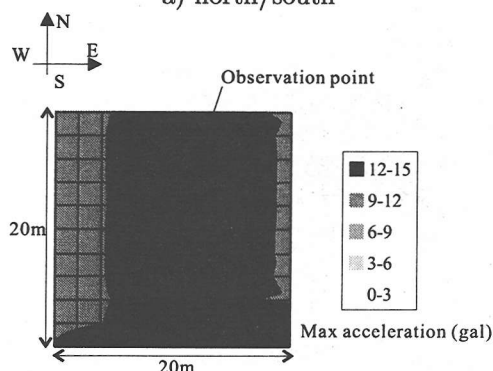


c) up/down

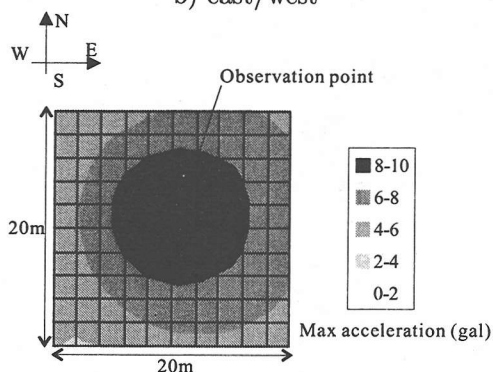
図-8 Optimistic の場合



a) north/south



b) east/west



c) up/down

図-9 Pessimistic の場合

う狭い範囲の中でも、地盤の複雑な構造により最大加速度分布に顕著な偏りが起こることを実際に数値計算により、定量的にあらわすことができた。

今回は簡単なモデル化を採用したため、計算波形と実際の波形の形が異なっていた。今後はより実際の地盤構造、断層モデルを取り入れられるように数値解析手法を改良していく予定である。また、本手法適用の妥当性をより検証するために、より多くの観測点でえられた実測データを再現することを予定している。

参考文献

- 1) Hesheng Bao, Jacobo Bielak, Omar Ghattas, Loukas F. Kallivokas, David R. O'Hallaron, Jonathan R. Shewchuk, and Jifeng Xu: Large-scale Simulation of Elastic Wave Propagation in Heterogeneous Media on Parallel Computers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 152(1-2), pp.85-102, 22 January 1998.
- 2) M. Hori: Bounds for Effective Material Properties of Statistically Non-homogeneous Solid, *Structural Eng./Earthquake Eng.* vol.11, No.3, pp.131-140, October 1994
- 3) M. Hori and S. Nemat-Nasser: On Two Micromechanics Theories for Determining Micro-Macro Relations (to be published).
- 4) 中川克也, 北原道弘, 浜田政則: 3次元弾性波動問題への積分方程式の応用, 境界要素法研究会 境界要素法論文集 第1巻, pp.163-168, 1984
- 5) Kikuchi and Ishida: Source Retrieval for Local Earthquakes with Broadband Records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp.330-346, 1993.
- 6) 鶴津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦: 有限要素法ハンドブック 2 応用編, 培風館, 1983.
- 7) Mary P. Anderson, William W. Woessner (藤縄克之訳): 地下水モデル 実践的シミュレーションの基礎, 共立出版, 1994.
- 8) 田中正隆, 田中喜久昭: 境界要素法—基礎と応用, 丸善株式会社, 1992.
- 9) 福井卓雄, 井上耕一: 高速多重境界要素法による2次元動弾性問題の解析, 応用力学論文集, vol.1, pp.373-380, 1998.
- 10) 渡辺修, 速水謙: 多重展開法による境界要素法の高速度化, *BEM・テクノロジー・コンファレンス論文集*, 4, pp.39-44, 1995
- 11) 福井卓雄, 服部純一, 土居野優: 高速多重境界法の境界要素解析への応用, 構造工学論文集, vol.43A, pp.373-382, 1997.
- 12) 市村 強: 広域強震動シミュレーターに関する基礎研究, 東京大学工学部学士論文, 1998.
- 13) 市村強, 堀宗朗: 都市強震動予測のためのマクロ・ミクロ解析, 応用力学論文集, vol.1, pp.607-612, 1998.