

都市地震シミュレーションにおける 3 次元地盤振動解析の V&V に向けて

理化学研究所・日本学術振興会特別研究員 PD

東京大学

東京大学

東京大学

東京大学

正会員 ○藤田 航平

正会員 市村 強

正会員 堀 宗朗

正会員 M. L. L. Wijerathne

正会員 田中 聖三

1. はじめに

工学的基盤より浅い地盤と構造物群からなる都市の地震シミュレーションは、震災対策の高度化に役立つと期待されている。都市の地震シミュレーションのうち、表層地盤の振動の問題は、対象領域の大きさ・対象周波数・非線形な地盤物性といった問題特性により、直接支配方程式を 3 次元で離散化して計算するには計算量が膨大になる。そのため、地盤振動の問題には計算量の削減できる 1 次元や 2 次元手法が頻繁に使われてきたが、近年の計算機と高性能計算技術の発展により直接 3 次元手法を使うことが可能となりつつある。例えば、文献[1]では、高性能計算手法を使ったプログラムを並列計算機上で実行することで、領域 1.9 km x 1.7 km の地盤振動を対象周波数 2.5Hz で解析している。このように、単一ケースの計算ができつつある一方、これらの解の信頼性を確認することが課題となっている。

シミュレーション結果の確からしさは、verification and validation (V&V)という概念に基づいて検証されるのが一般的である(例えば、[2]など参照)。通常の物理ベースの数値シミュレーションでは、実現象を物理モデルとしてモデル化し、物理モデルを離散化して数値計算することで数値解を求める。V&V では、「物理モデルが正確に解かれているか」を確認し(verification)、「解かれた解が実際の現象に一致しているか」を確認する(validation)、という二段階のプロセスを踏むことでシミュレーション結果の確からしさを検証する。文献[1]では、3 次元地盤振動解析の信頼性確認の試みとして、歪に関して verification を試みた後、計算波形と実測波形との比較により SI 値がある程度一致することを示しているが、その verification は十分ではなかった。そこで本研究では、数値解析手法の verification を通して地盤振動解析の信頼性を確認する。ここでは、分解能の異なる複数の数値モデルにより得られる地表面での加速度波形、及び、地表面での地震波形を構造物応答解析に入力して得られた構造物の応答変位波形の収束を確認する。これにより、地盤振動の支配方程式が正しく離散化・計算されていることを verify する。

2. 解析手法

地盤振動解析には、複雑な形状を持つ問題において応力や歪を精度よく求めるのに適した、2 次の四面体要素による有限要素法を使う。時間積分には Newmark- β 法を使い、減衰にはレイリー減衰を使う。また、地盤の非線形構成則には Ramberg-Osgood モデルと Masing 則を使う。大規模問題を現実的な時間内で実行するため、マルチグリッド法を使った可変前処理 CG 法や、MPI-OpenMP のハイブリッド並列計算を使ったプログラムを使う。地盤振動解析手法の詳細は文献[1]に記されている。構造物応答解析には、各階を質点とそれをつなぐバネとしてモデル化する多自由度モデルを使う。質点とバネの構造パラメータは GIS データに含まれる外形情報と建築基準法により推測する。構造物のモデル化と解析手法の詳細は文献[3]に記されている。

3. 数値検証用モデル

大きさ 1.25 km x 1.25 km、深さ約 100 m、物性の異なる 3 層の地盤構造からなる領域を対象とし、対象周波数 5, 10, 15 Hz の 3 種類の分解能の異なるモデルを作成する。第 1 層はせん断波速度 150 m/s の粘性土、

キーワード V&V, 地震シミュレーション, 地盤振動解析, 高性能計算

連絡先 〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26 理化学研究所計算科学研究機構 Email: kohei.fujita@riken.jp

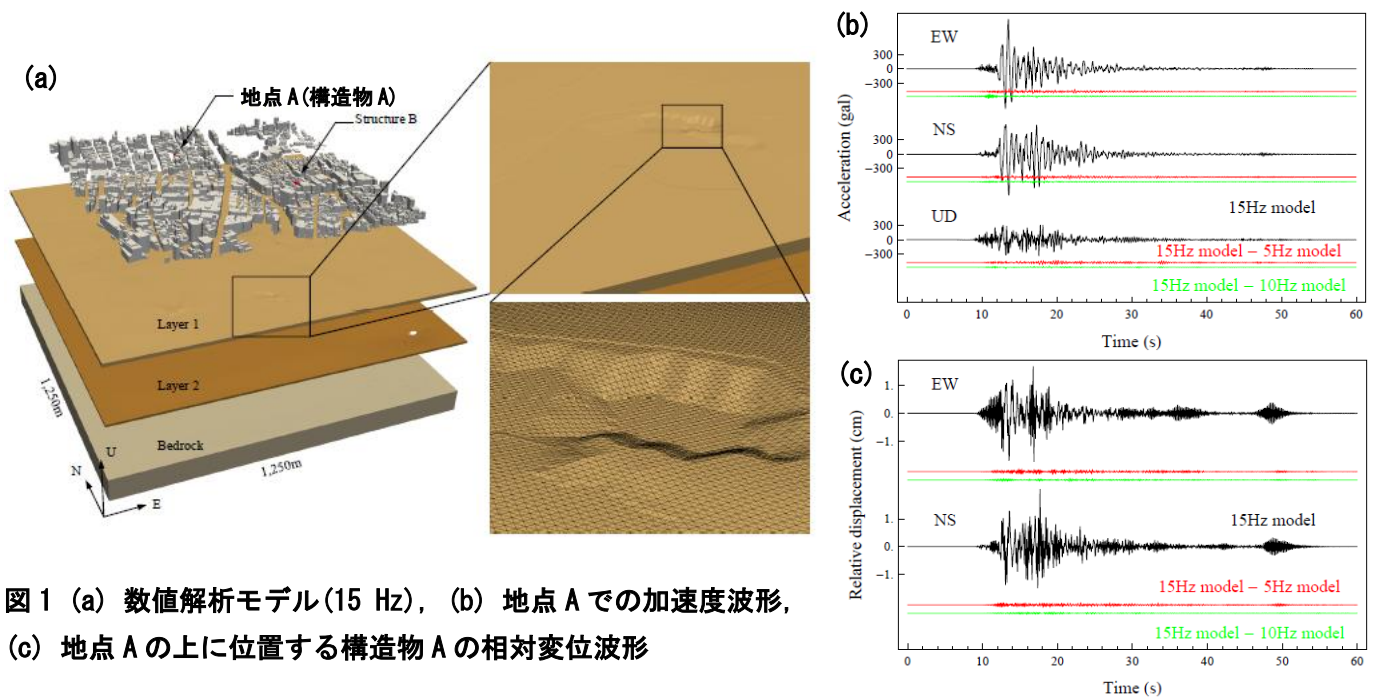


図 1 (a) 数値解析モデル(15 Hz), (b) 地点 A での加速度波形,
(c) 地点 A の上に位置する構造物 A の相対変位波形

第 2 層はせん断波速度 255 m/s の砂質土, 第 3 層は基盤層であり, 第 1 層のみ, 非線形層としてモデル化する. ここでは, 非線形層で一波長あたり 10 要素, 線形層で一波長あたり 5 要素となるように要素寸法を定めている. 図 1 (a) に 15 Hz モデルを示す. このモデルでは最小要素寸法が 1.0 m, 1,022,630,349 自由度の大規模モデルとなっている. 図から, 複雑な地形がモデル化されていることが分かる. 入力波形として, 1995 神戸波(JMA, 時間刻み 0.001 s, 60,000 ステップ)をモデル底面まで引き戻し, モデル底面から入力する. 15 Hz モデルの解析には京コンピュータ 8,192 ノードを使って 39,756 s (約 11 時間)かかった.

4. 地表面・構造物応答の収束結果

まず, 地表面にある地点 A での加速度波形の収束を確認する. 図 1 (b) がその結果である. 図から, 対象周波数を上げるに伴って解が収束していくことが分かる. また, 地点 A で得られた波形をこの真上に位置する構造物 A の応答解析に入力した結果を図 1 (c) に示す. 図から, 対象周波数を上げるに伴って構造物応答も収束していくことがわかる. また, 15 Hz において数値解が工学的に十分な程度まで収束していることがわかる.

5. おわりに

本研究では, 都市地震シミュレーションの 3 次元地盤振動解析の verification として分解能を変えた 3 つのモデルの応答を比較し, 地表面加速度と構造物応答変位の時系列波形が分解能を上げるに伴い収束することを確認した. 今後は, 構造物を含めた都市地震シミュレーションの V&V を進めるとともに, 3 次元地盤振動解析により得られた地表面応答や構造物応答と 1 次元地盤振動解析により得られた結果を比較することで地盤の 3 次元形状の効果を分析する計画である.

謝辞: 本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号 24・8183)の助成を受けたものです. また, 本研究では理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用しました(課題番号: hp120308).

参考文献

- [1] Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., Sakanoue, T., Hamanaka, R.: Three-dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology (ASME)*, in press.
- [2] An Overview of the PTC 60 / V&V 10, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, *ASME*, <http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/CommitteeFiles/24816.pdf>
- [3] Wijerathne, M. L. L., Hori, M., Kabeyasawa, T., Ichimura, T.: Strengthening of parallel computation performance of integrated earthquake simulation, *J. Comput. Civ. Eng. (ASCE)*, 2012.