

地震被害想定に向けた有限要素法と有限差分法による地震動解析の比較

海洋研究開発機構 正会員 ○縣 亮一郎
東京大学・理化学研究所 正会員 藤田 航平
東京大学・理化学研究所 正会員 市村 強
海洋研究開発機構 非会員 堀 高峰
愛知工業大学・内閣府(防災担当) 正会員 横田 崇

1. はじめに

将来の発生が懸念される海溝型巨大地震による長周期地震動の推定は、都市部の地震被害対策を進めていくうえで重要である。そのために、適切に設定された震源断層モデルに対し複雑な地盤構造における地震波動場を数値計算することが必要である。国の被害想定では従来、有限差分法による地震動解析手法が使われてきた[1]。一方、有限差分法は構造格子に基づいて計算を行うため、速度コントラストのある層境界面の形状を滑らかに再現できず、結果的に計算精度が悪くなる場合があることが指摘されている[2]。このような場合、有限要素法のような非構造メッシュに基づいた計算手法を用いることが望ましい。有限要素法導入の障壁となっていたのは、計算コストの大きさである。しかし、近年の計算科学分野における研究開発により、非構造メッシュ生成と地震動解析双方を 10^{10} - 10^{11} 自由度といった大規模問題において高速実行可能な計算アプリケーション E-wave FEM(例えば[3])が開発されている。そのため、国が行うような被害想定においても、有限差分法による地震動解析を E-wave FEM によるものに置き換え、幅広い問題設定に対する検討をより精度よく行えるようになることが期待されている[4]。

本研究では、堆積層と母岩の速度コントラストの大きい堆積盆地での地震動解析を、E-wave FEM と、国の被害想定に使用されるものと同等の有限差分法との双方で行い、結果を比較する。この検討を通じ、有限要素法を用いることで、有限差分法が苦手とする問題を精度よく解けることを確認することを目的とする。それに先立ち、1次元地震波速度構造における地震波動場解析解との比較による数値検証、1次元構造と3次元構造での計算波形の比較による地震動解析での3次元的效果の確認も行う。

2. 解析手法と解析モデル

本研究で用いる E-wave FEM は、複雑な3次元不均質構造において波動方程式を解くために開発された、四面体2次要素を用いた陰解法ベースの手法である。連立一次方程式の高速求解のため共役勾配法と幾何的マルチグリッド法を組み合わせた収束性能の高いソルバを導入している[3]。対象とする最大周波数について、1波長当たり最低5要素となるよう計算メッシュを生成する。比較する有限差分法は[1]に示されるものと同等の性能である。対象とする最大周波数について、1波長当たり最低10格子となる格子間隔で計算を行う。

堆積盆地を模した図1のような計算モデルを設定する。これは「Moon Basin 問題」と呼ばれる設定[5]であり、母岩にあたる硬質な地盤層からの地震動に対し、堆積層にあたる軟弱地盤において反射波と透過波の混在による複雑な波形が形成される。比較のための1次元地震波速度構造モデルは、図1と同じ物性値の2層構造であるが、堆積層を厚さ1kmの水平成層とする。1次元構造問題での

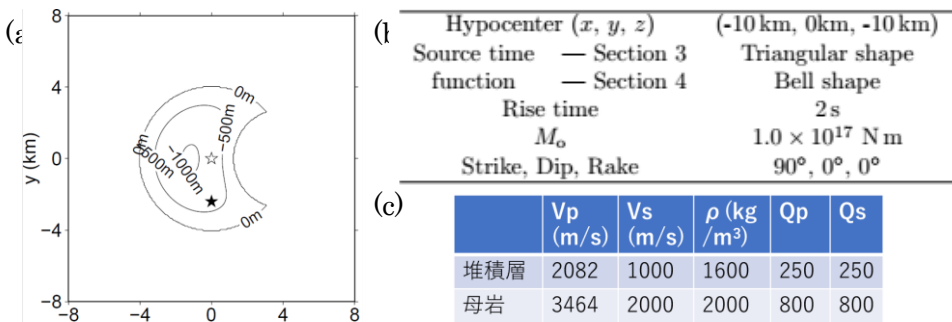


図1 堆積盆地を模した計算モデル設定。(a)堆積層と母岩の境界面形状。☆と★は観測点位置。(b)震源パラメータ。東向きがx方向。(c)各層の物性値。

り、母岩にあたる硬質な地盤層からの地震動に対し、堆積層にあたる軟弱地盤において反射波と透過波の混在による複雑な波形が形成される。比較のための1次元地震波速度構造モデルは、図1と同じ物性値の2層構造であるが、堆積層を厚さ1kmの水平成層とする。1次元構造問題での

図2 Moon Basin問題での図1☆における有限差分法(黒点線)、有限要素法(赤線)による速度波形の比較。

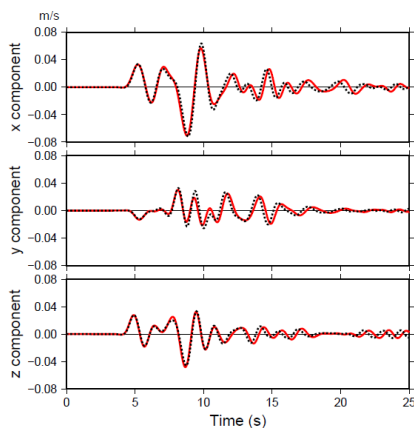
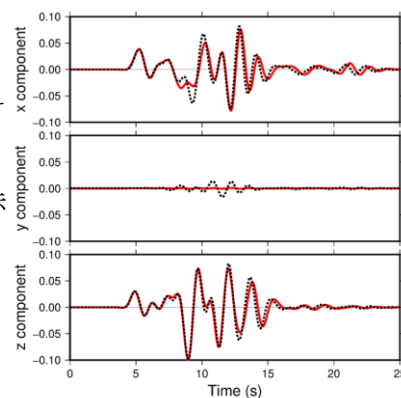


図3 Moon Basin問題での図1★における有限差分法(黒点線)、有限要素法(赤線)による速度波形の比較。



解析解の計算には[6]の手法を用いる。双方の問題とも 1Hz 以下を対象とした地震動解析を行う。

3. 有限要素解と有限差分法の比較

まず、1次元構造問題で有限要素法と解析解の波形を比べたところ、よく一致した。次に1次元構造問題と Moon Basin 問題での有限要素法の波形を比較すると、後者での3次元不均質構造導入の効果により振幅・継続時間ともに大きく異なった。1次元構造問題ではフーリエスペクトルのピーク周波数がどの成分も 0.2–0.4Hz 程度であった。一方 Moon Basin 問題では、ピークあるいはそれと同レベルの振幅が、一次元構造問題でのピーク周波数より 0.2–0.5Hz 程度大きい周波数において見られた(図は紙面の都合上割愛)。

4. 有限要素解と有限差分法の比較

Moon Basin 問題における E-wave FEM と有限差分法の計算波形を比較する。★など、盆地の内部でも両手法の波形が比較的良好に一致する地点が多い(図 2)。一方、盆地の中央部(☆)では、有限差分法において対称性により本来速度 0 となるべき y 成分の振幅が大きくなっており、x 成分でも振幅がかなり異なる部分がある(図 3)。このずれの原因は、有限差分法において図 1(a)の境界面を構造格子により表現していることだと推測される。E-wave FEM の解については計算メッシュを細かくしても数値解がほとんど変わらないことを確認しており、今後は差分法についても同様の確認を行った上で数値解のずれの要因を分析する。また堆積層の物性値を工学的基盤以浅に相当する低速度なものに置き換えて同様の検討を行うことも予定する。

5. おわりに

1次元構造問題における数値検証、3次元不均質構造の数値解への影響の確認の上で、Moon Basin 問題における E-wave FEM と有限差分法の計算波形を比較した。よく一致する地点が多い一方、差が大きくなる点も存在した。今後は数値解の収束性を確認した上で、異なる物性値を試すなどより詳細な検討を行う。

謝辞 有限差分法の計算では応用地質株式会社の協力を得ました。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 首都直下地震モデル検討会 三次元差分法を用いた長周期地震動の推計手法, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/jishinnankai20151217_07.pdf. (2020 年3 月24 日閲覧)
- [2] Hisada, Y., and S. Yamamoto. "One-, two-, and three-dimensional site effects in sediment-filled basins." Proceedings of the 11th world conference on earthquake engineering. 1996.
- [3] Ichimura, Tsuyoshi, et al. "Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation." SC'14. IEEE, 2014.
- [4] 内閣府: 相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動による被害予測の高度化, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2018/08/23/1407672_4.pdf. (2020 年3 月24 日閲覧)
- [5] Sanchez-Sesma, Francisco J., and Francisco Luzon. "Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves." Bulletin of the Seismological Society of America 85.1 (1995): 269-284.
- [6] Hisada, Yoshiaki. "An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths." Bulletin of the Seismological Society of America 84.5 (1994): 1456-1472.