

スペクトル要素法を用いた不整形地盤による表面波位相速度の方位依存性の検討
 Study on the Directional Dependence of Surface Wave Phase Velocity in 3D Subsurface Structure
 Based on Spectral Element Method

○CHOU YuTing・松島信一・長嶋史明
 ○YuTing CHOU, Shinichi MATSUSHIMA, Fumiaki NAGASHIMA

Subsurface velocity structure is crucial for earthquake engineering. Microtremor survey methods are the commonly used to estimate subsurface velocity structure, due to its convenience. However, microtremor survey methods generally assume a laterally homogeneous structure, i.e. 1D structure, for the analysis and the analytic result might be debatable in some cases where lateral heterogeneity may exist. In this study, we construct a 3D subsurface velocity model of an area in Uji City, Kyoto, Japan, where heterogeneous structure exists and detailed velocity structure has been investigated. We simulate the waveforms at the model surface caused by point sources distributed on the model surface using the spectral element method, and apply the microtremor survey methods to the waveforms to obtain surface wave phase velocities. Then, we compare the analytic results based on synthetic and observation. Finally, we discuss the effect of heterogeneous subsurface structure on phase velocity by comparing with the theoretical value under 1D assumption. (153 words).

1. はじめに

地盤速度構造は地震工学において重要である。地盤速度構造を求めるために、常時微動を用いた手法はその利便性が高いことからよく用いられている。しかし、常時微動を用いた手法は水平成層(一次元)の地盤構造を仮定することが多く、不整形地盤などの三次元地盤構造への適用性はまだ議論の余地がある。本研究は、詳細な地盤構造が調査され且つ不整形地盤が存在する京都府宇治市北部¹⁾をターゲットとして、三次元地盤構造の数値モデルを構築し、スペクトル要素法を用いて微動波動場をシミュレーションする。シミュレーションで得られた常時微動を解析して位相速度を求め、既往研究²⁾の観測結果や一次元における理論値と比較し、位相速度に対する不整形地盤による影響を調べる。

2. 三次元地盤構造モデルの構築

本研究では既往研究(反射法地震探査の解釈図、ボーリング、PS 検層など^{1),3),4),5)}) をもとに、不整形地盤構造を再現する三次元地盤構造の数値モデルを作成する。反射法地震探査解釈図¹⁾における海成粘土層 Ma3 以浅を一層目、Ma3 ないし本研究が定義した A 層を二層目、A 層ないし基盤岩を三層目、基盤岩以深を四層目とし、 $20 \times 20 \times 10 \text{ km}$ の

四層三次元数値モデルを作成した(図 1)。各層の物理値は VSP 探査⁵⁾による結果に基づいて決定した(表 1)。また、本研究は位相速度に対する不整形地盤構造の影響調査が目的のため、地形による影響を排除するため、地形情報を含めず地表面は水平とした。数値モデルのメッシュサイズは一から三層目を 100 m、四層目を 300 m とした。スペクトル要素法(EFISPEC3D⁶⁾)で用いるための数値モデルは各格子に五つの Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) ノードを有しており、一波長に五つ以上の GLL ノードが割り当てられると精度よく解析できることから⁶⁾、本数値モデル地表面上の観測点においては波長 100 m までの波を対象とする。

3. 波動シミュレーション及び解析

三次元地盤構造における波動伝播の計算には EFISPEC3D⁶⁾を用いる。スペクトル要素法を用いると任意の形を持つメッシュ構造における波動を計算でき、自由表面における波形を精度よく計算できることから、スペクトル要素法を選択する。本研究では異なる方向から到来した波の伝播速度の違いを調べることを目的とするため、既往研究²⁾のアレイの観測点配置を数値モデル上で再現し、アレイ中心(UJ01)から距離 8 km の円周上に 5 度ずつずらしながら計 72 個の振源を置き、振源ごとに

レイリー波位相速度を求める。観測点と振源との距離は、表面波が実体波より卓越するような距離としている⁷⁾。振源ごとに 25 秒の波形を計算し、周波数一波数法(FK 法)で解析して各振源における back azimuth 及びレイリー波位相速度を推定する。数値解析により推定したレイリー波位相速度および back azimuth と振源方位との関係を整理し、実観測における観測値との比較を行い、位相速度に対する三次元不整形地盤構造の影響についてまとめる。

謝辞

本研究において、スペクトル要素法の計算は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピューターを利用した。また、本研究の一部は東大地震研—京大防災研拠点間連携共同研究の支援を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 文部科学省研究開発局、京都大学防災研究所：奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測成 果報告書(令和元年度～令和 3 年度), https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nara_juten/, 2022. (令和 7 年 10 月 12 日参照)
- 周宇廷, 長嶋史明, 松島信一: 京都府宇治市五ヶ庄周辺で観測される當時微動水平上下スペクトル比や位相速度に見られる方位依存性と周辺の地盤速度構造との関係, 日本地震工学会論文集, 25(1), 1_175-1_185, 2025.
- 小泉尚嗣, 佃栄吉, 高橋誠, 横田裕, 岩田知孝, 入倉孝次郎, 上砂正一, 高木清, 長谷川昌志: 黄鱗断層の地下構造調査, 地震第 2 輯, Vol. 55, No. 2, pp. 153-166, 2002.
- 京都市:平成 14 年度地震関係基礎調査交付金「京都盆地の地下構造に関する調査」成果報告書, 2003.
- 白川智香子, 岩田知孝: 京大宇治構内に設置されたボアホール地震アレイ記録を用いた京都盆地南東部の地盤震動特性, 京都大学防災研究所年報 B, 50(B), 251-258, 2007.
- De Martin, F.: Verification of a spectral-element method code for the Southern California Earthquake Center LOH. 3 viscoelastic case, Bulletin of the Seismological Society of America, 101(6), 2855-2865, 2011.
- 時松孝次, 田村修次: 3 次元多層地盤における地表面鉛直点加振の応答変位に対するレイリー波と実体波の寄与, 日本建築学会構造系論文集, 60(476), 95-101, 1995.

表 1 四層モデルの物性値

Layer	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Density (kg/m ³)
一層目	1484.94	474.82	1924.37
二層目	2026.73	660.31	2079.99
三層目	2321.84	1450.00	2151.89
基盤岩	4987.00	2346.00	2605.08

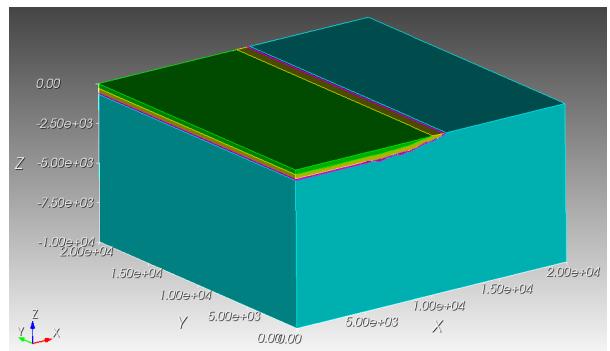


図 1 数値解析に用いた地盤構造モデル。緑部は表面から Ma3 層上部、黄色部は Ma3 層、紫は A 層、浅葱色は基盤岩