

# 表層地盤の多次元非線形性を考慮した基盤上昇波推定法

#野田利弘・山田正太郎(名大)・浅岡顕・澤田義博(地震予知振興会)

## Estimation method of upward transmitting wave in base considering multidimensional nonlinearities of surface subsoil

#T. Noda, S. Yamada (Nagoya Univ.), A. Asaoka, Y. Sawada (ADEP)

**はじめに** KiK-netの基盤内における観測記録は、大地震の震源モデルの推定に頻繁に用いられているが、表層地盤が非線形な応答を示した場合は、同観測記録もその影響にさらされる<sup>1)</sup>。また、地盤が水平に均質一様に堆積していることは稀で、地表も平らでないことが殆どであるため、多次元的な波動伝播(屈折・透過・反射)の影響も受ける。現状、このような影響を取り除くためには、はぎとり解析、重複反射理論ないしは等価線形解析など、一次元の線形理論に頼るほかない。そこで、本研究では、非線形な地盤解析コードを使用し、表層地盤の材料的非線形性と多次元的な波動伝播の影響を加味して、基盤内の観測記録から震源から伝わる上昇波を推定することを試みる。これを成し遂げるために、粘性境界条件の新しい利用法を提案し、さらに提案手法の実現可能性について検証する。

**提案手法の概要** 提案手法では、粘性境界条件<sup>2)</sup>を利用する。同境界条件は、有限要素法に適用した場合、式(1)のように表すことができる。

$$\{f_{vc}\} = [K_{vc}] (2\{v_B\} - \{v\}) \quad (1)$$

ここに、 $\{v_B\}$ は解析領域への入射波(「基盤内の上昇波」)、 $\{v\}$ は境界における実際の運動(速度)を表し、これらは境界の外側に仮定する一様な弾性体の密度 $\rho$ や弾性波速度 $v_s$ 、 $v_p$ からなるマトリクス $[K_{vc}]$ を介して節点力 $\{f_{vc}\}$ に変換される。

式(2)は境界条件を含む有限要素離散化された全体運動方程式を表す。

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (2)$$

式(1)は式(2)の右辺の対応する節点に代入する。通常、 $\{v_B\}$ は入力条件として与えられるため、右辺に残すが、 $\{v\}$ は未知であるため、左辺に移項し、解の一部として求められる。これに対し、提案する手法では、上昇波が基盤内を一様に伝播すると仮定し、 $\{v_B\}$ は共通な未知数として、式(2)の左辺に移項して処理する。代わりに、 $\{v\}$ のうち、観測点における運動は入力条件とし、式(2)の右辺に残し、その他については、左辺に移項して処理する。すなわち、提案手法では、高々一点の地震観測記録を地震応答解析の外力に関する入力条件として問題を解き、基盤内の上昇波(解析領域への入射波)を、解析対象の運動と同時に求める。

**推定手法の検証** 提案手法が実際に成立するか、地表での複雑な反射が生じるように、図1の盛土を有するモデル地盤を対象に検証を行った。平面ひずみ条件下で、底面の水平方向には粘性境界条件を課している。検証方法は次の通りである。まず、Step 1として、一般的な粘性境界条件の利用法を適用し、模擬地震動を入力して問題を解く。底面にある一点を観測点と見立てて、Step 1の解からその点の運動を取り出した上で、Step 2として、提案する粘性境界条件の利用法を適用し、観測点における運動を入力条件として、同じ問題を解く。Step 2では入射波が解の一部として求まるが、これがStep 1で入力した波と一致するか確かめる。

上記の検証には、水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>3)</sup>を用いた。updated Lagrangeanと速度型弾塑性構成式を採用しているため、式(2)よりも時間に関して一階高次の運動方程式を用いているが、提案手法を適用することができる。

図2はStep 1の入力に用いた波形とStep 2で得られた入射波を示す。両者が一致していることが分かる。図3はStep 1における加振終了時のせん断ひずみ分布を示す(Step 2でも同様な結果が得られる)。明らか表層地盤に塑性変形が生じており、非線形な問題を対象にしたことが確認できる。

**おわりに** 地盤を対象とした非線形有限要素解析コードを用い、地中の観測記録から、表層地盤の非線形挙動と多次元波動伝播(屈折・透過・反射)の影響を考慮して、基盤内の上昇波を推定するために、粘性境界条件の新しい利用法について提案し、このことが実現可能であることを実証した。この方法により妥当な推定値を得るためには、解析コードの性能や地盤モデルが妥当であることが肝要である。これらの検証法については、口頭発表において議論する。

**参考文献** 1) 若井淳, 野津厚 (2014): KiK-net地中観測点の記録に盛られる表層地盤の非線形挙動の影響, 地震, 2-67(3), pp.99-104. 2) Lysmer, J. and R., L., Kuhlemeyer (1969): Finite dynamic model for infinite media, ASCE, EM4, 859-877. 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, Soils and Foundations, 45(6), 771-790.

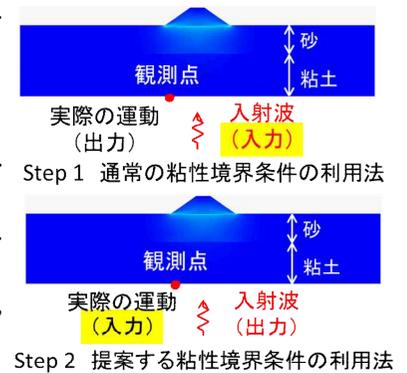


図1 推定手法の検証方法

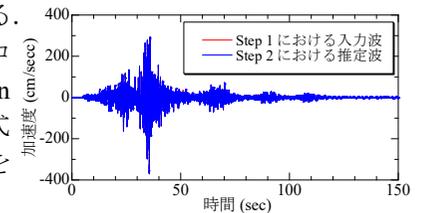


図2 推定手法の検証結果

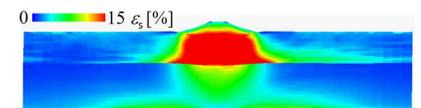


図3 加振終了時のせん断ひずみ分布