

粘性境界条件を適用した水～土連成弾塑性有限変形解析による基盤入射波の推定法の提案 Proposal of an estimation method for an incident wave to a bedrock by using a soil-water coupled elasto-plastic finite deformation analysis with viscous boundary

山田正太郎 (名大・工) 野田利弘 (名大・減災連携研究センター)
浅岡 颯 (地震予知総合研究振興会)
Shotaro YAMADA, Nagoya University Toshihiro NODA, Nagoya University
Akira ASAOKA, Association for the Development of Earthquake Prediction
FAX: 052-789-4624, E-mail: s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp

Records observed in bedrocks have been used to extrapolate seismic origin model. However, if non-linear response occurred in the surface ground, the influence of it on the records would not be negligible. In addition, multi-dimensional wave propagation can occur because most deposited grounds are neither horizontal nor even. Therefore, this study proposed a new estimation method for the incident wave to base rock from an observational record while taking into account non-linearity response of surface ground such as liquefaction phenomena and multi-dimensional wave propagation by using a soil-water coupled elasto-plastic finite deformation analysis code. In other words, through this achievement, a new utilization of the viscous boundary condition (VBC) will be proposed. In addition, the feasibility of the proposed method will be examined.

1. 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、同観記録もその影響にさらされる。また、地盤が水平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。それにもかかわらず、現状では、表層地盤の応答の影響を取り除くためには、はざとり解析、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、非線形問題を取り扱うことが可能な地盤解析コードを使用し、表層地盤の非線形挙動と多次元波動伝播の影響を加味して、基盤内の観測記録から震源より伝わる上昇波を推定する手法の構築を試みる。これを成し遂げるために、粘性境界条件¹⁾の新しい利用法を提案するとともに、提案手法を適用した解析コードが正しく機能し得るか検証する。

2. 提案手法の概要

粘性境界条件²⁾の新しい利用法を提案する。粘性境界条件は、有限要素法に適用した場合、式(1)のように表し得る。

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

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 ρ 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(1)は式(2)の右辺の対応する節点に代入して使用する。

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

通常、 $\{v_B\}$ は入力条件として与えるため、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る。これに対し、提案手法では、上昇波が基盤内を鉛直方向に一様に伝播すると仮定し(この仮定を適用可能な層を工学的基盤とする)、 $\{v_B\}$ 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を入力条件とし、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、基盤内の上昇波を解析対象の運動と同時に求める。

3. 提案手法および同手法を適用した解析コードの検証

通常、我々がよく行う地震応答解析では、実現象と同じく、震源から伝播してくる地震動が入力(原因)となり、解析対象の振動が出力(結果、観測)となる。これに対し、観測値から基盤内の上昇波を推定する問題は、結果や観測から原因を探る一種の逆問題と見做すことができる。これらの関係を念頭に、Fig. 1に示すような手法で、提案手法を適用した解析コードが正しく機能し得るか検証する。まず、Step 1として、粘性境界条件の一般的な利用法を適用して、地震応答解析を実施する。ここでは、この解析を順問題と呼ぶ。次に、Step 2として、この順問題における底面の一点の運動を観測値と見做し、これを粘性境界条件の新しい利用法の入力値として解析を行う。ここでは、これを逆問題と呼ぶ。実際の基盤での観測値を用いて、後者の計算を行う場合、本当の入射波を計算によって完璧に求めることはできない。その最大の理由は、もちろん推定に用いるモデル地盤が実際の地盤と厳密に一致することはないためである。しかし、ここで後者の入力に用いるのは、設定した順問題の解の一部である。つまり、推定に用いるモデル地盤とその入力として用いる運動を生んだ地盤は完全に一致している。したがって、提案する手法が原理的に成立し、解析理論におかしな点がなく、さらに解析コードが正しく組まれているならば、逆問題より得られる推定入射波は順問題の入力地震動に完全に一致するはずである。以下ではこのような発想のもと検証を行う。

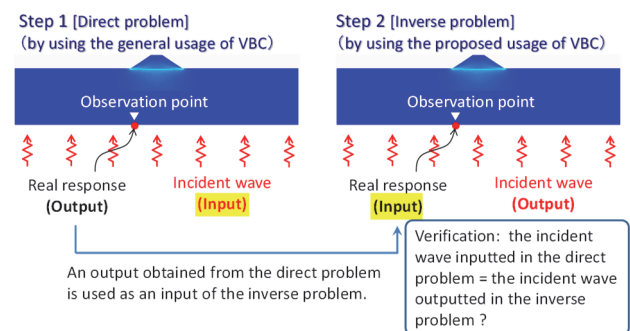


Fig. 1 Schematic diagram of verification method

3-1 解析条件

水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**²⁾に提案手法を適用した。updated Lagrangean と速度型構成式を採用して

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、同様な手続きで提案手法を適用することができる。また、構成式には SYS Cam-clay model と非関連 Drucker-Prager model が同時に負荷状態を示し得る複合負荷弾塑性構成式³⁾を用いた。この構成式は液状化時のサイクリックモビリティなど、繰返し時の土の複雑な弾塑性挙動を表現可能である。

Fig. 2 に解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。液状化を生じうる砂層と多次元的な反射を生じさせる盛土を有するモデル地盤を設定した。平面ひずみ条件を適用し、解析領域の下端以深には工学的基盤が広がっていると仮定して、底面の水平方向には粘性境界条件を課した。順問題では、Fig. 3 に示す波を入力地震波として用いた。また、逆問題では、順問題の(A-1)点における加速度応答を入力した。

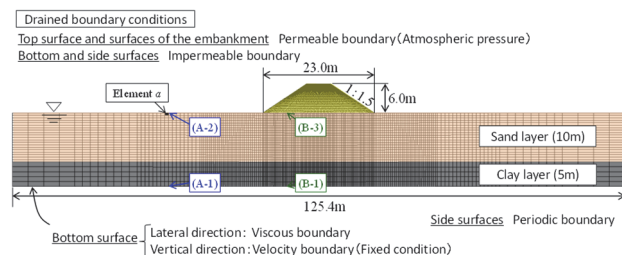


Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions

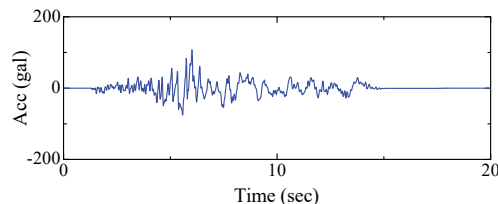


Fig. 3 Input seismic wave

3-2 順問題

まずは、順問題の解析結果を示す。Fig. 4 にせん断ひずみ分布を示す。5 秒付近で盛土直下に円弧上のひずみの局所化が発生し、その後、砂層全体でひずみが発生している。Fig. 5 に(A-2)点における水平加速度応答を示す。入力には 15 秒程度まで継続しているが (Fig. 3)、液状化の影響により、8 秒付近から地表面はほとんど振動していない。また、サイクリックモビリティに起因するスパイク状の応答も見られる。Fig. 6 に(A-1)点と(B-1)点の水平加速度応答を示す。式(1)が示す通り、粘性境界条件を用いているため、入力地震動と底面の応答はもちろん一致しない。また、地震動は底面に一様に入力しているが、盛土の存在に起因する多次元波動伝播の影響により、底面の運動は(A-1)点と(B-1)点で異なっている。以上で見た通り、確かに、対象としている問題は、顕著な非線形応答を示すと同時に、多次元波動伝播の影響を受けている。

3-3 逆問題

次に、逆問題と順問題の解析結果を比較する。Fig. 7 に順問題の入力地震動と逆問題から得られた推定入射波を示す。両者が一致していることを確認できる。これより、非線形挙動や多次元波動伝播の影響を受ける問題においても提案手法を適用した解析コードは正しく機能すると言える。

4. 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活用して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

の影響を考慮して基盤内の上昇波を推定することを目的に、粘性境界条件の新しい利用法を提案した。また、提案手法を適用した解析コードが正しく機能し得ることを実証した。

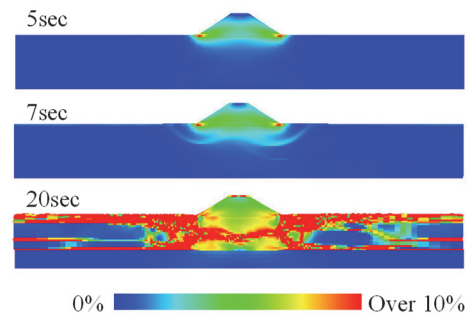


Fig. 4 Shear strain distributions

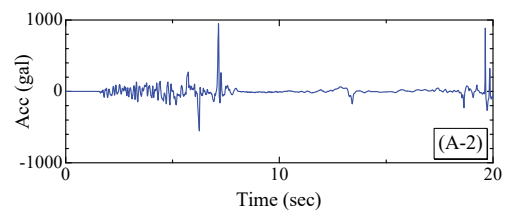


Fig. 5 Horizontal acceleration response on the top surface

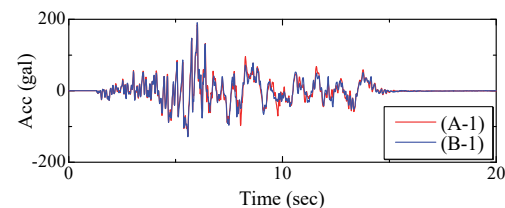


Fig. 6 Horizontal acceleration response on the bottom surface

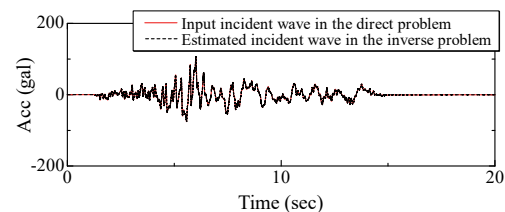


Fig. 7 Comparison of incident wave and estimated wave

謝辞

本研究は科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究：課題番号 16K14303、基盤研究(A)：課題番号 25249064）の補助を受けて実施した。

参考文献

- 1) J. Lysmer and R. L. Kuhleemeyer: Finite dynamic model for infinite media, ASCE, EM4, 859-877, 1969.
- 2) T. Noda, A. Asaoka and M. Nakano: 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, 2008.
- 3) S. Yamada and T. Noda: Proposal of a new double hardening elasto-plastic constitutive model of soil skeleton based on integration of associated and non-associated flow rules, Proc. of 15th ARC, JPN-128, 2013.