

表層地盤の非線形性および多次元波動伝播の影響を考慮した基盤入射波の推定法の提案

地震波, 材料非線形, 多次元波動伝播

名古屋大学 国際会員 ○山田正太郎 野田 利弘
 地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 颯 澤田 義博
 名古屋大学 非会員 永田 優

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, 同観測記録もその影響にさらされる¹⁾。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 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(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して使用する。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られる。これに対し, 提案手法では, 上昇波が基盤内を一樣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というのは, 結果や観測から原因を探る一種の逆問題である。これらの関係を念頭に, 図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

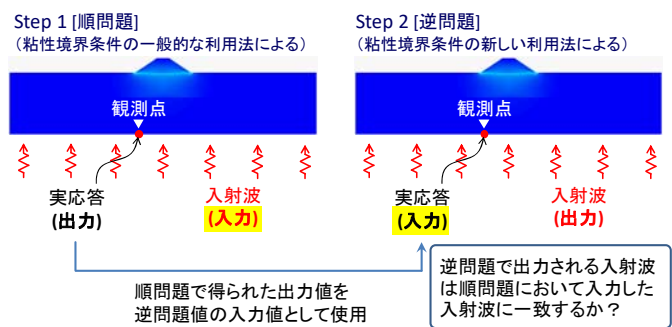


図1 検証方法の概念図

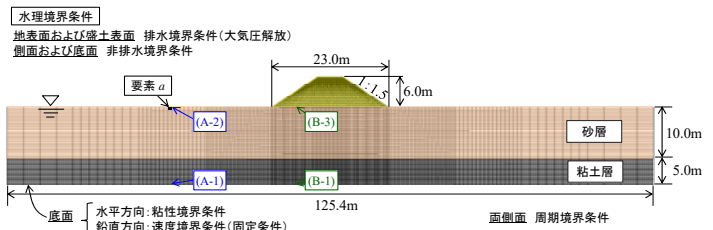


図2 有限要素メッシュと境界条件

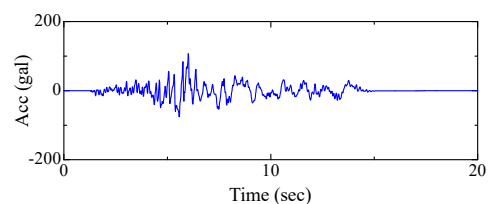


図3 入力地震動

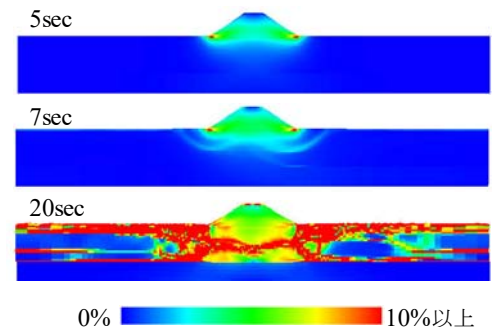


図4 せん断ひずみ分布

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。

3-1 解析条件 水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*³⁾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⁴⁾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。

図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、図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。

3-2 順問題 まずは、順問題の解析結果を示す。図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。図5に(A-2)点における水平加速度応答を示す。入力は15秒程度まで継続しているが(図3)、液状化の影響により、8秒付近から地表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。図6に要素 *a* の挙動を示す。確かにサイクリックモビリティを描いている。図7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ともに、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。図8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することができる。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。さらに、(B-2)点における順問題と逆問題における地中の運動を比較する(図9)。両者はやはり一致している。(B-2)点の運動を例に挙げたが、もちろんこの点に限らず、全ての点の運動が一致する。当然の結果ではあるが、このことは、提案手法を実際の問題に適用したときに、モデル地盤が実際の地盤と同様な現象を生じてはじめて妥当な推定が可能になることを示している(したがって、実際の問題において、KiK-netのように地中と地表に観測点があるような場所では、地中の観測値を入力として計算した結果、地表の応答と観測値が近い値を示していることを確認することが、妥当な推定入射波を得ることができているか確認する上で重要である)。なお、ここでは、順問題における(A-1)点の運動を逆問題の入力値に選んだが、本問題では底面のどの点の運動を用いても同じ結果が得られる。

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。

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) 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., Kuhleemeyer (1969): Finite dynamic model for infinite media, ASCE, EM4, 859-877. 3) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, S&F, 45(6), 771-790. 4) Yamada et al. (2013): 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.

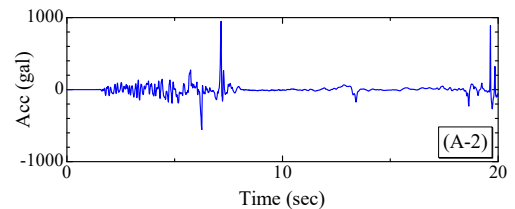


図5 地表面の水平加速度応答

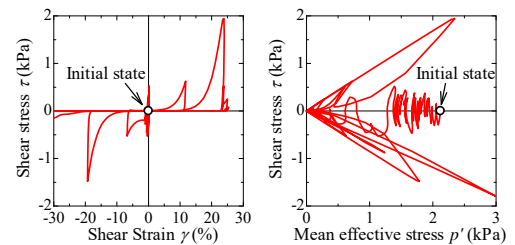


図6 要素 *a* の挙動

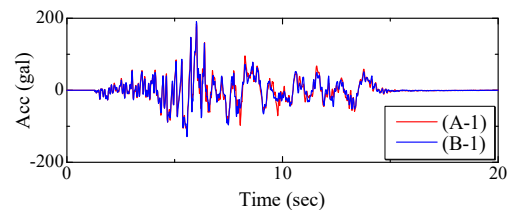


図7 解析領域底面の水平加速度応答

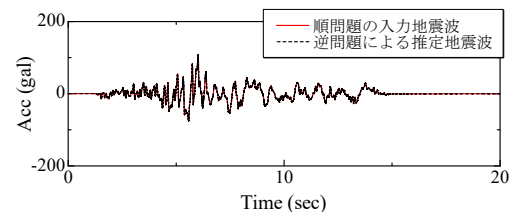


図8 入力地震動とその推定値の比較

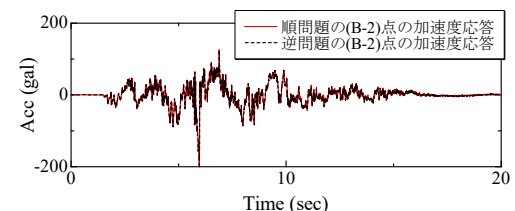


図9 順問題と逆問題における地中の運動の比較