

平成 30 年 9 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14303

研究課題名(和文) 表層地盤の非線形挙動の影響を受けた観測基盤波から直達波を抽出する手法の提案

研究課題名(英文) A proposal of estimation method of incident wave to base rock considering effect of multidimensional wave propagation and nonlinearity of surface ground

研究代表者

山田 正太郎 (YAMADA, Shotaro)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70346815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：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行った。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た。また、提案手法を適用した解析コードが正しく機能することを実証した。

2008年岩手・宮城内陸地震における、荒砥沢ダムでの特徴的な強震記録を取り上げた。提案手法を用いた数値計算によって同観測記録の特徴を再現すること、基盤上昇波を推定することに成功した。本研究で示された研究成果は今後の耐震設計の入力地震動決定に一石を投じる結果となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, new utilization of the viscous boundary condition that enables to estimate an upward wave in bedrock from an observational record in consideration of non-linearity and the influence of multi-dimensional wave propagation (refraction, transmission, reflection) by using a non-linear finite element code for soil was proposed. We verified that the proposed method behaves properly under a condition in which liquefaction phenomena and multi-dimensional wave propagation occurred.

In order to adopt to real problems, the observed record at the rock base of the Aratozawa dam bottom in the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake was picked up. We successfully reproduced the properties of the above-mentioned records and estimated the upward transmitting wave at the bedrock on the same point and estimated the upward transmitting wave in the bed-rock by using the proposed method. The results obtained in this study must raise a question about the future design of structures.

研究分野：地盤工学

キーワード：地震波 非線形 多次元波動伝播 弾塑性解析 水～土連成解析 粘性境界条件

1. 研究開始当初の背景

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、一次元の線形理論に頼るほかない。

全国に地震観測網が張り巡らされ、そして観測機器の性能が向上したことにより、かつては観測されることがなかった強振動波形が記録されるようになった。これらの強震観測記録が元となり、耐震設計に用いられる入力地震動は増大の一途を辿り、構造物の構築を困難なものにしつつある。

以上で示した通り、表層地盤の非線形性と多次元波動伝播の影響を考慮した基盤入射波の推定手法が望まれる状況が生じていた。

2. 研究の目的

上記の背景を鑑み、本研究では下記の目的を設定した。

- ・動的問題に対応可能な空気～水～土骨格連成弾塑性有限変形解析を用いて、基盤における観測波から表層地盤の非線形性および多次元性を考慮して震源から伝播してくる直達波を抽出する手法を確立する。
- ・提案手法の妥当性を検証する。
- ・既往の理論では特異と見做される地震観測記録を取り上げ、基盤上昇波を推定する。

3. 研究の方法

以下の方法に従って研究を推進した。

(1) 定式化および解析コードへの実装

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を構築するために、粘性境界条件の新しい利用法を提案した。非線形問題を取り扱うことが可能な地盤解析コード GEOASIA に同手法を実装した。

(2) 解析手法の Verification

粘性土層と砂質土層からなる多層系地盤の上に盛土を有する構造物-地盤系を対象に、提案手法が実現可能であること、ならびに、解析コードが正しく組み立てられていることを実証した。

(3) 地震観測記録を用いた Validation

提案手法を実際問題に適用するために、特徴的な観測記録を取り上げ、その挙動の再現を試みるとともに、基盤上昇波の推定を行った。

4. 研究成果

以下に、研究成果の概要について示す。

(1) 提案手法の概要

粘性境界条件の新しい利用法を提案した。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や弾性波速度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。

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

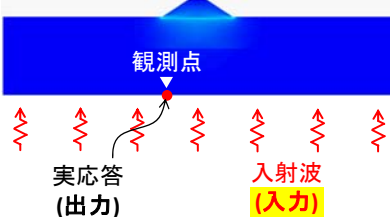
式(1)は式(2)の右辺の対応する節点に代入して使用する。通常、 $\{v_B\}$ は入力条件として与えるため、右辺に残すが、 $\{v\}$ は未知であるため、左辺に移項し、解の一部として求められる。これに対し、提案手法では、上昇波が基盤内を一様に伝播すると仮定し(この仮定を適用可能な層を工学的基盤とする)、 $\{v_B\}$ は共通な未知数として、式(2)の左辺に移項して処理する。代わりに、 $\{v\}$ のうち、観測点における運動を入力条件とし、式(2)の右辺に残し、その他については、左辺に移項して処理する。すなわち、提案手法では、高々一点の地震観測記録を地震応答解析の外力に関する入力条件として問題を解くことで、基盤内の上昇波を解析対象の運動と同時に求めることができる。

本研究では、上記手法を水～土連成有限変形解析コード GEOASIA に実装して提案手法の検証と実問題への適用を行った。

(2) 提案手法の検証

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した。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した(順問題)。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った(逆問題)。検証の結果、図2に示す通り、逆問題より得られる推定入射波が順問題の入力地震動に完全に一致することを確かめることができた。

Step 1 [順問題]
(粘性境界条件の一般的な利用法による)



Step 2 [逆問題]
(粘性境界条件の新しい利用法による)

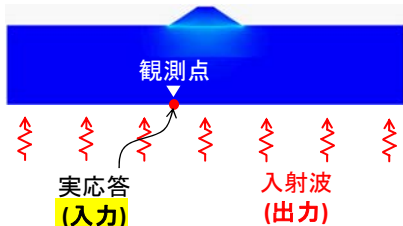


図1 検証手法の概要

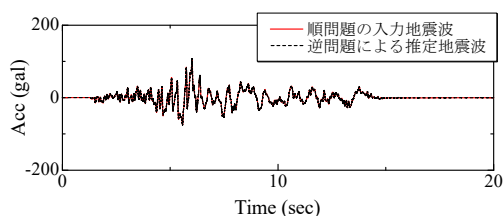


図2 順問題の入力地震波と
逆問題による推定地震波

(3) 提案手法の実問題への適用

2008年岩手・宮城内陸地震において、荒砥沢ダムでは特徴的な強震動が記録されている。特徴的な点として、ダム底部の岩盤上において、最大加速度が1024Galを記録している点が挙げられる。ダム基礎における国内の地震観測記録で1000Galを超える記録は現時点において他にない。ダム底部でこのような記録的な加速度が観測された一方で、監査廊の上部に位置するコア中央部とさらに上方の天端部において観測された最大加速度は、それぞれ535Galと525Galとなっている。基盤に対する応答倍率が大きく1を下回るという点も他に例を見ない特徴である。提案手法を実装した数値解析コードGEOASIAを用いてこれらの特徴を再現するとともに、基盤上昇波の推定を行った。

解析の結果、実観測記録と同様に、ダム基礎における応答よりもコア中央や天端における応答の方が小さくなる特徴を再現することができた。観測点近傍の要素挙動から、履歴減衰が基盤に対する応答倍率を低下させたことが分かった。

図3に、解析によって推定された基盤上昇波と基盤上における観測記録を示す。推定さ

れた基盤上昇波は観測記録の約半分程度となった。このように入射波に比べて、基盤での応答が倍近くまで大きくなるのは、繰返し負荷によって堤体下部で特に顕著に剛性が劣化し、観測点近傍で全反射的な現象が生じるためであると考えられる。

東日本大震災以降、強震観測記録が得られる度に地震応答解析に求められる入射波は増大し続け、構造物の設計を困難にしている。したがって、強震観測記録において、基盤上昇波が観測記録の半分程度であったことが持つ意味は大きい。本研究で示された研究成果は今後の耐震設計における入力地震動の設定に一石を投じる結果となるものと考えられる。

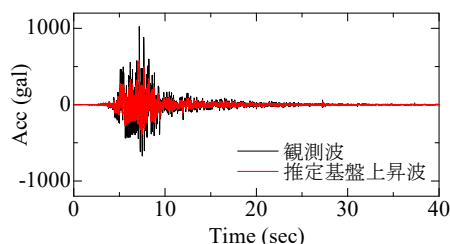


図3 推定基盤上昇波と観測波

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

1. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕 (2017): 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, 第64回理論応用力学講演会, OS3-01-05.
2. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博, 永田優 (2017): 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, 第52回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1589-1590.
3. 山田正太郎 (2017): 水～土連成弾塑性有限変形解析による表層地盤の非線形性と多次元波動伝播の影響を考慮した基盤入射波の推定, 長岡平野西縁断層帯の地震活動性に関する調査研究 (招待講演).

4. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕
(2016): 液状化砂地盤のスパイク状加
速度応答の数値解析, 日本地震学会
2016 年度秋季大会概要集, S15-21.
5. 山田正太郎, 野田利弘, 高稲敏浩, 浅
岡顕 (2016): 複合負荷弾塑性構成式
を搭載した水～土骨格有限変形解析コ
ードによる土構造物-地盤系の地震応
答解析, 第 51 回地盤工学研究発表会
講演概要集, pp. 1673-1674.
6. 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡顕, 澤田
義博 (2016): 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, 日
本地震学会 2016 年度秋季大会概要集,
S15-20.
7. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕
(2016): 表層地盤の力学的非線形性お
よび複雑な幾何学的形状を考慮した工
学的基盤への入射波の推定法の提案,
日本地球惑星科学連合 2016 年大会概
要集, S-SS25-21.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田正太郎 (YAMADA, Shotaro)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70346815

(2) 研究分担者

浅岡顕 (ASAOKA, Akira)
公益財団法人地震予知総合研究振興会・そ
の他部署等・副主席主任研究員
研究者番号: 50093175

野田利弘 (NODA, Toshihiro)
名古屋大学・減災連携研究センター・教授
研究者番号: 80262872