地震観測と微動計測に基づく道路盛土の震動特性の類似性評価とその応用

秦吉弥¹⁾, 江川拓也²⁾, 佐藤京³⁾, 池田隆明⁴⁾

1) 正会員 大阪大学 大学院工学研究科, 准教授 博(工)

e-mail : hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2) (国研)土木研究所 寒地土木研究所, 研究員

e-mail : egawa@ceri.go.jp

3) (国研)土木研究所 寒地土木研究所, 研究員

e-mail : taka4@ceri.go.jp

4) 正会員 長岡技術科学大学 大学院工学研究科, 教授 博(工)

e-mail : ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

要 約

道路等の盛土の合理的な耐震検討には, 盛土の震動特性を正確に評価しておく必要がある. 本研究では, 苫小牧市内の高速道路盛土を対象に, 天端中央とその直下の地中で地震観測, 法尻と法肩で微動計測を各々実施し, 得られた記録に基づき伝達関数を評価した. その結果, 両者の伝達関数の類似性を確認でき, 動的FEM解析や既存の固有周波数算定式を併用することで盛土内の平均的なせん断波速度構造を把握できる可能性を示した.

キーワード: 地震観測, 微動計測, 盛土, 伝達関数, 二次元FEM解析

1. はじめに

近年, 大規模地震による盛土の深刻な被災¹⁾が相次いで発生している. 盛土の耐震検討を合理的に実施するためには, 当該盛土の震動特性を正確に把握しておく必要があり, これまで数値解析に基づいた検討^{2),3)}は数多く実施されているものの, 現地観測・計測^{3),4),5)}に基づいた検討は数少ない. 秦ほか⁵⁾は, 和歌山県田辺市の道路盛土において, 法肩と法尻で臨時地震観測および常時微動計測を実施し, 地震観測と微動計測に基づく伝達関数(法肩/法尻)が比較的類似していることを報告している. 池田ほか³⁾および西本ほか⁴⁾は, 北海道苫小牧市の高速道路盛土を対象に(以後, 対象盛土と呼ぶ; 写真1, 図1, 図2参照), 天端中央とその直下の地中において地震観測を継続的に実施し, 観測記録に基づいた伝達関数(天端/地中)を明示するとともに, 動的FEM解析(図3参照)を用いて観測地震動を再現することに成功している.

上述した背景を盛土内でのせん断波速度の評価に関する観点から以下のとおり要約する. まず, 盛土内の平均的なせん断波速度は, 地震時の挙動を把握する上で重要なパラメータの一つであり, 対象とする盛土において観測された地震動に基づいて評価するのが最適であるといえる. しかしながら, 一般実務の分野などでは, 不透明な観測期間(地震計機器を設置し, 評価に用い得る地震が発生するまでの時間および十分なデータを得るまでの期間)などを考慮すると盛土での地震観測の実施が適当であるとは言い難い. 一方で, 著者らは先行研究⁵⁾として, 地震動と微動に基づく盛土の伝達関数の類似性を指摘しており, 常時微動計測により盛土内の平均的なせん断波速度を容易に評価できる可能性が期待されている. すなわち, 地震観測に基づく盛土の伝達関数(地震応答特性の正解値)が既知であるサイトにおいて常時微動計測を追加実施し, 動的FEM解析などの数値解析を組合せることで, 伝達関数の卓越周波数から概算可能なせん断速度と再現解析に使用したせん断波速度を比較し, 両者の違いについて考察を

行うことは、盛土内の平均的なせん断波速度の評価方法の確立を目指す上で有意義であるといえる。

そこで本稿では、対象盛土の法肩と法尻で常時微動計測を実施し、地震観測と微動計測に基づく伝達関数について比較検討を行うだけでなく、地震および微動をそれぞれ模擬したFEM解析を実施することで、各々の伝達関数に関する類似性を踏まえて得られた知見に関しても言及した。

2. 伝達関数の評価

2.1 地震観測

西本ほか⁴⁾は、対象盛土の天端中央と地中(図2参照)等で地震観測を実施し、下記EQ-01～08によって得られた記録に基づき震動特性について検討を行っている。本研究では、地震観測を更に継続的に実施し、下記EQ-09～11によって天端中央と地中で同時に観測された地震動を含めた追加の検討を実施した。

- ・EQ-01：1997/02/20 浦河沖 $M_j5.9$
- ・EQ-02：1999/05/13 釧路支庁中南部 $M_j6.3$
- ・EQ-03：2001/08/14 青森県東方沖 $M_j6.4$
- ・EQ-04：2003/09/26 04:50 十勝沖(2003年十勝沖地震) $M_j8.0$
- ・EQ-05：2003/09/26 06:08 十勝沖(最大余震) $M_j7.1$
- ・EQ-06：2004/06/11 十勝支庁南部 $M_j5.2$
- ・EQ-07：2004/11/29 釧路沖 $M_j7.1$
- ・EQ-08：2004/12/06 釧路沖 $M_j6.9$
- ・EQ-09：2007/02/17 十勝沖 $M_j6.2$
- ・EQ-10：2007/04/19 胆振支庁中東部 $M_j5.6$
- ・EQ-11：2007/06/23 日高支庁西部 $M_j4.9$

図4は、地震観測に基づく対象盛土の伝達関数(天端中央/地中)である。伝達関数は、EQ-01～11によって地中と天端中央で同時に観測された地震動のフーリエ振幅スペクトル(0.05HzのParzen Windowを考慮)を各々算定し、天端中央と地中の比率を観測地震ごとに計算し、EQ-01～11による平均で評価した。対象盛土でこれまでに得られた観測地震動(EQ-01～11)の中で最大の記録は、2003年十勝沖地震(EQ-04)である。図4に示すように、EQ-01～11とEQ-04による伝達関数の比較では、5～7Hzの周波数帯域においてEQ-04の伝達関数の振幅が若干低下しているものの、周波数帯域全体のスペクトル形状やピーク周波数は比較的類似している。そこで、EQ-04も分析対象に加えた。なお、EQ-01～08による既往の伝達関

写真1 対象盛土現況と、常時微動計測状況の一例

図1 対象盛土での地震観測・微動計測(平面図⁴⁾)

図2 対象盛土での地震観測・微動計測(断面図⁴⁾)

写真2 左側・右側斜面での微動計の設置状況

数とEQ-01～11による本稿の伝達関数に差異はほとんど無く、既往の評価⁴⁾が妥当であったことを確認済みである。

2.2 常時微動計測

対象盛土の地震観測断面(図1, 図2参照)の法肩と法尻の各二か所(ともに盛土の水平断面内の成分に着目)に微動探査兼地震計機器⁶⁾を同時に設置し(写真1枠内参照), 常時微動計測を2017年4月23日に実施した。計測は盛土断面方向(および盛土軸・鉛直方向)において一時間程度同時に実施し(アレー計測を実施し), サンプリング周波数を100Hzとした。

微動計測データの整理として, 四計測地点においてともに同時刻において比較的雑振動が少ない20.48秒の区間を10区間抽出し, 微動のフーリエ振幅スペクトル(0.05HzのParzen Windowを考慮)を各々算定した。そして, 法肩と法尻の比率を10区間ごとに計算し, その10区間平均を採用することで, 左側斜面および右側斜面(ともにN42°E方向)における伝達関数をそれぞれ評価した。図5にその評価結果を示す。

2.3 動的FEM解析

左右対称の対象盛土断面(図2参照)による既存のFEMモデル(図3参照)³⁾を利活用した二種類の線形動的解析を実施した。FEMモデルは, 後述の微動模擬解析⁷⁾に対応させるために, 左右1kmずつの幅広のモデルとした以外は既存モデル³⁾のメッシュ構成やサイズなどを援用した。線形解析に必要な各土層における密度やせん断波速度などの入力パラメータについては, 既往研究³⁾による設定値を転用した。地震模擬解析ではFEMモデル底面(法尻相当の地盤地表面から深度35.0m)にホワイトノイズ波(水平一方向)を327.68秒間入力し, 微動模擬解析では先行研究⁷⁾による知見を参考に, 対象盛土中央から800m遠方の地表面節点においてホワイトノイズによる327.68秒間の加振を鉛直方向に対して行った(図3参照)。側方および底面ともに粘性境界とし, 地震模擬解析および微動模擬解析において共通とした。数値解析条件として, 計算時間増分は0.001秒, 動的解析時間は327.68秒とした。

伝達関数は, 法肩と法尻の位置節点(図3参照)で得られた解析時間中間付近の時間断面における40.96秒間の加速度波形に対してフーリエ振幅スペクトル(0.05HzのParzen Windowを考慮)を各々算定し, 法肩と法尻の比率を計算することで評価した。ここに, 動的FEM解析(地震模擬解析ならびに微動模擬解析)に基づく伝達関数(法肩/法尻)は, 上述のParzen Windowの考慮の有無に影響されないものの, 地震観測および常時微動計測に基づく伝達関数の評価方法と同様とするために, フーリエ振幅スペクトルに対して0.05HzのParzen Windowを考慮することとした。

図5に地震模擬解析および微動模擬解析に基づく両ケースにおける伝達関数の評価結果を示す。なお,

図3 地震・微動模擬解析のための二次元FEMモデル, およびその地盤パラメータの一覧

同種の解析(地震模擬解析もしくは微動模擬解析)において、二種類の伝達関数(天端中央／地中もしくは法肩／法尻)はほぼ一致しており、差異がほとんど見受けられないことから(天端中央と法肩の地震挙動が類似していることは先行研究⁴⁾においても指摘済み)、図5および次章では、法肩／法尻の伝達関数(常時微動計測と同種)を選択して議論を進めていくこととする。また、地震模擬解析によって得られた伝達関数は、先行研究と一致している点とそうでない点が見受けられるが、その理由として先行研究では本研究と異なり、入力地震動としてホワイトノイズ波ではなく実際の観測波を使用していること、SCP改良地盤内(図1および図2参照)の物性値として一様ではなく土層・深度ごとに变化させていること、などが挙げられる。

3. 伝達関数に関する類似性評価とその応用の可能性

図5は、地震観測(2.1および図4参照)、微動計測(2.2参照)、地震模擬解析・微動模擬解析(ともに2.3参照)による計五つの伝達関数(天端中央／地中もしくは法肩／法尻)を比較したものである。伝達関数の類似性に関して得られた新たな知見を以下に示す。

まず、図5に示すとおり、地震観測と微動計測による伝達関数の比較によれば、スペクトル形状に若干の差異が見受けられるものの、ピーク値を示す周波数(以後、卓越周波数と呼ぶ)は、三種の伝達関数ともに7.1Hzという値が得られ、一致する結果が得られた。この一致度は、対象とする盛土の法肩・法尻において微動計測を実施すれば、地震観測と同等程度の精度で比較的容易に盛土の卓越(固有)周波数などの震動特性を評価可能であることを示唆するものである。また一般実務では、本研究と同様に天端中央付近での微動計測は困難であることが多いため、供用中の道路等の盛土を対象とする場合、車道外の法肩・法尻での計測実施に基づく盛土の伝達関数の一定精度(上記の卓越周波数の一致、および卓越周波数時に見られる伝達関数の相対誤差が最大でも0.59)を示す評価は、有用性が高いものと考えられる。

次に、図5に示すとおり、地震観測と地震模擬解析、および微動計測と微動模擬解析による伝達関数が概ね類似していることが読み取れる。この類似性は、対象盛土とその基礎地盤における入力パラメータの設定値³⁾の適用性を示唆するものである。一方で、道路や鉄道などの盛土を対象としたFEMによる地震応答解析^{2),3),7)}を実施する場合、同じFEMモデルを用いた地震模擬解析もしくは微動模擬解析(ともに線形解析)を事前に行うことで、盛土内の平均的なせん断波速度の設定値(対象盛土の場合；180m/s³⁾)に関する適用性を確認することが可能となる。PS検層や表面波探査によって盛土内のせん断波速度の線状分布や面的分布を評価することも可能であるが、FEM解析の実施において盛土内をせん断波速度の値によってゾーニングを施すことは実務において稀であり(高盛土を除く)、微動計測とその模擬解析の組合せに基づき盛土内の平均的なせん断波速度の値を評価する試みは、効果的であり実用性が高いといえる。

最後に、図5に示す五つの伝達関数の卓越周波数はともに7.1Hzに位置している。一方で、1/4波長則もしくは台形状の盛土を対象とした固有周波数算定式^{2),8),9)}に基づく、対象盛土(せん断波速度180m/s、盛土高7.35m、天端幅25.0m、法勾配1:1.8；図2参照)の固有周波数は6.1Hzもしくは6.2Hzとそれぞれ概算され、

図4 地震観測に基づく伝達関数(天端/地中)の評価

図5 各種手法による対象盛土の伝達関数の評価

卓越周波数と各々の固有周波数が概ね類似する結果（一割程度低い結果）が得られた。つまり、卓越周波数を1/4波長則もしくは固有周波数算定式に基づきせん断波速度で換算するとともに約207m/sとなり、動的FEM解析での採用値(180m/s)に対して一割程度速い結果が得られる。これらの類似性は、上述した微動模擬解析（もしくは地震模擬解析）によって盛土内の平均的なせん断波速度を伝達関数との一致度を踏まえて試行錯誤により評価する際に、1/4波長則もしくは盛土の固有周波数算定式^{2),8),9)}に基づいて卓越周波数から逆算されたせん断波速度の値が初期値として有効であることを示唆するものである。

4. まとめ

本研究では、苫小牧市内の高速道路盛土において、天端中央とその直下の地中で地震観測、法尻と法肩で微動計測を各々実施し、得られた記録を用いて伝達関数を評価した。さらに、両者の伝達関数の類似性を明示するとともに、地震と微動をそれぞれ模擬したFEMに基づく数値解析シミュレーションを実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 地震観測に基づく伝達関数(天端中央／地中)と微動計測(法肩／法尻)に基づく伝達関数を比較すると、両者の卓越周波数やスペクトル形状などの特徴が非常に良い一致を示す。
- (2) 上記(1)の一致度は、対象とする盛土の法肩・法尻において微動計測を実施すれば、地震観測と同等程度の精度で比較的容易に盛土の卓越(固有)周波数などの震動特性を評価可能であることを示唆するものである。また一般実務では、供用中の道路等の盛土を対象とする場合、天端中央付近での微動計測は困難であることが多いため、車道外の法肩・法尻での計測実施に基づく盛土の伝達関数の一定の精度による評価は、有用性が高い。
- (3) 地震観測と地震模擬解析に基づく伝達関数、および微動計測と微動模擬解析に基づく伝達関数をそれぞれ比較すると、両者の卓越周波数やスペクトル形状などの特徴が各々類似する傾向を示す。
- (4) 上記(3)の類似性は、FEMによる対象とする盛土の地震応答解析を実施する場合、同じFEMモデルを用いた地震模擬解析もしくは微動模擬解析を事前に行うことで、盛土内の平均的なせん断波速度の設定値に関する適用性を確認することが可能となり、実用的であるといえる。
- (5) 上記(4)の地震模擬解析もしくは微動模擬解析の事前実施の際に設定が必要となる盛土内の平均的なせん断波速度の初期値は、卓越周波数と1/4波長則もしくは固有周波数算定式の組合せによって得られる逆算値の採用が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、秦吉弥，湊文博，門田浩一，常田賢一：臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の前震における国道443号線道路盛土崩壊地点での強震波形の評価，地盤と建設，地盤工学会，Vol.34, No.1, pp.119-126, 2016.
- 2) 坂井公俊，荒木豪，室野剛隆：等価1自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価，土木学会論文集A1，Vol.73, No.1, pp.174-186, 2017.
- 3) 池田隆明，三輪滋，西川純一，林宏親，谷口啓二郎：地震観測記録を用いた道路盛土の地震応答解析，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，III-A123, pp.244-245, 1998.
- 4) 西本聡，橋本聖，池田隆明，三輪滋，上明戸昇：地震観測記録を用いた軟弱地盤上の道路盛土の地震時挙動分析，土木学会論文集C，Vol.64, No.4, pp.802-812, 2008.
- 5) 秦吉弥，一井康二，山田雅行，常田賢一，竹澤請一郎，柴尾享，満下淳二，村田晶，古川愛子，小泉圭吾：中小地震観測および常時微動計測に基づく道路盛土の地震応答特性の評価，土木学会論文集A1，Vol.68, No.4, pp.I_407-417, 2012.
- 6) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，飯澤清典，藤原広行：微動探査観測システムの開発，第115回物理探査学会学術講演会講演論文集，pp.227-229, 2006.
- 7) 秦吉弥，一井康二，村田晶，野津厚，宮島昌克，常田賢一：常時微動計測を利用した道路盛土のせん断波速度の評価—2007年能登半島地震で被災した能登有料道路を例として—，日本地すべり学会誌，Vol.48, No.6, pp.318-325, 2011.
- 8) 秦吉弥，加納誠二，山下典彦，横井芳輝，土田孝：形状を考慮した簡便な盛土の固有周波数算定式，地盤工学ジャーナル，Vol.2, No.3, pp.197-207, 2007.

- 9) 秦吉弥, 加納誠二, 土田孝, 山下典彦: 盛土形状を考慮した水平および上下方向の固有周波数算定式, 第41回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.2111-2112, 2006.

(受理: 2017年5月31日)

(掲載決定: 2017年9月16日)

Similarity Assessment of Transfer Functions of a Road Embankment based on Seismic Observations and Microtremor Measurements

HATA Yoshiya ¹⁾, EGAWA Takuya ²⁾, SATO Takashi ³⁾ and IKEDA Takaaki ⁴⁾

1) Member, Associate Professor, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

2) Researcher, Civil Engineering Research Institute for Cold Region

3) Researcher, Civil Engineering Research Institute for Cold Region

3) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

Accurate evaluation on the shaking characteristics of an embankment is very important for the rational seismic assessment. In this study, the transfer functions of a road embankment were evaluated based on the in-situ records of seismic observation and microtremor measurement. The both transfer functions were almost similar, indicating the possibility that the shear wave velocity profile of an embankment using the microtremor measurement can be evaluated by the original equation for natural frequency estimation and/or the dynamic linear 2-D FEM analysis.

Key Words: Seismic observation, Microtremor measurement, Embankment, Transfer function, 2-D FEM analysis