

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— An evaluation of the shear wave velocity profile in a road embankment using the microtremor measurement —Application for the damaged sites of the Noto Toll Road due to the 2007 Noto Hanto Earthquake—

秦 吉弥^{a)}*, 一井康二^{b)}, 村田 晶^{c)}, 野津 厚^{d)}, 宮島昌克^{c)}, 常田賢一^{e)}

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Akira MURATA, Atsushi NOZU, Masakatsu MIYAJIMA and Ken-ichi TOKIDA

Abstract

The evaluation of the shear wave velocity distribution in the road embankment is necessary for the rational seismic assessment. However, the evaluation of shear wave velocity is usually difficult. In this study, the evaluation method of the shear wave velocity distribution in the road embankment using the microtremor measurement is proposed. First, the transfer functions of a high embankment in the Noto Toll Road were evaluated based on array measurements of microtremor at the toe, banquettes and shoulder. Next, the shear wave velocity profile of the high embankment was calibrated so that the transfer functions in the elastic FEM analysis agree with the observation. Finally, we confirm that a seismic response analysis using the estimated shear wave velocity is consistent with the actual damage results in the 2007 Noto Hanto Earthquake.

Key words : earthquake, embankment, shear wave velocity, microtremor measurement, FEM analysis

和文要旨

合理的な道路盛土の耐震検討の実施には、盛土断面におけるせん断波速度などの地盤物性値を評価しておく必要がある。しかし、PS検層などでは、盛土内におけるせん断波速度の面的な分布の推定は困難である。そこで本研究では、常時微動計測を利用した道路盛土断面におけるせん断波速度の評価方法を提案する。具体的には、まず、能登有料道路の高盛土を対象に、法肩～小段～法尻の6地点において常時微動アレー計測を実施し、高盛土の伝達関数を評価した。次に、常時微動アレー計測と動的線形FEM解析の伝達関数が整合するように、高盛土断面におけるせん断波速度の分布を推定した。最後に、2007年能登半島地震における推定地震動を用いた動的非線形FEM解析を実施し、被災実績と矛盾しないことを確認した。

キーワード：地震，盛土，せん断波速度，常時微動計測，FEM解析

1. はじめに

近年、大規模地震に対する道路などの高盛土の被災が相次いでいる。例えば、2004年新潟県中越地震では関越自動車道（地盤工学会，2007a），2007年能登半島地震では能登有料道路（地盤工学会，2007b），2009年静岡県駿河湾の地震では東名自動車道（横田ほか，2010）においてそれぞれ高盛土の崩壊が発生した。このような高盛土の耐震検討手法の1つとして、動的FEM解析（たとえば、井合ほか，1998；秦ほか，2008）の実施が挙げられる。動的FEM解析の実施にあたっては、適切な入力地震動の設定ならびに入力地盤物性値の評価が必要となる。入力地盤物性値の評価では、盛土内のせん断波速度などの動的地盤物性値を適切に評価しておく必要がある。特に、せん断波速度（初期せん断剛性）は、様々な解析手法（たとえば、Iai *et al.*, 1992；Oka *et al.*, 1999；

Wakai and Ugai, 2004）の採用において、その設定が必要不可欠な重要なパラメータの1つである。これまで、盛土断面内のせん断波速度の推定には、地震観測（たとえば、林ほか，1997；沖村ほか，2002；Shibao *et al.*, 2010；秦ほか，2010a, 2010b, 2010c），PS検層（たとえば、沖村ほか，2002；千野ほか，2007），表面波探査（たとえば、沖村ほか，2002；千野ほか，2007；田窪ほか，2007，2008；古川・森，2010a, 2010b；Shibao *et al.*, 2010；秦ほか，2010b, 2010c）など様々な方法が用いられてきた。地震観測による方法は、直接的で有効な手法であると考えられるが、経済性および合理性の観点からは、その適用が困難である場合が多いと考えられる。また、PS検層による方法は、盛土断面内におけるせん断波速度の面的な把握には最適であるとは言い難い。さらに、表面波探査による方法は、水平地盤での探査の実施が必要となるため、斜面を有する盛土に適用する場合には、高盛土であるほど数多くの測線での実施（たとえば、秦ほか，2010c）が必要となるため、比較的高価となる。

一方で、盛土断面内のせん断波速度は、盛土の固有周期などにより評価できると考えられ、宅地盛土（沖村ほか，2002），ため池堤体（古川・森，2010b），道路盛土

* 連絡著者 / corresponding author

a) 日本工営株式会社中央研究所
Research and Development Center, Nippon Koei Co., Ltd.
〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304
2304, Inarihara, Tsukuba, Ibaraki, 300-1259, JAPAN

b) 広島大学大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

c) 金沢大学理工研究域
College of Science and Engineering, Kanazawa University

d) (独)港湾空港技術研究所
Port and Airport Research Institute

e) 大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

(水野ほか, 2009; 秦ほか, 2010a, 2010c) などに常時微動計測が適用されている。しかしながら, 既往の研究(沖村ほか, 2002; 古川・森, 2010b; 秦ほか, 2010a, 2010c) では, 地震観測による卓越振動数や表面波探査による推定 1 次元固有振動数が, 常時微動計測による卓越振動数と概ね一致することが報告されているものの, 常時微動計測に基づいた盛土断面内でのせん断波速度分布の具体的な評価方法については示されていない。また, 水野ほか (2009) は, 常時微動計測と動的FEM解析を併用して高速道路盛土の震動特性 (伝達関数) の比較検討を行っている。しかしながら, 常時微動計測において, 高盛土を対象にしているにも関わらず, 多点同時計測ではなく 2 点同時計測によるH/Hスペクトルを用いた検討が行われている。さらに, 動的FEM解析では, 微動を模擬したFEM解析手法 (たとえば, Lachet and Bard, 1994; Uebayashi, 2003) が採用されていない。

そこで本研究では, 高盛土を対象にした多点同時計測による常時微動計測とその微動計測を模擬したFEM解析に基づいた道路盛土断面内のせん断波速度の評価方法を提案する。

2. 検討フロー

2.1 対象盛土

検討対象盛土は, 石川県七尾市の徳田大津インターチェンジ近傍に位置する能登有料道路 (縦-01) の高盛土である。図-1 は, 検討対象地点における新旧地形図を比較したものである。この図より, 検討対象盛土は, 水田上に築造された高盛土であることが読み取れる。この盛土の土質材料は, 検討対象地点の北側および南側における山部において能登有料道路の造成に伴う切土掘削によって搬出された砂礫土である。写真-1 および図-2 には, 西側法面の全景写真および断面図を示す。盛土断面諸元は, 盛土高さ31.9m, 天端幅33.6m, 法勾配 1 : 1.5もしくは 1 : 1.8のほぼ左右対称の台形形状の高盛土であり, 法面に幅 1mの小段を 4つ有している。2007年能登半島地震では, 写真-2 に示すように天端に縦断亀裂が発生したものの, 比較的軽微な被害であったことが報告されており, 検討対象盛土は縦-01と名付けられている (たとえば, 地盤工学会, 2007b)。

2.2 研究の流れ

具体的な研究の流れは, まず, 能登有料道路 (縦-01) の高盛土を対象に, 法肩~小段~法尻の計 6 地点での同時計測による常時微動アレー計測を実施し, 高盛土における伝達関数を推定した。次に, 遠方での地表加振により微動を模擬した動的線形FEM解析を実施し, 常時微動アレー計測と動的FEM解析による伝達関数が整合するように, 高盛土断面内におけるせん断波速度の分布を評価した。最後に, 評価したせん断波速度の分布を有する高盛土を対象に, 2007年能登半島地震における推定地震動 (秦ほか, 2010d) を入力した動的非線形FEM解析

を実施し, 地震被災実績と矛盾しないことを確認した。

2.3 本研究の位置付け

常時微動計測時の微動波形の振幅は, 最大でも0.003 cm/s程度 (夜間部) であることを確認しており, これを単純にひずみ振幅に換算することはできないが, 極めて微小 (10^{-6} 以下) であると推察される。一方で, 単調載荷試験における応力~ひずみ関係の弾性範囲は, 一般に 10^{-6} を大きく超えるひずみレベルであり, 常時微動のひずみレベルとは差異を有していると考えられる。この点に留意せず, 初期せん断剛性を算定すると, 同じせん断強度であっても応力~ひずみ関係に差が生じることになる。図-2 に双曲線モデルにおける初期せん断剛性の差による応力ひずみ関係の差を模式的に示す。ここで, 2007年能登半島地震において対象盛土では, 天端に 3 cm程度の段差クラックの発生 (軽微な被災) が確認されている (写真-2 参照)。盛土高さが31.9mであるため, 概算ではあるが天端において生じたひずみは約 10^{-3} となる。図-2 は, 後述する盛土内中間土層 (E3土層) の物性値を用いて, 応力~ひずみ曲線を双曲線モデル (マ

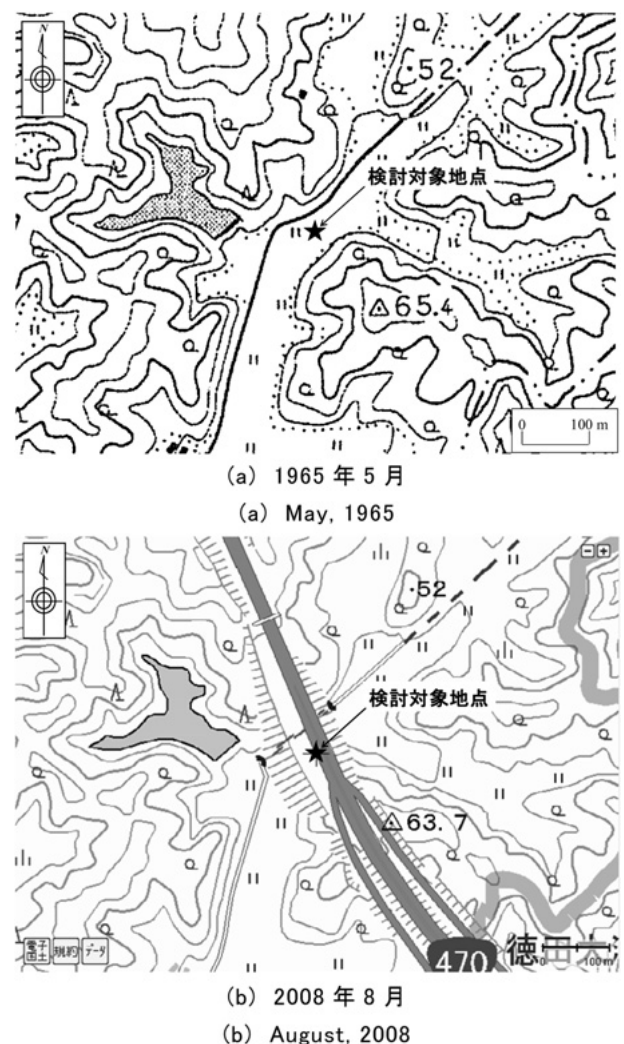


図-1 検討対象地点での新旧地形図の比較
Fig. 1 The comparison of old and new topographical map in targeted high embankment site.

ルチスプリングモデル; Iai *et al.*, 1992) で示したものである。図-2に示すとおり, このモデルでは, 概ね 10^{-4} レベルからせん断強度に漸近する。そして, 地震被災事例に相当する 10^{-3} レベルのひずみが生じる場合には, 微



写真-1 西側法面の全景
Photo 1 The panorama of the west side slope.

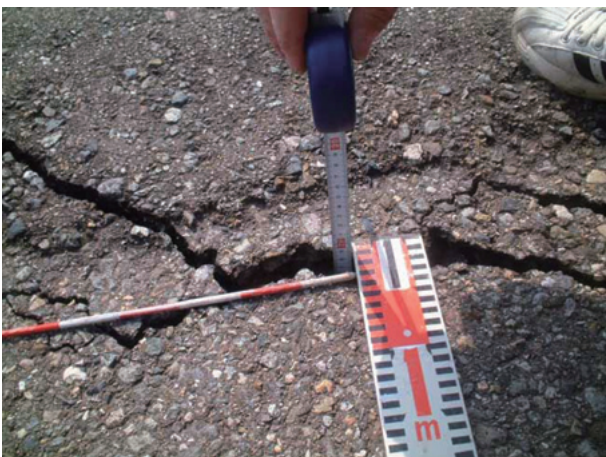


写真-2 縦-01での路面クラック発生状況
(石川県道路公社提供)

Photo 2 The condition of the crack occurrence in the crest pavement at the Tate-01 site.
(Courtesy by Ishikawa Road Public Corporation)

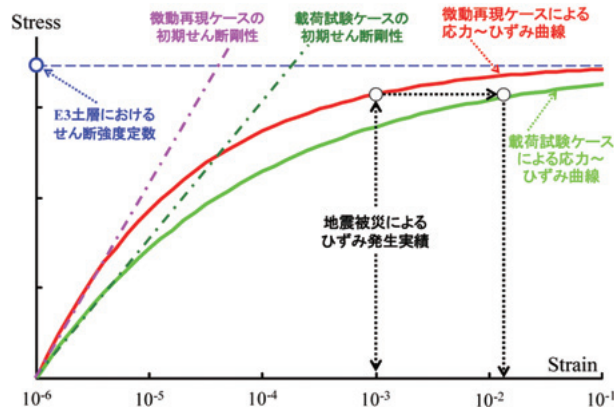


図-2 初期せん断剛性の差に起因する応力~ひずみ関係の差
Fig. 2 The difference in stress-strain relationships due to the difference in the initial shear modulus

動計測再現ケース (常時微動アレー計測と動的線形FEM解析による伝達関数が概ね整合するように盛土内せん断波速度を評価するケース) と単調載荷試験ケース (盛土内でのサンプリング試料による単調載荷試験結果に基づいてせん断波速度を評価するケース) における初期せん断剛性の差に起因して, 10倍程度のひずみ差が生じることになる (各ケースの詳細は後述する)。本研究では, この差に着目し, 応力~ひずみ曲線が双曲線モデルで近似でき, さらに室内試験によるせん断強度の値が正しいという前提の上で, 初期せん断剛性推定の重要性を指摘し, 軽微な地震被災事例に基づいて推定値の検証を行う。

なお, 動的非線形FEM解析に用いる入力地震動は, 当該盛土 (法尻相当地点) における常時微動計測や中小地震観測記録に基づいてサイト特性を評価し, 当該盛土周辺の既存強震観測点での本震記録を再現できる推定手法を用いて算定されている (秦ほか, 2010d)。したがって, 本研究の当該盛土地点における入力地震動は一定の精度を有しており, このレベルの推定精度を持つ地震動が提供可能である軽微な被災事例は非常に数少ない。

3. 常時微動計測

3.1 計測条件

計測に用いた微動計は, (株) 東京測振製のサーボ型速度計VSE-15D-1 (写真-3参照) である。計器の仕様等については, 参考文献 ((株) 東京測振, 2010) を参照されたい。計測日時は2010年12月5日の15~17時 (昼間部) および2010年12月6日の2~4時 (夜間部) であり, サンプリング周波数は100Hzとした。昼間部と夜間部においてそれぞれ微動計測を行ったのは, 昼間部と夜間部における微動レベルの差異などを確認するためである。計測地点は, 図-3に示すとおり西側法面のP-1 (法尻), P-2~P-5 (小段), P-6 (法肩) の計6計測点であり, P-1~P-6における同時連続計測による常時微動アレー計測を実施した。写真-3には, P-5 (小段) での常時微動計測状況を示す。計測方向は,



写真-3 常時微動計測状況 (P-5地点)
Photo 3 A microtremor measurement condition. (P-5 site)

盛土断面方向 (N115°W-N65°E) の 1 成分であり, P-1~P-6 とともに共通である。各微動計 (P-1~P-6) は, 長さが 100m, 50m, 10m のいずれかの専用ケーブルで収録器 (法尻周辺に設置) につながれており, プリアンプを通した後に AD 変換される計測システムとした。また, P-1~P-6 の各計測地点の周辺にデジタルビデオカメラをそれぞれ 1 台ずつ設置し, 計測時間帯における車両通行, 歩行者, 風の様子などを記録した。なお, 計測開始に先立ち, 常時微動アレー計測時と全く同じ微動計とケーブルを用いて, 微動計に付属する計測方向スイッチを水平方向から強制的に上下方向に切り替えることによって, 微動計測システムの回路の電気ノイズと見なした事前計測を行い, 各計測点でのディップ振動数 (森・古川, 2010) が 0.2~0.3Hz 付近にあることを予め確認した。

3.2 解析条件

微動データの解析は, 夜間部の常時微動アレー計測データを対象とし, デジタルビデオカメラによる撮影映像などを参考にして車両通行, 歩行者, 風の影響などを受けていないと考えられる 163.84 秒の区間の微動データを 20 区間抽出した。抽出区間 (時間帯) は, P-1~P-6 の各計測点において同時刻とした。夜間部の計測データの採用理由は, 微動レベルは夜間部と昼間部でそれほど大きな差異はないものの, 車両通行による雑振動の影響が夜間部のほうが小さいためである。抽出した 20 区間の微動データに対してそれぞれフーリエスペクトルの計算を行い, バンド幅 0.05Hz のパーセンウィンドウで平滑化を施すことで, スペクトル形状を大きく変えずに卓越振動数を読み取りやすくした。図-4 は, P-1

~P-6 の各計測点における盛土断面方向のフーリエスペクトルで 20 区間の平均をとったものである。この図より, P-1 (法尻) から P-6 (法肩) に近づくにつれ 2 Hz 付近のスペクトルが徐々に卓越しているため, 対象盛土全体の固有振動数は 2 Hz 程度であると推察できる。なお, P-1 (法尻) を基準とした伝達関数の算定結果については, 次章で述べる。一方で, P-1~P-6 の全計測点において 0.5 Hz 付近に明瞭なピークが見受けられるが, これは, 同周波数を多く励起する震源の影響や基礎地盤の深部地下構造に起因したサイト増幅特性の影響などが考えられる。

4. 微動を模擬した動的 FEM 解析

図-5 に高盛土の FEM モデルを示す。モデル幅は 2,000m, 総節点数は 25,535, 総要素数は 24,699 である。側方および底面はともに粘性境界とした。検討対象盛土から東側 800m の遠方地点 (基礎地盤地表部) をホワイトノイズによる鉛直方向加振 (327.68 秒間) を行うこと

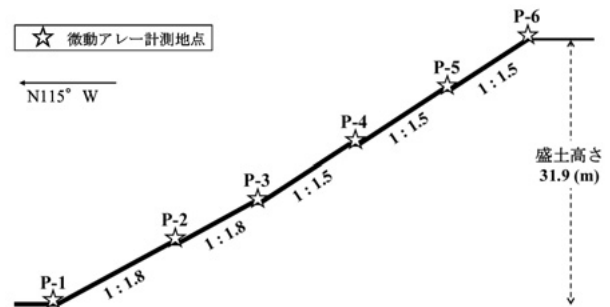


図-3 西側法面の形状
Fig. 3 The slope shape in the west side.

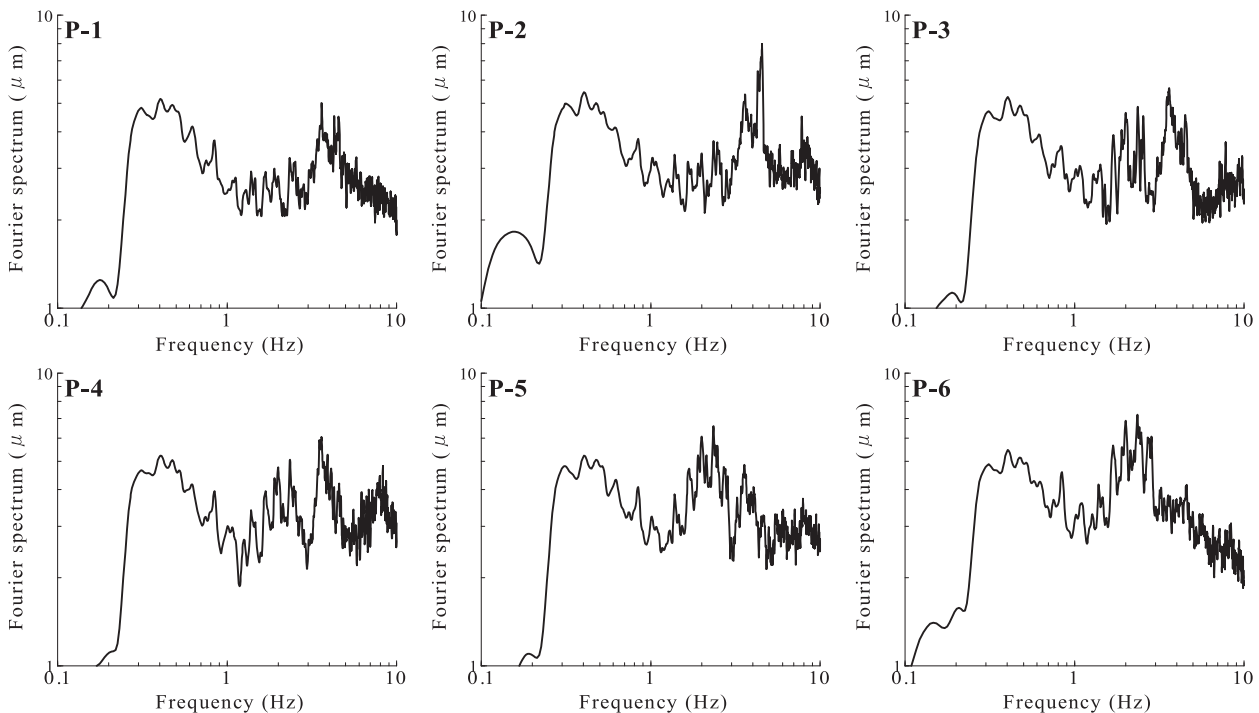


図-4 盛土断面方向におけるフーリエスペクトルの平均値
Fig. 4 The mean of the horizontal Fourier spectrum.

で、常時微動を模擬した（たとえば、Lachet and Bard, 1994 ; Uebayashi, 2003）。なお、西側の遠方地点からの鉛直方向加振としても同様の結果が得られることを確認している。基礎地盤は、高盛土法尻の東部および西部で行われたボーリング（PS検層）の結果により地表から砂質土層（As1, As2）、シルト層（Dc）、砂礫層（Ds）の順に地層構成を設定した。一方で、高盛土は、微動計を設置した小段において土層境界を設けることで、5つの土層（E1～E5）により構成されるモデルとした。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秒間とした。

表-1に地盤パラメータの一覧を示す。高盛土および基礎地盤はすべて弾性体でモデル化した。基礎地盤は、密度試験結果（湿潤密度）とPS検層結果（せん断波速度）に基づいて初期せん断剛性を計算し、ポアソン比（=0.333）を仮定してヤング係数を算定した。一方で、高盛土では、湿潤密度は密度試験結果に基づいて評価し、ポアソン比は一定値（=0.333）とした。そして、以下に示す2種類の方法に基づいて高盛土断面におけるせん断波速度およびヤング係数を評価した。

1つ目の方法は、後述するように常時微動アレー計測と動的線形FEM解析による伝達関数が概ね整合するように、高盛土の各土層でのせん断波速度を試行錯誤により設定し、湿潤密度とポアソン比を用いてヤング係数を算定した（以後、微動計測再現ケースとよぶ）。具体的には、当該盛土内におけるボーリングデータが存在しないことなどを勘案し、P-1～P-6の各計測点間を境界とした水平成層構造を仮定した。試行錯誤を行う際には、常時微動アレー計測による伝達関数のピーク周波数（ピーク周期）と、経験的な道路盛土の固有周期（西山ほか, 2008）が概ね一致するように、盛土内のせん断波速度の初期値を設定するとよい。なお、最終的に求めたせん断波速度が唯一の解であるかどうかは、慎重な吟味

が必要であるが、湿潤密度とポアソン比が一定の条件ということと、深度方向にせん断波速度が増加する（盛土であるのでこの仮定は順当と思わせる）ことを考慮すると、ほぼ唯一に近い安定した解が得られていると思われる。

2つ目の方法は、高盛土の各土層（E1～E5）におけるサンプリング試料を対象に、三軸試験装置を用いて非排水状態（CU条件）で単調載荷試験を実施し、ヤング係数を算定した（以後、単調載荷試験ケースとよぶ）。表-1に示すとおり、常時微動アレー計測結果に基づく

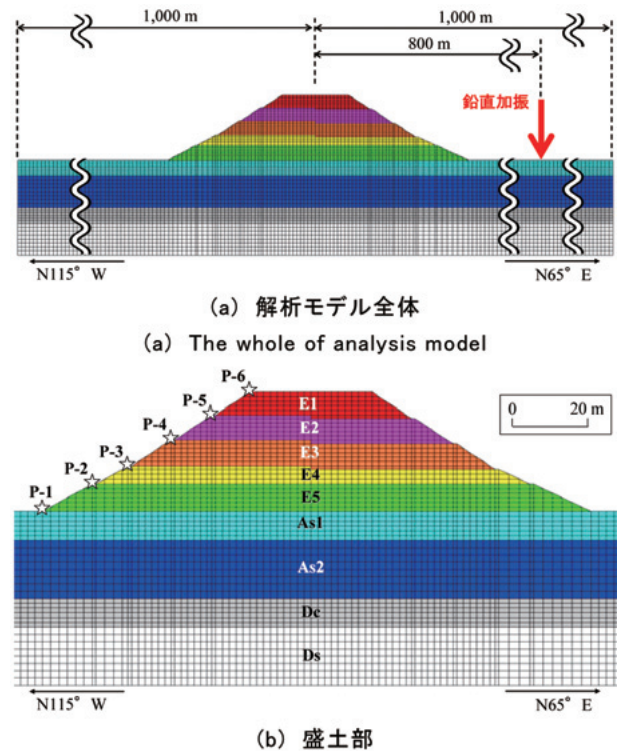


図-5 有限要素解析モデル
Fig. 5 The finite element model.

表-1 弾性FEM解析のためのパラメータ一覧
Table 1 The parameter list for the elastic FEM analysis.

入力パラメータ			盛土					基礎地盤			
			E1	E2	E3	E4	E5	As1	As2	Dc	Ds
共通	湿潤密度	ρ (t/m^3)	1.892	1.884	1.862	1.908	1.898	1.914	1.934	1.828	2.010
	ポアソン比	ν (-)	0.333					0.333			
常時微動計測	せん断波速度	V_s (m/s)	220	230	260	270	280	160	250	190	290
	初期せん断剛性	G_0 (kPa)	91,600	99,700	125,900	139,100	148,800	49,000	120,900	66,000	169,000
	ヤング係数	E (kPa)	244,100	265,700	335,600	370,800	396,700	130,600	322,300	175,900	450,700
単調載荷試験	せん断波速度	V_s (m/s)	180	190	210	220	230	160	250	190	290
	初期せん断剛性	G_0 (kPa)	61,500	67,900	82,100	92,300	100,500	49,000	120,900	66,000	169,000
	ヤング係数	E (kPa)	164,000	181,000	219,000	246,000	268,000	130,600	322,300	175,900	450,700

初期せん断剛性は、単調載荷試験結果に基づく初期せん断剛性よりも比較的大きく算定されている。これは、上述したとおり、単調載荷試験で求まるヤング係数が、常時微動レベルに相当する値であること、及びサンプリング時の乱れの影響であると思われる。

図-6に常時微動アレー計測と動的線形FEM解析による伝達関数を比較したものを示す。伝達関数は、法肩(P-6)および小段(P-5~P-2)におけるフーリエスペクトルを法尻(P-1)でのフーリエスペクトルで除することによって算定した。具体的には、常時微動アレー計測のケースでは、図-4で示した各計測点におけるフーリエスペクトル(20区間の平均)を用いて各計測点(P-2~P-6)における伝達関数を計算した。一方で、動的線形FEM解析のケースでは、計測点(P-1~P-6)の位置相当で得られた1区間の速度応答波形(163.84秒間)に対してそれぞれフーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05Hzのパーセンウィンドウで平滑化を施した。そして、平滑化を施したフーリエスペクトル(1区間分)を用いて各計測点(P-2~P-6)における伝達関数を計算した。図-6に示すとおり、動的線形FEM解析(微動計測再現ケース)を用いて、有効な下限振動数(ディップ振動数: 0.2~0.3Hz)より高い振動数領域での常時微動アレー計測による伝達関数のピーク振動数やスペクトル形状を一定の精度で再現できた。一方で、常時微動アレー計測と動的線形FEM解析(単調載荷試験ケース)では、常時微動計測結果に比べFEMの伝達関数のピーク振動数が低周波側にシフトしているような結果となっている。

以上のように、常時微動を解析により再現することで、

盛土内のせん断波速度の分布を推定することができた。なお、このせん断波速度は、前述のようにひずみレベルの小さな領域での値であり、PS検層などで求まるせん断波速度と同じ性質の物性である。

5. 2007年能登半島地震による動的FEM解析

2007年能登半島地震による地震動を入力した動的非線形FEM解析を実施し、解析結果と被災実績を比較検討することで、前章で設定した高盛土内部のせん断波速度分布(表-1参照)の妥当性について検討を行った。FEMモデルおよび境界条件については前章のもの(図-5参照)と同様である。図-7は入力地震動の加速度時刻歴であり、対象高盛土(縦-01)での推定地震動(秦ほか, 2010d)をFEMモデル底面に引戻したものである。なお、引戻し計算には、表-1に示す基礎地盤における湿潤密度・せん断波速度と、代表的な動的変形特性(安田・山口, 1985)に基づく1次元地盤解析モデル(地表(法尻相当)~工学的基盤(FEM解析モデル底面))を用いた等価線形解析(杉戸ほか, 1994)を適用した。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81.92秒間とした。表-1および表-2は、設定した解析パラメータの一覧である。表-2に示すとおり、基礎地盤および高盛土は、すべてマルチスプリングモデル(Iai *et al.*, 1992)でモデル化し、全応力解析を行った。拘束圧パラメータは、ともに一般値(=0.5)とした。間隙率は、物理試験の結果から設定した。最大減衰定数は、動的変形試験の結果に基づいて評価した。せん断強度定数(c' , ϕ')は、三軸試験(CU (bar) 試験)の結果より設定した。すなわち、微動計測再現ケースと

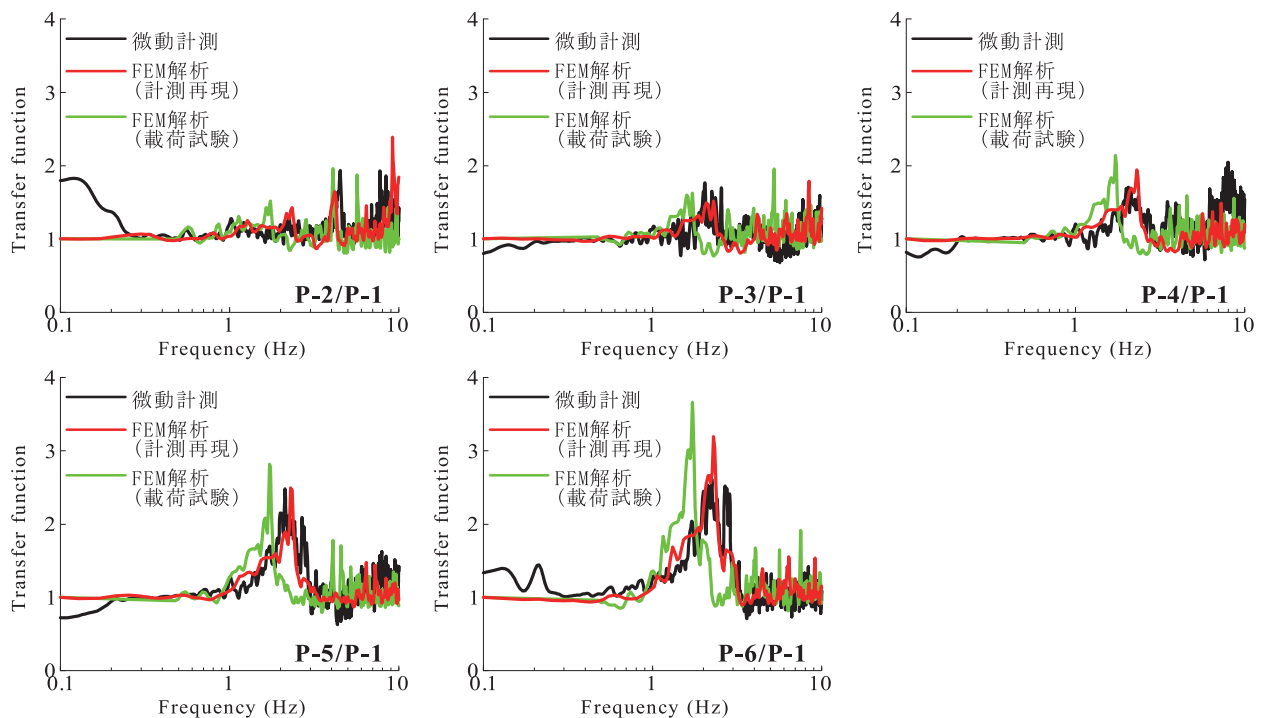


図-6 高盛土での伝達関数の比較
Fig. 6 The transfer function at the high embankment.

表-2 地震応答解析のためのパラメータ一覧
Table 2 The parameter list for the seismic response FEM analysis.

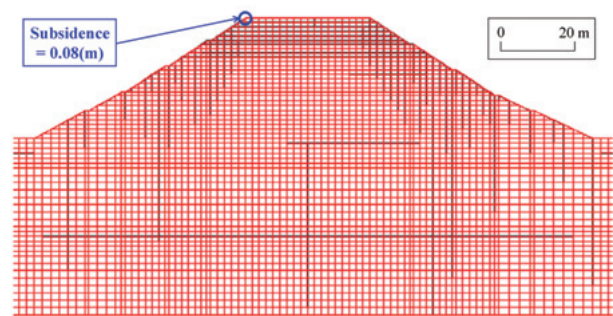
入力パラメータ		盛土					基礎地盤			
		E1	E2	E3	E4	E5	As1	As2	Dc	Ds
共通	平均拘束圧 σ_m (kPa)	38.9	119.7	205.4	280.3	358.6	455.8	606.9	755.7	908.5
	拘束圧パラメータ m_G (-)			0.5					0.5	
	拘束圧パラメータ m_K (-)			0.5					0.5	
	間隙率 n (-)	0.41	0.43	0.39	0.39	0.38	0.43	0.45	0.39	0.47
	最大減衰定数 H_{max} (-)	0.24	0.23	0.26	0.29	0.31	0.23	0.27	0.17	0.29
	粘着力 c' (kPa)	11	13	14	18	21	9	12	83	15
	内部摩擦角 ϕ' (deg.)	32	32	35	36	36	33	36	14	37

単調荷試験ケースでのパラメータの差異は、本研究で着目したせん断波速度により求まる初期せん断剛性の違いのみ(表-1参照)であり、その他の解析パラメータについては、両ケースとも同じ値である。

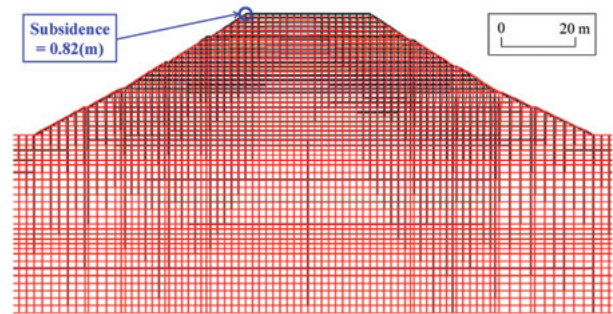
図-8に動的非線形FEM解析による等倍スケールでの残留変形状況を示す。この図より、微動計測再現ケース(図-8(a))では、残留変形が天端付近に若干発生しているものの、変形量はごく僅かであり、西側斜面法肩における残留沈下量は8cmとなっている。この解析結果は、天端において縦断亀裂が発生したものの、段差が数センチ程度であった被災実績(写真-2参照)と矛盾していない。一方で、単調荷試験ケース(図-8(b))では、天端付近において比較的大きな残留変形が発生しており、西側斜面法肩における残留沈下量は82cmとなっている。この解析結果は、上述した被災実績と大きく矛盾している。すなわち、室内試験結果から得られた初期せん断剛性を入力パラメータとして用いると、現状の室内試験ではせん断波速度の推定に課題があるため、せん断強度定数の設定が同一という仮定の下ではあるが、せん断波速度から初期せん断剛性を求めた場合に比べて変形量を過大評価する危険性があるといえる。

6. まとめ

高盛土を対象にした多点同時計測による常時微動計測とその微動計測を模擬したFEM解析に基づいて盛土断面内のせん断波速度を評価する方法を提案し、能登有料



(a) 常時微動計測結果に基づいたせん断波速度評価
(a) The shear wave velocity evaluation based on the microtremor measurement results



(b) 単調荷試験結果に基づいたせん断波速度評価
(b) The shear wave velocity evaluation based on the monotonic loading test results

図-8 等倍による残留変形状況
Fig. 8 The condition of the residual displacement based on the real scale.

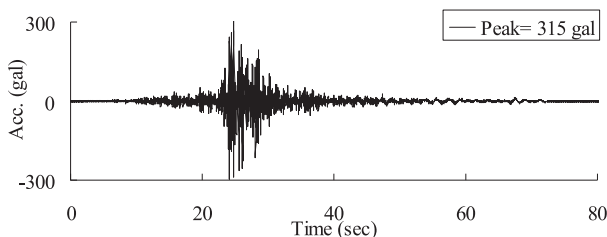


図-7 入力地震動
Fig. 7 Input earthquake motion.

道路の高盛土(縦-01)に適用した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 高盛土を対象にした法肩~小段~法尻の多点同時計測による常時微動アレー計測により、ディップ振動数よりも高振動数の領域については、高盛土の震動特性(伝達関数)を評価することができる。
- ・ 遠方での加振により微動を模擬した動的線形FEM

解析を実施することで、常時微動アレー計測に基づいた高盛土における伝達関数のピーク振動数やスペクトル形状を再現することができる。またこれにより、高盛土断面内におけるせん断波速度の分布を推定することが可能である。

- ・ 推定されたせん断波速度分布を用いて、2007年能登半島地震における能登有料道路の高盛土（縦-01）での再現解析を実施し、解析結果と地震被災実績との間に矛盾が存在しないことを確認した。
 - ・ 通常の手順で得られる単調載荷試験に基づく初期せん断剛性は、常時微動アレー計測と動的線形FEM解析から推定した初期せん断剛性よりも過小に評価されている可能性があり、せん断強度定数の設定が同一なら大規模地震における残留変形量をPS検層などにおけるせん断波速度に基づいて初期せん断剛性を評価した場合よりも過大に評価する危険性がある。
- 今後は、本提案手法の適用事例を増やしていくことによって、本提案手法の適用性をさらに検証していく予定である。

謝 辞

石川県道路公社には、能登有料道路での常時微動計測の実施にご協力いただきました。(社)土木学会地震工学委員会性能を考慮した道路盛土の耐震設計・耐震補強に関する研究小委員会の委員の皆様には、貴重なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 千野克浩・村田芳信・三浦均也・森政信吾 (2007): 高盛土住宅地の地震時安定性評価に向けた地盤調査とその結果, 第16回調査・設計・施工技術報告会講演概要集, 地盤工学会中部支部, No. 3.
- 古川将也・森伸一郎 (2010a): 表面波探査による地震被害を受けた既存ため池堤体のせん断速度構造, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, III-384, pp.767-768.
- 古川将也・森伸一郎 (2010b): 地震被害を受けた既存ため池堤体の微動応答特性と堤体内部構造の対応, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, No.477, pp.953-954.
- 秦吉弥・一井康二・土田孝・李黎明・加納誠二・山下典彦 (2008): 地震時の斜面の変形量評価における解析手法および入力地震動の選定, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.1, pp.64-71.
- 秦吉弥・一井康二・常田賢一・柴尾享・山田雅行・満下淳二・小泉圭吾 (2010a): アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2010 論文集, 地盤工学会, pp.21-26.
- 秦吉弥・一井康二・常田賢一・竹澤請一郎・山田雅行・柴尾享・満下淳二・小泉圭吾 (2010b): 中小地震観測記録に基づく道路盛土の地震応答特性の評価, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学学会, pp.3379-3386.
- 秦吉弥・一井康二・山田雅行・竹澤請一郎・村田晶・柴尾享・伊藤佳洋・常田賢一・満下淳二・小泉圭吾 (2010c): 各種現地観測に基づく道路盛土の地震時応答に影響を及ぼすせん断波速度構造の評価, 第7回地盤工学学会関東支部発表会 (Geo-Kanto2010) 発表講演集, Vol.7, No.104, pp.294-297.
- 秦吉弥・一井康二・村田晶・野津厚・宮島昌克 (2010d): 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動

- の推定とその応用-2007年能登半島地震での道路被災を例に-, 土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.799-815.
- 林宏親・西川純一・谷口啓二郎 (1997): 地盤および道路盛土におけるアレー観測, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.117-120.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15.
- 井合進・一井康二・佐藤幸博・桑島隆一 (1998): 高盛土の地震応答解析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10, pp.1557-1562.
- (社)地盤工学会 (2007a): 新潟県中越地震災害調査委員会報告書, 518p.
- (社)地盤工学会 (2007b): 2007年能登半島地震道路災害データ集, 74p.
- Lachet, C. and Bard, P. Y. (1994): Numerical and theoretical investigation on the possibilities and limitation of the "Nakamura's" technique, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.42, pp.377-397.
- 水野菊・丸山喜久・山崎文雄・山本将・藤島勝利 (2009): 高速道路盛土の震動特性の把握に向けた常時微動観測とFEM解析, 第7回日本地震工学学会・大会-2009梗概集, pp.114-115.
- 森伸一郎・古川将也 (2010): 伊豆半島東方沖群発地震を利用したため池堤体の動的応答特性の評価, 土木学会地震工学論文集, Vol.31, pp.242-251.
- 西山大策・常田賢一・小田和広・都岡英俊・江川祐輔 (2008): 地震時における水平地盤上の道路盛土の固有周期と剛性低下の関係, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, No.571, pp.1141-1142.
- Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., Yamashita, S. (1999): A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680.
- 沖村孝・南部光広・篠原秀明・桜井秀憲・前田修 (2002): 高盛土地盤における物性評価と地震動増幅特性, 土木学会論文集, No.707/IV-55, pp.51-65.
- Shibao, S., Hata, Y., Ichii, K., Tokida, K., Takezawa, K., Yamada, M., Mitsushita, J. and Koizumi, K. (2010): Estimation on the shear wave velocity of a road embankment, *Proc. of the 9th Japan/Korea Joint Seminar on Geotechnical Engineering*, pp.97-102, Osaka, Japan.
- 杉戸真太・会田尚義・増田民夫 (1994): 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58.
- 田窪裕一・神野邦彦・佐伯嘉隆・森伸一郎・河野幸一 (2007): 表面波探査による高速道路盛土堤体のせん断波速度, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, No.19, pp.37-38.
- 田窪裕一・神野邦彦・佐伯嘉隆・森伸一郎 (2008): 表面波探査による砂質地盤上の道路盛土のせん断波速度構造の評価, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, No.797, pp.1593-1594.
- (株)東京測振 (2010): 小型サーボ型速度計VSE-15D-1, 仕様パンフレット.
- Uebayashi, H (2003): Extrapolation of irregular subsurface structures using the horizontal-to-vertical spectral ratio of long-period microtremors, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.93, pp.570-582.
- Wakai, A. and Ugai, K. (2004): A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.4, pp.83-97.
- 安田進・山口勇 (1985): 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542.
- 横田聖哉・石田誠幸・高木宗男 (2010): 駿河湾の地震における高速道路盛土の被災調査報告, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, No.747, pp.1493-1494.
- (原稿受付2011年4月20日, 原稿受理2011年10月11日)