

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

秦 吉弥¹・一井 康二²・山田 雅行³・常田 賢一⁴・竹澤 請一郎⁵
柴尾 享⁶・満下 淳二⁷・村田 晶⁸・古川 愛子⁹・小泉 圭吾¹⁰

¹正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)
E-mail: hata-ys@n-koei.jp

²正会員 広島大学大学院 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)
E-mail: jamada@nifty.com

⁴正会員 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁵正会員 (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)
E-mail: takezawakc@newjec.co.jp

⁶正会員 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 (〒239-0826 愛知県小牧市大山1545-33)
E-mail: shibaosusumu.dec4th@gmail.com

⁷正会員 応用地質(株)関西支社ジオテクニカルセンター (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)
E-mail: mitsushita-junji@oyonet.oyo.co.jp

⁸正会員 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: murata@t.kanazawa-u.ac.jp

⁹正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

¹⁰正会員 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

道路盛土の合理的な耐震検討の実施には、道路盛土の地震応答特性を正確に評価しておく必要がある。しかしながら、既往の研究では、動的FEM解析や動的遠心模型実験などを主体としてその評価が行われており、現場での記録に基づいた評価は非常に少ない。そこで本研究では、道路盛土（法肩および法尻）での中小地震観測結果および常時微動計測結果などに基づいて道路盛土の地震応答特性を評価した。さらに、動的FEM解析を併用することで盛土内のせん断波速度構造を把握できる可能性を示した。

Key Words : *embankment, shear wave velocity, transfer function, seismic observation, microtremor measurement*

1. はじめに

近年、大規模地震に対する道路盛土の被災が全国で相次いでいる。例えば、2004年新潟県中越地震では関越自動車道¹⁾、2007年能登半島地震では能登有料道路²⁾、2009年静岡県駿河湾の地震では東名自動車道³⁾、2011年東北地方太平洋沖地震では常磐自動車道⁴⁾⁵⁾においてそれぞれ道路盛土の大規模な崩壊が発生し、機能不全が生じた。道路盛土の耐震検討において、地震による盛土の崩壊発生の有無、崩壊の範囲や程度を全線にわたり把握するこ

とが重要であり、いくつかの試みがなされている⁷⁾¹⁵⁾。一方で、合理的な道路盛土の耐震検討を実施するためには、道路盛土の地震応答特性を正確に把握しておく必要がある。しかしながら、既往の研究では、振動台模型実験・固有値解析¹⁶⁾、動的遠心実験¹⁷⁾、動的FEM解析¹⁸⁾などに基づいた検討が比較的多く実施されているが、道路盛土における地震観測記録に基づいた検討¹⁹⁾²⁰⁾は非常に少ない。さらに、盛土内におけるせん断波速度構造などの地盤物性に対する検討がなされた事例²¹⁾²⁶⁾はあるものの、少ないのが現状である。そこで本研究では、道路盛

土(法肩および法尻)での中小地震観測結果および常時微動計測結果に基づいて道路盛土の地震応答特性の評価において重要となる伝達関数に着目した検討を行った。さらに、動的FEM解析と常時微動計測の組合せや中小地震観測により、盛土内のせん断波速度の評価を行った。

なお、本研究は、(社)土木学会地震工学委員会が設けた「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(委員長:常田賢一(大阪大学大学院工学研究科 教授))」が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

2. 対象盛土

対象盛土は、和歌山県田辺市にある国道42号線田辺

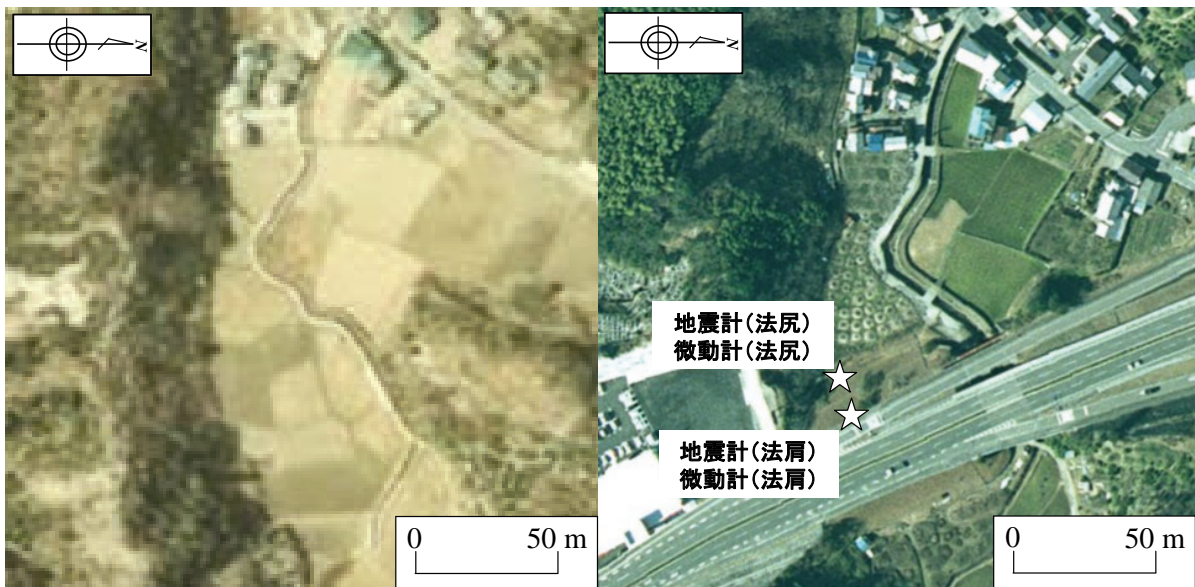
バイパスの道路盛土(施工時期:1978年)である。図-1および写真-1は、対象盛土周辺の新旧地形図および空中写真をそれぞれ比較したものであり、水田上に築造された盛土であることが読み取れる。また、対象盛土周辺は、文里港まで約600mの小河川の沖積地であることも読み取れる。写真-1および写真-2に示すとおり、地震計・微動計設置地点は盛土法面の法肩および法尻の2地点である。盛土の土質特性としては、図-2に示すように主に砂礫土で構成されている。一方で、基礎地盤は、シルト混じり砂質土の1層で主に構成されており、工学的基盤までの層厚は15~20m程度である。

図-3および図-4には、対象盛土の断面図および縦断面図を示す。対象盛土(地震計設置側(西側)断面)の盛土高 H は8.6m、天端幅 B は31.7m、法勾配 $1:s$ は $1:1.8$ である。盛土北端は橋脚、盛土南端は切土(傾斜基盤)となってお



(a) 1965年5月 (b) 2008年8月

図-1 対象盛土周辺の地形図の比較 (出典:国土地理院1/25,000地形図)



(a) 1976年2月 (b) 2009年10月

写真-1 対象盛土地点の上空写真の比較 (出典:国土地理院空中写真)



写真-2 対象盛土での地震計/微動計の設置

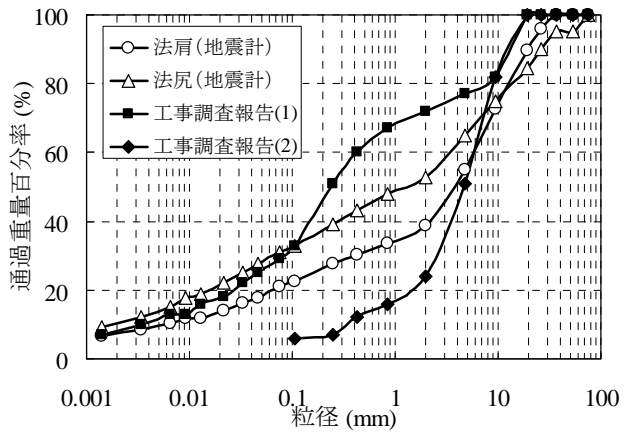


図-2 対象盛土の粒径加積曲線

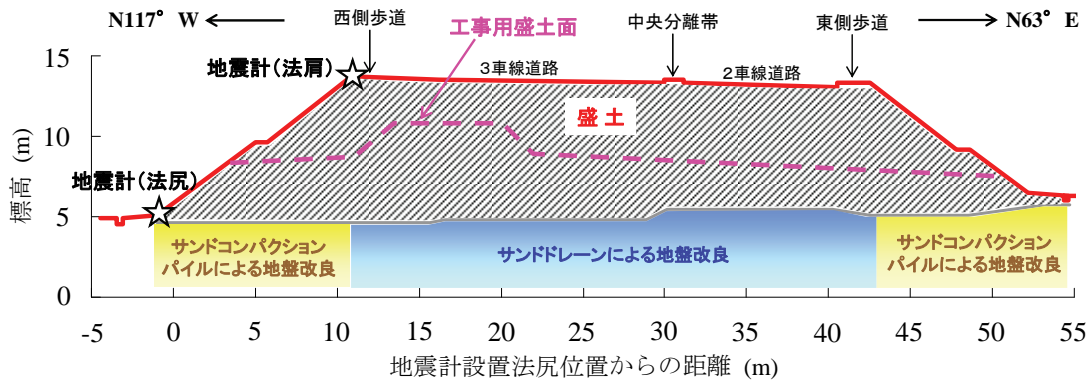


図-3 対象盛土の断面図 (地震計設置盛土断面)

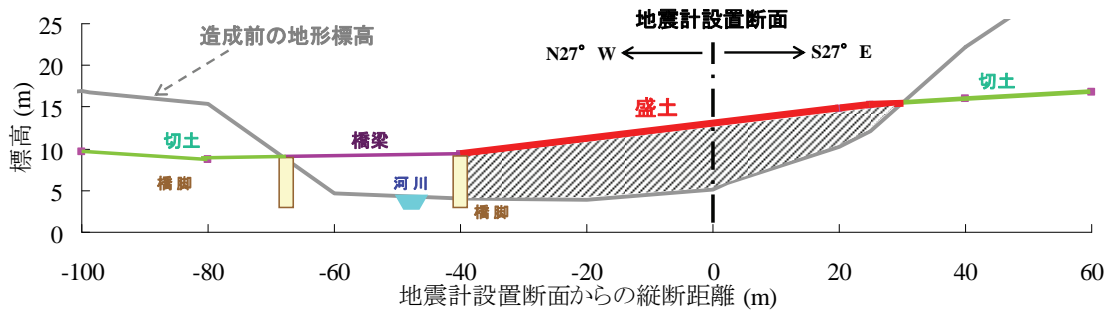


図-4 対象盛土の縦断面

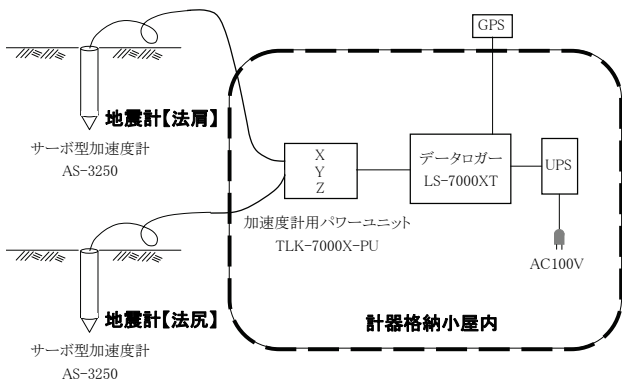


図-5 中小地震観測システム

時にサンドドレーンおよびサンドコンパクションによる地盤改良が施されており、盛土内部においては図-3に示すような工事用盛土面(破線)が含まれている。なお、この工事用盛土は、セメント系改良土である可能性があり、既往の表面波探査結果²⁷⁾²⁸⁾によれば、 $V_s=500\text{m/s}$ 程度のせん断波速度が局所的に得られている。

3. 中小地震観測

(1) 観測システム

図-5に示すように、地震計には、ボアホールタイプのサーボ型加速度計(東京測振(株)製AS-3250A)を法肩と法

り、工事資料に拠ると、盛土直下の基礎地盤は盛土造成

尻の同時観測(写真-2参照)のため2台使用し、データロガーは24ビットのデジタル記録が収録可能な装置(白山工業(株)製LS-7000XT)を採用した。地震観測システムの詳細については、参考文献29)を参照されたい。サンプリング振動数は100Hz、観測方向は盛土断面方向、道路延長方向、鉛直方向の計3方向とした。トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムとし、2010年2月1日から12月17日までの約10か月半にわたり観測を実施した。表-1に法尻ならびに法尻で得られた主な地震観測イベントの一覧を示す。

表-1 対象盛土での地震観測イベント

発生年月日	発生時刻	発生地域	気象庁マグニチュードMj
2010/02/21	15:46	和歌山県北部	Mj3.5
2010/03/04	07:19	和歌山県南部	Mj3.1
2010/03/07	14:25	和歌山県南部	Mj3.3
2010/03/21	13:20	和歌山県北部 (EQ-1)	Mj3.8
2010/05/01	12:59	和歌山県北部	Mj3.1
2010/05/14	14:34	和歌山県南部	Mj3.7
2010/05/24	03:23	和歌山県南部	Mj3.4
2010/05/29	00:47	紀伊水道	Mj3.8
2010/07/21	06:19	奈良県 (EQ-2)	Mj5.1
2010/11/29	15:52	和歌山県南部 (EQ-3)	Mj4.1

(2) せん断波速度の推定

観測された中小地震のうち、表-1に示すように比較的規模の大きな地震は、2010/03/21和歌山県北部の地震Mj3.8 (EQ-1)、2010/07/21奈良県の地震Mj5.1 (EQ-2)、2011/11/29和歌山県南部の地震Mj4.1 (EQ-3)の3地震である。図-6は、盛土断面方向における法尻と法尻での観測加速度波形を重ね合わせたものである。図-6に示すとおり、法尻での地震動が増幅しており、法尻と法尻でのS波初動ピークの時間差は、0.04sec (EQ-1) もしくは0.03sec (EQ-2およびEQ-3) となっている。一方で、図-7は、法尻と法尻の観測波形の相互相関係数を算定したものであるが、時間遅れがそれぞれ0.038sec (EQ-1)、0.032sec (EQ-2)、0.036sec (EQ-3) において相互相関係数が最も大きくなっており、S波初動ピークの時間差による結果(図-6参照)と良い一致を示している。

よって、せん断波の伝播時間を平均的な値として0.035secと概算すれば、2.で述べたとおり地震計設置断面での盛土高さは8.6mであるため、対象盛土内での平均的なせん断波速度は、250m/s程度であると推察される。

(3) 伝達関数の評価

図-8は、中小地震観測記録(表-1参照)に基づく盛土断面方向の伝達関数(法尻/法尻)である。伝達関数は、図-9にEQ-3での一例を示すように、法尻部のフーリエスペクトルを法尻部のフーリエスペクトルで除することで算定した。なお、フーリエスペクトルの算定にあたっては、0.05HzのParzen Windowを考慮(バンド幅を短くすることで伝達関数のピーク振動数の明瞭化に配慮)した。図-8に示すように、観測記録毎にバラツキがあるものの、概ね3.5Hz付近、4.5Hz付近、5~9Hz付近においてそれぞれ伝達関数が連続的に1.0を上回っている。

対象盛土本体の固有振動数³⁰⁾について考察すれば、盛土高(8.6m)と3.(2)で評価した対象盛土内の平均的なせん断波速度(250m/s)に対して1/4波長則を適用すると、7.3Hzと概算されることから、伝達関数が卓越している5~9Hz付近の周波数帯域(図-8参照)は、対象盛土本体の固

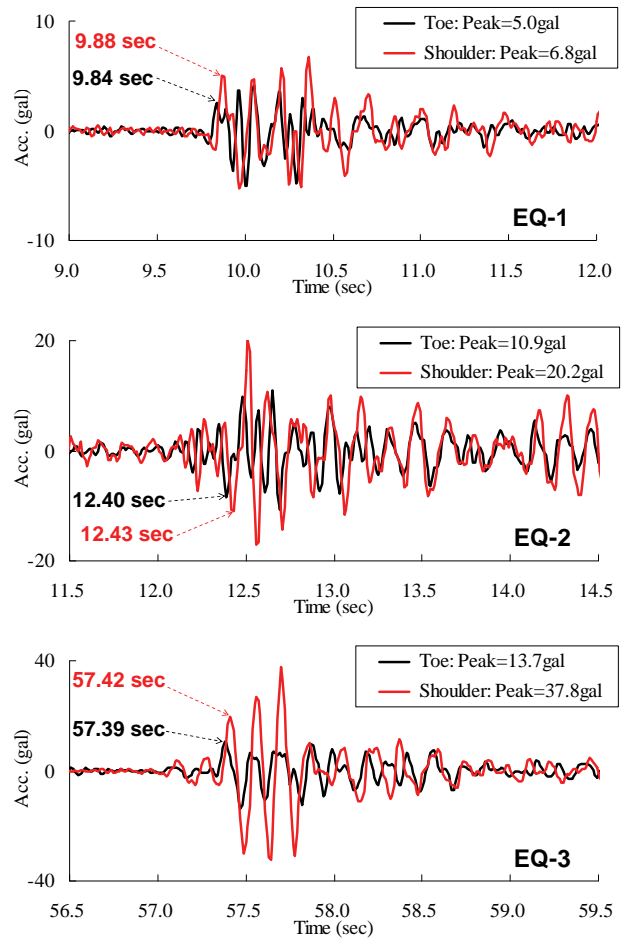


図-6 初動ピークの時間差によるせん断波速度の推定

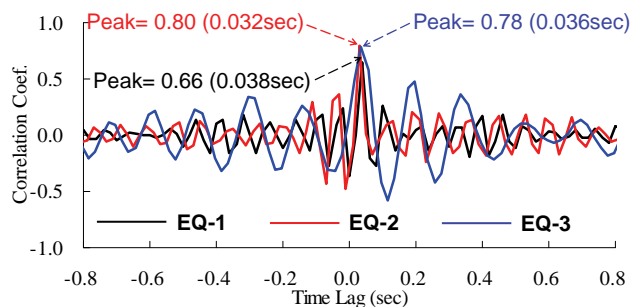


図-7 相互相関係数によるせん断波速度の推定

有振動数が主に影響しているものと考えられる。なお、道路延長方向および鉛直方向の伝達関数や固有振動数の検討・評価については今後の課題としたい。

4. 常時微動計測

(1) 微動アレー計測

a) 計測システム

微動計は、車両通行による高振動数の卓越が予想されること、静穏な夜間の長時間連続計測であることなどを勘案して速度計が適していると考え選定した。設置場所は、上述した地震計設置場所と同様に法面部の法尻および法肩とした(写真-2参照)。設置位置は、写真-3に法肩での一例を示すとおり地震計設置位置の極近傍とした。図-10は、微動計測システムの概略構成であるが、微動計を除く微動計測システムの装置(ノートパソコンおよびバッテリー等)は、計測ボックス内に集約させた(写真-3参照)。微動計センサーにより得られた微動記録は、ケーブルを介してノートパソコン内の収録装置に蓄積される計測システムである。採用した微動計や計測システムの詳細については参考文献29)を参照されたい。

計測条件として、サンプリング振動数を100Hz、夜間15時間の連続計測とした。また、計測方向は、3.(1)で示した中小地震観測と同様に、盛土断面方向、道路延長方向、鉛直方向の計3方向とした。さらに、GPS機能を利用することで、法肩部および法尻部における計測開始時間(19時00分)および計測終了時間(翌朝10時00分)を完全に一致させた同時計測とした。よって、法肩部と法尻部で得られるデータ数は全く同じである。なお、対象サイトは、比較的交通量の多い道路(バイパス)であるため夜間においても常時の微動レベルは比較的高く、電気ノイズに埋もれるような微弱な振動レベルではないことを確認している。法尻および法肩ともにコンクリート板の上に微動計を設置(写真-3参照)したため、地盤とコンクリート板の一体化には十分に留意した。

b) 伝達関数の評価

図-11は、常時微動計測による盛土断面方向のH/Hスペクトル³⁾⁾による伝達関数(法肩/法尻)であり、法肩部のフーリエスペクトルを法尻部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、まず、車両通行などの雑振動が小さい163.84秒間(法肩と法尻で同時刻)の微動データを盛土断面方向の法肩および法尻についてそれぞれ5区間抽出した。次に、抽出した微動データについて0.05HzのParzen Windowを考慮したフーリエスペクトルを法肩および法尻についてそれぞれ5区間分計

算した。最後に、法肩部のフーリエスペクトルを法尻部のフーリエスペクトルで除して比率(法肩/法尻)を5区間分計算し、5区間における平均比率を常時微動計測による盛土断面方向の伝達関数とした。図-11に示すとおり、概ね3.5Hz付近、6.5Hz付近、8.0Hz付近においてそれぞれ伝達関数が連続的に1.0を上回っているのが確認できる。中小地震観測による伝達関数(図-8参照)と微動アレー計測による伝達関数(図-11参照)を比較すると、微動アレー計測では7~8Hz付近において1.0を下回るトラフなどが確認でき、伝達関数の形状はそれほど一致していないものの、連続的に1.0を上回るピーク振動数(3.5Hz付近、6.5Hz付近、8.0Hz付近)については、比較的良い一致を示している。これは、地震観測を実施することなく、常時微動計測の実施のみで、盛土の地震応答特性(固有振動数など)を評価できる可能性があることを示唆するものである。

(2) 微動アレー探査

a) 探査システム

地表に常在する微動を利用した微動アレー探査を行い、対象盛土の基礎地盤におけるせん断波速度構造を推定した。実施状況と採用した機器を写真-4に示す。微動計には、加速度計(一体型微動探査兼地震計機器³²⁾)を採用した。採用した微動計や探査システムの詳細については参

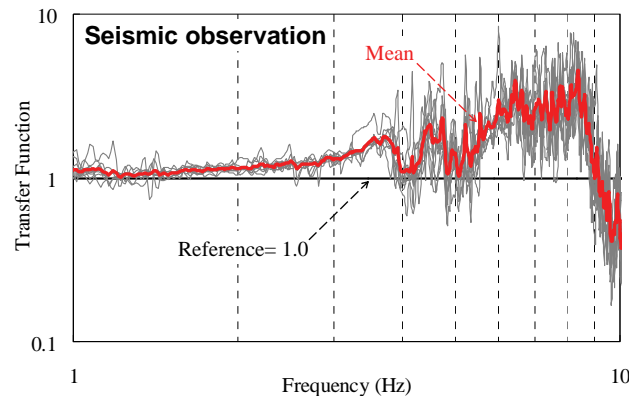


図-8 中小地震観測による伝達関数の評価

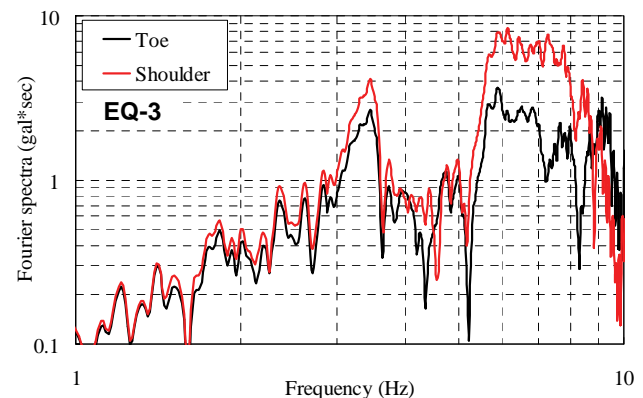


図-9 法尻と法肩でのフーリエスペクトルの比較(EQ-3)

参考文献33)を参照されたい。微動アレー探査では、私有地による設置制限等を考慮して、3つの地震計を群設置(アレー設置)し常時微動を同時に計測した。1つのアレーで計測できる波長の範囲は制限されるため、図-12に示すように大・中・小と3つの三角形アレーを組み合わせることで実施した。計測条件としては、サンプリング振動数100Hz、各三角形アレーで昼間1時間の連続計測とした。

三角形アレーサイズは、45m(大)、30m(中)、15m(小)となっており、3計測点がいずれも道路などの公共地への設置となるよう配慮して設定した。また既往資料(設計・施工図)に拠れば、SCPによる地盤改良エリアは法尻直下までとなっており、三角形アレー内(図-12参照)に改良地盤が含まれている可能性は低いと考えられる。また、大・中・小の三角形アレー計測点(全9計測点)での常時微動H/Vスペクトルの特性(ピーク周波数やスペクトル形状等)は、若干のばらつきは認められるものの、概ね類似していることを確認しており、計測点毎の条件の違い(舗装の種類・有無など)による影響は比較的小さいと考えている。

b) 基礎地盤のせん断波速度構造の評価

図-13に微動アレー探査の結果得られた位相速度スペクトルを示す。図-13に示すとおり、位相速度のバラツキは比較的大きい。そこで、現地探査による地下水位を参考にしたフォワードモデリングから、適当な地盤モデルの探索を行った。具体的には、過去の工事資料などの予備知識をもとに、得られた位相速度を都合良く説明できる地盤のせん断波速度構造について、地盤モデルをいろいろと変えて繰り返し計算を行い、最適な地盤モデルを探し出した。図-14に得られた1次元せん断波速度構造地盤モデルを示す。この地盤モデルは、基礎地盤での微動計測に基づく常時微動H/Vスペクトルの3.5Hzを中心とした卓越周波数(図-15参照)を説明するように設定したものであるが、盛土の耐震安定性を議論するうえで安

全側の評価となるように、各アレー計測点で得られた常時微動H/Vスペクトルの最も低周波数側のピーク(2.6Hz)に一致するように設定している。また、図-15に示すように、東側法面の法尻付近(図-12参照)においても西側法面と同様の常時微動H/Vスペクトルが得られていることから、基礎地盤は概ね水平成層であると推察できる。一方で、中小地震観測や微動アレー計測における盛土断面方向の伝達関数(図-8および図-11参照)において3.5Hz付近にピーク振動数が見られた点については、基礎地盤における常時微動H/Vスペクトルの3.5Hz付近の卓越周波数(図-15参照)と一致することから、基礎地盤の速度構

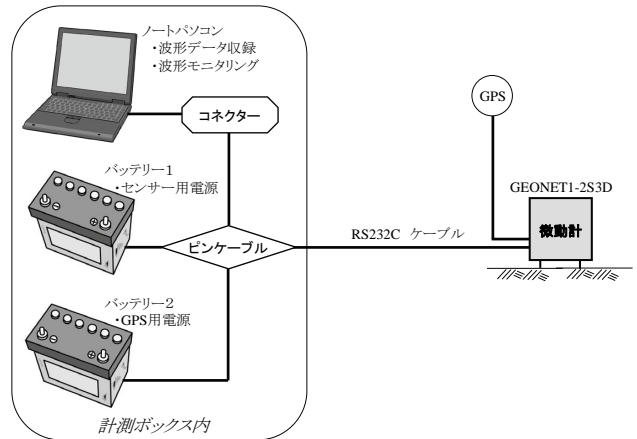


図-10 微動アレー計測システム

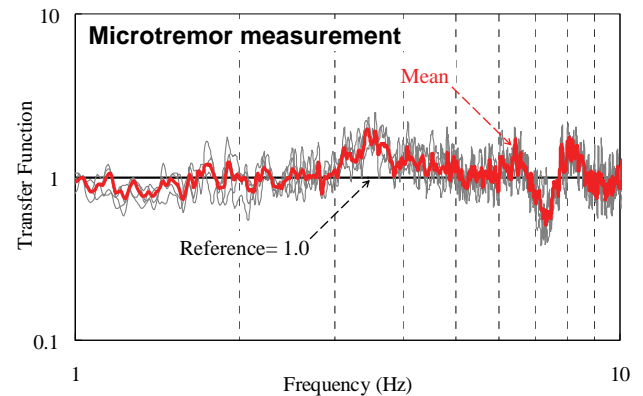


図-11 微動アレー計測による伝達関数の評価

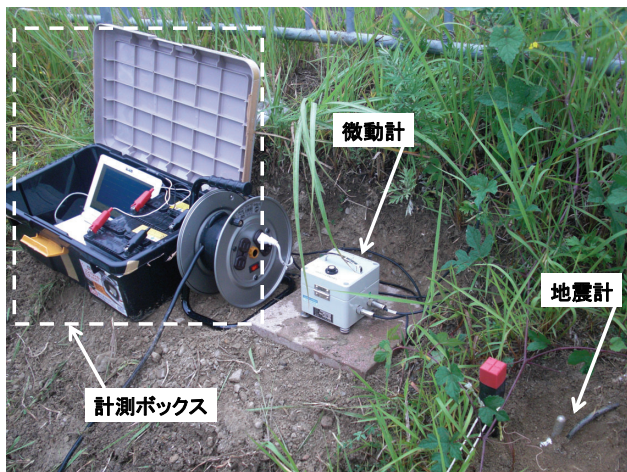


写真-3 微動アレー計測システム



写真-4 微動アレー探査実施状況と採用した微動計

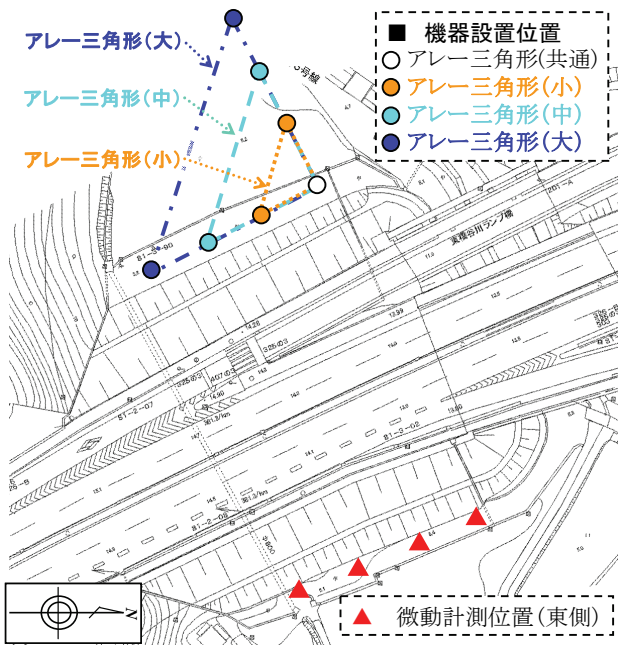


図-12 微動アレー探査および常時微動計測の実施測点

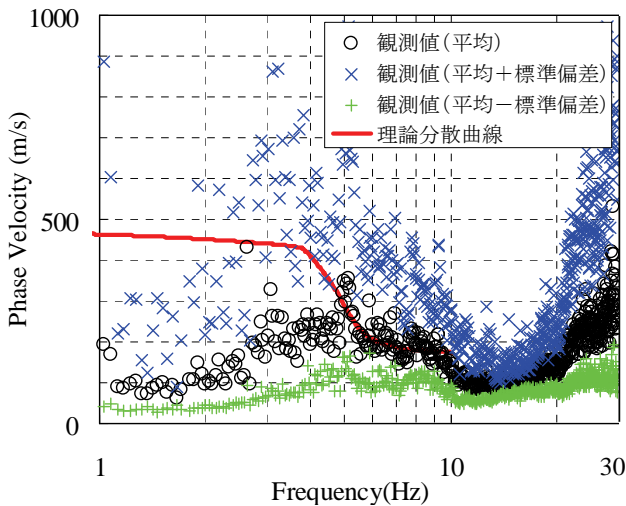


図-13 位相速度スペクトル

深度(m)	地下 水位(m)	せん断波速度 (m/sec)
0m		
2m	▽	180
		180
17m		
		500

図-14 フォワードモデリングによる基礎地盤の1次元モデル

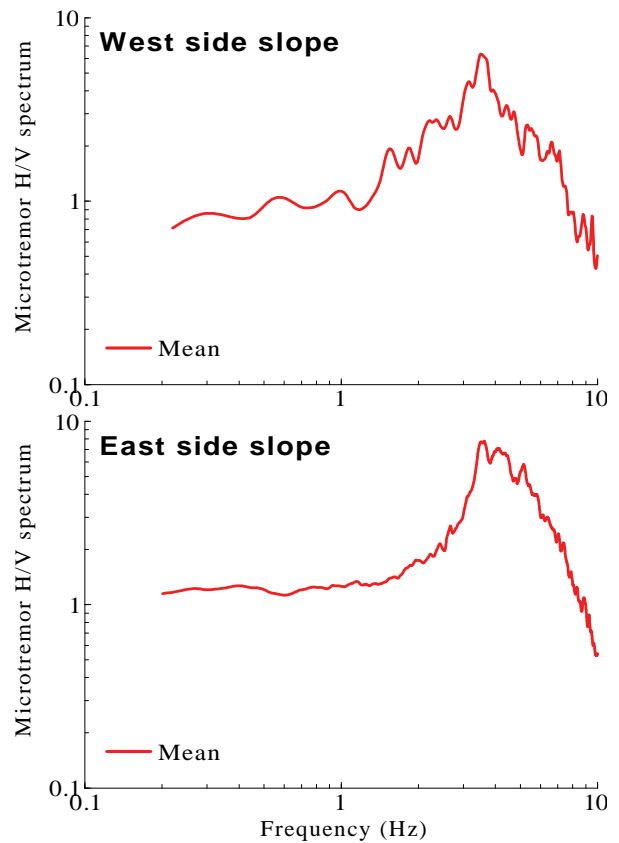


図-15 法尻付近における常時微動HVスペクトル

造が盛土+基礎基盤による全体の震動特性として影響しているものと考えられる。

5. 動的FEM解析

(1) 概要

図-16にFEMモデルを示す。モデル幅は2,000m(西側・東側ともに1,000mずつ)とし、側方および底面はともに粘性境界とした。表-2に地盤パラメータの一覧を示す。盛土および基礎地盤はすべて弾性体でモデル化した。盛土については、現場密度試験結果(湿潤密度)と3.(2)で評価した中小地震観測結果(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($\nu=0.333$)を仮定してヤング係数を算定した。基礎地盤(未改良地盤)についても同様に、現場密度試験結果(湿潤密度)と4.(2)で示した微動アレー探査結果(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($\nu=0.333$)を仮定してヤング係数を算定した。盛土直下のサンドドレーンもしくはサンドコンパクションによる地盤改良部分については、それぞれ一般的な値³⁴⁾を採用した。なお、本解析では、工事資料に基づいて地盤改良部分(盛土直下部分)の物性値やそのエリアを評価しているが、入力するせん断波速度や地盤改良部分のゾーンングによって伝達関数が影響する

表-2 入力パラメーター一覧

入力パラメータ	盛土	未改良地盤		サンドドレーンによる地盤改良部分(SD)	サンドコンパクションによる地盤改良部分(SCP)	基盤
		地下水位が浅	地下水位が深			
湿潤密度 ρ (t/m ³)	1.964	1.800	1.900	1.900	1.950	1.900
ポアソン比 ν (-)	0.333					
せん断波速度 V_s (m/s)	250	180	180	350	320	500
初期せん断剛性 G_0 (kPa)	123,000	58,000	62,000	233,000	200,000	475,000
ヤング係数 E (kPa)	327,000	155,000	164,000	621,000	532,000	1,266,000

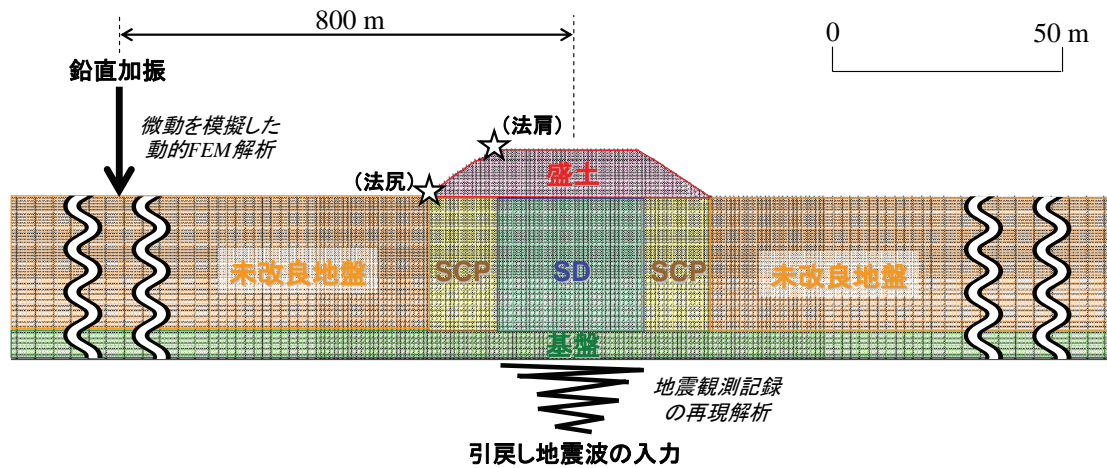


図-16 有限要素解析モデル

ことを確認しており、特に後述する常時微動を模擬した動的解析では、盛土直下の地盤のせん断剛性の評価³⁹⁾に十分に留意する必要があると思われる。

解析ケースは、以下に示す入力波が異なる2種類である。1つ目の解析は、中小地震観測の再現解析である。具体的には、法尻で得られた観測地震波形(表-1参照)を1次元の等価線形解析(SHAKE)を用いて、FEMモデルの底面相当に引戻した波(10波)を入力地震動とした動的線形FEM解析(図-16参照)である。なお、1次元モデル(図-14参照)による引戻し波は、2次元FEMモデル(図-16参照)とGauss波を利用することで得られるFEM解析モデル底面相当波と大きな差異がないことを確認済みである。

もう一方の解析は、常時微動を模擬した再現解析である。具体的には、図-16に示すように対象盛土から西側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)を行うことで常時微動を模擬した動的線形FEM解析^{36,37)}である。

数値解析条件としては、計算時間増分は0.001秒、動的解析時間は327.68秒間とし、両解析ケースで全く同じ条件である。

(2) 伝達関数の評価

a) 中小地震観測の再現解析

図-17に中小地震観測の再現解析によって得られた伝

達関数を示す。伝達関数の算定方法は、3.(3)で示した中小地震観測に基づく方法と同じである。図-17には、中小地震観測記録に基づいた10波平均の伝達関数(図-8参照)も同時に示しており、観測記録と再現解析による伝達関数が良い一致を示している。

これは、3.(2)で示した法尻および法尻での中小地震観測記録に基づくS波初動ピークの時間差や相互相関係数を用いた盛土内の平均的なせん断波速度の評価方法の妥当性を示唆するものである。

b) 常時微動を模擬した再現解析

図-18に常時微動を模擬した動的解析によって得られた伝達関数を示す。伝達関数の算定方法は、4.(1)で示した微動アレー計測に基づく方法と同じである。図-18には、微動アレー計測に基づいた伝達関数(図-11参照)も同時に示しており、3.5Hz付近、6.5Hz付近、8.0Hz付近に見られるピーク周波数を概ね再現できており、アレー計測と再現解析による伝達関数が比較的良い一致を示している。

c) 伝達関数の比較

中小地震の再現解析と常時微動を模擬した再現解析では、図-17および図-18に示すように伝達関数のピーク周波数はおおむね一致するものの、伝達関数の形状が完全に一致することはない。この理由は、どちらも法尻と法尻で得られた同じH/Hの成分を用いて伝達関数を算定し

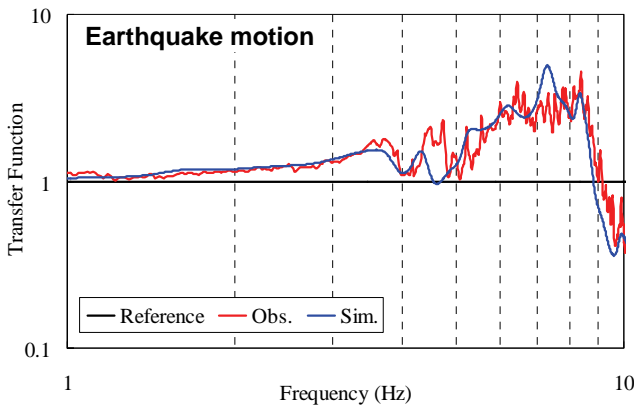


図-17 地震動による伝達関数の比較

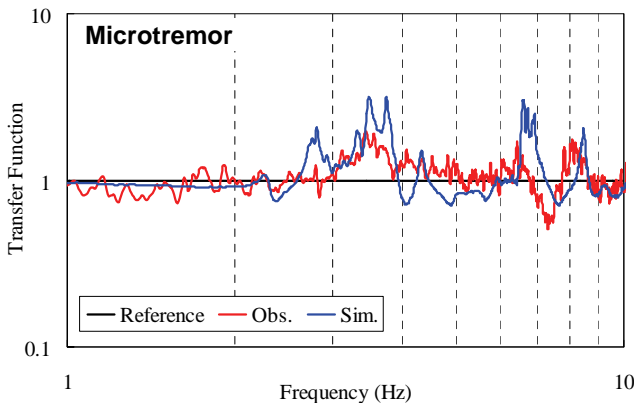


図-18 常時微動による伝達関数の比較

ているものの、対象指標の違い(地震加速度波形と微動速度波形)、入力波の違い(地震波(せん断波主体)と常時微動(表面波主体))、入力方向の違い(水平方向と鉛直方向)、入力位置の違い(FEMモデルの底面と基礎地盤地表面)に加えて、常時微動の模擬解析では伝達関数のピーク後に微動スペクトル特有のディップ(トラフ)が発生(図-18参照)することによるものと考えられる。

本稿内では、中小地震観測記録に基づいて盛土内の平均的なせん断波速度を評価しているが、延長が長い道路盛土に対して全ての検討断面において地震観測を実施するのは、現実的ではない。図-18で示した結果は、法尻および法肩における微動アレー計測で得られた対象盛土の伝達関数に対して、常時微動を模擬した動的FEM解析を併用することで、計測と解析における伝達関数の形状は異なるもののピーク振動数の一致度から、盛土内の平均的なせん断波速度を評価できる可能性を示唆するものである。

6. まとめ

本研究では、和歌山県田辺市の田辺バイパスの道路盛土を対象として、中小地震観測および常時微動計測など

を実施し、道路盛土の伝達関数(法肩/法尻)に主に着目した検討を行った。さらに、動的FEM解析についても実施することで、盛土内の平均的なせん断波速度を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 実測同士(中小地震観測と微動アレー計測)による伝達関数の比較では、伝達関数(法肩/法尻)の形状に関しては一致度がそれほど高くないものの、得られたピーク振動数に関しては比較的良い一致を示しているため、地震観測を実施することなく、微動アレー計測の実施により、盛土の固有振動数などを評価できる可能性がある。
- (2) 基礎地盤の速度構造(地盤震動特性)は、伝達関数のピーク振動数などに影響を及ぼす可能性がある。
- (3) 法肩および法尻での中小地震観測記録によるS波初動ピークの時間差や相互相関係数を用いて盛土内の平均的なせん断波速度が評価可能である。
- (4) 微動アレー計測で得られた伝達関数に対して、常時微動を模擬した動的FEM解析を併用することで、計測と解析における伝達関数の形状は異なるもののピーク振動数の一致度から、盛土内の平均的なせん断波速度を評価できる可能性がある。

今後は、当該盛土で実施した表面波探査結果²⁸⁾²⁹⁾などと比較検討を行い、盛土の地震応答特性や盛土内のせん断波速度構造についてより詳細な検討を実施していく予定である。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、道路盛土での地震観測や常時微動計測の実施などにおいて国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所にご多大なるご協力をいただきました。(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いた。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，518p, 2007.
- 2) (社)地盤工学会：2007年能登半島地震道路災害データ集，74p, 2007.
- 3) 高木宗男，横田聖哉，菅浩一，安田進，太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の実態，第55回地盤工学シンポジウム平成22年度論文集，地盤工学会，No.29, pp.193-196, 2010.
- 4) 横田聖哉：高速道路盛土の地震被害と復旧，土木学会平成23年度全国大会研究討論会研-09資料，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，pp.3-4, 2011.
- 5) 金田和男，長尾和之，横田聖哉：高速道路における地震災害の復旧事例，地盤工学会誌，Vol.59, No.11, pp.14-17, 2011.
- 6) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，野津厚，横田聖哉，金田和男：サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖

- 地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定, 第31回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, No.2-018, 2011.
- 7) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 今村孝志: 盛土の耐震診断に基づく高速道路の通行機能の耐震性評価, 土木学会論文集F, Vol.65, No.1, pp.50-58, 2009.
 - 8) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討, 土木学会論文集F, Vol.65, No.4, pp.529-541, 2009.
 - 9) 常田賢一, 小田和広: 道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察, 土木学会論文集C, Vol.65, No.4, pp.857-873, 2009.
 - 10) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一: モンテカルロシミュレーションを用いた地震時における斜面崩壊範囲の評価, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3410-3417, 2010.
 - 11) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogui, H.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 1158-1167, 2010.
 - 12) 一井康二, 栗原園実, 柴尾享, 田森賢太郎, 桑野将司, 秦吉弥: 斜面の地震被災の有無における地形の影響の統計的分析—2007年能登半島地震における能登有料道路の事例から—, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.4, pp.198-206, 2011.
 - 13) 一井康二, 秦吉弥, 村田晶: 道路盛土の耐震性評価のための地震動設定手法に関するアンケート調査, 第31回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, No.1-007, 2011.
 - 14) 村上陽平, 一井康二, 丸山喜久, 秦吉弥, 福島康宏: 高速道路盛土の地震被災予測に関する一考察, 第31回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, No.4-166, 2011.
 - 15) Murakami, Y., Ichii, K., Maruyama, Y., Hata, Y. and Fukushima, Y.: Interval of Analysis in the Damage Evaluation of Expressway Embankments, *Proc. of 10th ICCEE 2011*, pp.272-278, Zhongli, Taiwan, 2011.
 - 16) たとえば, 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振動数算定式, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.197-207, 2007.
 - 17) たとえば, 秦吉弥, 一井康二, 李黎明, 土田孝, 加納誠二: 傾斜基盤を有する盛土の地震応答特性に関する動的遠心模型実験, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.295-304, 2007.
 - 18) たとえば, 都間英俊, 常田賢一, 小田和広, 江川祐輔: 応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する解析的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.1205-1210, 2007.
 - 19) 林宏親, 西川純一, 谷口啓二郎: 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, 1997.
 - 20) 池田隆明, 三輪滋, 林宏親, 西川純一, 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, pp.244-245, 1998.
 - 21) 千野克浩, 村田芳信, 三浦均也, 森政信吾: 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, 2007.
 - 22) 田窪裕一, 神野邦彦, 佐伯嘉隆, 森伸一郎, 河野幸一: 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, 2007.
 - 23) 田窪裕一, 神野邦彦, 佐伯嘉隆, 森伸一郎: 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, 2008.
 - 24) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克, 常田賢一: 常時微動計測を用いた道路盛土におけるせん断波速度構造の評価, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, No.892, pp.1783-1784, 2011.
 - 25) 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, 第31回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, No.2-019, 2011.
 - 26) 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.
 - 27) 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: 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, 日本地震工学会, pp.3379-3386, 2010.
 - 28) Shibao, S., Hata, Y., Ichii, K., Tokida, K., Takezawa, K., Yamada, M., Mitsushita, J. and Koizumi, K.: 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, 2010.
 - 29) 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: 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, 2010.
 - 30) 西山大策, 常田賢一, 小田和広, 都間英俊, 江川祐輔: 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, 2008.
 - 31) 水野菊, 丸山喜久, 山崎文雄, 山本将, 藤島勝利: 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回日本地震工学会・大会-2009梗概集, pp.114-115, 2009.
 - 32) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
 - 33) 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: 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回地盤工学会関東支部発表会(Geo-Kanto 2010)発表講演集, No.104, pp.294-297, 2010.
 - 34) 柴尾享, 一井康二, 秦吉弥, 山田雅行, 竹澤請一郎: 2次元動的応答解析による盛土のせん断波速度構造の推定結果の検証, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, No.857, pp.1713-1714, 2011.
 - 35) たとえば, 佐伯嘉隆, 森伸一郎: 現場実測に基づく軟弱地盤上の道路盛土の地震動増幅モデルの開発, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, No.795, pp.1589-1590, 2008.
 - 36) Lachet, C. and Bard, P. Y.: 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, 1994.
 - 37) Uebayashi, H.: 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, 2003.

(2011. 12. 9 受付, 2012. 2. 15 修正, 2012. 3. 6 受理)

EVALUATION ON THE SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS
OF A ROAD EMBANKMENT
BASED ON THE MODERATE EARTHQUAKE OBSERVATION
AND THE MICROTREMOR MEASUREMENT

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Masayuki YAMADA, Ken-ichi TOKIDA,
Koichiro TAKEZAWA, Susumu SHIBAO, Junji MITSUSHITA,
Akira MURATA, Aiko FURUKAWA and Keigo KOIZUMI

Accurate evaluation on the seismic response characteristics of a road embankment is very important for the rational seismic assessment. However, in a lot of previous studies, the seismic response characteristics of an embankment were evaluated based on the results of shaking table test, centrifuge model test and dynamic FEM analysis. In this study, the transfer function and the shear wave velocity of a road embankment were evaluated based on the in-situ records of moderate earthquake observation and microtremor measurement. Test results show the possibility that the shear wave velocity of an embankment can be estimated by the earthquake observation or the microtremor measurement and the dynamic linear FEM analysis.