

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日本工営(株)中央研究所主任研究員
(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail:hata-ys@n-koei.jp

²広島大学大学院工学研究院准教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³(株)ニュージェック技術開発グループチームマネージャー (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail:jamada@nifty.com

⁴大阪大学大学院工学研究科教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁵(株)ニュージェック技術開発グループマネージャー (〒485-0801 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail:takezawakc@newjec.co.jp

⁶東海旅客鉄道(株)総合技術本部技術開発部構造計画チーム (〒239-0826 愛知県小牧市大山1545-33)

E-mail:shibaosusumu.dec4th@gmail.com

⁷応用地質(株)関西支社ジオテクニカルセンター上級専門職 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

E-mail:mitsushita-junji@oyonet.oyo.co.jp

⁸金沢大学理工研究域環境デザイン学系助教 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:murata@t.kanazawa-u.ac.jp

⁹京都大学大学院工学研究科准教授 (〒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大阪大学大学院工学研究科助教 (〒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⁾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^{5),6),7)}。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⁸⁾、動的遠心実験⁹⁾、動的FEM解析¹⁰⁾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^{11),12)}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^{13),14),15),16)}が少ないのも現状である。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など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結果の組み合わせや中小地震観測結果により、盛土内のせん断波速度の評価を行った。

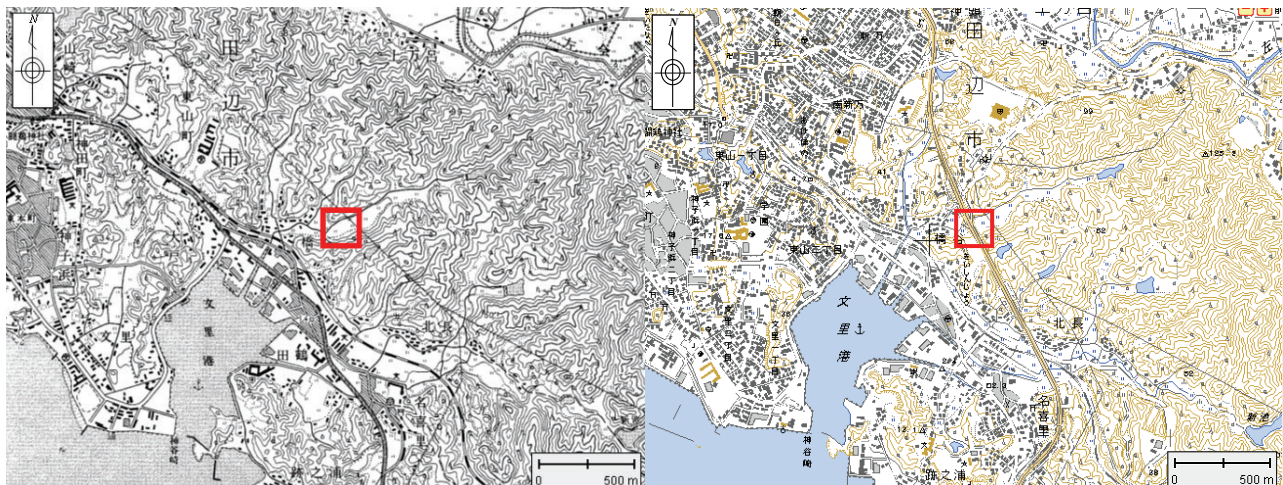
なお、本研究は、(社)土木学会地震工学委員会が設けた「性能を考慮した道路盛土の耐震設計・耐震補強に関する研究小委員会（委員長：常田賢一（大阪大学大学院工学研究科 教授））」が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

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。

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)となっており、工事資料に拠ると、盛土直下の基礎地盤は盛土造成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。



(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

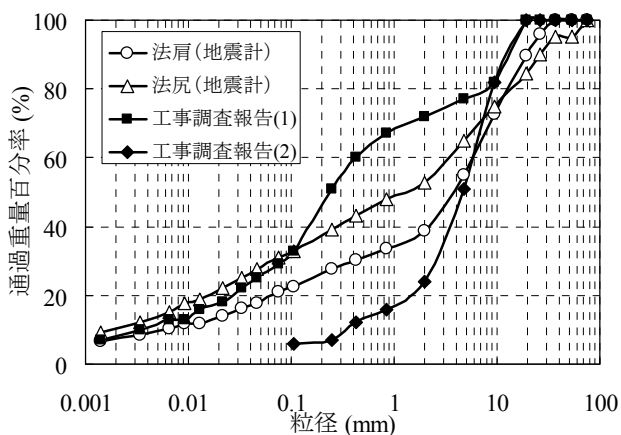


図-2 対象盛土の粒径加積曲線

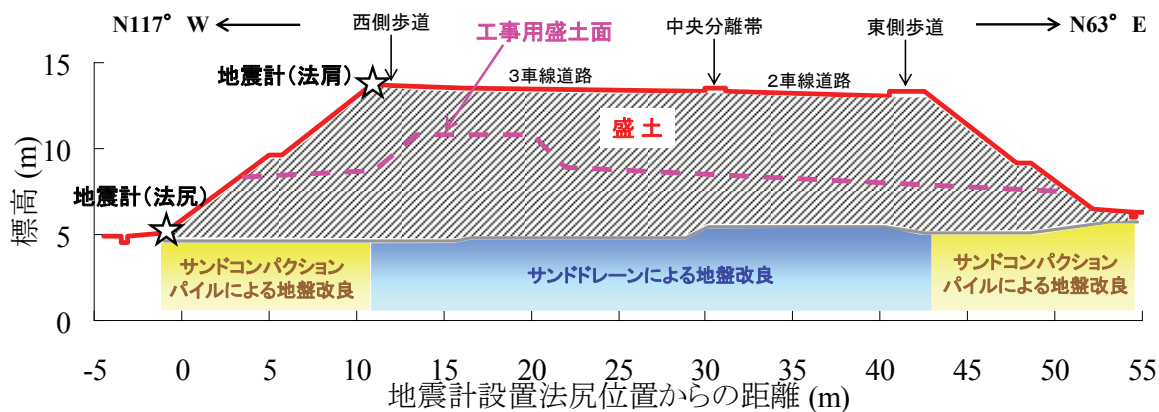


図-3 対象盛土の断面図（地震計設置盛土断面）

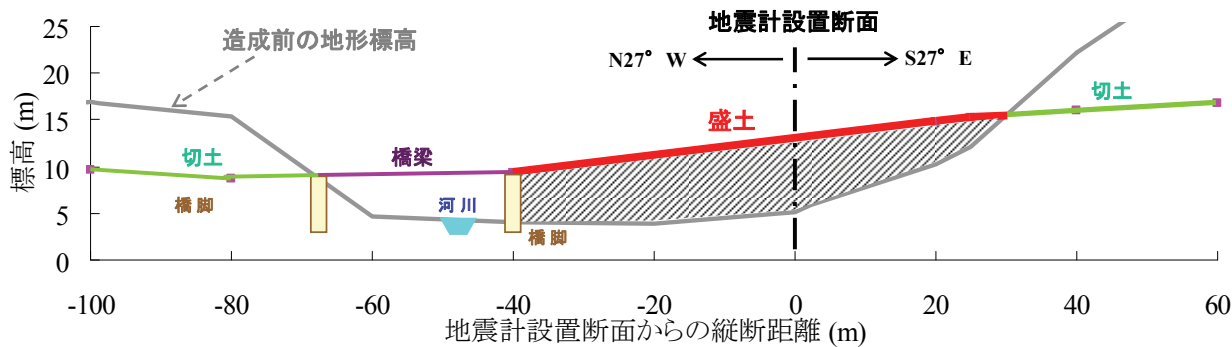


図-4 対象盛土の縦断面図

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17)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に法肩ならびに法尻で得られた地震観測イベントの一覧を示す。

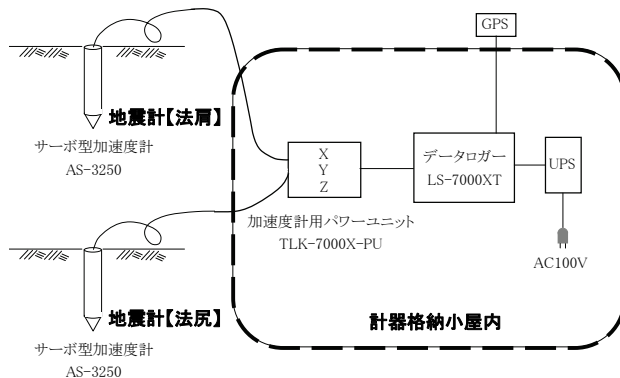


図-5 中小地震観測システム

(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肩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、法肩での地震動が増幅しており、法尻と法肩での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、法尻と法肩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. で示したとおり地震計設置断面における盛土高さは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/sec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(法肩/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¹⁸⁾について考察すれば、3 (2) で評価した対象盛土内の平均的なせん断波速度(250m/sec)と盛土高(8.6m)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。

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

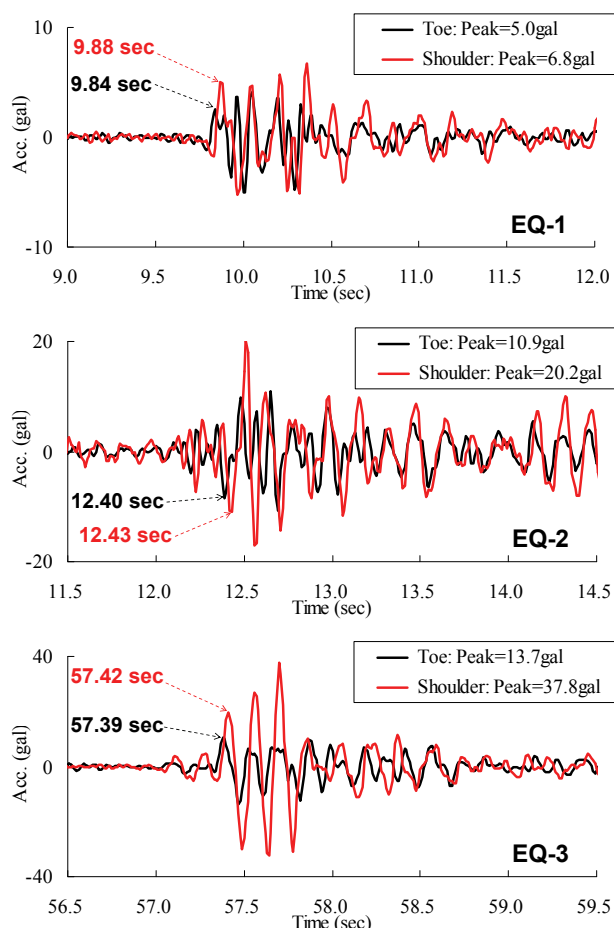


図-6 初動ピークの時間差によるせん断波速度の推定

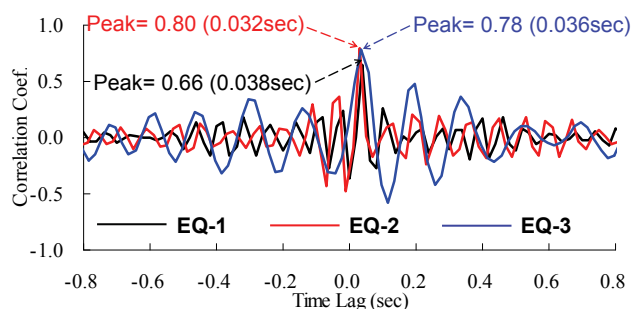


図-7 相互相関係数によるせん断波速度の推定

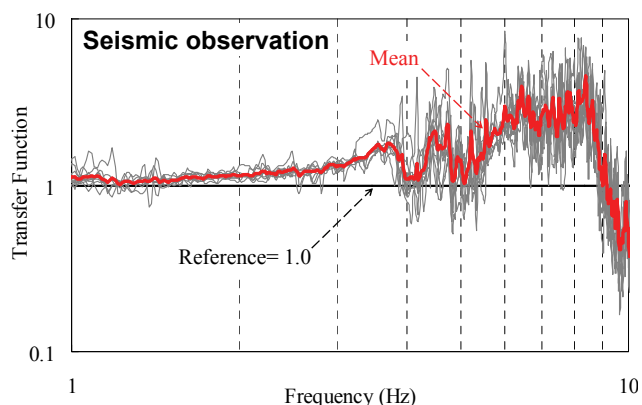


図-8 中小地震観測による伝達関数の評価

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17)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. 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。

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¹⁹⁾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あり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。

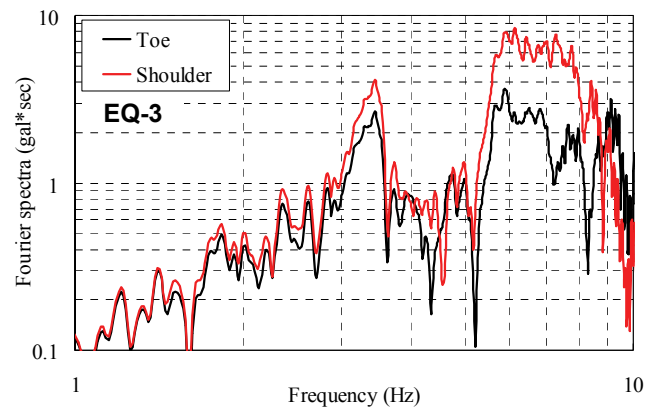


図-9 法尻と法肩でのフーリエスペクトルの比較(EQ-3)

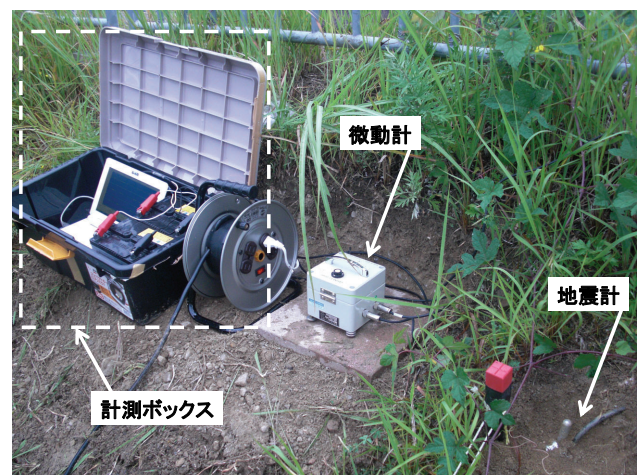


写真-3 微動アレー計測システム

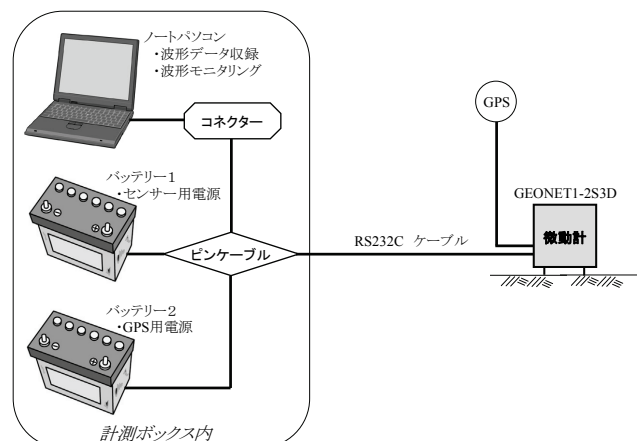


図-10 微動アレー計測システム

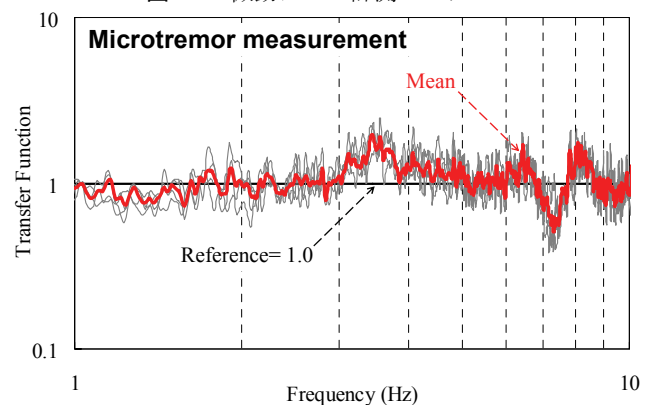


図-11 微動アレー計測による伝達関数の評価

(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²⁰⁾)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考文献21)を参照されたい。微動アレー探査では、3つの地震計を群設置(アレー設置)して、常時微動を同時に計測する。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。

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ー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。なお、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付近の卓越周波数(図-15参照)を説明できるものである。また、図-15に示すように、東側法面の法尻付近においても東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、基礎地盤の速度構造が盛土+基礎地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。



写真-4 微動アレー探査実施状況と採用した微動計

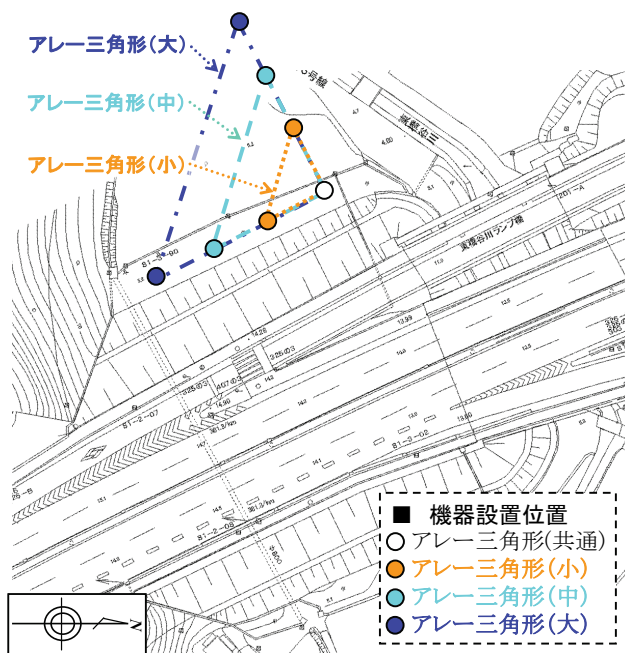


図-12 微動アレー探査の実施測点

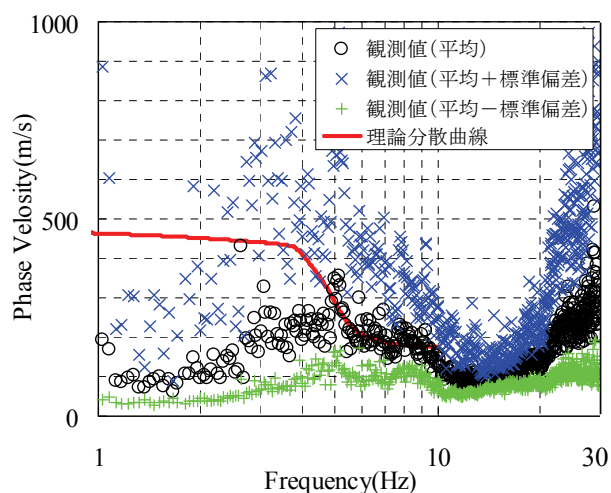


図-13 位相速度スペクトル

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

図-14 フォワードモデリングによる基礎地盤の1次元地盤モデル

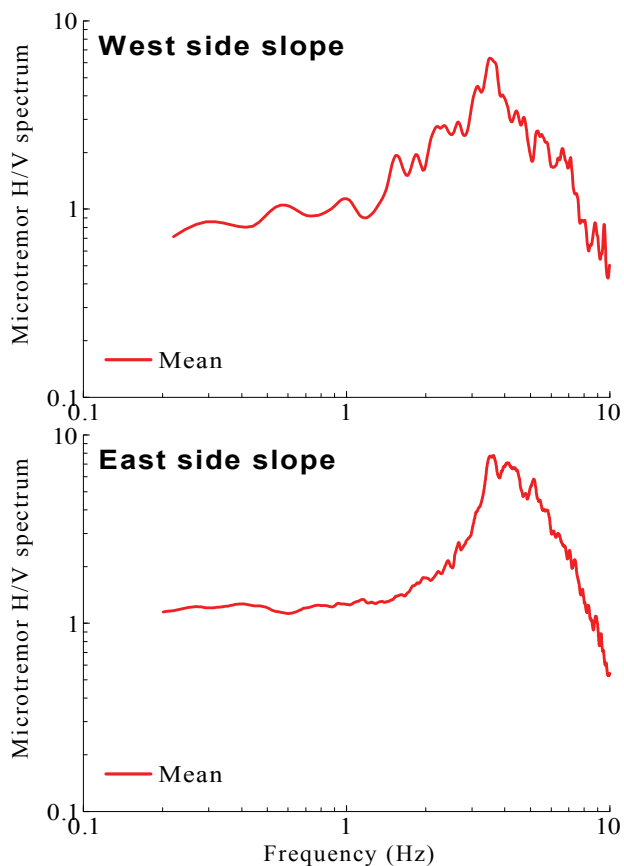


図-15 法面法尻における常時微動H/Vスペクトル

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($=0.333$)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($=0.333$)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²²⁾を採用した。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き戻した波(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。

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

表-2 入力パラメータ一覧

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)	基礎
			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

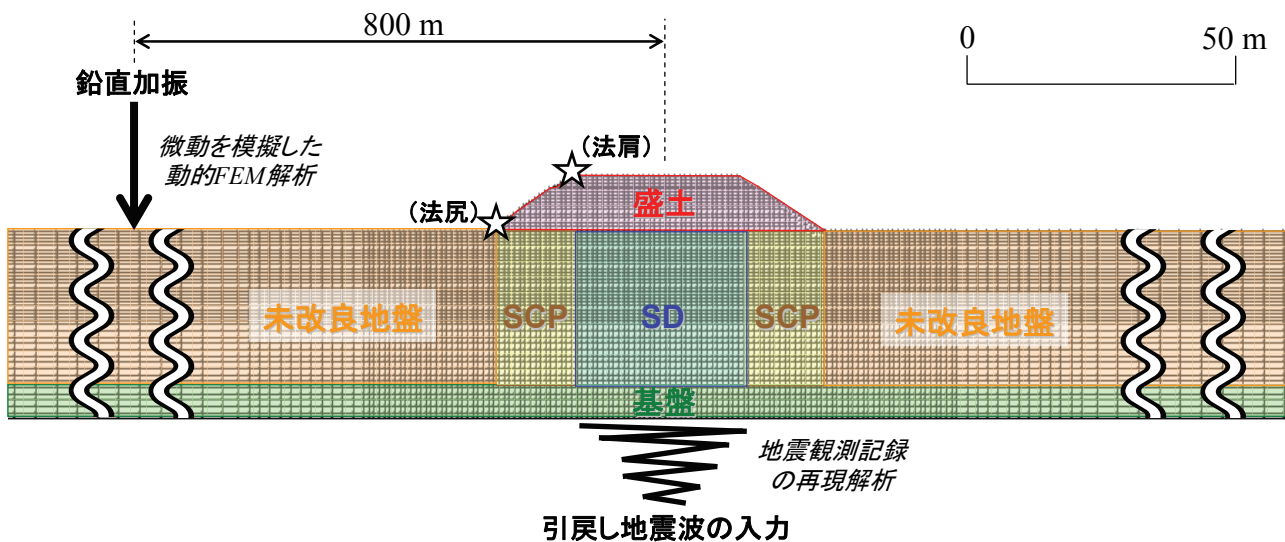


図-16 有限要素解析モデル

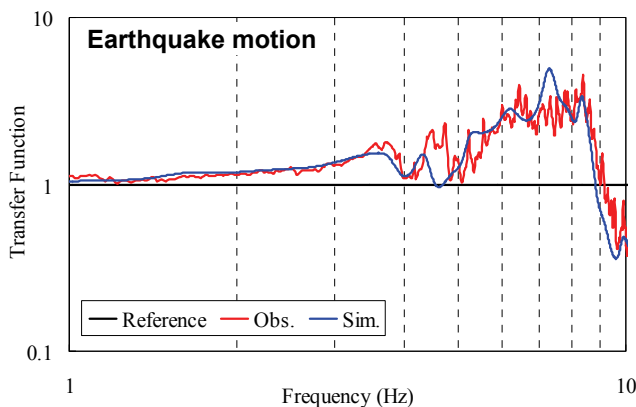


図-17 地震動による伝達関数の比較

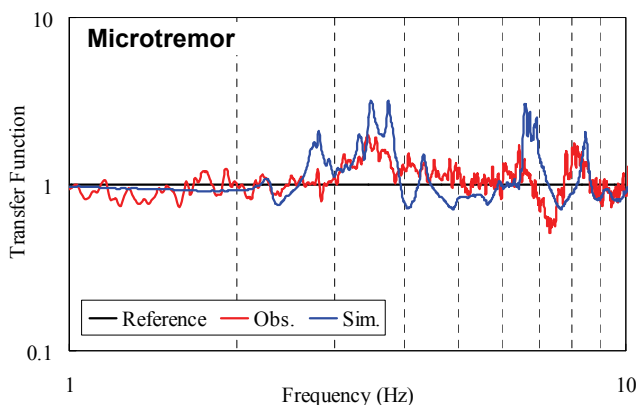


図-18 常時微動による伝達関数の比較

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^{23),24)}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(10波平均)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)で示した法肩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(10波平均)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

達関数が比較的良好な一致を示している。

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、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、アレー計測と動的解析による伝達関数の一致度により、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におい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)に着目した検討を行った。さらに、動的FEM解析を実施し、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) 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、伝達関数の形状に関しては一致度がそれほど高くないものの、ピーク振動数に関しては比較的良好な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のみで、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、アレー計測と動的解析による伝達関数の一致度に基づいて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²⁵⁾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。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) 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.
 - 6) 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.
 - 7) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogai, 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 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.
 - 25) 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.

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.