

排水補強パイプの打設に伴うせん断剛性の増加効果を考慮した
高速道路盛土の耐震性の評価Evaluation of Seismic Performance of a High Embankment for Expressway
in Consideration of the Increase Soil Shear Modulus by Drainage Pipes

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
常田賢一	Ken-chi TOKIDA	(大阪大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究科)
北口峻輝	Shunki KITAGUCHI	(大阪大学大学院工学研究科)
林 訓裕	Kunihiro HAYASHI	(阪神高速道路(株)大阪管理部)

近年、集水地形上に施工された大規模地震による高速道路盛土の被災が相次いでおり、現在、排水補強パイプの打設などによる耐震性向上策が図られている。排水補強パイプの打設には、地下水位の低下効果のほかに、盛土内部のせん断剛性の増加効果もあると推察できる。そこで本研究では、神戸市内の高速道路盛土を対象に、排水補強パイプの施工前後において、常時微動アレー計測を実施することで、高盛土の震動特性(伝達関数)を評価した。そして、常時微動を模擬したFEM解析を実施し、計測と解析による伝達関数が整合するように盛土内部のせん断剛性を推定することで、排水補強パイプ打設に伴うせん断剛性の増加効果を評価した。さらに、せん断剛性の増加効果によって、想定される大規模地震時における高速道路盛土の耐震性能が向上することを明らかにした。

キーワード：地震，盛土，せん断剛性，常時微動計測，FEM解析 (IGC : D-7, E-8)

1. はじめに

近年、大規模地震の強震動の作用による高速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⁾においてそれぞれ盛土の崩壊が発生した。これらの被災盛土は、集水地形上に施工されたものが多く、現在、排水補強パイプの打設などによる耐震性能の向上策が図られている⁵⁾。

排水補強パイプ工法は、ストレーナー加工された鋼管(排水補強パイプ)を斜面に打ち込む非常に単純な工法であり、1960年代に鉄道総合技術研究所によって開発された。近年では、鉄道盛土だけでなく道路法面や宅地盛土などへの対策工として利用されている。太田ほか^{6,7)}によれば、この工法の特徴・機能として、①排水パイプを挿入することによる地盤の締固め効果、②ストレーナーからの地下水排除効果が主であるが、それ以外にも、③鋼管と地盤との引張摩擦、④③による補強土工としての小規模すべりの抑止効果、⑤粗粒土の地盤が崩壊する際に引き起こす膨張変形を抑制する効果(正のダイレタンス抑制効果)などが挙げられる。

排水補強パイプの打設により、地下水位が低下すること

で耐震性が向上する効果が主であると考えられるが⁸⁾、その他の効果として、土のせん断剛性の増加効果もあると推察できる。しかしながら、排水補強パイプの打設に伴う地下水位の低下の効果については様々な検討⁹⁻¹⁴⁾がこれまでなされているものの、せん断剛性の増加効果¹⁵⁾については十分な検討がなされていない。

そこで本稿では、排水補強パイプの打設に伴う道路盛土のせん断剛性の増加について常時微動計測を利用して評価した結果について報告する。具体的には、まず、2013年9月に排水補強パイプが打設された阪神高速北神戸線の高盛土(図-1参照)を検討対象として取り上げる(以後、対象盛土と呼ぶ)。次に、排水補強パイプの打設前(2013年6月)と打設後(2013年11月)に現地(小段・法肩)にお

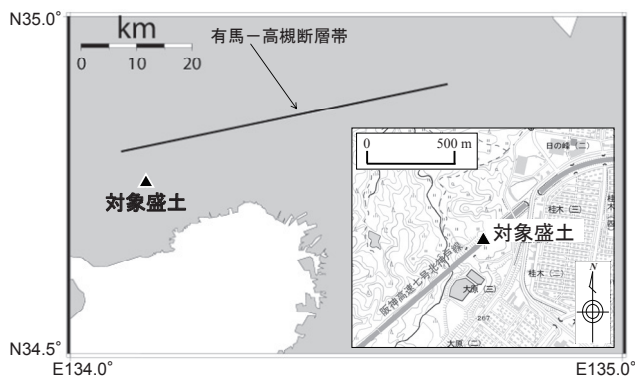


図-1 検討対象とした高速道路盛土

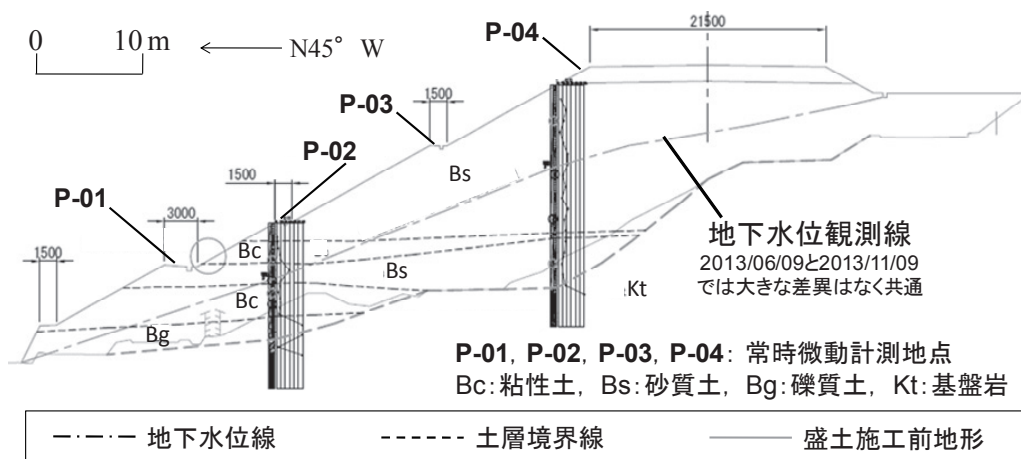


図-2 対象盛土断面と微動計測時における地下水位観測線

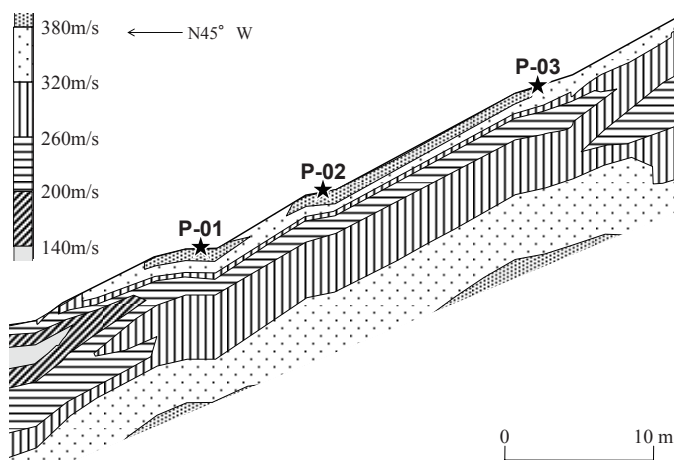


図-3 対象盛土断面での表面波探査によるせん断速度分布

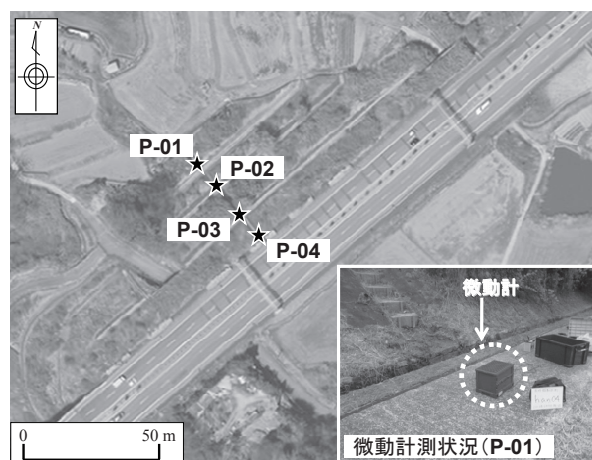


図-4 対象盛土における上空写真と常時微動計測状況



写真-1 表面波探査の実施状況

いて常時微動アレー計測を行い、得られた記録に基づき対象盛土の震動特性(伝達関数)を評価した。最後に、微動を模擬した動的 FEM 解析を実施し、計測と解析による伝達関数を比較検討することによって、排水補強パイプの打設前後におけるせん断剛性の増加を定量的に評価した。さらに、せん断剛性の増加効果によって、解析の物性値の不確

定性や地震時の水圧変化、排水効果に関する不確定性を考慮し、耐震性能が向上する効果を示した。なお、本稿における全ての断面図は、横軸と縦軸のスケールが同じ比率であることを予め述べておく。

2. 対象盛土

対象盛土は、図-1 に示すとおり、神戸市北区に位置する阪神高速 7 号北神戸線の高盛土であり、緊急調査およびマクロ評価による地震危険度評価の結果、補強・調査が必要と判断された盛土の一つ¹⁶⁾である。また、対象盛土は、図-2 に示すように斜面高さ約 20m で 3 つの小段を有する片盛土であり、ボーリング調査と調査孔を利用した地下水位観測(図-2 参照)、表面波探査(図-3・写真-1 参照)¹⁷⁾などの現地調査が行われている。ここに、工学的基盤以浅の盛土内の平均 N 値は、それぞれ 13(P-02 付近)および 18(P-04 付近)となっている。なお、表面波探査が行われた時期は、排水補強パイプ施工以前である。図-4 および図-5 は、対象盛土の平面図であり、微動計測状況および排

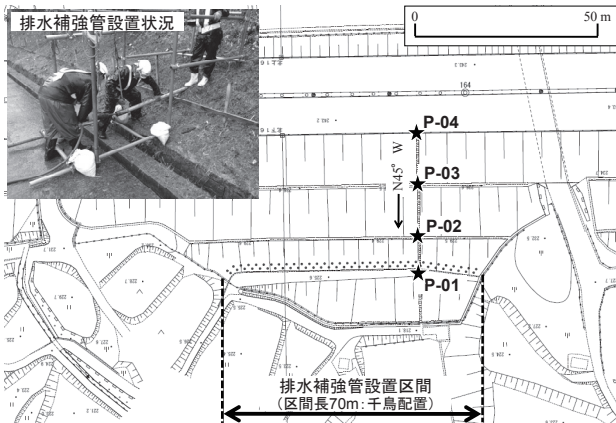


図-5 対象盛土での排水補強パイプの打設状況(平面図)

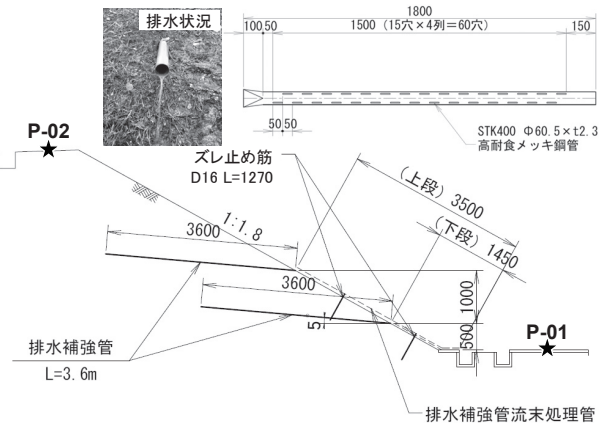


図-6 対象盛土での排水補強パイプの打設状況(断面図)

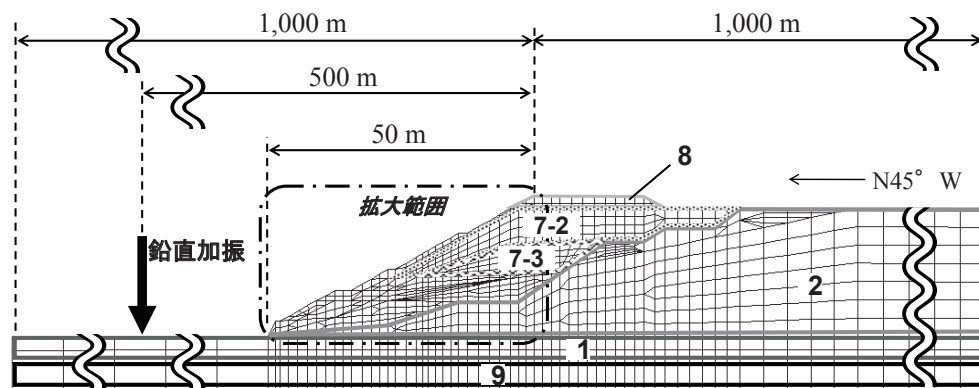


図-7 微動を模擬した対象盛土の動的FEM解析(図中の番号は表-1の地盤材料番号と対応している)

水補強パイプ打設状況とともに示す。排水補強パイプは、図-5および図-6に示すように、法尻に近い法面小段付近に約70mの延長にわたり千鳥配置で打設されており(打設間隔は約2mとなっており)、盛土内への打設長は3.6m(単体長さ1.8mの排水パイプを二本継ぎ足して打設)となっている。なお、図-6内の排水状況の写真は、排水補強パイプ設置直後の雨天時に撮影されたものである。また、排水補強パイプの先端(図-6参照)は、せん断波速度200~260m/sの速度構造を有する盛土層内(図-3参照)に位置することになる。

3. 微動アレー計測

計測に用いた微動計は、車両通行による高周波数に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考慮して速度計(GEONET1-2S3D)を採用した。微動計の仕様等については、既往の文献¹⁸⁾を参照されたい。計測日は、2013年6月9~10日の夜間(パイプ打設前)および2013年11月9~10日の夜間(パイプ打設後)であり、サンプリング周波数は100Hzとした。計測地点は、P-01(小

段(下)), P-02(小段(中)), P-03(小段(上)), P-04(法肩)の計4計測点であり、P-01~P-04における同時連続計測による微動アレー計測を実施した。

図-4の枠内写真には、P-01(小段(下))での常時微動計測状況を示す。計測方向は、盛土断面方向(N45°W-N135°E)の一分成分であり、P-01~P-04でもともに共通である。なお、微動計測日である2013年6月9~10日と2013年11月9~10日では、図-2に示すように、地下水位の観測値に有意な差異がないことがわかっている。ただし、後述する数値解析上では盛土内の地下水位条件を同じと仮定しているが、盛土内の土質が飽和-不飽和状態であること、対策工設置前後で植生条件も異なっていることなどを考慮すると、今後更なるデータの蓄積と分析が必要であると考えている。

微動データの解析処理は、車両通行やノイズ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-01~P-06の各計測点において同時刻とした。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Parzen Window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周波数を読

み取りやすくした。なお、P-01(小段(下))を基準とした対象盛土の伝達関数(H/H スペクトル)の算定結果については、次章で纏めて述べる。

4. 微動を模擬した動的FEM解析

図-7 および図-8 は、対象盛土のFEMモデルである。このモデルは、対象盛土の耐震性能評価のために実施した動的FEM解析¹⁹⁾を参考にし、後述するように常時微動を模擬するホワイトノイズを与えるために左右端に幅広の要素を付け加えたものである。モデル幅 2,000m、総節点数は 24,437、総要素数は 22,813 である。側方および底面はともに粘性境界とした。対象盛土内の土層の境界条件として、表面波探査結果に基づくせん断波速度構造(図-3 参照)を参照する方法も考えられる。しかしながら、本研究の目的の一つとして、既往の耐震性能照査¹⁹⁾に用いられている物性値の妥当性確認であるため、既往照査と同様に設計・施工図(図-2 参照)に基づいて対象盛土内の土層の境界条件を設定した。排水補強パイプの打設対象の土層は、地盤材料 6-1・6-2(図-8 参照)であるが、地盤材料 6-1・6-2(ともに粘性土層)のせん断剛性の増加だけでは、後述する設置前後の伝達関数の変化を十分に再現することができなかったため、地盤材料 6-3(粘性土層：図-8 参照)についてもせん断剛性を 2 割増加させた。なお、地盤材料 6-3 におけるせん断剛性の増加の取り扱いについては、上述した伝達関数の再現性のほかに、排水補強パイプの打設による排水促進に伴う当該粘性土の圧密の影響などを考慮した。また、盛土のような N 値が比較的小さい地盤に排水補強パイプを設置した場合、排水補強パイプの上下において密度が異なると考えられるが、本稿では上下での密度変化の影響を考慮せず、同じ地盤材料の区分内で密度を一定の割合で増加させた。

図-7 に示すように、対象盛土から 500m の遠方地点(基礎地盤地表部)をホワイトノイズによる 327.68 秒間の鉛直方向加振を行うことで(表面波の一種であるレイリー波を仮定することで)常時微動を模擬した²⁰⁾²³⁾。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、基礎地盤、舗装部は全て弾性体でモデル化した。初期せん断剛性および湿潤密度(いずれも排水パイプ打設前)は、土質試験結果やボーリング調査結果を参考に設定された対象盛土における既往の耐震性能評価¹⁹⁾での採用値であり、一定値のポアソン比(=0.333)を仮定することでヤング係数を算定した。

5. 伝達関数の比較

図-9 に各種伝達関数を比較したものを示す。伝達関数は、法肩(P-04)および小段(P-03・P-02)におけるフーリ

表-1 弾性FEM解析のためのパラメータの一覧(表中のハッチングは、せん断剛性初期ケースと増加ケース)

地盤材料	土質	設置前	設置後	設置前	設置後	設置前	設置後
		せん断剛性 G_B (kPa)	せん断剛性 G_A (kPa)	ヤング係数 E_B (kPa)	ヤング係数 E_A (kPa)	湿潤密度 ρ_B (t/m ³)	湿潤密度 ρ_A (t/m ³)
1	基礎地盤	373,000			994,000		2.0
2	基礎地盤	373,000			994,000		2.0
3-1	礫質土	66,000			176,000		2.0
3-2	礫質土	138,000			368,000		2.0
4-1	粘性土	144,000			384,000		1.8
4-2	粘性土	73,000			195,000		1.8
4-3	粘性土	144,000			384,000		1.8
5-1	砂質土	174,000			464,000		1.9
5-2	砂質土	78,000			208,000		1.9
5-3	砂質土	152,000			405,000		1.9
6-1	粘性土	165,000	233,000	440,000	622,000	1.8	1.9
6-2	粘性土	73,000	108,000	195,000	288,000	1.8	1.9
6-3	粘性土	144,000	173,000	384,000	461,000	1.8	1.9
7-1	砂質土	280,000			746,000		1.9
7-2	砂質土	94,000			251,000		1.9
7-3	砂質土	152,000			405,000		1.9
8	舗装部	138,000			368,000		2.0
9	基礎地盤	980,000			2,613,000		2.0

表-2 地震応答解析のためのパラメータの一覧

地盤材料	土質	拘束圧	拘束圧	間隙率 n (-)	最大	せん断強度定数	
		パラメータ m_G (-)	パラメータ m_K (-)		減衰定数 h_{max} (-)	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg.)
1	基礎地盤	0.5	0.5	0.4	0.25	0	50
2	基礎地盤	0.5	0.5	0.4	0.25	0	50
3-1	礫質土	0.5	0.5	0.4	0.25	10	45
3-2	礫質土	0.5	0.5	0.4	0.25	10	45
4-1	粘性土	0.5	0.5	0.6	0.24	50	25
4-2	粘性土	0.5	0.5	0.6	0.24	50	25
4-3	粘性土	0.5	0.5	0.7	0.24	50	25
5-1	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
5-2	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
5-3	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
6-1	粘性土	0.5	0.5	0.6	0.22	50	25
6-2	粘性土	0.5	0.5	0.6	0.22	50	25
6-3	粘性土	0.5	0.5	0.6	0.22	50	25
7-1	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
7-2	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
7-3	砂質土	0.5	0.5	0.5	0.25	30	35
8	舗装部	0.5	0.5	0.4	0.24	0	45
9	基礎地盤	—	—	—	—	—	—

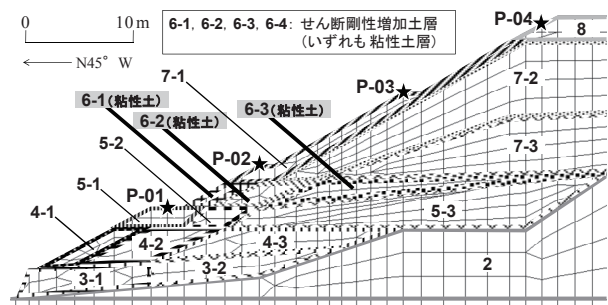


図-8 対象盛土内部の土層構成

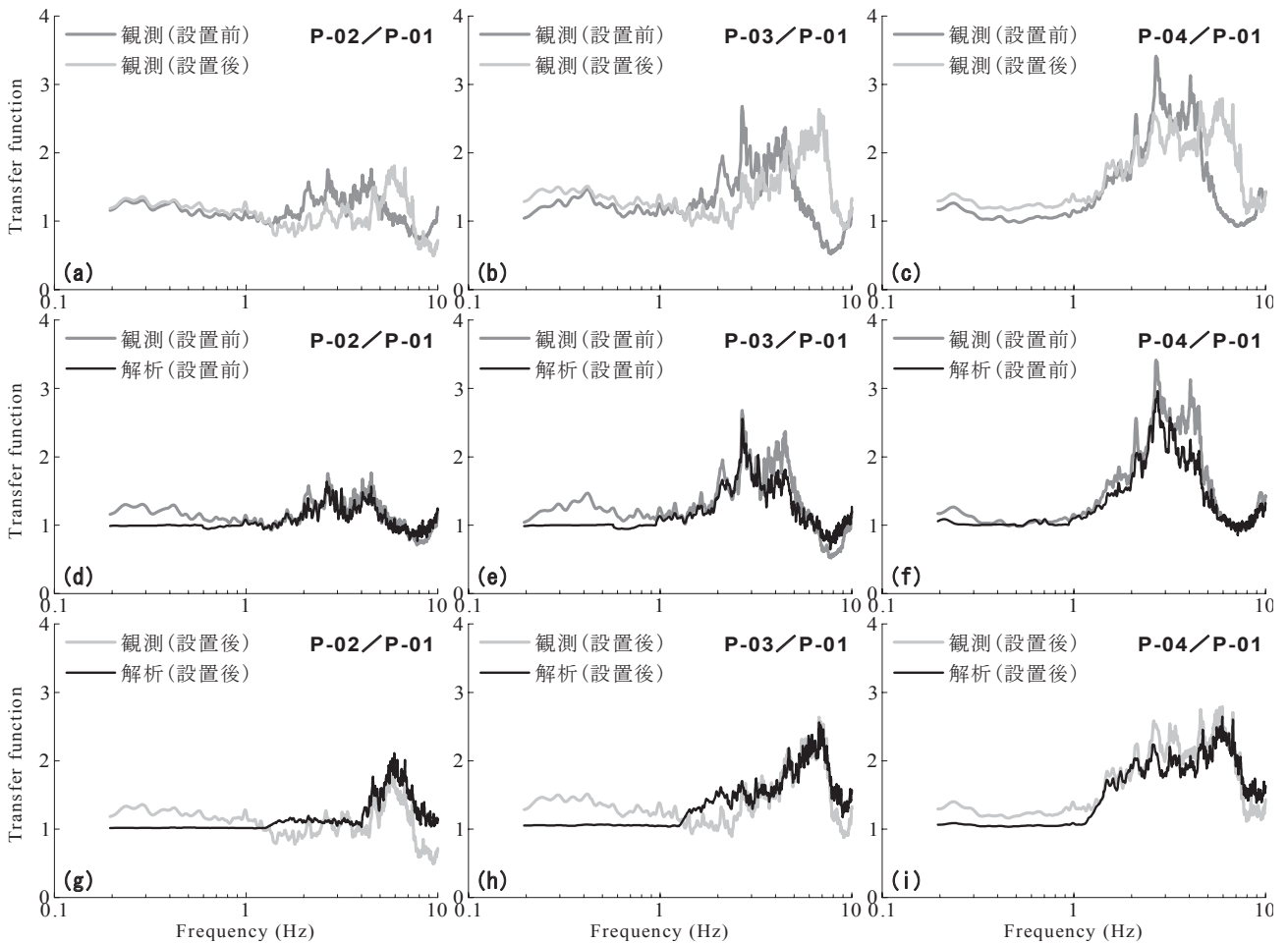


図-9 伝達関数の比較によるせん断剛性の増加効果の確認

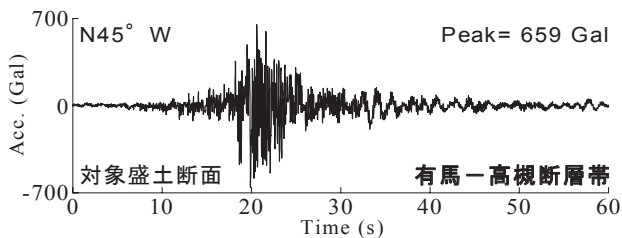


図-10 入力地震動の加速度時刻歴¹⁷⁾

エスペクトルを、小段(下) (P-01)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、アレー計測のケースでは、上述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-02~P-04)における伝達関数(H/Hスペクトル²⁴⁾⁻²⁷⁾を計算した。ここに、微動アレー計測に基づくH/Hスペクトルを利活用^{24),27)}することによって、盛土内のせん断波速度構造が一定の精度で評価できることが報告^{25),26)}されている。一方で、動的解析のケースでは、計測点(P-01~P-04)の位置相当で得られた一区間の模擬微動による速度応答波形(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Parzen Window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(一区間分)を用

いて各計測点(P-02~P-04)における伝達関数を計算した。

まず、図-9(a),(b),(c)は、アレー計測のケースにおける2013年6月9日(打設前)と2013年11月9日(打設後)の伝達関数を比較したものであり、排水補強パイプ打設後は打設前と比べて、卓越周波数が高周波側に移行している。明らかに排水パイプ設置の影響があると思われるが、上述した盛土内の土質条件(飽和-不飽和状態)や植生条件などの影響も考えられ、排水パイプのみの影響と見なせるのかについては今後の検討課題である。

次に、図-9(d),(e),(f)は、アレー計測と動的解析ケースにおける伝達関数(いずれも排水補強パイプ打設前)を比較したものであり、アレー計測による伝達関数を良く再現できている。これは、採用したパラメータセッティング、すなわち既往の耐震性能評価¹⁹⁾に用いられていたせん断剛性の値の妥当性を示唆するものである。ただし、図-9(e),(f)では、4~5Hz前後で解析値よりも観測値のほうが大きくなっており、本解析では上述したようにボーリング調査と表面波探査による土層区分に差異があるため(図-3と図-7・図-8の比較参照)、解析モデルとその地盤物性値において両者の差異を十分に考慮できていないのが原因の一つであると考えられる。具体的には、3Hz付近の一次

ピーク周波数においては観測値と解析値が比較的良好一致を示しているものの、4~5Hz 付近の二次ピーク周波数において再現性が低下していることから、一次ピーク周波数に主に起因していると思われる工学的基盤から地表までの地盤構成についてはボーリング調査結果の適用性が確認できるものの、二次ピーク周波数に主に起因していると思われる表層付近の地盤構成についてはボーリング調査結果だけでなく表面波探査結果を併用する必要性が示唆される。ボーリング調査と表面波探査のハイブリッド評価に基づく盛土内における地盤モデルの構築については今後の検討課題の一つである。

最後に、図-9(g),(h),(i)は、アレー計測と動的解析ケースにおける伝達関数(いずれも排水補強パイプ打設後)を比較したものである。ここに、動的解析のケースにおけるせん断剛性および湿潤密度は、両者の伝達関数が良く一致するように試行錯誤により設定した。具体的には、排水補強パイプを打設した粘性土層(図-6, 図-8, 表-1 参照)のせん断剛性および湿潤密度を、伝達関数の再現性を考慮して変化させた。一致度に応じて変化させたせん断剛性および湿潤密度の変化増分の妥当性に関する詳細検討については今後の課題の一つであるが、表-1 に示すように、対象土層(粘性土層)のせん断剛性の値が主に増加しており、排水補強パイプの打設による盛土内のせん断剛性の増加効果が示唆される。なお、地盤材料 6-1, 6-2, 6-3 のせん断剛性の増加割合については、今後、排水パイプ設置前と同様の位置で表面波探査や PS 検層を行うなどして、妥当性を確認していきたいと考えている。

6. 想定地震による動的 FEM 解析

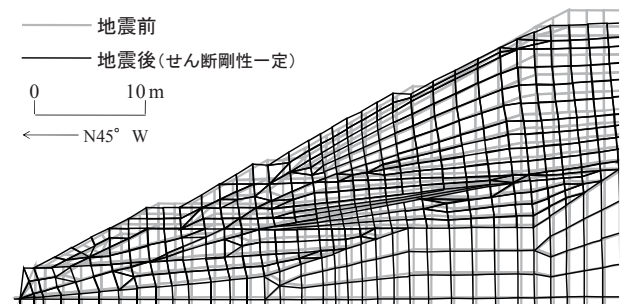
対象盛土周辺で想定される大規模地震による地震動を入力した動的非線形 FEM 解析を実施した。具体的には、前章で設定した排水補強パイプの打設に伴う高盛土内部におけるせん断剛性の増加(表-1 参照)が高速道路盛土の耐震性能に及ぼす影響について検討を行った。なお、本稿では道路盛土を対象としているため、地震後の天端における残留沈下量に焦点を当てる^{28),29)}。具体的には、段差を考慮した車両走行実験²⁸⁾に基づく残留沈下量の許容値²⁹⁾を踏まえて、以下の議論を行う。

FEM モデルおよび境界条件については前章のもの(図-7 および図-8 参照)と同様である。図-10 は入力地震動の加速度時刻歴であり、有馬一高槻断層帯(図-1 参照)による対象盛土地点でのサイト特性を考慮した推定地震動¹⁷⁾を採用した。地震動推定の詳細については、既往研究¹⁷⁾

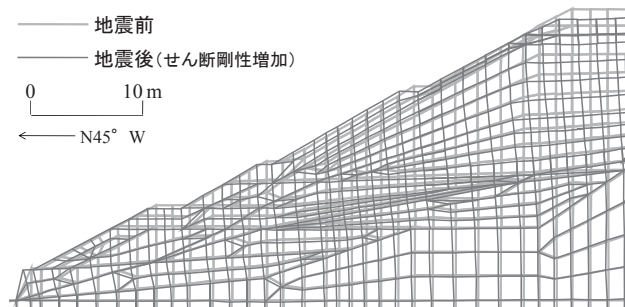
を参照されたい。

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 60 秒間(図-10 参照)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(最深層を除く)および高盛土は、すべてマルチスプリングモデル^{30),31)}でモデル化、および最深部の基礎地盤は弾性体でモデル化し、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、独自に実施した物理試験の結果を参考に設定した。表-2 に示す最大減衰定数およびせん断強度定数(粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ)は、いずれも対象盛土における既往の耐震性能評価¹⁹⁾での採用値を転用した。

よって、本解析ケースは、せん断剛性初期ケースとせん断剛性増加ケースの 2 つであり、両解析ケースにおける入力パラメータの差異は、湿潤密度の比較的小さな差異を除けば、本研究で着目している排水補強パイプの打設に伴うせん断剛性増加効果の有無が主體的であり(表-1 参照)、盛土内の地下水位条件(図-2 参照)を含めたその他の解析



(a) せん断剛性初期ケース



(b) せん断剛性増加ケース

図-11 残留変形状況

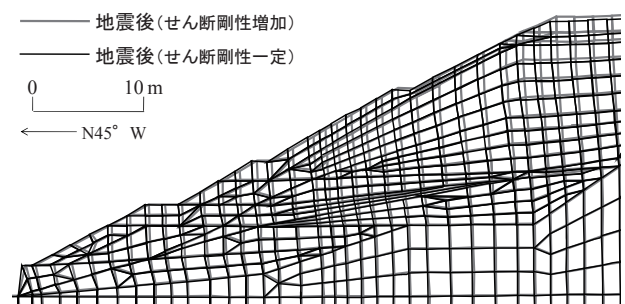


図-12 せん断剛性の増加が残留変形量に及ぼす影響

パラメータについては、両ケースともに同じ値である。すなわち、排水パイプの解析モデル³²⁾、土とパイプの周面摩擦係数³³⁾、せん断剛性の増加に伴うせん断強度定数(粘着力 c)の増加³⁴⁾などは、いずれも考慮していない。また、数値解析上では、排水パイプが打設されていても、水圧が常時ならびに地震時において変動しないと仮定している。

図-11 に動的非線形 FEM 解析による対象盛土の想定地震後の残留変形状況(注: 5 倍スケール)を盛土解析モデル(想定地震前)とともに示す。図-11 に示すとおり、せん断剛性初期ケースとせん断剛性増加ケースでは、地震後の変形状況が類似しているものの、せん断剛性増加ケースのほうが残留変形の程度が小さくなっている。図-12 は、せん断剛性初期ケースの残留変形状況(図-11(a) 参照)とせん断剛性増加ケースの残留変形状況(図-11(b) 参照)を重ね合せたもの(両図ともに 5 倍スケールを採用)である。天端における残留沈下量に着目すると、せん断剛性初期ケースでは 29cm およびせん断剛性増加ケースでは 21cm となっており、3 割程度低減される結果となった。これは、従来の盛土の耐震検討では、排水補強パイプの打設による地下水位の低下に主眼が置かれ³⁵⁾、十分に考慮されていなかった排水補強パイプの打設に伴う盛土内部のせん断剛性の増加効果が、道路盛土の耐震性能の向上に寄与していることを示唆するものである。

ただし、盛土天端における残留沈下量の低減の主要因が、せん断剛性の変化による応力一ひずみ関係の変化²⁰⁾によるものなのか、せん断剛性の変化による盛土斜面の固有周波数の変化^{36),37)}によるものなのか、現時点では言及することができない。

7. まとめ

本稿では、神戸市北区の高速道路盛土を対象に、排水補強パイプの打設前後において、多点同時計測による微動アレー計測とその微動計測を模擬した FEM 解析をそれぞれ行い、盛土内のせん断剛性を比較評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高速道路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、高盛土の震動特性(伝達関数)を評価することができる。
- (2) 遠方でのホワイトノイズ鉛直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速道路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、盛土断面内におけるせん断剛性の分布を推定することが可能である。

- (3) 排水補強パイプ打設前の対象盛土断面内におけるせん断剛性の推定値は、既往の耐震性能評価における採用値とほぼ一致する結果となった。
- (4) 排水補強パイプ打設後の対象盛土断面内(パイプ打設層)におけるせん断剛性の推定値は、打設前の推定値よりも増加しており、排水補強パイプの打設による盛土内部のせん断剛性の増加効果を確認した。
- (5) 排水補強パイプの打設に伴う盛土内部のせん断剛性の増加効果は、想定地震による盛土天端の残留沈下量の低減に貢献しており、道路盛土の耐震性能の向上に寄与していることを確認した。

今後は、現地でのボーリング調査の追加実施や現地踏査・観測の継続実施などにより、せん断剛性の変化量の増分度合を把握するなどして、排水補強パイプの打設に伴うせん断剛性の増加効果の定量的評価に関する方向性を見出ししていきたい。

謝辞

常時微動計測の実施にあたっては、河野真弓氏・高町茉莉氏・村上雄亮氏・伊東達彦氏(ともに広島大学大学院工学研究科)および谷本隆介氏・VU NHAT LINH 氏(ともに大阪大学大学院工学研究科)にご協力いただきました。また、科学研究費補助金・基盤研究 C「地表面形状が表面波の分散曲線に及ぼす影響の評価と補正～地盤脆弱部の適切な把握へ～」(25420505)の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (公社)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) (公社)地盤工学会：2007 年能登半島地震道路災害データ集，74p., 2007.
- 3) 横田聖哉，石田誠幸，高木宗男：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，pp.1493-1494, 2010.
- 4) 安部哲生，横田聖哉，日下寛彦，金田和男：東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の地震被害について，第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.959-960, 2012.
- 5) 秋田剛，常田賢一：既設道路盛土の安定性向上のための排水パイプの適用性の検証，平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会梗概集，防災・保全部門：No.22., 2012.
- 6) 太田英将，柏熊誠治，橋高敏晴：斜面对策の新工法－排水補強パイプ・鋼管膨張型ロックボルト－，第 43 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.543-546, 2004.
- 7) 太田英将，柏熊誠治，國眼定：豪雨と地震に対して効果を発揮した斜面安定化対策の 2 つの事例，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.1145, pp.2285-2286, 2005.
- 8) Linh, V. H., 常田賢一，秋田剛，吉開裕也：排水パイプの排水特性を考慮した地下水位の設定法に関する

- 研究, 第 58 回地盤工学シンポジウム平成 25 年度論文
文集, 地盤工学会, pp.165-170, 2013.
- 9) 秋田剛, 常田賢一, 平山淳基, 柏熊誠治: 排水パイ
プの排水機能に関する室内模型排水実験, 第 46 回地
盤工学研究発表会発表講演集, No.964, pp.1927-1928,
2011.
 - 10) Linh, V. H., 常田賢一, 秋田剛: 排水パイプの排水特
性のモデル化及び解析的評価, 第 47 回地盤工学研究
発表会発表講演集, pp.1755-1756, 2012.
 - 11) 吉開裕也, 常田賢一, 秋田剛, 上出定幸: 排水パイ
プ設置時の地下水位分布に関する土層実験, 第 48 回
地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2009-2010, 2013.
 - 12) 北口峻輝, 常田賢一, Linh, V. H., 秋田剛, 吉開裕也,
上出定幸: 排水パイプの排水特性およびその評価に
関する検討, Kansai Geo-Symposium 2013 論文集, 地
盤工学会, pp.197-202, 2013.
 - 13) Linh, V. H., 常田賢一, 北口峻輝, 上出定幸: 道路盛
土に対する排水パイプの設計法に関する解析的研究,
第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1709-1710,
2014.
 - 14) 林訓裕, 常田賢一, 北口峻輝, Linh, V. H.: 実盛土に
おける排水パイプの効果に関する検討, 第 49 回地盤
工学研究発表会発表講演集, pp.1713-1714, 2014.
 - 15) 秦吉弥, 魚谷真基, 常田賢一, 一井康二, 北口峻輝,
林訓裕: 排水補強パイプの打設に伴う盛土内におけ
るせん断剛性の増加効果, 地盤工学会誌, Vol.62, No.7,
pp.16-19, 2014.
 - 16) 林訓裕, 足立幸郎, 甲元克明, 山尾泰之, 常田賢一,
林健二: 道路盛土の緊急点検および地震危険度マク
ロ評価に基づく耐震対策, 第 32 回地震工学研究発表
会講演論文集, 土木学会, Paper No.4-294, 2012.
 - 17) 秦吉弥, 常田賢一, 林健二, 林訓裕: 高速道路盛土
の耐震性能照査に適した入力地震動の設定手法, 地
盤と建設, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.185-193, 2013.
 - 18) 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.
 - 19) 魚谷真基, 常田賢一, 秦吉弥, 北口峻輝, 林訓裕:
改良 O 型 Newmark 法を用いた想定地震時における道
路盛土の残留変形量の評価, Kansai Geo-Symposium
2013 論文集, 地盤工学会, pp.123-128, 2013.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) Uebayashi, H: Extrapolation of irregular subsurface str
uctures using the horizontal to vertical spectral ratio of
long-period microtremors, *Bulletin of the Seismological
Society of America*, Vol.93, pp.570-582, 2003.
 - 23) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 丸山喜久, 酒井久和:
常時微動 H/V スペクトルに基づく我孫子市布佐地区
の地盤におけるせん断剛性の 2011 年東北地方太平洋
沖地震後の回復過程とそのシミュレーション, 第 59
回地盤工学シンポジウム平成 26 年度論文
文集, 地盤工学会, pp.387-394, 2014.
 - 24) 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.
 - 25) 古川将也, 森伸一郎: 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, pp.953-954, 2010.
 - 26) 柴尾享, 一井康二, 秦吉弥, 山田雅行, 竹澤清一郎:
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, pp.1713-1714, 2011.
 - 27) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一: 南海ト
ラフ巨大地震 (M_w 9.0) による土構造物の耐震性評価
事例, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, 地盤工学
会, pp.89-94, 2014.
 - 28) 依藤光代, 常田賢一: 地震時の段差被害に対する補
修と交通開放の管理・運用方法について, 平成 19 年
度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部
門: No.16, 2007.
 - 29) (一財) 土木研究センター: 盛土の性能評価と強化・
補強の実務, (一財) 災害科学研究所・盛土の性能向
上技術普及研究会編, 228p., 2014.
 - 30) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space
plasticity model for cyclic mobility, *Soils and
Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
 - 31) 森田年一, 井合進, Liu, H., 一井康二, 佐藤幸博:
液状化による構造物被害予測プログラム FLIP におい
て必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾空港技術
研究所資料, No.869, 1997.
 - 32) 渡邊論, 浅野嘉文, 杉山友康, 西垣誠: 排水パイ
プが打設された盛土の弾塑性 FEM を用いた安定性評価
に関する一考察, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講
演集, pp.2009-2010, 2013.
 - 33) 太田英将, 柏熊誠治: 圧入式排水補強パイプの引抜
試験, 第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.
2185-2186, 2002.
 - 34) 本山賢司, 奈良俊介, 加地隆之: 地盤パラメタの設
定と工学的基盤深さによる地震応答解析結果への影
響について, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概
要集, II-170, pp.339-340, 2008.
 - 35) 常田賢一: 地盤構造物に固有な長寿命化とその取り
組みの姿勢, 地盤工学会誌, Vol.62, No.7, pp.1-5, 2014.
 - 36) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和: 大規模地震に
よる盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周
波数帯域に関する一考察, 第 58 回地盤工学シンポジ
ウム平成 25 年度論文
文集, 地盤工学会, pp.225-232,
2013.
 - 37) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和: 高盛土の残
留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域に関
する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.
747-759, 2014.

(2015 年 6 月 2 日 受付)