

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289147

研究課題名(和文)地震で変状した堤防の耐浸透・耐越流性能の評価と新しい性能指標の提案

研究課題名(英文) Seepage and overtopping performance of deformed levee after earthquake

研究代表者

渦岡 良介 (Uzuoka, Ryosuke)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：40333306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：地震によって堤防は変形し、天端の沈下だけでなく、ひずみやクラックなどの変状が生じる。このような変状が生じた堤防の耐浸透・耐越流性能は明らかになっておらず、従来は堤防天端の沈下量だけで性能評価がなされている。本研究では、堤防を構成する不飽和土の力学に立脚して模型実験や数値解析を用いて、地震による変状を受けた堤防の耐浸透・耐越流性能を明らかにする。遠心模型実験では、加振前後の変状の有無によって堤体の透水性が変化することを示し、変状した堤体は川裏側で浸透破壊の可能性が高くなる可能性を示した。また、浸透流解析では、堤体形状の変化では説明できない要因が変状後の堤体の透水性に影響している可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, coast and river levees caught the influence of external force by tsunami as well as earthquake. However there were few studies on seepage and overtopping performance of damaged levees after earthquake against tsunami and rainfall. In this study, we investigated seepage performance of deformed levees after shaking and evaluated durability of deformed levee under plural external forces such as earthquake and tsunami using centrifugal model tests and numerical simulations. We examined the effects of some experimental parameters such as input motions and water rising velocity on the seepage performance. The centrifugal model tests showed that seismic deformation changed the seepage performance of levees, and progressive failure during seepage might occur at the downstream side of levee slope. The numerical simulations showed that factors except for configuration change might affect the seepage performance of deformed levee.

研究分野：地盤工学

キーワード：堤防 地震 耐浸透性能 耐越流性能

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、河川・海岸堤防、道路・鉄道盛土などの土構造物が大きな被害を受けた。特に沿岸部の土構造物は震動に加えて津波の外力を受け、津波の越流水深が大きい地点では河川・海岸堤防の破堤、道路・鉄道盛土の侵食が発生し、震動のみによる被害よりも被害程度はさらに大きなものとなっている。

地震後に津波・豪雨時の様々な外力が時間差を伴って作用した場合の堤防の破壊挙動や後続の外力に対する性能評価の問題については、2010年以前から指摘されていた¹⁾ものの、既往の研究は少ない。特に、地震後の堤防ではひずみやクラックなどの変状が生じるが、このような変状が生じた堤防の耐浸透・耐越流性能は明らかになっておらず、従来は堤防天端の沈下量だけで性能評価がなされている。また、地震後の津波や豪雨に対する堤防の破壊挙動や耐浸透・耐越流性能に着目した研究²⁾は少なく、これらを定量的に評価した国内外の研究はほとんどない。

2. 研究の目的

地震・津波および地震・豪雨のような複合災害における様々な外力作用下において、先行の地震外力による堤防の変状を考慮し、後続の浸透・越流などの外力に対する堤防の性能を明らかにすることを目的とする。本研究では、堤防を構成する不飽和土の力学に立脚して模型実験や数値解析を用いて、地震による変状を受けた堤防の耐浸透・耐越流性能を解明する。

3. 研究の方法

はじめに堤防材料の力学特性に着目し、繰返しせん断履歴が堤防材料の浸透特性に与える影響を検討する。次に堤防模型の動的遠心模型実験、震動後の浸透を考慮した堤防の遠心模型実験およびその数値解析を実施して、震動により変状した堤防模型の耐浸透性能について検討する。

(1) 繰返しせん断履歴が堤防材料の浸透特性に与える影響

三軸試験は飽和過程、圧密過程、透水試験過程、非排水繰返し載荷過程、透水試験過程の5つに分けられる。透水試験過程では、三軸圧力室内で二重管ピュレットを2つ用いて変水位透水試験を行った。豊浦砂とけい砂7号を質量比8:2で混ぜた混合砂を試料として用いた。その物理特性は、土粒子密度 $s_s = 2.569 \text{ g/cm}^3$ 、最大乾燥密度 $d_{max} = 1.61 \text{ g/cm}^3$ 、最少乾燥密度 $d_{min} = 1.337 \text{ g/cm}^3$ である。

表1に各ケースの実験条件を示す。実験条件は同じ試料を用いて行った繰返し非排水液状化試験の結果をもとに決定した。その試験で得られた液状化強度曲線を図1に示す。供試体は、直径50mm高さ100mmの円柱供試体となるよう相対密度 D_r が50%になるよう

表1 三軸試験の実験条件

Case No.	case1	case2	case3	case4
拘束圧	49kPa			
供試体寸法	Φ50mm×H100mm			
相対密度	51.7%	48.4%	51.5%	51.7
初期間隙比	0.753	0.764	0.754	0.753
応力比	0.15→0.2	0.1→0.15→0.2	0.15→0.2	0.1→0.15→0.2
繰返し載荷回数	10回		20回	

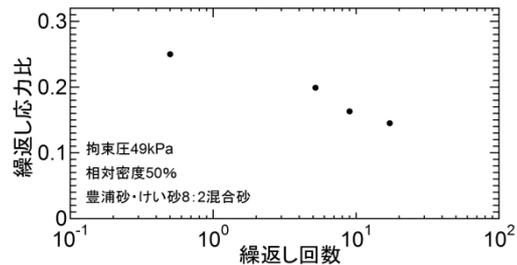


図1 液状化強度曲線

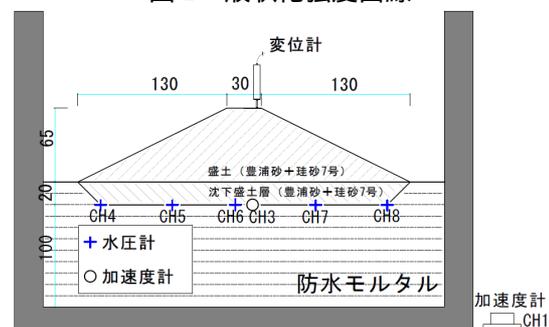


図2 動的遠心模型

表2 動的遠心模型実験ケース

実験条件	Case07	Case08	Case09
沈下盛土層厚	20 mm	20 mm	20 mm
入力周波数	18 Hz	18 Hz	18 Hz
加振時間	1.0 s	1.5 s	1.5 s
沈下盛土層の相対密度	49.7 %	50.3 %	46.3 %
堤防部の締固め度	79.6 %	79.6 %	80.2 %

に空中落下法により作製する。全4ケース行うが、case1、case2は繰返し載荷回数10回、case3、case4は繰返し載荷回数20回で行い、case1・case3は繰返し応力比を0.15 0.2の順に増加させ、case2、case4は繰返し応力比を0.1 0.15 0.2の順に増加させた。なお、各ケースとも、各載荷の終了ごとに一度排水状態とし体積変化を許した状態で透水係数を計測した。なお、応力比0.2に至ると、全ケースで液状化が発生したことを確認した。

(2) 堤防模型の動的遠心模型実験

本実験は遠心模型実験装置を用いて25g場で行う。図2に実験模型図を示す。表2に実験ケースを示す。なお表の数値は模型スケールで記述している。基礎地盤は、堤防の変状のみに着目するために、防水モルタルで作製した。また、基礎地盤には盛土の自重圧密による沈下部分を模擬して、くぼみ(沈下盛土層20mm)を作製した。実験模型図に示すように、加振時の堤防底部の応答加速度計測、過剰間隙水圧の計測また浸透実験時の堤体内部の水位把握のために加速度計と間隙水

圧計を設置した。その後、くぼみに盛土の試料を空中落下法により目標相対密度 D_r が 50.0 % になるように敷き詰めた。盛土の材料は(1)で用いた材料と同じである。盛土寸法は天端幅 30 mm、高さ 65 mm、底面幅 290 mm で法面勾配を 1:2 に調整した盛土を作製した。盛土は含水比 $w=13.0$ %、目標締固め度 $D_c=80.0$ %、乾燥密度 $\rho_d=1.29$ g/cm³ となるように調整し、設置した。また、天端に変位計を設置し、加振時の鉛直変位量の計測を行った。

盛土を設置後、遠心模型実験装置により 25g まで遠心加速度を上昇させ、25cst に調節した粘性流体を地表面から 5mm の高さまで上昇させた後、振動台を用いて 18Hz (実スケールで 0.7Hz) で加振を行った。

(3) 震動により変状した堤防の耐浸透性能に関する遠心模型実験

浸透実験は加振を行った動的実験に続いて 25g 場でを行った。図 3 に遠心力場浸透実験概要図を示す。表 3 に浸透実験ケースを示す。ここでは、(2)で述べた Case08 と Case09、および加振なしの Case10 について述べる。浸透実験時の堤体内部の水位を把握するために間隙水圧計 (CH04 ~ 08) を、流入側の水位を把握するために土槽流入口付近に同様に間隙水圧計 (CH10) を設置した。実験中の水位調整は貯水タンクに接続した空気圧レギュレーターによりタンク内の空気圧を調整して行い、浸透の様子を土槽正面に設置したカメラによって撮影した。さらに排水側の流量を計測するために排水側タンク底部に間隙水圧計 (CH18) を設置している。本実験では緩やかな水位上昇を再現することを目的とし、2.0 分毎に 1.0 cm の水位上昇を行い、加振による変形を考慮し、堤体高さ 6.5 cm の約 60% の高さである 4.0 cm まで水位を 8 分かけて上昇させた。そして地表面から 4.0 cm の位置で 10 分間水位を一定にし、堤体内の水位の変化および川裏側への浸透流量を計測した。

(4) 震動により変状した堤防の耐浸透性能に関する数値解析

(3)の実験結果に対して、三相多孔質体理論に基づく飽和・不飽和浸透流解析³⁾を実施した。本解析では、(3)で述べた Case08 ~ 10 の浸透実験を対象とし、動的実験後の形状を再現した二次元有限要素モデルを作成し、形状の差による浸透流量の違いを検討した。材料パラメータは同じ盛土試料を用いた室内土質試験 (透水試験、保水性試験) から設定した。土骨格の変位境界条件は全節点固定としている。水理境界条件としては、モデルの左側 (川表側) に全水頭を与えることによって水位の上昇を再現した。盛土の右側 (川裏側) については間隙水圧が負の値からゼロになると排水が始まる浸出境界を設定した。間隙空気に関する境界条件としては、盛土の天

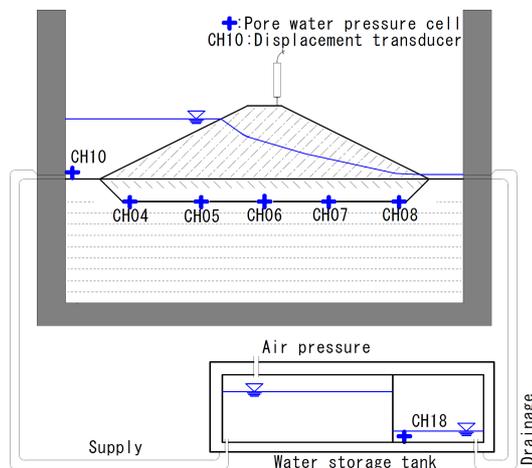


図 3 加振後の浸透実験模型

表 3 加振後の遠心模型実験ケース

Case	水位上昇速度	目標水位高さ
01	3.0 cm/min	4.5 cm
02	3.0 cm/min	4.5 cm
03	3.0 cm/min	4.5 cm
04	3.0 cm/min	4.5 cm
05	0.5 cm/min	天端付近
06	0.5 cm/min	天端付近
07	0.5 cm/min	天端付近
08	0.5 cm/min	4.0 cm
09	0.5 cm/min	4.0 cm
10	0.5 cm/min	4.0 cm

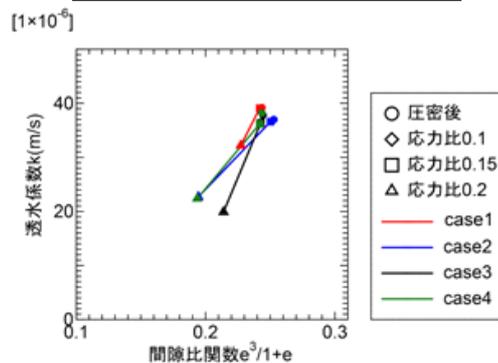


図 4 各ケースの透水係数の変化

端および法面で大気圧一定となる条件を与えた。初期応力解析後にモデルの川表側法面に実験上で得られた水位 (CH10 での計測値) を全水頭として与え浸透流解析を行った。各ケースそれぞれ実験で要した時間に達するまで解析を行った。

4. 研究成果

(1) 繰返しせん断履歴が堤防材料の浸透特性に与える影響

Taylor は、間隙比と透水係数の関係が $k=C_2e^3/(1+e)$ などのように表せると提案している⁴⁾。図 4 に、Taylor により提案された透水係数と間隙比の関係式をもとに、本研究で得られた透水係数 k と間隙比関数 $e^3/(1+e)$ の関係を示す。図より、全ケースの各載荷段階での点は多少バラつきがあるものの、概ね直線上にプロットされていることが分かる。

以上より、繰返し载荷を受けた供試体は、間隙比・透水係数ともに減少し、応力履歴の違いによる透水性能への影響はほとんど受けないことが分かった。本研究で使用した材料では、繰返しせん断による土粒子の配列の変化などは透水性に大きな影響を与えず、密度の変化により透水性が悪くなったことが確認できた。

(2) 堤防模型の動的遠心模型実験

ここでは、代表的な結果として表 2 における Case08 の結果を述べる。なお、Case08 と Case09 の実験条件はほぼ同一であり、概ね同様な結果が得られたことから、実験の再現性を確認することができた。図 5 に加振後の正面写真を示す。図 6 に入力加速度、図 7 に加振による天端沈下量および図 8 に過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。過剰間隙水圧比は、加振直前の水圧計の最小値から加振時における間隙水圧の差を、オスターバーグ (1957) による地盤内応力の影響値を考慮した有効上載圧で除して算出している。なお、加速度と沈下量の結果は模型スケールで記述している。図 5 から堤防底部から法尻部分にかけて側方に流動し、それに伴い堤防表面を中心にクラックが発生したことを確認した。図 8 より CH08 地点で過剰間隙水圧比が 0.95 程度の値を示しており、沈下盛土層の一部で液状化がおきていると考えられる。

(3) 震動により変状した堤防の耐浸透性能に関する遠心模型実験

ここでは、Case08 ~ 10 についての実験結果について述べる。図 9 に浸透実験における川裏側浸透流量の時刻歴を示す。図より、無加振の Case10 に比べて加振した Case08、Case09 の方が堤体を浸透した全流量が減少していることがわかる。図 10 に Case08 における浸透過程 1080 秒後の正面写真を示す。川裏側 (写真右側) において法尻の流出が拡大していることがわかる。この流出は川裏法面中腹部にまで到達しており、加振なしの Case10 では見られない傾向である。この結果より、震動後の堤防では浸透流量の大きな変化はないものの、川裏法尻部での進行的な浸透破壊が起きやすくなる可能性があることがわかった。この川裏法尻部での浸透破壊は、地震で変状した堤防の耐浸透性能を評価するうえで新しい指標になると思われる。

(4) 震動により変状した堤防の耐浸透性能に関する数値解析

図 11 に Case08 ~ Case10 における解析で得られた川裏側浸透流量の結果を模型実験の結果と比較したグラフを示す。Case10 の解析結果と模型実験の結果は概ね一致したが、どのケースにおいても開始から 700 ~ 900 秒における川裏法尻部分の流出に伴った流量勾配の増加は、本解析では再現されていない。また、Case08 と Case09 では解析が実験結果

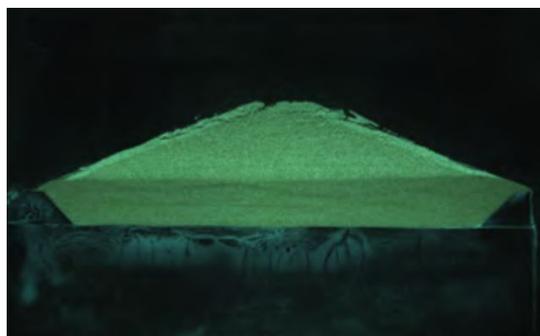


図 5 加振後の実験模型

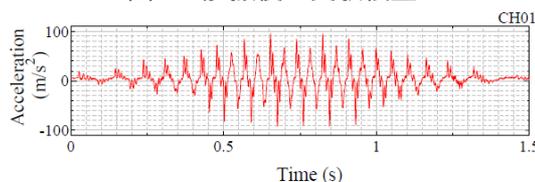


図 6 振動台での加速度応答の時刻歴

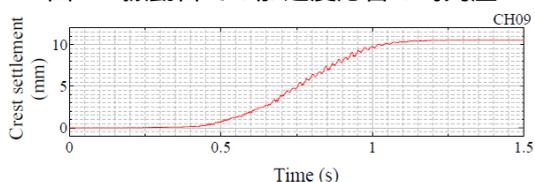


図 7 盛土天端の沈下量の時刻歴

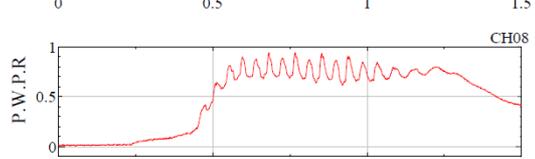
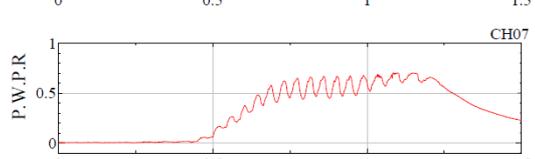
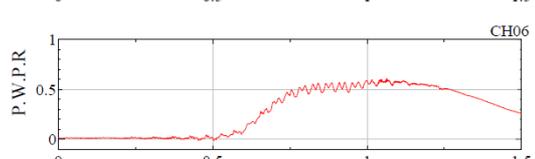
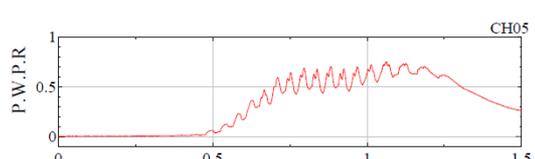
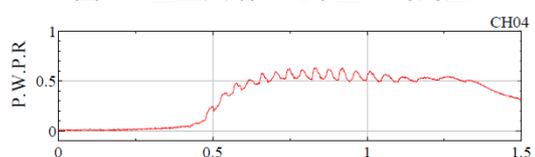


図 8 過剰間隙水圧比の時刻歴

をやや過大に評価している。この一因として、浸透による間隙や透水性の変化を考慮していないことが考えられる。また、各ケースの解析結果を比較すると大きな差がないことから、加振後の形状の変化による浸透流量への影響は少ないということがわかった。

参考文献

- 1) 地盤工学会 2007 年度会長特別委員会：地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために，地盤工学会，2009.
- 2) 乙志和孝，古関潤一，金子勝，田中宏征，永尾直也，鋼矢板を用いた堤防の補強に関する実験的研究：地盤工学ジャーナル，6(1)，1-14，2011.
- 3) Uzuoka, R. and Borja, R.I.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 36, 1535-1573, 2012.
- 4) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.458-459.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 9 件)

宇藤多磨輝、仙頭紀明、様々な方向の浸透による内部侵食が砂質土の強度変形特性に及ぼす影響、土木学会東北支部技術研究発表会(平成 27 年度)、2016 年 3 月 5 日、岩手大学(岩手県・盛岡市)

- ② J.S. Ryu, Y. Ikami, and R. Uzuoka, Evaluation of unsaturated seepage behavior of damaged river levee, The 4th Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soil, 2016 年 2 月 27 日、岡山大学(岡山県・岡山市)

居上靖弘、大黒雄貴、伊藤慧、上野勝利、渦岡良介、河川堤防の地震時変形挙動を対象とした遠心模型実験の再現性の検討、第 5 回遠心模型実験技術シンポジウム、2015 年 9 月 4 日、寒地土木研究所(北海道・札幌市)

浦野智貴、仙頭紀明、浸透による砂質土の内部侵食が強度変形特性に及ぼす影響、土木学会東北支部技術研究発表会(平成 26 年度)、2015 年 3 月 7 日、東北学院大学(宮城県・仙台市)

鈴木利宏、仙頭紀明、様々な粒度分布を有する砂質土の内部侵食に関する浸透実験、土木学会東北支部技術研究発表会(平成 26 年度)、2015 年 3 月 7 日、東北学院大学(宮城県・仙台市)

仙頭紀明、川崎丞、かご工により対策した火山灰質砂質土造成盛土の地下水位変動、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10 日～2014 年 9 月 12 日、大阪大学(大阪府・大阪市)

- ⑦ 大黒雄貴、大山一輝、福田典紀、渦岡良介、上野勝利、鈴木壽、震動後の水位上昇による浸透を考慮した河川堤防の模型実験、平成 26 年度四国支部技術研究発表会、2014 年 5 月 31 日、徳島大学(徳島県・徳島市)

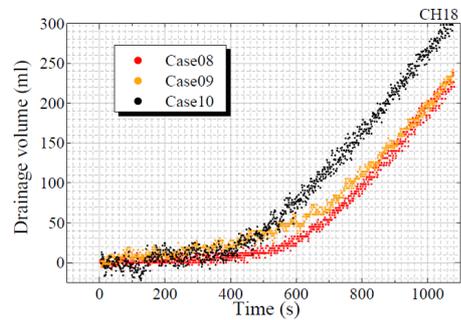


図 9 川裏側浸透流量の時刻歴

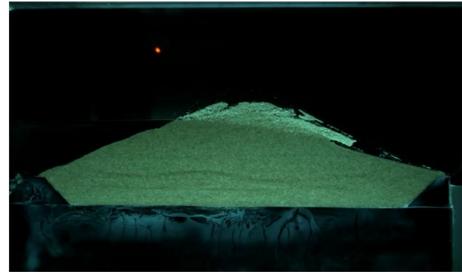
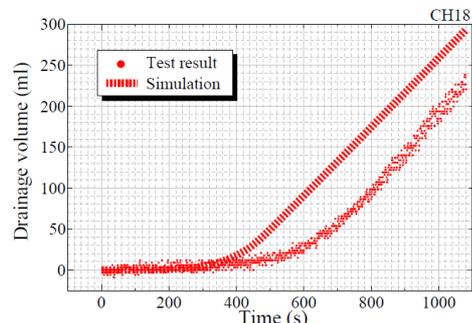
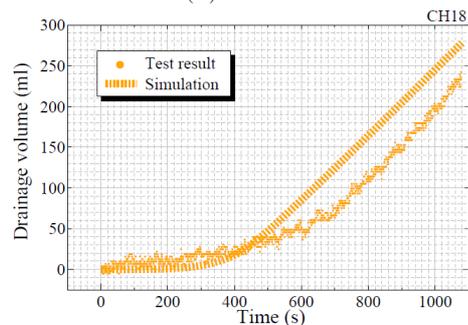


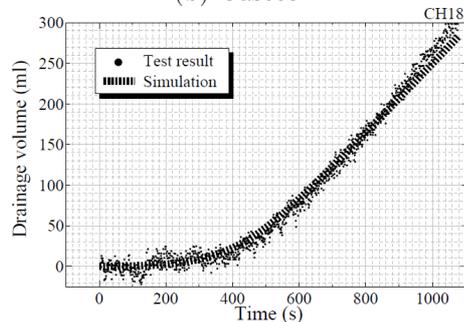
図 10 浸透過程 1080 秒後の堤防模型



(a) Case08



(b) Case09



(c) Case10

図 11 解析による川裏側浸透流量の時刻歴

川崎誉正、神田祥五、渦岡良介、上野勝利、鈴木壽、稲城砂の飽和・不三軸圧縮試験、平成 26 年度四国支部技術研究発表会、2014 年 5 月 31 日、徳島大学（徳島県・徳島市）

川崎丞、仙頭紀明、かご工を設置した盛土斜面の地下水位変動と対策効果の検証、土木学会東北支部技術研究発表会（平成 25 年度）、2014 年 3 月 8 日、八戸工業大学（青森県・八戸市）

柳 振錫 (RYU, Jinseok)

大黒 雄貴 (DAIKOKU, Yuki)

川崎 誉正 (KAWASAKI, Takamasa)

伊藤 慧 (ITO, Kei)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渦岡 良介 (UZUOKA, Ryosuke)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号：40333306

(2) 研究分担者

原 忠 (HARA, Tadashi)

高知大学・自然科学系・教授

研究者番号：80407874

仙頭 紀明 (SENTO, Noriaki)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40333835

(3) 連携研究者

岡村 未対 (OKAMURA, Mitsu)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50251624

山中 稔 (YAMANAKA, Minoru)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：50264205

山川 優樹 (YAMAKAWA, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80324010

鈴木 壽 (SUZUKI, Hisashi)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・准教授

研究者番号：80154574

上野 勝利 (UENO, Katsutoshi)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・准教授

研究者番号：70232767

武藤 裕則 (MUTO, Yasunori)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号：40263157

(4) 研究協力者

居上 靖弘 (IKAMI, Yasuhiro)