

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420512

研究課題名(和文)高靱性材料を用いた土構造物の耐震性・耐侵食性強化技術

研究課題名(英文)Aseismic reinforcement and erosion control method for soil structures using materials having high toughness

研究代表者

小竹 望 (KOTAKE, NOZOMU)

香川高等専門学校・建設環境工学科・教授

研究者番号：60512704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：河川堤防や貯水池堤体などの耐震強化が遅れており、施工効率に優れ経済的な土構造物の補強技術の開発が要求されている。本研究は、土構造物の強靱化を目的として構造と材料の両面からアプローチした。構造面では、振動台模型実験等の結果に基づき、土構造物表面を部分的に改良することによって、耐震性を向上させる耐震補強技術を提案した。土質材料の開発においては、低利用資源の積極的活用と環境配慮型に配慮して以下の適用性を検討した。すなわち、再生石膏を用いた底泥固化材、竹繊維を用いた繊維補強土、木くずが混入する津波堆積土の土工材料としての利用、再生プラスチックを用いた地山補強土工法の受圧板等である。

研究成果の概要(英文)：The earthquake-resistance of soil structures such as embankments of river and reservoir has been insufficient, and the development of economical aseismic technology for soil structures has been required. In this study, new structural and material types were examined for the purpose to toughen soil structures. As a measure to improve seismic behaviors of soil structures, the partially reinforced embankment was proposed based on a series of shaking table model tests and numerical analyses. In addition, development of ductile composite geomaterial was conducted considering utilization of low-use materials such as reclaimed plastic, bamboo fiber, tsunami deposit soils, reclaimed plastic and others.

研究分野：地盤工学

キーワード：高靱性土質材料 繊維補強固化処理土 低利用資源 耐震補強 部分改良工法 振動台実験 数値解析  
安定解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 河川堤防や貯水池堤体などの耐震強化が遅れている。東日本大震災においても堤体等の土構造物が大被害を受けた。地震によって堤体が崩壊に至らないまでも損傷を受け、地震後の増水時に亀裂による漏水が堤防破壊の誘因となることが指摘されている。また、最近の気候変動に起因する豪雨と洪水によって破堤に伴う被害が頻発している。堤防は土でつくることが従来からの原則であるが、近年特に土構造物の脆弱性が顕著に現れてきた。

(2) 基礎地盤の液状化に対する耐震強化対策としては、堤体直下から法尻部の地盤改良や矢板補強などがよく用いられている。しかし、沈下抑制効果は限定的であり、補強工事が大規模になって事業費が膨らむことや用地取得の制約などの問題から、施設整備が円滑に進まないのが現状である。このような実態を踏まえ、堤体の機能向上を効率的に図るためには、耐震強化対策ならびに豪雨・洪水対策を同時に解決できる総合的な技術的取組みを行い、低コストで環境保全に配慮した技術が必要となる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、高い靱性を有する土質材料を用いて堤体表面部の部分的改良することによって(図-1)、全体系の耐震性と耐侵食性を向上させる低コストの土構造物補強技術を確立することを第一の目的とする。高靱性土質材料として研究実績のある繊維補強固化処理土を候補とした。地震による大変形時においても強度を発揮しうることに加えて耐侵食性が期待できる材料である。この部分改良は、供用中の施工が可能で、工事規模の縮小と工期短縮が可能となり、低コストの耐震補強技術となり得る。

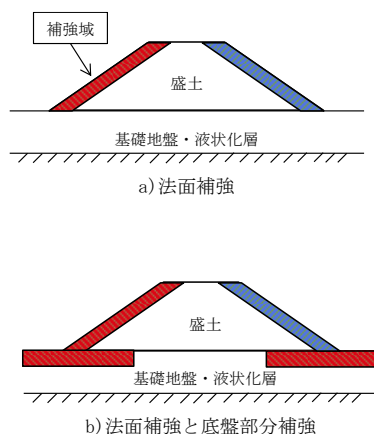


図1 表層部分改良の補強形態の例

(2) 本研究では、既往の研究成果を踏まえ、部分改良による土構造物補強技術を確立するために以下の課題を明らかにすることを目的とする。

- ・堤体表面の部分改良によって得られる堤体

の変形性能・耐震性能の評価

- ・地震時の要求性能に応じた改良範囲ならびに改良形式の評価
- ・部分改良された堤体の基礎地盤を含めた全体系の耐震性能の評価方法

(3) 環境配慮型技術として、原料土に浚渫土や建設残土を利用し、補強材に自然由来の天然繊維材料や再生プラスチック材料など低利用資源の利用可能性を検証することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 提案する堤体の部分補強構造に関して構造と材料の両面から検討した。構造面では、堤体の部分改良形態について強度・位置・範囲など諸元に関する検討を行って基本パターンを設定した。土構造物表層の部分補強盛土について、その耐震性能を評価することを目的として、補強領域と補強材料の違いによって生じる崩壊形態を振動台模型実験により評価した。さらに、盛土模型の崩壊を解析対象として、震度法斜面安定解析および FEM による 2 次元平面ひずみ弾塑性動的応答解析を用いた数値シミュレーションを実施し、補強効果の評価を行った(図2)。

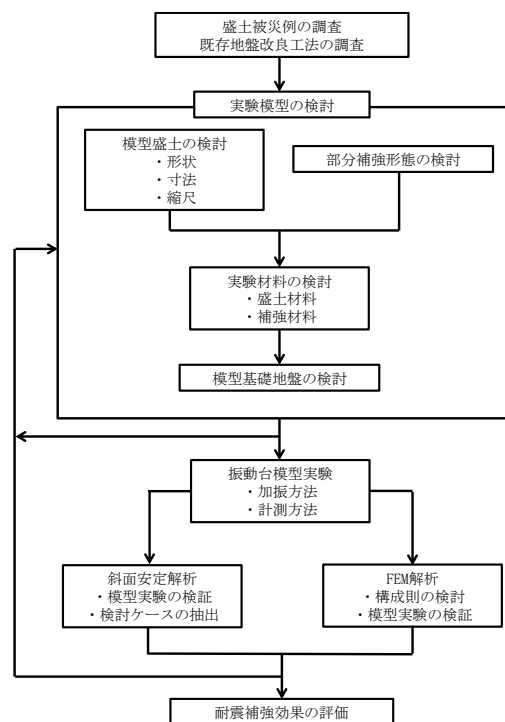


図2 部分補強盛土に関する検討フロー

(2) 材料面では、室内配合試験により竹材などの植物繊維、再生プラスチック繊維など低利用資源の利用可能性の検討、ならびに環境にやさしい中性固化材の固化性能、耐久性、環境安全性を評価する。さらに、微視構造解析による繊維材料ならびに固化材料の有効性等を評価した。

(3) 振動台模型実験で使用するステンレス製の平面ひずみ実験土槽と実物高さ 6m を想定した 1/40 縮尺模型の部分耐震補強盛土を図 3 に示す。模型盛土の寸法と形状を法面勾配 1:1.5、天端  $B_1=150\text{mm}$ 、底面幅  $B_2=600\text{mm}$ 、高さ  $H=150\text{mm}$  とし、その模型盛土内で部分的に補強を施すことによって、その効果を確認するものとした。本実験では、高さ 561mm×幅 1000mm×奥行 290mm のステンレス製の平面ひずみ実験土槽を用いた。前面の強化ガラスを通して 2 次元模型断面の挙動を観察した。

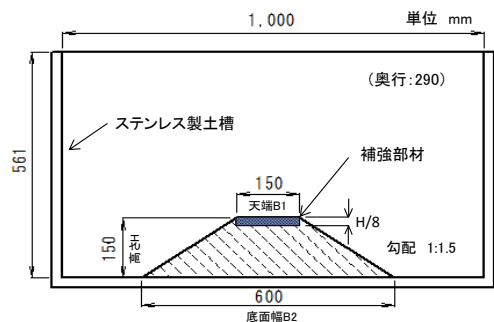


図 3 1/40 縮尺模型盛土（天端補強の例）

(4) 振動台実験装置は、油圧サーボ駆動のサーボアクチュエーターであり、その諸元は、加振力 150kN、ストローク 100mm (±50mm)、周波数 0.1-10.0Hz である。鋼製土層を振動台に搭載し、正弦波を作用させて加速度を段階的に増加させる載荷方式とした。加振は周波数 5Hz の正弦波とした。加振加速度は表 -3.9 に示す振幅の入力値を変更することで設定する。加振加速度を 50~100gal ずつ段階的に増加させ、それぞれの加速度で 5 秒間程度加振した。斜面の著しい崩壊が生じるまで加速度を増加させた。

(5) 部分補強盛土の基本的な補強形態は、図 4 に示す天端補強盛土、法面補強盛土、全表面補強盛土の 3 種とした。

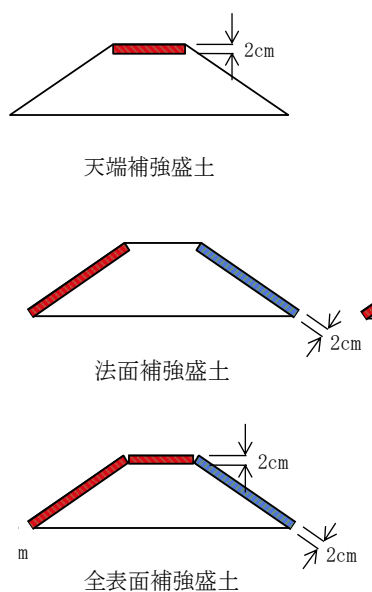


図 4 基本的な補強形態

(5) 補強材料として、高剛性の材料と柔軟性の材料をそれぞれ作製した。これらは、模型盛土と同等の密度をもつ様に調整した。1) 高剛性材料は、人工軽量骨材および砂質土を混合した板状固化体を用いた。2) 袋状補強材には、表層崩壊が発生せず、振動に対して変形が小さく形状が安定し、盛土との境界面すべりが生じない条件を満たす補強部材を作製した。



図 5 補強材料

(6) 土質材料として砂質混合土（珪砂 8 号の乾燥質量に対して粘土 2% 混合し、含水比を 2% に調整）を用いた。砂質土に小さい粘着力を与え、実際に近い破壊形態を再現でき、締め固めが可能である。本実験の基礎地盤は、剛な基礎地盤を想定し、土槽表面に合板を敷いた。合板表面に接着剤を用いて砂粒子を接着して粗面を作製した。

(7) 加速度計を振動台上、模型底部の合板上、模型盛土の天端中央に設置した。通常の VTR、静止カメラ撮影に加え、高速度カメラ (200 frame/sec) で撮影し、崩壊形態を詳細に記録した。

(8) 堤体の改良形態に関する地盤地震応答解析は、地盤材料の非線形性を考慮できる動的有効応力解析プログラム (UWLC、フォーラムエイト製) を用いた。

#### 4. 研究成果

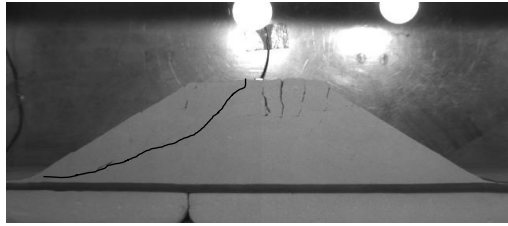
(1) 部分補強盛土に関する振動台模型実験について代表的なケースの崩壊形態を図 6 に示す。各図に示す加振加速度  $\alpha$  は、崩壊の生じた加速度である。

(2) 部分補強盛土に関する振動台模型実験により得られた知見は以下の通りである。

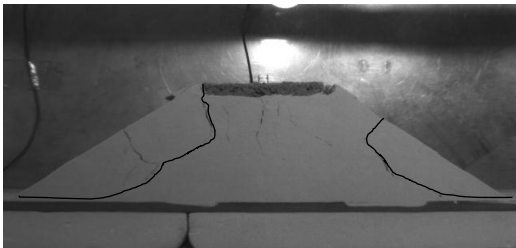
- 板状固化体および袋状補強材を用いた天端補強は、法面からのテンションクラック発生を抑制できないため、補強効果が得られない。
- 法面補強に板状固化体と袋状補強材のどちらを用いても、初期クラックの発生を抑制するため補強効果が得られる。
- 法面補強盛土と全表面補強盛土では耐震補強効果がほぼ同等である。法面補強の方

が、補強面積が小さく効率的である。

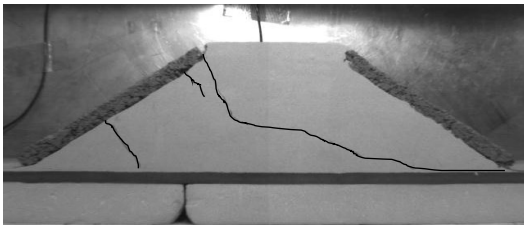
- ・高剛性よりも柔軟性を有する補強部材の方が、変形に対する追随性があり耐震補強効果が得られる。



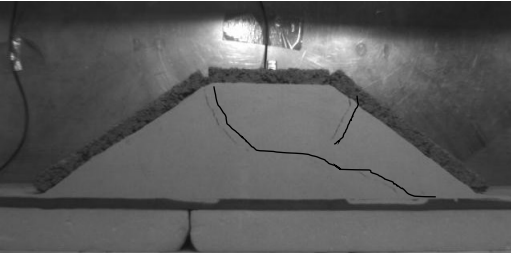
a)  $\alpha = 680\text{gal}$  加振時（無補強盛土）



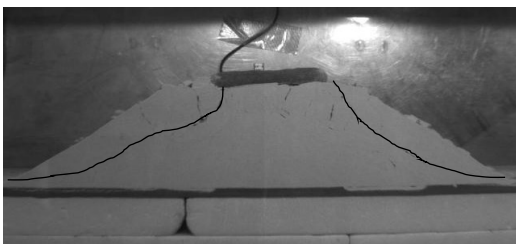
b)  $\alpha = 670\text{gal}$ （天端補強盛土，板状固化体）



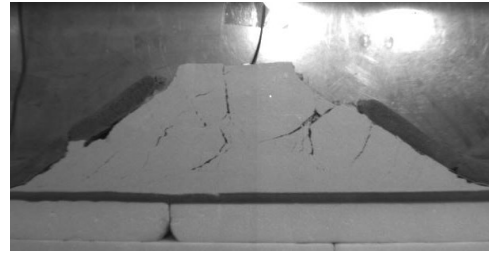
c)  $\alpha = 770\text{gal}$  加振時（法面補強盛土，板状固化体）



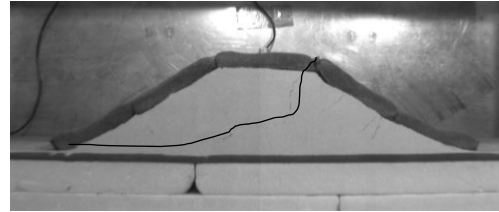
d)  $\alpha = 780\text{gal}$  加振時（全表面補強盛土，板状固化体）



e)  $\alpha = 680\text{gal}$  加振時（天端補強盛土，袋状補強体）



f)  $\alpha = 950\text{gal}$  加振時（法面補強盛土，袋状補強体）



g)  $\alpha = 850\text{gal}$  加振時（全表面補強盛土，袋状補強体）

図 6 振動台模型実験による部分補盛土の崩壊形態

(3) 部分補強盛土に関する振動台模型実験により得られた知見は以下の通りである。

- ・板状固化体および袋状補強材を用いた天端補強は、法面からのテンションクラック発生を抑制できないため、補強効果が得られない。
- ・法面補強に板状固化体と袋状補強材のどちらを用いても、初期クラックの発生を抑制するため補強効果が得られる。
- ・法面補強盛土と全表面補強盛土では耐震補強効果がほぼ同等である。法面補強の方が、補強面積が小さく効率的である。
- ・高剛性よりも柔軟性を有する補強部材の方が、変形に対する追随性があり耐震補強効果が得られる。

(4) 振動台模型実験の結果に関する斜面安定解析では、実験で確認された崩壊モードを図7の円弧すべりに分類した。斜面安定解析の結果から以下の知見が得られた。

- ・一面せん断試験で得られた強度定数は低拘束圧下の模型盛土の安定解析に適さないが、無補強盛土の逆解析から得られた粘着力  $c$  を用いると、振動台模型実験結果を概ね再現できた。
- ・震度法円弧すべり斜面安定解析の臨界円は、実験結果をほぼ再現できた。実験で確認された板状固化体と交差するすべり線の発生を抑制する効果が斜面安定解析でも確認された。



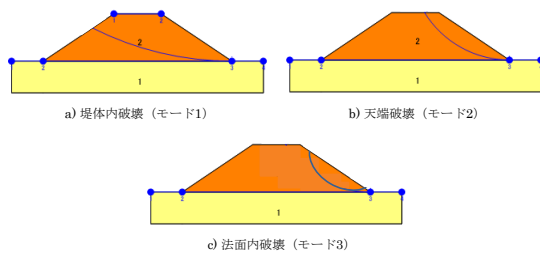


図7 部分補強盛土の円弧すべりモード

(4) FEM 解析より得られた知見は以下の通りである。

- ・無補強盛土および部分補強盛土の実験で観測された動的挙動を概ね再現できた。
- ・板状固化体および袋状補強材で盛土を補強すると、補強部材が応力を負担するため、盛土に引張応力が発生することを抑制する効果が確認された。
- ・板状固化体は剛性が高いことから、盛土の変形に柔軟に対応できず、法面を補強すると盛土と補強部材の境界に大きなひずみが発生する傾向がみられた。
- ・袋状補強材は柔軟性を有していることから、盛土の変形に柔軟に対応し、法面を補強しても盛土と補強部材の境界に大きなひずみは発生しない傾向がみられた。

(5) 以上をまとめると、振動台模型実験により、地震による盛土の崩壊形態が実験で再現できた。また、盛土の耐震性を向上させるためには、法面を補強する必要があり、剛性の高い板状固化体および柔軟性を有する袋状補強材により法面を補強することで耐震性が向上することが確認できた。板状固化体および袋状補強材のそれぞれの特徴から盛土の変形に追従する袋状補強材を用いることが最も耐震補強効果があり、効率的であることがわかった。これより靱性土質材料による部分補強の耐震補強技術が有用と考えられる。

(6) 土質系靱性材料の開発においては、低利用資源の積極的活用と環境配慮型技術に配慮して以下の各種材料および利用法の可能性を検討した。

- ・再生石膏固化材について、現場における含水比評価方法を明らかにした。また、細粒土の造粒材として適する可能性を確認できた。
- ・繊維補強固化処理土の面状改良体としての利用に関し、曲げ変形時のひずみ分布を画像解析技術により可視化する手法を開発した。
- ・SEM 撮影画像による微視構造解析結果から繊維材料の疎水性と親水性の相違が検出できる目安を得た。
- ・低利用かつ自然由来の竹繊維を用いた繊維補強土について砂質土～礫質土における適用限界を確認した。東日本大震災の津波堆積土について、木くず混入量がせん断強度特性に与える影響を評価した。

・再生プラスチックを用いた地山補強土工法の受圧板の柔軟性が支圧特性に与える影響を評価した。

(7) 将来展望として、本研究では盛土のみに着目したが、基礎地盤を含むモデルに拡大することで全体系の耐震補強効果が検証可能である、また、斜面安定解析およびFEM 解析に関しては、物性値をある程度推定したが、より精度の高い室内実験結果に基づく物性値を使用することで解析の精度を上げられる。FEM 解析の再現性を概ね実証したことから実物大の盛土に対しても補強効果について検証可能である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ①佐野博昭・山田幹雄・小竹望・稲積真哉，桑嶋啓治：廃石膏ボード由来再生石膏を添加・混合した安定処理土の含水比推定式の提案，地盤工学ジャーナル，査読有，Vol. 10, No. 4, pp. 603-610, 2015.
- ②小竹望・山中稔・多田有次・山内聡士：津波堆積物分別土に混入する木くずが一面せん断強さに及ぼす影響，第11回環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，査読有，pp. 143-148, 2015.
- ③Kotake, N., Kamon, M.: Seismic stability of geosynthetic barrier on landfill slope. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有，Vol. 2 (2015) No. 69, pp. 2352-2356.
- ④山中稔・小竹望・宮本慎宏・宇都宮直樹：竹繊維を混入した壁土の力学特性とFEMによる土塗壁の最大耐力の推定，第11回地盤改良シンポジウム論文集，日本材料学会，査読有，pp. 251-256, 2014. 11.
- ⑤Kotake, N., Kamon, M.: Seismic Stability of Geosynthetic Barrier Slope, *Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics*, Berlin, Germany, 査読有，pp. 312-319, 2014.
- ⑥小竹望・宮脇史恭・松岡賢樹：繊維補強による固化処理土の乾湿繰り返し抵抗性の向上効果，ジオシンセティクス論文集 28 巻，査読有，pp. 161-166, 2013.
- ⑦山下亮介・山中稔・小竹望・宇都宮直樹・宮本慎宏：補強材として竹繊維を用いた建築用壁土の強度及びひび割れ特性について，ジオシンセティクス論文集 28 巻，査読有，pp. 149-154, 2013.

[学会発表] (計18件)

- ①Tada, Y., Kotake, N., Yamanaka, M.: Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Tsunami Deposit Soils. InCIEC2015, *Proceedings of the International Civil and Infrastructure*

- Engineering Conference. Editors: Yusoff, M. et al (Eds.) ISBN 978-981-10-0155-0
- ② Kotake, N., Hamaguchi, R., Kadono, S. and Kutsuzawa, T.: Improving seismic stability of reinforced slope by soil nailing with bearing plates made from reclaimed plastic, *Geo-Environmental Engineering 2015, Concordia University, Montreal, Canada, (CD-ROM), 2015.*
- ③ 多田有汰・小竹望・山中稔・山内聡士: 津波堆積物分別土の一面せん断試験によるせん断強度の評価、地盤工学会第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 535-536, 2015.
- ④ 小竹望・濱口竜一・土居正信・沓澤武: 受圧板を有する地山補強土工法ののり面工低減係数に関する考察、地盤工学会第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 1687-1688, 2015.
- ⑤ 角野充・小竹望・沓澤武: 受圧板を用いた地山補強土工における地震時補強材力に関する考察, 土木学会平成 27 年度全国大会第 70 回年次学術講演会, pp. 723-724, 2015.
- ⑥ Kotake, N., Matsushita K. and Kamon, M. : Hardening Performance and Environmental Safety of the Stabilizing Agent Using Reclaimed Gypsums for Ground Improvement, Proceedings of the 13th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, pp. 61-69, 2014.
- ⑦ 小竹望・川野浩二・松下和史: 再生石膏固化材による底泥固化改良の現場実験、廃棄物資源循環学会, 第 25 回研究発表会 (広島), pp. 147-148, 2014.
- ⑧ 小竹望・濱田和綺・角野充・川野浩二・松下和史: 再生石膏固化材の軟弱粘性土に対する固化性能, 地盤工学会第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), pp. 539-540, 2014.
- ⑨ 山内彩加・小竹望・松原三郎: 部分補強による盛土の耐震性能向上に関する基礎的研究, 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp. 7-8, 2014.
- ⑩ 角野充・濱口竜一・小竹望・松原三郎・沓澤武: 受圧板を用いた地山補強土工の振動台模型実験, 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp. 621-622, 2014.
- ⑪ 沓澤武・奥野倫太郎・長田貴絵・小竹望: 再生ポリプロピレン製受圧板を用いた地山補強土工法における受圧板の変形状態, 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp. 623-624, 2014.
- ⑫ Kotake, N., Matsuoka, Y., Miyawaki, F. and Kamon, M. : Improvement of durability of cement-treated soils against wetting and drying by fiber inclusion. Proceedings of 13<sup>th</sup> Geo-Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, pp. 23-28, 2013.
- ⑬ Hamaguchi, R. and Kotake, N. : Improving seismic stability of reinforced slope by soil nailing with bearing plate. The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013), Hong Kong VTC, pp. 237-238, 2013.
- ⑭ 小竹望・松原三郎・濱口竜一・川野裕知: 表面遮水工の地震時斜面滑りに関する安定検討, 地盤工学会第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 2183-2184, 2013.
- ⑮ 宮脇史恭・小竹望・伊藤勉: 繊維補強固化処理土における繊維材質の差異による影響, 地盤工学会第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 717-718, 2013.
- ⑯ 松岡賢樹・小竹望・宮脇史恭: 繊維補強による固化処理土の乾湿繰り返し抵抗性の向上効果, 地盤工学会第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 721-722, 2013.
- ⑰ 濱口竜一・小竹望・松原三郎・沓澤武: 受圧板を有する地山補強土工法の検討, 土木学会平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術講演会, pp. 27-28, 2013.
- ⑱ 大河原・大塚・阪本・高井・今西・遠藤・大嶺・風間・加藤・小竹・珠玖・鈴木・中川・中野・西村・藤川・松山・山中・勝見: 災害廃棄物処理過程で発生する分別土砂の特性評価, 地盤工学会第 10 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp. 355-360, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小竹 望 (KOTAKE Nozomu)

香川高等専門学校・建設環境工学科・教授  
研究者番号: 60512704

### (2) 研究分担者

伊藤 勉 (ITOU Tsutomu)

香川高等専門学校・機会工学科・准教授  
研究者番号: 00409038