

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00810

研究課題名（和文）土のう構造体を用いた既設盛土の経済的耐震補強工法の実用化研究

研究課題名（英文）Practical research on economic aseismic countermeasure against on-service road embankment by using soil-bag structure

研究代表者

澁谷 啓 (SHIBUYA, SATORU)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：00206153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土のう構造体を用いた既設盛土の経済的耐震補強工法の実用化を目指して、中詰め材料試験（土の中詰め材の粒度改善と重質化を達成するための現地発生土と製鋼スラグの配合の考え方を確立）、小型振動台模型実験（土のう積層体に作用する側方土圧の影響を考慮した実験を行い、土のう構造体を加振させた場合の加速度応答、PS低減量、土のうのクリープ等を評価）等の基礎的研究の成果を踏まえ、世界最大規模の震動台（E-ディフェンス）を利用して、地盤施工を忠実に再現した「実物実験」により、その補強効果（耐震補強の有効性）を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災以降、古い盛土の耐震診断や耐震補強に係る研究開発は、国内で精力的に行われている。しかし、高いコストや低い信頼性がネックとなって社会実装は進まず、既設の道路盛土の耐震化が十分に進んだとは言えない。さらなるコストダウンが課題である。

本研究により得られた成果は、（公社）地盤工学会の提言に対する回答そのものである。すなわち、「膨大なストックである道路盛土の危険箇所を素早く低廉で確度高く判定できる技術と、効率的・経済的に実施可能な補強工法」である。なお、本研究によって開発される耐震補強の新技術は、道路、造成宅地、河川堤防、ため池堰堤、等の耐震化にも大いに貢献できることに最大の特徴がある。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to promote the economic countermeasure method against earthquake applicable to on-service road embankment by using soil-bag structure. In so doing, a laboratory research into properties of soil in use for the bag as well as a series of small-scale shaking table test were performed. Based on the results of these fundamental research outcomes, a full-scale shaking table test was performed in Miki-city, Hyogo, Japan (i.e., E-defense). It was successfully demonstrated that the performance of the soil-bag structure was of great use for preventing serious damage of embankment even against level-II earthquake.

研究分野：地盤工学

キーワード：土のう構造体 耐震補強工法 盛土

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

全国で毎年のように大地震が発生し、多数の盛土が崩壊している。東日本大震災(2011)では、仙台市の宅地盛土が数多く被災した。東日本大震災後に作成された(公社)地盤工学会の提言では、「膨大なストックである盛土の危険箇所を素早く低廉で確度高く判定できる技術と、効率的・経済的に実施可能な補強工法開発」が喫緊の課題であると指摘している。

そこで、本研究では、図1に示すように、「土のう構造体によるのり先補強工法」を提案する。盛土のり面の下部を階段状に掘削した土を枕型の土のう袋に詰め、土のう群を積層し鋼棒で締め付けることによりプレストレス(以下、PS)を与え、一体化した土のう構造体をのり先に設置する。必要に応じて、構造体を基盤にアンカリングすることにより、地震時に盛土全体が壊れにくくする工法である。新たな土地を取得する必要がなく、高度な施工技術、特殊な材料や重機を用いない経済的な工法である。従前の土のうを用いた応急復旧工事と同程度の手間と費用で一気に耐震補強をするところに最大の特長がある。

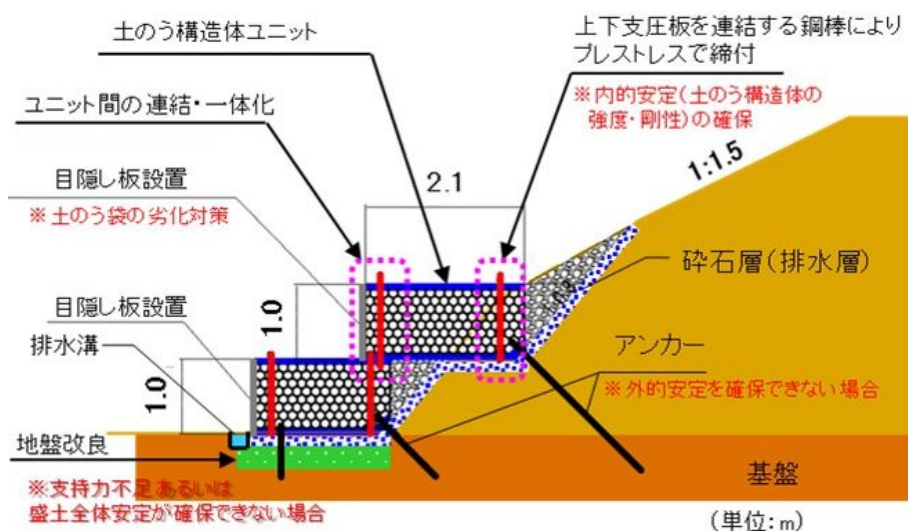


図1 多段式土のう構造体による法先補強工法(恒久対策)の提案

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、土のうを用いた経済的で有効な盛土耐震補強工法の実用化にある。そのために、土のう中詰め材料の室内試験、小型模型振動台実験による基礎的な検討だけでなく、世界最大規模の震動台(E-ディフェンス)を利用して、地盤施工を忠実に再現した‘実物実験’を行って、その補強効果を検証する。

### 3. 研究の方法



写真1 実物大盛土実験に用いた土槽の全景

本研究では、各種の地盤材料試験(粒度試験、締固め試験、三軸試験、配合試験等)を実施し

て、土のうち詰め材の粒度改善と重質化を達成するための現地発生土と製鋼スラグの配合の考え方を確立し、神戸大学が所有する振動台装置を使用し、土のうち積層体に作用する側方土圧の影響を考慮した実験を行い、土のうち構造体を加振させた場合の加速度応答、PS 低減量、土のうちのクリープ等を評価した。このように、中詰め材料試験および小型振動台模型実験等の基礎的研究の成果を踏まえ、当該補強工法の地震時の挙動及び耐震性能を検証するため、防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設（E - ディフェンス）の震動台を用いて実物大震動台実験を実施した。

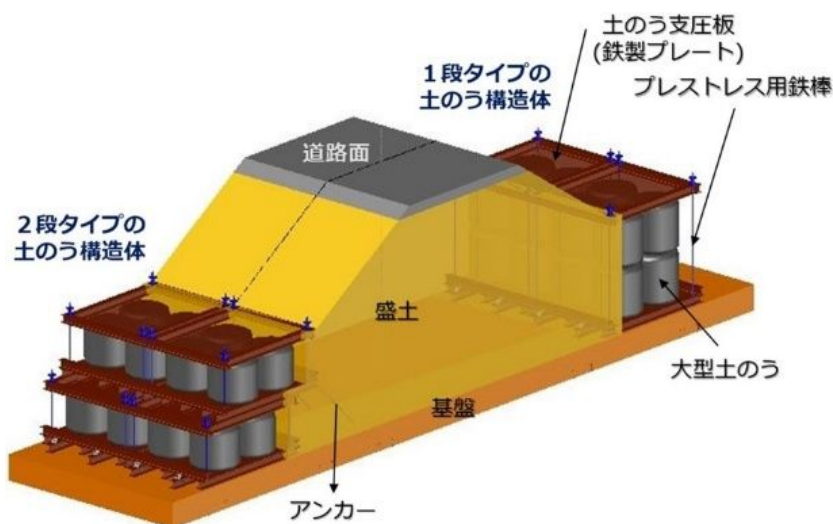


図2 盛土試験体の3次元イメージ

写真1に示すように、直方体の大型土槽（内寸法：W16m×D4m×H4.5m）の中に高さ3.9mの実物大盛土を造成し、その両サイドに積層方法の異なる2つのタイプの土のうち構造体を設置し、E - ディフェンスの震動台を用いて、これらの耐震性能の比較検証実験を実施した。図2に盛土試験体の3次元イメージを示す。E - ディフェンスの震動台の諸元は、最大搭載質量1,200t、最大質量搭載時震動台の最大加速度は水平900 cm/s<sup>2</sup>、鉛直1,500 cm/s<sup>2</sup>、最大変位は水平±100 cm、鉛直±50 cmである。

また、加振条件を表1に示す。入力加振波は、f = 5Hz、40波の正弦波を用いて、振幅を100Gal、250Gal、450Gal、最終的には、750Galを目標値として段階的に大きくした。なお、この加振条件は、既往の研究において、同等の規模で実施されたため池堤体の実験条件を参考にした。実際の土槽底部で測定された加速度は、それぞれ最大で、125Gal、245Gal、376Gal及び660Galであり、これらを加振条件とした。

この報告書では、E - ディフェンスで実施した実物大盛土実験の結果を中心に述べる。

表1 加振条件

	加振条件 1(125Gal 相当) 最大加速度：(+)方向：1.25 m/s <sup>2</sup> (=125Gal)、 (-)方向：-1.23 m/s <sup>2</sup> (=-123Gal)	加振条件 2(245Gal 相当) 最大加速度：(+)方向：2.32 m/s <sup>2</sup> (=232Gal)、 (-)方向：-2.45 m/s <sup>2</sup> (=-245Gal)
震動台の加速度		
	加振条件 3(376Gal 相当) 最大加速度：(+)方向：3.76 m/s <sup>2</sup> (=376Gal)、 (-)方向：-3.64 m/s <sup>2</sup> (=-364Gal)	加振条件 4(660Gal 相当) 最大加速度：(+)方向：6.56 m/s <sup>2</sup> (= 656Gal)、 (-)方向：-6.60 m/s <sup>2</sup> (= 660Gal)
震動台の加速度		

#### 4. 研究成果

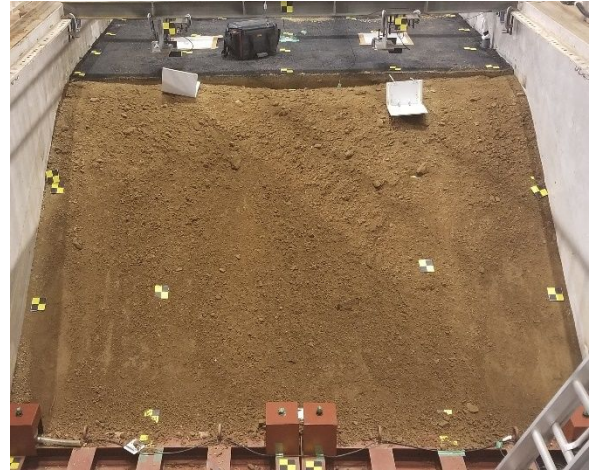
##### (1) 加振条件 1 及び加振条件 2

加振条件 1 (最大 125Gal 相当波) の場合、加振後に両タイプの土のう構造体ともにプレストレスは、ほとんど変わらず維持し、盛土及び土のう構造体の加振後の残留変位も 1mm 以下の微小な変形であり、健全な状態であったことが確認できた。

一方、加振条件 2 (最大 245Gal 相当波) では、加振により 1 段タイプの土のう構造体における加振前のプレストレスに対して 27.7% 低下し、土のう構造体に 2.9mm 程度の残留沈下と 4.4mm 程度の残留水平変位が生じ、せん断変形が発生した。なお、土のう構造体の応答加速度も 2 段タイプに比べ若干大きく発生していることが確認できた。一方、2 段タイプの土のう構造体はプレストレスの減少率が少なく (上部は 2.9% 減少、下部は 12.0% 減少) 残留変位も 1 段タイプに比べ小さいことが確認できた。しかし、両側の土のう構造体ともに数 mm 範囲の変位が生じ、盛土の天端でも最大 1.3mm の沈下が発生し、盛土天端や法面での損傷も認められない健全な状態であった。そこで、本研究で用いた盛土や土のう構造体の仕様においては、最大 245Gal 相当の地震波に対して、十分な耐震性を確保していると考えられる。



(a) 1 段タイプ側



(b) 2 段タイプ側

写真 2 法面の損傷状況 (加振条件 3 (最大 376Gal 相当波) の加振直後)



(a) 1 段タイプ側



(b) 2 段タイプ側

写真 3 法面の損傷状況 (加振条件 4 (最大 660Gal 相当波) の加振直後)

##### (2) 加振条件 3

加振条件 3 (最大 376Gal 相当波) では、1 段タイプの土のう構造体のプレストレスが大幅に減少して (減少率は平均 77.5%) 加振後の残留プレストレスは平均 13.4kPa であった。土のう構造体の残留変位も比較的大きく、平均沈下量が 4.8mm、上部載荷板の平均水平変位は 16.6mm であり、せん断変形が生じた。また、盛土中央部の応答加速度も 1 段タイプ方向 (+) 方向) に大きく増加して、天端での増幅率が入力加速度の 4.2 倍 ( $15.79\text{m/s}^2$ ) になった。そこで、のり面の表面土が崩れて、土のう構造体の背面には、写真 2 のようにクラックが発生した。このクラックは土のう構造体のせん断変形による主働破壊のように見えるが、破壊メカニズムに関しては、今後さらなる検討が必要であると考えられる。一方、のり面に多少の損傷は発生したが、大規模なす

べり破壊までは至らなく、天端の道路面の損傷もほとんどないことから、速やかに復旧できる範囲の損傷であったと判断される。

2段タイプの土のう構造体は、1段タイプに比べプレストレスの減少率が少なく、上部は平均70.9kPa、下部は平均39.4kPaのプレストレスを維持していることが確認できた。そこで、土のう構造体の変形も1段タイプに比べ小さいことが分かる。一方、のり面の表面では、1段タイプ側の法面と同様に若干崩れたが、クラックは観察されなかった。

### (3) 加振条件4

加振条件3の加振により土のう構造体のプレストレスが低下したため（とりわけ1段タイプにおいて）実験前の剛性や性能と多少違う状態になったが、本実験盛土の破壊現象を確認するため、加振条件4（最大660Gal相当波）の加振実験を行った。両タイプの土のう構造体ともに殆どのプレストレスがゼロに近くなった。また両側ののり面の表面が崩れて、法面下部の土のう構造体の背面と法面上部2箇所でクラックが発生したものの、両側ともに大規模な破壊は発生しなかった。写真3は、加振条件4における加振後の法面の損傷状況を示す。一方、天端の中央部では、平均9.5mm（盛土の高さの0.24%）の残留沈下が発生して、顕著な損傷は見られなかった。そこで、両タイプともにプレストレスがほとんど抜けても、本実験の仕様では、大規模な破壊や損傷は発生しないことが確認できた。土のう構造体が依然として抗土圧構造物の機能を保持していること、アンカーにより転倒や滑動が生じなかったこと、等が明らかとなった。

本報告書では、土のうの積み方を変えた2種類の補強構造体を盛土の両側に設置した実大盛土の震動台加振実験の結果を中心に述べた。振幅（最大加速度）を変えた5Hzの正弦波を用いて加振させて、加振時の盛土及び土のう構造体の加速度応答特性、加振後の残留変形及び土のう構造体のプレストレスの変化、盛土の損傷状況を観察した。その結果、加振条件1（最大125Gal相当波）と加振条件2（最大245Gal相当波）では、両タイプの土のう構造体ともに大きな変状もなく、盛土も健全な状態であった。

一方、加振条件3（最大376Gal相当波）の場合、1段タイプの土のう構造体のプレストレスが大きく低下し、せん断変形が生じて、土のう構造体の背面法面でクラックが発生した。しかし、両側ののり面表層部で土が崩れたものの大規模な破壊には至らなかった。さらに加振レベルを上げた加振条件4（最大660Gal相当波）の場合には、2段タイプ土のう構造体もほとんどプレストレスが抜けて、両側ののり面で土が崩れ、土のう構造体の背面部とのり面の上でクラックが発生したが、大規模な盛土破壊や顕著な路面損傷は見られなく、速やかに復旧できる程度の損傷で収まっていると判断した。

土のうの積み方による耐震性効果の比較に関しては、2段タイプの方がプレストレスの減少率も小さく、土のう構造体及び盛土の変形も小さいことが確認された。一方、施工性や経済性の観点からは、1段タイプの方が優位であると考えられるため、実盛土に適用する際には、現場に応じた施工条件、工期、費用等の要因を検討した上で最適な積層方法を検討する必要があると考えられる。

今後の課題として、加振時の土のう構造体の変形モードや盛土の破壊モード、また、基盤部に設置したアンカー力の挙動についてより詳しく検討し、これらの実験結果の検討や安定解析及びFEM動的解析などの数値解析を用いた検討を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Koseki Junichi	4. 巻 27
2. 論文標題 Several challenges in advanced laboratory testing of geomaterials with emphasis on unconventional types of liquefaction tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geomechanics for Energy and the Environment	6. 最初と最後の頁 100157 ~ 100157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gete.2019.100157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakazawa Hiroshi, Kawamata Yohsuke, Shibuya Satoru, Kato Shoji, Jeong Kyung-Beom, Baek Jemin, Lohani Tara Nidhi, Morita Akihira, Takemoto Osamu, Moriguchi Yoshitaka	4. 巻 15
2. 論文標題 Full-Scale Experiment of Earthquake Resistant Embankment Using Flexible Container Bag	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 765 ~ 781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2020.p0765	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 加藤 卓彦, 澁谷 啓, 片岡 沙都紀, 中澤 博志, 中西 典明, 歳藤 修一, 石田 正利, 伊藤 修二, 片山 政和, 由井 洋和, 丁 経凡	4. 巻 35
2. 論文標題 土のう構造体を用いた法先補強工法による盛土耐震補強の設計法検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ジオシンセティクス論文集	6. 最初と最後の頁 95-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 NAKAZAWA Hiroshi, ISHIZAWA Tomohiro, DANJO Toru, ONOUE Yasuhiro	4. 巻 77
2. 論文標題 BASIC EXPERIMENTS ON EVALUATION OF SLOPE STABILITY UNDER THE CONDITION OF RAINFALL AND EARTHQUAKE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_243 ~ I_255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.77.4_I_243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 中澤博志, 河又洋介, 澁谷啓, 森田明平, 丁經凡, 白濟民, 加藤正司, 口八二・タラニディ, 片岡沙都紀, 竹本修, 森口芳隆, 井上貴仁, 梶原浩一	4. 巻 447
2. 論文標題 土のう構造体を用いた道路盛土の新たな耐震補強工法に関する実大震動台実 - 地震災害後の道路の早期復旧と中長期的な維持に向けての検証 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 防災科学技術研究所研究資料	6. 最初と最後の頁 1 - 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 澁谷 啓, 丁 經凡, 白 濟民, 中澤 博志, 河又 洋介	4. 巻 62
2. 論文標題 道路盛土における土のう構造体を用いた耐震補強工法の耐震性評価のための実物大震動台実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 建設工学研究所論文報告集	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 澁谷啓	4. 巻 土と基礎 67(11・12)
2. 論文標題 補強土壁の変状事例から学んだ教訓と課題 (特集 補強土)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 丁經凡, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 白濟民	4. 巻 0
2. 論文標題 土のう構造体を用いた盛土の耐震補強工法に関する解析的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 2019論文集	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jeong, K., Baek, J., Kataoka, S. & Shibuya, S.	4. 巻 0
2. 論文標題 Evaluating aseismicity of an embankment constructed with the mixture of steel slag and fine grained soil	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Roma, Italy	6. 最初と最後の頁 3109-3114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Jeong., J. Baek., J. Hur. & S. Shibuya.	4. 巻 0
2. 論文標題 Study on basic properties of soil-slag mixtures and applicability as a fill material to improve aseismicity of embankment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Asia Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 SF01-02-003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 劉爽, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 小笠原明信, 原田道幸, 林豪人	4. 巻 34
2. 論文標題 ジオセルとジオグリッドを併用した補強土壁の凍結指数に応じた壁面材厚に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 115-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5030/jcigsjournal.34.115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 平井泰輔, 川口貴之, 川尻峻三, 中村大, 衛藤遼, 原田道幸, 安達謙二	4. 巻 34
2. 論文標題 ジオセルと排水パイプを併用した斜面安定工の排水メカニズムに関する模型実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 107-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5030/jcigsjournal.34.107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷 和夫, 林 史泰, 池谷 毅, 稲津 大祐
2. 発表標題 サンプリング兼コーン貫入試験方法の実現可能性の検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 史泰, 谷 和夫, 池谷 毅, 稲津大祐
2. 発表標題 サンプリング兼引上げ試験のサウンディング性能に係る実験的検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田健斗, 堀田崇由, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 高畠光平
2. 発表標題 盛土施工現場における土質の変化が工学的諸特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷淵篤樹, 片岡沙都紀, 石原朱莉, 河井克之, 澁谷啓
2. 発表標題 鉄鋼スラグ混合土を用いた小型盛土試験における盛土浸透水のpH挙動
3. 学会等名 第54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島光平, 堀田崇由, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 松田健斗
2. 発表標題 盛土材料の自然含水比と最大乾燥密度の関係における一考察
3. 学会等名 第54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山里拓也, 片岡沙都紀, 澁谷啓
2. 発表標題 低品質土の改良効果に着目した鉄鋼スラグ混合土の水理・力学特性
3. 学会等名 第54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井泰輔, 古矢達也, 原田道幸, 新目陽平, 川口貴之, 中村大
2. 発表標題 2層構造のジオセルからなるのり面保護工に関する実物大実験
3. 学会等名 第60回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古矢達也, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 原田道幸, 安達謙二
2. 発表標題 ジオセルや排水パイプを用いたのり面保護工に関する屋外土槽試験
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度 年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉爽, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 林豪人, 原田道幸
2. 発表標題 凍上対策を施したジオセルとジオグリッドを連結した補強土壁の現地計測
3. 学会等名 土木学会令和元年度全国大会 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川口 貴之 (Kawaguchi Takayuki)  (20310964)	北見工業大学・工学部・教授  (10106)	
研究分担者	中澤 博志 (Nakazawa Hiroshi)  (20328561)	静岡理科大学・理工学部・教授  (33803)	
研究分担者	古関 潤一 (Koseki Junichi)  (30272511)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授  (12601)	
研究分担者	谷 和夫 (Tani Kazuo)  (50313466)	東京海洋大学・学術研究院・教授  (12614)	
研究分担者	片岡 沙都紀 (Kataoka satsuki)  (50552080)	神戸大学・工学研究科・助教  (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	白 濟民  (Baek Je-min)  (50774098)	神戸大学・工学研究科・学術研究員   (14501)	削除：2019年7月31日
研究分担者	丁 經凡  (Jeong Kyung-beom)  (80837740)	神戸大学・工学研究科・学術研究員   (14501)	削除：2019年11月28日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関