

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K22022

研究課題名（和文）被災地で発生する軟弱泥土の積極的再利用による迅速な復旧工法の提案

研究課題名（英文）Study on Elemental Technologies for the Development of Small Hand-Guided Sludge Removal Machine

研究代表者

高橋 弘（TAKAHASHI, Hiroshi）

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：90188045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、被災地で発生する軟弱泥土を如何に効率的に一定場所に集泥し、含水比を下げ、強度を上げ、復旧のための地盤材料として活用するかについて実験的に検討した。廃棄ポリマーを用いた流動性の抑制では、泥土のコンシステンシーを求めれば、流動性を抑えるポリマーの添加量を算出できることが分かった。回収した泥土を廃石膏ボード紙とセメント系固化材で改良した結果、改良土は高い強度特性・耐久性を有し、優れた地盤材料として利用可能であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は災害現場で発生する厄介物の軟弱泥土を単に除去するのではなく、軟弱泥土を地盤材料に改良し、被災地の復旧・復興に貢献しようとするものである。研究の結果、おむつ工場から発生する廃ポリマーを用いて軟弱泥土を速やかに除去でき、さらに泥土を地盤材料に再資源化できたことは、災害現場での速やかな復旧に貢献できるものであり、社会的意義は大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we experimentally examined how to efficiently collect the sludge generated in the disaster area, reduce the water content, increase the strength, and utilize it as ground materials for restoration. In the suppression of fluidity using waste polymer, it was found that the amount of added polymer that suppresses fluidity can be calculated if the consistency of the sludge is obtained. As a result of improving the collected sludge with waste gypsum board paper and cement, it was found that the improved soils have high strength and durability, and they can be used as excellent ground materials.

研究分野：建設機械施工学

キーワード：水溶性ポリマー フロー値 ジオポリマー パーライト副産物 泥土改良 破壊強度 破壊ひずみ 可搬性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨による大規模自然災害が多発している。2011年8月に発生した台風23号による奈良県での大規模土砂崩落、2014年8月に発生した広島での大雨による大規模土砂災害、2015年9月の関東・東北豪雨による鬼怒川の堤防決壊、2017年7月の秋田県雄物川の氾濫、2018年9月の台風21号による近畿地方を中心にした被害など枚挙に暇がない。これらの被災地では大量の軟弱泥土が発生するが、この軟弱泥土は被災地の復旧の妨げになる「厄介物」でしかない。そのため、まずこの「厄介物」の軟弱泥土を取り除き、山砂などの新材を用いて復旧作業を行う工法が一般的である。しかし、軟弱泥土は豪雨の前には通常の土として機能しており、単に含水比が高いためで元々は通常の土である。被災地で発生する高含水比泥土は、含水比が高いために極めて使い難く、厄介物でしかないが、逆に言うと含水比さえ簡単に下げることができれば復旧のための地盤材料として活用できる可能性がある。これまで厄介物として扱われてきた高含水の軟弱泥土を地盤材料として活用できれば、軟弱泥土を捨てる手間が省け、新材を搬入する必要もなくなることから大幅なコスト縮減が可能になる。なによりも現場の軟弱泥土を原位置で復旧資材として利用するので泥土・土砂を運搬する必要がなく、極めて効率的で短時間に復旧作業が行えるため、災害に強い街づくりの実現が可能になる。以上が研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究では、被災地で発生する軟弱泥土を如何に効率的に一定場所に集泥し、含水比を下げ、強度を上げ、復旧のための地盤材料として活用するかについて実験的に検討することを目的とする。本研究は、これまで「厄介物なので捨てる」という発想しかなかった被災地の軟弱泥土を、復旧のための地盤材料として積極的に活用するという逆転の発想に基づくものである。

3. 研究の方法

1年目：軟弱泥土の集泥と地盤材料としての再資源化

泥土回収には、水溶性ポリマーの使用を考える。1年目には、廃棄ポリマーの適用性・有効性を確認し、その後、泥土の含水比と最適添加量の関係について実験的に検討する。さらに、一定場所に集められた泥土にジオポリマー1)を添加して短時間で強度を発現させるための実験を行う。セメント系固化材では水和反応に時間を要し、短時間で復旧資材を生成するという本研究の目的に合わないために、本研究ではジオポリマーに着目する。ジオポリマーとしては、フライアッシュ(FA)を用いたジオポリマーとペーパースラッジ灰(PS灰)を用いたジオポリマーの両方を用いる。廃棄ポリマーにより団粒化した軟弱泥土にジオポリマーを添加し、復旧資材として使用可能な地盤材料に再資源化できるかを実験的に検討する。

2年目：再資源化処理により生成された地盤材料の強度特性

2年目は、1年目の成果を基に、種々の泥土(粘土系、砂質系、両者の混合)に対してジオポリマーを用いて改良土を作成し、強度特性を把握する。強度特性評価は一軸圧縮試験により行う。目標強度を125kN/m²として、その目標強度を達成するための必要添加量について検討する。さらに、できるだけ短時間で目標強度を達成するために必要な添加量やジオポリマーの濃度について一軸圧縮試験を通して検討する。なお、目標強度125kN/m²は、ダンプトラックが走行できる必要最低限の地盤のコーン指数を基に設定した値である。

3年目：再資源化処理により生成された地盤材料の劣化耐久性

本研究では、改良土を復旧のための地盤材料として使用することを目指す。3年目は乾湿繰返しに対する耐久性について実験的に検討する。地盤は降雨などにより水を含むと膨潤し、乾燥すると収縮するため、乾湿を繰り返すと地盤材料に亀裂が生じ、強度が低下する懸念がある。そこで、乾湿繰返し試験を実施し、劣化耐久性を評価する。試験方法は、建設汚泥利用マニュアルに記載されている方法に準じ、「40 炉乾燥2日間、20 水浸1日間」を1サイクルとし、10サイクル終了後も強度が初期の80%以上を保持することを目標とする。目標を達成できない場合は、これまでに劣化耐久性の向上に実績のある古紙破砕物の混合を検討する。

4. 研究成果

研究成果は、以下の(1)～(3)に集約できる。

(1) 高吸水性ポリマーによる高含水土砂の流動性抑制効果とコンシステンシーの関係に関する検討

はじめに

本研究では、モルタルフロー試験でSAPの添加による高含水土砂の流動性を評価して、SAPの添加率と高含水土砂の土質パラメータの関係について検討することを目的とした。

モルタルフロー試験の概要

供試土を作製後1日静置した後、SAPを添加した。SAPの添加から1日、7日、14日、21日、28日、35日後の供試土の流動性をモルタルフロー試験で評価した。フローテーブルの上下に伴って広がった試料の最長径

(l_1) と最長径に直交する直径 (l_2) の平均値がフロー長さ (l_f) である。フロー長さが 100 mm のとき、試料は流動性がないことを意味する。本研究では既往の研究を参考に、フローテーブルを 50 回上下させて試験を行った。本研究では、市販の粘土、シルト、珪砂を使用して作製した 3 種類の土砂を用いた。SAP 添加率 a は SAP の添加質量 m_a と供試土の乾燥質量 m_s との比として式 (1) のとおり定義した。

$$a = \frac{m_a}{m_s} \quad (1)$$

試験結果および考察

図 2 に SAP 添加後の供試土のフロー長さの時間変化を示す。SAP の添加によって供試土の流動性は抑制できているが、フロー長さは緩やかな増加傾向にあることがわかる。ここで、SAP 添加率 a と供試土の液性指数 I_L との比 (式 (2)) と、35 日後のフロー長さの関係プロットすると図 3 の相関関係が得られる。

$$\frac{a}{I_L} = \frac{a(w_L - w_P)}{w - w_P} \quad (2)$$

図 3 から得られたフロー長さと a/I_L の相関関係から、SAP の添加から 35 日が経過しても流動性を抑制し続けるために必要な SAP の添加率 a_n を求める。図 3 における近似直線と横軸との交点からフロー長さを 100 mm に抑制する a/I_L を算出し、供試土の塑性限界 w_P との関係プロットすると図-4 が得られる。この関係を a_n で整理すると式 (3) が得られる。

$$a_n = (0.000072w_P + 0.000737) \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad (3)$$

以上から、土のフロー長さを 100 mm に抑制する、すなわち、土を流動させないために必要な SAP の添加率 a_n は、添加対象の土のコンシステンシー (塑性限界および液性限界) と含水比から推定可能であることが示された。

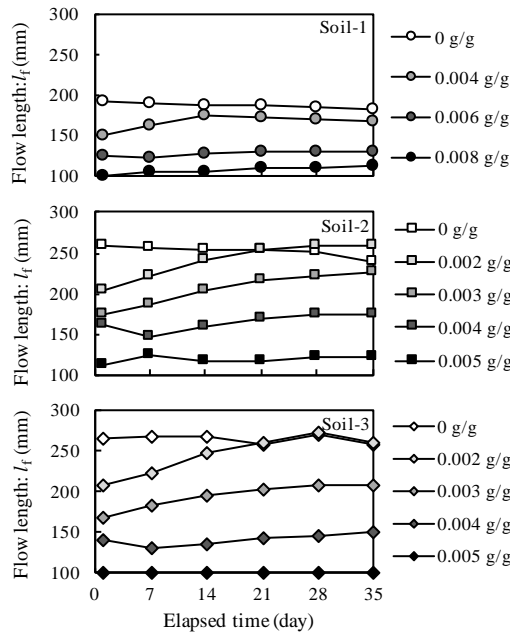


図 2 SAP 添加後の供試土のフロー長さの時間変化

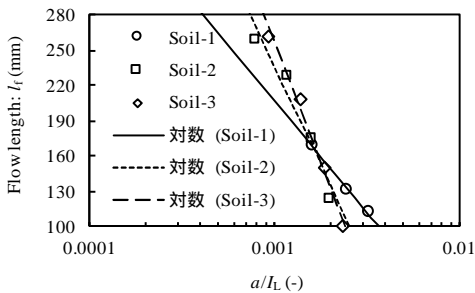


図 3 35 日経過後のフロー長さと a/I_L の関係

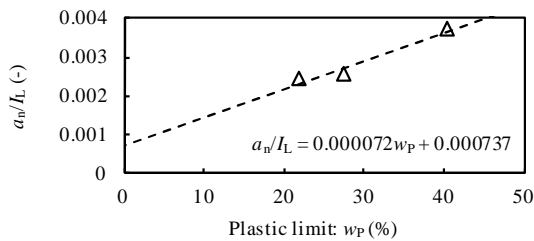


図 4 流動性抑制に必要な SAP の添加率、液性指数と塑性限界の関係

(2) ジオポリマーを用いた泥土改良に関する考察

地すべりは、落石や土石流などの一連の地塊の移動を含む地質学的現象として定義され、人命や財産に多大な損失をもたらす。地滑り後は一般に大量の軟弱泥土が発生し、埋め立て地に搬送される。また地滑り地域では地盤強度が非常に低くなる。したがって、この種の材料を活用し、地滑りの危険性が高い地域を補強するには、軟弱泥土を改良し、強度を高める必要がある。従来の研究では、軟弱泥土の改良方法として、セメントが一般に用いられてきたが、近年では、セメントの代替品としてジオポリマーが注目されている。ジオポリマーは副生成物とアルカリ活性剤を利用した接着剤であり、環境に優しい材料としても注目されている。ただし、活性溶液を生成する成分の 1 つは水酸化ナトリウムであり、高濃度で使用すると人間の健康に悪影響を与える化学物質であることに注意する必要がある。本研究では、水酸化ナトリウムを使用せずにジオポリマーを添加した場合の地滑り地域の土壌の機械的特性を調査し、飛灰や高炉スラグなどの副産物についても検討した。特にジオポリマーの成分間の最適な割合と圧縮時の最適な含水率を決定するための方法について考察した。供試泥土はシルト 60%、粘土 40%、水分 70% で構成した。供試体は 50 x 100 mm の円柱で、20 °C で 7 日間養生した。

図 5 に締固め曲線を示す。模擬土の締固め曲線図から、締固め時の含水率は 32% であり、高密度の供試体が得られたことが分かった。図 6 に破壊強度とジオポリマーの添加量の関係を示す。アルカリ活性化剤と副生成物、高炉スラグとフライアッシュの比率がそれぞれ 3:5 と 3:7 の場合、破壊強度目標 (123 kPa) で最良の結果が得られたが、ひずみは低くなった。これらの結果から、破壊強度と目標破壊ひずみのバランスをとるためには、締固め中の含水率の調整が必要であることが確認された。

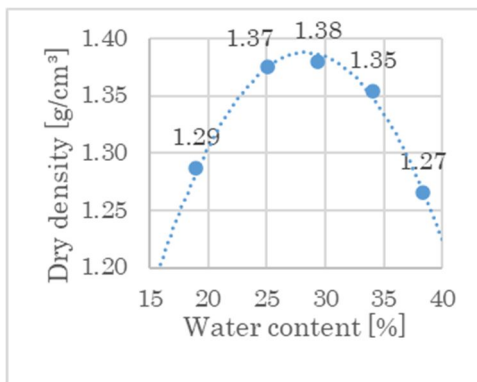


図 5 締固め曲線

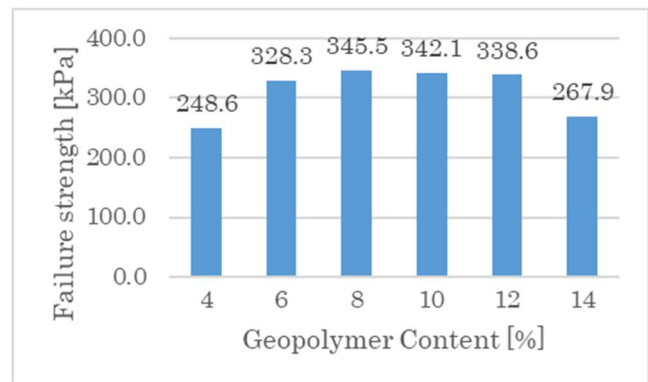


図 6 破壊強度とジオポリマーの添加量の関係

(3) 廃石膏ボード紙を用いた繊維質固化処理土の強度特性と耐久性に関する研究

はじめに

本研究では、ボード紙を用いた繊維質固化処理土の強度特性を一軸圧縮試験で調査し、古紙破砕物の代替としての適用可能性について検討した。また、改良土を地盤材料として使用する場合、改良土は気象変動の影響、すなわち浸水及び乾燥の乾湿繰り返しの影響を受ける。過去の研究において、古紙破砕物を用いた繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが確認されている。そこで、本研究ではボード紙を用いた繊維質固化処理土に対して乾湿繰り返し試験を行い、耐久性を評価した。

ボード紙を用いた繊維質固化処理土の強度特性

一軸圧縮試験

本実験では、ボード紙を用いた繊維質固化処理土の他に、従来の古紙破砕物を用いて作製された改良土およびセメント系固化材のみで固化した改良土の 3 種類の改良土に対して一軸圧縮試験を行い、強度特性を比較することで繊維質固化処理土工法におけるボード紙の適用性を検討する。改良対象の泥土には、笠岡粘土とシルトを乾燥質量比 4:6 で混合した模擬泥土を用いた。

供試体作製後、一軸圧縮試験を行い、破壊強度と破壊ひずみを計測した。応力の最大値を破壊強度、その時のひずみを破壊飛墜と定義した。破壊強度と破壊ひずみの目標値は以下のように定めた。

破壊強度目標値 = 120 kN/m² 以上、破壊ひずみ目標値 = 5 %以上

結果と考察

図 8 に破壊強度および破壊ひずみと繊維質物質添加量の関係を示す。図 8 より、ボード紙固化処理土の破壊強度は、古紙破砕物を用いた場合と比較して大幅に小さいが、一部の条件で目標値を満足した。また、破壊ひずみはセメントのみを用いた改良土と比べて優れた値を示し、従来の繊維質固化処理土と同様の特徴を有することが確認された。さらに、ボード紙は極めて安価に入手可能であり、コスト的にメリットがある。以上のことから、ボード紙は繊維質固化処理土工法における古紙破砕物の代替になり得ると考えられる。

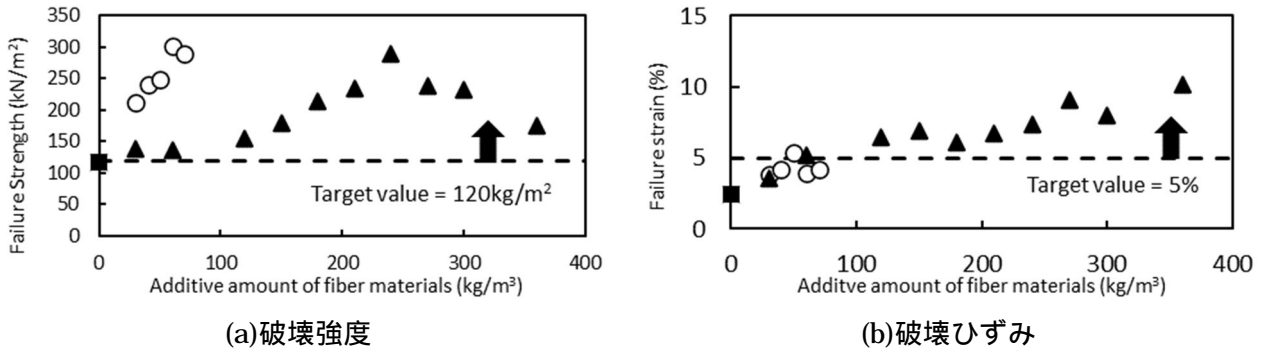


図 8 破壊強度および破壊ひずみと繊維質物質添加量の関係

ボード紙を用いた繊維質固化処理土の乾湿繰り返しに対する耐久性

試験方法

2.1 と同様の手順で供試体を作製し、28 日間の養生後、40℃ 炉乾燥 2 日、20℃ 浸水 1 日のサイクル(0, 2, 6, 10 サイクル)終了後に一軸圧縮試験を行い、サイクル数の増加に伴う強度特性の変化を調べた。また、本研究ではボード紙固化処理土(含水比=80%、セメント添加量=60kg/m³、ボード紙添加量=150kg/m³)の他に、比較として同程度の破壊強度を有する古紙破砕物を用いた繊維質固化処理土(含水比=80%、セメント添加量=60kg/m³、古紙添加量=30kg/m³)の 2 種類の改良土を用いた。

結果と考察

図 9 にサイクル経過数と初期強度に対して正規化した破壊強度および破壊ひずみの関係を示す。図 6 より、ボード紙固化処理土の正規化した破壊強度の低下傾向は、従来の繊維質固化処理土に比べて緩やかであった。過去の研究では、従来の繊維質固化処理土が 10cycle 経過後も高い耐久性を示した報告もあるため、本研究での古紙添加量が過去の研究と比べて少ないことが強度の低下傾向に影響したと考えられる。したがって、繊維質物質の種類を問わず添加量の多さが乾湿繰り返しに対する耐久性に大きく影響を及ぼしていると考えられ、ボード紙固化処理土も乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが確認された。

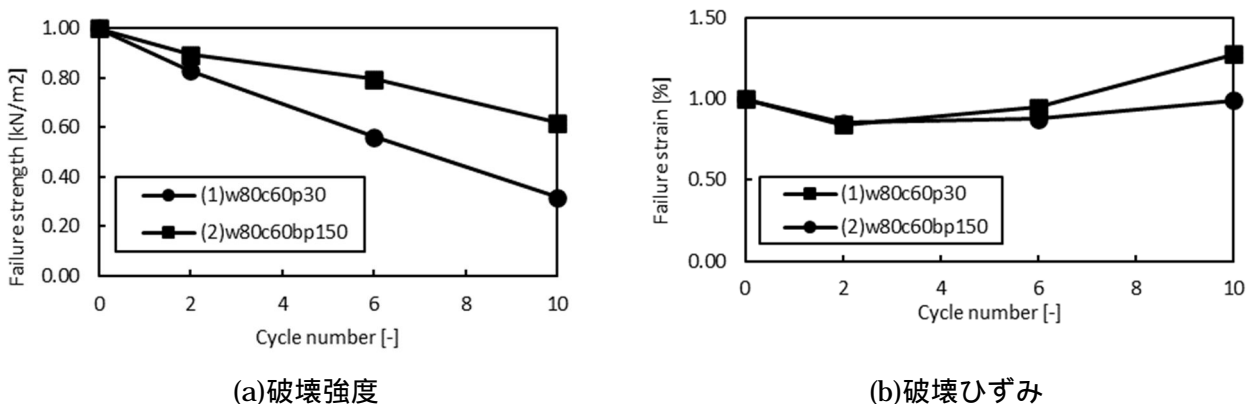


図 9 サイクル経過数と初期強度に対して正規化した破壊強度および破壊ひずみの関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上野 耕平, 里見知昭, 高橋 弘	4. 巻 41
2. 論文標題 吸水材添加による高含水泥土の流動性低減と再利用性に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 テラメカニクス	6. 最初と最後の頁 17-22
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 Minh Chien Vu, Tomoaki Satomi and Hiroshi Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Study on soft soil reinforcement by liquefied stabilized soil method using paper sludge ash-based geopolymer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Earth Science and Technology 2019	6. 最初と最後の頁 244-249
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 Minh Chien VU, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI	4. 巻 1
2. 論文標題 Properties of geopolymer modified sludge generated in landslide area designed by Taguchi method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering Works and Structure	6. 最初と最後の頁 685-690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-0802-8_108	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 Nguyen Truong Van Loc, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI	4. 巻 42
2. 論文標題 Study on Mechanical Properties of Modified Soil by Geopolymer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 テラメカニクス	6. 最初と最後の頁 55-60
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 Delima Canny Valentine Simarmata, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI	4. 巻 25
2. 論文標題 Study on Mechanical Properties of Cemented Soil Reinforced by Empty Fruit Bunch(EFB)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of the Society of Materials for Resources	6. 最初と最後の頁 109-114
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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Nguyen Truong Van Loc, Tomoaki Satomi, Hiroshi Takahashi
2. 発表標題 Study on Mechanical Properties of Modified Soil by Geopolymer
3. 学会等名 テラメカニックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Delima Canny Valentine Simarmata, Tomoaki Satomi and Hiroshi Takahashi
2. 発表標題 Study on Mechanical Properties of Cemented Soil Reinforced by Empty Fruit Bunch (EFB)
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu SATO, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on the Mechanical Properties of Fiber-Cement-Stabilized Soil Using Waste Gypsum Board Paper
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hina OMURO, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Effect of the Additive Amount of Perlite By-products on Strength Characteristic of Fiber-Cement-Stabilized Soil
3. 学会等名 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Moeka KUSE, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on Estimation of Optimum Mixing Conditions for Fiber-cement-stabilized Soil by Regression Tree
3. 学会等名 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rina KASAI, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on Recycling of Reservoir Bottom Sludge as Banking Materials
3. 学会等名 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Moeka KUSE, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on Estimation of Optimum Mixing Conditions for Fiber-cement-stabilized Soil by Multilayer Neural Network
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hina OMURO, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on Strength Characteristics of Fiber-Cement-Stabilized Soil with Perlite By-products
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野耕平, 里見知昭, 高橋弘
2. 発表標題 吸水材添加による高含水泥土の流動性低減と再利用性に関する研究
3. 学会等名 テラメカニックス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Minh Chien VU, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on soft soil reinforcement by liquefied stabilized soil method using paper sludge ash-based geopolymers
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minh Chien VU, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Properties of geopolymers modified sludge generated in landslide area designed by Taguchi method
3. 学会等名 5th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering Works and Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤ゆう, 里見 知昭, 高橋 弘
2. 発表標題 廃石膏ボード紙を用いた繊維質固化処理土の強度特性と耐久性に関する研究
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Delima Canny Valentine Simarmata, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 パーム椰子空果房を用いた繊維質固化処理土の耐久性および強度特性に関する研究
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Delima Canny Valentine Simarmata, Tomoaki SATOMI and Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 The Evaluation of Geographic Information System(GIS)-Integrated Slope Stability by Limit Equilibrium Method for the Failed Landslide Recovery
3. 学会等名 Inetrnational Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers (国際学会)
4. 発表年 2022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

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
---------	---------