

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02235

研究課題名（和文）古紙を原料とする革新的泥土処理技術の開発とその処理メカニズムの解明

研究課題名（英文）Development of innovative mud treatment technology using waste paper and elucidation of the treatment mechanism

研究代表者

木村 亮（Kimura, Makoto）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30177927

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、古紙微細粉体による高含水泥土処理のメカニズムの解明と、処理泥土の物理・力学特性変化を明らかにすることを目的に種々の実験を実施した。その結果、古紙微細粉体を添加することで泥土のせん断強度が増加する他、物理・力学特性が著しく変化することを確認した。さらに、処理泥土を地盤材料として再利用する場合には、古紙微細粉体とセメントを併用することで、処理泥土は粘り強い変形性能を示すことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最終目標は、古紙を微細化加工した粉体を用いて高含水泥土を即座に処理する技術を開発し、ため池やダムの浚渫・建設泥土処理・地盤災害復旧を変革することである。本技術を用いることで、特別な機械を用いることなく、即座に泥土の流動性を低下させることが可能となる。本研究を通じて、古紙微細粉体における処理メカニズムを詳しく分析できた他、処理泥土を再利用する際の地盤材料としての特性を調べることができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, various experiments were conducted to elucidate the mechanism of treating high water content mud with fine shredded paper and to clarify the changes in the physical and mechanical properties of the treated mud. As a result, it was confirmed that the shear strength of the mud increased and the physical and mechanical properties of the mud changed significantly after the addition of fine shredded paper. Furthermore, when the treated mud was reused as a geomaterial, it was found that the mud showed tenacious deformation performance when the fine shredded paper was used in combination with cement.

研究分野：地盤工学

キーワード：古紙 微細化加工 高含水泥土 セルロース 地盤の水分分布

## 1. 研究開始当初の背景

建設工事に伴い発生する泥土は、その取り扱いの難しさから、処理・処分にかかる経済的・社会的コストが大きい。これまでは、乾燥処理、脱水処理、セメントや石灰等の固化剤による安定化処理により流動性の低下が図られてきた。しかしながら、乾燥処理には大規模な用地が必要になること、脱水処理には大型の機械が必要となること、固化材による安定化処理では自然地盤との強度差により用途が限られ、環境への負荷が大きいなどの問題が挙げられる。さらに、上記の処理を行うためには専用のトラックを用いて隣接する施設へ運搬することになり、多くのコストを要する。以上の観点から、現場において即座に流動性を低下させることが可能である工法が望まれている。

そこで応募者らは、古紙を微細化加工した微細粉体（以下、古紙微細粉体（FSP：Fine Shredded Paper））が有する高い吸水性能に着目し、高含水泥土処理の考え方を根本的に変える新技術の開発に取り組んでいる（図1）。そもそも紙の原料である木材は、50～55%がセルロースで構成されている。セルロースは強固な結晶構造を持っているため水に溶けず、親水性の水酸基を有しているため高い吸水性能を有することが知られている。さらに、紙は繊維と繊維が絡み合い結合して層を成していることから、絡み合った繊維の間には微細な間隙があり、多孔質構造となっている。つまり、この多孔質構造に起因する毛細管現象により紙は水をさらによく吸収する。

これまでの応募者らは、古紙微細粉体の基本的な特性や、高含水泥土に古紙微細粉体を添加した際の効果について、強度特性および運搬性に着目して検討を進めてきた<sup>1,2)</sup>。その結果、高含水泥土に古紙微細粉体を添加することによりみかけの含水比が低下し、せん断剛性が増加するとともに、運搬性が著しく向上することを確認した。このように、実務面での有用性については一定の検証が行われているのに対し、処理原理に関する詳細なメカニズムの解明には至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、古紙微細粉体による高含水泥土処理のメカニズムの解明と、処理泥土の物理特性変化を明らかにすることを目的に、主に以下に示す3項目について研究を実施した。

### (1) 古紙微細粉体を含む処理泥土の地盤材料特性

古紙微細粉体による高含水泥土の処理原理は、古紙に含まれるセルロースによる吸水作用が主たる要因であると考えられる。さらに、古紙微細粉体が土粒子周辺の間隙水を吸水することで地盤が不飽和状態となることも流動性を低下させる要因のひとつであると考えられる。一方、処理泥土を再利用することを考えると、古紙微細粉体による保水性や透水性の向上、さらに、繊維状の物質を添加したことにより、短繊維地盤改良と同様の効果を期待することができる。これら、古紙微細粉体が高含水泥土の材料特性に与える影響を明らかにする。

### (2) セルロースの分解に伴う処理泥土の中長期的な物性変化

提案する処理技術は、セルロースの吸水特性を利用したものであるが、セルロースは土中の糸状菌が分泌するセルラーゼによって分解されることが知られている。一時的に高含水泥土のワーカビリティを向上させることを目的として使用する場合は問題とならないが、処理泥土を保管する場合や、盛土材料などに再利用する場合には、セルロースの分解に伴う処理泥土の中長期的な変化が問題となる。そこで、古紙微細粉体を地盤中に敷設し、長期間にわたってその強熱減量の変化からセルロースの分解の状況を調べる。

### (3) 古紙微細粉体と固化材を併用した際の力学特性

本研究を実施していく中で、対象泥土の含水比が著しく高い場合には、古紙微細粉体による処理だけでは地盤材料として再利用することが難しいことが明らかとなった。そこで、古紙微細粉体とセメントを併用した処理泥土の各種力学試験を実施し、地盤材料としての適用可能性を検討する。



図1 古紙微細粉体（FSP）を用いた高含水処理技術



図2 実験サイトにおける試料の敷設位置<sup>3)</sup>

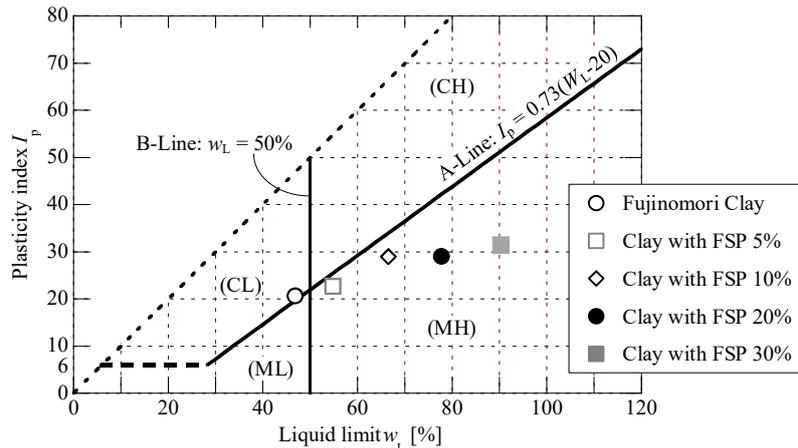


図3 古紙微細粉体を添加したことによるコンシステンシー特性の変化<sup>4)</sup>

### 3. 研究の方法

#### (1) 古紙微細粉体を含む処理泥土の地盤材料特性

古紙微細粉体による処理泥土を対象に、コンシステンシー特性、各種力学特性（せん断、圧密、透水）の変化を調べた。対象泥土は藤森粘土 ( $G_s=2.68$ ,  $w_L=48.5\%$ ,  $w_p=28.0\%$ ) とし、乾燥重量に対して、気乾状態の古紙微細粉体を 5, 10, 20, 30% 添加してその特性変化を調べた。

試料の作製に際しては、はじめに気乾状態の藤森粘土と古紙微細粉体をよく混合した後、液性限界の 1.5 倍以上に含水比調整して脱気・攪拌した。その後、様々な含水比（飽和度 100% なので含水比と間隙比は 1 対 1 に対応）条件を模擬するために遠心力場で圧密させた。圧密後、各試料を温度 20 °C、湿度 60% の恒温恒湿室に移し 24 時間以上静置した後、各種試験を実施した。

#### (2) セルロースの分解に伴う処理泥土の中長期的な物性変化

京都大学防災研究所の宇治川オープンラボラトリーにて実施した。目合い 0.0508 mm のナイロンメッシュに古紙微細粉体を 10 g 投入し、100 mm × 110 mm の大きさになるように縫い合わせた。その後、40 ± 2 °C にて 24 時間乾燥させた試料を一定間隔で地盤中に敷設した。図 2 に現場における試料の配置を示す。実験サイトの選定にあたっては、人や車両の通行がなく、植生がある条件とした。試料を敷設する際は、1 m 四方の正方形の区画を 24 個用意し、1 区画あたり 9 個の試料を敷設することとし、一定期間経過後には区画 1 から順番にサンプリングするようにした。

#### (3) 古紙微細粉体と固化材を併用した際の力学特性

浚渫土砂を古紙微細粉体とセメント系固化材を用いて処理を行うことを想定して、既往の文献から実現現場における浚渫土砂の含水比を調査した。その結果、浚渫土の含水比は、およそ 70% から 150% の範囲に多く分布していることが明らかとなった。そこで、高含水泥土の初期含水比を 100%, 150%, 200% に設定した。古紙微細粉体の添加量は、応募者らが実施した運搬性に関する検討結果<sup>2)</sup>を参考に決定した。また、セメント添加量は、水セメント比  $w/c$  に基づいて、 $w/c=3.75, 7.5, 15$  の 3 つ設定した。試料の作製に際しては、予め乾燥状態で各材料をよく混ぜ合わせた後、所定の蒸留水を加えることとした。その後、1 日の湿潤養生を経て 6 日間水中で養生させた。一軸圧縮試験とコーン貫入試験を実施してその力学特性を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 古紙微細粉体を含む処理泥土の地盤材料特性

図 3 に古紙微細粉体添加に伴うコンシステンシー特性の変化を示す。なお、古紙微細粉体を含む試料については、土粒子と古紙微細粉体の総重量に対する水の重量を含水比として定義し

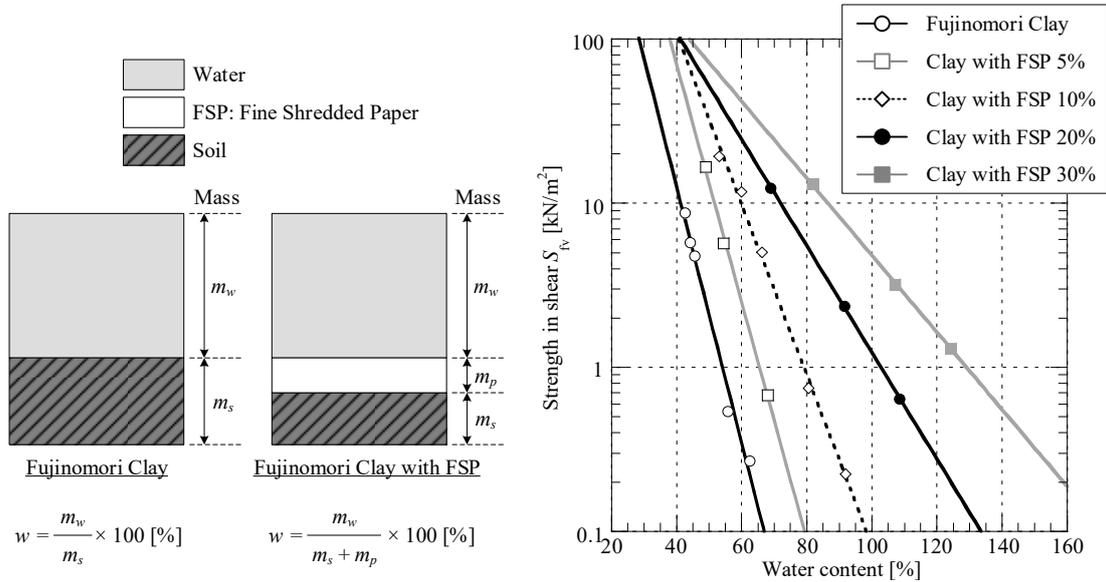


図4 ベーンせん断強さと含水比の関係<sup>4)</sup>

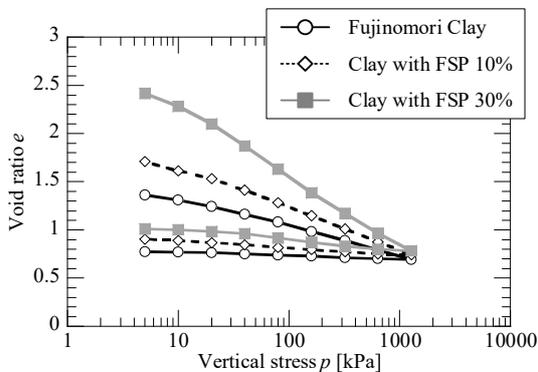


図5 圧密試験から得られた  $e$ - $\log p$  曲線<sup>4)</sup>

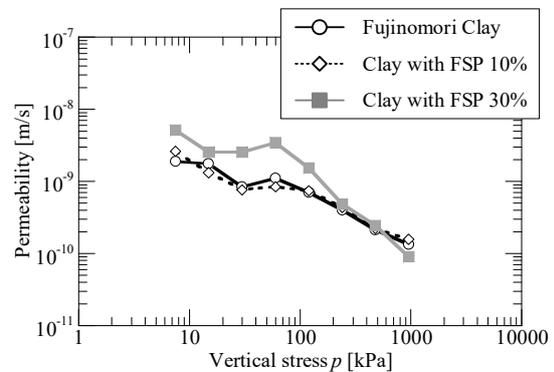


図6 圧密試験から得られた  $k$ - $\log p$  曲線<sup>4)</sup>

ている。図より、古紙微細粉体の添加量が大きくなるにつれて、液性限界、塑性指数ともに増加し、低液性限界粘土 (CL) から高液性限界シルト (MH) へと推移していくことが確認できる。つまり、古紙微細粉体を添加した試料では、粗粒的な性質が強くなっているといえる。

図4に、ベーンせん断試験の結果を示す。図より、古紙微細粉体の有無や添加量によらず、含水比とせん断強さはよい相関があることが確認できる。また、いずれの試料についても、含水比の増加とともにせん断強さが小さくなる傾向を示すが、古紙微細粉体を添加した試料では、同一せん断強さにおける含水比が大きくなっており、高含水状態においても高いせん断強さを有することがわかる。これは、古紙微細粉体の繊維質による補強効果であると考えられる。また、比較のために実施した古紙微細粉体だけをを用いた試料では、藤森粘土とFSPを混合した試料に比べてはるかに高い含水比において同一のせん断強さを有しており ( $S_{fv} = 1 \text{ kN/m}^2 : w \approx 550\%$ ,  $S_{fv} = 10 \text{ kN/m}^2 : w \approx 300\%$ )、特にベーンせん断試験によるせん断特性の評価では繊維質による補強効果が顕著に表れた。

図5に、圧密試験から得られた  $e$ - $\log p$  曲線を示す。なお、古紙微細粉体を含む試料の間隙比については、含水比と同様、土粒子と古紙微細粉体の体積に対する間隙の体積として定義している。古紙微細粉体を含む試料では、初期状態の間隙比が大きく、その後の荷重により間隙比が大きく変化することが確認できる。しかし、荷重が大きくなると、古紙微細粉体の添加量によらず同様の間隙比に収束していることから、古紙微細粉体を用いて高含水泥土を処理した場合にも、加圧により減容化を図ることができ、さらに、古紙微細粉体を添加したことによる処理済み泥土の体積増加はわずかであるといえる。また、圧縮指数と膨潤指数に着目すると、古紙微細粉体の添加によりこれらの値が増加していることが確認できる。

図6に、圧密試験から得られた  $k$ - $\log p$  曲線 (透水係数と荷重の関係) を示す。同図より、いずれの試料についても荷重の増加に伴って透水係数が低下することが確認できる。古紙微細粉体の添加量に着目すると、古紙微細粉体を10%添加した試料では、古紙微細粉体を含まない場合と同様の結果となったのに対し、古紙微細粉体を30%添加した試料では、荷重が小さい条件において透水係数が大きくなる傾向を示した。藤森粘土と古紙微細粉体の透水性を比較した場合、古紙微細粉体の透水性はるかに大きいことが考えられるが、古紙微細粉体の添加による透水係数の増加は限定的であった。これは、古紙微細粉体を添加して透水係数が劇的に大きくなるためには、間隙水を排水するために古紙微細粉体が地盤中に連続して存在し水道を形成する必要があるが、古紙微細粉体添加率10%程度では、古紙微細粉体が連続して水道を形成するまで

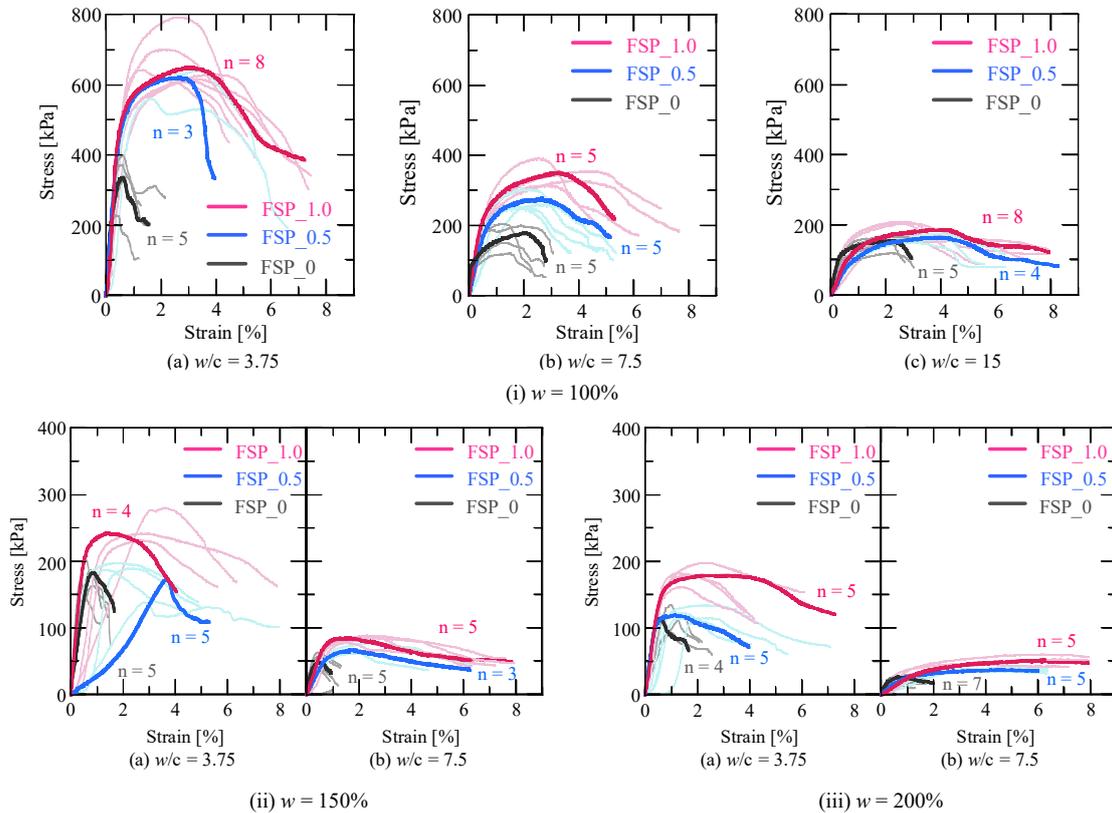


図7 一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係<sup>5)</sup>に追記

には至らなかったためであると考えられる。しかしながら、一定量の古紙微細粉体を地盤に添加した際には透水性の向上が期待できる結果となった。

(2) セルロースの分解に伴う処理泥土の中長期的な物性変化

古紙微細粉体を敷設後、埋設した古紙微細粉体を定期的に回収し、強熱原料試験を実施した。その結果、強熱減量は敷設後から数か月程度で一定値を示すことを確認した。本検討は古紙微細粉体を含んだナイロンメッシュを地盤中に敷設したものであり、実際に古紙微細粉体を地盤中に混合したものではないが、少なくとも本検討結果から、古紙微細粉体は地盤中で一定期間は分解が進むが、その後は非常に緩やかに分解が進むものと考えられる。

(3) 古紙微細粉体と固化材を併用した際の力学特性

図7に一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係を示す。実験では、それぞれの配合に対して5体の試験体を目標に試料を作製した。図中には、それぞれの配合における代表的な結果を濃く描いている。図より、古紙微細粉体およびセメント添加量が増加するにつれて、処理泥土の一軸圧縮強さが増加していることが確認できる。さらに、古紙微細粉体とセメントを併用することで、破壊に至るまでのひずみが大きくなり、粘り強い挙動を示していることがわかる。一般的にセメントのみによる処理泥土は、破壊ひずみが小さいために周囲の地盤とのなじみが悪いことが指摘されているが、古紙微細粉体を併用することでこの点が大きく改善される可能性がある。

<参考文献>

- 1) 澤村康生, 矢野隆夫, 相原恵一, 西村正幸, 木村 亮:セルロースを主成分とする微細粉体による高含水泥土の力学特性変化, 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, No.15-4, pp.505-510, 2017.
- 2) 木田翔平, 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮:古紙を原料とする微細粉体を用いた高含水泥土処理における強度と運搬性の変化, 第13回地盤改良シンポジウム論文集, No.9-3, pp.443-450, 2018.
- 3) 澤村康生, 宮崎祐輔, Vivian Njambi Gathuka, 矢野隆夫, 木村 亮:古紙を微細化加工した高含水泥土処理材の地盤中における分解挙動に関する検討, 第14回地盤改良シンポジウム論文集, pp.33-36, 2020.
- 4) 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮:古紙を原料とする微細粉体による粘性土地盤の特性変化, 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, No.11-4, pp.371-376, 2019.
- 5) 浅井泰一郎, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮:古紙微細粉体による処理泥土におけるセメント添加時の力学特性, 第14回環境地盤工学シンポジウム論文集, No.12-6, pp.415-422, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮
2. 発表標題 古紙を原料とする微細粉体による粘性土地盤の特性変化
3. 学会等名 第13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤村康生, 宮崎祐輔, Vivian Njambi Gathuka, 矢野隆夫, 木村 亮
2. 発表標題 古紙を微細化加工した高含水泥土処理材の地盤中における分解挙動に関する検討
3. 学会等名 第14回地盤改良シンポジウム論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gathuka N. Vivian, 宮崎祐輔, 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮
2. 発表標題 Compressive strength characteristics of a cement-fine shredded paper-treated clay
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 浅井泰一郎, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮
2. 発表標題 古紙微細粉体による処理泥土におけるセメント添加時の力学特性
3. 学会等名 第14回環境地盤工学シンポジウム論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井泰一郎, 澤村康生, 宮崎祐輔, 矢野隆夫, 木村 亮
2. 発表標題 古紙微細粉体による泥土処理にセメントを添加した際の一軸圧縮試験
3. 学会等名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井泰一郎, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮
2. 発表標題 再利用を目的とした古紙微細粉体による処理泥土の力学特性の把握
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井泰一郎, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮
2. 発表標題 古紙微細粉体による固化処理泥土の解砕・締固め時の力学特性
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teshome Birhanu, 浅井泰一郎, 木戸隆之介, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮
2. 発表標題 Unconfined compressive strength of treated soil with fine shredded paper and hydrated lime
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teshome Birhanu, 浅井泰一郎, 木戸隆之介, 澤村康生, 宮崎祐輔, 木村 亮
2. 発表標題 Improvement effect of FSP and lime on volume change and crack for clay slurry observed by X-ray CT and XRF tests
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
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
研究分担者	澤村 康生 (Sawamura Yasuo)  (20738223)	京都大学・工学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	宮崎 祐輔 (Miyazaki Yuusuke)  (10847320)	京都大学・工学研究科・助教  (14301)	

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