

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：54401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04693

研究課題名（和文）粘土分が多く混じる土の締固め密度を高める方法に関する研究

研究課題名（英文）Study on the method of increasing compaction density of clayey soil

研究代表者

新納 格 (NIIRO, Tadashi)

大阪公立大学工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：70198422

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：粘土鉱物4種類（Na型ベントナイト、Ca型ベントナイト、カオリナイトおよびアロフェン）と珪砂7号の混合土に無機と界面活性剤の水溶液を添加して、締固め密度を高める効果を検討した。この結果、特にNa型ベントナイト混合土に対してチオ硫酸ナトリウムが締固め密度を高めることを確認した。また、一軸圧縮強さ特性からその締固め密度が高まるメカニズムを考察し、膨潤の影響も検討した。最後に埋設管の埋戻し工事を想定した屋外実験を行い、締固め密度が高まる効果を確認し、経験式の粘着力 c と内部摩擦角の経時変化を観察して、実用化できる可能性が高いことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘土分が多く混じる土のせん断強さには、粘土鉱物特有の物理化学的性質が強く関係するため、締固め仕事を大きくしても締固め密度を高めることはできない。そのために土質材料としての活用が制限されてきた。本研究はこの問題を改善する物理化学的方法を明らかにしたものであり、学術的意義がある。この成果が実用化され、粘土分が多く混じる土を容易に活用できるようになれば、有用土砂の種類拡大のみならず、降雨や地震に対して粘りと高い遮水性を有する盛土構築が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study investigated the effect of increasing the compaction density by adding inorganic and surfactant aqueous solutions to the mixed soil of four types of clay minerals (Na-type bentonite, Ca-type bentonite, kaolinite and allophane) and silica sand No. 7. As a result, it was confirmed that sodium thiosulfate increases the compaction density especially for Na-type bentonite mixed soil. In addition, the mechanism of the increase in compaction density was considered from the unconfined compressive strength characteristics and the effect of swelling was also investigated. Finally, we conducted an experiment assuming the backfilling work of the buried pipe outdoors, confirmed the effect of increasing the compaction density, observed the change over time of the cohesion c and the internal friction angle, and could be put to practical use showed high potential.

研究分野：地盤工学

キーワード：締固め 粘性土 物理化学的作用 チオ硫酸ナトリウム アニオン性界面活性剤 堤防 盛土 埋戻し

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

当初の背景は近年の降雨や地震による盛土堤防の崩壊が甚大な被害を与えていることにあった。例えば河川堤防の崩壊対策として、越流に対しては堤防裏のり面をアスファルト舗装するなどの構造的な方法が提案されているが、粘土分が多く混じる土で構築して日頃から堤体内の含水量や地下水位を低下できれば、洪水時には堤体への浸透時間を長引かせ、堤体自体を粘り強くして耐震性も向上する。

2. 研究の目的

粘土分が多く混じる土の締固め密度を高める方法を検討し、新たな締固め工法の開発につなげることを目的とした。粘土分が多く混じる土の締固め密度を高めるという発想およびその手段に無機や界面活性剤の水溶液を使用する点は学術的独自性と創造性を有している。

3. 研究の方法

粘土分が多く混じる土のせん断強さには、式(1)の「マトリックポテンシャル」、図-1の単位層やその集合体であるスタック間の電気化学的吸着に起因した式(2)の「浸透ポテンシャル」と「膨潤」、さらに土粒子(本研究では単位層とスタックおよびマクロ粒子を示す)間の「化学的固結」の4つが主に関係している。これらの作用を変化させて土粒子を動き易くすれば、せん断強さが低減して締固め密度が高まると考え、本研究では下記の(1)節と(2)節の方法を検討した。

$$P_m = -\sigma_L \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{\pi}{4} d^2 \sin^2 \beta - \sigma_L \pi d \sin \beta \sin(\beta + \theta) \quad (1)$$

ここに、 P_m :マトリックポテンシャル、式の前半はLaplace圧力、後半は線張力、 σ_L :液体表面張力、 R_1, R_2 :曲率半径、 d :土粒子直径、 β :土粒子間の液量に対する角度、 θ :固液間の接触角。

$$P_s = \kappa T \left\{ \sum_i \rho_i \left(\frac{\chi}{2} \right) - \sum_i \rho_i(\infty) \right\} \quad (2)$$

ここに、 P_s :浸透ポテンシャル、 κ :ボルツマン定数 $=1.38066 \times 10^{-23}$ (J/K)、 T :絶対温度

(K)、 χ :図-1の固体表面間距離、 $\sum_i \rho_i(\chi/2)$:固体表面間中央部($\chi/2$)の全イオン濃度(M)、 $\sum_i \rho_i(\infty)$:図-1のバルクの全イオン濃度(M)、 i :イオン種別。

(1)無機水溶液を添加する方法

粘土分の多い土が対象であるため、上記のへの影響は無視できる。バルクと固体

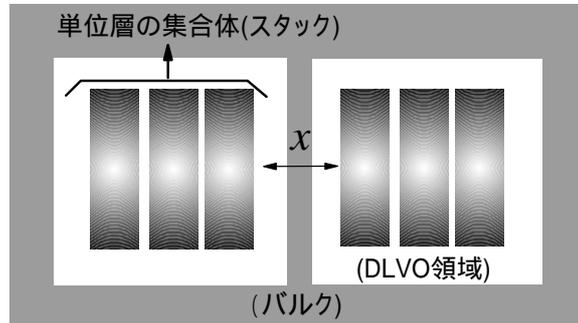


図-1 スタック周辺のDLVO領域とバルク

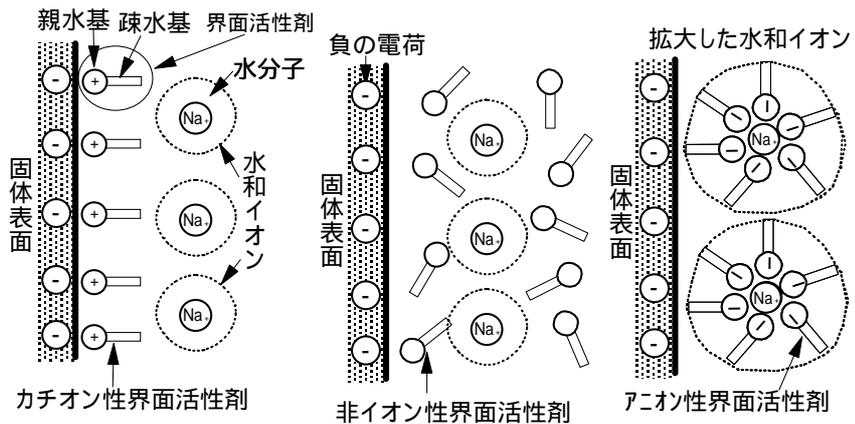


図-2 界面活性剤水溶液の作用モデル

表-1 実験で使した土質

分類など	土質表示	製品名など	土粒子の密度 s (Mg/m ³)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)
細粒分	Na型ベントナイト	クニゲルV1(クニミネ工業製) 溶出陽イオン量Na ⁺ =53.9 meq/100g	2.775	419.2	18.4
	Ca型ベントナイト	クニボンド(同上) 溶出陽イオン量Ca ²⁺ =74.2 meq/100g	2.641	144.5	63.9
	カオリナイト	カオリンクレーRC1(竹原化学製)	2.657	71.8	26.4
	アロフェン	セカードP1(品川ゼネラル製)	2.622	114.1	66.5
粗粒分	珪砂	7号普通品(三河珪石製)	2.661	-	-
屋外実験	粘性土質砂質礫(GCsS)	大阪府交野市内産出(最大粒径75 mm)	2.655	礫44.1%、砂31%、細粒分24.9%	

表面間のイオン濃度に変化が生じれば、 γ が変化し、 θ や α に影響を与える。

(2) 界面活性剤水溶液を添加する方法

液体表面張力が低下するため γ が弱くなる。図-2に示すようにカチオン性界面活性剤(以下、他のイオン性も界面活性剤を省略する)は固体表面を疎水性に変化させるが、吸着面は十分に広いために土粒子間とバルクのイオン濃度差は大きく変わらない、同様に非イオン性は均等分散するため、 θ への影響は小さい。アニオン性は陽イオンに親水基が付着して水和イオンを拡大するため、 θ や α への影響が期待できる。

(3) 使用した土質および水溶液、実験方法

表-1に実験に用いた土質を示す。締固め試験などは細粒分70%粗粒分30%の混合土を使用した。水溶液は蒸留水(現場実験は水道水)、液体表面張力30mN/m前後の界面活性剤(アニオン性(花王製ペレックスOT-P)、非イオン性(同エマルゲンLS-106)、カチオン性(同コータミン24P)を濃度0.5質量%で使用した。無機水溶液はチオ硫酸Na($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)、塩化Na(NaCl)、硫酸Na(Na_2SO_4)および硫酸AL($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)を濃度0.1M、0.3Mと0.5M、ヘキサメタリン酸Na($(\text{NaPO}_3)_6$)を濃度20質量%、ハイブリッドと称してアニオン性(濃度0.5質量%)とチオ硫酸Na(濃度0.1M、0.3Mおよび0.5M)の混合水溶液を使用した。なお、土粒子の密度が異なるため、式(3)および式(4)の体積率を示し



図-3 屋外実験の作業工程とその状況

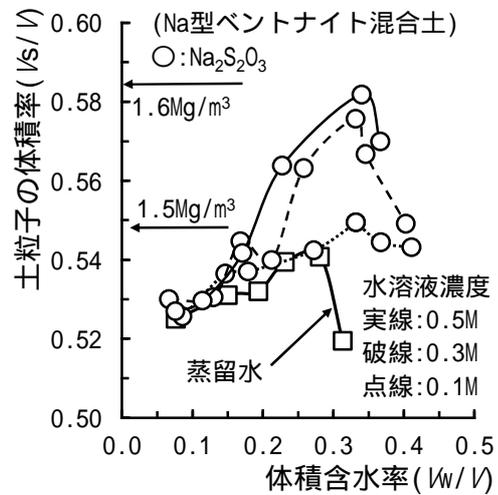


図-4 チオ硫酸Na水溶液の作用

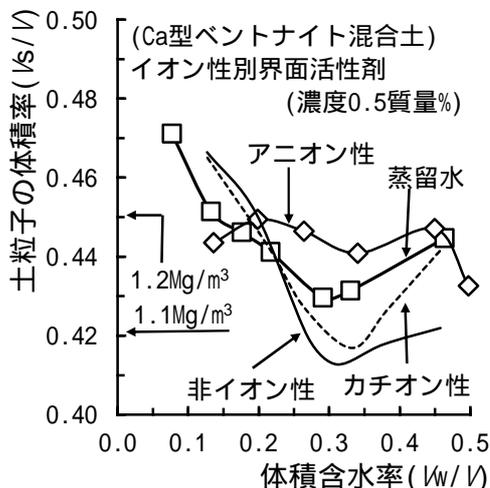


図-5 界面活性剤水溶液の作用

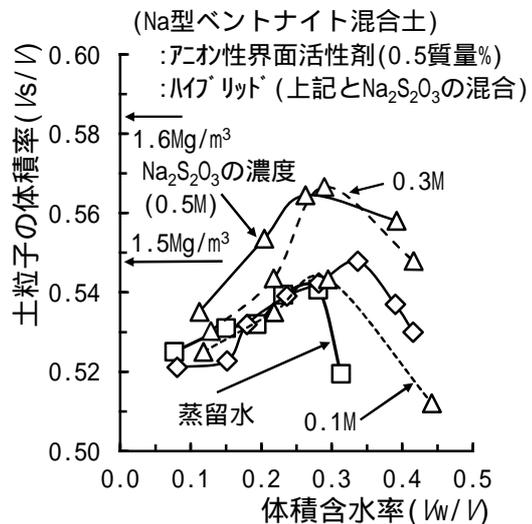


図-6 ハイブリッド水溶液の効果

た。液体の密度は 1.0 Mg/m^3 とした。

$$\frac{V_s}{V} = \rho_d / \rho_s \quad (3)$$

$$\frac{V_w}{V} = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \times \frac{1}{100} \quad (4)$$

ここに、 V_s :土粒子の体積、 V_w :液体の体積、 V :全体積、 ρ_d :締固めた土の乾燥密度(Mg/m^3)、 ρ_w :液体の密度、 w :含水比(%)

室内実験の締固め試験は締固め仕事量 540 kJ/m^3 の非繰返し法で行った。一軸圧縮試験の供試体は $V_w/V=0.3$ および 0.13 の加水を行った混合土を $V_s/V=0.53$ で静的に圧縮して作製した。膨潤量試験は炉乾燥した細粒分を使用し、アロフェン以外は 1.6 Mg/m^3 で作製し両面吸水させた。

埋設管埋戻し工事を想定した屋外実験で散布した水溶液はアニオン性(濃度 0.5 質量%)、チオ硫酸Na(濃度 0.5 M)、ハイブリッド(アニオン性(濃度 0.5 質量%)とチオ硫酸Na(濃度 0.5 M)の混合水溶液)と水道水である。図-3に作業工程を示す。まず、幅 0.6 m ・深さ 1.2 m ・長さ 2 m の溝4か所をバックホーで掘削、溝に仕上がり厚 30 cm 程度に必要な埋戻し土を投入、ジョーロで 20 dm^3 の水溶液を散布、埋設管工事と同じ方法で転圧(散布前の含水比が高いためランマーによる転圧は実施できず、バックホーのバケットで押さえる程度に変更)。～を4回繰返して地表まで埋戻した。埋戻し完了直後に現場密度試験を実施し、定期的に簡易動的コーン貫入試験で M_d 値を測定し、深度 50 cm でベーンコーンせん断試験を行い、横軸に式(5)縦軸に式(6)で直線回帰式を求め、経験式による粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を求めた。

$$\sigma = 2.4 \times 10^2 W_{VC} \quad (5) \quad \tau = 1.5 \times 10^4 T_{VC} \quad (6)$$

ここに、 W_{VC} :ベーンコーンに作用する鉛直荷重(N)、 T_{VC} :ベーンコーンに作用する回転トルク($\text{N}\cdot\text{m}$)。

4. 研究成果

(1) 室内実験

図-4にNa型ベントナイト混合土に蒸留水とチオ硫酸Naを添加した締固め曲線を示す。図中には乾燥密度も記入した。図に示すように 0.3 M と 0.5 M は蒸留水に比べて $V_w/V=0.15 \sim 0.4$ で V_s/V が高まる効果が確認できた。 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ の還元力と主な土中の陽イオンと安定的結合をつくらない性質が V_s/V を高めた可能性が高い。図-5のCa型ベントナイト混合土に界面活性剤を添加した場合、蒸留水と比べて $V_w/V=0.2 \sim 0.45$ でわずかにアニオン性に効果を確認した。図-6はNa型ベントナイトにアニオン性とハイブリッドを添加した場合である。アニオン性に効果は確認できず、ハイブリッドは図-4のチオ硫酸Na単独に比べて同じ濃度

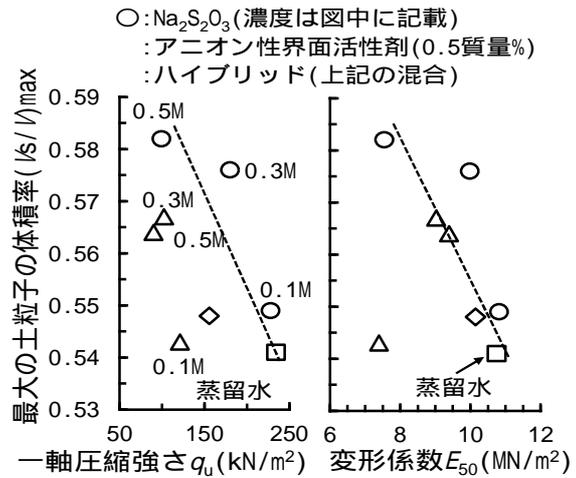


図-7 最大の土粒子の体積率と一軸圧縮強さ等の関係

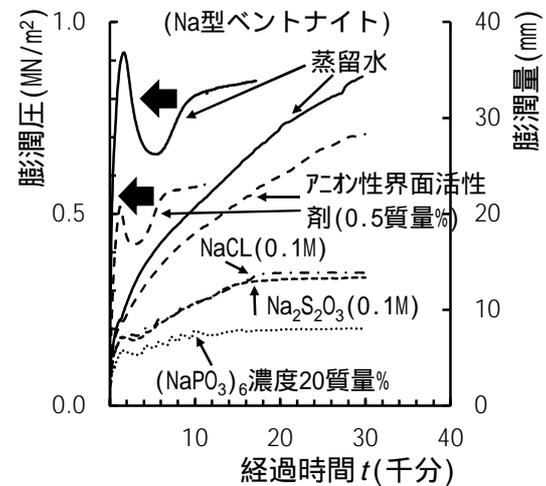


図-8 Na型ベントナイトの膨潤試験結果

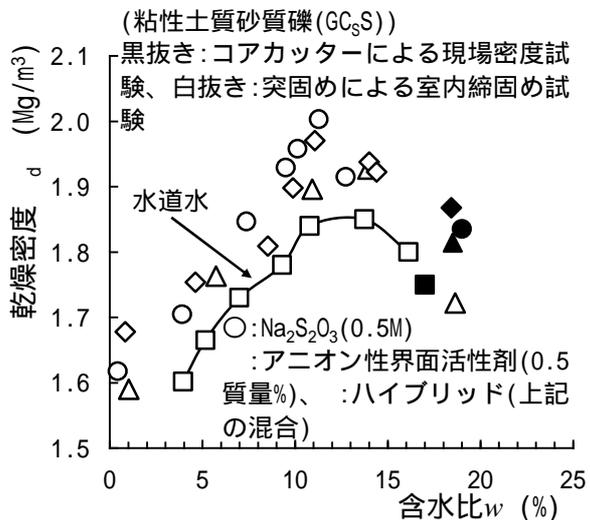


図-9 室内締固め試験結果と現場乾燥密度

で効果が低下した。無機および界面活性の水溶液のいずれもカオリナイト混合土とアロフェン混合土に効果は確認できなかった。図-7は図-4と図-6の各締固め曲線の最大 v_s/v と一軸圧縮試験結果の関係である。一軸圧縮強さや変形係数と最大 v_s/v に反比例の関係がみられ、せん断強さが低減すると締固め密度が高まることを示唆している。図-8にNa型ベントナイトの膨潤圧と膨潤量を示す。蒸留水と比べて無機の膨潤量が低下し、バルクのイオン濃度が固体表面間のそれを上回って膨潤を抑えるからである。Ca型ベントナイトの場合はNa型と逆に蒸留水より膨潤量が大きくなり、カオリナイトとアロフェンの膨潤量に水溶液の影響は認められなかった。

(2)屋外実験

図-9は締固め試験結果(B-c法)に現場乾燥密度をプロットしたものである。埋戻し土は細粒分の少ない礫質土であったが、室内試験はいずれの水溶液も水道水を上回る乾燥密度を示した。埋設管埋戻し工事と同じようにランマーによる転圧は実施できなかったが、現場密度も水道水を上回った。図-10にNd値の深度分布を示す。施工1日後は各水溶液を散布した地盤のNd値は水道水のそれを下回っているが、施工7日後には同等以上に回復している。散布した無機および界面活性剤の消失拡散で締固め密度に応じたNd値に回復したためである。図-11に経験式の粘着力 c と内部摩擦角の経時変化を示す。最上部のチオ硫酸Naは施工直後に内部摩擦角が低下し、その下のアニオン性は粘着力 c が低下している。ハイブリッドは両者を合わせた傾向で、最下部の水道水は概ね一定した値を示した。以上をまとめると以下のようなものである。

- ・Na型ベントナイト混合土にチオ硫酸Naの濃度0.3Mおよび0.5Mを添加すると締固め密度が高まる。
- ・Ca型ベントナイト混合土にアニオン性を添加するとわずかに締固め密度が高まる。
- ・カオリナイトおよびアロフェン混合土は締固め密度が高まる効果は認められなかった。

・埋戻し工事を想定した屋外実験で、水道水の場合を上回る乾燥密度が得られた。

<引用文献>

独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)、土木研究所資料第4176号、pp.31-39、2010。

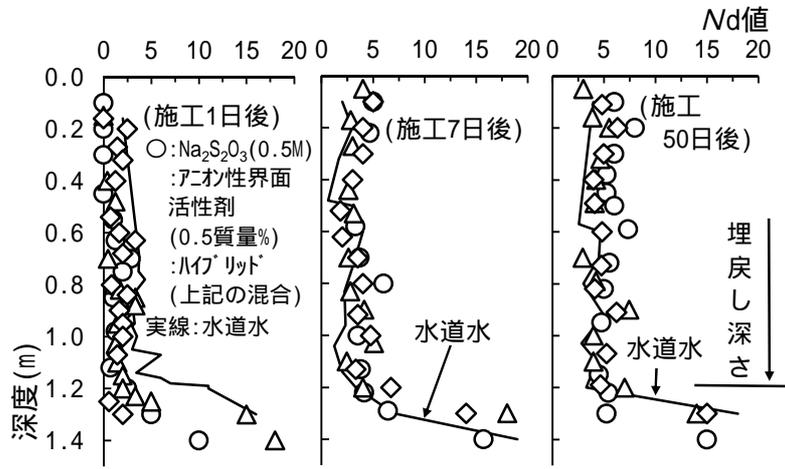


図-10 Nd値の経時変化

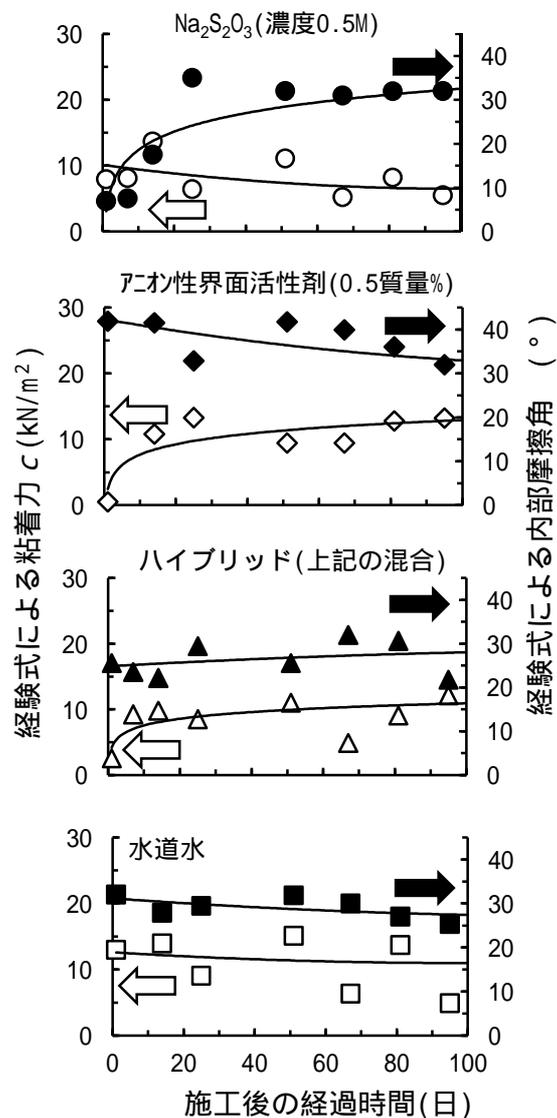


図-11 ベーンコーンせん断試験結果の経時変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤健太、新納 格
2. 発表標題 粘土・珪砂混合土の締固め性改善に関する研究
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会、 -13
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤健太、新納 格、尼丁勇輝、数田智大、杉野智仁、中畑晴稀
2. 発表標題 粘性土の締固め密度を高める方法に関する研究
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会、 -14
4. 発表年 2021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
---------	---------