

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06293

研究課題名(和文)地震と豪雨の複合作用に対するため池堤体の安全性評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of safety evaluation technique of earth dam against combined effects by earthquake and rainfall

研究代表者

上野 和広 (UENO, Kazuhiro)

島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教

研究者番号：60560167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ため池堤体の安全性評価では、地震と豪雨による複合的な作用は考慮されていない。本研究では、災害外力の複合的な作用が土質材料の強度・変形特性へ及ぼす影響について検討を行った。その結果、地震と降雨が複合的に作用する場合、それぞれの作用が地盤の強度・変形特性へ及ぼす影響は独立であり、その発生順序による影響は小さいことが示唆された。また、せん断速度と液状化強度の相関関係に初期せん断応力が及ぼす影響を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震と豪雨の複合的な作用がため池堤体を構成する土質材料の強度・変形特性へ及ぼす影響を明確にしたことで、災害外力の複合作用に対する安全性評価へ資する知見を得たことである。また、ため池現地で観測可能なせん断波速度と液状化強度の相関関係を示したことにより、せん断波速度を指標としたため池堤体の安全性評価の高度化が期待でき、安全な農村環境の構築へ貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Combined effects by earthquake and rainfall are not considered in the current safety evaluation of earth dam. In this study, laboratory investigations were conducted to assess the combined effects by earthquake and rainfall on mechanical properties of soil. As a result, it was suggested that, when earthquake and rainfall act in combination, the influence of each action on the strength and deformation characteristics is independent, and the influence of the order of occurrence is small. Moreover, the influence of the initial shear stress on the relationship between shear wave velocity, which can be measured on site, and liquefaction strength was evaluated.

研究分野：施設機能工学

キーワード：地震 降雨 ため池 弾性波速度 ベンダーエレメント

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

平成 29 年に公表された「ため池一斉点検を踏まえた詳細調査等の実施状況」では、調査を実施したため池の約 55%で耐震不足が確認され、約 38%で豪雨対策が必要とされた。地震や豪雨によるため池の被害は、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震や平成 30 年 7 月豪雨での決壊事例にあるように、人的被害を含む甚大な被害を生じる可能性がある。農業用水の供給に不可欠なため池を安全な状態で保全するには、ため池の災害に対する耐力や被災時における損傷の程度を高い精度で評価する手法を確立するとともに、対策が必要と判断されたため池に対する改修を迅速に進める必要がある。

ため池堤体の災害に対する耐力評価は、被災原因のほとんどを占める地震と豪雨が主要な対象であり、現在までに広く研究が行われてきた。平成 27 年に改定された土地改良事業設計指針「ため池整備」では、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査や液状化の検討に関する内容が追記される等、既往の研究成果が実際のため池堤体の改修を行う際の指針として結実した。しかしながら、従来の研究では地震や豪雨による災害を単独の事象として取り扱っており、両者の複合作用についてはほとんど検討が行われていない。我が国が地震国であり、今後も南海・東南海地震等の大規模地震の発生が懸念されることや、大きな 1 時間降水量を示す降雨の年間発生回数が近年増加傾向にあることを踏まえると、地震と豪雨の複合作用を考慮したため池の安全性評価手法の開発が不可欠である。連続した強振動により被害が拡大した平成 28 年熊本地震や、地震後の降雨による二次被害が懸念された平成 30 年北海道胆振東部地震で示されたように、複数の災害外力に対する社会基盤の脆弱性が近年顕在化しつつある。本研究課題では、ため池を対象施設とし、複数の災害外力に対するため池堤体の安全性評価手法について検討を行う。

2. 研究の目的

ため池の主要な被災原因である地震と豪雨を対象に、両者の複合作用に対するため池堤体の安全性評価手法を開発する。現状のため池堤体の安全性評価では、地震と豪雨が連続的に発生した場合の検討は行われていない。近年、複数の災害外力の作用が自然地盤や社会基盤の被害を拡大する事例が増加していることから、ため池堤体の安全性評価にその影響を組み込むことが不可欠である。本研究課題では、ため池堤体土を対象に複数の災害外力を模擬した室内試験を実施し、災害外力の複合作用が土質材料の強度・変形特性に与える影響を解明する。また、それら強度・変形特性をため池現地で観測可能な指標を用いて評価する手法を開発する。取得したデータを統合し、複数の災害外力による複合作用を考慮したため池堤体の安全性評価手法を確立する。

3. 研究の方法

地震と豪雨による災害外力を対象に、複数の災害外力がため池堤体に作用した際の安全性評価手法を開発するには、土質材料へ地震動や降雨による作用を与えた上で強度・変形特性を評価する必要がある。本研究では、想定する複数の災害外力として、地震後の降雨、降雨後の地震、連続した地震を設定し、要素試験により以下の検討を行う。

(1) 災害外力の規模および、順序および頻度による影響解明

複数の災害外力を考慮した要素試験を実施し、災害外力の複合作用が土質材料の強度・変形特性に与える影響を明らかにする。具体的には、繰返し載荷（地震動を模擬）によって生じるひずみの程度と、繰返し載荷あるいは浸水作用（降雨を模擬）の発生順序と回数に異なる条件を設定することで災害外力の規模、順序および頻度を規定し、それらの条件が土質材料の強度・変形特性に与える影響を解明する。

(2) ため池堤体に特有の条件に対する災害外力の複合作用の影響解明

地盤の地震時挙動等に関する既往の研究では、細粒分をほとんど含まない砂質土が主に試料として使用されてきた。しかしながら、貯水構造物であるため池堤体は粘性土等の遮水性に富む材料で構成される。また、ため池堤体は盛土構造物であることから、堤体内には初期せん断応力が作用する。ため池堤体の安全性を評価するには、これらため池堤体に特有の条件を考慮する必要がある。そこで、(1) で述べた要素試験で用いる供試体は、ため池堤体で想定される試料の粒度分布、乾燥密度、初期含水比、初期せん断応力等を考慮した上でその条件設定を行う。これにより、複数の災害外力による複合作用の影響を、ため池堤体を構成する材料特性と初期応力条件に応じて明らかにする。

(3) 災害外力の複合作用に対するため池堤体の安全性評価手法の開発

ため池現地で観測可能なせん断波速度の計測を併せて行う要素試験を実施し、土質材料の強度・変形特性とせん断波速度の相関関係を分析する。これにより、せん断波速度を指標とした「災害外力の複合作用に対するため池堤体の安全性評価手法」を開発する。

4. 研究成果

(1) 災害外力の規模および、順序および頻度による影響解明

地震と豪雨による災害外力を模擬するため、実験にはセラミックフィルター（空気侵入値 200 kPa）付きペDESTALを備えた不飽和土三軸試験機を用いた。供試体は、ため池堤体の条件を考慮し、最適含水比に調整した試料に、普通ポルトランドセメントを試料の乾燥質量に対して 1%混合した後、直径 5 cm×高さ 10 cm のモールド内で締固め度が 90%となるように突固めて作製した。図-1 に、本研究で用いた試料の粒度分布を示す。最適含水比と最大乾燥密度は標準プロクターに対する値である。試料に普通ポルトランドセメントを混合した理由は、自然地盤や転圧から長期間経過した盛土で確認される年代効果を模擬するためである。供試体作製から三軸試験開始までは湿潤養生箱内で養生を行い、その養生期間は予備試験として実施した一軸圧縮試験結果（図-2）を基に、一軸圧縮強度が概ね収束するまでの 21 日間とした。なお、図-2 にはセメントを混合していない真砂土のみの供試体の結果（0%）も併せて示す。

本研究で実施した試験の条件一覧を表-1 に示す。全ての Case で、三軸セル内の飽和したセラミックフィルター付きペDESTALに供試体を設置した後、非排水状態でセル圧を 50 kPa まで上昇（間隙空気圧は 0 kPa）させ、50 kPa の基底応力を作用させた。その後、 S_{u1} が 100 kPa の Case では、間隙空気圧とセル圧の差が 50 kPa を保つよう、同時に両圧力を 100 kPa 上昇させた後、排水状態にすることで 100 kPa のサクシオンを作用させた。この状態を 48 時間継続し、圧密を行った。圧密後、 ε_{Ps} が 0.0 以外の Case では、地震動を模擬した予備せん断を実施した。この予備せん断は排気・非排水状態で実施し、表-1 の ε_{Ps} 欄に示す軸ひずみが生じるまで 0.03%/min の載荷速度で供試体を圧縮した後、主応力差が初期状態（ゼロ）に戻るまで除荷することによって実施した。予備せん断終了後に排水状態とし、 S_{u2} に示すサクシオンの値になるよう、間隙空気圧とセル圧を同時に調整した。この状態を 48 時間継続した後、0.007%/min の載荷速度で軸ひずみが 15% に達するまで排気・排水状態でせん断を行った。表-1 の No.1-3 は降雨によって地盤の含水比が高くなった状態で地震動によるせん断を受けた状況を、No.4-6 は無降雨の乾燥状態で地震動によるせん断を受けた状況を、No.7-8 は無降雨の乾燥状態で地震動によるせん断を受けた後に降雨によって含水比が高まった状況を模擬している。

図-3 に、表-1 のサクシオン履歴と予備せん断履歴を与えた後に実施したせん断時の主応力差一軸ひずみ関係を示す。図-3(a)では No.1-3 と No.4-6 を、図-3(b)では No.1-3 と No.7-8 を比較している。図-3(a)を見ると、供試体に作用するサクシオンが 0 kPa の No.1-3 では、サクシオンが 100 kPa の No.4-6 よりもせん断中に生じる主応力差が小さく、せん断強度が低いことが分かる。これは、No.4-6 ではサクシオンの作用によって土粒子に作用する有効応力が増加したのに対し、No.1-3 ではサクシオンが 0 kPa であることからその効果が小さかったためである。これより、降雨時に含水比が増加した際、サクシオンの低下に伴ってせん断強度が大きく低下することを確認できる。また、同じサクシオンが作用する条件下で予備せん断がせん断強度に与える影響を見ると、サクシオンが 0 kPa の No.1-3 では、予備せん断で生じた軸ひずみの値の増加に伴って最大主応力差が僅かに増加する結果となった。一方、サクシオンが 100 kPa の No.4-6 では

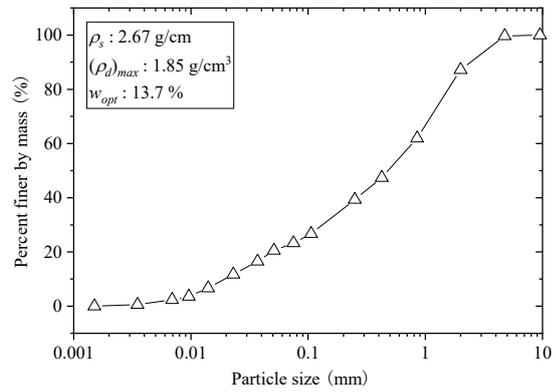


図-1 試料の粒度分布

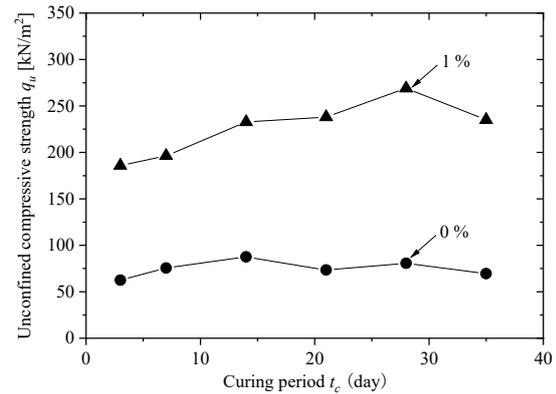


図-2 一軸圧縮試験結果

表-1 試験条件

No.	Case	基底 応力 (kPa)	S_{u1} (kPa)	ε_{Ps} (%)	S_{u2} (kPa)
1	Su0 Ps00 Su0	50	0	0.0	0
2	Su0 Ps05 Su0		0	0.5	0
3	Su0 Ps50 Su0		0	5.0	0
4	Su100 Ps00 Su100		100	0.0	100
5	Su100 Ps05 Su100		100	0.5	100
6	Su100 Ps50 Su100		100	5.0	100
7	Su100 Ps05 Su0		100	0.5	0
8	Su100 Ps50 Su0		100	5.0	0

* S_{u1} : 予備せん断終了時までのサクシオン, ε_{Ps} : 予備せん断で供試体に与えた軸ひずみ, S_{u2} : 予備せん断付与後からせん断が終了するまでのサクシオン

予備せん断で生じた軸ひずみの値の増加に伴って最大主応力差が若干低下（6%程度）した。図-2に示す一軸圧縮試験結果では、年代効果を模擬したセメント混合率1%の供試体の一軸圧縮強度は、年代効果のないセメント混合率0%のものと比較して2倍以上の値であった。この点を考慮すると、今回予備せん断で与えた最大5%程度の軸ひずみでは、セメント混合率1%で模擬した年代効果は、せん断強度の面からはほとんど喪失しなかったと考えられる。

次に、図-3(b)で予備せん断を与えた時のサクシヨンの影響を見ると、予備せん断で生じた軸ひずみが0.5%の場合（No.2とNo.7）と5.0%の場合（No.3とNo.8）の双方で主応力差-軸ひずみ関係が酷似している。また、予備せん断で与えた軸ひずみの値が大きいほど、ピーク強度を示す時の軸ひずみの値が小さくなっており、この傾向は図-3(a)のNo.4-6でも確認できる。このことは、地震と降雨が複合的に作用する際、それぞれの作用が地盤の強度変形特性に与える影響は独立であり、その発生順序による影響は小さいことを示唆する。

(2) 災害外力の複合作用に対するため池堤体の安全性評価手法の開発

せん断波速度 V_s を活用したため池堤体の安全性評価手法を開発するため、せん断波速度 V_s の計測を併せて実施する液状化試験を実施した。試験には、ベンダーエレメントによるせん断波速度 V_s の計測設備を装備した繰返し三軸試験機を用い、液状化強度比 R_L とせん断波速度 V_s の計測を併せて実施することで、両者の関係性を分析した。

試験に用いた試料は、図-1と同様である。この試料を、標準プロクターでの最大乾燥密度に対する締固め度85%となるよう、直径50mm×高さ100mmのモールド内で突き固めて供試体を作製した。その後、供試体を試験機へ設置し、飽和と圧密を行った。圧密は、ため池堤体の応力状態を考慮し、初期せん断応力が作用しない状態（等方応力状態）と初期せん断応力が作用する状態（有効軸方向応力 σ'_a の有効側方向応力 σ'_r に対する比が2.0）で実施した。圧密時の有効軸方向応力 $(\sigma'_a)_c$ と有効側方向応力 $(\sigma'_r)_c$ の値は、平均有効主応力 $(\sigma'_m)_c$ が100kN/m²となるように設定した。また、試験条件に応じ、この拘束圧を荷重した状態で供試体へ微小な応力振幅（主応力差の片振幅 $\sigma_d = 10$ kN/m²）の繰返し荷重を実施した。この微小繰返し荷重は、供試体の乾燥密度を大きく変化させずに土粒子構造をより安定的なものとする目的で実施した。これにより、同程度の乾燥密度で土粒子構造が異なる供試体を作製した。圧密終了後、非排水状態で繰返し荷重を行った。繰返し荷重は、主応力差が所定の片振幅 σ_d を有する0.05Hzのsin波となるように実施し、両振幅軸ひずみDAが10%へ達するまで続けた。また、圧密中の応力増加時や繰返し荷重前に、ベンダーエレメントによるせん断波速度 V_s の計測も併せて行った。

図-4に、一連の試験結果から求めた、「両振幅軸ひずみDA=1, 2, 5%に対する繰返し応力振幅比CSR-繰返し荷重回数 N_{cyc} 関係（液状化強度曲線）」を示す。なお、繰返し応力振幅比CSRは、 $CSR = \sigma_d / 2(\sigma'_m)_c$ の値である。CSR- N_{cyc} 関係は、異方応力状態(Ani)よりも等方応力状態(Iso)の方が上方に位置することから、初期せん断応力が作用しない条件の方が非排水繰返し荷重に対して高い抵抗性を有することが分かる。また、等方応力状態(Iso)と異方応力状態(Ani)の双方において、微小な応力振幅の繰返し荷重を供試体へ作用させることによって液状化強度曲線は上方へ移動した。これは、微小な応力振幅の繰返し荷重を与えることによって、より安定的

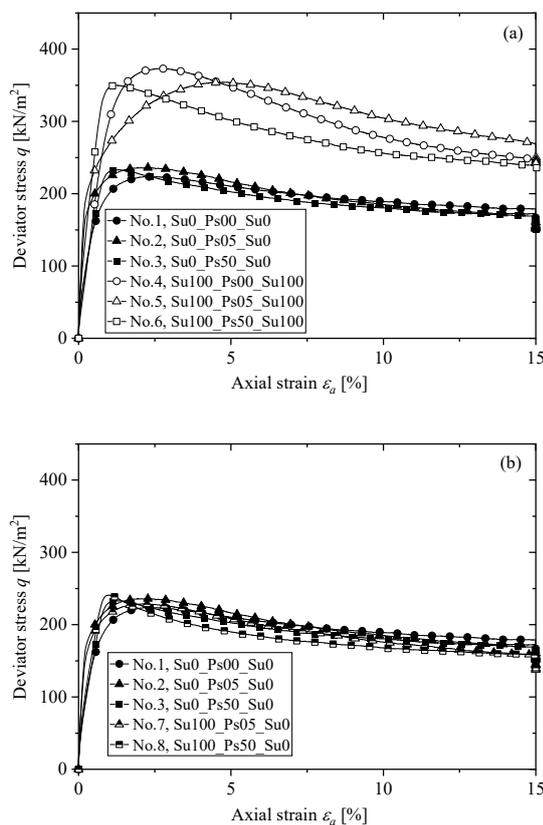


図-3 主応力差-軸ひずみ関係

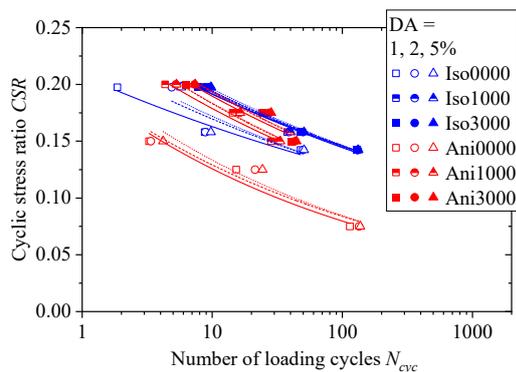


図-4 両振幅軸ひずみ1, 2, 5%に対する繰返し応力振幅比CSRと繰返し荷重回数 N_{cyc} の関係（液状化強度曲線）

な粒子骨格構造が形成され、非排水繰返し
 载荷に対する抵抗性が向上したためと考え
 られる。

図-4 に示すデータを対象に、「20 回の繰
 返し载荷で両振幅軸ひずみ $DA = 5\%$ を生
 じさせる繰返し応力振幅比 (液状化強度比,
 $CSR_{Ncyc=20,5\%}$)」を読み取り、繰返し载荷直
 前のせん断波速度 V_s に対してプロットした
 図を図-5 に示す。図-5 を見ると、微小な応
 力振幅の繰返し载荷を与えることによって
 液状化強度比 $CSR_{Ncyc=20,5\%}$ が上昇したことが
 分かる。また、微小な応力振幅の繰返し
 载荷によってせん断波速度 V_s も増加し、そ
 の結果として液状化強度比 $CSR_{Ncyc=20,5\%}$ と
 せん断波速度 V_s は正の相関を示した。せん
 断波速度 V_s の増加に伴う液状化強度比
 $CSR_{Ncyc=20,5\%}$ の上昇傾向を見ると、等方応
 力状態 (Iso) よりも異方応力状態 (Ani)
 の方が大きく上昇していることから、微小
 な応力振幅の繰返し载荷が安定的な粒子骨
 格構造の形成へ寄与する効果は、初期せん
 断応力が作用する状態の方が顕著となる可
 能性がある。

図-6 に、図-5 の各データを基準値
 ($CSR_{Ncyc=20,5\%}^*$, V_s^*) とし、その基準値に
 よって他のデータを正規化 ($CSR_{Ncyc=20,5\%}/$
 $CSR_{Ncyc=20,5\%}^*$, V_s/V_s^*) した図を示す。既往
 の研究¹⁾と同様に、 $CSR_{Ncyc=20,5\%}/$
 $CSR_{Ncyc=20,5\%}^*$ と V_s/V_s^* は正の相関を示した。

また、図-6 で初期せん断応力の影響を見ると、 V_s/V_s^* の増加に伴う $CSR_{Ncyc=20,5\%}/CSR_{Ncyc=20,5\%}^*$ の
 上昇は、初期せん断応力が作用する異方応力状態 (Ani) で顕著である。そのため、初期せん断
 応力が作用する貯水盛土構造物においては、サンプリング時における試料の乱れなどの影響に
 よって原地盤と室内試験で異なるせん断波速度 V_s が観測された場合、室内試験で求めた液状化強
 度比と原地盤の液状化強度比の相違が、既往の研究¹⁾から想定されるよりも大きくなる可能性が
 ある。

参考文献

1) 清田 隆, 呉 杰祐: 原位置と室内試験による V_s を用いた液状化強度比の推定法. 地盤工学
 ジャーナル, 12(4), pp. 375-383, 2017.

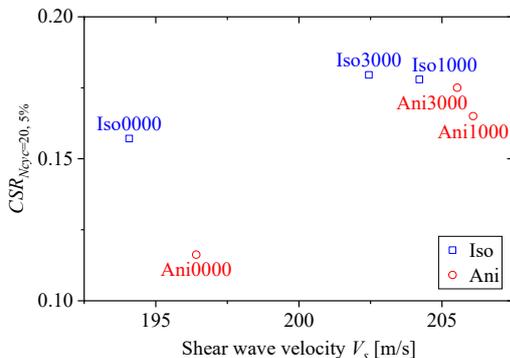


図-5 液状化強度 $CSR_{Ncyc=20,5\%}$ と繰返し载荷直
 前のせん断波速度 V_s の関係

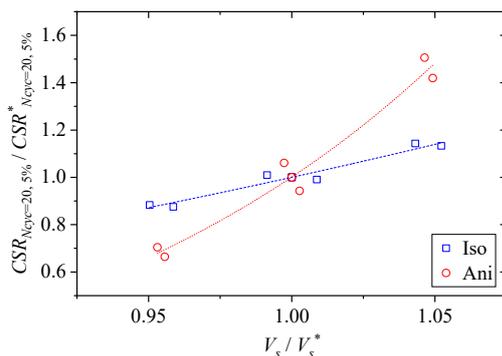


図-6 正規化した液状化強度比 $CSR_{Ncyc=20,5\%}/$
 $CSR_{Ncyc=20,5\%}^*$ と正規化したせん断波速度 V_s/V_s^*
 の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Duttine Antoine, Tatsuoka Fumio, Ueno Kazuhiro	4. 巻 92
2. 論文標題 Effects of compaction on soil undrained shear strength deteriorating during undrained cyclic loading and controlling seismic stability of embankment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 E3S Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 18003 ~ 18003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/e3sconf/20199218003	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 -

1. 著者名 上野和広、泉 明良、Duttine Antoine、矢崎澄雄、堀 俊和	4. 巻 15
2. 論文標題 非排水繰返し載荷を受ける飽和土の非排水せん断強度の簡易推定手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 241 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.15.241	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上野和広、河野瑞基
2. 発表標題 地震と降雨の影響を考慮した土のせん断強度に関する基礎的検討
3. 学会等名 第75回農業農村工学会中国四国支部講演会
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
---------	---------