

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02233

研究課題名（和文）深層学習によるダイラタント流体の履歴復元力モデルの作成と緩衝材としての実用性検討

研究課題名（英文）Development of Hysteresis Model of Dilatant Fluid by Deep Learning and Examination of Practicality as Shock Absorber Material

研究代表者

梶田 幸秀 (Kajita, Yukihide)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10403940

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：ダイラタント流体をRC板の上に設置し、重錘落下実験を行った。天然ゴムブロックを設置した場合との比較より、重錘の衝突時の運動エネルギーが小さいときは、ダイラタント流体の方が衝撃力緩衝効果が高いことを明らかにした。しかし、大地震時の落橋防止システム用緩衝材として用いるには、吸収できるエネルギー量不足は否めず、橋梁用の緩衝材として用いるには、さらなる工夫を要する。また、数値解析においては、載荷時は荷重と変位の関係を直線に、除荷時は大きな剛性で荷重を除荷する復元力モデルを作成し、その荷重-変位関係モデルをOpenSeesに外挿することで、実験でのRC板の最大変位は推定できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダイラタント流体を橋梁用緩衝材として用いるためには、ゴム製緩衝材に比べれば、エネルギー吸収量が不足していることが確認されたが、衝突エネルギーが小さい現象では、ゴム製緩衝材に比べて優れた衝撃力緩衝効果を有することを明らかにした。また、限られた実験の範囲内ではあるが、載荷時の荷重と変位の関係は物体の衝突速度にかかわらず直線で表すことが出来ることを明らかにした。ゴム製緩衝材と比べても費用は同等か安いものであり、また自然由来の原料しか用いていないため、廃棄したとしても環境に優しい材料であることは社会的には今後利活用される余地が残されているといえる。

研究成果の概要（英文）：A weight drop experiment was conducted by placing dilatant fluid on a RC plate. Compared with the case of a natural rubber block, it was found that the dilatant fluid was more effective in absorbing the impact force when the kinetic energy of the weight was small. However, it cannot be denied that the amount of energy that can be absorbed is insufficient for use as a buffer material for a bridge fall prevention system in the event of a major earthquake, and further work is required for its use as a buffer material for bridges. In the numerical analysis, the maximum displacement of RC plates in the experiment was estimated by extrapolating the load-displacement model to OpenSees.

研究分野：地震工学，衝撃工学

キーワード：ダイラタント流体 緩衝材 復元力特性 重錘落下実験

## 1. 研究開始当初の背景

橋梁の非線形動的応答解析において、例えば、ダイラタント流体材料を橋梁に用いる場合、ダイラタント流体材料の復元力特性(荷重-変位関係)を表す数学モデルの作成が必要となる。これまで、数学モデルの作成については、できる限り実物大の実験を実施し、その実験結果である荷重-変位関係を数式(近似式)で表す方法や、材料の応力-ひずみ関係から部材全体の荷重-変位関係を算出する方法などが行われている。1995年阪神・淡路大震災以降、急速に普及したゴム支承においても、橋梁の非線形動的応答解析に適用するため、種々の数学モデルが実験や数値解析から提案されている。橋梁に新規の材料や構造部材(例えば制振ダンパーなど)を適用する場合、実物大もしくはそれに近い大きさでの実験が可能ならば、近似式の作成を目指す方法も一つの方法であるが、近年急速に発展してきた深層学習の技術を用い、実験結果である荷重-変位関係を教師データとして用いてニューラルネットワークに復元力特性を学習させ、学習済みモデルを橋梁の非線形動的応答解析に適用できれば、近似式の作成は不必要となる。つまり、この手法が確立すれば、今後新たな材料や構造部材が開発される、発見される場合においても、比較的容易にその材料や構造部材を用いた構造物への非線形動的応答解析が実施できる。

緩衝材といえば、現時点では、橋梁ではゴム製緩衝材、落石防護構造物では敷き砂が一般的である。ダイラタント流体材料は、外力の作用速度により力学的性質を変えることができ、その性質をうまく活用できれば、ダイラタント流体材料は緩衝材として有用な材料の一つとして成立すると考えており、ダイラタント流体材料の落橋防止システム用緩衝材としての実用性を検討する価値は十分にあると考えていた。

ダイラタント流体材料は、力が作用していないときには流体であるため、形状の制約条件をほとんど受けず、費用も安価である。また、天然ゴムには劣るが、金属(鋼)はもちろん、砂や土に比べれば軽い材料であり、死荷重を低減することができる。本研究課題では、落橋防止システム用緩衝材としての実用性について検討するが、橋梁構造物のみならず、その他、衝撃的な作用を受ける土木構造物、例えば、落石防護構造物(ロックシェッド)や砂防ダム(土石流補足ダム)などの緩衝材として広く用いられる可能性を秘めている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、新たな材料や構造部材が開発された時に、その材料や構造部材を用いた構造物の非線形動的応答解析を実施する手法を深層学習の技術を用いたニューラルネットワークにより確立することと、ダイラタント流体材料を新たな落橋防止システム用緩衝材として適用可能なかどうかを明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

剛体と見なせる十分に厚いRCブロックの上にダイラタント流体を設置し、重錘落下実験により、重錘の流体貫通変位とRCブロックに作用する衝突力を計測することで、ダイラタント流体の荷重-変位関係を得ることに努めた。

次に、その荷重-変位関係を深層学習の技術を用いたニューラルネットワークに学習させ、学習したニューラルネットワークを地震応答解析ソフトウェアであるOpenSeesに外挿させることで、ダイラタント流体を緩衝材として用いた構造物の地震時応答解析が実施できる環境の構築を目指した。

一方、ダイラタント流体を橋梁用緩衝材として適用可能なかどうかを判断するために、RC板の上にダイラタント流体を設置し、重錘落下実験を行い、緩衝材としての効果を確認すると共に、ダイラタント流体の荷重-変位関係モデルをOpenSeesに外挿して、実験のシミュレーション解析を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 剛体にダイラタント流体を設置した重錘落下実験

ダイラタント流体を用いた落橋防止システム用緩衝材の適用可能性を橋梁全体系の解析によって検討する際に、ダイラタント流体の剛性を決定する必要がある。そこで、本研究では、重錘を衝突物体とみなした衝突実験をダイラタント流体の厚みを変えながら実施し、その厚みと重錘の落下高さ(重錘の衝突速度)がダイラタント流体の荷重変位関係に与える影響について検討し、ダイラタント流体の荷重-変位関係データを得ることに努めた。

写真-1に実験状況を示す。ロードセルの上に厚さ50mmのコンクリートブロックを設置し、その上にダイラタント流体を設置した。重錘は127kgのものを用い、重錘にもロードセルを設置し、直径85mmの円柱形の載荷板を設置した。ダイラタント流体として、本実験ではウーブレック(水溶き片栗粉)を使用した。水に対する片栗粉の重量比を1.5として内側寸法250mm四方の

容器に深さが 50mm, 100mm, 150mm となるように注ぎ込み, それぞれに対して所定の高さから重錘を自由落下させ, ロードセルの荷重と重錘の流体貫通変位を計測した。容器底面と接触しなかった厚みと重錘の落下高さの条件のダイラタント流体の荷重-変位関係から剛性を定めることとした。

図-1 に落下高さ 400mm, 図-2 に落下高さ 600mm のときの荷重変位関係を示す。落下高さが低い場合においては, ダイラタント流体の厚さに関わらず重錘がダイラタント流体中で停止するまで剛性は一定であったが, 落下高さ 600mm と衝撃速度が大きい場合においては, 衝突初期の剛性は一定で, とある変位を超えると, 剛性はより大きな一定値に変化した。同一の落下高さで, ダイラタント流体の厚さを変えた場合, 厚みが増すほど剛性が小さくなる傾向がみられた。また, 落下高さ 600mm といった衝撃速度が大きく, 剛性が変化する場合においても, 厚さが増す方が衝突初期と変化後の剛性は小さくなった。図-3 に厚さ 150mm のときの荷重変位関係を示す。剛性が大きく変化する変位は, 落下高さに関わらず, 94mm とほぼ同じ変位となった。同一の厚さで, 衝突速度を変えた場合, 衝突速度に関わらず, ダイラタント流体の荷重変位関係は同様の変移を辿った。

以上より, 本実験条件の範囲内において, 重錘が容器底面に衝突せず, ダイラタント流体中に停止する場合については, 重錘の衝突速度やダイラタント流体の厚さにかかわらず, 荷重 (衝突力) と変位の関係は直線もしくは 2 つの直線で表すことができることが判った。特に, ダイラタント流体の厚さが同じの場合, 重錘の衝突速度を変化させても初期剛性, 硬化後の剛性ともにほぼ同じになり, 本実験では厚さ 150mm のダイラタント流体の場合は, 初期剛性を 0.140kN/mm, 硬化時の変位を 94mm, 硬化後の剛性を 1.635kN/mm と設定すれば, 橋梁全体系解析を実施することができることが判った。

## (2) 深層学習の技術を用いたニューラルネットワークによる復元力特性の再現

従来, 材料や部材の非線形履歴挙動のモデル化は, 実験によって得られた荷重-変位関係を何らかの数学モデルで定式化することで行われてきた。非線形性が複雑である材料や部材に対しては, 既存の数学モデルが使用できず定式化が困難な場合もある。数学モデルでの定式化の代わりに関数近似能力のあるニューラルネットワークを活用し, ダイラタント流体の重錘落下実験から得られた荷重変位関係及び荷重速度関係を学習させることでニューラルネットワークがダイラタント流体の復元力特性を認識しモデル化可能かどうかを確認した。

ニューラルネットワークとは人間の脳神経細胞網を工学的に模擬するもので, 学習能力と自己組織化能力を有する情報処理システムである。モデル化した人間の神経細胞を複数結合させることによりネットワークを構築する。各ノードでは前層からの入力値と結合荷重の積の総和にバイアスを加えた  $x$  を求め, 活性化関数 ( $f$ ) を通して出力する。種々の入力データの組に対し

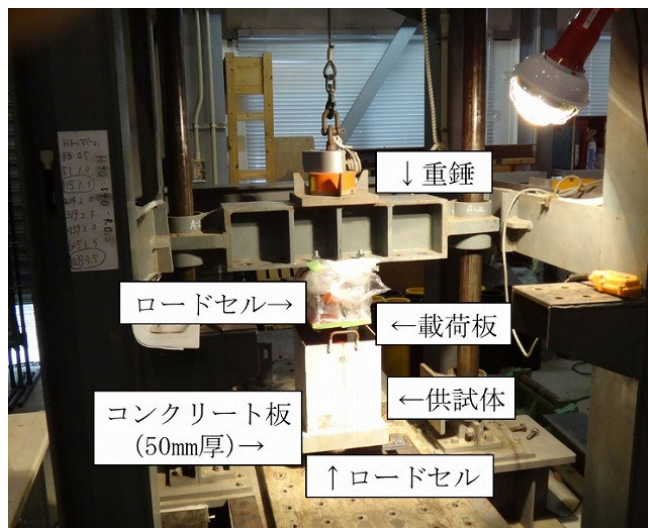


写真-1 実験状況

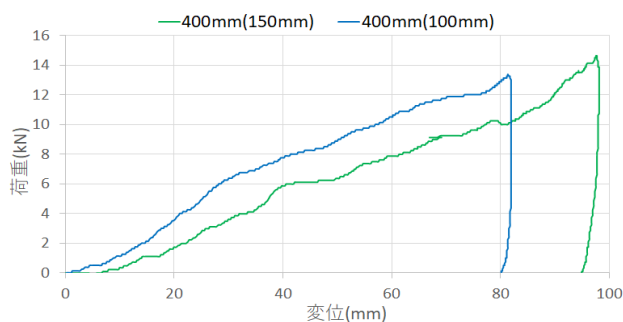


図-1 落下高さ 400mm における荷重変位関係

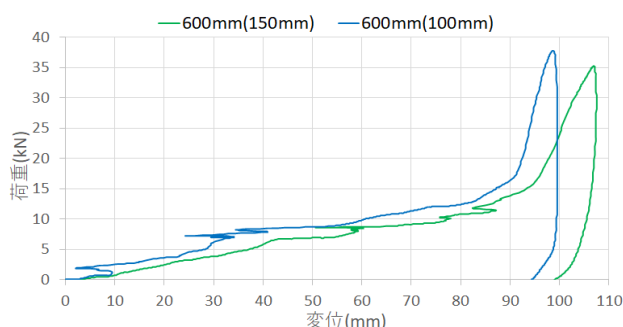


図-2 落下高さ 600mm における荷重変位関係

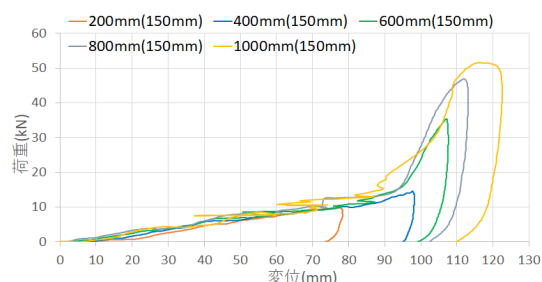


図-3 流体厚 150mm の荷重変位関係

て、ネットワークから出力される出力値と正解値との差が最小となるように、ノード間の結合荷重  $W$  を修正する過程を繰り返すことでニューラルネットワークが問題解決能力を持つようになる。結合荷重の更新方法には現在のディープラーニング研究で最も効果を上げている最新の Adam 法を使用した。本研究で用いた入出力要因は既往の研究を参考に、最大経験変位・荷重、最新折り返し点の変位・荷重、1 ステップ前の変位増分・荷重増分及び現在の変位を入力要因とし、現在の接線剛性を出力要因とした。荷重速度関係では、先に示した入出力要因の変位に関するものを速度に置き換えて定めた。

ダイラタント流体は条件の異なる 9 個の実験データがある。荷重変位関係ではすべてのデータに対して、接線剛性は荷重変位関係を 6 次関数に近似し、近似式の一階微分で導出した。荷重速度関係では、速度が正の値のみで構成されている 3 個のデータに対して、データの時間刻みを粗くしてスムージング処理を施し、接線粘性係数は荷重速度関係を 6 次関数に近似し、近似式の一階微分から導出した。ダイラタント流体の荷重変位関係と荷重速度関係はどちらも荷重が最大値となる点までを対象として学習を行った。

得られた学習データを用いて、モデル化を行った。中間層数は 2 層から 9 層、ノード数は 10 から 100 の中で試行錯誤的に求めた。ダイラタント流体の学習回数と二乗和誤差の推移、ニューラルネットワークを用いて出力した推定値と正解の教師データのとの比較を図-4, 5 に示す。ここでは厚さ 150mm, 高さ 200mm の結果を代表例として示す。

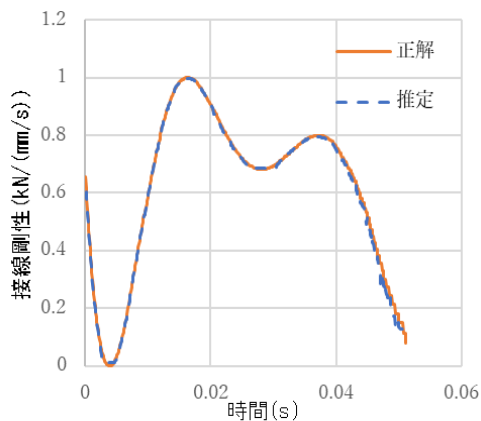


図-4 正規化された時刻歴接線剛性

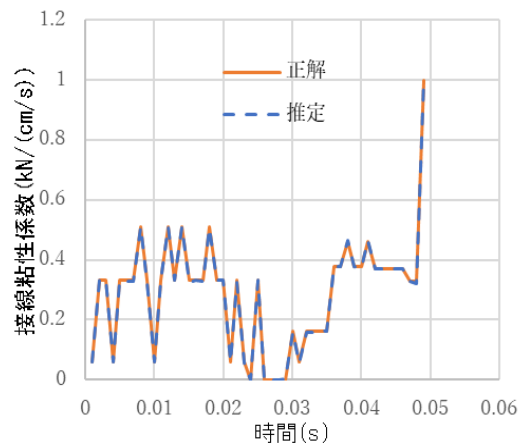


図-5 正規化された時刻歴接線粘性係数

### (3) RC 板上にダイラタント流体を設置した重錘落下実験 (衝撃力緩衝効果実験)

続いて、ダイラタント流体が緩衝材としての機能を有するかどうかを確認するため、鉄筋コンクリート板 (以下、RC 板) に対して重錘落下実験を行い、衝撃力緩衝効果の把握に努めた。

重錘落下実験では、写真-2 に示すように RC 板を設置し、重さ 127kg の重錘 (ロードセルや載荷治具などを含めた重さ) を所定の高さから落下させ実験を行った。RC 板は、長さ 900mm, 幅 300mm, 厚さ 100mm とし、支間長を 800mm とし、ローラー支点上に設置した。緩衝材として、縦、横 150mm 四方、厚さ 50mm のクロロプレンゴムと縦、横 300mm 四方、厚さ 50mm のダイラタント流体 (水溶性片栗粉) を準備した。なお、緩衝材の断面積を一致させたかったが、載荷治具の関係で、150mm 四方の容器は準備できず、また、事前の研究結果では、ダイラタント流体の断面積を変化させても荷重低減効果は変わらないことを確認していたため、ダイラタント流体の断面を 300mm 四方とした。なお、載荷に当たっては、同一供試体を用いた漸増載荷であり、一回一回、供試体を新しいものにはしていない。

緩衝材が無い場合、ゴム、ダイラタント流体を設置した場合それぞれの重錘の落下高さや重錘のロードセルで計測した荷重の関係を図-6 に示す。緩衝材が無い場合は落下高さ 50mm で RC 板の損傷が大きく、そこで試験を終了した。落下高さや重錘に設置したロードセルで計測した最大荷重との関係を示す。横軸が落下高さ、縦軸が荷重である。凡例は図に記載してある。緩衝材なしの時とゴム、ダイラタント流体を緩衝材としたときではどちらも荷重を低減することができていたので、緩衝効果を発揮していることがわかった。また、ゴムを緩衝材としたときは落下高さに対して、荷重の増加量が一定であり、40kN 付近で荷重が頭打ちになっている。一方でダイラタント流体では 300mm までは荷重の

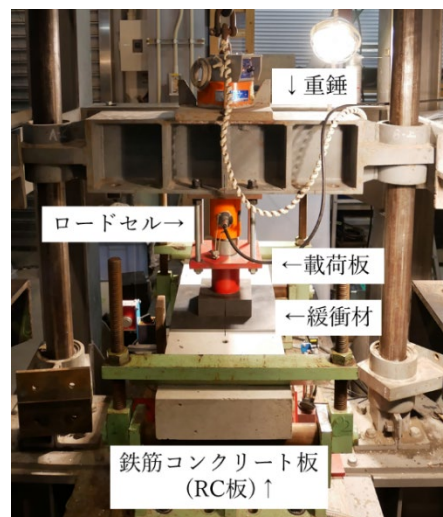


写真-2 RC 板を用いた重錘落下実験

増加量が小さく、300mm を超えた段階で増加量が増加している。容器の底面に載荷板がぶつかったことで、ダイラタント流体の緩衝効果が弱まったと考えられる。過去の研究では容器底面に衝突した後は荷重が緩衝効果をあまり示さず、ゴムを緩衝材とした時よりも荷重が大きくなるという結果であった。しかし、本実験では容器の底面に衝突した後も落下高さが 500mm を超えるまでは荷重がゴムの時よりも小さいという結果であった。これは RC 板がある程度スパンのあるものであるとそのたわみによって荷重が軽減されたと考えられる。図-7 に落下高さと RC 板中央の変位との関係を示す。横軸が落下高さ、縦軸が変位である。ダイラタント流体を緩衝材とした時は、250mm まで変位が小さくほとんど変化していなかった。ダイラタント流体中で重錘が停止した場合、ダイラタント流体中で重錘の落下エネルギーが分散し、RC 板に伝わるエネルギーが小さいためと考えられる。また、載荷板が容器の底面に到達した以降はゴムと同様に落下高さに応じて変位が増加していくという結果になった。載荷終了時の変位はゴムが 15.54mm であり、ダイラタント流体では 12.04mm という結果であり、ゴムを緩衝材とした時の RC 板の変位が常に大きくなるという結果になった。

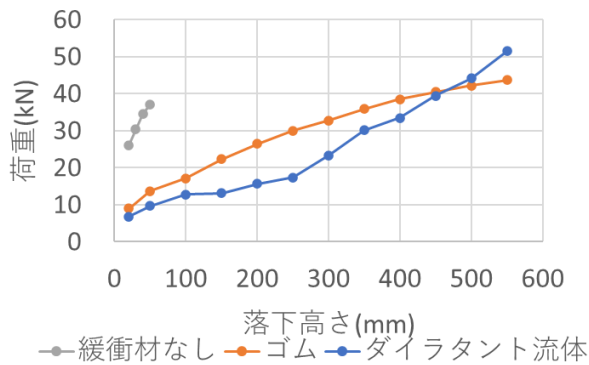


図-6 落下高さと衝突荷重の関係

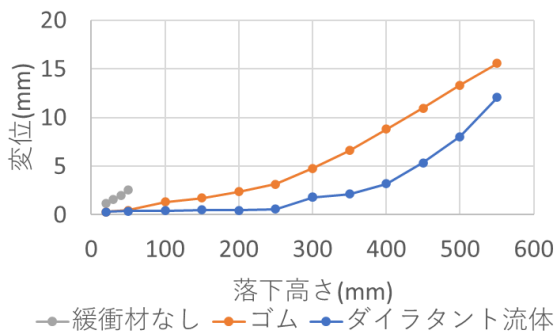


図-7 落下高さとはり中央最大変位

#### (4) OpenSees によるシミュレーション解析

前述したとおり、ニューラルネットワークにより、重錘がダイラタント流体を貫通中の荷重-変位関係を学習することは出来たが、その後の除荷時をどのように表すのかに課題を残したため、当初の研究計画とは異なるが、(1) 剛体にダイラタント流体を設置した重錘落下実験での成果をふまえ、重錘がダイラタント流体を貫通中は直線でモデル化し、除荷時は大きな剛性で荷重を除荷する数値モデルを作成し、その復元力特性を OpenSees に外挿することで、(3) RC 板上にダイラタント流体を設置した重錘落下実験をシミュレーションすることを試みた。

図-8 に実験ならびに本解析で求めた各落下高さにおける最大応答値の関係を示す。ここで、黒は主鉄筋降伏までの結果、赤色は主鉄筋降伏後の結果である。主鉄筋降伏までの結果において、緩衝材の有無に関わらず解析値と実験値は良い一致を示している。また、主鉄筋降伏後の結果において、(a)図の最大支点反力では最大応答値の増加に伴い、解析値と実験値の差が大きくなり解析値の過小評価が見られる。(b)図の最大変位では緩衝材なしの解析値が実験値より過大評価しているが、ゴム及びウーブレック緩衝材の解析値が実験値と良い一致している。(c)図の最大主鉄筋ひずみでは緩衝材なし及びゴム緩衝材の解析値が実験値より過大評価し大きな差が生じているが、ウーブレック緩衝材の解析値が実験値と近い値を示していることがわかった。

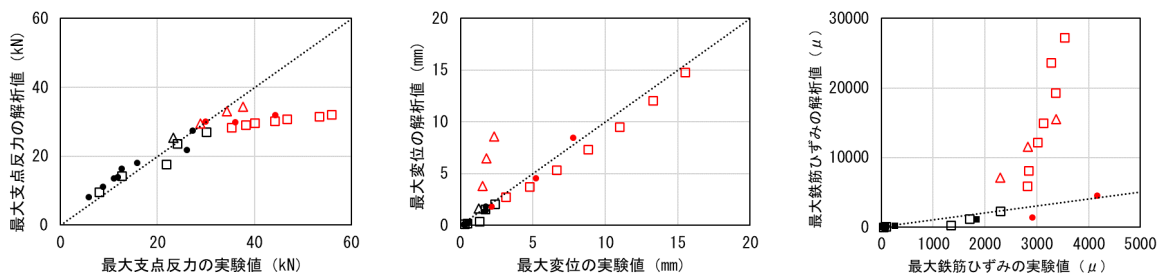


図-8 最大支点反力，最大変位（たわみ），最大鉄筋ひずみの比較（実験と解析）

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 今泉壮真
2. 発表標題 ダイラタント流体を緩衝材としたRC板に対する重錘落下実験
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志賀弘健
2. 発表標題 重錘落下試験結果によるダイラタント流体の剛性に関する一考察
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
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
研究分担者	松田 泰治  (Matsuda Taiji)  (50264065)	九州大学・工学研究院・教授   (17102)	

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