

令和 3 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04323

研究課題名（和文）組積造の地震時破壊挙動の数値解析手法の精緻化と耐震補強法の提案

研究課題名（英文）Refinement of numerical analysis method for failure behavior of masonry structures during an earthquake and proposal of seismic reinforcement method

研究代表者

古川 愛子（Furukawa, Aiko）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00380585

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000 円

研究成果の概要（和文）：従来のプログラムでは単純な応力-ひずみ関係を採用しており、煉瓦やコンクリート等の脆性材料に適したモデル化でなかった。そこで引張軟化特性や圧縮軟化特性を考慮した応力-ひずみ関係を導入した。また、鉄筋で補強することを想定し、鉄筋用の応力-ひずみ関係も導入した。従来のプログラムではポアソン効果を考慮できず、圧縮力と直交方向に孕み出す様子を再現することができなかった。そこで、ポアソン効果による引張ひずみを考慮できるモデル化を導入した。また、簡単な振動台実験とその再現解析を行い、プログラムの再現性を確認した。さらに、煉瓦同士の噛み合いにより組積造を補強する耐震工法について、面外方向への適用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が目指すものは、組積造の弾性挙動から破壊の発生、そして破壊後の崩壊挙動までを追える数値解析手法の確立である。これまで開発してきたプログラムの問題点を1つずつ解決することで、開発手法の改良を行った。

改良版個別要素法では、ばねの切断によって簡易に破壊を評価できる反面、モデル化の精度に課題があった。本研究で、材料毎に異なる性質を反映したモデル化を導入したため、解析精度が向上した。組積造の数値解析手法としてだけでなく、想定を超える巨大地震が発生して構造物が破壊した場合にどのような事が起こるのか、有限要素法では考慮できない現象に対しても、適用が可能となる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In the previous program, a simple stress-strain relationship was used, which was not suitable for brittle materials such as bricks and concrete. Therefore, a stress-strain relationship that takes into account the tensile and compressive softening characteristics was introduced. A stress-strain relationship for reinforcing steel bars is also introduced. In the previous program, the Poisson's effect could not be taken into account, and the strain in the orthogonal direction to the compressive force could not be reproduced. Therefore, we introduced a modeling method that can consider the tensile strain and failure caused by the Poisson's effect. The reproducibility of the program was confirmed by a simple shaking table experiment and its analysis. In addition, the applicability of the reinforcing method using interlocking bricks to the out-of-plane direction was verified.

研究分野：地震工学

キーワード：組積造 地震 破壊挙動 数値解析手法 耐震補強法

## 1. 研究開始当初の背景

世界の地震による死者の75%は建物倒壊により亡くなっており、建物倒壊による死者の大多数が、開発途上国で多く建設されている耐震性の低い組積造の倒壊により亡くなっている。レンガや石材などを積み上げて建設する組積造は、地震の揺れに対して非常に脆弱であるにも関わらず、現在でも、世界の約6割もの人口が住んでおり、かつ地震の多発地帯に多く建設されているので、地震の度に多くの組積造が壊れ、多くの尊い命が失われている。これらの組積造は、地域で調達できる材料を使い、居住者自身によって建設されるなど、工学的な配慮がほとんどなされていない。以上のことから、地域で調達できる安価な材料を用いつつも、工学的な配慮を施した耐震補強法を開発することにより、地震による建物被害を軽減することが重要であると考えられる。数値解析により組積造の地震時破壊メカニズムを分析し、効果的な耐震補強法を検討する際、破壊の発生や崩壊挙動を扱える数値解析手法が必要となる。しかしながら現状では、組積造に適した数値解析手法、即ち、弾性挙動から破壊の発生、そして破壊後の崩壊挙動までを追える数値解析手法は確立されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、組積造の地震時破壊挙動を3次元で精緻に再現できる数値解析手法の開発を目的とする。

個別要素法で引張破壊をモデル化する際、要素間のばねに生じる引張応力が引張強度を上回ったときにばねを切断することで引張破壊をモデル化している。これに対して実際のレンガやモルタルの応力-ひずみ関係は、コンクリートと同様に、引張軟化特性を有している。引張強度に達した後、応力が突然0になったりせず、靱性のある破壊をする。個別要素法では、引張軟化特性を考慮しておらず、引張強度に達すると引張応力が突然0となるため、実際よりも脆性的な破壊をしてしまう。この問題点を解決することを1つ目の目的とする。

また個別要素法では、剛体要素が互いに重なり合うことによって構造物全体の変形を擬似的に表現するが、要素自身の変形は考慮できない。したがって、弾性挙動の解析精度を論じる上で重要なポアソン効果を表現することができない。また組積造の主要な破壊モードの1つとして、レンガに圧縮力が作用したときに、ポアソン効果によって圧縮力と垂直な方向に引張応力が生じ、引張破壊に至ることがある。しかし個別要素法では、ポアソン効果による引張破壊という主要な破壊モードを表現することもできない。この問題点を解決することを2つ目の目的とする。

## 3. 研究の方法

信頼性のある解析手法とするには、現実に即した破壊モデルを採用する必要がある。有限要素法を用いたコンクリートの破壊解析では、精緻な破壊のモデル化手法が既に確立されている。そこで、有限要素法の考え方を参考に、個別要素法においても引張軟化特性を考慮できるモデル化手法を確立した。また、レンガ目地だけでなく、レンガ内部の破壊も考慮できるようにする。

要素は剛体のままで、隣接する複数の要素をまとめたものをユニットとし、要素間の相対変位によってユニットとしてのポアソン効果を考慮できるようにする。ユニットに圧縮力が作用する際に、圧縮力に垂直な方向に要素が離れ引張破壊する様子を再現できるようにした。

## 4. 研究成果

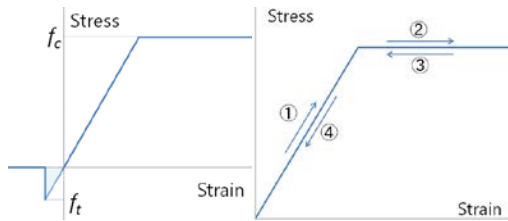
### (1) 応力-ひずみ関係の改良

#### (a) 従来の応力-ひずみ関係

従来の応力-ひずみ関係の骨格曲線を図1(a)に示す。正が圧縮、負が引張を示す。引張側は、引張応力が引張強度 $f_t$ に達すると引張破壊が生じ、ばねを切断するモデルとしており、ハッチ面積が引張破壊による吸収エネルギーである。引張軟化特性を考慮できておらず、引張破壊による吸収エネルギーを過小評価している。圧縮側の骨格曲線は、図1(a)に示す完全弾塑性型であった。履歴特性は、図1(b)のように載荷時に①→②、除荷時に③→④という経路をとる非線形弾性のモデルとなっていたため、圧縮破壊による履歴吸収エネルギーが適切に考慮されていない。

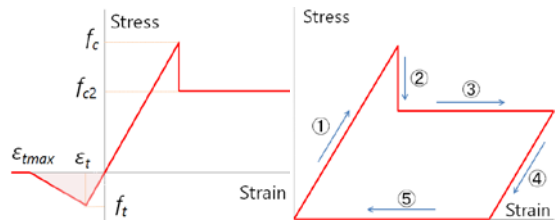
#### (b) 改良した応力-ひずみ関係

改良した応力-ひずみ関係の骨格曲線を図2(a)に示す。引張側は、コンクリートに特有な引張軟化特性を考慮した。 $\epsilon_t$ は引張強度に達したときの引張ひずみ、 $\epsilon_{max}$ は引張抵抗を考慮に入れる最小の引張ひずみである。ハッチ面積である吸収エネルギー(単位体積当たり)に要素間距離を乗じたものが破壊エネルギー $G_F$ に一致するように $\epsilon_{max}$ を決定した。圧縮側の骨格曲線は、圧縮軟化を考慮したモデルとした。図2(a)に示すように圧縮応力が圧縮強度 $f_c$ に達すると圧縮破壊が生じ、圧縮応力が $f_{c2}$ まで減少するモデルとした。ここでは、 $f_{c2}$ を終局強度と呼ぶこととする。本論文では簡単なモデル化となったが、今後はより詳細なモデル化手法を開発したい。履歴特性は、図2(b)のように、載荷時に①→②→③、除荷時に④→⑤という経路をとるモデルとし、除荷時の勾配④は初期勾配①と同じとした。このように、非線形非弾性のモデルを採用し、圧縮破壊による履歴吸収エネルギーを考慮できるモデルとした。



(a)骨格曲線(b)載荷と除荷時の経路 (圧縮側)

図1 従来の応力-ひずみ関係



(a)骨格曲線(b)載荷と除荷時の経路 (圧縮側)

図2 改良した応力-ひずみ関係

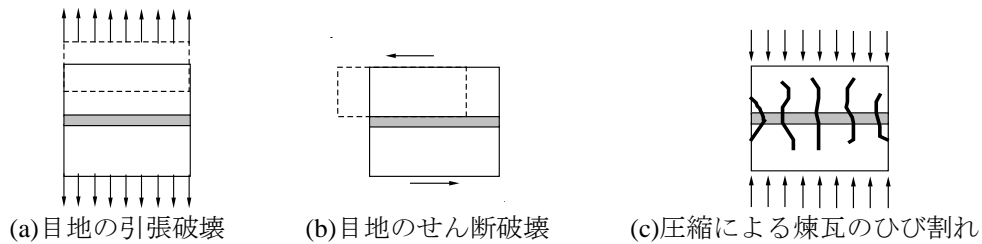


図3 組積造の破壊パターン

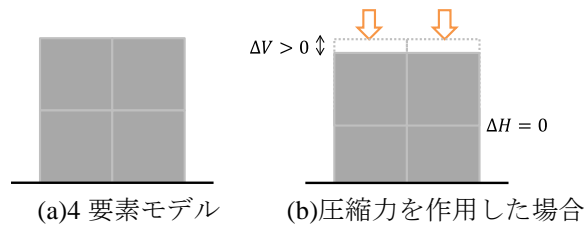


図4 ポアソン効果の非考慮

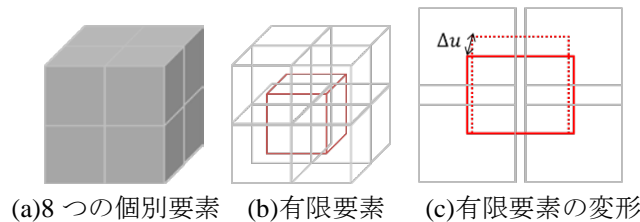


図5 ポアソン効果を考慮する方法

(2) ポアソン効果の導入

(a)組積造の破壊パターン

Lourenco らによって、組積造の破壊パターンが3分類されている。図3(a)(b)は目地の引張破壊とせん断破壊であり、2要素間の法線方向および接線方向ばねの切断によって簡易に表現できる。図3(c)は圧縮力に直交する向きにポアソン効果によって引張破壊するものであるが、改良版個別要素法で再現することができない。

図4(a)のように2個の要素が2段重ねられたものに対して鉛直下向きに圧縮力を作用させた場合、図4(b)のように上下の要素が重なり合うことで圧縮応力による鉛直ひずみを表現することは可能であるが、左右の要素間には力が発生しないため、水平方向のひずみは表現されない。これは、改良版個別要素法では弾性係数テンソルのうち対角成分しか考慮していないためである。本研究では、3つ目の破壊パターンを表現するため、ポアソン効果による破壊を考慮できる改良版個別要素法を開発することを目的とする。

(b)ポアソン効果の導入方法

3次元の応力-ひずみ関係における弾性係数テンソルを $[D]$ とする。このうち、ポアソン効果に相当する非対角成分を抜き出したものを $[D_p]$ とする。

図5(a)は個別要素を幅方向、奥行き方向、高さ方向に2つずつ計8つ並べたものである。この個別要素8つを1セットとみなし、各重心を頂点として構成される六面体を新たに有限要素として定義する。図5(b)の灰色線で示す要素が個別要素、赤色線で示す要素が有限要素である。解析モデル全体に対し同様の処置をとり、8つの個別要素に対して1つの有限要素を構築する。

図5(c)のように個別要素が移動したとき、有限要素の8頂点(8つの個別要素の重心)の相対変位ベクトルを $\{\Delta u_p\}$ とし、ポアソン効果による荷重ベクトルを $\{F_p\}$ とすると、 $\{F_p\}$ は

$\{F_p\} = [K_p]\{\Delta u_p\}$ と表すことができる。  $[K_p]$ は要素剛性行列のうちポアソン効果の寄与分であり、弾性テンソルの非対角成分 $[D_p]$ を用いて $[K_p] = [B]^T [D_p] [B]$ と求められる。  $[B]$ は形状関数から構成されるひずみと変位を関連付けるマトリクスである。  $[K_p]$ からポアソン効果により各個別要素重心に作用する力を計算し、これを各個別要素の並進の運動方程式に加える。

一例として、個別要素を幅方向 ( $x$ )、奥行き方向 ( $y$ )、高さ方向 ( $z$ ) に2つずつ計8つ並べた解析モデルを、高さ方向に圧縮する数値解析の流れを図6に示す。図6の灰色線で示す要素が個別要素、赤色線で示す要素が有限要素である。下段の要素は鉛直下方向への変位が拘束されているとする。

- ① 上側の個別要素に  $z$  軸の下向きに力が作用する。
- ② 上側の個別要素は  $z$  軸の下向きに変位する。上段と下段の個別要素同士が  $z$  方向に重なり合い、それに伴い有限要素が  $z$  方向に圧縮される。
- ③ ポアソン効果により、有限要素が  $x, y$  方向に孕み出すような力が式(3)によって算出される。これを個別要素の重心に作用させる。
- ④ 個別要素の重心が移動し、 $z$  方向の圧縮力によって  $x, y$  方向に孕み出す様子が再現される。

以上の流れによって、提案手法ではポアソン効果による孕み出しを再現することが可能となる。図6の④において  $x$  方向に隣り合う個別要素がポアソン効果によって離れていることが確認される。このようにポアソン効果によって要素間に隙間ができることで、個別要素間には引張応力が生じる。引張応力が引張強度より小さいときは、要素間に隙間はあっても引張破壊していないとみなす。引張応力が要素の引張強度を上回ったとき、引張破壊が発生したとみなし、復元ばねを切断し、ポアソン効果によるひび割れが表現される。本研究では、ポアソン効果による破壊の発生を考慮することを目的としているので、有限要素を構成する8つの個別要素間のいずれかに破壊が発生すると、当該有限要素を削除し、ポアソン効果による要素間力を考慮するのを止めた。

### (c)コンクリートの圧縮試験の数値解析

#### (i) 概要

提案手法によりポアソン効果による引張破壊を再現できるかどうかを検証するため、図7に示すコンクリート供試体の圧縮試験の数値解析を行う。コンクリート供試体を固定要素の上に設置し、コンクリート供試体の上に載荷板を設置した。載荷板に鉛直下向きに強制変位を与えることで、コンクリートに圧縮力を与えた。

まず、ポアソン効果を再現できているかどうかを確認するため、鉛直方向の変形に対する水平方向の変形の比を求め、入力したポアソン比と比較した。次に、水平方向に引張破壊が生じることを確認することで、ポアソン効果による引張破壊を再現できていることを確認する。

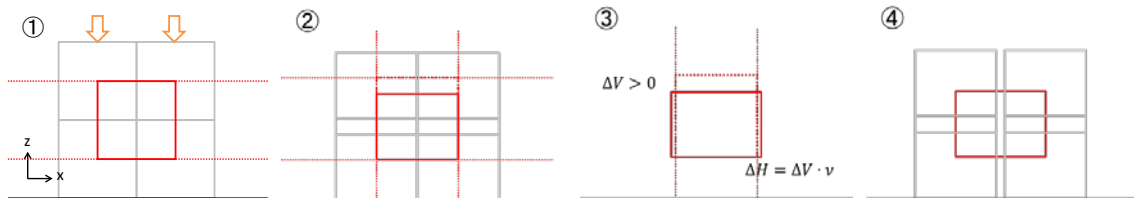


図6 提案手法による数値解析の流れ

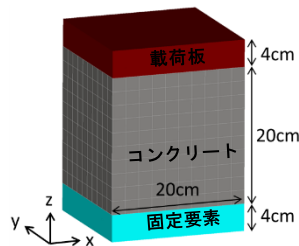


図-7 解析モデル

表1 解析定数

(a)物性値

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	ヤング率 [N/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比
$2.3 \times 10^3$	$3.0 \times 10^{10}$	0.20

(b)要素間強度・ダッシュポットの減衰係数

引張強度[N/m <sup>2</sup> ]	粘着力[N/m <sup>2</sup> ]	摩擦係数	減衰係数
$4.5 \times 10^6$	$\infty$	0.624	1.0

### (ii) 解析モデル

図7に灰色で示すコンクリートは、一辺20cmの立方体とした。x, y, z方向に10分割し、全部で1000個の個別要素でモデル化した。赤色で示す載荷板と水色で示す固定要素は、幅と奥行きはコンクリートと同じ20cmとし、高さは4cmとした。x, y方向に10分割し、z方向に1分割とした。それぞれ100個の個別要素でモデル化した。接するコンクリート要素との間にポアソン効果を考慮するための有限要素を設定するために、x, y方向にコンクリートと同じ数で分割を行った。

総要素数は個別要素が1200個、有限要素が891個である。要素表面のばね・ダッシュポットの設置数は、1辺あたり4本ずつとした。

表1に解析定数を示す。引張破壊のみ考え、せん断破壊を発生させないため、粘着力を十分に大きな値とした。

載荷板には鉛直下向き(z軸の負方向)に1.0mm/sの速度で強制変位を与え、供試体に圧縮力を作させ圧縮試験を模擬した。計算時間間隔は $2.0 \times 10^{-6}$ 秒とした。

### (iii) 解析結果

図8(a)に青色、黄緑色、黄色の丸で示す3つの個別要素の重心の変位から、見かけのポアソン比を算出した。青色と黄色で示す要素間の鉛直方向相対変位(近づく方向を正)で、青色と黄緑色で示す要素間の水平方向相対変位(離れる方向を正)を除すことで見かけのポアソン比を求め、解析で入力したポアソン比と計算した。

結果を図8(b)に示す。0~0.14秒までは、見かけのポアソン比が入力したポアソン比0.2とほぼ一致する結果となった。0.14秒後に引張破壊が発生し、青色と黄緑色の要素間に亀裂が入り相対変位が生じたため、0.14秒以降は見かけのポアソン比が振動した結果となっている。

引張破壊発生時(0.14秒)に載荷板に作用していたコンクリートからの反力を断面積で除して応力に換算したところ、 $2.12 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ であった。これにポアソン比0.2を乗じると $4.24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ となる。引張強度 $4.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ より若干小さいのは、載荷面における応力分布が均一でないためと考えられる。

鉛直下向きに6.35mm、6.5mm変位した時の破壊状況を図9(a)に示す。0.14秒後に引張破壊が生じた後、徐々に縦方向の亀裂の幅が大きくなり、水平方向に供試体が孕み出す様子を再現することができた。外側に発生した縦方向の亀裂ほど、亀裂幅が広がりやすい結果となった。これは、周囲からの拘束が小さいため、孕み出し易いのではないかと推察される。図9(c)は著者らが実施した直方体煉瓦(幅10cm、奥行き6cm、高さ10cm)の圧縮試験の結果であるが、数値解析結果と同様に、外側に縦方向の亀裂が生じていることが見て取れる。

### (3) 開発プログラムを用いた数値解析と耐震性向上策の検討

改良版個別要素法を用いて、簡単な組積壁モデルの再現解析を行った。簡単な振動台実験とその再現解析を行い、プログラムの再現性を確認した。さらに、煉瓦同士の噛み合いにより組積造を補強する耐震工法について、面外方向への適用性を検証した。

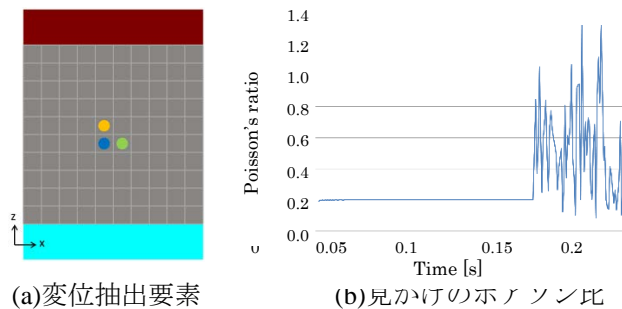


図8 見かけのポアソン比

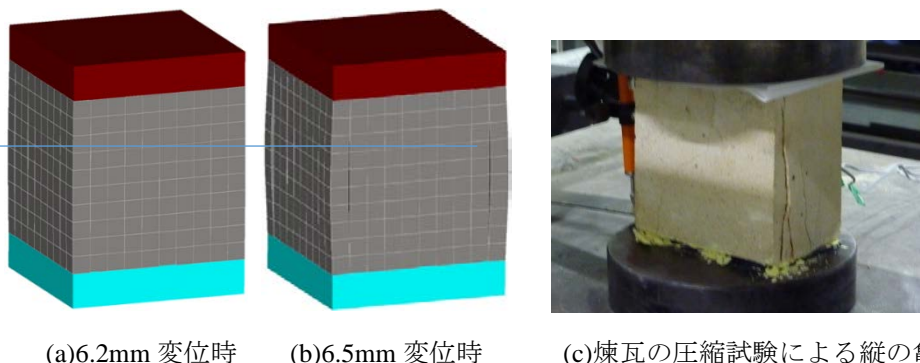


図9 コンクリート供試体の圧縮試験の数値解析によるポアソン効果による引張破壊と水平方向への孕み出し



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Aiko Furukawa, Keiya Masuda, Junji Kiyono	4. 巻 6
2. 論文標題 Diagonal Compression Test of Mortar Interlocking Masonry Wall with Various Block Shapes and Different Support Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontier in built environment	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbuil.2020.579366	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 Rishi R. Parajuli, Aiko Furukawa, Dipendra Gautam	4. 巻 28
2. 論文標題 Experimental characterization of monumental brick masonry in Nepal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 1314-1321
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.istruc.2020.09.065	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 該当する
1. 著者名 Masato Goto, Aiko Furukawa, Junji Kiyono, Hitoshi Nakase	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical simulation of impact phenomena of concrete slab subjected to medium speed collision by steel projectile	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The Thirty-First KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 Aiko Furukawa, Masato Goto, Junji Kiyono, Hitoshi Nakase	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on numerical analysis of impact response of concrete plate subjected to medium speed collision of steel projectile	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The Vietnam-Japan Symposium on natural disasters	6. 最初と最後の頁 70-74
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 -

〔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 山木誠也, 古川愛子, 清野純史
2. 発表標題 数値解析を用いた鉄道組積橋脚の地震時挙動と鋼板接着補強の効果に関する検討
3. 学会等名 第40回土木学会地震工学研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山木誠也, 古川愛子, 清野純史
2. 発表標題 改良版個別要素法による鋼板接着補強組積橋脚の破壊挙動の数値解析
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020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
---------	---------