

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04365

研究課題名（和文）残留変形を抑制するRC梁の設計方法と再現性の高いRCフレームの解析モデルの構築

研究課題名（英文）Design Method for RC Beams to Reduce Residual Deformation and Construction of Highly Reproducible Analytical Model for RC Frames

研究代表者

川添 敦也（KAWASOE, Atsuya）

鹿児島工業高等専門学校・都市環境デザイン工学科・教授

研究者番号：50710290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：梁降伏先行型の中低層の鉄筋コンクリート造建物を対象に、梁の上端に高強度鉄筋を用い、骨格曲線において二次剛性を発揮させることにより地震後の残留変形を抑制するRC梁を提案した。改良型梁の加力実験を行い、上端筋にSD685を用いた試験体で残留変形の抑制と最大せん断力の抑制が同時に可能であることを確認した。

改良型梁および柱脚の解析モデルを、回転バネを使ったモデルやMSモデルによって作成し、履歴特性を概ね再現した。これらの柱梁の解析モデルを用いて、RCフレームの解析モデルを作成し、地震波による応答解析を行うことにより、改良型梁による残留変形の抑制効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震により大変形しても、残留変形を無視できる程度に抑制するRC建物の可能性について示した。提案する建物は、梁の下端の普通鉄筋が早期に降伏した後、上端の高強度鉄筋による二次剛性の効果によって、層間変形角が1/100rad.程度では残留変形は生じず、1/50rad.に達しても残留変形を1/400rad.未満に抑制する。また、建物に想定外の変形が生じて層せん断力が大きく上昇しないように、梁の部材角が1/50rad.程度で降伏するように高強度鉄筋の降伏強度によって制御する。このようなRC建物は、地震による残留変形を抑制する様々な従来工法に比べて簡単かつ安価であり、施工費用の抑制に効果的である。

研究成果の概要（英文）：A design method for RC beams that reduces residual deformation after earthquakes by using high-strength rebars at the top of the beams and exerting secondary stiffness in the skeleton curve has been proposed for low- to mid-rise reinforced concrete buildings that are prone to beam yielding. Loading experiments were conducted on the improved beams, and it was confirmed that the test specimens using SD685 for the upper reinforcement were capable of simultaneously reducing both residual deformation and maximum shear force.

Analytical models of the improved beams and column bases were created using models with rotational springs and multi-springs, and the hysteretic characteristics were largely reproduced. Using the above analytical models of columns and beams, analytical models of an RC frames were created, and a response analysis was performed using seismic waves to clarify the effect of the improved beams in reducing residual deformation.

研究分野：建築構造

キーワード：残留変形 二次剛性 MSモデル 復元モーメント 高強度鉄筋

1. 研究開始当初の背景

新耐震設計法は、建物が大地震を受けても入力した地震エネルギーを靱性に富む構造躯体の塑性化によってバランスよく吸収させることにより、建物を倒壊に至らせないという方針に基づいている。しかしながら、人命を守ることができるものの、結果的に塑性化による地震後の残留変形は避けられない為、建物の継続使用はできなくなる可能性がある。新耐震基準が1981年に施行され、40年以上経て社会のニーズは大きく変化した。高度経済成長期のスクラップアンドビルトの経済活動に対し、経済が低成長の現代では建設資本を保全しながら長く使っていくという考え方に变化しており、大地震により建物が被災しても、解体せずに軽微な補修により継続使用できることが社会的要請になっている。免震構造や制震構造の研究が進み、重要度の高い建築物や高層建築を中心に採用されている。しかし、これらの構法は非常に高価なため、一般の建築物に採用される事例は多くない。1995年の兵庫県南部地震以降、2011年の東日本大震災や2016年の熊本地震等、日本列島付近は地震の活動期に入っている。簡便で安価な施工法によって、地震後の損傷を抑制し継続使用できる建物が求められている。

2. 研究の目的

地震後のRC建物の継続使用のため、最大層間変形角が1/50rad.に達する大地震を受けても、残留層間変形角が無視できる程度の1/400rad.に留まるRC造建物を目指す。RC梁の上端筋を高強度鉄筋に置き替えることにより、骨格曲線において二次剛性を発揮させることができるが、二次剛性を有する履歴特性は残留変形の抑制に効果的である(図1)。単に梁の上端筋を高強度鉄筋に置き替えると、二次剛性の影響により従来の梁に比べて大変形時の曲げ応力は上昇する。その結果、建物の層せん断力も上昇することになり、柱のせん断設計が困難になる可能性がある。建物に想定外の変形が生じてせん断力が大きく上昇しないように、1/50rad.程度で高強度鉄筋が降伏するように鉄筋の降伏強度によってコントロールする(図2)。大地震により建物が大変形しても、下端の普通鉄筋が早期に降伏した後、二次剛性の効果によって層間変形角が1/100rad.程度では残留変形は生じず、さらに1/50rad.に達しても残留変形を無視できる程度の1/400rad.未満に抑制するRC建物の設計方法の確立を目的とする。

また、提案する梁(以下、改良型梁)の履歴特性を再現し、残留変形を適切に評価できる解析モデルの作成を行い、同様に柱についても残留変形の評価が可能な解析モデルの検討を行う。さらに、以上の柱梁の解析モデルを用いて、地震波によるRC平面フレームの応答解析を行い、残留変形の抑制効果について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 提案する梁試験体の加力実験

試験体の形状と配筋を図3に、梁断面を表1に示す。主筋はすべてD10を用いている。従来型の試験体N-345では、上下端筋に普通鉄筋SD345を4本ずつ用いている。改良型試験体H-685では、上端筋に高強度鉄筋SD685を4本用い、下端筋には普通鉄筋SD345を4本用いているが、その内の2本はスタブへの定着あり、2本は定着無しとした。加力状況を図4に示す。加力は、左右のスタブを上下方向に平行に移動させるために、2台の油圧ジャッキを用いて行った。荷重

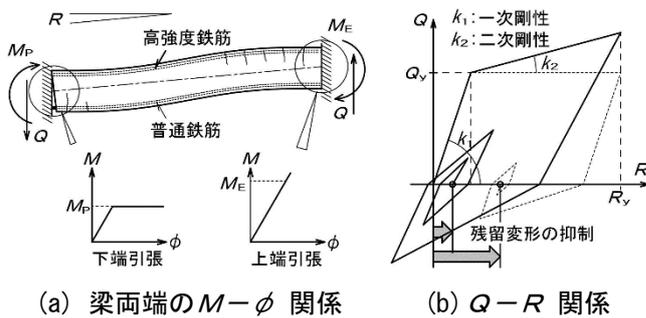


図1 高強度鉄筋を用いて二次剛性を発揮するRC梁

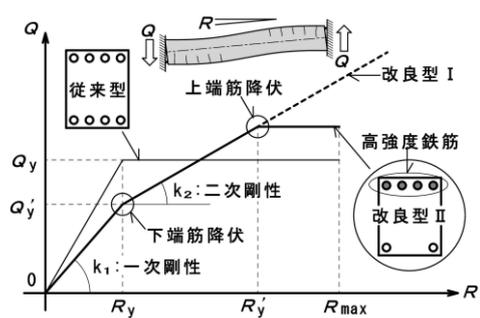


図2 提案する梁の履歴特性

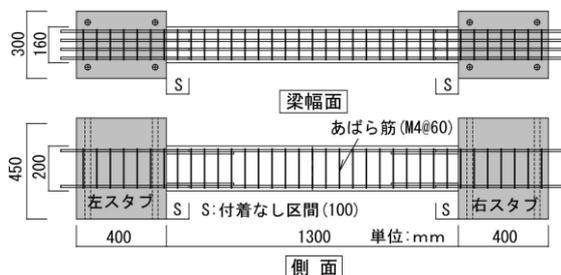


図3 試験体の形状と配筋

表1 梁断面のリスト

	N-345(従来型)		H-685(改良型II)	
	中央	端部	中央	端部
上端筋	4-D10	4-D10	4-D10(高強度)	4-D10(高強度)
下端筋	4-D10	4-D10	4-D10	2-D10(定着あり)
あばら筋	□ - M4 @60 (1本あたり有効断面積: 8.78mm ²)			

はそれぞれの油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより測定し、それらの値を足し合わせるにより梁部分に作用するせん断力が得られる。H-685 の変位履歴を図 5 に示す。N-345 では部材角が $\pm 2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$.に達するまで、H-685 では部材角が $\pm 2.5 \times 10^{-2} \text{rad}$.に達するまで、目標部材角を漸増させた。さらに各目標部材角に達した後は、準静的加力を行うことにより残留部材角を確定させた。図 6 に準静的加力について示す。準静的加力は、部材角がピークに達した後の自由振動を想定した加力方法であり、除荷時に放出されるエネルギー E_e と再加力時に入力するエネルギー E_s が等しくなるように加力と除荷を繰り返す。十分に振幅が小さくなった時点で残留変形が得られる。

(2) 梁の解析モデルの作成

解析モデルを図 7 に示す。梁試験体の両端の曲げ変形を弾塑性の回転バネでモデル化した。従来型梁および改良型梁の曲げ変形の復元力特性は、それぞれ武田モデルおよび Ramberg-Osgood 型モデルとし、パラメータは実験値に基づいて設定した。武田モデルおよび Ramberg-Osgood 型モデルのパラメータは実験結果に基づき設定した。

(3) 柱の解析モデルの作成

提案した 2 種類の異なる特性を持つマルチスプリング（以下、MS）を用いた柱の解析モデルを図 8 に示している。塑性ヒンジ領域の MS に隣接して、接合部の入り込み部に柱と同じ断面を有し、履歴特性の異なる仮定の MS（以下、入込部 MS）を設けている。入込部 MS によって、主筋の接合部からの拔出しやコンクリートのひび割れによる剛性低下を柱全体の履歴特性に反映させた。入込部 MS の鉄筋の復元力特性にスリップの性状を持たせ、かつ入込部 MS の長さ L_v を調整することによって、部材全体のスリップ性状を再現させることができる。

4. 研究成果

(1) 提案する梁試験体の加力実験

図 9 に梁の骨格曲線を示している。図中の●印は普通鉄筋が降伏した時点、○印は高強度鉄筋の降伏点または比例限界に達した時点を示している。従来型試験体の N-345 は、部材角 R が約 $\pm 0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$.で降伏し、その後、一次剛性の 2~3%の二次剛性を発揮する。一方、改良型は、下端の鉄筋量が従来型よりも少ないため、従来型よりも早期に降伏するが、その後二次剛性を発揮することにより、 R が $\pm 1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$.を超えたところで従来型のせん断力を超えた。H-685 では、 R が $\pm 0.4 \times 10^{-2} \text{rad}$.程度で下端筋が降伏し、 R が $\pm 2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$.付近で上端筋が降伏した。H-No.1 は過去に実験が行われている試験体であり、梁の上端に SD980 を使用している。H-No.1 では R が比例限界に達する $\pm 2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$.付近まで H-685 と同様の履歴をたどり、その後も高強度鉄筋が降伏する R が $\pm 3.0 \times 10^{-2} \text{rad}$.付近まで二次剛性を発揮した。

残留部材角 rR_e と目標部材角 $\pm R_t$ の関係を図 10 に示す。図中の●印は正加力時、○印は負加力時である。N-345 では、鉄筋が降伏する R_t が $\pm 0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$.付近に達して以降、 R_t に比例して rR_e が増加し、

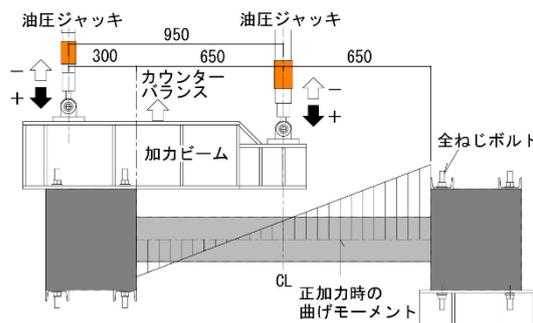


図 4 加力状況

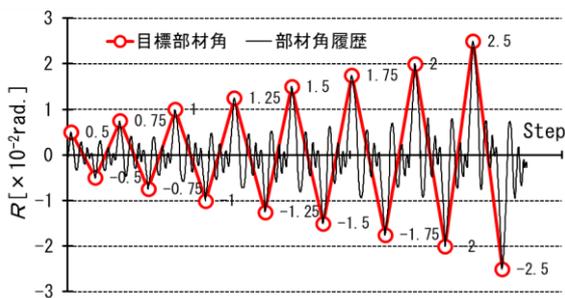


図 5 変位履歴 (H-685)

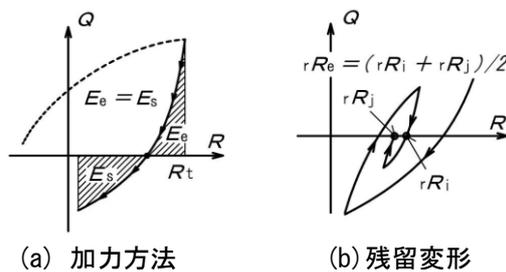


図 6 準静的加力

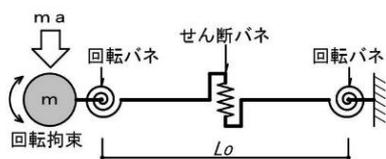


図 7 解析モデル

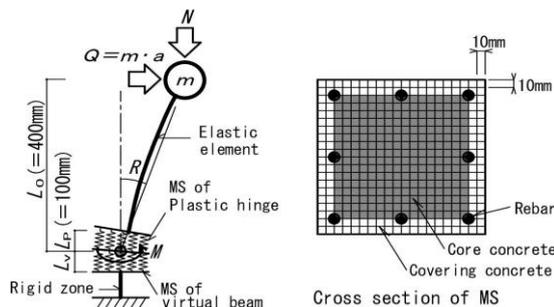


図 8 柱脚の解析モデル

R_t が $\pm 1.0 \times 10^{-2}$ rad.を超えた付近で制限値として設定している $1/400$ rad.に達する。さらに、 R_t が $\pm 2.0 \times 10^{-2}$ rad.で使用限界に近い $1/200$ rad.を超える。改良型では、上端筋が降伏するまで、 $r_e R_e$ の変動は小さいが、N-685では負側に、H-No.1では正側に偏っている。これは試験体の製作精度や加力の精度に起因したものと考えられる。H-685では、高強度鉄筋が降伏する R_t が $\pm 2.0 \times 10^{-2}$ rad.から 0.5×10^{-2} rad.増加した $R_t = \pm 2.5 \times 10^{-2}$ rad.にかけては、残留変形の増加がみられるが、それでも $r_e R_e$ の大きさは $1/400$ rad.程度に収まる。

(2) 梁の解析結果

梁の解析では、図7の解析モデルの梁端に設定した質点 ($m=10$ ton) に任意の加速度を0.1秒間与えることによって試験体にせん断力を作用させた。加速度は、試験体の部材角が目標部材角 R_t に等しくなるまで調整を行う。 R_t に達した後は、振動を十分に収束させるために10秒間自由振動させ、その後再び次の R_t を目指して加速度を与えた。これを繰り返すことにより、実験と同様の加力履歴を再現した。

図11に試験体のせん断力 Q と部材角 R の関係を示している。目標部材角 R_t が 1.0×10^{-2} rad.および 2.0×10^{-2} rad.のときで解析値と実験値を比較しており、振動が収束した時の残留部材角 $r_e R_e$ を図中の○印で示している。 $r_e R_e$ はいずれの試験体でも R_t の増加に伴って増加するが、従来型に比べて改良型は大きく抑制されている。 R_t が 2.0×10^{-2} rad.までは、N-345とH-685の解析によるループ形状は、実験値を概ね再現できており、 $r_e R_e$ の解析値も概ね再現できた。各目標変形角 R_t における残留変形角 $r_e R_e$ を図12に示す。従来型梁の実験では、 1.5×10^{-2} rad.の時に $r_e R_e$ の本研究におけるクライテリアである $1/400$ rad.を超えてしまうが、解析においても同様の結果を得ることができた。改良型梁の実験では、 R_t が 1.75×10^{-2} rad.までは $r_e R_e$ はほとんど生じず、 R_t が 2.5×10^{-2} rad.でも $1/400$ rad.程度にとどまったが、解析でも同様の結果を得ることができた。

なお、柱の解析モデルによる解析結果も過去の実験結果を精度よく再現した。

(3) RC平面フレームの応答解析

作成した柱と梁の解析モデルを用いて、12種類の平面フレームを対象に地震波による応答解析を行った。解析対象は5層3スパン、5層2スパン、5層1スパン、3層3スパン、3層2スパン、3層1スパンの6種類の形状のフレームで、それぞれ従来型の梁を使用したフレームをNタイプ、改良型梁を使用したフレームをHタイプとした。使用材料は、普通鉄筋をSD345、高強度鉄筋をSD685とし、コンクリートは、NタイプではFc27、HタイプでFc45とした。柱の軸力によって、建物の傾きを復元させるモーメントが生じるが、解析モデルでは、柱の軸力は残留変形が生じやすい

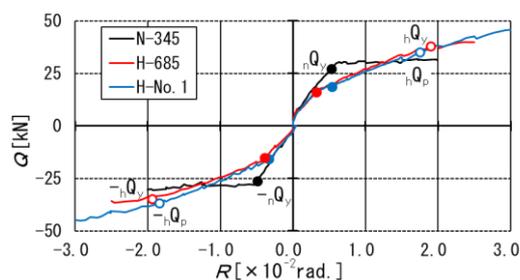


図9 骨格曲線

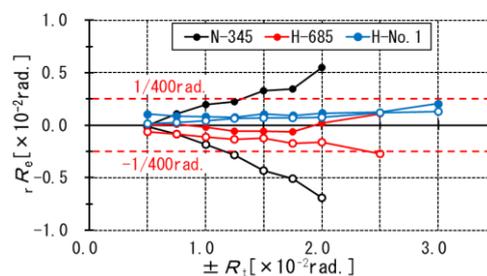
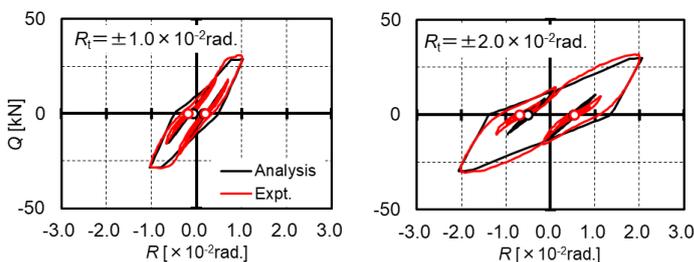
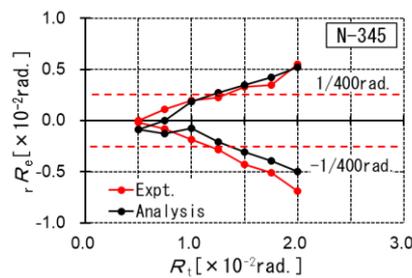


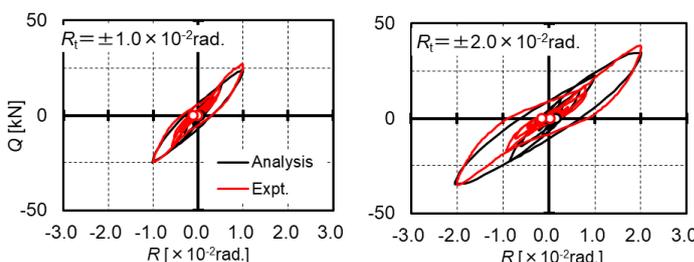
図10 残留変形



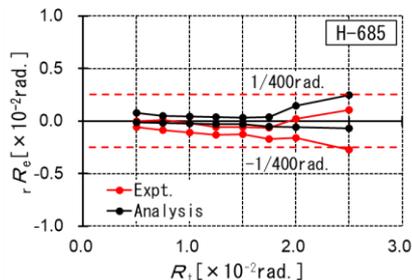
(a) 従来型梁



(a) 従来型梁



(b) 改良型梁



(b) 改良型梁

図11 $Q-R$ 関係

図12 $r_e R_e - R_t$ 関係

比較的低軸力とし、側柱の軸力比は5%とした。地震波の加速度データは、観測波を中心に9波を使用し、フレーム全体の層のいずれかの最大層間変形角が $2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ となるように、各地震波の倍率を調節した。同じ地震波およびフレーム形状で比較すると、ほとんどのケースで N タイプと H タイプの倍率に大きな差は無かった。

フレーム全層における最大の残留変形角 $rR_{e,max}$ と地震波の最大速度の関係を、図 13 に示している。N タイプでは 54 ケース中、13 ケースで目標値として設定している残留層間変形角 $1/400 \text{rad}$ を超え、平均では $0.177 \times 10^{-2} \text{rad}$ となった。一方、H タイプではすべてのケースで残留層間変形角は $1/400 \text{rad}$ を超えることは無く、平均でも N タイプの半分となる $0.075 \times 10^{-2} \text{rad}$ に留まった。図 14 にベースシア C_B と最大速度の関係を示している。全体的には最大速度が大きいほど C_B が大きく、タイプ別では H タイプが N タイプを上回る傾向があった。N タイプと H タイプの C_B の平均はそれぞれ 0.669 と 0.704 となり、H タイプは N タイプを 5.3% 上回った。

以上の解析結果から、高強度鉄筋を使用した改良型梁による RC フレームの残留変形の抑制効果が確認できた。

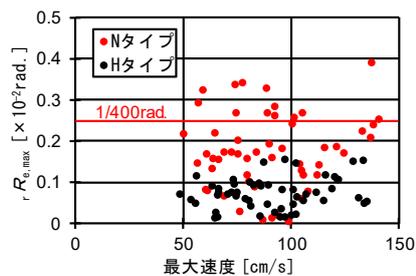


図 13 $rR_{e,max}$ - 最大速度関係

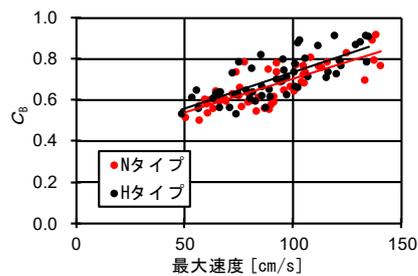


図 14 C_B - 最大速度関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 1件）

1. 著者名 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 62
2. 論文標題 高強度鉄筋を用いて履歴特性と残留変形を制御するRC梁に関する実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 337-340
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 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 45
2. 論文標題 高強度鉄筋を用いて骨格曲線と残留変形を制御したRC梁に関する実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	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 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 -
1. 著者名 高石健祐, 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 61
2. 論文標題 再現性の高い鉄筋コンクリート梁の解析モデルに関する研究 その1 提案する解析モデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 369-372
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 長濱銀正, 川添敦也, 塩屋晋一	4. 巻 61
2. 論文標題 再現性の高い鉄筋コンクリート梁の解析モデルに関する研究 その2 解析結果と実験結果の比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 373-376
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 KAWASOE Atsuya, SHIOYA Shinichi	4. 巻 68B
2. 論文標題 ANALYTICAL MODEL OF RC COLUMN WITH HIGH REPRODUCIBILITY OF HYSTERETIC BEHAVIOR USING MULTI-SPRINGS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering B	6. 最初と最後の頁 66 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijse.68B.0_66	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0件

〔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	安井 賢太郎 (YASUI Kentarou) (70897701)	鹿児島工業高等専門学校・都市環境デザイン工学科・准教授 (57701)	

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