

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06579

研究課題名(和文) 高強度緊張材で能動拘束された損傷RC柱の圧縮性能とせん断伝達機構の解明

研究課題名(英文) Experimental Investigation of the Axial Compression Capacity and Shear Resistance Mechanism of Shear-damaged RC Columns with Emergency Fiber Belt Prestressing Retrofitting

研究代表者

中田 幸造 (NAKADA, Kozo)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：80347129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アラミド繊維ベルトによる能動横拘束を地震でひび割れが生じた損傷RC柱に応用し、能動横拘束による「ひび割れ閉合」効果を水平加力実験と圧縮実験により検証した。その結果、本研究では、(1) 中程度の能動側圧を導入した主筋の付着がある損傷RC柱は、主筋が引張降伏して曲げ破壊となった、(2) 主筋の付着がない補強損傷RC柱では、能動側圧の大きい方が最大水平耐力も大きくなり、また、能動側圧が大きいと、アーチ機構の斜め圧縮応力度も大きくなった、(3) 圧縮実験では、損傷RC柱に導入する能動側圧を大きくすると拘束損傷コンクリート強度も大きくなった、などの成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

例えば、平成28年熊本地震では大地震が連続発生した。現行の耐震設計は建物が大地震を複数回受けることは想定しておらず、また、近年では地震後に建物を継続使用する要求も高い。地震直後に居住者を一時避難させることなく、また、余震対策のためにも短時間で被災建物に応急補強を施し、建物の安全・居住者の安心を確保することが求められている。本研究では、地震でひび割れが生じた損傷鉄筋コンクリート(RC)柱を高強度緊張材で締め付けてひび割れを「閉合」し、RC柱の軸力支持能力、水平抵抗能力を回復させる。目的を達成するため、水平加力実験と圧縮実験の2種類の構造実験を行い、「ひび割れ閉合」効果を検証した。

研究成果の概要(英文)：This study involves a rehabilitation method (emergency retrofitting) for restoring the axial compression capacity and shear resistance mechanism of shear-damaged reinforced concrete (RC) columns. In this shear-damaged RC columns emergency retrofitting, aramid fiber belts and couplers are employed. Prestressed aramid fiber belts are applied on the damaged RC column, offering active and passive confinement as well as shear strengthening. The results reveal the following: (1) The emergency-retrofitted RC column with high lateral confining pressure exhibits flexural behavior. (2) In the emergency-retrofitted RC column with unbonded rebars, the lateral force capacity and diagonal concrete stress of the arch mechanism increase with rising lateral confining pressure. (3) The emergency retrofitting with high lateral confining pressure causes significant axial compression capacity and compressive ductility recovery.

研究分野：建築構造学

キーワード：プレストレス 横拘束 拘束コンクリート 応急補強 軸耐力 リハビリテーション せん断破壊

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

次なる巨大地震の発生が危惧される中、その備えとしての耐震補強は広く普及し、耐震設計も高度化した。不幸にして被災した鉄筋コンクリート (RC) 造建物の構造安全性確保のための研究は道半ばにある。このような中であって、琉球大学の山川 (名誉教授) と中田 (研究代表者) は、高強度緊張材で RC 柱を横拘束すれば、①能動横拘束効果、②受動横拘束効果、③せん断補強効果の3つの補強効果が得られることについて実験的研究を展開してきた。ここで、能動横拘束効果とは、「RC 柱をあらかじめ締め付けることで得られる横拘束効果」のことである。例えば、緊張 PC 鋼棒で RC 柱を能動的に横拘束した中心圧縮実験によれば、能動横拘束された RC 柱の圧縮強度は無拘束コンクリート強度から最大で 1.28 倍増大し、かつ、PC 鋼棒による弾性横拘束により応力下降域が非常に緩やかになること、また、PC 鋼棒による能動横拘束によりせん断強度も増大することを明らかにしてきた。この能動横拘束が地震でひび割れが生じた損傷 RC 柱にも適用できるという山川の着想は、市販のラッシングベルト (荷締め具) を用いて損傷 RC 柱を能動的に横補強する簡便・迅速な応急補強法へと展開されてきた。損傷 RC 柱を締め付ければ、応急補強後の RC 柱は曲げ破壊し、鉛直荷重支持能力も回復することは実験的に分かりつつあるが、せん断強度はどれくらい増大するのか、能動横拘束後の応力伝達がどのようなものであるのかについては不明であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の PC 鋼棒を用いた能動横拘束の基礎研究成果を基軸に、高強度緊張材 (アラミド繊維ベルト) による能動横拘束を地震でひび割れが生じた損傷 RC 柱に適用し、「能動横拘束」の原理を4つ目の補強効果となる「ひび割れ閉合効果」としてさらに発展させ、この「ひび割れ閉合効果」を万能試験機による圧縮実験と建研式加力装置による水平加力実験の2つの構造実験から検証することが目的である。本研究の実験変数は、損傷レベル、能動側圧、主筋の付着の有無、破壊モードとし、圧縮実験と水平加力実験を実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 柱試験体の形状寸法

損傷 RC 柱に補強を施し、水平加力実験を行う柱試験体を ER シリーズ、圧縮実験を行う柱試験体を AC シリーズと称する。これらの柱試験体は1辺が 250mm の正方形断面であり (1/2.4 の縮尺)、ER、AC シリーズ共に柱全高さは 900mm である。柱の試験区間には D10 主筋を 12 本使用し、試験区間には直径 3.7mm の帯筋を 105mm 間隔で配筋したせん断破壊が曲げ破壊に先行する柱である (図 1 (a))。

#### (2) 加力実験の流れ 1 (せん断損傷実験)

ER、AC シリーズ共に RC 柱を4つの鉄骨スタブに PC 鋼棒を用いて緊結し、建研式加力装置を用いて軸力比 0.2 の下で斜めひび割れを導入する「せん断損傷実験」を行う (図 1 (b), (c))。柱試験体と鉄骨スタブの緊結には PC 鋼棒のほかにエポキシ樹脂を用いた。「せん断損傷実験」では、RC 柱のせん断破壊を制御するため、アラミド繊維ベルト (以下、ベルト) を疎に配置して目標の損傷レベルに到達するまで水平加力を行った。

#### (3) 加力実験の流れ 2 (能動横拘束後の水平加力実験と圧縮実験)

せん断損傷導入後、残留水平変位をゼロに戻し、軸力を除荷した。その後、ER シリーズは建研式加力装置の中で、AC シリーズは損傷 RC 柱を鉄骨スタブから分離し、2000kN 万能試験機に柱試験体を設置した後にベルトで能動横拘束を行った (図 2)。能動横拘束後、ER シリーズでは、再び軸力比 0.2 の下で水平加力実験を行った (写真 1 (a))。

圧縮実験を行う AC シリーズの材端条件は、一端ピン、他端固定であり、圧縮ひずみは荷重版間 (900mm) とスタブ間 (675mm) の2か所を各4台、計8台の変位計で計測した (写真 1 (b))。

補強において、損傷 RC 柱試験体の隅角部は半径 20mm で面取りし、隅角部およびカプラーの位置には厚さ 0.8mm のテフロンシートを設置した。ベルトは 50mm の幅を半分折り曲げて幅

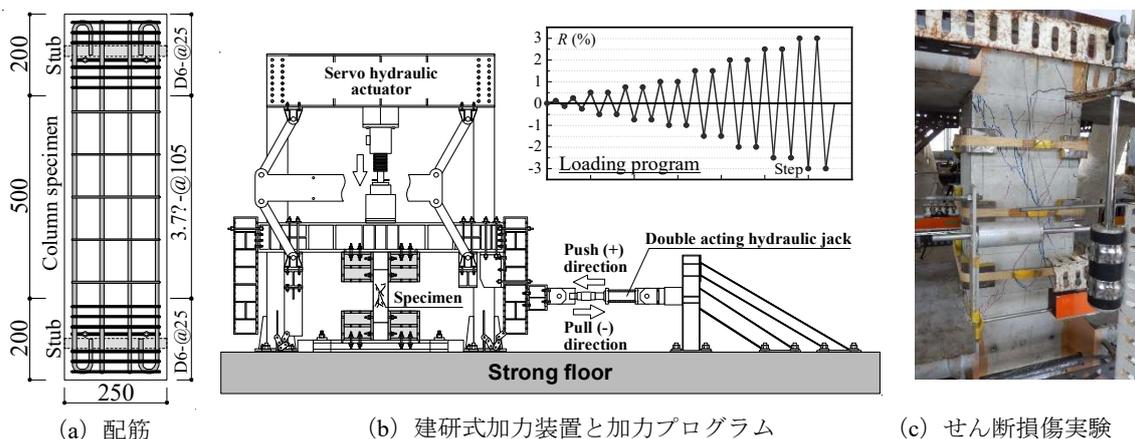


図 1 柱試験体の配筋と加力装置、およびせん断損傷実験風景

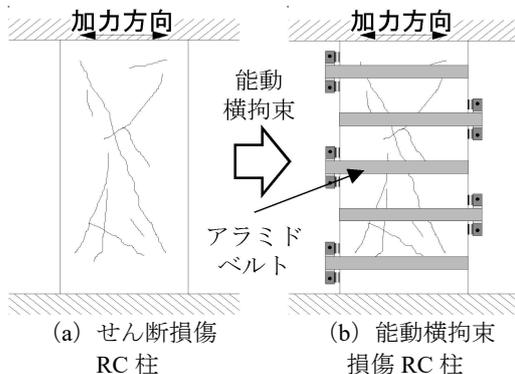


図2 せん断損傷 RC 柱の能動横拘束

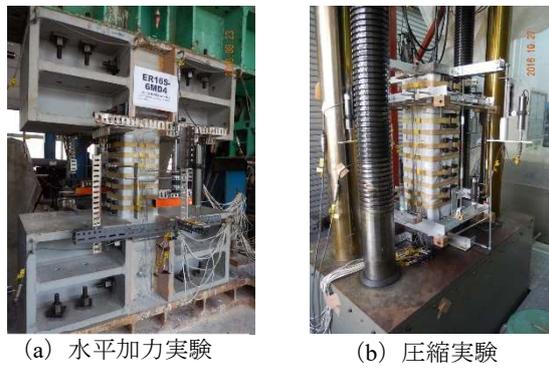


写真1 応急補強 RC 柱の実験風景

25mm とし、1 本のベルトの両端を 100mm ラップさせ、エポキシ樹脂で接着し、リング状に製作した。ベルトの両端は鋼製のカプラーにて連結している。カプラーとベルトの間には摩擦低減のために離形フィルムを設置した。緊張ひずみは、ベルトの継ぎ目と継ぎ目の反対側にエポキシ樹脂で硬化部を製作し、ゲージを貼付することで管理した。損傷 RC 柱に設置したベルトへの張力導入時には、ひび割れ閉合による張力のバラつきが少なくなるように、何回か均等に締め付けを行っている。

#### 4. 研究成果

##### (1) ひび割れ閉合による鉛直荷重支持能力回復の実現

ベルトの能動横拘束によるひび割れ閉合効果を圧縮実験で検証した。実験結果概要を図 3 に示す。図 3 (a) は、損傷レベル IV (2mm を超えるひび割れ幅) であるせん断損傷 RC 柱 (赤色)、ベルトで横拘束しただけの損傷 RC 柱 (能動側圧ゼロ, 灰色)、ベルトで高い能動側圧を与えひび割れ閉合を実施した損傷 RC 柱 (青色) の圧縮応力度-ひずみ度関係である。図 3 (b) は損傷レベル IV の結果に、損傷レベル III (ひび割れ幅 1~2mm 程度) のせん断損傷 RC 柱と (赤色の破線)、損傷レベル III の損傷 RC 柱に高い能動側圧を与えてひび割れを閉合した柱試験体 (青色の破線) の実験結果を合わせて示したグラフである。図 3 より、赤で示す損傷 RC 柱に対して、ベルトの能動横拘束でひび割れ閉合を行うと、損傷 RC 柱の圧縮応力度は、元のコンクリート強度の 9 割以上に回復する成果が本実験により得られた。また、図 3 (a) より、灰色の能動側圧ゼロ (ひび割れ閉合なし) より、高い能動側圧を与えた (ひび割れ閉合した) 青色の方が圧縮応力度の回復が大きく、従って、応急補強には受動横拘束より、能動横拘束がはるかに効果的であることも示された。

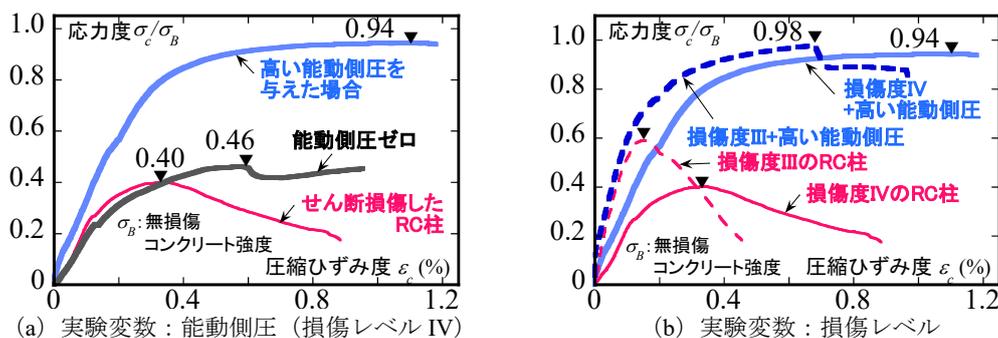


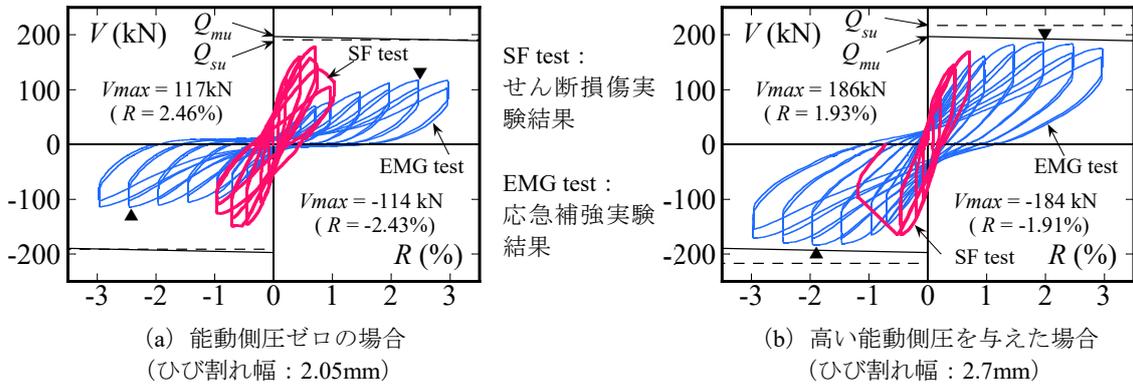
図3 ひび割れ閉合効果の検証結果 (圧縮実験結果の例)

##### (2) 損傷 RC 柱への能動横拘束適用による曲げ破壊の実現

図 4 は、ベルトの能動横拘束によるひび割れ閉合効果を水平加力実験で検証した実験結果の例である。図 4 (a), (b) に示す RC 柱は損傷レベル IV (2mm を超えるひび割れ幅) の RC 柱であり、せん断損傷実験 (SF test と表記) を赤線で、ベルトで応急補強を行った後の実験結果を青線 (EMG test と表記) で示している。

図 4 (a) より、せん断損傷 RC 柱 (赤色) に対して、ベルトを巻き付けて能動側圧を導入しない (ひび割れ閉合を実施しない) 場合 (青色)、応急補強後の実験結果は、変形能力の改善は認められるものの、水平耐力の回復は見られなかった。図 4 (a) ではベルトを緊張していないため、損傷コンクリートは相互に一体化していない (ひび割れ閉合していない) 状態であり、そのため、損傷コンクリートが膨れて初めてベルトに引張力が生じる受動横拘束のみが発揮されている状況にある。

一方、図 4 (b) では損傷 RC 柱にベルトを巻き付け、強く締め付ける (高い能動側圧を導入する) と能動横拘束によるひび割れ閉合効果が発揮され、損傷コンクリートは拘束コンクリートとして再一体化し、応急補強後の最大水平耐力はせん断損傷実験時よりも大きくなり、かつ、主筋



注)  $Q_{mu}$ ,  $Q_{su}$ : シリンダー強度による曲げ強度およびせん断強度計算値

図4 ひび割れ閉合効果の検証結果 (水平加力実験結果の例, 損傷レベル IV)

が引張降伏する曲げ降伏を示し、変形能力に優れた履歴性状となった (青色)。従って、水平加力実験の結果からも、応急補強には受動横拘束より、能動横拘束の方がはるかに効果的であることが示されたと言える。

(3) 能動横拘束されたせん断損傷 RC 柱のアーチ機構の実験的検証

せん断伝達機構への能動横拘束の効果を検証した。本実験では、せん断伝達機構のうち、アーチ機構を検証するため、柱試験体の主筋の付着を除去し、トラス機構の発生を抑制することで柱頭柱脚をせん断力が斜めに伝わるアーチ機構を検証した。図5は主筋の付着を除去した損傷 RC 柱 (損傷レベル IV) にベルトによる能動横拘束を適用した水平加力実験結果である。図5の赤線はせん断損傷実験結果 (SF test と表記)、青線は応急補強実験結果 (EMG test と表記) である。図5 (a) は、損傷 RC 柱へのベルトによる能動側圧が小さい場合、図5 (b) は、ベルトによる能動側圧が中程度の場合の実験結果である。図5より、主筋の付着がない能動横拘束損傷 RC 柱 (青色) の水平荷重は漸増する結果であった。図5 (b) に青色で示す中程度の能動側圧を導入した損傷 RC 柱の最大水平耐力 (154kN) は、小さい能動側圧を導入した図5 (a) の最大水平耐力 (青色, 129kN) より大きくなった。これらの試験体では主筋の付着を除去しているため、ベルトのせん断補強効果は発生しない。また、これらの試験体のせん断力の伝達は、柱頭と柱脚を結ぶ圧縮帯で行われると考えられ、従って、図5 (b) 青色の最大水平耐力が (a) の青色より大きくなったのは、ベルトの能動横拘束によるひび割れ閉合の効果がアーチ機構に表れたものと考えられる。

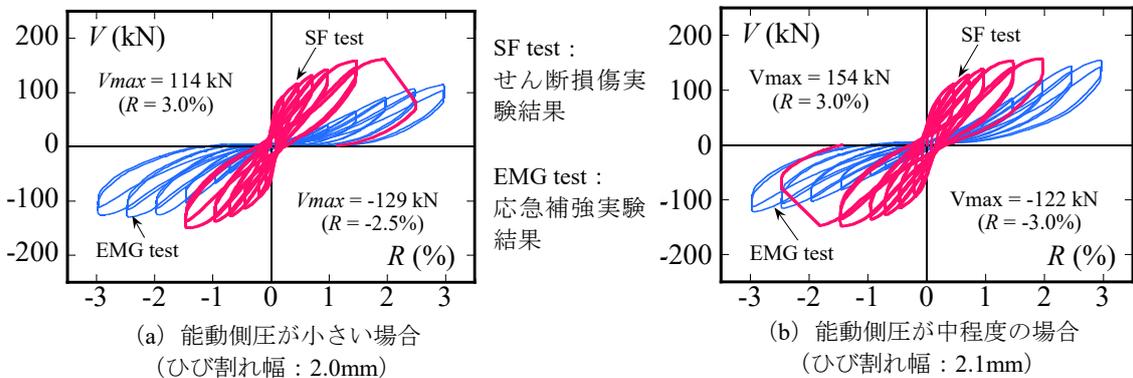


図5 能動横拘束された損傷 RC 柱のアーチ機構の検証結果例 (主筋の付着を除去した柱試験体)

(4) 能動横拘束された損傷 RC 柱のトラス機構とアーチ機構の応力伝達機構

図6は、本研究で考える能動横拘束された損傷 RC 柱のトラス機構とアーチ機構の応力伝達機構 (以下、モデル) である。本研究では、図6 (a) に示す (主筋の付着がある柱試験体の) トラ

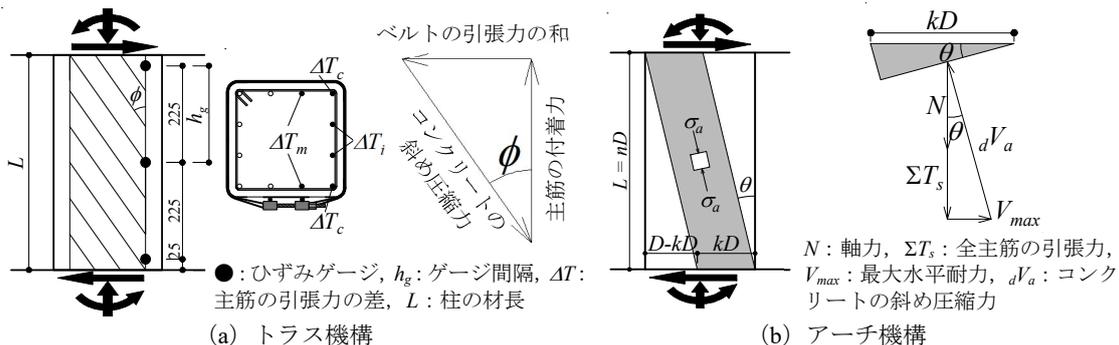


図6 本研究で考える能動横拘束された損傷 RC 柱のせん断伝達機構

ス機構のモデルにおいて、主筋の柱頭，中央に貼付したひずみゲージ測定値からせん断強度時の主筋の引張力の差を求め，これらのひずみゲージ間のベルトの引張力の総和を用いてトラス機構の角度 $\phi$ 実験値を求める。図 6 (b) は，（主筋の付着を除去した柱試験体の）アーチ機構の力の釣合いを示しており，本研究では，作用軸力と最大水平耐力時の全主筋の引張力の和，最大水平耐力，コンクリートの斜め圧縮力でアーチ機構の力の三角形が閉じると考える。本研究では，図 6 のトラス機構とアーチ機構のモデルを提示し，これらで実験結果を概ね説明できることを示した。

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中田幸造, 山川哲雄, 喜屋武徹, 金田一男	4. 巻 42
2. 論文標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱のせん断強度に関する実験的研究	5. 発行年 2020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 掲載確定
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 中田幸造, 山川哲雄, 喜屋武徹, NOORI Mohammad Zahid	4. 巻 41
2. 論文標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱に関する実験的研究	5. 発行年 2019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 1201-1206
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 中田幸造, 山川哲雄	4. 巻 40
2. 論文標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱のせん断破壊実験	5. 発行年 2018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 1261-1266
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 中田幸造, CASTRO Juan Jose, 井出大希	4. 巻 39
2. 論文標題 緊張材で能動拘束された損傷RC柱に関する実験的研究	5. 発行年 2017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 1177-1182
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 K. Nakada, J. J. Castro	4. 巻 -
2. 論文標題 Emergency retrofitting of shear-damaged RC columns using fiber-belt prestressing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures	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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 喜屋武徹, 中田幸造, 山川哲雄, NOORI Mohammad Zahid, 金田一男
2. 発表標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田幸造, 山川哲雄, NOORI Mohammad Zahid
2. 発表標題 損傷RC柱への能動横拘束効果に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田幸造, 山川哲雄
2. 発表標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱の圧縮実験とせん断破壊実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 喜屋武徹, 中田幸造, 山川哲雄, 李龍輝, Noori Mohammad Zahid
2. 発表標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱の圧縮実験と水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田幸造, CASTRO Juan Jose
2. 発表標題 緊張材で能動拘束された損傷RC柱の実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 李龍輝, 中田幸造, 山川哲雄
2. 発表標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱のせん断破壊実験
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中田幸造, CASTRO Juan Jose
2. 発表標題 緊張材で能動拘束された損傷RC柱の耐震性能に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----