

令和 6 年 4 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：2020～2023

課題番号：20K04794

研究課題名（和文）緊張材の能動横拘束で地震損傷RC部材のひび割れを閉合する機動的な応急補強法の開発

研究課題名（英文）Development of Mobile Technique for Emergency Retrofit of Shear-damaged RC Columns Using Fiber-belt Prestressing

研究代表者

中田 幸造（NAKADA, Kozo）

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：80347129

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目的は、緊張材の能動横拘束を地震被災鉄筋コンクリート（RC）柱のひび割れ閉合に応用し、簡便・迅速・安価な機動的応急補強法を確立することである。本研究では、せん断伝達機構及び能動側圧と耐震性能の回復程度などを圧縮実験及び水平加力実験により検証した。その結果、（1）圧縮及び水平加力実験では、損傷RC柱に大きな能動側圧を導入すると耐力は回復するが、剛性の回復は小さかった、（2）能動側圧は補強の効率化に繋がると考えられる、（3）水平剛性の回復程度を検証するために能動横拘束にエポキシ樹脂補修を併用すると、水平耐力と剛性いずれも大きく回復した、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

本研究の重要なキーワードは、コンクリートをあらかじめ締付ける「能動横拘束」である。能動横拘束効果によって、コンクリートの圧縮強度は増大する。本研究では、この能動横拘束を地震によってひび割れが生じた損傷RC柱の「ひび割れ閉合」に応用する点に学術的意義がある。また、本研究の成果は、（1）連続発生する大地震や余震における震災建築物の損傷進行を阻止し得る、（2）震災建築物付近の安全確保や不動産の保全に繋がる、（3）応急仮設住宅等の需要や災害廃棄物発生量を抑制することにも繋がる、などの点から社会的意義が考えられる。

研究成果の概要（英文）：The ultimate purpose of this research is development of a simple, quick, and inexpensive mobile-emergency retrofitting technique to close the cracks of shear-damaged reinforced concrete (RC) columns via applying active lateral confinement pressure using fiber belts. In this study, the shear transition mechanism, and the recovery of seismic performance of shear-damaged RC columns retrofitted using mobile emergency technique were examined under the axial compressive and lateral loading tests. The results showed that: 1) applying active lateral confinement pressure on the shear-damaged RC columns largely restored their flexural strength, but smaller stiffness recovery was observed; 2) Applying active lateral confinement pressure led to a more efficient shear reinforcement; 3) Use of epoxy resin in conjunction with applying active lateral confinement pressure resulted in a significant recovery of both lateral strength and stiffness of shear-damaged RC columns.

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 せん断破壊 リハビリテーション

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1978年2月(M6.7)と同年6月(M7.4)の宮城県沖地震, 1997年3月(M6.6, 最大震度5強)と同年5月(M6.4, 最大震度6弱)の鹿児島県北西部地震, 平成28年熊本地震(M6.5とM7.3, 最大震度7)は大地震が連続発生し得ることを示した。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まっている。大地震の連続発生や, 本震後の余震における被災建物の損傷進行の阻止・構造安全性の確保は, 地震国日本の直面する重要課題であり, 故に被災建物への簡便・迅速・安価で機動的に対応可能な応急補強技術の確立は喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は, 緊張材の能動横拘束を地震被災鉄筋コンクリート(RC)柱のひび割れ閉合に応用し, 簡便・迅速・安価な機動的応急補強法を確立することである。損傷RC柱のひび割れ閉合は, RC柱の外周に周回させた緊張アラミド繊維ベルト(以下, ベルト)の能動横拘束により実現される。ひび割れの閉合によって, 損傷RC柱のコンクリートを再一体化し, 拘束コンクリートとして修復することで鉛直荷重支持能力を回復させ, ベルトのせん断補強効果によって, 損傷RC柱の曲げ破壊が実現できる。本研究では, ①能動横拘束された損傷RC柱のせん断伝達(トラス・アーチ)機構の解明, ②能動横拘束のレベルと補強RC柱の耐震性能(曲げ・せん断・圧縮耐力)回復の検証, について取り組むため, 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

本研究では, 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。製作した柱試験体は3種類に分けられる。まず, 2020年度及び2021年度に製作した柱試験体は, 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, 試験区間は500mmのせん断スパン比1.0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)(b))。これらの柱試験体は, 琉球大学構造実験室で製作した。

一方, 2023年度の柱試験体は, 断面寸法及び配筋は2020年度及び2021年度と同様だが, 柱の長さを750mm(せん断スパン比を1.5)とし, 柱を長くして応急補強後の曲げ性状を確認する柱試験体を製作した(図1(c))。その他, 2020年度及び2021年度の柱試験体とは異なり, RC柱とスタブはコンクリートが一体的に打設されたエ形の柱試験体である。

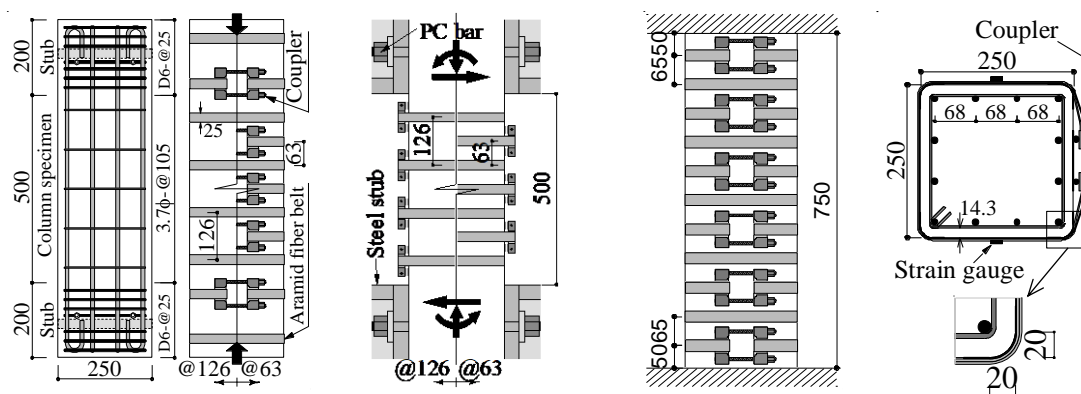
(2) 加力実験の流れ(その1: せん断損傷実験)

加力装置を図2に示す。2020年度と2021年度の柱試験体は, PC鋼棒を用いてRC柱を4つの鉄骨スタブに緊結して組立て, また, 2023年度柱試験体は製作した柱試験体をそのまま建研式加力装置に設置した。加力装置に設置したあと, 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」を行った(写真1)。なお, 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, 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(その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能動横拘束を行い(図3), 再び軸力比0.2の下で水平加力実験を行った(写真2)。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い, 圧縮実験を実施した(写真2)。

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, 圧縮ひずみは載荷版間(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2)。



(a) 配筋状況とACシリーズ (b) ERシリーズ (c) ERシリーズ(2023年度) (d) 補強断面

図1 柱試験体(単位:mm)

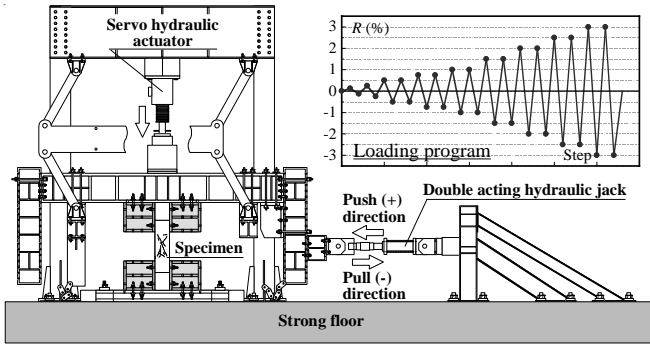


図2 加力装置



写真1 せん断損傷実験

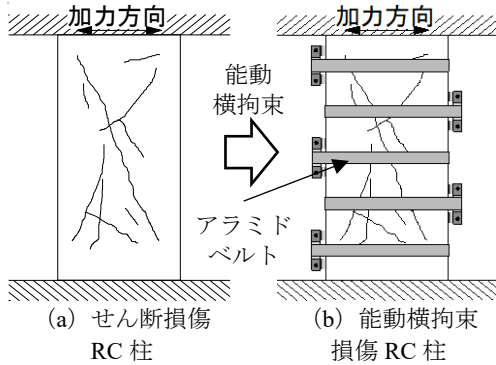


図3 せん断損傷 RC 柱の能動横拘束



写真2 能動横拘束後の水平加力及び圧縮実験

補強では、損傷 RC 柱試験体の隅角部は半径 20mm で面取りし (図 1 (d)), 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 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

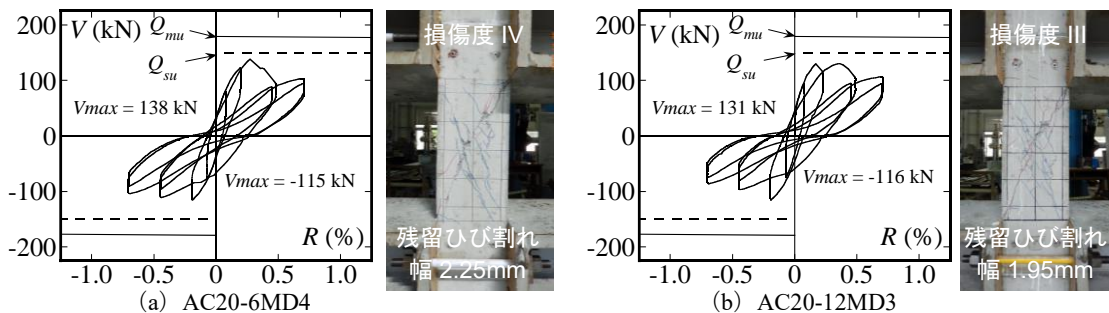
(1) せん断損傷実験の結果

代表的な柱試験体の水平荷重 V -部材角 R 関係及び実験終了後の最終ひび割れ状況を図 4 に示す。これらは、圧縮実験に使用した柱試験体のせん断損傷実験結果である。図 4 には、シリンダー強度 (14.7 N/mm^2) による多段配筋柱の曲げ耐力略算値 Q_{mu} と、修正荒川 mean 式によるせん断耐力計算値 Q_{su} も示した。せん断損傷実験において、損傷度はひび割れ幅を中心に総合的に判断した。

なお、2023 年度に製作した柱試験体のうち、1 体については、加力試験機に設置する際に RC 柱にひび割れが生じたため、せん断損傷を生じさせることが困難であった。この 1 体については、機会を見つけて再実験を行いたい。

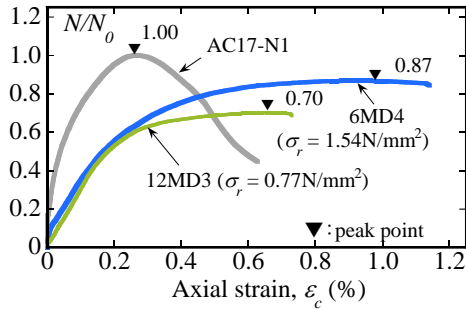
(2) 能動横拘束された損傷 RC 柱の圧縮実験の結果

AC シリーズの圧縮実験結果を図 5 に示す。図 5 (a) は圧縮軸力-圧縮ひずみ度関係、(b) は応力度-ひずみ度関係である。図 5 の実験変数は能動側圧であり、6MD4 の能動側圧は 12MD3 の約 2 倍である。ただし、12MD3 の損傷度は III であり、6MD4 より損傷度がやや小さい。図 5

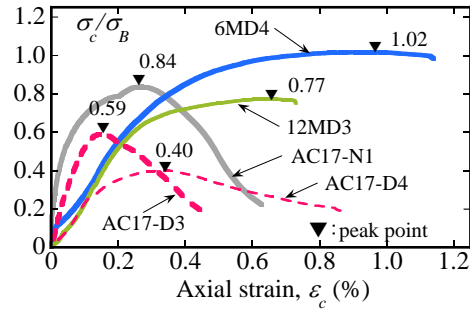


注) Q_{mu} , Q_{su} : シリンダー強度による曲げ耐力およびせん断耐力計算値

図4 せん断損傷実験の結果



(a) 圧縮軸力-圧縮ひずみ度関係



(b) 応力度-ひずみ度関係

図5 能動横拘束された損傷RC柱の圧縮実験の結果

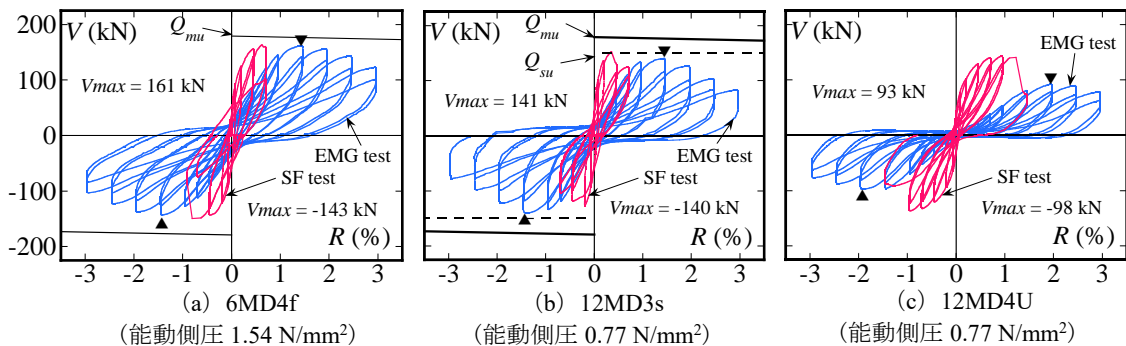
には比較のために基準試験体 AC17-N1 (せん断損傷なし, 過年度結果) を表示し, 図 5 (a) では圧縮軸力を AC17-N1 の最大圧縮軸力 N_0 で除して示した。

図 5 (a) より, 能動側圧が 6MD4 の約半分である 12MD3 の軸剛性は, 6MD4 とほぼ同じとなった。12MD3 の損傷度は 6MD4 よりも小さい III であり, 即ち, 能動側圧が小さく損傷度 III の 12MD3 と, 能動側圧が大きく損傷度 IV である 6MD4 のひび割れ閉合の度合いが同程度だったため, 軸剛性がほぼ同じとなった可能性がある。

図 5 (b) は柱試験体の圧縮軸力から主筋の負担軸力を差し引いて求めたコンクリートの応力度-ひずみ度関係である。図 5 (b) には, 参考のため, 過去に実施した無拘束の損傷 RC 柱試験体 AC17-D3 (損傷度 III) と AC17-D4 (損傷度 IV) を示した。図 5 (b) より, 12MD3 の圧縮強度は $0.77\sigma_B$ ($\sigma_B = 14.7\text{N/mm}^2$), 6MD4 の圧縮強度は $1.02\sigma_B$ であり, 能動側圧が大きいと拘束コンクリート強度が大きくなることがわかった。

(3) 能動横拘束された損傷 RC 柱の水平加力実験結果

図 6 は能動横拘束した損傷 RC 柱の水平荷重 V -部材角 R 関係である (赤色はせん断損傷実験の結果)。図 6 において Q_{mu} 及び Q_{su} はシリンダー強度 (14.7N/mm^2) による曲げ及びせん断耐力計算値であり, 図 6 (a) に示す 6MD4f の能動側圧は, 図 6 (b) に示す 12MD3s の約 2 倍である。図 6 (c) の能動側圧は, 図 6 (b) と同じだが, 主筋の付着を除去することで, トラス機構の発生を抑制し, アーチ機構を発生させた柱試験体である。図 6 (a) より, 主筋の引張降伏が観察されたことから曲げ破壊したと考えられる。図 6 (b) より, 加力の初期では, せん断損傷実験時の斜めひび割れの拡幅が進行した。12MD3s の最大水平耐力は Q_{su} に近いことからせん断破壊したと考えられる。図 6 (a), (b) より, 能動横拘束によって耐力は増大するが, 剛性の差異は小さいと分かる。図 6 (c) より, 加力の初期には柱頭柱脚の断面引張側にひび割れが観察された。主筋の降伏は発生せず, また, 主筋の付着を除去していることから, アーチ機構によって



注) SF: せん断損傷実験結果, EMG: 能動横拘束された損傷 RC 柱の実験結果

図6 能動横拘束された損傷 RC 柱の水平加力実験結果 (ER20S, せん断スパン比 1.0)

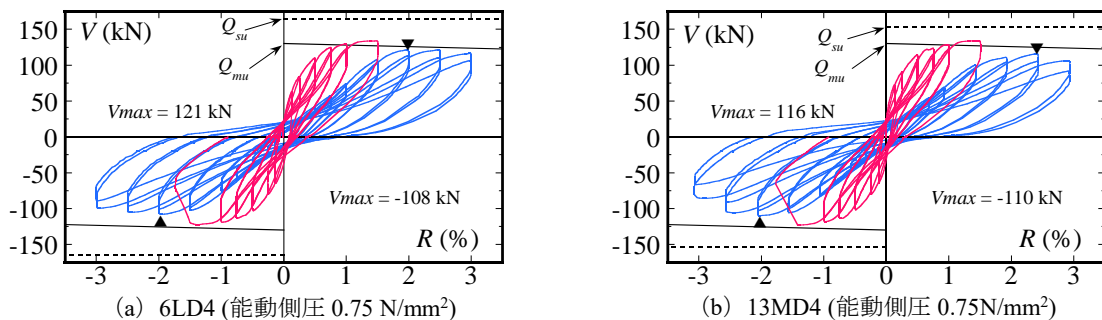


図7 能動横拘束された損傷 RC 柱の水平加力実験結果 (ER23M, せん断スパン比 1.5)

せん断力を伝達したと考えられる。

図7は、せん断スパン比1.5の実験結果である。図7において Q_{mu} 及び Q_{su} はシリンダー強度(17.9 N/mm²)による曲げ及びせん断耐力計算値である。図7(a)と(b)は、補強間隔と緊張力を小さくする、あるいは、補強間隔と緊張力を大きくすることで導入する能動側圧を同じとした。図7(a)、(b)の赤の線はせん断損傷実験の結果である。図7(a)、(b)より、能動側圧を等しくすれば、応急補強後の耐力と変形能力は概ね同じであった。能動横拘束は、補強の効率化に繋がると考えられる。

(4) スケルトンカーブの比較

図8は、能動横拘束に加えてエポキシ樹脂併用の有無を変数としたスケルトンカーブの比較である。図8(a)は能動側圧が0.51 N/mm²、(b)は0.77 N/mm²、(c)は1.54 N/mm²であり、主筋の付着がある柱試験体の比較である。図8(d)は主筋の付着を除去してアーチ機構を発生させた柱試験体を用いた比較であり、能動側圧は1.54 N/mm²である。

図8(a)～(c)より、能動側圧によるひび割れ閉合に加えて、エポキシ樹脂によるひび割れ閉塞を用いると、耐力及び剛性ともに大きく回復することがわかる。ただし、部材の損傷度、応急補強期間終了後の恒久復旧への影響などを考慮に入れて、併用するかどうかは判断が必要になると考えられる。その他、アーチ機構によるせん断伝達機構が発生していると考えられる図8(d)においても、能動横拘束に加えてエポキシ樹脂を併用すると剛性が回復することがわかるが、耐力の回復程度は、図8(a)～(c)ほどではなかった。

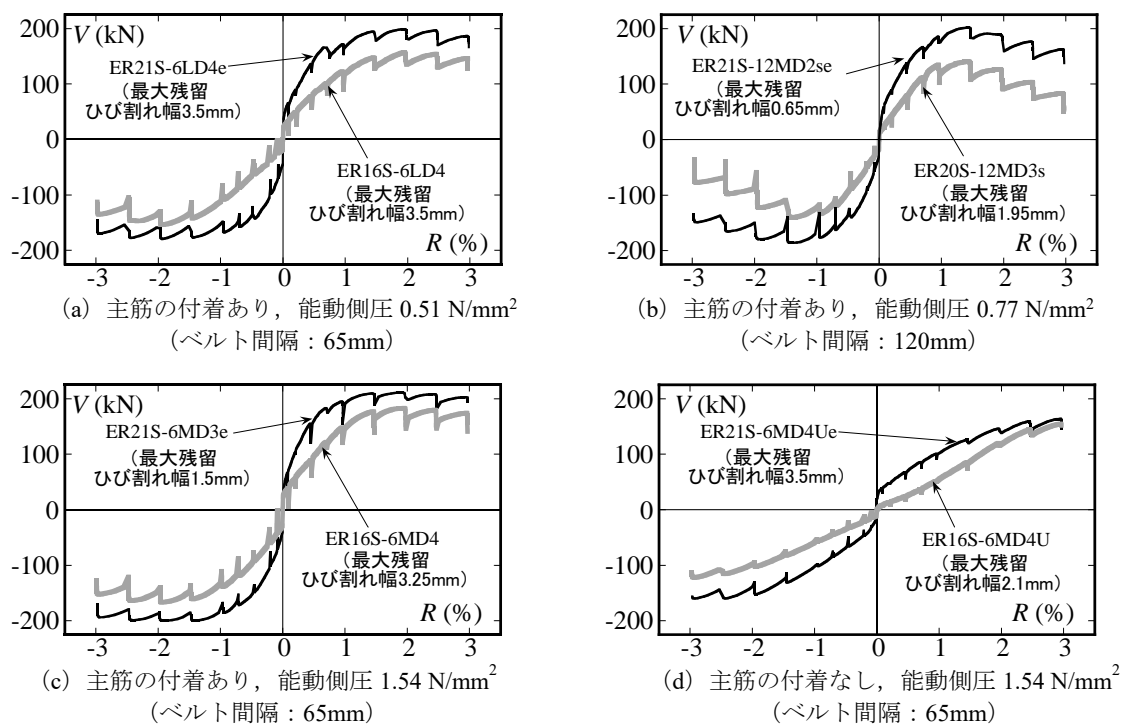


図8 エポキシ樹脂併用の有無を変数としたスケルトンカーブの比較

(5) 主なまとめ

- ① 圧縮実験の結果、損傷 RC 柱に与える能動側圧が大きいと損傷 RC 柱の圧縮強度は大きくなった。ただし、圧縮強度が回復するほどには剛性は回復しなかった。
- ② 水平加力実験の結果、能動側圧を大きくすると最大水平耐力も大きくなるが、水平剛性の差は小さかった。
- ③ 補強間隔と緊張力を大きくする、あるいは補強間隔と緊張力を小さくすることで同じ能動側圧とした水平加力実験の結果、能動側圧が等しければ応急補強後の耐力と変形能力はおおむね同じとなった。能動横拘束は補強の効率化に繋がると考えられる。
- ④ 水平剛性の回復程度を検証するために、能動横拘束によるひび割れ閉合に加えて、エポキシ樹脂によるひび割れ閉塞を併用する水平加力実験を実施した。その結果、主筋の付着のある柱試験体では、エポキシ樹脂併用によって耐力及び剛性の回復程度は大きくなった一方、主筋の付着がない柱試験体では剛性の回復は大きくなったが、耐力の回復程度は主筋の付着がある柱試験体ほどではなかった。

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 0件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 中田幸造, 瀬長大輝, 永木 瞭, 山川哲雄, 金田一男, 黒木正幸 | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 緊張材で能動横拘束された損傷RC柱の圧縮および水平加力実験 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集 | 6. 最初と最後の頁 649-654 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.649 | 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 Mohammad Zahid NOORI, Kozo NAKADA, Daiki SENAGA and Kazuo KANEDA | 4. 巻 45 |
| 2. 論文標題 Experimental Investigation on Shear-damaged RC Columns Retrofitted by Prestressed Fiber Belts | 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 229-234 |
| 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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 瀬長大輝, 中田幸造, 山川哲雄, 金田一男 |
| 2. 発表標題 ひび割れ閉合と樹脂補修を併用したせん断損傷RC柱の水平加力実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 NOORI Mohammad Zahid, NAKADA Kozo, SENAGA Daiki and KANEDA Kazuo |
| 2. 発表標題 Experimental Investigation on Shear-damaged RC Columns Retrofitted by Prestressed Fiber Belts |
| 3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 瀬長大輝, 中田幸造, 金田一男, 永木 瞭, 山川哲雄 |
| 2. 発表標題 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 日本建築学会大会 |
| 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 |
|---------|---------|
|---------|---------|