

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06646

研究課題名(和文) 軽量PCaRC制振方立て壁を用いた被災SRC造共同住宅の復旧・補強法に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Restoration and Reinforcement Method of Earthquake-Damaged SRC Condominium Using Lightweight PCaRC Damping Wall

研究代表者

吉岡 智和 (Yoshioka, Tomokazu)

九州大学・芸術工学研究院・准教授

研究者番号：40304852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：架構に小破程度の損傷が生じた震災マンションの耐震性能を回復・補強する方法として、破壊したRC非構造壁を撤去後に代替として、摩擦ダンパー・ファスナーを利用した軽量PCaRC制振方立て壁を取り付ける制振補強法を提案した。研究成果として、せん断力100kN、200kNを発揮可能な軽量PCaRC制振方立て壁における方立て壁、及び摩擦ダンパーの仕様を確認した。加えて、地震拳動時の方立て壁に生じる損傷の程度、及びそのエネルギー吸収性能(等価粘性減衰定数)を把握することが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2016年熊本地震では20%以上の分譲マンションが「半壊」以上の被害を受け、その復旧が大幅に遅れるという事例が多数見られた。分譲マンションは重要な社会インフラであるため、その復旧の遅れは都市機能の回復の大きな障害となっている。震災マンションの多くは、RC非構造壁がせん断破壊するものの架構は小破程度の被災度であり、復旧工事を施し継続使用できる場合が多い。それ故に、被災したマンションの価値保全、価値向上が図れる提案した軽量PCaRC制振方立て壁を用いた制振補強法の開発は急務であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The method of restoring or reinforcing the earthquake resistance of earthquake-damaged condominiums with minor damage to the structural frame of the building was proposed. In the proposed method, a lightweight PCaRC damping wall using friction damper-fasteners is installed as a replacement for the destroyed non-structural RC wall. As a result of the research, it was confirmed that the proposed lightweight PCaRC damping wall could achieve a shear force of 100 kN and 200 kN with minor damage. In addition, the proposed lightweight PCaRC damping wall has been confirmed to have excellent energy absorption performance. The specifications of the proposed damping wall required to achieve the above performance were identified.

研究分野：建築構造学

キーワード：非構造壁 摩擦ダンパー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震では20%以上の分譲マンションが「半壊」以上の被害を受け、その復旧が大幅に遅れるという事例が多数見られた。分譲マンションは重要な社会インフラであるため、その復旧の遅れは都市機能の回復の大きな障害となっている。震災マンションの多くは、RC非構造壁がせん断破壊するものの架構は小破程度の被災度であり、復旧工事を施し継続使用できる場合が多い。それ故に、震災マンションにおいて、RC非構造壁の破壊が防止でき、損傷時に容易な取り替えが可能で、被災したマンションの価値保全、価値向上が図れる復旧・補強法には隠れた社会的ニーズがあると考えた。そこで本研究では、そのような方法として、破壊したRC非構造壁を撤去後に代替として、軽量PCaRC制振方立て壁を取り付ける補強法を提案した。

### 2. 研究の目的

本研究では、開発研究の第1段階として、提案した軽量PCaRC制振方立て壁単体の地震時挙動を明らかにするため、縦筋の定着方法、配筋方法を実験変数とした実大方立て壁試験体3体(W1, W2-1, W2-2)の水平加力実験を実施し、軽微な損傷を維持しつつ目標せん断力80kN以上を發揮し、完全弾塑性型の履歴ループが得られること、実験条件が方立て壁の最終破壊性状に与える影響を把握し、方立て壁の加力・拘束条件から弱点と推測される壁脚固定部の破壊に至る前に、所定のせん断力を發揮可能であることを確認した。第2段階では、第1段階での成果を踏まえ、ファスナー取付面側に縦筋を偏在配置することでその引張降伏を抑制しつつ減衰力約100kNを發揮でき、縦筋の引張降伏領域の拡大を抑制することで方立て壁の脆性的な曲げ圧縮破壊を防止できることを確認するため、軽量PCaRC制振方立て壁実大試験体2体(W2-3, W3-1)の水平加力実験を行った。第3段階では、減衰力として約200kNを發揮させる場合に、摩擦ダンパー部のボルト本数を倍増させボルト1本当当たりの導入張力を25kN/本に制限することで、摺動時のボルト張力の減少による摩擦力の低下を防ぐ仕様とした軽量PCaRC制振方立て壁実大試験体(W3-2)、及び同様の摩擦ダンパーを利用し減衰力約200kNを發揮しても縦筋が引張降伏しないことを意図した軽量PCaRC制振方立て壁実大試験体(W4-2)の水平加力実験を行い、地震時挙動を明らかにした。さらに、方立て壁の曲げひび割れ損傷の発生を防止し、水平剛性の低下を防ぐために、曲げモーメントによる引張主応力方向に圧縮力を導入するプレストレスト軽量PCaRC制振方立て壁実大試験体(W3-1PS)の水平加力実験を行い、減衰力約100kNを發揮する場合のひび割れ損傷抑制効果を確認した。

### 3. 研究の方法

加力実験に使用した試験体の形状寸法、配筋を図1に示す。各試験体の共通事項として、RC方立て壁の寸法は高さ1970mm×幅1350mm×厚さ150mmとし(W3-1-PSは除く)、コンクリートには軽量1種コンクリート(設計基準強度30N/mm<sup>2</sup>)を使用した。配筋として、横筋D10@200ダブル(SD295A)を配筋した。W1では、縦筋D10@150ダブル(SD295A)とし、壁脚側端部は応力伝達のために180°フックを設けコンクリート中に定着させた。W2-1では、W1試験体と同様に縦筋D10@150ダブル(SD295A)を配筋し、壁頭・壁脚部にエンドプレートPL16(SS400、塞ぎ板と称す)を設け、それに縦筋を溶接しコンクリートに機械式定着させた。塞ぎ板は、壁脚固定部のアンカーボルトの端抜け破壊を防止する役割も担っており、壁脚固定部の端抜け破壊に対し方立て壁の曲げ破壊が先行することを企図し設けた。W2-2では、縦筋D10@300ダブルとし、W1, W2-1と比較し縦筋断面積を減少させ、代わりに縦筋の総断面積と等しくなるように斜め筋として4-D10を摩擦ダンパー中心から壁脚固定部中心を結ぶ方向に2箇所配筋した。斜め筋は全てファスナー取り付け面側に偏らせて配筋した。また、W2-1と同様に縦筋の壁頭・壁脚位置において塞ぎ板に溶接し、コンクリートに機械式定着させた。W2-3では、W2-2の斜め筋を縦筋に置き換え片面偏在させ、その他の仕様(形状・寸法、使用材料、鉄筋本数、ファスナー詳細等)は同一とした。W3-1は、せん断力100kN發揮時に方立て壁の曲げ降伏の発生を抑制するため曲げ降伏時せん断力の増加を意図し、縦筋についてファスナー取付け面側端部にそれぞれ3-D16@150(SD345)、同中央部に3-D13@150(SD345)、ファスナーを取り付けていない面側(自由面と称す)にD13@150(SD345)を9本配筋した。縦筋端部の定着方法は、W2-1と同様に壁頭・壁脚部に塞ぎ板PL16(SS400)を設け、それに縦筋を溶接しコンクリート機械式定着させた。W3-2は、W3-1試験体と形状・寸法、配筋は同一とし、後述する摩擦ダンパー部の締付けボルト数を2倍とした。また、W4-2では、せん断力200kN發揮時に方立て壁の曲げ降伏の発生を抑制するため曲げ降伏時せん断力の増加を意図し、縦筋についてファスナー取付け面側端部にそれぞれ3-D19@150(SD345)、同中央部に3-D16@150(SD345)、自由面側に9-D16@150(SD345)を配筋することで、W3-1, W3-2の約1.5倍の断面積に相当する縦筋を配筋している。これに加えてW3-2と同様に摩擦ダンパー部の締付けボルト数を2倍とした。W3-1PSは、W3-1と同一仕様の方立て壁に対し、曲げひび割れ発生の抑制のために、壁高方向に平行にプレストレスト導入用のPC鋼棒(17 C種1号)を9列並べ圧縮力(950kN)を導入した。ただし、プレストレストを計測する荷重計の設置に伴い、加力装置に組み込むための高さ制限(2,020mm)を満たすため、壁高をW3-1の1,970mmから240mm縮小させ壁頭部の摩擦ダンパーの位置を150mm下方に移動させた。

摩擦ダンパーを構成する鋼板(PL12, SS400, 連結板と称す)には、長孔(30×長さ870mm)を設け、ボルトとの接触なく水平方向に摺動が生じるようにした上で、方立て壁に埋め込み機械式定着させた19(PC鋼棒, C種1号)により締め付けた。締付けボルト本数は、W1, W2-1~3, W3-1, W3-1PSでは6本×1行、W3-2, W4-2では6本×2行として、25~27.5kN/本の初期張力を導入し、6本ボルトダンパーでは約94kN、12本ボルトダンパーでは約190kNのせん断力(すべり

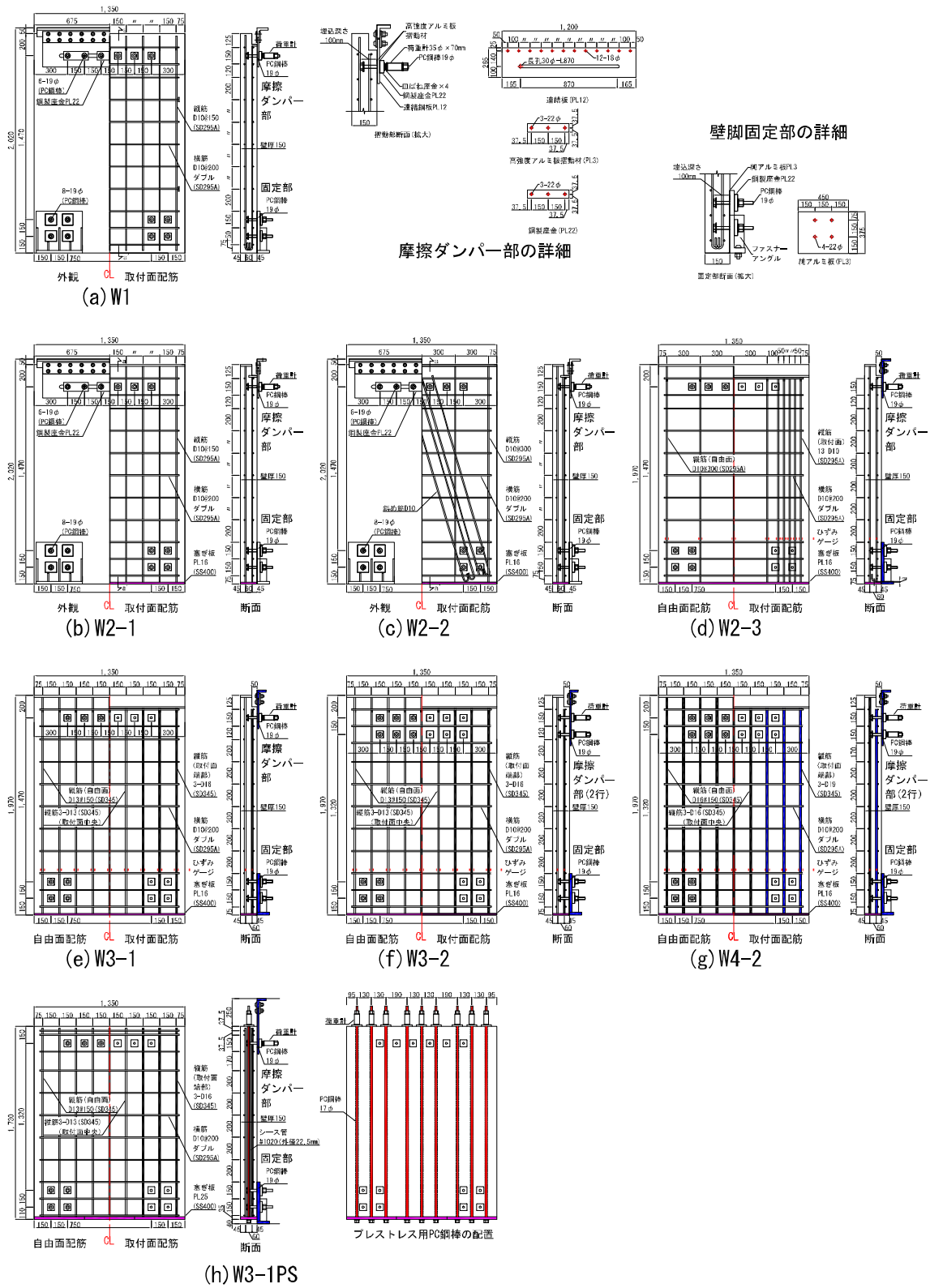


図1 試験体の形状寸法, 及び配筋

係数 0.57 で換算) を発揮せた。安定した摩擦力を発揮させるため、方立て壁と連結板との摩擦面、及び連結板と鋼製座金との摩擦面には高強度アルミ板摺動材( $t=3\text{mm}$ , A7075P-T351)を挿入した。ボルト締め付け部には、皿ばね座金(M20 軽荷重用 1 種, JIS B1251)を 4 枚並列重ねて挿入し、繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下の緩和を図った。下部ファスナーアングルと方立て壁は、壁中に埋め込み機械式定着させた 8-19 (PC 鋼棒, C 種 1 号)により締め付け、摩擦接合(導入張力  $120\text{kN/本}$ 以上)し固定した。固定部ファスナーと方立て壁の間に約 0.63)のすべり係数を発揮させるために、純アルミ板( $t=2\text{mm}$ , A1050P-H24)を挿入し圧着することで、せん断力が約  $170\text{kN}$  に達するまで壁脚固定部に摺動が生じないように設定した。

加力は、大地震時の応答を模擬するため、方立て壁試験体を鋼製骨組の内部に取り付け、鋼製骨組を構成する上部加力桁に接続した  $750\text{kN}$  アクチュエータにより強制変位を与えた。加力は

変位制御とし、壁板の部材角  $R = \pm 1/400\text{rad.}$ ,  $\pm 1/200\text{rad.}$ ,  $\pm 1/100\text{rad.}$  となる変位を各 1 回ずつ与えた後に、一定変位  $R = \pm 1/50\text{rad.}$  を 5 回繰り返す、再び  $R = \pm 1/100\text{rad.}$ ,  $\pm 1/200\text{rad.}$ ,  $\pm 1/400\text{rad.}$  となるように変位を与えた。物理量として、水平力、上・下加力桁間の相対水平変位(層間変位)、壁脚部位置での縦筋ひずみ、連結板と方立て壁との間の相対水平変位(すべり変位)、方立て壁と固定部ファスナーとの間の相対鉛直変位、及び摩擦ダンパー部の締付けボルト張力をそれぞれ計測した。

#### 4. 研究成果

実験結果として、軽量 PCaRC 制振方立て壁のエネルギー吸収性能を表すサイクル毎の等価粘性減衰定数の推移を図 2 に、壁負担せん断力と層間変位の関係を図 3 に示す。図 3 には、それぞれの事象が生じた計測点として、曲げひび割れを○印、斜めひび割れを◇印、曲げ降伏を×印、最大せん断力を□印で示し、その時のせん断力の大きさ QBC, QDC, Qy, Qmax として併記した。得られた実験結果を以下に列挙する。

- (1) W1, W2-1, W2-2, W2-3 では、摩擦ダンパー部の初期ボルト張力の総和として約 150kN を導入すると、方立て壁に軽微なひび割れ損傷が発生するものの、摩擦ダンパーが作動し 90kN 前後のせん断力を発揮でき、完全弾塑性型の履歴ループを描いた。自由面側に斜め筋を多数配筋した W2-2 ではひび割れ損傷の度合いが最も小さくなった。W2-2、及び自由面側に斜め筋の代わりに縦筋を多数配筋した W2-3 では、縦筋、斜め筋の引張降伏が発生しなかった。
- (2) (1)で加力実験に用いた試験体を再利用し、初期ボルト張力の総和として約 300kN (50kN/本に張力を増加)を導入した加力テストランを実施したところ、加力途中にせん断力 170kN を超過したあたりから、縦筋の引張降伏に伴い壁脚に生じた塑性ヒンジの回転が増大し、ひび割れ幅の急増により方立て壁の浮き上がりが生じ、壁頭に設けた摩擦ダンパー部の締付けボルトと連結鋼板の長孔が接触することで壁負担せん断力が急増し、W1 では壁脚固定部がボルト端抜け破壊した。壁底面に塞ぎ板を設けた W2-1 では曲げ圧縮破壊に破壊形式が移行しより大きな耐力を発揮したものの、制振壁としての機能を喪失した。従って、当該制振壁にせん断力 200kN を発揮させるためには、そのせん断力を負担しても、縦筋の引張降伏を生じさせない、又は塑性ヒンジの回転角を増大させない縦筋量が必要なことが把握できた。
- (3) W3-1 では、初期ボルト張力として約 150kN を導入すると、方立て壁に軽微なひび割れ損傷が発生するものの縦筋が引張降伏せず、摩擦ダンパーが作動し、約 110kN のせん断力を発揮する完全弾塑性型の履歴ループを描いた。ただし、W2-1 と比較したところ、縦筋降伏の有無が、エネルギー吸収能力に与える影響はほとんど見られなかった。
- (4) W3-1PS では、W3-1 と同様に縦筋が降伏することなく、壁負担せん断力約 100kN を維持する完全剛塑性型に近い履歴ループを描いた。極めて軽微な曲げひび割れは生じたものの、W3-1 に比較し、曲げひび割れ時せん断力の増加、曲げひび割れ本数、長さが減少したことから、曲げモーメントによる主応力方向に導入したプレストレスは曲げひび割れ発生を抑制する効果が確認できた。しかし、壁脚部に生じる斜めひび割れ発生を抑制するには至らなかった。荷重変形復元力特性(壁負担せん断力と層間変位の関係)の関係、及び等価粘性減衰定数と層間変形角の関係から、W3-1 に比較し、ひび割れ損傷が大幅に抑制された W3-1PS の方が摩擦ダンパーの摺動に伴うエネルギー吸収能力に富む性能を発揮した。
- (5) 摩擦ダンパーのボルト本数を倍増し締付けボルト張力 25 kN/本を導入した W3-2 では、W3-1 に比較し、方立て壁に大きなひび割れ損傷が発生し、複数の縦筋が引張降伏するものの、(2)で述べた方立て壁の曲げ圧縮破壊は発生せず、せん断力約 200kN を発揮した。一方、等価粘性減衰定数は、方立て壁の損傷が大きく剛性低下した W3-2 の方が W3-1 より小さくなったものの、負担せん断力が倍増したことを加味すると十分なエネルギー吸収性能を発揮した。縦筋量を W3-2 の約 1.5 倍にした W4-2 では、W3-2 と同程度のひび割れ損傷が発生し、一部の縦筋のひずみ度が僅かに降伏ひずみ度を超過したため、方立て壁は曲げ降伏したものの、W3-2 と同様にせん断力約 200kN を発揮した。両者の等価粘性減衰定数の差異は少なく、方立て壁の脚部に生じる塑性ヒンジの回転角の増加が制振壁のエネルギー吸収性能へ与える影響は、本実験の範囲では少ないことが把握できた。

以上、せん断力 100kN, 200kN を発揮可能な軽量 PCaRC 制振方立て壁に必要とされる方立て壁、摩擦ダンパーの仕様、及びそのエネルギー吸収性能(等価粘性減衰定数)を把握することが出来た。また、取替の必要性を判断するための方立て壁に生じるひび割れ損傷の多寡に関する実験資料も併せて収集した。

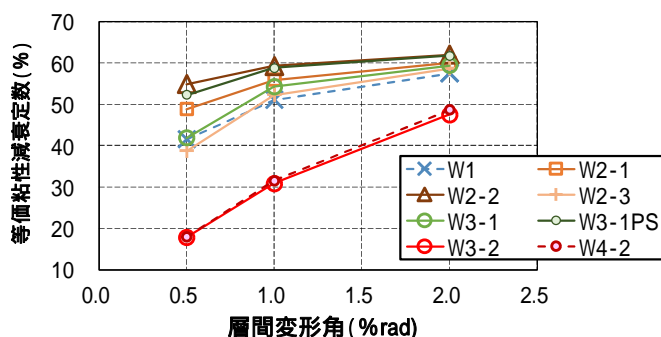
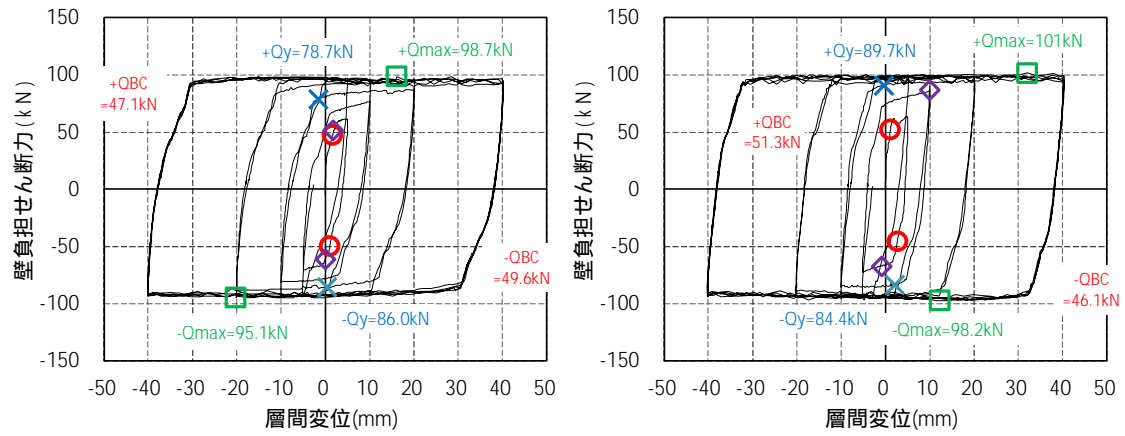
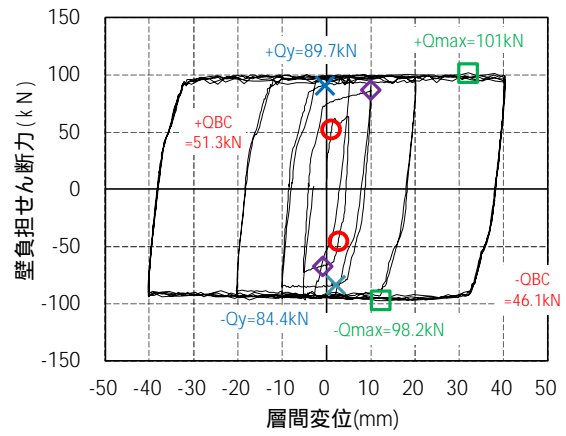


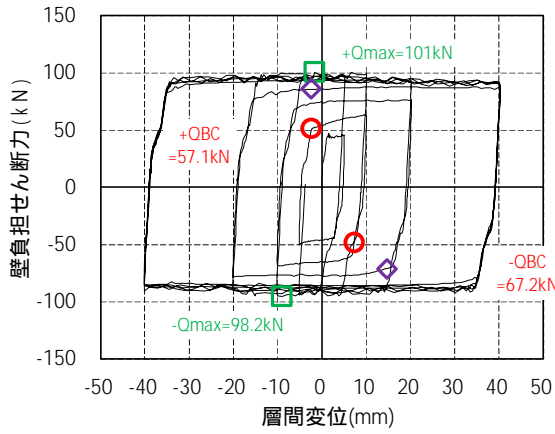
図 2 等価粘性減衰定数の推移



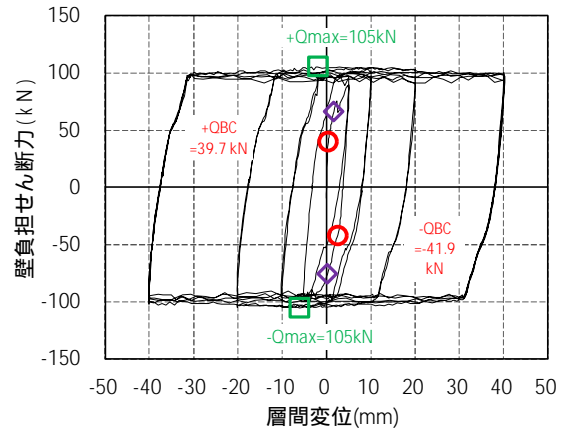
(a)W1



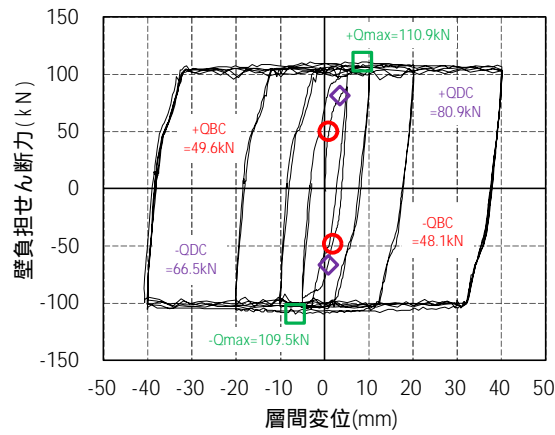
(b)W2-1



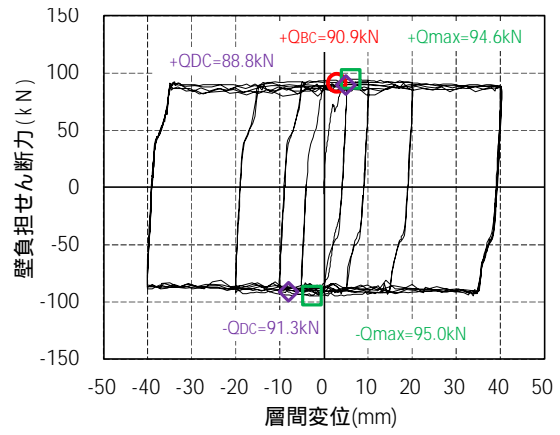
(c)W2-2



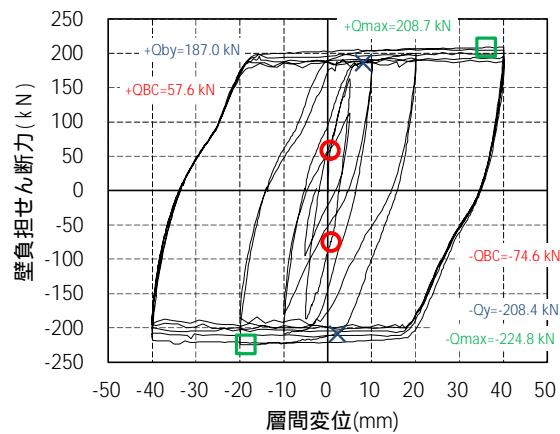
(d)W2-3



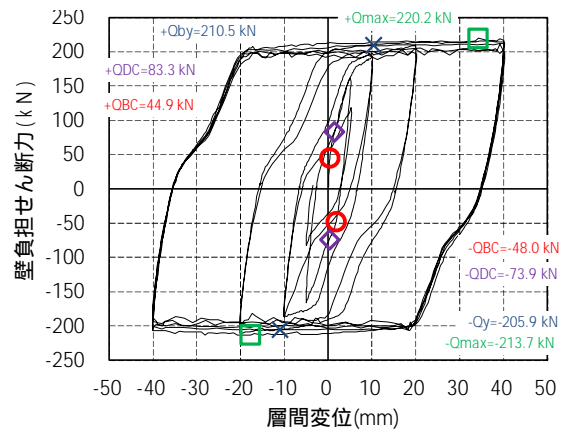
(e)W3-1



(f)W3-1PS



(g)W3-2



(h)W4-2

図3 壁負担せん断力と層間変位の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 吉岡智和, 太田智大	4. 巻 Vol.41, No.2
2. 論文標題 取替可能な軽量PCaRC制振方立て壁の地震時挙動	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 883-888
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 志水亮介, 太田智大, 吉岡智和	4. 巻 Vol.42
2. 論文標題 縦筋引張降伏の有無が軽量PCaRC制振方立壁の地震時挙動に与える影響	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 内田弥能, 志水亮介, 太田智大, 吉岡智和	4. 巻 Vol.42
2. 論文標題 プレストレス軽量PCaRC制振方立壁の地震時挙動	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 二島冬太, 吉岡智和
2. 発表標題 軽量PCaRC 制振方立て壁の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡智和, 錦戸ほのか
2. 発表標題 軽量PCaRC制振方立て壁の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志水亮介, 太田匠, 吉岡智和
2. 発表標題 後付け・取替えを前提とした軽量PCaRC制振方立壁の開発 その1 偏在する縦筋が損傷・破壊性状に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田匠, 志水亮介, 吉岡智和
2. 発表標題 後付け・取替えを前提とした軽量PCaRC 制振方立壁の開発 その2 縦筋引張降伏の有無が方立て壁の最終破壊形式に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田智大, 吉岡智和
2. 発表標題 後付け・取替えを前提とした軽量PCaRC制震方立て壁の開発 その3 3次元非線形有限要素法解析を用いた地震時挙動評価
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志水亮介, 太田匠, 吉岡智和
2. 発表標題 損傷時の取替えを前提とした軽量PCaRC制振方立壁に関する研究 その1 偏在する縦筋が損傷・破壊性状に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田匠, 志水亮介, 吉岡智和
2. 発表標題 損傷時の取替えを前提とした軽量PCaRC制振方立壁に関する研究 その2 縦筋引張降伏の有無が方立て壁の最終破壊形式に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田智大, 吉岡智和
2. 発表標題 損傷時の取替えを前提とした軽量 PCaRC 制振方立壁に関する研究 その3 3次元非線形有限要素法解析を用いた地震時挙動評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田弥能, 川島聖, 志水亮介, 吉岡智和
2. 発表標題 曲げひび割れ発生の抑制を目的としたプレストレスト軽量 PCaRC 制振方立て壁の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 川島聖, 内田弥能, 志水亮介, 吉岡智和
2. 発表標題 せん断力200kN を低下なく発揮可能な軽量 PCaRC 制震方立壁の水平加力実験 その1 実験方法
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 志水亮介, 川島聖, 内田弥能, 吉岡智和
2. 発表標題 せん断力200kN を低下なく発揮可能な軽量 PCaRC 制振方立壁の水平加力実験 その2 実験結果及び考察
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田智大, 志水亮介, 吉岡智和
2. 発表標題 3次元FEM解析を用いた軽量PCaRC制振方立て壁の地震時挙動評価
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
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
---------	---------------------------	-----------------------	----