

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760452

研究課題名(和文)歴史的煉瓦造建築物の耐震補強に資する振動特性調査と振動実験

研究課題名(英文)Vibration Characteristics Investigation and Experiment of Historic Masonry Constructions for Seismic Retrofit

研究代表者

多幾山 法子(Takiyama, Noriko)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：10565534

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)：煉瓦壁の耐震補強と振動特性変化を把握するため、煉瓦壁の振動特性に着目して実在建築物の振動調査や実験を実施した。まず、実在煉瓦建物での振動計測においては、様々な諸元の無補強煉瓦壁の振動特性を把握し、鉄骨外装前後での振動特性変化を把握した。しかし、同一の対象に対して振動特性と力学特性を把握した事例は見当たらないため、煉瓦壁の外観変更の少ない壁体内補強として、目地置換工法とステンレスピン挿入補強法に着目し、同一試験体において補強工程に沿った常時微動計測と曲げ試験を実施した。また、目地置換工法としては、既存のアラミドロッド目地置換工法に加え、新素材のセルロースナノファイバーを用いることを検討した。

研究成果の概要(英文)：We conducted investigation on existing buildings and experiment on specimens to understand the relationship between reinforcement of masonry wall and vibration characteristics. First, microtremor measurements were conducted on real historic masonry walls before and after reinforcement. However, microtremor measurement and bending test are not yet conducted on just same subject. Additionally, recently, there are some advanced materials: such as aramid rods, cellulose nanofiber and so on. The aramid rods have already applied to joint replacement method. So, next, microtremor measurements were conducted on masonry wall specimens at each stage in the construction: inserting stainless pins and joint replacement by aramid rods or cellulose nanofiber as intramural reinforcement: and attached steel frame as extramural reinforcement. Finally, bending tests were conducted on just same subject to clarify the relationship between the change of vibration characteristics and stiffness raising rate.

研究分野：耐震補強・構造実験

キーワード：煉瓦壁 振動調査 固有振動数 固有値解析 曲げ試験 目地置換工法 新素材

1. 研究開始当初の背景

近年、文化の象徴として歴史的煉瓦造建築物を保存・再生しようとする自治体が多い。しかし、この種の建築物の煉瓦壁は無補強であることが一般的であり、その耐震性は低い。巨大地震の発生が高い確率で予測される我国において、耐震性を確保することは歴史的建築物の保存・再生だけでなく人命保護の観点からも極めて重要な課題である。

煉瓦造建築物の耐震補強法には、S造フレームやRC造耐震壁などの耐震要素の増設が多い。また、様々な耐震補強法を模索する研究事例は存在する。しかし、検討に必要な煉瓦壁の構造的特徴が知られておらず、確保できる耐震性が不明確である場合が多い。

一方、歴史的建築物の耐震補強では、文化的価値の保存のために外観などを可能な限り変更しないことが望ましい。しかし、特に国宝や重要文化財では、可逆性を有する補強法に対する要望が高い、等の理由から意匠を全く変更しない補強には限界がある。

また、煉瓦造建築物の耐震補強を行う際には、煉瓦壁の耐力を向上させると共に、地震時に煉瓦壁の固有振動数がどの程度の周期帯域に存在するのか把握することも重要である。既往の研究では、煉瓦壁の面外方向の挙動に着目し、無補強煉瓦壁の面外方向振動特性などを明らかにしてきた。

2. 研究の目的

本研究では、煉瓦壁の振動特性に基づき、意匠性も比較的考慮しやすいS造と耐震壁の増設を利用した補強法に着目して意匠性を考慮した耐震補強計画法の開発を行う。まず、常時微動計測を行い、補強前後の振動特性変化を把握する。また、固有値解析により煉瓦壁の振動特性をシミュレーションする。さらに、補強計画を立案し、補強煉瓦壁の振動実験と要素実験を実施し、補強効果を確認する。

3. 研究の方法

(1) 実建物を対象とした調査

補強前後での空間構成要素の調査

魅力的な再生を目指し、煉瓦造建築物のコンバージョン前後の空間構成要素に着目し、事例の分析を行う。本研究では京都府舞鶴市の赤れんがパークを対象とする。ここでは5棟の耐震改修が完了し、文化施設として利用されている。本研究では主に展示施設として利用されている建物Iと、演劇など多目的に利用される建物IIの比較、分析を行う。

実建物での煉瓦壁の常時微動計測

補強前の建物III、補強後の建物I、IIIにおいて常時微動計測を実施した(図1)。なお、建物Iの補強前計測は実施していないが、平面形状がほぼ等しいため同様の振動性状を示すと仮定する。

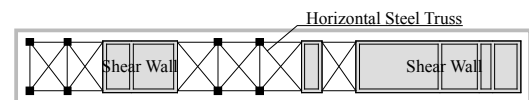
補強材として、煉瓦壁に直交する門型フレームのH型鋼柱、水平トラス、2F床ブレイ

ス等がある。建物IIIは鉄骨のみが用いられ、2F床と小屋組レベルに鉄骨臥梁と水平トラスが設置されている。建物Iは1FのみをRC耐震壁と鉄骨で補強している。鉄骨柱梁を通じて耐震壁に力を伝える構造である。

常時微動計測には水平2成分、鉛直1成分の加速度計を用いる。加速度計は2F床の煉瓦壁際に複数台、1Fに1台設置し、同時計測を実施する。固有振動数は、フーリエスペクトル比(2F床のフーリエスペクトルを1Fで除したもの)のピーク振動数とする。



(a) 建物III



(b) 建物I

図1 対象建物の平面図

固有値解析

建物I、IIIについて、2次元平面骨組モデルを用いた固有値解析を行う。鉄骨柱1本に相当する有効壁長さを定義し(図2(a))、この区間を抜き出した煉瓦壁と鉄骨フレーム、RC耐震壁を組み合わせた1部材1要素で表した解析モデル(図2(b))を作成した。

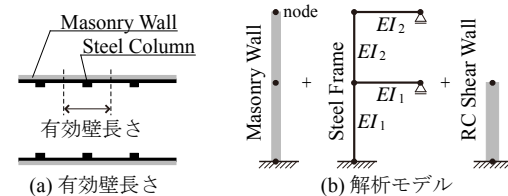


図2 解析モデルの作成

表1 補強繊維としての比較

| 補強用繊維 | CNF | 炭素繊維 | アラミド繊維 | ガラス繊維 |
|------------------------|-----|------|--------|-------|
| 密度(g/cm ³) | 1.5 | 1.82 | 1.45 | 2.55 |
| 弾性率(GPa) | 140 | 230 | 112 | 74 |
| 強度(GPa) | 3 | 3.5 | 3 | 3.4 |
| 熱膨張(ppm/K) | 0.1 | 0 | -5 | 5 |

(2) 柱状壁試験体を用いた各種実験

壁体内補強として目地置換工法とステンレスピン挿入補強法に着目し、振動特性変化と補強効果を確認する。また、目地置換工法に新素材の適用を考える。

新素材:

①アラミドロッド

アラミド繊維を組紐上に編み、エポキシ樹脂を含浸させた連続繊維補強材である。繊維は、引張強度が鋼鉄の5倍程度で、弾性、耐熱、耐摩擦性が高い。アラミドロッドを用いた目地置換工法は実施工で用いられており、補強効果に関する先行研究も存在する。

②セルロースナノファイバー(CNF)

植物の細胞壁の約50%を占める植物の繊

維をナノレベルまで細かく解すことで得られる植物由来の材料であり、表1に示すように、優れた特性をもつ素材である。

表2 試験体一覧

| 試験体名称 | 補強方法 | 備考 |
|--------------|-------------|------|
| W-N | 無補強 | — |
| W-ST1, W-ST2 | ステンレスピン挿入補強 | 片面打ち |
| W-AR1 | アラミドロッド | 従来手法 |
| W-AR2 | 目地置換工法 | 変更手法 |
| W-CNF | CNF目地置換工法 | — |

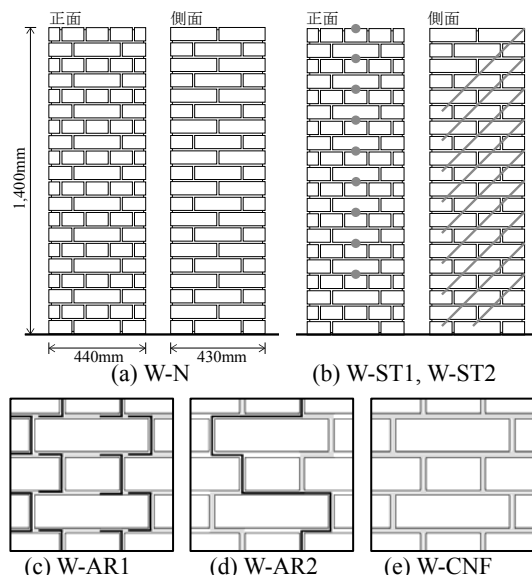


図3 試験体詳細



(a) 縦目地用 (b) 横目地用 (c) CNF
写真1 新素材

試験体：

普通煉瓦を用いたイギリス積で幅 440mm、壁厚 430mm、高さ 1,400mm とし、柱状の壁試験体とする(表2, 図3)。目地モルタルは砂の重量比を大きく(水:セメント:石灰:砂=1:1:1:4.5)して曲げ引張強度を低減する。

①W-ST1, W-ST2 (ステンレスピン挿入補強試験体)：目地部から斜め下向き 45 度にステンレスピンを挿入する補強方法である。本実験では壁の片面からのみ補強する。

②W-AR1 (既往のアラミドロッド目地置換工法)：目地モルタルを約 50mm 切削し、縦目地用コの字ロッド(写真1(a))と横目地用直線状ロッド(写真1(b))を配し、モルタルを再充填する方法である(図4)。先行研究の鉛直曲げ試験では、コの字状のロッドが開くため、補強効果は十分とは言えない。

③W-AR2 (変更アラミドロッド目地置換工法)：従来のアラミドロッド目地置換工法の

ロッドの配置を変更する。直線状ロッドを折り曲げて、目地に沿わせて配する(図5)。

④W-CNF (セルロースナノファイバー目地置換工法)：目地モルタルを切削し、CNF を含有するモルタルを再充填する。本実験では 1%水溶液を用いる(写真1(c))。モルタルと CNF を混合すると、降伏値や揺変性が増加することを示した先行研究が存在する。

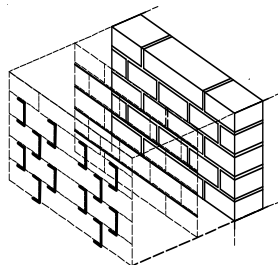


図4 従来型アラミドロッド目地置換工法

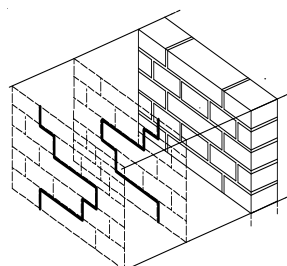


図5 変更アラミドロッド目地置換工法

実験方法：

①常時微動計測

壁補強工程に沿って、常時微動計測を実施し、補強前後での固有振動数の変化を把握する(図6)。更に、鉄骨フレームも増設した場合の固有振動数の変化を把握する。常時微動計測には水平2成分、鉛直1成分の速度計を用い、壁上と地盤の計測点で同時計測を行う。

②壁の曲げ試験

3点曲げ試験を行い、壁体内補強の有無による破壊性状や剛性の変化を把握する。

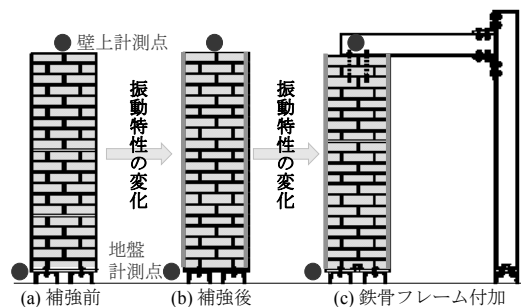


図6 常時微動計測の手順

4. 研究成果

(1) 実建物の調査や振動計測

補強前後での空間構成要素の調査

①平面構成の変化

建物IはRC耐震壁が用いられ、鉄骨フレームでも補強されている。柱のみの空間にRCのキューブが挿入されることで、展示空間と回遊動線が生まれている(写真2)。

建物IIは多目的スペースとして利用するため、鉄骨による補強と、仮設的な木造キューブによって空間が構成される(写真3)。

両棟において、規模や改修後の用途や改修方法が異なるが、主な耐震構造要素は鉄骨フレームであるという点が共通している。

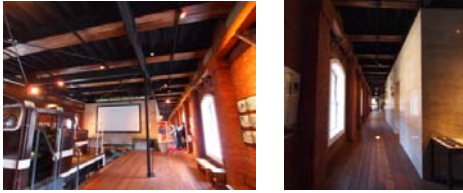


写真2 建物Iの内観

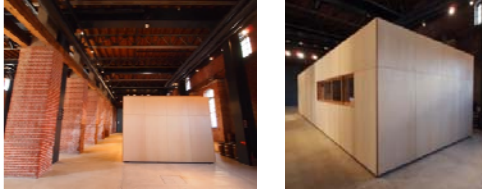


写真3 建物IIの内観

②視覚的变化

両棟は単純な長方形平面で、視界を遮る壁がないため、建物内部のどの場所からも、既存と新規の部材が同時に視界に入る。

③空間構成要素の変化

改修前の空間構成要素は2棟とも同様であったが、改修後は、耐震補強や用途変更のため、既存の要素に新たな要素が付加され、煉瓦、鉄骨、RC、木材と多様な材料が用いられている(表3)。改修前後の要素が混在し、コンバージョン特有の空間が生まれている。

また、同様の素材であっても、既存と改修後とで年代の違いが表現されている。例えば、鉄骨梁については、既存は銀色、耐震用は黒色と異なる表現がなされている(写真4)。

表3 改修後の要素における構造と表層

| | 改修前 | 建物I 改修後 | 建物II 改修後 |
|---|-----|------------|----------|
| 柱 | 煉瓦造 | 煉瓦造 | 煉瓦造 |
| | | 鉄骨造(耐震) | 鉄骨造(耐震) |
| 梁 | 鉄骨造 | 鉄骨造 | 鉄骨造 |
| | 木造 | 木造 | 木造 |
| | | 鉄骨造(耐震) | 鉄骨造(耐震) |
| 壁 | 煉瓦造 | 煉瓦造 | 煉瓦造 |
| | | RC造(耐震・用途) | 木造(用途) |

④付加された要素の構造と表層の関係

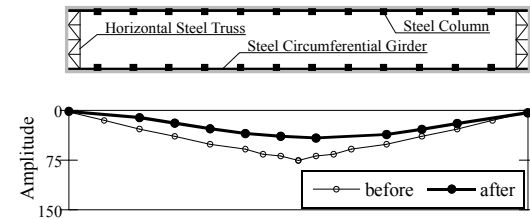
改修後に付加された柱、梁、壁の構造と表層の関係に注目して比較した。天井がないため、鉄骨柱梁はそのまま空間に現れている。建物IのRC壁は打ち放しであり、建物IIの木の壁は仕上げがなされておらず、構造材料が化粧を施すことなく空間に現れている。



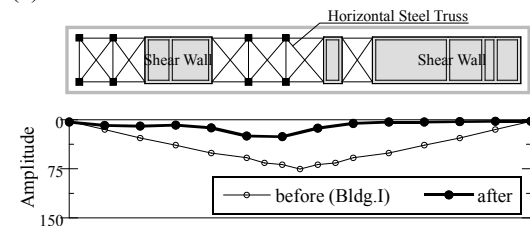
写真4 鉄骨梁

実建物での煉瓦壁の常時微動計測

建物IIIでは各ピーク振動数が平行移動するように上昇し、建物Iではピーク数が減少した(図8)。各次固有振動数は1~2Hz上昇し、増加率は約1.1~1.9倍であった(図9)。また、建物IIIでは1次振動モード形状に顕著な変化は見られないが、振幅は抑えられた(図7)。建物Iでは耐震壁の位置で振幅が大きく抑えられた。

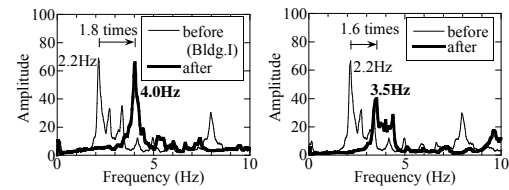


(a) 建物III



(b) 建物I

図7 振動モード形状の変化



(a) 建物III

(b) 建物I

図8 フーリエスペクトル比

固有値解析

建物IIIでは1次固有振動数 f_1^* が調査結果より高めであるが、固有振動数の増加率 f_1^*/f_1 は1.6倍で実測値に等しい(表4)。また、鉄骨柱の断面2次モーメント I をパラメタとし、建物I, IIIの1, 2F柱梁にそれぞれ $I, I/10$ を与えた場合の固有振動数の増加率を図10(a)に示す。1F断面2次モーメントの増加に従い、固有振動数も増加するが、2Fの補強量によって異なる。建物Iでは調査結果より低めに評価されたが、RC壁厚の増加とともに固有振動数は上昇し、一定値に漸近する(図10(b))。

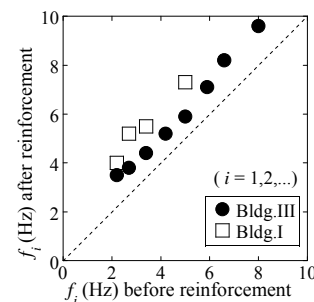
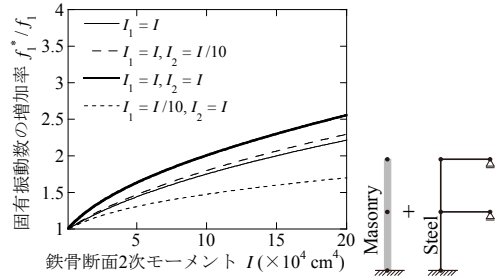


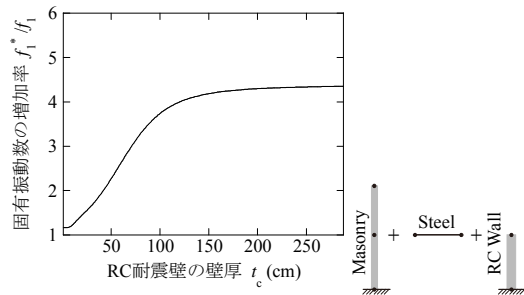
図9 補強前後の固有振動数

表 4 固有値解析の結果

| 建物 | 固有振動数 (Hz) | | | 実測による f_1^*/f_1 |
|----|------------|-----------|-------------|----------------------|
| | 補強前 f_1 | 後 f_1^* | f_1^*/f_1 | |
| I | 2.5 | 4.0 | 1.6 | 1.6 |
| II | | 3.6 | 1.4 | 1.8 |



(a) 建物 III



(b) 建物 I

図 10 補強量と 1 次固有振動数の変化

(2) 新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化を把握するための各種実験

壁の曲げ試験

試験概要を図 11 に、加力の様子を写真 5 に示す。また、実験結果表 1 と写真 2 に示す。支点間距離 $L=880[\text{mm}]$ とし、面外方向が垂直になるよう横伏した柱状壁試験体の中央を加力する。試験体には自重と加力の両方に依る曲げモーメントが生じる。

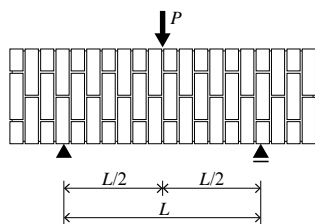


図 11 3 点曲げ試験方法



写真 5 試験の様子

①破壊性状

W-N は、中央より 1 つ隣の目地にて煉瓦と目地モルタルの界面の剥離により破壊した。W-ST1, W-ST2 は加力方向依存性を考慮するため、W-ST1 は挿入面、W-ST2 は裏面を上

面にして加力した。W-ST1 は中央より 1 つ隣の目地、W-ST2 は中央目地で破壊した。

W-AR1, W-AR2 は中央目地で破壊した。W-AR1 では縦目地用と横目地用ロッドのどちらも破壊面を通過していない (写真 6(a))。W-AR2 では、折り曲げたロッド端部が徐々に抜け出した (写真 6(b))。

W-CNF では、破壊目地の両界面で煉瓦と剥離した。

②力学特性

W-N は荷重 33.15kN で急激に荷重が低下した。W-CNF も荷重 47.05kN で荷重が低下した。

W-ST1 は 43.95kN, W-ST2 は 53.50kN で目地破壊して急激に荷重が低下したが、W-ST2 ではステンレスピンによって靱性を発揮した。

W-AR1 と W-AR2 の最大荷重は 43.75kN, 43.80kN であった。

③曲げ剛性の比較

荷重-変位関係から初期勾配を読み取り、曲げ剛性を概算した (表 5)。W-CNF が最も高く、他の試験体は約半分を示しており、概ね近い値を示している。

④目地引張強度の比較

試験体重量と曲げ試験で得られた最大荷重を用いて目地引張強度を求めた (表 5)。W-CNF は目地引張強度が高いと予想されたが、全試験体で特筆すべき差異が見られない。

表 5 試験結果まとめ

| 試験体 | 重量 | 最大荷重 | 初期勾配 | 曲げ剛性 | 引張強度 |
|-------|-------|-------|---------|------------------------------------|----------------------|
| | [kN] | [kN] | [kN/mm] | $\times 10^9$ [kNmm ²] | [N/mm ²] |
| W-N | 5.039 | 33.15 | 153.33 | 2.1769 | 0.468 |
| W-ST1 | 4.985 | 43.95 | 148.30 | 2.1055 | 0.616 |
| W-ST2 | 5.044 | 53.50 | 179.86* | 2.5535* | 0.885 |
| W-AR1 | 4.985 | 43.75 | 180.02 | 2.5558 | 0.726 |
| W-AR2 | 4.970 | 43.80 | 222.86 | 3.1640 | 0.727 |
| W-CNF | 4.970 | 47.05 | 406.29 | 5.7682 | 0.658 |



(a) W-AR1 : ロッド (b) W-AR2 : ロッド引抜
写真 6 代表的な損傷



(a) 鉄骨付加前 (b) 鉄骨付加後
写真 7 常時微動計測の様子

常時微動計測

補強工程に沿って常時微動計測を複数回実施し、固有振動数の変化を把握した。

1 回目は煉瓦積後に、2 回目は壁体内補強後に、3 回目は鉄骨付加直前に (写真 7(a))、

4 回目は鉄骨付加後に実施した（写真 7(b)）。2,3 回目は補強に差異はないが、作業時に壁下端が損傷したため、再度計測を実施した。

表 6 面外方向の 1 次固有振動数の変化

| 試験体 | 1 次固有振動数 f_1 [Hz] | | | | f_1 増加率 | |
|-------|---------------------|---------------|-------------|-------------|-----------|---------|
| | 煉瓦積後 1st | 壁体内補強後 2nd | 鉄骨付加 3rd | 鉄骨付加 4th | 2nd / 1st | 4th/3rd |
| W-N | 23.4 | 23.4 | 23.8 | 24.5 | 1 | 1.03 |
| W-ST1 | 27.0 | 26.6 | 23.3 | 25.8 | 0.99 | 1.11 |
| W-ST2 | 13.9 | 14.3 | 19.4 | 22.7 | 1.03 | 1.17 |
| W-AR1 | 25.2 | 25.9 | 16.8 | 18.0 | 1.03 | 1.07 |
| W-AR2 | 25.1 | 27.4 | 7.4 | 15.3 | 1.09 | 2.07 |
| W-CNF | 23.6 | 23.8 | 6.5 | 13.7 | 1.01 | 2.11 |

表 7 固有値解析結果

| 試験体 | 1 次固有振動数 f_1 [Hz] | | | f_1 増加率 | |
|-------|---------------------|-------------------|-------------|-----------|---------|
| | 煉瓦積後 1st | 壁体内補強後 2nd=3rd | 鉄骨付加 4th | 2nd / 1st | 4th/3rd |
| W-N | 17.5 | — | 22.7 | — | — |
| W-ST1 | | 19.1 | 23.8 | 1.09 | 1.25 |
| W-ST2 | | | | | |
| W-AR1 | | 22.4 | 26.0 | 1.28 | 1.16 |
| W-AR2 | | | | | |
| W-CNF | | 24.9 | 27.7 | 1.42 | 1.11 |

① 1 次固有振動数

壁上部のフーリエスペクトルを床上の計測値で除した値をフーリエスペクトル比とする。なお、1,2 回目の計測結果は 1 次固有振動数の位置に実線を引いて示す。また、1 次固有振動数と増加率を表 6 にまとめる。

W-N は鉄骨付加前後で固有振動数が若干上昇した。また、W-CNF は鉄骨付加後の固有振動数の増加率が著しく高い。

W-ST1, W-ST2 は設置方向に依存しないが、1 次固有振動数が大きく異なった。しかし、補強に依る固有振動数の増加率は近い。

W-AR1 より W-AR2 の固有振動数増加率が高い。鉄骨付加後の増加率が約 2 倍である。

② 曲げ剛性と 1 次固有振動数の変化

曲げ試験で得られた曲げ剛性の W-N との比は W-CNF が最も大きい。剛性の 2 乗が固有振動数と比例関係にあり、先行研究において剛性の増加に従って固有振動数が上昇すること解析的に示されている。W-CNF は大きく外れているが、他の試験体では 1 次固有振動数増加率と曲げ剛性の比が概ね対応する。

固有値解析

解析モデルは煉瓦壁や鉄骨フレームを線材置換して構築する。目地置換補強材は壁両側面に断面を持つサンドイッチ断面部材とする。ステンレスピン挿入補強の場合は、目地破壊した断面をピンが通過する位置で鉛直方向に連続した線材部材として置換する。

補強材を追加していく実験の工程を模して解析する。ただし、材料特性値は単位体積重量として $3.3 \times 10^2 \text{ kN/cm}^3$ 、ヤング係数として $4.09 \times 10^2 \text{ kN/cm}^2$ を与える。

解析結果と計測結果は異なるが、固有振動数の上昇傾向は確認できた（表 7）。しかし、解析値をみると、壁体内補強を施す前後での

固有振動数の増加率は実験結果より高く、鉄骨を付加する前後での増加率は高くない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）全文査読論文

- ① 南部恭広, 多幾山法子, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物の耐震補強前後における煉瓦壁の面外方向振動特性変化, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 41 号, pp.165-168 2013.2.

〔学会発表〕（計 7 件）

査読無し論文

- ① 井立直人, 原光平, 松野淑, 多幾山法子: 新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 1) 新素材を用いた補強方法の提案と実験概要, 日本建築学会大会 (関東), 2015 (2015/9/5 発表予定, 東海大学)

- ② 原光平, 松野淑, 井立直人, 多幾山法子: 新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 2) 曲げ試験結果, 日本建築学会大会 (関東), 2015 (2015/9/5 発表予定, 東海大学)

- ③ 松野淑, 井立直人, 原光平, 多幾山法子: 新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 3) 常時微動計測と固有値解析, 日本建築学会大会 (関東), 2015 (2015/9/5 発表予定, 東海大学)

- ④ 熊谷雄, 多幾山法子, 小林克弘: 歴史的煉瓦造建築物のコンバージョン前後における内部空間構成要素の変化—舞鶴赤れんがパークを対象として—, 日本建築学会大会 (近畿), 建築歴史・意匠, pp.205-206, 2014.9. (2014/9/12 発表, 大阪大学)

- ⑤ N. Takiyama, Y. Nambu and Y. Hayashi: Analytical Study on Out-of-plane Vibration Characteristics of Reinforced Masonry Walls, *Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, Macedonia, May, 2013. (2013/5/31 発表)

- ⑥ 多幾山法子, 南部恭広, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物の耐震補強が煉瓦壁の面外方向振動特性に与える影響, 第 31 回日本自然災害学会学術講演会, pp.19-20, 2012.9. (2012/9/18 発表)

全文査読論文

- ⑦ N. Takiyama, F. Matsuno, T. Kumagai, N. Idate, K. Hara and K. Kobayashi: Convension of Historic Masonry Constructions and Structural Characteristics of Walls by Intramural Reinforcement, REHAB2015, Porto, Portugal, July, 2015. (掲載決定, 2015/7/22-24 発表予定)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕ホームページ等（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多幾山 法子 (Noriko TAKIYAMA)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号: 10565534