

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760417

研究課題名（和文） 歴史的煉瓦造建築物の意匠性と施工性を考慮した鋼板耐震補強法の開発

研究課題名（英文） Development of reinforced method of historic masonry buildings by steel in consideration for design and workability

研究代表者

多幾山 法子（TAKIYAMA NORIKO）

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10565534

研究成果の概要（和文）：歴史的煉瓦造建築物の意匠性と施工性を重視した耐震補強法の確立へ向け、振動調査と解析を行った。鉄骨フレームや RC 壁で補強した建物を対象として補強前後で振動計測を実施し、煉瓦壁の固有振動数や振動モード形状、減衰定数の変化を把握した。また、補強前の調査建物を対象として固有値解析を行い調査結果の比較・検証をすると共に、厚板理論を参考に、壁の諸寸法に基づく煉瓦壁の面外方向 1 次固有振動数の略推定式を提案した。

研究成果の概要（英文）：I carry out vibration survey and analysis of historic masonry buildings forward construction of reinforced methods in consideration for design and workability. Microtremor measurements conducted for masonry buildings before and after reinforcement used by steel frame and/or RC shear walls. So we understand the change of out-of-plane natural frequencies, vibration mode and damping factor. Under unreinforced walls, I conduct mode analysis and proposal of estimation formula of 1<sup>st</sup> natural frequency based on thick plate theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：耐震設計，耐震補強

## 1. 研究開始当初の背景

我国には、伝統的な煉瓦造建築物が多く存在する。それらの建物は明治期から大正期にかけて建築されたものが多く、築 100 年以上の建物も少なくない。煉瓦造として登録された建築物は国宝・重要文化財、登録有形文化財を含めて全国各地に分布している。近年では、地域の歴史や文化の象徴としてこれらの歴史的建築物を保存・再生しようとする自治

体や団体も多いが、この種の建築物の煉瓦壁は一般的に無補強であり、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、耐震性の確保は歴史的煉瓦造建築物の保存・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。

近年では、歴史的煉瓦造建築物の保存・再生へ向けて耐震補強や免震化などの対策が行われている。特に、補強効果が高く経済的

なS造フレームやRC造耐震壁などの耐震要素の増設が採用される例が多い。しかし、上述のような耐震改修事例は存在するものの、実際に確保できる耐震性が不明確であり、評価法が未確立である場合が多い。また、様々な耐震補強法を模索する研究事例は存在するが、耐震補強を行うにあたり、必要な煉瓦壁の構造的特徴が知られていない。

一方で、国宝や重要文化財などの歴史的建築物の耐震補強では、文化的価値の保存が最優先事項であるため、外観などを可能な限り変更しないことに対する要望が極めて高い。

上述の現状を踏まえれば、過度な補強や耐力不足を効率的に回避でき、かつ、安定した補強効果が得られる耐震補強の計画手法が必要である。また、その補強効果や安全性を簡便かつ的確に評価する手法を確立できれば、国宝や重要文化財を含めた歴史的煉瓦造建築物の耐震診断に一役買うことができ、耐震改修促進に繋がることが期待される。

## 2. 研究の目的

煉瓦造建築物の耐震補強時には、煉瓦壁の耐力向上と共に、地震時に固有振動数などの程度の周期帯域に存在するの把握することも重要である。また、過去の地震において、煉瓦壁の面外崩壊事例が多いことより、煉瓦壁の面外挙動に着目する昼用がある。

煉瓦壁の振動特性に着目した一連の検討を行う。実在歴史的煉瓦造建築物の補強前後の煉瓦壁を対象とした常時微動計測を実施し、固有振動数や振動モード形状、減衰定数の変化を把握する。また、調査に基づく固有値解析を行い、モデル化の検討や調査結果との比較・検証を行う。最後に、薄板理論に基づく1次固有振動数の推定式を提案する。

## 3. 研究の方法

7棟の煉瓦造建築物を対象として常時微動計測を実施した(表1)。建物IV-VIIの補強方法を図1に、煉瓦壁詳細を表2に示す。

常時微動計測方法を示す。水平2成分・鉛直1成分の加速度計を用いる。加速度計は、壁頂部または2F床に設置し、煉瓦壁の固有振動数と減衰定数を同定する(図2)。また、加速度計を複数台用いた同時計測を行い、水平・鉛直方向の振動モード形状を把握する。

表1 調査建物概要

建物	建築年代	階数	建築面積[m <sup>2</sup> ]	2F床構造	計測
I	明治期	2	884	木造	補強前
II	明治期	1	3,015	—	前
III	明治期	2	6,099	木造	前
IV	大正期	2	1,266	木造・鉄骨	前後
V	明治期	2	747	木造	前後
VI	明治期	2	816	木造	後
VII	明治期	2	756	木造・鉄骨	後

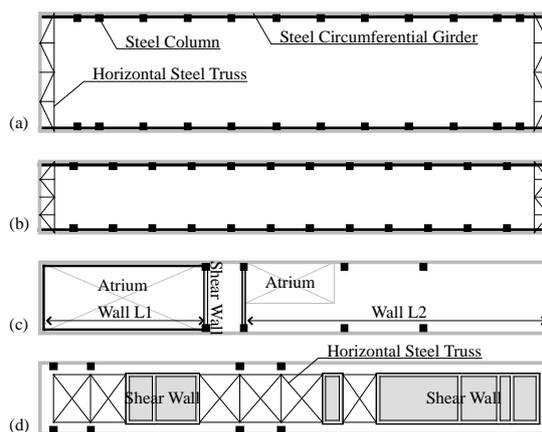


図1 補強方法 (a)-(d):建物IV-VII

表2 長方形平面建物の煉瓦壁の詳細

建物	壁	壁長さ L [m]	壁高さ H [m]			壁厚 T [m]	
			1F	2F	合計	1F	2F
IV	A	71.6	7.4	3.1	10.5	0.47	0.36
	B	17.7	7.4	3.1	10.5	0.47	0.36
V	A	72.2	4.6	2.7	7.3	0.57	0.47
	B	10.3	4.6	2.7	7.3	0.57	0.47
VI	A	72.2	4.4	2.9	7.3	0.56	0.46
VII	A	72.3	4.6	2.6	7.2	0.56	0.46



図2 計測の様子

## 4. 研究成果

### (1) 常時微動計測結果

#### ① 補強前の固有振動数と振動モード形状

常時微動計測の結果を表3、図3に示す。なお、フーリエスペクトル比は、壁頂部または2F床での計測値を1F床での計測値で除したものである。固有振動数 $f$ は複数見られる場合もあるが、1次固有振動数を $f_1$ と表す。

図3に建物V壁Aの常時微動計測結果を示す。図3(a)に建物I壁Aの計測点配置を示す。壁沿いの2F床に加速度計7台を配置し、1台は1F床上の計測点①に設置する。図3(b)に示す面外方向のフーリエスペクトル比より、2.2Hz~8.0Hzまでに卓越がいくつか見られる。確認できた5つの固有振動数での面外方向の振動モード形状を図3(c)に示す。なお、壁半分のみ描いているが、ほぼ対称または逆対照モードであることを確認している。これより、壁端は完全固定に近いことがわかる。また、2F床と壁頂部の小屋組での同時計測も

行っており、2.2Hz と 8.0Hz における壁の鉛直断面における振動モード形状を図 3(d)に示す。なお、図 3(a)に示した a, b, c の位置での計測結果を示している。2.2Hz では 2 階床と壁頂部で同位相となったが、8.0Hz では逆位相であった。

表 3 常時微動計測結果

建物	壁	補強前 (1次)		補強後 (1次)	
		$f_1$ [Hz]	$h_1$ [%]	$f_1$ [Hz]	$h_1$ [%]
IV	A	1.8	0.9	2.8	1.0
	B	4.0	1.1	4.0	-
V	A	2.2	1.3	3.5	1.4
	B	5.9	1.4	8.8	-
VI	A	-	-	[L1] 4.1, [L2] 3.6	1.2
VII	A	-	-	4.0	0.9

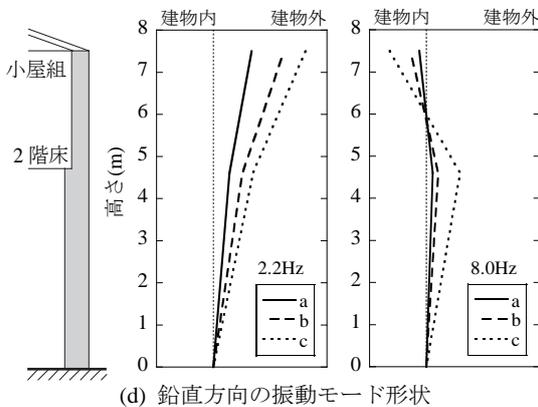
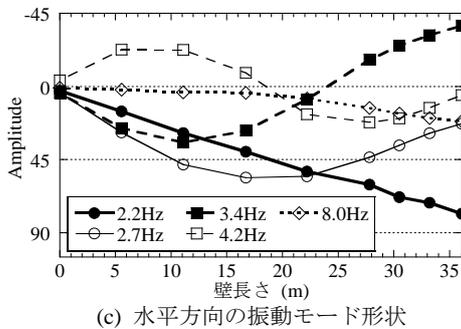
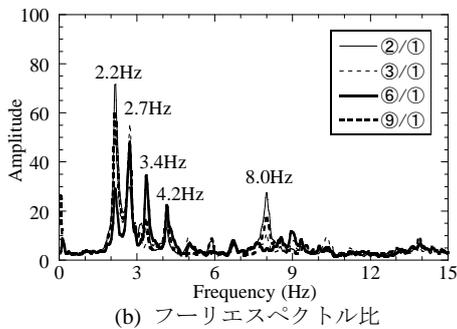
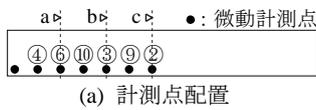


図 3 建物 V 壁 A の常時微動計測結果

② 補強後の固有振動数と振動モード形状

建物 IV, V は鉄骨フレームが増設され、建物 VI は RC 壁と鉄骨柱の増設、建物 VII は鉄骨フレームと水平ブレース、RC 耐震壁が増設されている (図 1)。

補強後の建物 IV-VII で実施した常時微動計測結果を図 4 に示す。建物 IV のフーリエスペクトル比の変化を図 4(a)に示す。1 次固有振動数は 1.6 倍上昇し、各ピーク振動数が平行移動するように上昇する傾向が見られた。また、建物 V-VII の振動モード形状の変化を図 4(b)-(d)に示す。なお、建物 VI, VII は建物 V と酷似した平面を持つ建物であるため、建物 V の無補強時のデータと比較する。また、最大振幅で基準化した値を用いている。建物 V の振動モード形状を見ると、形状に変化は見られない。建物 VI の RC 直交壁で壁を分けてモード形状をみると、壁 L2 では直交壁の位置で振幅が小さく抑えられていることがわかる。建物 VII では、鉄骨フレームより RC 耐震壁が配置されている箇所面で外方向への振幅が抑えられていることがわかる。

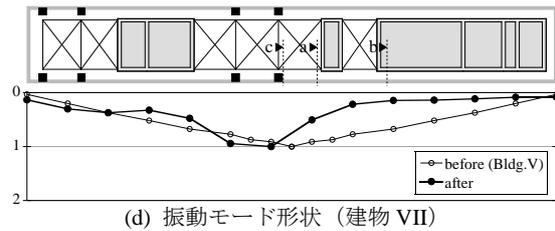
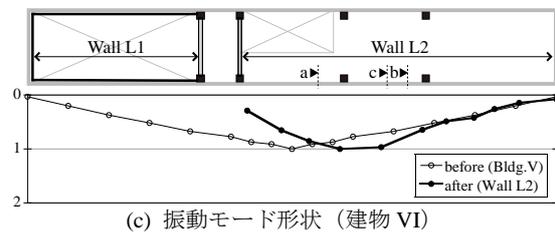
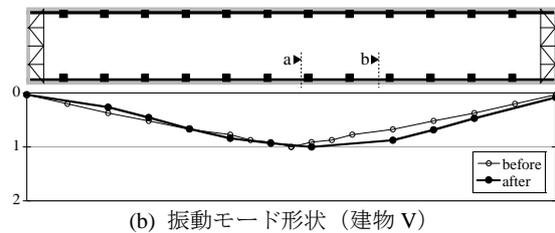
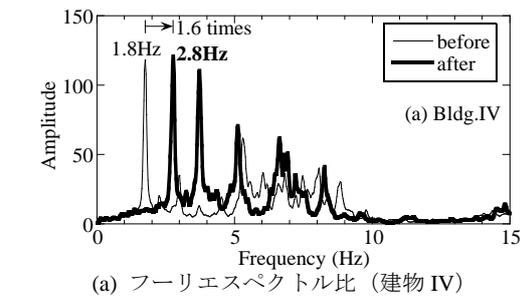


図 4 補強による  $f$  と振動モード形状の変化

### ③ 補強前後での減衰定数の変化

RD法を用い、明瞭な卓越が確認できた周波数領域のみをフィルタにより抜き出し、減衰定数を同定する。

1次固有振動数 $f_1$ に対応する減衰定数 $h_1$ を同定し、表3に示す。また、補強建物IV-VIIについて、補強前後での1次の減衰定数を比較した物を図5(a)に示す。補強前後での減衰定数に変化は見られない。無補強建物I-Vと補強建物IV-VIIについて、1次固有振動数 $f_1$ と減衰定数 $h_1$ の関係を図5(b)に示す。なお、無補強時の回帰式も実線で併せて示しており、 $R$ は相関係数である。補強の有無に関わらず、減衰定数は1~4%あたりに分布していることがわかる。

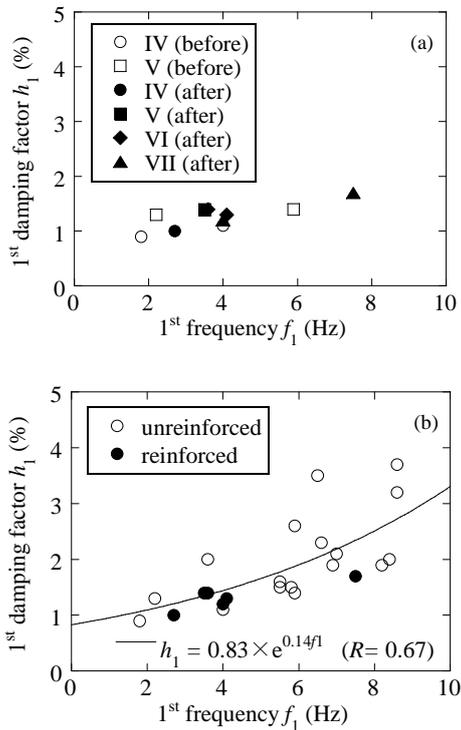


図5 1次固有振動数と減衰定数

### (2) 無補強煉瓦壁に対する固有値解析

調査を行った煉瓦壁に基づいて作成した解析モデルを用いて固有値解析を行い、振動性状を把握する。

#### ① 材料特性値と解析モデル概要

煉瓦壁は厚肉シェル要素としてモデル化する。等方性材料とし、建物IIにおいて実施された既往の材料試験結果に基づき、弾性係数 $E=4.09 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 、密度 $\rho=1,760 \text{kg/m}^3$ とする。ポアソン比 $\nu$ はコンクリートの規準値を参考に0.17とする。

建物Vの壁寸法と平面形状を参考に、口の字型平面の解析モデルを作成し、図6に示す。メッシュ分割サイズは0.5mとする。なお、諸寸法はシェル要素のメッシュに合わせて

おり、実際建物とは一部の寸法が異なる。壁厚は平均値で一様化せず、屋根重量や開口は反映しない。

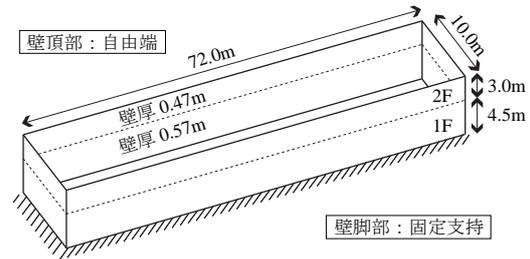


図6 口の字型モデルの概要 (建物V)

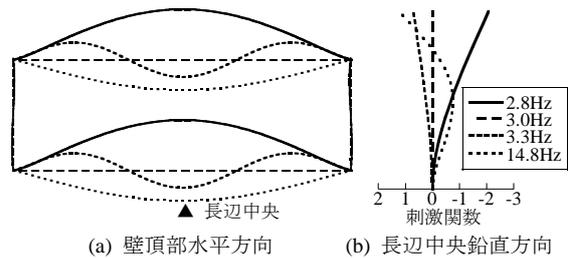


図7 長辺面外入力に対する刺激関数

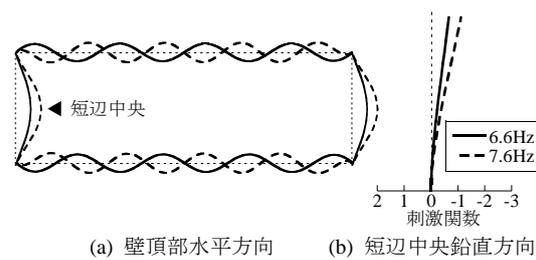


図8 短辺面外入力に対する刺激関数

### ② 解析結果

口の字型モデルの長辺面外方向に入力した際の、面外方向の刺激関数を図7に示す。図7(a)には壁頂部における平面内の刺激関数を示しているが、複数の振動モード形状が確認でき、建物V壁Aの振動計測によって得られた振動モード形状を概ね再現できていることがわかる。ただし、逆対称な振動モードである3.0Hz時のモードは刺激関数が概ね0と小さくなっている。また、図7(b)の長辺中央の高さ方向の振動モードについても概ね再現できている。

短辺面外方向入力の際の面外方向の刺激関数を図8に示す。短辺では近接する固有振動数6.6Hz、7.6Hzで刺激関数が大きくなり、2つのモード形状は長さ・高さ両方向において類似している。また、1次より2次の方が短辺中央での刺激関数が大きいこともわかる。これは、実測においても確認された現象である。短辺と長辺で連成しており、2つの固有振動数で長辺のモード形状は類似している。

(3) 無補強煉瓦壁の1次固有振動数推定式

煉瓦壁の固有振動数を簡易に推定することを目的として、面外方向振動における固有振動数の略算定式を提案する。

① 固有振動数の略算式の提案

煉瓦壁は高さや長さ比べて厚さが十分に小さい板であるとし、薄板理論に基づく簡易算定式を提示する。

煉瓦壁をモデル化するにあたり、2種類の境界条件を想定する。下辺固定・左右両辺単純支持・上辺自由支持である条件(支持条件A, 図9(a)), 下辺と左右両辺が単純支持, 上辺が自由支持である条件(支持条件B, 図9(b))である。調査結果より、煉瓦壁の左右端は半固定状態であると考えられることから、支持条件A, Bより算定される固有振動数の間に求める固有振動数があると考えられる。

板は等質等方性で密度が $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)の弾性体と仮定する。煉瓦壁寸法として、高さ $H$ (m), 長さ $L$ (m), 厚さ $T$ (m)を与える。また、ヤング係数を $E$ (N/m<sup>2</sup>), ポアソン比を $\nu$ とし、 $\nu$ はコンクリートの基準値0.17と仮定する。

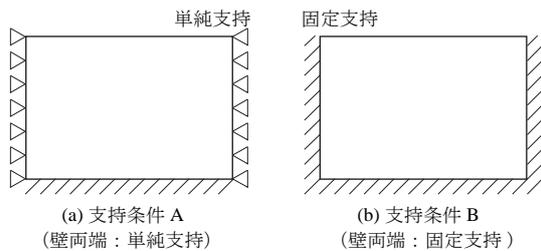


図9 平板のモデル化

既往の研究より、平板の固有振動数算定式は次式で与えられる。

$$f = \frac{\pi}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{\lambda T}{H^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

各条件に対する $\lambda$ は次のように与えられる。  
[支持条件A]

$$\lambda = \sqrt{0.127 + \left(\frac{H}{L}\right)^4 + 2\left(\frac{H}{L}\right)^2 [-0.087\nu + 0.471(1-\nu)]}$$

[支持条件B]

$$\lambda = \sqrt{0.127 + 5.14\left(\frac{H}{L}\right)^4 + 2\left(\frac{H}{L}\right)^2 [-0.109\nu + 0.588(1-\nu)]}$$

$\nu=0.17$ として $\lambda$ を近似すると、次式となる。

$$\lambda = \sqrt{0.127 \left(1 + \alpha \left(\frac{H}{L}\right)^2\right)} \quad (2)$$

ここで、条件A, Bに各々 $\alpha=2.8, 6.0$ を与える。これを(1)式に代入し、次式が導出される。

$$f = \frac{\sqrt{0.127\pi}}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{T}{H^2} \left(1 + \alpha \left(\frac{H}{L}\right)^2\right) \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

② 1次固有振動数推定式の検証

前項の(3)式より算出した平板の固有振動数について検証を行う。建物Iの屋根重量の比重を参考に $\mu=0.05$ と仮定する。また、壁厚 $T$ (m)は階ごとに異なっているため、各壁の平均値で一様化した値を用いる。なお、ここでは $H/L$ をアスペクト比と呼ぶ。材料特性値については、 $\sqrt{E/\rho}=1500$  [m<sup>2</sup>/s]と仮定する。

図10には(3)式と、別に検討を行った片持ち梁の固有振動数算定式の比較を示す。調査対象の煉瓦壁の $T/H^2$ の下限値が0.003, 上限値が0.02であったことより、 $T/H^2$ を0.003, 0.01, 0.02に変化させた。支持条件Aの推定値を黒太線, 支持条件Bを黒細線, 片持ち梁を灰線で示す。アスペクト比が小さい場合は、どの推定式を用いてもほぼ等しい固有振動数であることがわかる。

図11に、各壁の1次固有振動数の実測値と支持条件ごと推定値との関係を示す。建物IIIでは壁の数箇所に直交壁が存在するなど、複雑な構造をしていたため、大きく外れる壁もある。その他の壁については概ね支持条件A, Bの間に位置することがわかる。

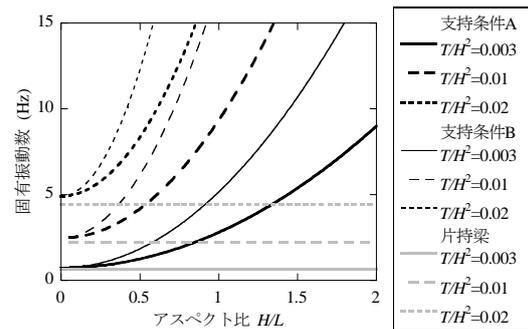


図10 (3)式の検証

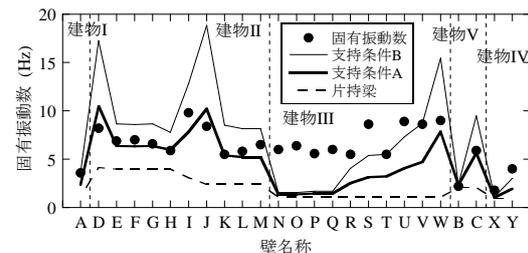


図11 1次固有振動数の実測値と推定値

(4) まとめ

歴史的煉瓦造建築物の煉瓦壁の振動特性を把握するため、実在建築物の補強前後の煉瓦壁を対象とした常時微動計測を実施した。また、固有値解析を行い、壁のモデル化の検討や調査結果との比較・検証を行った。最後に、薄板理論に基づく1次固有振動数の推定式を提案した。

① 煉瓦壁の面外方向の1次固有振動数は、1.8~10Hzに明瞭な卓越がみられる。また、壁長さの増大に従い、振動モード数が増加

- する。また、煉瓦壁の面外振動モードは、直交煉瓦壁の面外振動と連成している。
- ② RC耐震壁と鉄骨フレームを用いて補強を施した場合、固有振動数が上昇する可能性がある。振動モード形状をみると、RC耐震壁のある箇所では面外方向への振幅が抑えられており、これらの耐震要素を適切に配置することが重要であるとわかる。
  - ③ 煉瓦壁の減衰定数は小さい。1次固有振動数に対応する減衰定数は、概ね1~4%程度であり、固有振動数に応じて上昇する。
  - ④ 1次固有振動数の実測値は、薄板理論に基づく左右両辺を完全固定とした境界条件モデルと単純支持のモデルより求まる推定値との間に存在する。高次の固有振動数についても、下限値が押さえられた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 多幾山法子, 田井利幸, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物の無補強壁の面外方向振動特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, No.673, pp.475-482, 2012.3. (査読有)

[学会発表] (計5件)

- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9, (2012.9.13名古屋大学, 発表予定)
- ② N. Takiyama, Y. Nambu, Y. Hayashi and T.Tai: Evaluation of Out-of-plane Vibration Characteristics for Walls of Historic Masonry Constructions, *Proceedings of the 15th WCEE*, Lisbon, Portugal, September, 2012. (in print)
- ③ 多幾山法子, 田井利幸, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物における無補強壁の振動特性 (その1) 実建物に対する振動特性調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.931-932, 2011.8, (2011.8.24早稲田大学)
- ④ 田井利幸, 多幾山法子, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物における無補強壁の振動特性 (その2) 固有値解析による振動特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.933-934, 2011.8, (2011.8.24早稲田大学)
- ⑤ 大西良広, 多幾山法子, 林康裕: 歴史的煉瓦造建築物における無補強壁の振動特性 (その3) 煉瓦壁の固有振動数の推定式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.935-936, 2011.8, (2011.8.24早稲田大学)

[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)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10565534