

常時微動計測と振動実験に基づく 損傷を受けた組積造建物の振動特性に関する考察 —熊本の煉瓦・RC 混構造建物を対象として—

小石 咲樹

1. はじめに

PS オランジュリ¹⁾は熊本市に位置し、大正8年(1919年)に建てられた歴史的建築物である。構造形式は煉瓦造一部鉄筋コンクリート造の混構造である。また、2016年の熊本地震で損傷を受けており(図1)、補修工事が検討されている。現状では、組積造建物の耐震性能評価には確立された手法がなく、様々な方法で評価が行われている^{2,3)}。本研究は当該建物の耐震性能評価を最終的な目標としているが、これは同様の組積造建物の評価手法を確立させることにつながると考えている。

本論文では耐震性能評価の中でも振動特性の評価に焦点を当て、常時微動解析結果より対象建物の減衰定数の算定を試みた。また、煉瓦壁体のひび割れ発生前後の振動特性の変化を調べるため、振動実験を行った。さらに、今後非線形有限要素法解析を行うためのモデルの作成を試みた。

2. PS オランジュリの減衰定数の算定

既往の研究⁴⁾で行われた常時微動解析と周波数応答解析の結果より、当該建物の減衰定数は同年代に建てられた一般的な組積造建物に比べ高い可能性が示唆されている。本研究では常時微動計測で得られた加速度データやフーリエスペクトル比から減衰定数の算定を試みた。

2.1 RD 法による算定⁵⁾

常時微動計測の結果より、RD法を用いて減衰定数を算定した。RD法とは常時微動計測により得られた加速度データのパワースペクトル密度を求め、卓越振動数のピークが十分に落ち切った幅でバンドパスフィルターをかけ、減衰波形を生成させる手法である。得られた自由振動波形に減衰曲線を最小二乗法によりフィッティングすることで減衰定数を算定した。



図1 開口部付近の損傷

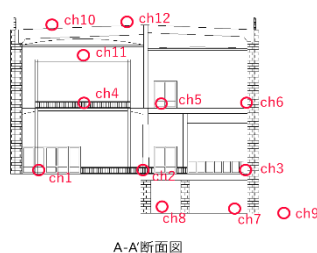


図2 常時微動計測位置

フィルターの範囲が減衰定数の算定結果に及ぼす影響を調べるため、3.0~6.3Hz, 3.4~4.0Hzの2パターンについて算定を行った。小サンプルは初期値から500点を取り出し、小サンプル2000個を重ね合わせた。小サンプルの初期値についても、各極大値を初期値とするパターンと、連続する3つの極大値のうち最大のものを初期値とするパターンの2種類を検討した。

算定位置を図2に、パラメータを表1に、算定結果を図3に示す。本論文では主に屋上の2点(ch10, ch12)について述べる。算定した減衰定数は屋上北側の最小のもので約26%と、大きな値になった。高次の減衰の影響で大きい値となることも考えられるが、自由振動の波形は作成できているため、高次の減衰の影響ではないと思われる。原因として、地盤の影響が考えられる。

2.2 その他の方法による算定⁶⁾

算定結果の信頼性と地盤の影響を確かめるため、他の手法でも算定を行った。算定はハーフパワー法とカーブフィット法を行った。これらの手法はスペクトル比を用いるため、地盤の影響を軽減できるとされる。

ハーフパワー法はスペクトル比がピーク時(振動数 f_0)に対して $1/\sqrt{2}$ になる振動数 f_1, f_2 をとり、次式により

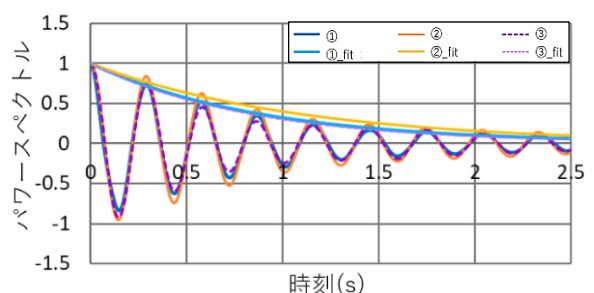


図3 RD波形(ch12)

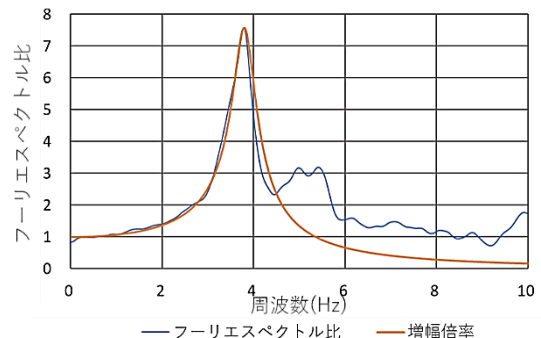


図4 カーブフィット法

減衰定数を算定する手法である。

$$h = \frac{1}{2} \frac{|f_2 - f_1|}{f_0}$$

f_1 : スペクトル比がピーク時の $1/\sqrt{2}$ 倍を初めて超える振動数

f_2 : スペクトル比がピーク時の $1/\sqrt{2}$ 倍を超える最後の振動数

カーブフィット法は最小 2 乗法を用いて関数をフィッティングさせる手法である。本研究では、フーリエスペクトル比の 1 次固有振動数時の振幅と動的増幅倍率

$$a = 1/\sqrt{(2h\beta)^2 + (1 - \beta^2)^2} \quad (\beta = \bar{\omega}/\omega)$$

の最大値の差の 2 乗が最小となるような減衰定数 h の値を求めた。

2.3 結果・考察

3 手法での算定結果を表 2 に示す。いずれの値も一般的な RC 造および煉瓦造の値と比べると大きな値となった。特に RD 法での算定結果が他の 2 手法と比べて大きな値となった。RD 法での算定には地盤や地盤と建物間での減衰が多く影響していると考えられ、ハーフパワー法やカーブフィット法ではそれが軽減できていると考えられる。ハーフパワー法やカーブフィット法で得られた建物の減衰定数は 6~7% 程度である。しかし図 4 に示すカーブフィット法では、今回 1 次固有振動数でのスペクトル比のみを考慮して減衰定数を算定したため、最小 2 乗法を適用する範囲によって算定結果が変

表 1 RD 法パラメータ

ケース	ハイパス		ローパス		重ね合わせ	減衰定数			
	遮断	通過	通過	遮断		5ch	6ch	10ch	12ch
①	1.5Hz	3.0Hz	6.3Hz	12.6Hz	1	29.6	30.2	28.1	28.2
②	1.7Hz	3.4Hz	4.0Hz	8.0Hz	1	24.6	23.9	26.0	26.1
③	1.7Hz	3.4Hz	4.0Hz	8.0Hz	2	32.1	31.6	34.4	33.5

表 2 減衰定数算定結果

ch	RD法(微動)			ハーフパワー法 (1chに対する スペクトル比)	カーブフィット法 (1chに対する スペクトル比)
	①	②	③		
4(S造)	-	-	-	2.8	3.4
5	29.6	24.6	32.1	7.7	13.3
6	30.2	23.9	31.6	5.7	11.8
10	28.1	26.0	34.4	5.8	6.7
11(S造)	-	-	-	2.3	1.3
12	28.2	26.1	33.5	5.8	6.9

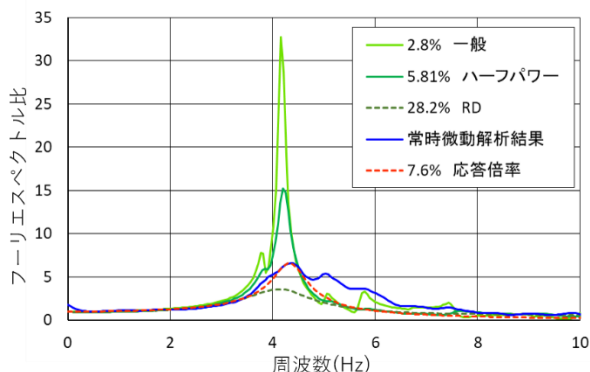


図 5 周波数応答解析結果 (EW 方向)

わることも考えられる。

算定した値を用いて再度周波数応答解析を行った結果を図 5 に示す。ひび割れ発生後の PS オランジュリの減衰定数は 6~7% の可能性がある。しかし、ひび割れによる減衰の変化については不明な点も多く、減衰についてはさらなる検討が必要である。

3. 煉瓦壁体の振動特性の調査を目的とした振動実験⁷⁾

3.1 実験概要

煉瓦壁体の振動特性、特にひび割れ前後の振動の変化を把握するため、振動実験を行った。使用機器は島津製振動台、加振は面外方向に水平 1 方向とした。実験では図 8 に示す位置の面外方向の加速度と変位を計測した。1ch, 2ch は振動台の変位及び加速度である。

実験の流れは以下の通りである、

- ① 小振幅のステップ加振を行う。
- ② 加速度応答より 1 次固有振動数を求める。またフーリエスペクトル比から減衰定数を求める。
- ③ ジャッキで壁体の頂部を押してひび割れを生じさせる。
- ④ ひび割れ発生後、小振幅のステップ加振を行い、固有振動数と減衰定数の算定を再び行う。

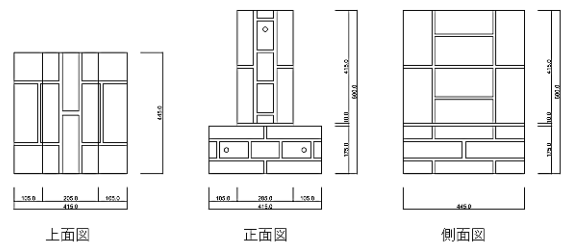


図 6 試験体

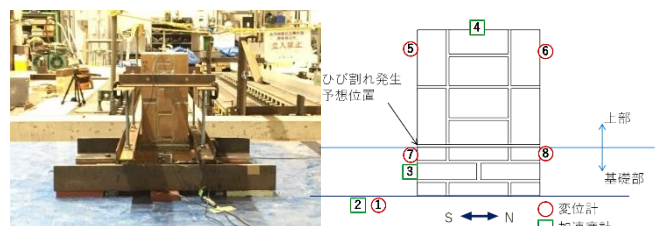


図 7 試験体写真

図 8 計測器位置

表 3 入力波一覧

番号	波の種類	サンプリング 間隔(Hz)	振幅(mm)		振動数(Hz)	長さ		備考
			最大	最小		時間(s)	サイクル数	
ひび割れ前	1	sin	200	10.0	-10.0	1	35	
	2	step	200	1.0	-1.0	0.1	5	
	3	step	200	1.5	-1.5	0.1	5	
	4	step	200	1.8	-1.8	0.1	5	リミット超過
	5	sin	200	10.0	-10.0	1	35	
	6	step	1000	1.5	-1.5	0.1	5	
	7	step	1000	1.6	-1.6	0.1	5	
ひび割れ後	8	sin	200	10.0	-10.0	1	35	
	9	step	500	1.5	-1.5	0.1	5	
	10	step	500	1.6	-1.6	0.1	5	
	11	step	500	1.7	-1.7	0.1	5	

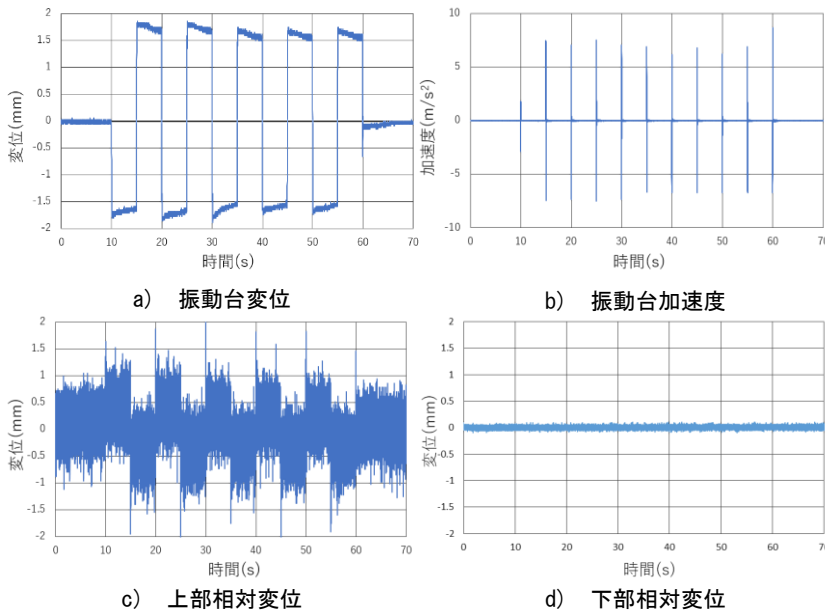


図9 時刻歴応答(振動10)

表4 1次固有振動数

振動	1次固有振動数(Hz)	応答スペクトル比
7	117.68	12.58
10	97.66	7.61

表5 減衰定数

振動	減衰定数(%)	
	ハーフパワー	カーブフィット
7	3.42	3.98
10	3.62	6.58

め、ひび割れ後の加振時にはサンプリング間隔を500Hzとした。

解析長はサンプリング間隔が200Hzで1024点、500Hzで2048点、1000Hzで

4096点とし、500Hzと1000Hzの際に周波数分解能 Δf が同じになるように定めた。

また、振動番号4の振幅1.8mm、振動数0.1Hzのステップ波で振動台の制限値(加速度0.9G)を超えたため、サンプリング間隔の変更後やひび割れ後の加振では行っていない。

振幅が同じである振動7と振動10の結果について述べる。振動10の際の振動台と試験体の変位及び振動台の加速度を図9に、1次固有振動数の算定結果を図10および表4に示す。固有振動数はひび割れ発生前が約117.7Hz、ひび割れ後が約97.7Hzであった。ひび割れが起こることによって固有振動数が小さくなることが確認できた。またひび割れ発生後はスペクトル比も40%程度小さくなった。加えて、1次固有振動数以下の周波数のスペクトル比が大きくなり、1次固有振動数が突出しなくなっている。

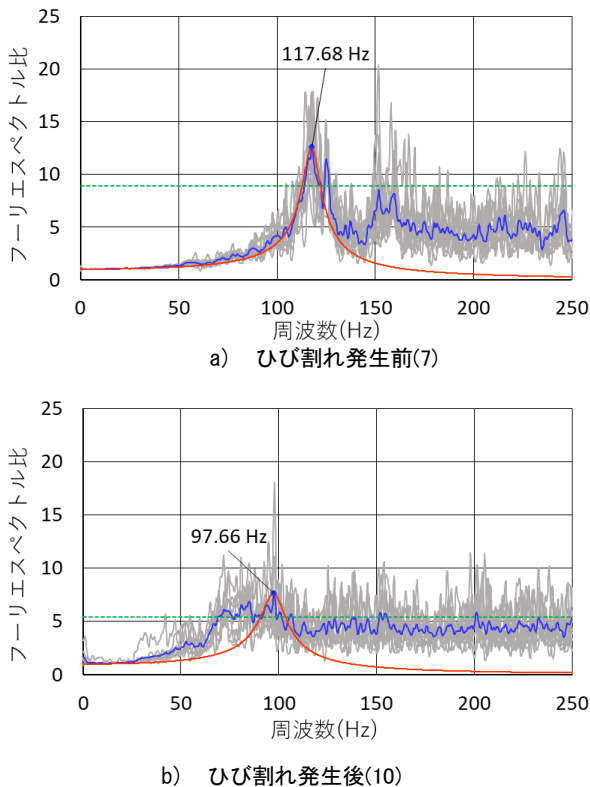


図10 上部/振動台のフーリエスペクトル比

3.2 固有振動数の算定

加振した振動の一覧を表3に示す。得られた加速度データより振動台(2ch)に対する壁体上部(4ch)のフーリエスペクトル比を算出した。

サンプリング間隔について、実験開始時は200Hzとしたが、解析の結果100Hz以下に固有振動数が見られなかったため、サンプリング間隔を1000Hzとして再度同じ加振を行った。その結果、サンプリング間隔500Hzとすれば試験体の固有振動数が含まれると判明した

3.3 減衰定数の算定

前節で求めたフーリエスペクトル比をもとに、2.2節と同様にハーフパワー法およびカーブフィット法を用いて減衰定数を算定した。結果を図10および表5に示す。ハーフパワー法ではひび割れ発生前後で減衰定数は0.2%しか変化しなかったが、カーブフィット法ではひび割れ発生後には発生前の1.65倍程度まで大きくなった。前節で述べたようにひび割れ発生後は1次固有振動数以下の周波数のスペクトル比が大きくなり、1次固有振動数が突出しなくなったためだと考えられる。また、2.3節でも述べたように、今回のカーブフィット法ではピーク時の1点の差が最小になるように減衰定

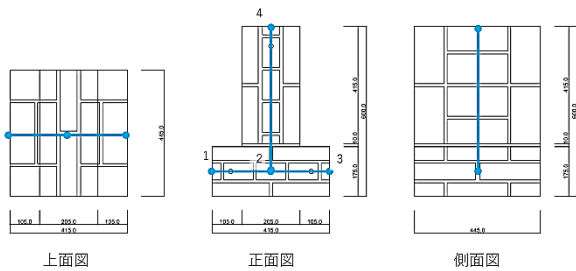


図 11 解析モデル

表 6 材料定数

	ヤング係数 (N/mm ²)	せん断弾性係数 (N/mm ²)	単位容積重量 (kN/m ³)
煉瓦組積体	6.65	2.82	1850

表 7 固有値解析結果

次数	周期	振動数	円振動数	減衰定数
1	17.707	0.056	0.355	0.067
2	4.138	0.242	1.519	0.016
3	0.376	2.659	16.71	0.001

数を定めているため、固有振動数付近の裾野に関しては考慮されていないことの影響も考えられる。しかし、カーブフィット法で求めたひび割れ発生後の減衰定数と2章で述べたPS オランジュリの減衰定数が近い値となったことから、ひび割れ発生後の組積造建物の減衰定数が6%付近まで大きくなっている可能性がある。また、圧縮強度やヤング係数により減衰が変化する可能性もあるため、今後検討が必要である。

4. 非線形有限要素法による固有値解析

振動実験を行った試験体の有限要素法による解析を試みた。解析には有限要素法解析ソフト SNAP[®]を使用した。SNAP は線材置換により構造解析を行うソフトウェアである。SNAP は RC/SRC/S/木造に対応しており、これらの構造であれば断面寸法から材料・断面性能を自動作成し、それらから質量や復元力特性等を自動作成できる。しかし組積造には対応していないため、材料・部材の断面性能・剛域・危険断面位置・剛性増大率・復元力特性を「設計者判断」で直接入力する必要がある。

解析モデルを図 11 に示す。試験体の下部を梁、上部を柱としてモデル化した。本研究では、材料定数は組積体が作成された際に実験により求められている値⁹⁾(表 6)を、復元力特性は所属研究室で以前行われた無補強煉瓦壁体の水平載荷実験¹⁰⁾の結果より、2 線形逆行型としてモデル化した。

固有値解析の結果を表 7 に示す。解析の結果は振動実験で得られたものとは大きく異なる結果となった。復元力特性については未知な部分も多いため、実験を

並行して行い、合わせて検討を進める必要がある。

5. まとめ

PS オランジュリの常時微動計測に基づく減衰定数の算定と煉瓦組積体の振動実験による振動特性の把握を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験体の 1 次固有振動数はひび割れ発生前は約 117.7Hz、ひび割れ発生後は約 97.7Hz であった。
- (2) ひび割れにより 1 次固有振動数の低下が生じ、加速度のフーリエスペクトル比も小さくなった。
- (3) ひび割れ発生後は 1 次固有振動数以下の振動数においてフーリエスペクトル比が大きくなった。
- (4) 試験体の減衰定数はひび割れ発生前に約 4.0%、ひび割れ発生後に約 6.6%が得られた。
- (5) 非線形の有限要素法解析に必要な設定事項を調べ、現時点で不明なものを明らかにした。

本研究では実験を 1 体のみ実施したため、実験のサンプル数が少ない。そのため今後さらに実験を行い、破損前後の振動データの採取と解析を行い、データを蓄積していく必要がある。また、非線形の有限要素法解析を行うためには、組積造建物の減衰や復元力特性をより詳しく把握しなければならない。減衰の把握に加え、各種の外力に対する復元力特性を把握するための実験も行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、文部科学省国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B), 課題番号:18KK0129, 研究代表者:宮島昌克)の助成を受けた。常時微動データの提供などに関して三重大学院工学研究科建築学専攻花里利一教授から、また常時微動データの解析にあたり九州大学大学院人間環境学研究院神野達夫教授から多大な協力を得た。末尾ながら記して謝意を示す。

参考文献

- 1) PS オランジュリ(熊本)-ピーエスグループ <https://ps-group.co.jp/psi/orangerie>
- 2) 北海道建築技術協会:煉瓦造建築物の耐震診断規準, 2012
- 3) 文化庁文化財部参事官:重要文化財(建造物)耐震診断・耐震補強の手引(改訂版)事例集, pp.65-90, 2017年3月
- 4) 中村優佑:2016年熊本地震で被災した歴史的な煉瓦・RC混構造建築物の有限要素法解析, 平成29年度九州大学学士論文, 2018年
- 5) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫:RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, pp.29-38, 1993年12月
- 6) 日本建築学会:建築物の減衰, pp.103-106, 日本建築学会, 2000年10月
- 7) 香水 提介:組積造壁面の振動台実験と補強法の提案, 土木学会中部支部研究発表会, pp.97-98, 2010年3月
- 8) (株)構造システム:SNAP-LE ver.7.0.0.0
- 9) 石原義高:九州大学本部第一庁舎および第三庁舎を構成する無補強煉瓦組積体の力学特性, 平成26年度九州大学修士論文, 2015年
- 10) 村上公志:無筋煉瓦造壁体を表面からRC壁板で補強する方法の検討-壁体の水平載荷実験による補強効果確認-, 平成27年度九州大学学士論文, 2016年