

文化財の耐震性向上のための社寺建築・近代建築の振動特性に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻環境・安全マネジメント講座

飛田研究室 博士課程前期課程2年 藤井智規

1. 序論

近い将来発生すると言われている巨大地震に対して、歴史的価値を持つ文化財を守ることは緊急の課題である。その中でも、社寺建築は地域の拠点として象徴的な存在であると同時に、広い境内を避難所として活用することが出来る。そのためにも、社寺建築の耐震化は必要不可欠であるが、未だ多くの検討課題が残されている。一般的な社寺建築の振動特性に関する研究は、ねじれ挙動や向拝の挙動等、実物大の社寺建築の詳細な研究が不足している。また、耐震改修前後の比較による効果的な耐震化手法は確立されていない。

本論では、愛知県内にある6棟の社寺建築を対象に常時微動計測と振動実験を実施し、微動レベルでの建物の振動と、起振機で加振したときの挙動を多点で計測した。

江戸時代以前の社寺建築等の伝統木造建築物は、重要文化財に指定され維持・保存に向けた取り組みが行われている一方、明治以降の近代建築に関しては、体系的な研究が殆どなされていないのが現状である。この理由として以下の三点が挙げられる。第一に歴史的建築物の耐震診断及び改修に対して、確立された標準的手法が無いこと。第二に構造性能を評価する上での様々な資料が必ずしも十分に整備されていないこと。第三に歴史的価値を保持したままの改修が望まれるため、当時の外見を保ちながら耐震補強を行わなければならない、一般の建築物よりも補強方法が限られることである。

愛知県犬山市の博物館明治村には、67件の近代建築物が存在し、重要文化財が10件、その他殆どが登録有形文化財である。これらを将来に渡って維持・保存することは非常に重要な課題である。本論では、そのための基礎資料として、村内の建築物の常時微動計測を実施した。明治村には、明治時代の様々な構造・用途・規模の建築物がほぼ同条件の地盤上に立地し、設計図や移築報告等の資料が詳細にまとめられている。これらを的確に評価することによって、日本全国の近代建築物の耐震性能を確認する上で、重要な資料になると考えられる。

2. 社寺建築の計測とその比較検討

2.1 社寺建築の概要

一般的に社寺建築は良好な地盤上に立地することが多い。各社寺の位置関係と表層地盤、及び外観写真を図1に示す。浄照寺、円楽寺は岡崎平野北部の扇状地に位置し、興禅寺は濃尾平野北部の山間部の麓にあり、永平寺別院・山門は熱田台地上に位置する。常時微動計測及び振動実験のセンサー設置点を図2に示す。微動計を、小屋組のねじれを見るため東

西に設置し、向拝の挙動を見るため梁上に設置した。図は浄照寺を例に挙げたが、他の5棟も概ね同様の配置となっている。

各社寺建築の概要、計測メニュー、及び常時微動計測結果を表1に示す。浄照寺、興禅寺は過去の地震災害や風水害を受けて、鉄骨による補強が施されている。浄照寺、円楽寺、光西寺、海蔵寺は向拝と呼ばれる部分を持つ。興禅寺は屋根が二段構造となっている。6棟の社寺建築のうち、海蔵寺と永平寺別院・山門は耐震構造である。海蔵寺は耐震改修を行い、既存の柱の隣に新たな柱を添えて補強し、亀壁やトグル制震装置を用いて変形時の減衰を確保する。永平寺別院・山門はすべり支承の免



図1 各社寺の位置、表層地盤、及び外観写真

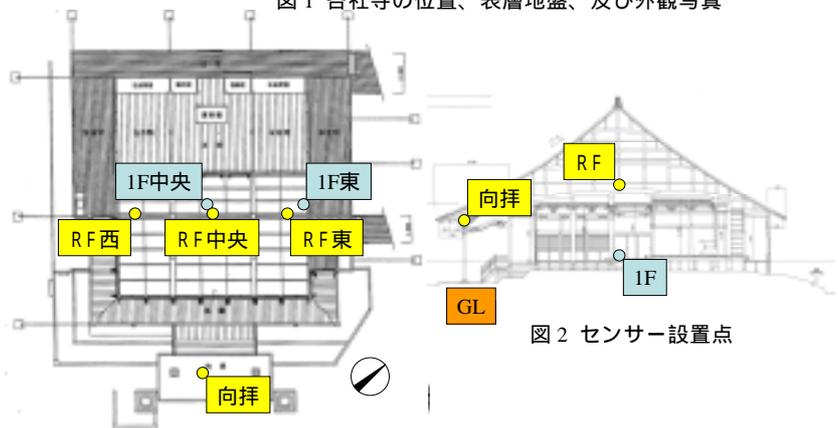


図2 センサー設置点

震装置が基礎部分に備え付けられている。浄照寺、円楽寺、興禅寺は、耐震改修を実施する予定のため、今後は各々の耐震改修前後の振動特性の変化を調べられる。

光西寺、海蔵寺、永平寺別院・山門は常時微動計測を、浄照寺、円楽寺、興禅寺は加えて起振機を2台用いた振動実験を行った。振動実験では並進振動とねじれ振動を起こし、それぞれ計測した。

2.2 各社寺の振動特性とその比較

表1に23分間の常時微動計測から求めた伝達関数(RF/GL)の一次固有振動数、及びRD法を用いて求めた減衰定数を示す。また、既往の研究より最高高さとの固有周期の関係を図3に示す。中に色が塗られてある点は、本論で対象とした社寺建築である。本論のいずれの社寺も最高高さは10～15m付近に集中しており、概ね回帰直線上に乗っており、最高高さとの固有周期の相関が高いものと考えられる。しかし、海蔵寺は耐震改修を実施して建物剛性が増加しているため、やや固有周期が短い。また、鉄骨補強を行った浄照寺や興禅寺は、鉄骨補強を行っていない円楽寺に比べ、最高高さの差が殆ど無いにも関わらず周期がやや短くなっている。既往の研究の対象建物は、薬師寺や法隆寺などの重要文化財であるため、景観を損なう補強はなされていないため、一般的な社寺建築に比べて周期が長いことが分かる。

次に、浄照寺を例にねじれの検討を行う。浄照寺の屋根裏階の中央・東の1階に対する伝達関数(梁間成分)をそれぞれ図4に示す。中央の伝達関数では見られなかった2.54Hz付近の振動数のピークが東側で見られ、西側も同様のピークが確認できたため、ねじれの振動数だと考えられる。また、社寺の南側にある向拝の1階に対する伝達関数を図5に示す。この図にも、桁行成分に同様の振動数が卓越していることが見られる。向拝はねじれながら振動し、並進振動の増幅率も中央より大きいことが分かる。よって、多くの社寺建築がねじれながら倒壊する理由は、壁が多い内陣と壁の少ない外陣、突き出た向拝が平面のバランスを欠き、向拝側がねじれながら大きく振動し、変形が集中するからであると考えられる。

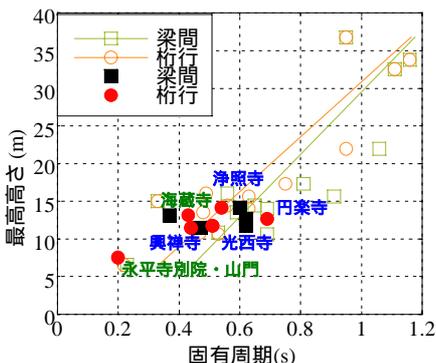


図3 最高高さとの関係

振動実験を行った浄照寺、円楽寺、興禅寺の3棟において、振動数及び減衰定数の振幅依存性の検討を行った。3棟の社寺の振動数の振幅依存性を図6に、減衰定数の振幅依存性を図7に示す。浄照寺、円楽寺ではそれぞれ最大約100kN、興禅寺では最大で約200kNの加振力を出した。加振時の常時微動時に対する振動数比を見ると、円楽寺は約10%振動数が変化したのに対し、浄照寺、興禅寺は約5%の変化であり、振幅に対する振動数の変化が小さい。これは、鉄骨補強による影響であると考えられる。減衰定数については、興禅寺は振幅に殆ど依存しない2%であったが、浄照寺、円楽寺は常時微動時の2%から加振時は4%弱まで減衰定数が大きく変化した。浄照寺と円楽寺は同じ宗派、ほぼ同じ建て方で、向拝部分の屋根が突き出ており、振幅依存性の出方が比較的似ていると考えられる。一方、興禅寺は宗派が異なり、屋根

表1 概要・計測メニュー・計測結果

	浄照寺	円楽寺	興禅寺	光西寺	海蔵寺	永・山門
表層地盤	洪種層	洪種層	洪種層	沖種層	沖種層	洪種層
本堂建立年 [年]	1898	1848	1881		1769	2005
軒高 [m]	14.19	12.69	11.51	11.80	13.21	7.55
柱の径 [mm]	300	260	200	250	260	350
鉄骨補強	有	無	有	無	無	無
耐震改修	未	未	未	未	済	済
改修方法						免震
宗派	浄土真宗	浄土真宗	臨済宗	浄土真宗	浄土宗	曹洞宗
常時微動計測						
スイープ試験						
自由振動実験						
強震観測						
地盤調査	PS検層	PS検層	表面波探査			
一次固有振動数	梁間	1.68	1.61	2.13	1.61	2.69
	桁行	1.86	1.44	2.27	1.95	5.00
ねじれ [Hz]	2.54	2.20		2.78		
減衰定数	梁間	1.86	2.27	1.59		
	桁行	1.61	2.48	1.68		
一次固有振動数	梁間	1.55	1.56	2.05		
	桁行	1.78	1.30	2.20		

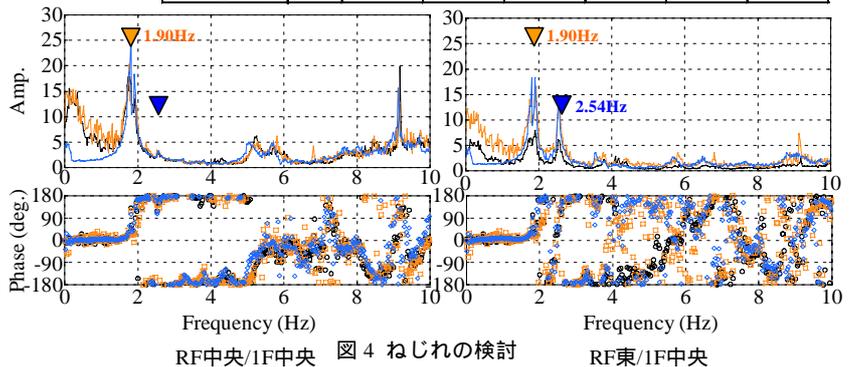


図4 ねじれの検討

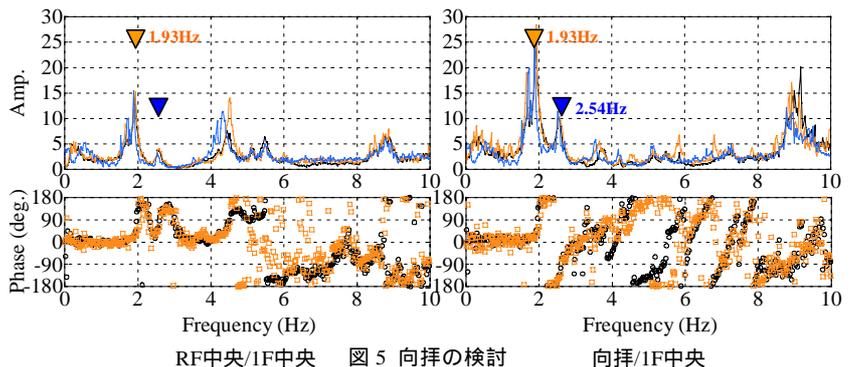


図5 向拝の検討

が二段構えになっていることから、建物特性の違いによる影響が出たと考えられる。

2.3 強震観測記録との比較

浄照寺では強震観測を行っており、30以上の地震記録が得られた。これらの波形から地盤-建物連成系の伝達関数を求め、固有振動数と減衰定数を推定し、振幅依存性の検討を行った。その結果を図8に示す。常時微動計測や自由振動実験による推定値と比較すると、自由振動実験は上部からの入力、地震は下部からの入力であるに関わらず、よく対応していると言える。社寺建築は二次部材が少ないため、二次部材の寄与する影響が小さく、ばらつきが小さいと考えられる。

この結果から、伝統木造建築物における常時微動計測や振動実験の分析は、地震時の振動特性を推定する上で有効であると言える。また、明治村の全建築物の常時微動計測も、今後の耐震化のための基礎資料として有用であると考えられる。

3. 近代建築の常時微動計測

3.1 計測概要及び建築物概要

常時微動計測では、各建築物の地盤、1階、屋根裏等3~5箇所に、動コイル型微動計を設置し、水平2成分と上下の計3成分を同時計測した。計測には約半年かけて、計測日を12日間設けた。

計測対象建物は、明治村に保存されている全67の建造物のうち、蒸気機関車・橋梁・燈台等を除く、1868年から1927年に建てられた建築物51件である。その内訳を以下に述べる。移築後の構造別件数を図9に示す。明治村内は木造建築が38件と最も多く、S造2件、RC造・SRC造が1件ずつあり、混構造が9件ある。その殆どが1,2階の低層建築物である。次に、用途と構造の関係を図10に示す。住宅の殆どが木造であり、町屋建築の商業施設や官公庁施設、学校建築や医療施設も殆ど木造である。S造やRC造の建築物は、工場や交番などが該当する。

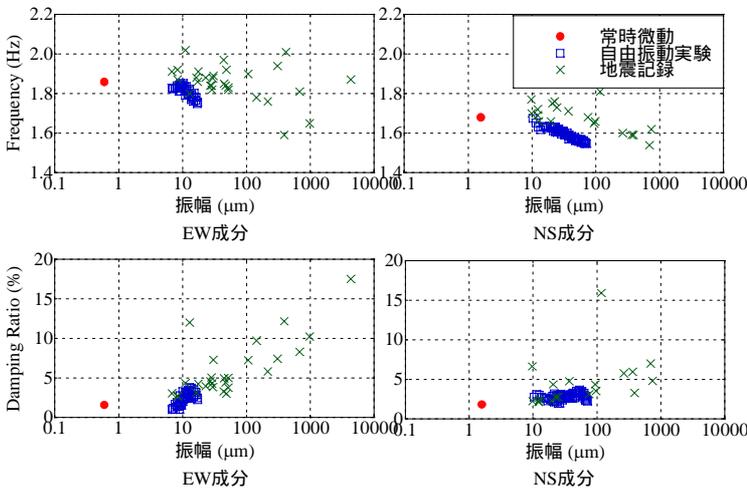


図8 振幅依存性の地震記録との比較

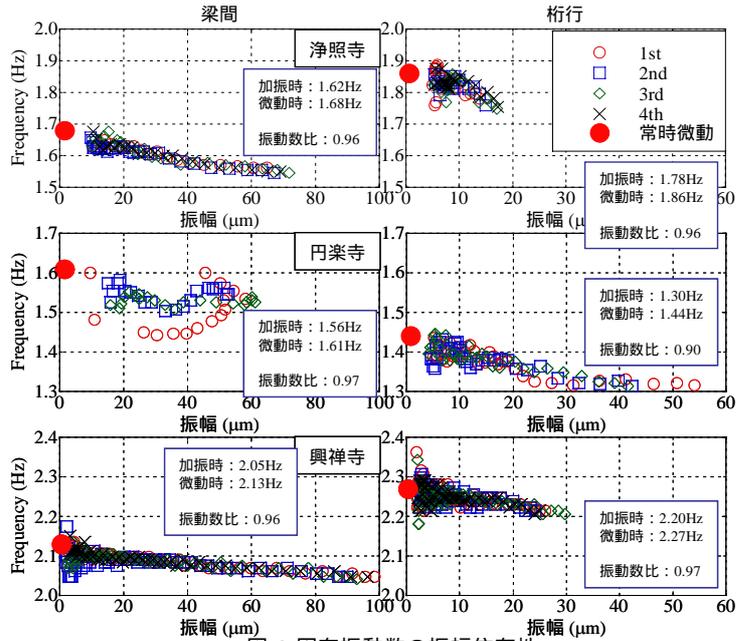


図6 固有振動数の振幅依存性

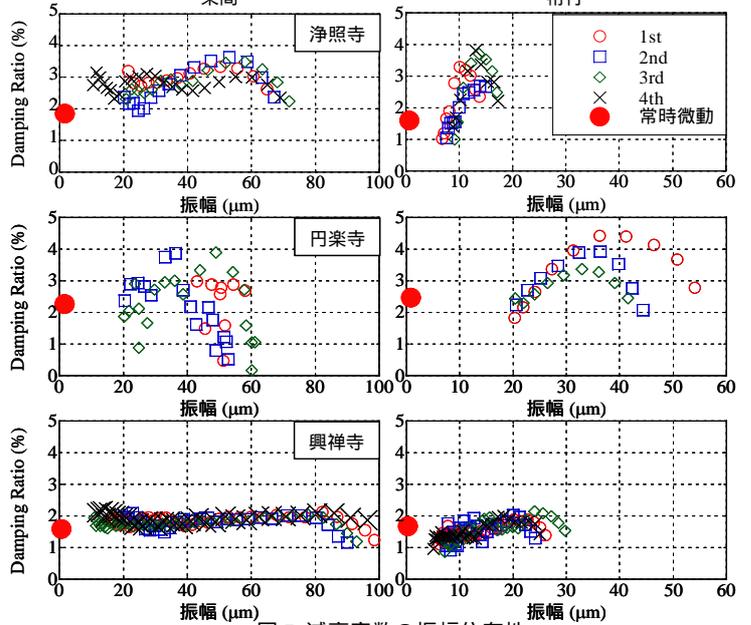


図7 減衰定数の振幅依存性

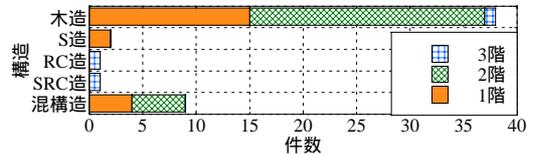


図9 構造別件数

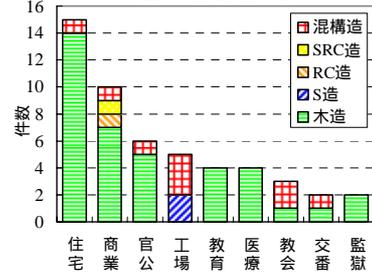


図10 構造と用途の関係

3.2 分析結果及び考察

常時微動計測結果から、一次固有振動数を地盤-建物連成系の伝達関数のピークより求め、減衰定数を RD 法による自由振動波形の対数減衰率から求めた。横軸を構造・用途順にソートし、一次固有振動数と減衰定数の一覧を図 11 に示す。木造住宅、商業施設、医療施設等の民間建築物は、長辺・短辺ともに概ね 3~6Hz 付近の一次固有振動数を持っている。一方、教育施設や官公庁施設等の公共建築物の一次固有振動数は、約 2~5Hz 付近であり、民間建築物に比べ長周期化している。公共建築物は大きな部屋を設けることが多く、壁量が少ないためと考えられる。減衰定数は、概ね 1~3% と現代建築に比べて全体的に低減衰であることが分かるが、木造の用途による違いは無いと考えられる。

混構造建築物は、構造の複雑さから明確な傾向は現れなかった。S 造・RC 造・SRC 造は建物サンプル数が少なく、傾向を把握するに至らなかった。よって、以下に木造建物の振動特性の傾向を述べる。

・固有周期と建築年・移築年：木造住宅 17 棟の関係をそれぞれ図 12、図 13 に示す。建築年には固有周期との相関が見られないが、移築年が新しいほど短周期になる傾向が見られた。これは、移築時の建築基準法に従い、筋交いの補強や土壁の塗り替えが行われたため、建築物の剛性が大きくなったと考えられる。

・固有周期と最高高さ：木造の住宅及び商業施設における小屋組別の関係を図 14 に示し、屋根重量の影響を考慮したものを図 15 に示す。図 14,15 より、洋小屋に比べ和小屋の方が長周期で振動しており、重い瓦屋根を葺く建築物が長周期化する傾向がある。洋小屋の斜材が水平剛性に寄与しているために周期が短くなったと考えられる。

・平面形状と固有周期：平面形状を片廊下ないし中廊下を持つ学校建築、間口が狭く奥行き長い町屋建築、及び住宅に分類し、固有周期との関係を図 16 に示す。町屋建築は他の平面計上をもつ建築物に比べ、長辺方向に壁量が多く、短辺と長辺の差が大きい。

・壁率と固有振動数：壁率と固有振動数の関係を図 17 に示す。ここでの壁率とは、1 階の垂壁・腰壁を除く建物の壁長を耐震壁の長さとし、壁倍率を一律 1.0 として以下のように求めた。

壁率(cm/m²)={1 階壁総延長(cm)/延床面積(m²)}×1.0
壁率が大きい、即ち壁量の多い建築物ほど高振動数であると確認できる。

4. 結論

本論では、日本の伝統木造建築の歴史を残す社寺建築と明治期の欧米の文化を取り入れ始めた近代建築の計測を実施し、その振動特性の把握を試みた。いずれも日本の文化を後世に伝える重要な建築物であり、これらの維持、保存は極めて重要であるため、本論でまとめたデータは今後の耐震化に向けた貴重な資料となりうる。

社寺建築の常時微動計測及び振動実験では、1 次固有振動数と減衰定数を求め、一般的な規模の社寺建築の振動特性をまとめた。軒高と固有周期には正の相関があるが、宗教等の違いによって建て方が異なるため、ばらつきが生じると考えられる。また、常時微動計測よりねじれ振動と向拝の揺れの増幅が確認でき、振動実験では振動数と減衰定数の振幅依存性が見られた。

明治村に移築保存されている様々な近代建築物の常時微動計測を行い、データベースをまとめ、振動特性の傾向を考察した。今後は構造や平面形状が複雑な建築物について、より詳細な計測と分析が必要である。また、耐震補強を行う建築物について、補強後の常時微動計測を実施し、振動特性の面から補強効果を確認する。更に、明治村を代表的する 4 件の建築物に地震計を設置し、地震記録と常時微動記録を比較検討する予定である。

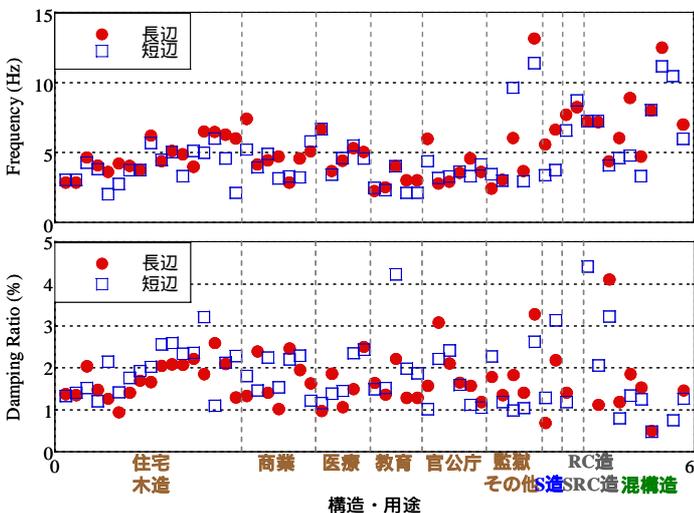


図 11 固有振動数と減衰定数

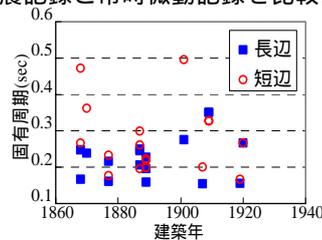


図 12 固有周期と建築年

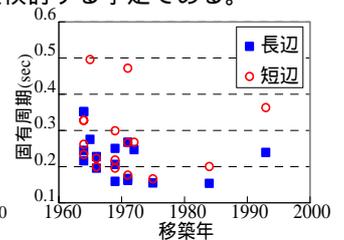


図 13 固有周期と移築年

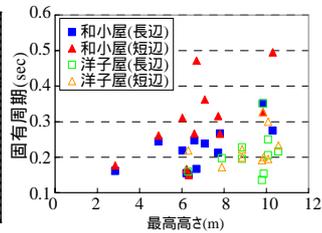


図 14 固有周期と最高高さ

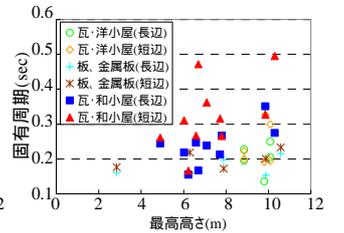


図 15 屋根種類別固有周期と高さ

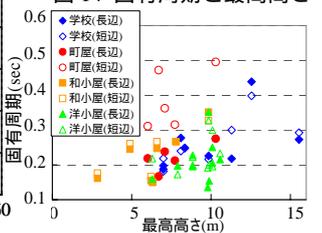


図 16 平面形状と固有周期

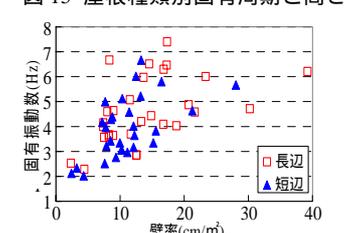


図 17 壁率と固有振動数