

rom 平成 23 年 1 月 21 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20860071
 研究課題名（和文）微小振動測定に基づく
 伝統的木造建築の構造性能評価に関する研究
 研究課題名（英文）EVALUATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE
 OF EXISTING TRADITIONAL TIMBER STRUCTURES
 IN JAPAN BY MICROTREMOR MEASUREMENTS
 研究代表者
 千葉 一樹（CHIBA KAZUKI）
 東京理科大学・工学部第一部建築学科・助教
 研究者番号：80516229

研究成果の概要（和文）：伝統的木造建築の保存活用には定期的な修理が必要不可欠である。そのため、修理工事要否を適切に評価し、構造部材の経年劣化及び損傷状況を解体や破壊を加えることなく把握できることが求められている。微小振動測定は、建物の常時微動を計測することにより基礎的な振動特性を把握する手法であり、非破壊検査手法としての活用が期待されている。本研究は、上述の研究背景を受け、「微小振動測定を用いた伝統的木造建築の構造性能評価手法の研究」を目的として実施した。現地調査また既往研究の整理を通して、建物種別の微動時 1 次固有振動数の分布性状及び建物形状との相関性を考察し、また微小振動測定と構造解析結果の比較から微動時 1 次固有振動数を活用した耐力推定に関する検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The structural integrity of the existing traditional timber structures (for instance, temples, shrines and folk dwellings) in Japan is maintained by the periodic maintenance. The evaluation of the structural performance is important to determine the necessity of repairing and maintenance. The microtremor measurement method is a simple nondestructive inspection method used to evaluate the fundamental vibration characteristics of structures. Therefore, this method is expected to play an effective role in the structural evaluation of the existing traditional timber structures. In this research, several existing traditional timber structures that differ in construction type, year of construction and building configuration are categorized into a construction type. The results of the microtremor measurements are evaluated for each category. The relationship between the natural frequency of structures obtained by the results of microtremor measurement and the maximum strength of structure calculated by structure analysis was discussed in this research. In future research, a method of seismic diagnosis by the application of microtremor measurement should be clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2008年度	1,150,000	345,000	1,495,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
総 計	1,750,000	525,000	2,275,000

研究分野：木質構造
 科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料
 キーワード：常時微動測定、人力加振試験、固有振動数、減衰定数、伝達関数、耐震診断、荷重変形関係、初期剛性、最大耐力

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

伝統的木造建築の文化的価値を尊重し、安全に保存・活用していくことは重要な課題である。そのため、修理工事の要否を判定するための定期的な構造健全性診断が必要不可欠である。現在、広く普及される耐震診断法^{1),2)}を基に、壁配置及び接合部形式、部材の劣化状況などを目視調査により行い、必要耐力に対する保有耐力の割合から評点を求め評価することで、耐震性に関わる診断が実施されている。しかしながら、より詳細な壁仕様、床下の状況や部材の腐朽・虫害などを正確に把握するためには、部分解体や軽微な損傷が伴う調査が必要となり、調査規模が拡大し簡易性が失われる。そこで、比較的簡易で非破壊により構造健全性診断ができる手法の構築が期待されている。

【参考文献】1) 「木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版)」、財団法人 日本建築防災協会・発行、国土交通省住宅局建築指導課・監修、平成16年7月、
2) 「重要文化財(建造物)耐震診断要領」、文化庁通知、13 財建造第2号、平成13年4月

2. 研究の目的

建物は、表層地盤の常時振動を入力として常に振動応答しており、高感度な振動計を利用することにより、こうした建物の微小振動応答を測定することができる。微小振動測定は、比較的簡易に実施可能であり、非破壊に対象建物の基礎的な振動特性を把握することができるため、構造性能評価への応用が期待されているが、定量的手法の構築は未だされていない。微小振動時と大変形時の応答性状は異なるものであり、構造性能の非線形性を考慮した補間が必要不可欠である。本研究では、伝統的木造建築の微小振動測定を活用した構造性能評価手法の構築を目的として、過去に蓄積された微動記録の収集と整理、微小振動時振動特性と大変形挙動との関連付けを検討する。

3. 研究の方法

本研究は、「(1)伝統的木造建築の建物種別微小振動特性の体系的分類」、「(2)伝統的木造建築における微小振動時1次固有振動数を活用した大変形挙動の推定」の2項に分けて研究を行い、微小振動測定に基づく伝統的木造建築の構造性能評価に関する知見を与えている。以下に研究方法の概要を示す。

(1) 伝統的木造建築の建物種別微小振動時振動特性の体系的分類

本項ではまず、研究代表者が研究期間内に実施した現地調査により得た微小振動測定結果を新たな知見として報告する。調査対象建物の概要を表1に示した。また現地調査結果を含め、これまでに研究代表者が現地調査と文献調査を通して蓄積してきた伝統的木造建築の微小振動時振動特性の体系的分類を行う。建物種別(寺院本堂・神社本殿・門・伝統民家など)の微動時1次固有振動数の分布範囲を統計処理により分析し、また建物高さや建物重量との相関性を検討する。

(2) 伝統的木造建築における微小振動時1次固有振動数を活用した大変形挙動の推定

本研究で行った現地調査では、簡易な構造解析を行うことを目的として、建物重量推定や接合部回転剛性を推定するための部材寸法調査も併せて行っている。

本項では、調査建物の中でも建長寺三門と円覚寺舍利殿を代表例として構造解析を行い、得られた荷重変形関係の初期剛性と微動時1次固有振動数から求まる微動剛性との関連性を分析した。その後、微小振動時と大変形挙動との関連付けを目的として、応答変位増加に伴う等価な1次固有振動数の変化に変換し、微動時1次固有振動数を用いた最大耐力推定に関する検討を行う。また、研究代表者が既往研究にて提案した推定式との比較を行い、その妥当性を検証する。

表1 調査対象建物概要

		門			寺院本堂
		二階二重門			一重裳階付仏殿
		建長寺	円覚寺	光明寺	円覚寺舍利殿
外観					
	1775 (江戸時代)		1783 (江戸時代)	1847 (江戸時代)	1338-1456 (室町時代初期)
建築年	重要文化財(国指定)		重要文化財(県指定)		国宝
文化財指定	重要文化財(国指定)		重要文化財(県指定)		国宝
壁形式	板壁				板壁
屋根形式	入母屋造・正面唐破風付 銅板葺		入母屋造 銅板葺	入母屋造 本瓦葺	入母屋造 柿葺
平面積 (m ²)	108		70	116	66.3
全重量 (t)	157		-	-	24.4
棟高(m)	19.6		16.5	16.8	9.14
常時微動1次 固有振動数 (Hz)	桁行(X)	1.37	1.59	1.29	2.52
	梁間(Y)	1.20	1.32	1.25	2.61

4. 研究成果

(1) 伝統的木造建築の建物種別微小振動時振動特性の体系的分類

① 現地調査結果

研究代表者は、既往研究において山門や寺院本堂の微小振動測定結果の蓄積が少ないことを指摘していた。そこで本研究では、首都圏近郊にて社寺建築が多く所在する鎌倉を調査対象地域として選定し、鎌倉地域を代表する山門3棟（三門とも記述される）と仏殿1棟を調査した。二階二重門の典型様式を有する建長寺三門、円覚寺山門、光明寺山門はいずれも江戸時代に再建された建物であり、平面規模と高さが多少異なるが、ほぼ同規模の建物である。仏殿は、中世禅宗様の代表的建築物である円覚寺舍利殿の現地調査を行った。

微小振動測定は、10～14台の速度計による多点同時同時計測を実施した。サンプリング200Hz、5分間の計測を数回行っている。図1、図2に測定計画の代表例を示した。

測定結果から地盤振動を入力、建物振動応答を出力としてパワースペクトルとクロススペクトルを算出し、スペクトル比から伝達関数を求めた。算出した伝達関数の代表例を図3、図4に示す。また応答倍率と位相差から、各卓越振動数に対応する振動モード図を作成している（図5）。振動モード図との比較から、表2のように固有振動数を特定した。

表2 固有振動数と振動モード

	建長寺三門		円覚寺舍利殿	
	固有振動数 (Hz)	振動モード	固有振動数 (Hz)	振動モード
1次	1.20	Y方向並進1次	2.52	X方向並進1次 (直交成分と連成)
2次	1.37	X方向並進1次	2.64	Y方向並進1次 (直交成分と連成)
3次	1.51	平面振れ	3.10	平面振れ
4次	3.27	Y方向並進2次	6.62	-
5次	4.00	X方向並進2次	6.79	-

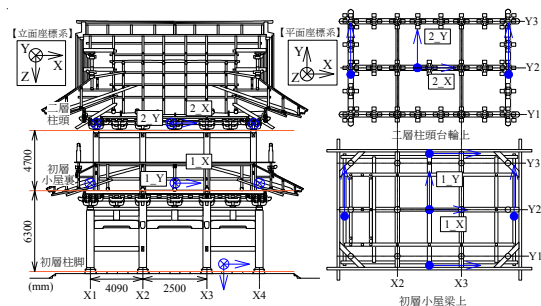


図1 建長寺三門 微動測定計画（断面図・平面図）

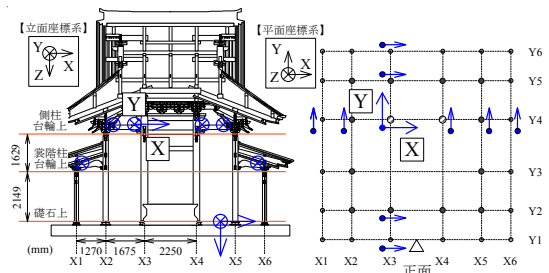


図2 円覚寺舍利殿 微動測定計画（断面図・平面図）

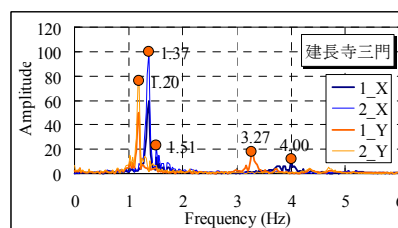


図3 伝達関数（建長寺三門）

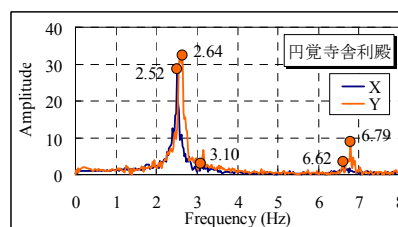


図4 伝達関数（円覚寺舍利殿）

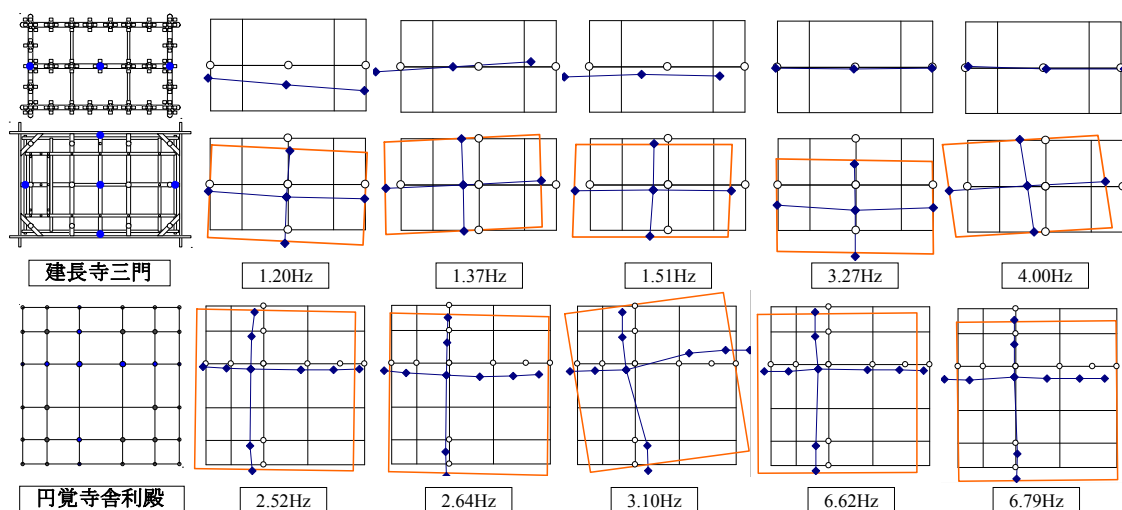


図5 振動モード図（建長寺三門・円覚寺舍利殿）

② 現地調査及び文献調査から得られた蓄積
研究代表者が主導して現地調査を実施した4棟に加え、研究協力の中で実施に関わることが出来た微小振動測定結果を新たな知見として蓄積した。また文献調査から追加収集した事例を併せ、本研究報告までに全611棟分の記録を収集した。本研究開始当初の450棟分の収集記録から、本研究期間内に161棟分の記録を追加したことになる。表3に全収集記録における建物種別棟数を示す。

表3 微小振動記録 建物種別棟数

建物分類		調査棟数
構造形式	構造形式	
在来構法	在来住宅	349
	店舗併用型住宅	
伝統構法	農家型民家	97
	町家型民家	93
	寺院本堂	29
	神社本殿	
	塔	33
	門	8
	城郭	2
計		611

③ 微動時1次固有振動数の分布性状
収集した記録から、各建物種別における微動時1次固有振動数の度数分布及び比較のための正規分布曲線を作成した(図6～図8)。
在来住宅は、新耐震設計法施行前後において分布範囲が明らかに異なっていることが読み取れる。また新耐震以降の分布から、構造性能の向上に伴い高い固有振動数域で幅広く分布する傾向が読み取れる。伝統民家(農家型・町家型)、社寺建築(寺院本殿・門・塔)は建築年に分類せず収集できたすべての記録を使用している。
表4に各建物種別に分類した微動時1次固有振動数の分布性状の分析結果を示した。

表4 建物種別・微動時1次固有振動数の分布

	在来 新耐震前	在来 新耐震後	町家型 民家	農家型 民家	寺院 本殿	塔
-σ	3.55	5.48	3.18	2.34	1.18	0.63
平均値	4.65	6.76	3.97	3.31	2.12	0.98
+σ	5.76	8.03	4.77	4.29	3.07	1.32
中央値	4.35	6.52	3.85	3.22	1.90	0.85
最頻値	4.30	6.30	3.50	3.50	2.10	0.70
分散	1.22	1.62	0.63	0.95	0.89	0.12
標準偏差	1.11	1.27	0.79	0.97	0.95	0.35
変動係数(%)	23.8	18.9	19.9	29.4	44.6	35.7
歪度	1.26	1.85	1.15	1.94	1.73	1.73
尖度	1.42	6.99	1.99	9.01	1.20	1.20

④ 建物高さ及び建物重量との相関性
図9に建物高さとの関係性を示した。図9には回帰式と設計用1次固有周期算定式の曲線を載せているが、良好な相関性あることが認められる。
図10には建物重量との関係性に加え、1質点系の固有振動数算定の基本式から求めた等価剛性別の曲線を示している。建物種別に等価剛性の分布範囲が異なっていることが読み取れる。

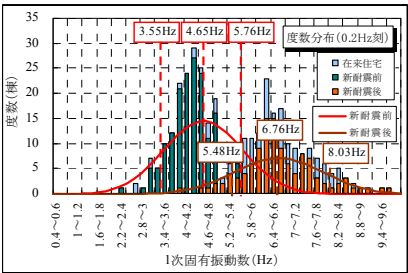


図6 微動時1次固有振動数の分布(在来住宅)

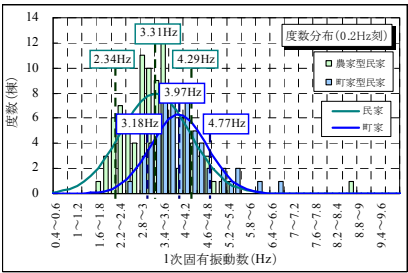


図7 微動時1次固有振動数の分布(伝統民家)

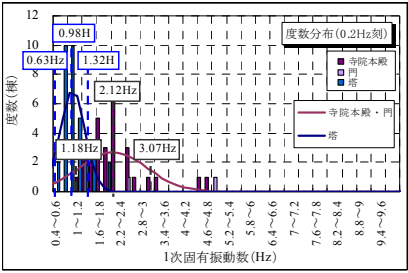


図8 微動時1次固有振動数の分布(寺院本殿・門・塔)

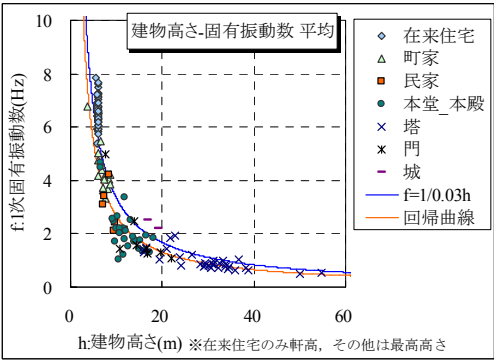


図9 建物高さとの関係

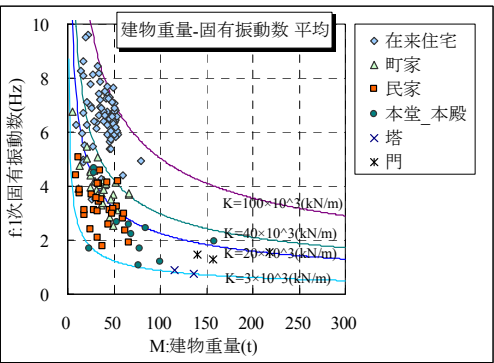


図10 建物重量との関係

(2) 微小振動時1次固有振動数を活用した伝統的木造建築の最大耐力推定方法

① 分析方法

円覚寺舍利殿と建長寺三門を対象に、部材寸法調査と修理報告書に記載される情報を元に構造解析を行った。構造解析結果と常時微動測定結果の比較から、常時微動測定結果を利用した最大耐力推定手法に関する検討結果を報告する。

② 構造解析

円覚寺舍利殿及び建長寺三門に存在する壁は壁板壁であるため、水平耐力に算入できる有効な壁量が存在していない。そのため、建物の躯体自体が有する水平抵抗を水平耐力要素として検討した。

本解析では、「柱貫接合部の回転剛性」と「柱の転倒復元力」の二つを水平耐力要素に仮定し構造解析を行っている。各鉛直構面別に荷重変形関係を算定し、剛床仮定を用いて、各方向鉛直構面の水平耐力を加算することによって、建物全体の荷重変形関係を算定している。このとき「柱貫接合部の回転剛性」は、図7に示す木材のめり込み理論によって算出している。求められためり込み剛性を接合部回転バネに置き換えて、鉛直構面のフレームモデルを構築し、応力解析した結果から水平剛性を求めている。また「柱の転倒復元力」は、各柱の負担重量を求め、図8に示す計算方法によって水平耐力を算定した。

③ 荷重変形関係

構造解析から得られた円覚寺舍利殿の荷重変形関係を図9に示す。解析結果から得られた荷重変形関係は、建物全体の荷重変形関係の他、接合部回転剛性を付加した鉛直構面架構の水平剛性・柱の転倒復元力、それぞれの復元力特性を併せて示している。このときX・Y方向は、それぞれ建物の桁行・梁間方向と定義している。

構造解析結果から円覚寺舍利殿の最大耐力はベースシア係数にしてCB=0.16~0.17程度と推定した。最大耐力時変形角は約1/60(rad.)であり、接合部の降伏耐力に依存していることがわかる。表5に各水平耐力要素別の水平耐力と負担割合を示した。小変形角領域では柱転倒復元力の負担割合が大きく、変形角増加に伴い架構耐力の負担割合が増加していることが読み取れる。

表5 水平耐力要素別の水平耐力と負担割合

R (rad.)		1/200	1/100	1/50	1/40
耐力(kN)	接合部	9 (0.41)	18 (0.59)	27 (0.73)	27 (0.75)
	柱	13 (0.59)	13 (0.41)	10 (0.27)	9 (0.25)
	建物全体	22	31	37	36
Y	接合部	8 (0.39)	16 (0.57)	24 (0.71)	24 (0.73)
	柱	13 (0.61)	13 (0.43)	10 (0.29)	9 (0.27)
	建物全体	21	29	34	33

※()内の数値は各変形角における建物全体耐力に対する各要素耐力負担割合

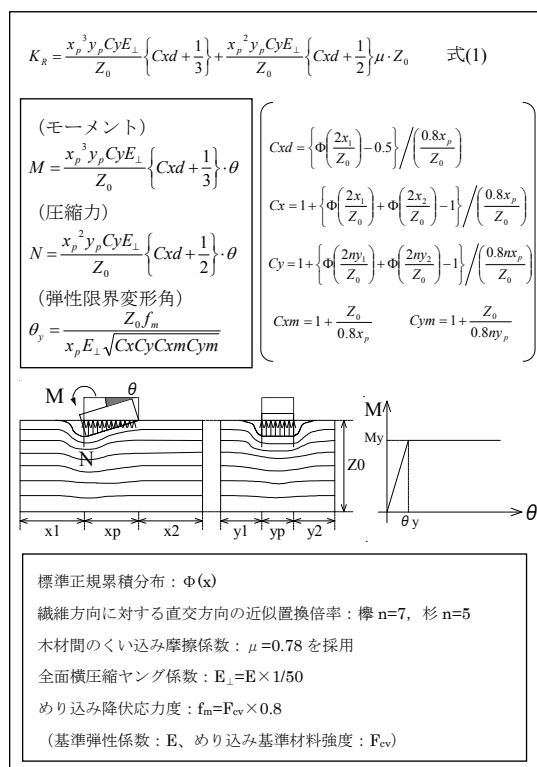


図7 木材のめり込み計算³⁾

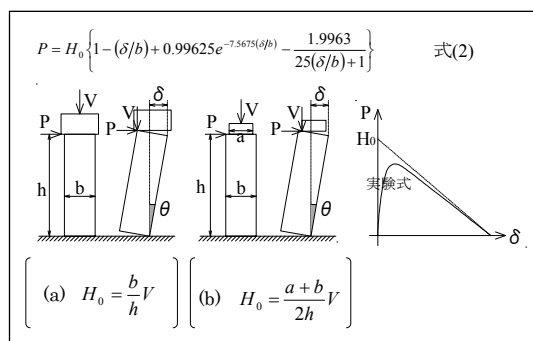


図8 柱の転倒復元力計算⁴⁾

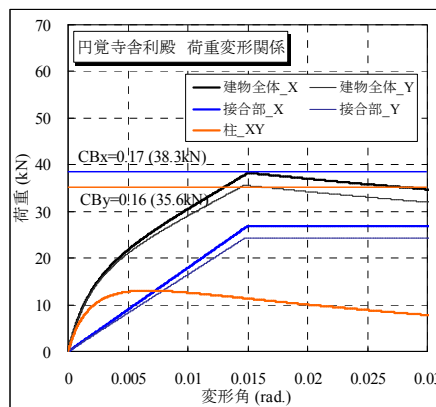


図9 荷重変形関係 (円覚寺舍利殿)

【参考文献】

- 3) 稲山正弘: 木材のめりこみ理論とその応用—靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究—、東京大学学位論文、1991.12
- 4) 坂静雄: 社寺骨組の力学的研究 (第1部 柱の安定復元力)、建築學會論文集(21)、pp.252-258、1941

④ 固有値計算結果と実測値の比較

構造解析から得られた荷重変形関係を基に微動時応答変形角 $1/1000000(\text{rad.})$ における割線剛性を求め、固有値計算により1次固有振動数を算定した。このとき、計算に使用した建物重量は部材寸法調査から推定した。

円覚寺舍利殿と建長寺三門を対象に、解析値と微動時1次固有振動数(実測値)を比較した結果を表6に示す。建長寺三門は、7割～9割程度、解析と実測が合致した。円覚寺舍利殿は7割程度の整合性に留まった。

さらなる解析精度の向上には、微小変位におけるめり込み剛性や、解析に算入していない余耐力の再評価の必要性が考えられる。

表6 実測値(微動)・解析値(固有値計算)の比較

		常時微動 (Hz)		構造解析 ※固有値解析用 割線剛性 $1/1000000\text{rad.}$ (Hz)		解析/実測 割合	
		1次	2次	1次	2次	1次	2次
円覚寺 舍利殿	X方向	2.52	-	1.80	-	0.71	-
	Y方向	2.61	-	1.79	-	0.68	-
建長寺 三門	X方向	1.37	4.00	1.25	3.01	0.91	0.75
	Y方向	1.20	3.27	1.24	2.98	1.04	0.91

⑤ 1次固有振動数と最大耐力の関連付け

円覚寺舍利殿のX方向を代表例として微動時1次固有振動数と最大耐力との関連付けについての検討内容を報告する。

式(3)により荷重変形関係を連続関数として近似することで、各変形角の等価剛性に対応する等価固有振動数の推移を図11に示した。このとき初期剛性に当たる K_0 は、微動時1次固有振動数から算定した。近似する前の荷重変形関係からも同様に等価固有振動数の推移を図示した。また研究代表者が既往研究において提案した、応答変位増加に伴う1次固有振動数変化の推定式(4)から求めた等価固有振動数の推移を同様に図示した。

$$F(x) = (F_0 + K_1 x) \times [1 - \exp(-K_0 x / F_0)] \quad \text{式(3)}^{(5)}$$

$$f(x) = NF_0 - (NF_0 - NF_1) \times [1 - \exp(K_{f1} \cdot x / NF)] \quad \text{式(4)}^{(6)}$$

(ここで、 $K_0 = (2\pi \cdot NF_0)^2 \cdot M$ 、 $NF = NF_0 - NF_1$)

表7 荷重変形関係近似
設定値(舍利殿X方向)

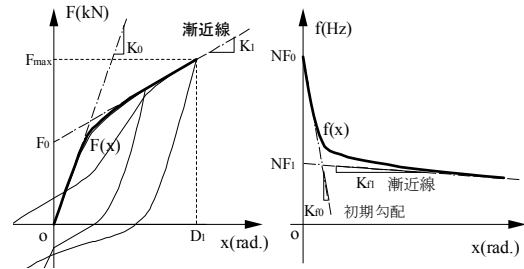
NF0	2.52	(Hz)
M	22.7	(t)
K0	20976	(kN/rad.)
F0	14.90	(kN)
K1	1562	(kN/rad.)
D1	0.015	(rad.)

表8 固有振動数変化
設定値(既往研究⁶⁾)

既往研究運用値	
NF1/NF0	0.6
Kf1/NF0	-250
Kf1/NF0	-7.7

(3) まとめ

微小振動測定に基づく伝統的木造建築の構造性能評価に関する研究として、常時微動測定記録の蓄積と整理、建物形状との相関性の検討、また微動時1次固有振動数と最大耐力との関連付けについて、構造解析を利用した検討から、その可能性を提示した。



(a) Foschi の近似式⁵⁾

(b) 既往研究⁶⁾

図10 荷重変形関係及び固有振動数変化の推定式

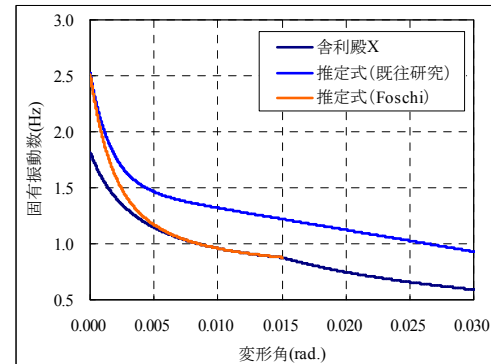


図11 最大耐力時固有振動数の推定(円覚寺舍利殿)

【参考文献】5) Foschi RO: Load-slip characteristics of nails, Wood Sci. 7(1), 69-76, 1974、6)常時微動測定に基づく伝統的木造建築の構造性能評価に関する研究、東京都立大学大学院学位論文、2008

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 千葉一樹、藤田香織、栗田哲、国宝円覚寺舍利殿の構造性能評価、歴史都市防災論文集 Vol.4、pp.173-180、2010.7

〔学会発表〕(計2件)

- ① 千葉一樹、中島裕貴、藤田香織、栗田哲、鎌倉地域における伝統的木造建築物の構造性能評価 その1 円覚寺舍利殿の常時微動測定と重量算定、日本建築学会学術講演梗概集、構造III・C-1、pp.605-606、2010.9
- ② Kazuki CHIBA, Kaori FUJITA, Evaluation of Structural Performance of Existing Traditional Timber Structures in Japan by Microtremor Measurements, World Conference on Timber Engineering 2010, CDR, 2010.6

〔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〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 一樹 (CHIBA KAZUKI)

東京理科大学・工学部第一部建築学科・助教

研究者番号：80516229