

国宝円覚寺舍利殿の構造性能評価

Evaluation of Structural Performance of Engaku-ji Syariden

千葉一樹¹・藤田香織²・栗田哲³

Kazuki Chiba, Kaori Fujita and Satoshi Kurita

¹東京理科大学 助教 工学部第一部建築学科 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6)
Assistant Professor, Tokyo University of Science, Dept. of Arch., Faculty of Engineering

²東京大学大学院 准教授 工学系研究科建築学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
Associate Professor, The Tokyo University, Dept. of Arch., Graduate School of Engineering

³東京理科大学 教授 工学部第一部建築学科 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6)
Professor, Tokyo University of Science, Dept. of Arch., Faculty of Engineering

This paper presents the results of microtremor measurements and evaluation of structural performance of *Engaku-ji Syariden*. *Engaku-ji Syariden* is a simple structure that consists of column-beam joints and column-batten(*Nuki*) joints with timber sidewalls. The stiffness calculated from the natural frequency and the building weight corresponds approximately to the theoretical stiffness (the timber perpendicular to the grain and the overturning resistance of columns). The natural frequency of the first mode is 2.52 Hz, the second mode is 2.61Hz and the torsional mode is 3.01Hz. We find that the maximum strength of the *Engaku-ji Syariden* is about 35.6 kN (CB = 0.16).

Key Words : Cultural Property, Buddhist Hall, Natural Frequency, Initial Stiffness, Seismic Diagnosis

1. はじめに

古くから残る伝統的木造建築は、建築当時の技術や構法・様式をその姿に写し、歴史や文化を現代に伝えている。こうした伝統的木造建築の文化的価値を尊重し、かつ安全に保存・活用していくことは現代に生きる我々の重要な課題である。鎌倉地域には、多くの歴史的建造物や史跡が残されており、鎌倉幕府が置かれた古都の景観を現代に残している。近年、鎌倉地域の都市全体としての歴史遺産に対する意識が高まり、世界遺産登録を目指した取り組みが鎌倉市を中心として行われている。

こうした背景から、鎌倉地域の伝統的木造建築を対象とした建築史における構造様式に関する研究や、景観整備に関する都市計画の研究が進められる一方、構造安全性に着目した研究報告は少ない。既往の研究において、腰原らは鎌倉市内に所在する社寺建築を中心に、1923年関東地震による地震被害状況を整理し耐震性に関する知見をまとめている²⁾、³⁾。また高島らは、立体架構モデルを用いた円覚寺舍利殿の構造安定性に関する解析的検討を進めている⁴⁾。

現在筆者らは、鎌倉地域に所在する社寺建築の構造性能に関する知見を整理し、振動記録を用いた伝統的木造建築の構造性能評価手法を構築することを目的として、寺院本堂や山門を中心とした構造調査を行っている。本論文は、その中でも代表的な国宝円覚寺舍利殿の常時微動測定及び人力加振試験結果と、部材寸法調査及び修理報告書⁵⁾から推定した建物重量と構造解析によって求めた荷重変形関係の算定結果から得られた知見を報告する。本論文は、既往研究¹⁾の内容を元に新たな知見を加え加筆修正を行ったものである。

2. 国宝円覚寺舍利殿

(1) 建物概要

国宝円覚寺舍利殿（以下舍利殿と略す）は、過去に何度か火災により焼失しており、現在の舍利殿は移建された旧太平寺仏殿であることが玉村の研究により明らかにされている⁵⁾。しかしながら、太平寺仏殿の的確な建立年代を示す史料がなかったため、正確な建築年は明らかにされなかった。玉村はその後の研究から、様式細部手法の特徴から判別して、室町前半の建築であることを示している⁵⁾。

建築様式は、禅宗様の典型様式を有する方三間裳階付き中規模仏殿である。正面・背面の中央間に棧唐戸、両端間に花灯窓、側面中央間にも花灯窓を配している。裳階上部頭貫下には弓欄間が一周し、壁はすべて堅張の板壁である。軸部は石の礎盤に丸柱を建て、地覆・腰貫・飛貫・頭貫・台輪により構成される。斗拱は二重尾垂木付き三手先詰組、屋根形式は入母屋造、裳階軒が平行垂木であり、主屋軒は扇垂木になっている。屋根葺材は、こけら葺きである。以前、茅葺であったが、昭和43年の修理に伴う調査により茅葺屋根は当初のものではないことが判明したため、現在のこけら葺屋根に還元されている。内部は全部土間となっており、裳階と主屋を海老虹梁で繋ぎ、主屋中央後方より高い来迎柱を立てている。

図1に舍利殿の基壇平面図、正面立面図また平面図中のA-A'、B-B'位置で描いた断面図を示した。舍利殿の棟高さは約9.3m、裳階柱はφ175、主屋の柱は側柱φ230と来迎柱φ290により構成される。舍利殿は、1923年関東地震により倒壊する被害を受けているが、軸部等の部材の取替を経て1925年に復旧されている。関東地震当時の屋根は茅葺であった。

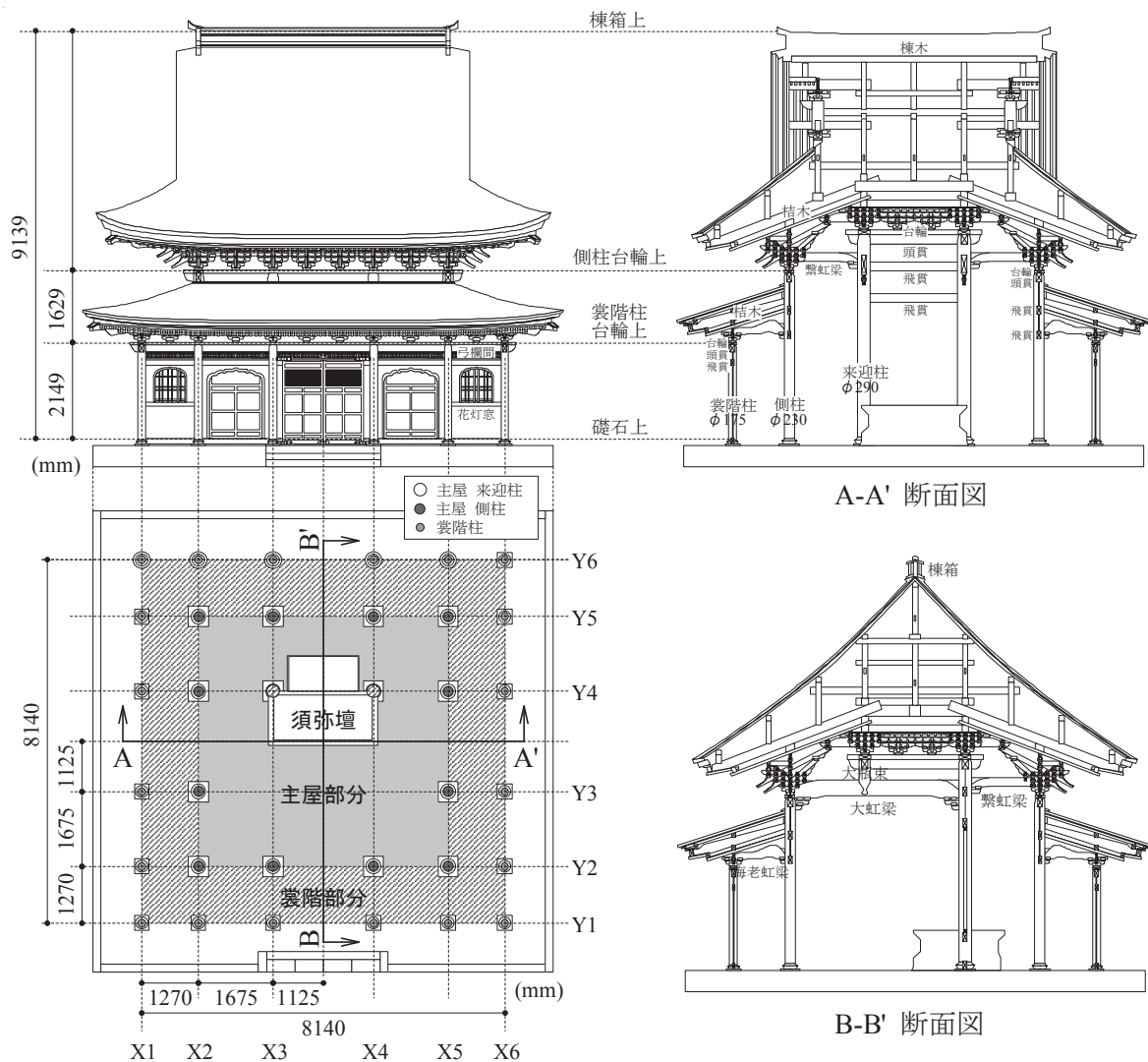


図1 基壇平面図・立面図・断面図

(2) 建物重量

部材寸法調査と修理報告書を元に舍利殿の材積を算定し、部材重量を求めた。このとき各部材の使用樹種を修理報告書を参考に決定し、樹種に対する比重は一般的な数値⁶⁾を採用した。柱・大瓶束・大斗は榿材(0.69t/m³)、台輪・貫・虹梁・垂木は杉材(0.38t/m³)、巻斗・肘木は檜材(0.44t/m³)、桔木・棟木は松材(0.52t/m³)とし、その他の部材はすべて杉材と仮定した。また、図面から屋根面積を推定し、こけら葺の単位面積当り屋根重量^{6),7)}18.6kg/m²を乗じて屋根重量を算定した。

表1に各部重量の算定結果と総重量に対する割合、裳階・主屋部分の平面積と屋根面積を示した。算定結果は、総重量24.3t(裳階部分8.1t、主屋部分16.3t)、総平面積66.3m²、総屋根面積200m²となった。既往研究⁴⁾では、総屋根面積207m²、総重量16.1t(157.92kN)と算定されており、総屋根面積は概ね同様の結果を示したが、総重量は本論文の方が大きな値を示す結果となった。各部重量比率の比較から、裳階重量が全体の約3割を占め、主屋重量の半分程度であることがわかる。また裳階・主屋ともに小屋組重量の占める割合が約半分を占めている。

図2に既往研究で報告されている寺院仏殿の屋根葺き材別総重量と、平面積の関係⁷⁾に舍利殿を追加した。こけら葺の事例は母数が少ないため定量的な見方が難しいが、本論文で算定した舍利殿の重量は概ね既往の研究が示す傾向と一致していることが確認できる。

表1 舍利殿の建物重量と各部面積

部位	部材	重量 (t)	重量比 (/合計*100)	平面積 (m ²)	屋根面積 (m ²)
裳階	軸部	1.48	6%	34.9	82.2
	斗拱	0.20	0.8%		
	小屋組	4.60	19%		
	屋根	1.53	6%		
	壁	0.17	1%		
	建具・造作	0.11	0.4%		
小計		8.10	33.2%		
主屋	軸部	3.13	13%	31.4	117
	斗拱	1.78	7%		
	壁	0.18	0.7%		
	小屋組	9.02	37%		
	屋根	2.18	9%		
小計		16.3	66.8%		
総重量		24.4		66.3	200

(※重量表の値は既往研究⁴⁾から斗拱部分の結果に修正を加えた。)

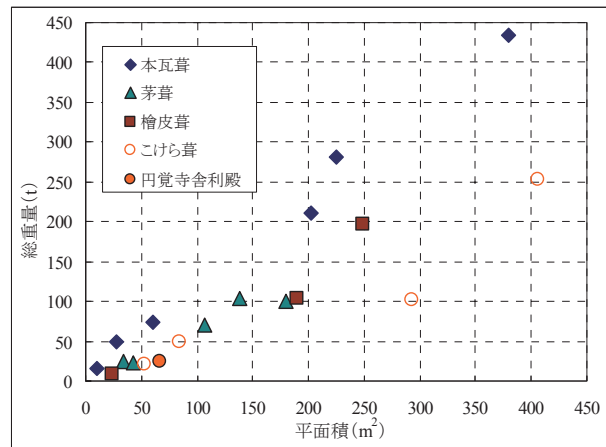


図2 寺院仏殿の総重量と平面積の関係⁷⁾

3. 微小振動測定

(1) 測定概要

微小振動計測には14台の速度計(東京測振製VSE-15D)を使用した。図3に測定計画の概要を示した。裳腰柱台輪上に4台、側柱台輪上に7台の微動計を設置し、残り3台は基壇上に設置し、地盤振動計測を行った。常時微動測定は300秒間、人力加振試験は加振開始から共振後、自由振動部分を含む60秒間計測を行った。サンプリング周波数は200Hzとした。(※人力加振試験は、図3に示す加振位置の柱を人力によって強制加振する試験である。常時微動測定から得られた1次固有振動数によって共振させ、定常振動からの減衰振動波形を計測する。)

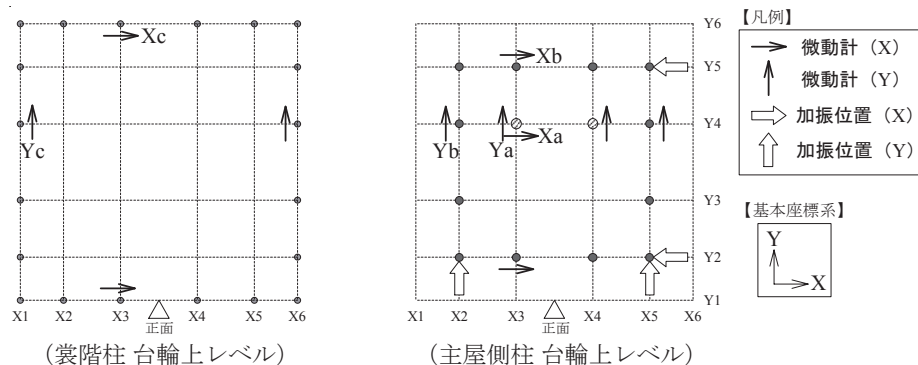


図3 微小振動測定 測定計画概要

(2) 常時微動測定結果

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⁸⁾。なお解析には全計測波形(300秒)に対して、40.96秒間隔で40.96/2秒ずつ解析範囲をずらして平均化を行うアンサンブル平均を行っている。図4、図5に求めた伝達関数を示した。伝達関数は、図3中Xa~Xc、Ya~Ycにおける解析結果を代表例として示した。また特定した卓越振動数に対応する振動モード図を図6に示した。

伝達関数から2.52Hz、2.62Hzに1次、2次の卓越が見られる。振動モード図から、2.52HzはX方向並進、2.62HzはY方向並進の振動モードであることが読み取れるが、純粋な並進ではなく若干斜めに振動する性状が認められる。このことは、1次と2次で固有振動数が近いことによる連成振動が示唆される。3次の3.10Hzでは明瞭な捩れ振動モードが励起されている。4次の6.79HzではY方向並進が励起されているが、この振動モードが励起される理由については今後詳細な分析が必要である。また、減衰定数は伝達関数の1次、2次卓越部分におけるCurve Fittingにより算定した。常時微動時の減衰定数は1次で1.86%、2次で1.17%であった。表2に算出した固有振動数と減衰定数をまとめた。

(3) 人力加振試験結果

自由振動波形から1波あたり振動周期平均値を求め、固有振動数を算出した。また対数減衰率により減衰定数を求めた。表3に人力加振試験結果をまとめる。自由振動時の固有振動数は、常時微動時に比べ低下し、減衰定数は上昇している。常時微動時の応答変位は最大でも0.01mm程度であるのに対して、人力加振時は0.36mm程度の応答を計測していることから、固有振動数と減衰定数の振幅依存性の影響が示唆される。

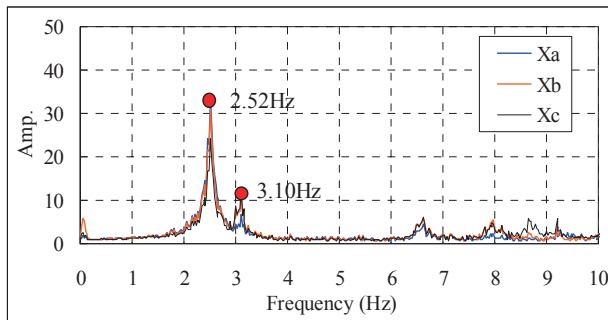


図4 伝達関数 (X方向)

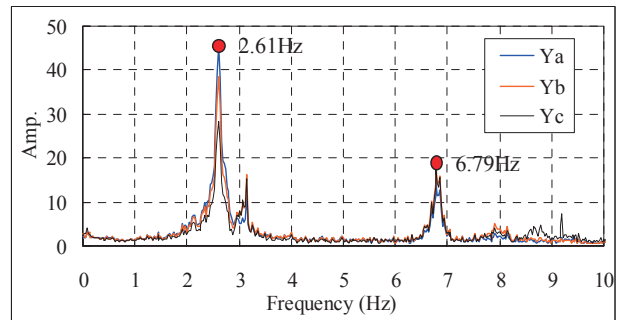


図5 伝達関数 (Y方向)

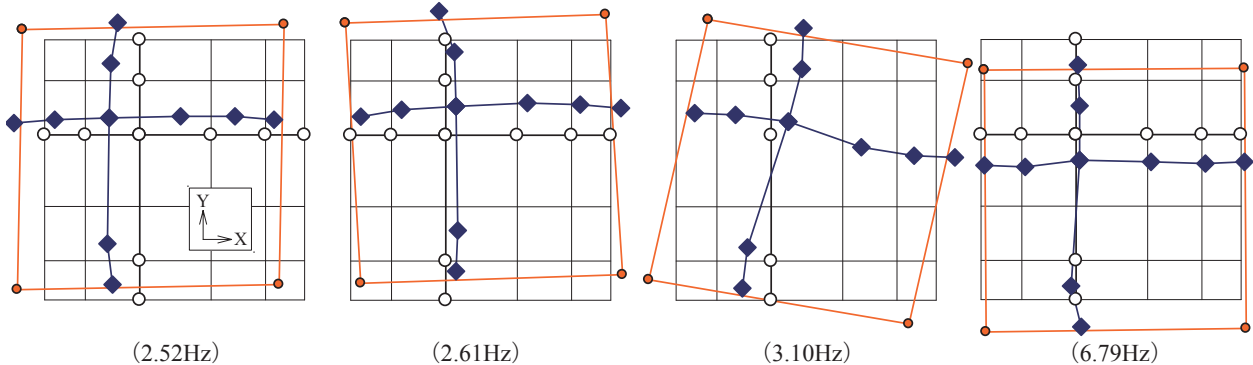


図6 振動モード図

表2 常時微動測定結果まとめ

	固有振動数 (Hz)	振動モード	減衰定数 Curve Fitt (%)	減衰定数 対数減衰率 (%)
1次	2.52	X方向並進 (直交成分と連成)	1.86	3.2~3.7
2次	2.61	Y方向並進 (直交成分と連成)	1.17	2.8~3.9
3次	3.10	平面捩れ	-	-
4次	6.79		-	-

表3 人力加振試験結果まとめ

加振方向	最大応答 (mm)	固有振動数 (Hz)	減衰定数 対数減衰 (%)	平均 固有振動数 (Hz)	平均 減衰定数 (%)
X	0.355	2.31	3.71	2.32	3.40
	0.329	2.32	3.34		
	0.320	2.32	3.15		
Y	0.218	2.20	3.52	2.37	3.37
	0.268	2.44	3.78		
	0.244	2.46	2.81		

4. 構造解析

(1) 仮定条件

部材寸法調査と修理報告書に記載される情報を元に、舍利殿の構造解析を各構面に分けた簡略計算によって行い舍利殿の水平耐力を求めた。このとき、各算定項目に対して以下のような仮定条件を設けた。

(荷重計算)

- ① 2. (2)項で求めた建物重量算定結果に基づき各柱に負担される軸方向力を算定する。
- ② 屋根荷重（屋根葺材および小屋組の重量）は軒面に均一に作用するものとする。
- ③ 軒面にかかる荷重は、隣接柱との中点で区切られる負担面積比により柱頭に負担する。
- ④ 裳階の屋根荷重も同様にして裳階柱と主屋側柱の柱頭に負担する。
- ⑤ 柱の自重はその半分が柱頭に鉛直荷重としてかかるものとする。
- ⑥ 柱半分より下に位置する部材、建具、裳階周板壁の重量は無視する。

(水平耐力要素)

- ① 舍利殿の水平耐力要素は柱貫接合部の回転剛性と柱の転倒復元力のみで構成されるものとする。
- ② 斗拱及び小屋組部分の水平構面剛性は十分にあると仮定し、頭貫より上を剛体とする。
- ③ 板壁や小壁また建具などの余力は無視する。
- ④ 層高さは主屋側柱高さ（3699mm）とする。
- ⑤ 層変位に対して主屋柱と裳階柱もすべて同じ回転角を有するものとする。
- ⑥ 水平耐力は各構面ごとに算定し、その総和を建物全体の水平耐力とする。

(2) 計算方法

a) 接合部回転剛性

柱貫接合部の回転剛性は、式(1)、図7の稲山の木材めり込み計算⁹⁾によって算定した。式(1)はめり込み抵抗によるモーメントとめり込み面摩擦によるモーメントの和を示す。木材の基準弾性係数 E ・めり込みの基準材料強度 F_{cv} には、樺材 $8.0(\text{kN/mm}^2) \cdot 10.8(\text{N/mm}^2)$ 、杉材 $7.0(\text{kN/mm}^2) \cdot 6.0(\text{N/mm}^2)$ を採用した¹⁰⁾。接合部回転剛性の復元力特性は、弾性限界変形角を降伏点にした完全弾塑性モデルとして計算を行った。

$$K_R = \frac{x_p^3 y_p C_y E_{\perp}}{Z_0} \left\{ C_x d + \frac{1}{3} \right\} + \frac{x_p^2 y_p C_y E_{\perp}}{Z_0} \left\{ C_x d + \frac{1}{2} \right\} \mu \cdot Z_0 \quad (1)$$

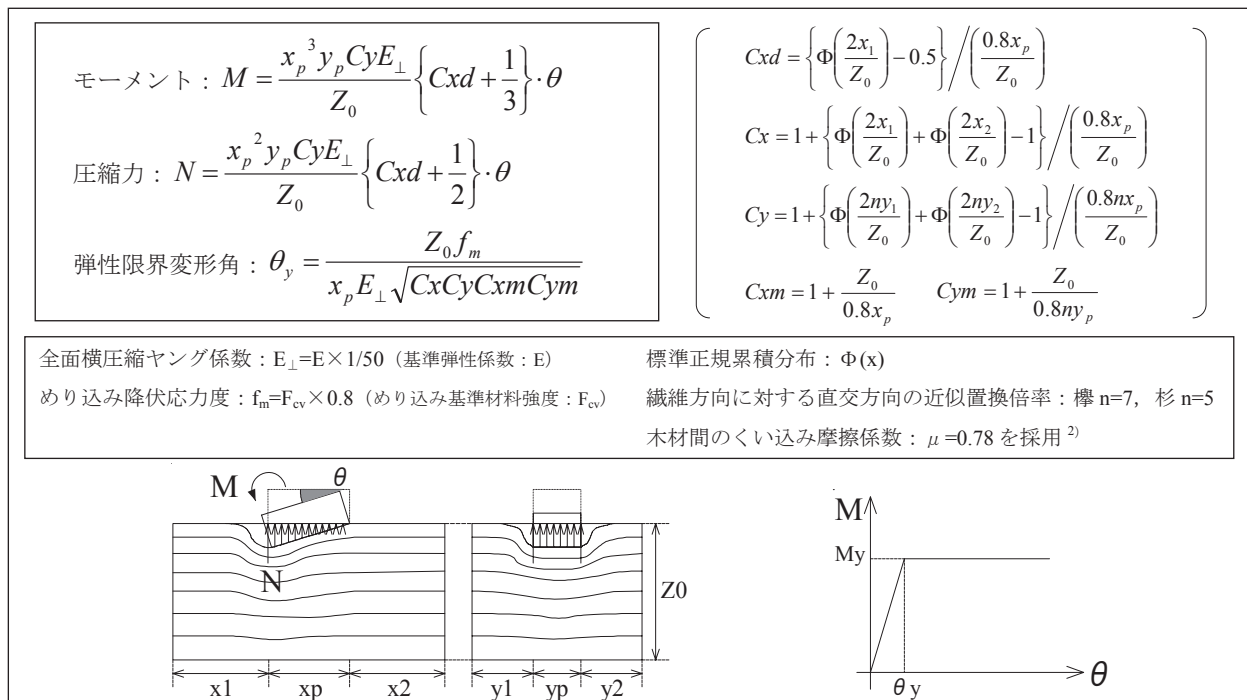


図7 木材のめり込み計算⁹⁾

b) 柱の転倒復元力

柱の転倒復元力は、坂の式(2)、図8によって算定した¹¹⁾。

$$P = H_0 \left\{ 1 - (\delta/b) + 0.99625e^{-7.5675(\delta/b)} - \frac{1.9963}{25(\delta/b)+1} \right\} \quad (2)$$

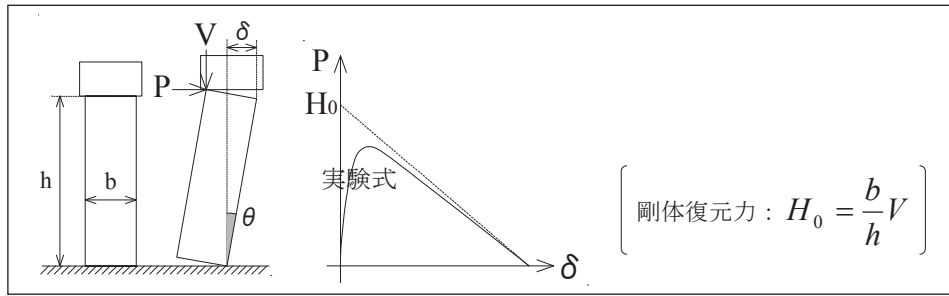


図8 柱の転倒復元力計算¹¹⁾

c) 構面解析モデル

各構面別に、木材のめり込み計算による接合部回転バネと、柱の転倒復元力による柱脚回転バネで構成した骨組解析モデルを作成し、舍利殿の水平耐力を求めた。図9に各構面の解析モデル概要を示す。図9には、めり込み計算により算定した回転剛性の数値も合わせて示した。接合部剛性で負担される水平耐力は静的増分解析によって算定し、別途算定した柱の転倒復元力特性を足し合わせて各構面の水平耐力を求めた。このとき接合部回転剛性の降伏変形角は、各接合部のめり込み降伏変形角の最小値を採用した。

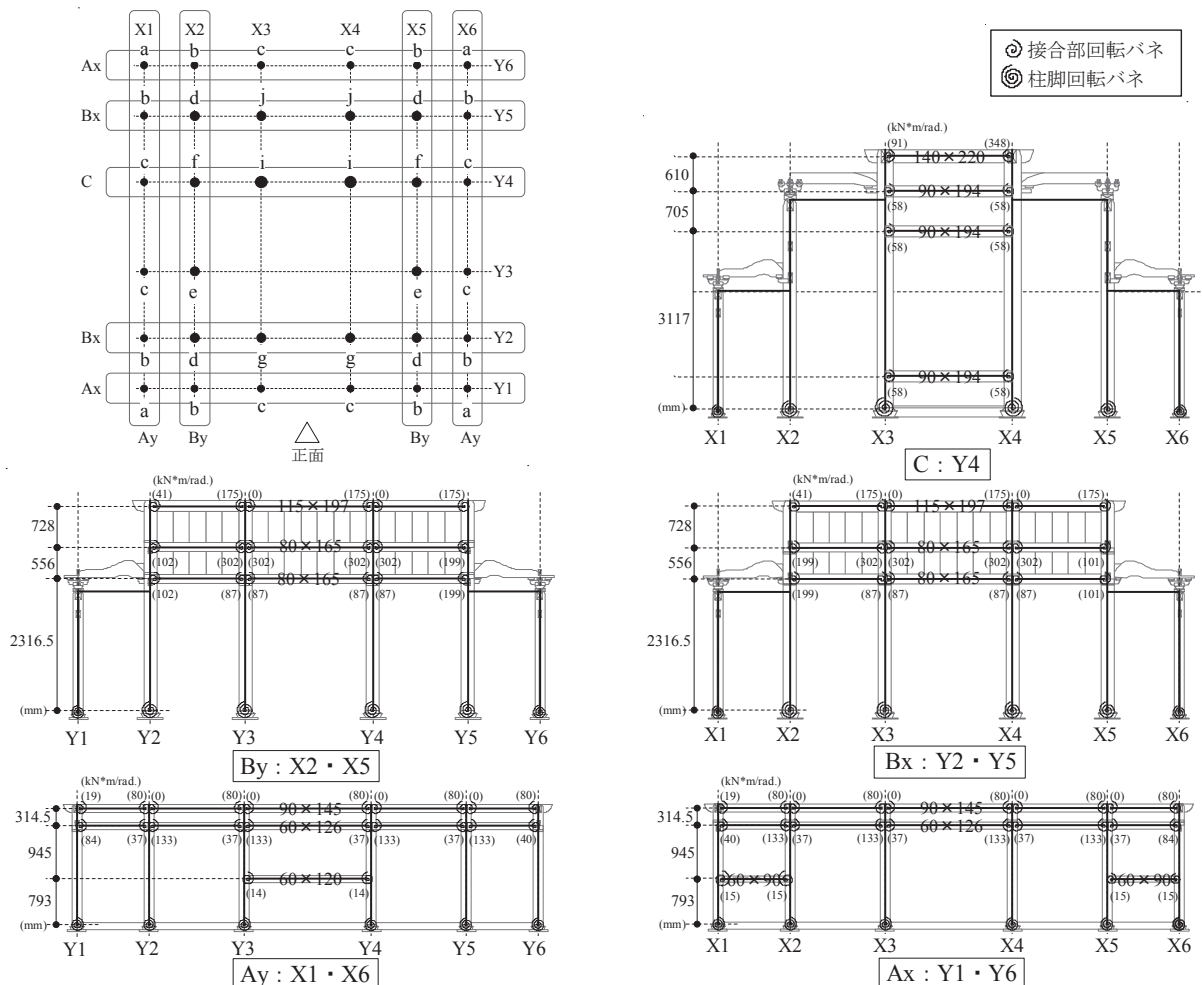


図9 構面解析モデル

図 10 に舍利殿の柱貫接合部と柱の回転によって生じるめり込み部分の推定図を示した。部材寸法調査では柱内部の接合部詳細までを把握することができなかつたため、外観からの推定と文献 2)を参考に、図 10 に示す接合部形状とめり込み面を仮定した。本論文では楔部分の木材繊維方向同士のめり込みは詳細に検討しておらず、単純に材厚が増したものとして換算した。また、式(1)における摩擦による回転モーメントは、特に部材の拘束が十分に期待できる図 10・iiiの通し貫接合部にのみ適用し、その他の接合部では部材間摩擦力の計算は考慮しないものとした。

表 4 に各構面の接合部回転剛性の算定結果と方向別に足し合わせた構面剛性を示した。また、表 5 に各柱の寸法と柱軸力、剛体復元力の算定結果を示した。なお柱軸力は荷重計算の仮定条件に基づいて算定した。

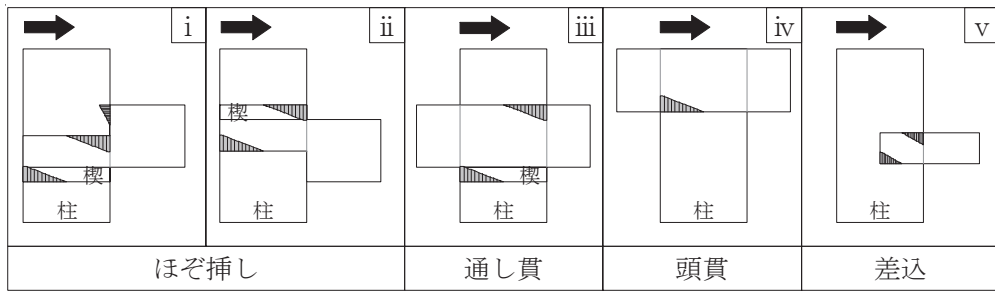


図 10 舍利殿の柱貫接合部とめり込み面の推定

表 5 各構面の柱の転倒復元力 計算結果

表 4 各構面の接合部回転剛性 計算結果

	構面		面数	接合部剛性		構面剛性	降伏変形角			
				Np	pKr			pKr×Np	KR	θ_y
					(kN/rad.)			(kN/rad.)		
裳階	Ax	X	2	368	735	1792	0.018			
主屋	Bx		2	456	913					
	C		1	144	144					
裳階	Ay	Y	2	366	732	1645	0.018			
主屋	By		2	456	913					

	柱		本数	柱寸法		柱軸力	剛体復元力			
				Nc	柱径		高さ	H0	H0×Nc	
					(mm)		(mm)			(t)
裳階	a	XY	4	175	2125	0.32	0.26	1.03		
	b		8			0.27	0.22	1.72		
	c					0.34	0.27	2.18		
主屋	d	XY	4	230	3699	1.41	0.86	3.43		
	e					1.02	0.62	1.25		
	f					1.03	0.63	1.26		
	g		2			1.34	0.82	1.63		
	i					290	4542	1.06	0.66	1.33
	j					500	3699	1.03	1.37	2.74

(3) 解析結果

各方向別に求めた耐力要素別の荷重変形関係と、舍利殿の荷重変形関係を図 11 に示した。解析結果から、舍利殿の最大耐力は X 方向で 38.3(kN)、Y 方向で 35.6(kN)と求められた。また、柱半分より上に位置する部材荷重から、舍利殿の地震時重量を 22.7(t)と算定し、ベースシア係数を換算すると X 方向で $CB_x=0.17$ 、Y 方向 $CB_y=0.16$ となる。表 6 に X 方向の耐力要素別の負担水平耐力と層全体に対する比率を示した。変形角が大きくなるに従い、接合部剛性の負担水平耐力が増加していることが分かる。

表 6 耐力要素別 負担水平耐力と比率

R (rad.)		1/200	1/100	1/50	1/40
		0.005	0.010	0.020	0.025
X	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)
	層	22	31	37	36

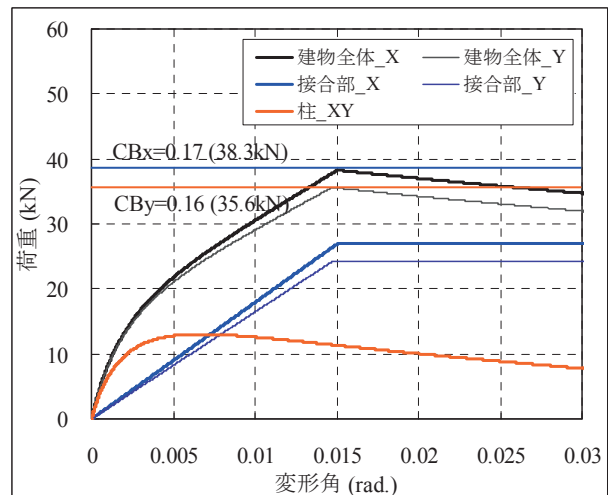


図 11 円覚寺舍利殿 荷重変形関係

(4) 微小振動測定結果との比較

構造計算結果から求めた荷重変形関係に基づいて、常時微動測定時の応答変位に相当する 1/36990rad.時の割線剛性とまた、1/200、1/100rad.時の割線剛性から求めた固有振動数を表 7 に示した。表中数値下の括弧に示した値は常時微動測定結果に対する割合である。このとき各変形角別の固有振動数算定には、地震時荷重 22.7(t)を使用した。表 7 から、本論で求めた固有振動数の解析値は常時微動測定結果と一致しなかった。このことは、水平耐力要素に含めなかった、構造要素が微小振幅範囲では初期剛性に影響していることを示している。また一方、主要な耐力要素の影響が支配的となる 1/200rad.、1/100rad.で比較すると、微動時に比べ 0.36 倍～0.45 倍程度の固有振動数となることがわかった。今回の算定結果は、一例にすぎないが、禅宗様の仏殿における微小振動特性と構造性能の関係を示す、ひとつの指標として考えることができる。今後さらに実測及び算定結果の蓄積を増やし、その妥当性を検証する必要がある。

表 7 実測値と解析値における固有振動数の比較

常時微動測定結果		固有振動数 (Hz)	
		X	Y
		2.52	2.61
構造 解析結果	1/36990	1.80	1.79
		(0.71)	(0.68)
	1/200	1.15	1.13
		(0.45)	(0.43)
	1/100	0.96	0.94
		(0.38)	(0.36)

(※常時微動時応答変位 0.01mm (変形角 1/36990rad.))

また一方、主要な耐力要素の影響が支配的となる 1/200rad.、1/100rad.で比較すると、微動時に比べ 0.36 倍～0.45 倍程度の固有振動数となることがわかった。今回の算定結果は、一例にすぎないが、禅宗様の仏殿における微小振動特性と構造性能の関係を示す、ひとつの指標として考えることができる。今後さらに実測及び算定結果の蓄積を増やし、その妥当性を検証する必要がある。

5. まとめ

国宝円覚寺舍利殿の微小振動測定と部材寸法調査の結果から、円覚寺舍利殿の基礎的な振動特性の把握と構造解析を行った。以下に本論文で得られた知見と今後の課題を示す。

- ① 円覚寺舍利殿の建物重量は24.4(t) (地震時重量22.7(t)) であり、既往研究の傾向と概ね一致した。
- ② 円覚寺舍利殿の基礎振動特性として、桁行並進2.52Hz、梁間並進2.61Hz、捩れ3.10Hzを特定した。
- ③ 構造解析の結果から、円覚寺舍利殿の保有耐力をCB=0.16～0.17 (35.6～38.3kN) と推定した。

今後、微小振動測定結果との比較を適切に行うため、微動時に影響する構造要素の特定と評価が必要である。また、捩れ振動や高次の卓越を説明する立体架構解析モデル構築を進める必要がある。

謝辞：本報の常時微動測定及び構造調査は、円覚寺住職長様、齊藤和尚様のご協力を頂きました。また、東洋大学の松田昌洋氏、徳島大学の佐藤弘美氏、東京大学の渡部昌弘氏、中島裕貴氏、東京理科大学栗田研究室の学生諸氏のご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。なお本研究は平成 21 年度科学研究費補助金による若手研究 (スタートアップ) 「微小振動測定に基づく伝統的木造建築の構造性能評価手法に関する研究」の一環として行いました。

参考文献

- 1) 千葉一樹ほか：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、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009.9
- 2) 腰原幹雄：関東地震による鎌倉市内の社寺等の被害に関する研究、東京大学修士論文、1994.2
- 3) 腰原幹雄ほか：1923 年関東地震による鎌倉の社寺の被害、日本建築学会構造系論文集 第 573 号、pp.129-135、2003.11
- 4) 高島英幸ほか：円覚寺舍利殿を対象とした歴史的木構造物の立体フレーム構造解析 その1～4、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I B-1、pp.323-326、2008.9、pp.869-872、2009.8
- 5) 国宝円覚寺舍利殿修理調査特別報告書、編集：神奈川県教育委員会、1970.10
- 6) 重要文化財 (建造物) 基礎診断実施要領、文化庁、平成 13 年
- 7) 大野敏ほか：文化財建造物の重量について－重要文化財仏堂の重量速算法の再検討－、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-2、pp.305-306、2001.9
- 8) 和泉正哲ほか：常時微動の多点同時記録に基づく構造物の振動性状の評価手法について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B、構造 I、pp.875-876、1986.7
- 9) 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
- 10) 木質構造の設計 学びやすい構造設計シリーズ、日本建築学会関東支部、2008.1
- 11) 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