

興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：興福寺東金堂

文化財種別（指定年月日）：特別保護建造物（明治 30 年 12 月 28 日）

国宝（昭和 27 年 3 月 29 日）

所在地：奈良県奈良市

所有者（管理団体）：宗教法人 興福寺

構造形式：桁行七間・梁間四間、一重、寄棟造、本瓦葺

建築年：室町時代 応永 22 年（1415）

事業名称：国宝興福寺五重塔保存修理事業

事業期間：調査工事 令和 2 年 9 月 1 日～令和 4 年 9 月 30 日

本体工事 令和 4 年 6 月 1 日～令和 13 年 3 月 31 日（予定）

工事種別：屋根葺替および部分修理

事業者：宗教法人 興福寺

設計監理：奈良県文化財保存事務所

実験計画者：清水建設株式会社

実験機関：同 NOVARE Lab.

実験年月日：令和 6 年（2024）1 月 29 日 ～2 月 14 日

引用・参考文献：

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，技法堂，1996.

●実験に至る経緯と目的

興福寺五重塔（室町時代 応永 33 年（1426））の隅部大斗（ケヤキ材）に破損が見られるため構造性能解析を行ったところ、現行法規上の長期許容応力度を超越する軸力（繊維直交方向の全面圧縮）を負担していることが示された。しかし、現行法規で定める基準強度は今日一般に調達できる木材を想定した値となっており、中世興福寺が調達した当該部材の実強度とは異なっている可能性がある。

ところで、五重塔と同時代（応永造営期）に再建された興福寺東金堂（室町時代 応永 22 年（1415））は昭和 14 年に解体修理を受けており、その際の不再用部材が東金堂小屋裏および境内建物内に保管されていた。今回の実験は、これら東金堂古材のうち所有者から提供を受けた二部材（杵肘木上巻斗および尾垂木上斗。いずれもケヤキ材。）を用いて材料強度試験を行い、五重塔大斗の材料強度推定を目的とした。

●姿図・寸法

【使用材料】

五重塔に隣接する東金堂（国宝）が塔と同時代に建設された建物であり、解体修理の際に取り外されて保管されていた二部材（尾垂木上斗および杵肘木上巻斗。いずれもケヤキ材。[写真 1 参照]）から材料試験片を採取した。

なお、試験体を製作した二部材に対して放射性炭素年代測定を行って下表の結果を得た。二部材とも最外年輪部に辺材は含まれず、部材加工された外に 50 年輪程度の木材幅があると考えれば東金堂の来歴（1411 年：前身堂焼失、1415 年：現堂再建）と矛盾しない。したがって、二部材とも現東金堂の当初材だったと考えられる。

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

・放射性炭素年代に基づくウィグルマッチング結果

	1 σ 暦年代範囲	2 σ 暦年代範囲
東金堂_尾垂木上斗の最外年輪年代	1367calAD - 1377calAD (68.3%)	1360calAD - 1381calAD (95.4%)
東金堂_枅肘木上巻斗の最外年輪年代	1362calAD - 1382calAD (68.3%)	1356calAD - 1389calAD (95.4%)

【試験体寸法】

試験体寸法は JIS Z2101 に定める範囲内の寸法の大きさとした。表 1～7 および図 1～6 に各試験における試験体の諸元および試験体図を示す。なお含水率計測用の試験片については、曲げ試験終了後の A 曲げおよび B 曲げの試験体から採取した試験片を用いた。

表 1 縦圧縮試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1～6縦	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×50	6	繊維方向に加力
B-1～5縦	枅肘木上巻斗	ケヤキ	25×25×50	5	繊維方向に加力

表 2 横圧縮試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1～9追	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×50	9	追桁_放射方向+約45° 方向に加力
A-1～5中間				5	中間_桁目と追桁の中間
A-1～9桁				9	桁目_放射方向に加力
B-1～8追	枅肘木上巻斗	ケヤキ	25×25×50	8	追桁_放射方向+約45° 方向に加力
B-1～5中間				5	中間_桁目と追桁の中間
B-1～9桁				9	桁目_放射方向に加力

表 3 部分圧縮試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1～5部	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×90	5	放射方向に木表から加力
B-1～7部	枅肘木上巻斗	ケヤキ	25×25×90	7	放射方向に木表から加力

表 4 曲げ試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1～4水	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×25	3	A曲げ試験片から採取
B-1～3水	枅肘木上巻斗			3	B曲げ試験片から採取

表 5 セン断試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1～7せ	尾垂木上斗	ケヤキ	外形 25×25×50 切欠き	7	せん断面を板目面として繊維方向に加力
B-1～9せ	枅肘木上巻斗		25×10×10	9	せん断面を板目面として繊維方向に加力

表 6 含水率試験_試験体一覧

試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1~4水	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×25	4	A曲げ試験片から採取
B-1~3水	枳肘木上巻斗			3	B曲げ試験片から採取

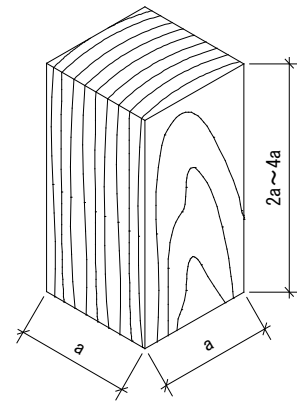


(a) 尾垂木上斗



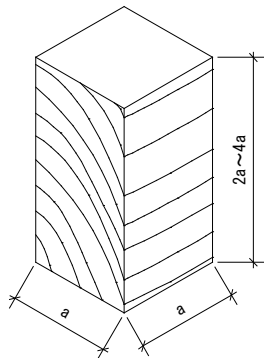
(b) 枳肘木上巻斗

写真 1 東金堂に保管されていた二部材



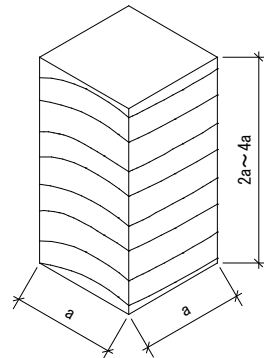
$a=25\text{mm}$, 高さ $H=2a=50\text{mm}$

図 1 縦圧縮試験_試験体図



$a=25\text{mm}$, 高さ $H=2a=50\text{mm}$

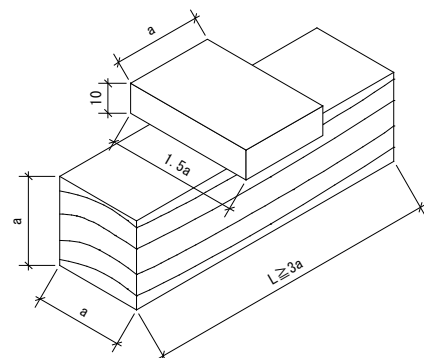
(a) 追杢



$a=25\text{mm}$, 高さ $H=2a=50\text{mm}$

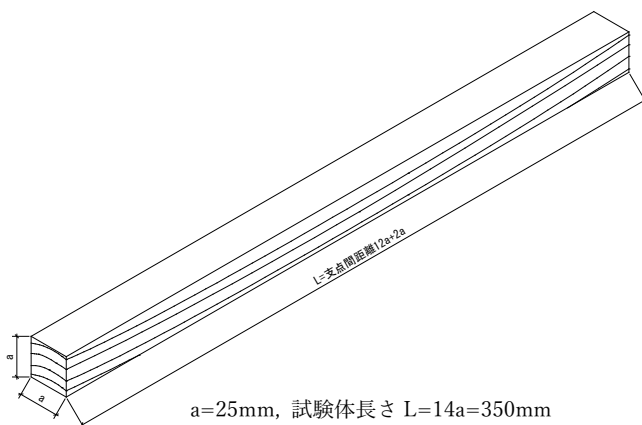
(b) 枳目

図 2 横圧縮試験_試験体図



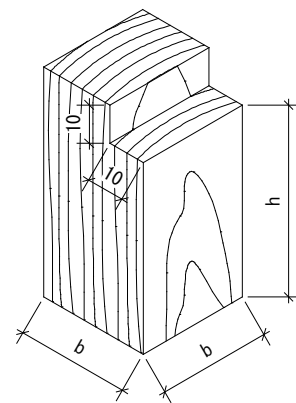
$a=25\text{mm}$, 試験体長さ $L \geq 3a=90\text{mm}$

図 3 部分圧縮試験_試験体図



$a=25\text{mm}$, 試験体長さ $L=14a=350\text{mm}$

図 4 曲げ試験_試験体図



$b=25\text{mm}$, $h=40\text{mm}$

図 5 せん断試験_試験体図

●概要

五重塔と同時代に建設された東金堂由来の斗から、25mm×25mm 角の小試験体を切り出し、縦圧縮試験体、横圧縮試験体、部分圧縮試験体、曲げ試験体、せん断試験体を作成した。加力前に試験体を恒温恒湿室（温度 20±1℃、湿度 RH60±5%）にて質量を安定させて寸法計測を行った後、アムスラー型万能試験機（最大容量 500kN）およびオートグラフ（最大容量 300kN）を用いて加力試験を実施した。含水率については、全試験片の質量安定後に水分計を用いた計測（全数）と、曲げ試験終了後の試験体の非破壊部分から採取した試験片での全乾法による計測の 2 つの方法を実施した。

●実験方法

1) 縦圧縮試験

試験は、繊維平行方向に圧縮荷重を加え、負荷開始から 1～2 分で破壊するように一定の速度で加力する。変位の測定は、試験体の両端から辺長 a=25mm の 1/2 以上離れた領域において、相対する面上に二つの標点を定め、接触式変位計を用いて標点距離の測定を行う。

式 1 に縦圧縮強さ σ_c 、式 2 に縦圧縮比例限度応力 σ_{cp} 、および式 3 に縦圧縮ヤング係数 E_c の算出方法、図 6 に各記号の概念図を示す。本試験では最大荷重 P_{cm} の 10% および 40% に該当する点 $P_{cm0.1}$ および $P_{cm0.4}$ を通る直線の傾きを弾性剛性と仮定し、 $P_{cm0.1}$ と $P_{cm0.4}$ 以降の点との割線剛性が弾性剛性の 95% を下回る直前の点を比例限度荷重 P_{cp} と定義する。

$$\sigma_c = \frac{P_{cm}}{A}$$

式 1

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{cp}}{A}$$

式 2

$$E_c = \frac{\Delta P l}{\Delta l A}$$

式 3

ここに、 σ_c	: 縦圧縮強さ [N/mm ²]
P_{cm}	: 最大荷重 [N]
A	: 試験体の断面積 [mm ²]
σ_{cp}	: 縦圧縮比例限度応力 [N/mm ²]
P_{cp}	: 比例限度荷重 [N]
E_c	: 縦圧縮弾性係数 [N/mm ²]
ΔP	: 比例限度領域における上限荷重と 下限荷重との差 [N]
l	: 標点距離（試験体高さ）[mm]
Δl	: ΔP に対応する変位 [mm]

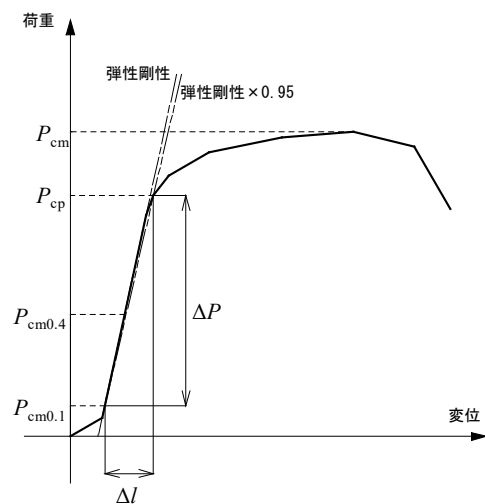


図 6 各記号の概念図_縦圧縮試験

2) 横圧縮試験

試験は、追桁の試験体は放射方向+約 45° 方向、桁目の試験体は放射方向、中間の試験体は追桁と桁目の試験体の中間方向に圧縮荷重を加え、負荷開始から 1～2 分で比例限度応力に到達するように一定の速度で加力する。変位の測定は、試験体の両端から辺長 a=25mm の 1/2 以上離れた領域において、相対する面上に二つの標点を定め、接触式変位計を用いて標点距離の測定を行う。

式 4 に横圧縮比例限度応力 σ_{cp90} 、および式 5 に横圧縮ヤング係数 E_{c90} の算出方法、図 7 に各記号の概念図を示す。本試験ではケヤキの繊維直交方向の基準材料強度（全面圧縮時 4.2[N/mm²]）から求まる荷重 P_{c90st} および、その 50% に該当する点 $P_{c90st0.5}$ を通る直線の傾きを弾性剛性と仮定し、 $P_{c90st0.5}$ と P_{c90st} 以降の点との割線剛性が弾性剛性の 95% を下回る直前の点を比例限度荷重 P_{cp90} と定義する。

$$\sigma_{cp90} = \frac{P_{cp90}}{A} \quad \text{式 4}$$

$$E_{c90} = \frac{\Delta P l}{\Delta l A} \quad \text{式 5}$$

ここに、 σ_{cp90} : 横圧縮比例限度応力 [N/mm²]
 P_{cp90} : 比例限度荷重 [N]
 A : 試験体の断面積 [mm²]
 E_{c90} : 横圧縮弾性係数 [N/mm²]
 ΔP : 比例限度領域における上限荷重と
 下限荷重との差 [N]
 l : 標点距離（試験体高さ）[mm]
 Δl : ΔP に対応する変位 [mm]

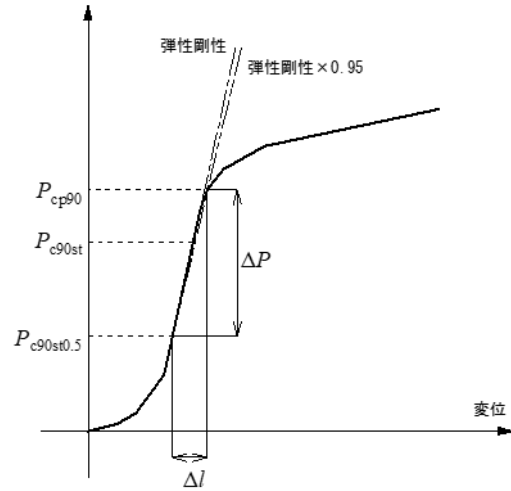


図 7 各記号の概念図_横圧縮試験

3) 部分圧縮試験

試験は、試験体中央に置いた加圧板（25×37.5×10mm）の上から木材の半径方向に圧縮荷重を加え、負荷開始から 1～2 分で辺長 a=25mm の 5%の変形（本試験体では 1.25mm）が生じるように一定の速度で加力する。

式 6 に部分圧縮比例限度応力 σ_{pcp} 、および式 7 に 5%部分圧縮強さ $\sigma_{pc5\%}$ の算出方法、図 8 に各記号の概念図を示す。本試験ではケヤキの繊維直交方向の基準材料強度（材中央部のめり込み 10.8[N/mm²]）から求まる荷重 P_{pcst} および、その 50%に該当する点 $P_{pcst0.5}$ を通る直線の傾きを弾性剛性と仮定し、 $P_{pcst0.5}$ と P_{pcst} 以降の点との割線剛性が弾性剛性の 95%を下回る直前の点を比例限度荷重 P_{pcp} と定義する。

$$\sigma_{pcp} = \frac{P_{pcp}}{A} \quad \text{式 6}$$

$$\sigma_{pc5\%} = \frac{P_{pc5\%}}{A} \quad \text{式 7}$$

ここに、 σ_{pcp} : 部分圧縮比例限度応力 [N/mm²]
 P_{pcp} : 比例限度荷重 [N]
 A : 試験体の断面積 [mm²]
 $\sigma_{pc5\%}$: 辺長 a の 5% 部分圧縮強さ [N/mm²]
 $P_{pc5\%}$: 辺長 a の 5% 変形時の荷重 [N]

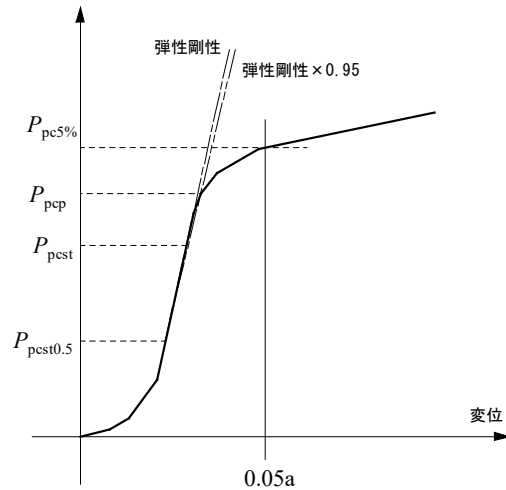


図 8 各記号の概念図_部分圧縮試験

4) 曲げ試験

試験は、両支点間の中央に曲げ荷重を生じさせる、中央集中荷重方式とし、試験体が破壊するまで一定の速度で加力する。支点はナイフエッジの上に鋼板（50×37.5×4mm）を載せた治具で、荷重点は曲率半径 30mm の鋼製の円柱とする[図 9]。変位の測定は、試験体のスパン中央部のたわみを、接触式変位計を用いて測定する。

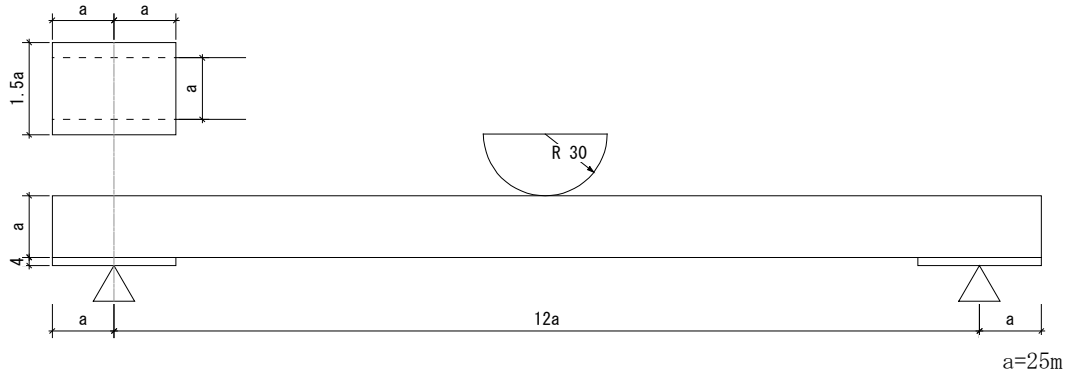


図9 加力図

式8に曲げ強さ σ_b 、式9に曲げ比例限度応力 σ_{bp} 、および式10に見掛けの曲げヤング係数 E_{b-ap} の算出方法、図10に各記号の概念図を示す。本試験では最大荷重 P_{bm} の10%および40%に該当する点 $P_{bm0.1}$ および $P_{bm0.4}$ を通る直線の傾きを弾性剛性と仮定し、 $P_{bm0.1}$ と $P_{bm0.4}$ 以降の点との割線剛性が弾性剛性の95%を下回る直前の点を比例限度荷重 P_{bp} と定義する。

$$\sigma_b = \frac{P_{bml}}{4Z}$$

式8

$$\sigma_{bp} = \frac{P_{bpl}}{4Z}$$

式9

$$E_{b-ap} = \frac{\Delta P l^3}{48 I \Delta y}$$

式10

ここに、 σ_b : 曲げ強さ [N/mm²]
 P_{bm} : 最大荷重 [N]
 l : 支点間距離 (12a = 300mm) [mm]
 Z : 断面係数 $Z = a^3 / 6$ [mm³]
 σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 [N/mm²]
 P_{bp} : 比例限度荷重 [N]
 E_{b-ap} : 見かけの曲げ弾性係数 [N/mm²]
 ΔP : 比例限度領域における上限荷重と下限荷重との差 [N]
 I : 断面2次モーメント $I = a^4 / 12$ [mm⁴]
 Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ [mm]

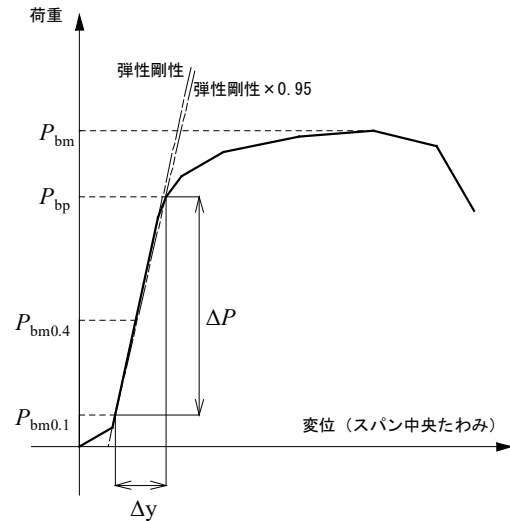


図10 各記号の概念図_曲げ試験

5) セン断試験

試験は、椅子型ブロックせん断試験体の切欠き部に鋼材 (10×10×25mm) を確実に接触させ、ピンでその鋼材を加力し、1～2分で試験体が破壊するまで一定の速度で加力する。

式11に含水率が u である木材の繊維と平行方向のせん断強さ τ_u の算出方法を示す。

$$\tau_u = \frac{P_{\tau m}}{bh}$$

式11

ここに、 τ_u : 繊維と平行方向のせん断強さ [N/mm²]
 $P_{\tau m}$: 最大荷重 [N]
 b : 試験体の厚さ [mm]
 h : せん断面の長さ [mm]

6) 密度・含水率計測

a. 密度の計測方法

式 12 に含水率が u における試験体の密度の算出方法を示す。なお、試験体の質量 m_u および容積 v_u は試験前に測定する。

$$\rho_u = \frac{m_u}{a_u \times b_u \times l_u} = \frac{m_u}{v_u} \quad \text{式 12}$$

ここに、 ρ_u : 試験時の含水率が u における試験体の密度 [g/cm³]

m_u : 試験時の含水率が u における試験体の質量 [g]

a_u, b_u, l_u : 試験時の含水率が u における試験体の各面の長さ [cm]

v_u : 試験時の含水率が u における試験体の容積 [cm³]

b. 含水率の計測方法

b-1 試験時の簡易計測

写真 2 に木材水分計の外観を示す。含水率は、木材水分計 MT-700（株式会社ケツト科学研究所）を使用して、試験前に非破壊で測定する。測定箇所は各試験体における板目面または柃目面の 3 点とし、その平均値を求める。



写真 2 木材水分計 MT-700

b-2 試験終了後の詳細計測

式 13 に含水率の算出方法を示す。含水率は、曲げ試験終了後の試験体の非破壊部分から採取した試験片を用いる。計測は全乾法によって実施するため、乾燥前の質量および乾燥後の質量を用いて算出する。なお乾燥条件については、乾燥装置を用いて 103±2℃の温度下で 6 時間ごとの質量変化が 0.5%以下となるまで乾燥させる。

$$u = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad \text{式 13}$$

ここに、 u : 試験体個々の含水率 [%]

m_1 : 乾燥前の試験体の質量 [g]

m_2 : 乾燥後の試験体の質量

●特性値

表 7～12 に各試験から得られた結果一覧を示す。ただし、A-1 曲げは接線方向に加力を行ったため、A-1 曲げの試験結果については参考とし、平均値および標準偏差については A-2～4 曲げのみで評価を行う。

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

表 7 結果一覧_縦圧縮試験

試験体	質量	体積	密度	含水率		断面積	縦圧縮強さ	縦圧縮 比例限度応力	縦圧縮 ヤング係数
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測				
A-1縦	19.77	32.02	0.62	9.5	11.5	628.4	49.5	39.0	7268
A-2縦	18.05	31.49	0.57	9.2	11.5	625.3	45.5	37.0	5171
A-3縦	18.42	32.62	0.56	10.1	11.0	649.4	43.5	35.5	3875
A-4縦	18.32	32.31	0.57	10.2		644.5	40.5	31.0	5586
A-5縦	18.77	32.85	0.57	10.9	平均	655.2	44.5	37.0	3439
A-6縦	19.70	31.75	0.62	9.2	11.3	632.9	55.5	51.0	5464
A-縦_平均	18.84	32.17	0.59	9.9	標準偏差	639.3	46.5	38.4	5134
A-縦_標準偏差	(0.73)	(0.52)	(0.03)	(0.7)	(0.3)	(12.1)	(5.3)	(6.7)	(1366)
B-1縦	21.55	32.72	0.66	9.2	10.5	650.4	59.0	56.5	3651
B-2縦	21.56	32.90	0.66	9.6	10.5	653.5	56.0	48.5	4433
B-3縦	18.86	32.79	0.58	9.7	11.0	647.4	50.0	39.0	5635
B-4縦	20.65	33.09	0.62	9.3		653.1	55.5	48.0	5709
B-5縦	22.03	32.53	0.68	10.1	平均	641.2	63.5	60.0	5299
B-縦_平均	20.93	32.80	0.64	9.6	標準偏差	649.1	56.8	50.4	4945
B-縦_標準偏差	(1.26)	(0.21)	(0.04)	(0.4)	(0.3)	(5.1)	(5.0)	(8.2)	(883)

表 8 結果一覧_横圧縮試験（A 材）

試験体	質量	体積	密度	含水率		断面積	横圧縮 比例限度応力	横圧縮 ヤング係数
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測			
A-1追	17.88	31.96	0.56	10.1	11.5	633.1	4.7	463
A-2追	20.12	36.26	0.55	10.7		717.4	4.8	388
A-3追	17.89	31.14	0.57	10.8		622.1	5.1	524
A-4追	18.71	34.28	0.55	10.8		680.9	4.5	452
A-5追	17.78	32.10	0.55	10.2		640.9	4.7	472
A-6追	19.19	34.11	0.56	10.0		678.3	4.4	305
A-7追	17.89	32.92	0.54	11.1		655.4	4.7	483
A-8追	18.78	33.75	0.56	10.9		668.3	4.9	186
A-9追	18.15	32.21	0.56	10.6		640.5	4.9	556
A-追_平均	18.49	33.19	0.56	10.6	11.5	659.7	4.8	425
A-追_標準偏差	(0.79)	(1.57)	(0.01)	(0.4)		(29.7)	(0.2)	(116)
A-1中間	18.63	31.89	0.58	10.6	11.0	630.7	6.4	752
A-2中間	18.80	31.80	0.59	11.2		631.3	4.5	483
A-3中間	18.25	32.45	0.56	11.1		644.9	4.5	485
A-4中間	19.56	33.41	0.59	10.4		656.4	5.0	769
A-5中間	18.17	31.69	0.57	10.9		628.6	6.5	711
A-中間_平均	18.68	32.25	0.58	10.9		638.4	5.4	640
A-中間_標準偏差	(0.56)	(0.71)	(0.01)	(0.3)		(11.9)	(1.0)	(144)
A-1柱	20.09	34.26	0.59	9.7	10.3	677.5	7.6	828
A-2柱	20.20	33.71	0.60	9.4		671.4	5.6	580
A-3柱	20.12	34.26	0.59	10.1		681.2	9.9	569
A-4柱	19.81	33.47	0.59	9.6		662.8	8.7	701
A-5柱	19.73	33.94	0.58	10.1		673.8	7.6	600
A-6柱	19.84	33.78	0.59	10.4		675.5	7.5	844
A-7柱	19.16	32.88	0.58	10.4		642.7	8.9	963
A-8柱	18.97	32.12	0.59	9.4		641.0	6.6	566
A-9柱	19.97	33.53	0.60	9.8		665.1	7.5	735
A-柱_平均	19.76	33.55	0.59	9.9		665.7	7.8	710
A-柱_標準偏差	(0.43)	(0.68)	(0.01)	(0.4)		(14.7)	(1.3)	(144)

表 9 結果一覧_横圧縮試験（B 材）

試験体	質量	体積	密度	含水率		断面積	横圧縮 比例限度応力	横圧縮 ヤング係数
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測			
B-1追	20.46	31.70	0.65	9.9	10.5	629.8	9.0	822
B-2追	20.57	32.21	0.64	9.9		634.9	9.9	820
B-3追	21.16	34.04	0.62	9.9		676.3	8.7	715
B-4追	19.54	32.10	0.61	9.7		637.2	8.2	665
B-5追	21.16	33.82	0.63	9.9		671.1	8.6	810
B-6追	19.97	31.63	0.63	10.2		625.6	7.7	795
B-7追	21.49	34.25	0.63	9.7		678.4	8.7	713
B-8追	19.73	32.54	0.61	9.9		644.0	7.4	651
B-追_平均	20.51	32.79	0.63	9.9	11.0	649.7	8.5	749
B-追_標準偏差	(0.72)	(1.08)	(0.01)	(0.2)		(22.0)	(0.8)	(71)
B-1中間	21.46	32.75	0.66	9.9		647.5	11.9	937
B-2中間	21.06	32.89	0.64	9.9		653.6	9.9	698
B-3中間	20.73	32.89	0.63	9.9		647.4	10.5	995
B-4中間	21.10	31.87	0.66	10.0		631.2	12.5	951
B-5中間	21.62	32.75	0.66	10.2		651.3	11.1	737
B-中間_平均	21.19	32.63	0.65	10.0		646.2	11.2	863
B-中間_標準偏差	(0.35)	(0.43)	(0.01)	(0.1)		(8.8)	(1.0)	(136)
B-1柱	21.02	33.90	0.62	9.5	10.7	673.7	13.7	1144
B-2柱	20.49	32.92	0.62	9.5		652.1	13.5	1119
B-3柱	20.87	31.86	0.66	9.8		631.4	14.1	1202
B-4柱	21.24	32.41	0.66	9.8		639.8	14.4	1127
B-5柱	21.42	32.65	0.66	10.1		645.9	14.2	832
B-6柱	21.41	32.44	0.66	10.0		644.8	15.0	1164
B-7柱	20.98	32.50	0.65	10.1		644.0	14.3	820
B-8柱	20.36	31.72	0.64	9.6		626.3	16.6	674
B-9柱	21.38	32.44	0.66	10.2		642.4	14.0	1009
B-柱_平均	21.02	32.54	0.65	9.8		644.5	14.4	1010
B-柱_標準偏差	(0.39)	(0.63)	(0.02)	(0.3)		(13.4)	(0.9)	(189)

表 10 結果一覧_部分圧縮試験

試験体	質量	体積	密度	含水率		支圧部 面積	部分圧縮 比例限度応力	5%部分 圧縮強さ
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測			
A-1部	31.99	58.94	0.54	11.1	11.5	638.8	11.2	14.2
A-2部	31.96	57.06	0.56	10.6	11.5	628.4	11.5	14.0
A-3部	35.96	58.38	0.62	11.6	11.0	635.8	12.9	17.3
A-4部	36.08	59.11	0.61	10.4		637.1	11.1	15.6
A-5部	37.46	58.65	0.64	10.6	平均	635.1	11.5	17.0
A-部_平均	34.69	58.43	0.59	10.9	標準偏差	635.0	11.6	15.6
A-部_標準偏差	(2.55)	(0.81)	(0.04)	(0.5)	(0.3)	(4.0)	(0.7)	(1.5)
B-1部	35.17	56.90	0.62	11.1	10.5	627.6	11.1	20.4
B-2部	35.29	57.04	0.62	11.3		627.3	16.4	20.1
B-3部	35.79	57.45	0.62	11.5		628.9	12.0	19.2
B-4部	39.33	58.57	0.67	10.4		632.0	20.4	25.5
B-5部	36.43	57.88	0.63	12.1		632.4	11.6	18.3
B-6部	35.71	57.93	0.62	12.3		633.0	11.0	18.6
B-7部	35.55	57.79	0.62	12.0		632.5	11.2	18.2
B-部_平均	36.18	57.65	0.63	11.5	標準偏差	630.5	13.4	20.1
B-部_標準偏差	(1.45)	(0.58)	(0.02)	(0.7)	(0.3)	(2.5)	(3.6)	(2.6)

表 11 結果一覧_曲げ試験

試験体	質量	体積	密度	含水率		断面係数 モジュール	曲げ強さ	曲げ 比例限度応力	曲げ ヤング係数
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測				
A-1曲げ	198.8	231.6	0.86	10.2	11.5	2623	2622	69.0	49.0
A-2曲げ	136.5	231.0	0.59	10.4	11.5	2816	36147	76.0	58.5
A-3曲げ	135.5	221.6	0.61	10.2	11.0	2640	33071	98.5	56.5
A-4曲げ	139.2	219.2	0.64	11.2	平均	2608	32626	97.5	60.5
A-曲げ_平均	137.1	223.9	0.61	10.6	標準偏差	2688	33948	90.7	58.5
A-曲げ_標準偏差	(1.9)	(6.2)	(0.02)	(0.5)	(0.3)	(112)	(1917)	(12.7)	(2.0)
B-1曲げ	138.8	234.7	0.59	10.5	10.5	2885	37297	77.5	54.5
B-2曲げ	152.5	236.1	0.65	9.3	11.0	2911	37746	95.5	67.5
B-3曲げ	139.5	233.4	0.60	10.1	平均	2873	37190	76.0	59.0
B-曲げ_平均	143.6	234.7	0.61	10.0	標準偏差	2890	37411	83.0	60.3
B-曲げ_標準偏差	(7.7)	(1.3)	(0.03)	(0.6)	(0.3)	(20)	(295)	(10.9)	(6.6)

表 12 結果一覧_せん断試験

試験体	質量	体積	密度	含水率		せん断面 面積	せん断強さ
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	簡易計測	詳細計測		
A-1せ	13.14	23.86	0.55	10.7	11.5	774.6	6.3
A-2せ	14.44	23.17	0.62	10.0		765.5	8.2
A-3せ	15.10	23.80	0.63	10.4		782.7	10.8
A-4せ	14.75	23.47	0.63	12.2		765.6	7.2
A-5せ	12.95	23.16	0.56	10.5		764.6	7.4
A-6せ	14.42	23.28	0.62	10.6		782.6	6.7
A-7せ	14.65	23.83	0.61	11.0		773.9	5.2
A-せ_平均	14.21	23.51	0.60	10.8	標準偏差	772.8	7.4
A-せ_標準偏差	0.83	0.32	0.03	0.7	(0.3)	(7.9)	(1.7)
B-1せ	16.26	23.51	0.69	9.9	10.5	758.2	9.2
B-2せ	16.49	23.97	0.69	9.9		776.9	7.5
B-3せ	17.03	23.72	0.72	10.0		763.2	8.4
B-4せ	14.33	23.78	0.60	9.7		787.3	8.1
B-5せ	16.22	23.90	0.68	10.0		780.3	8.3
B-6せ	16.22	23.79	0.68	10.4		773.8	6.5
B-7せ	16.03	23.79	0.67	10.1		788.9	6.4
B-8せ	17.30	23.55	0.73	10.1		765.6	3.1
B-9せ	17.18	24.11	0.71	9.7		780.1	4.4
B-せ_平均	16.34	23.79	0.69	10.0	標準偏差	774.9	6.9
B-せ_標準偏差	0.89	0.19	0.04	0.2	(0.3)	(10.7)	(2.0)

● 荷重変形

図 11～図 22 に各試験体の応力度－ひずみ関係または荷重変形関係を示す。

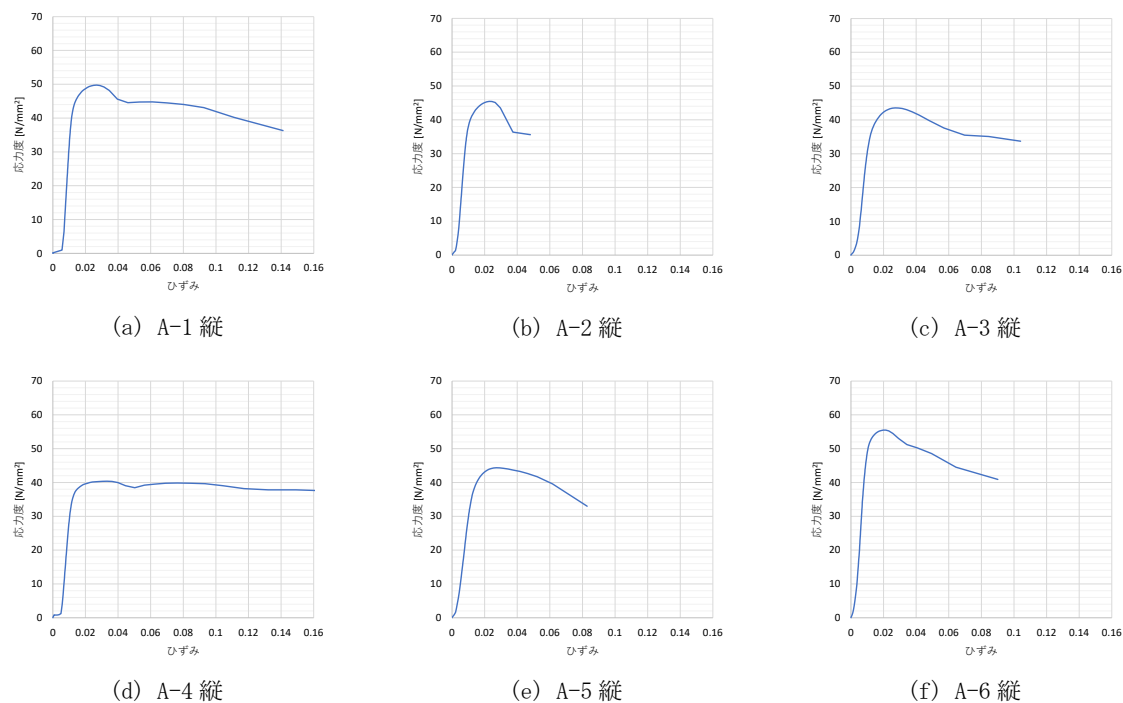


図 11 応力度－ひずみ関係_A-縦

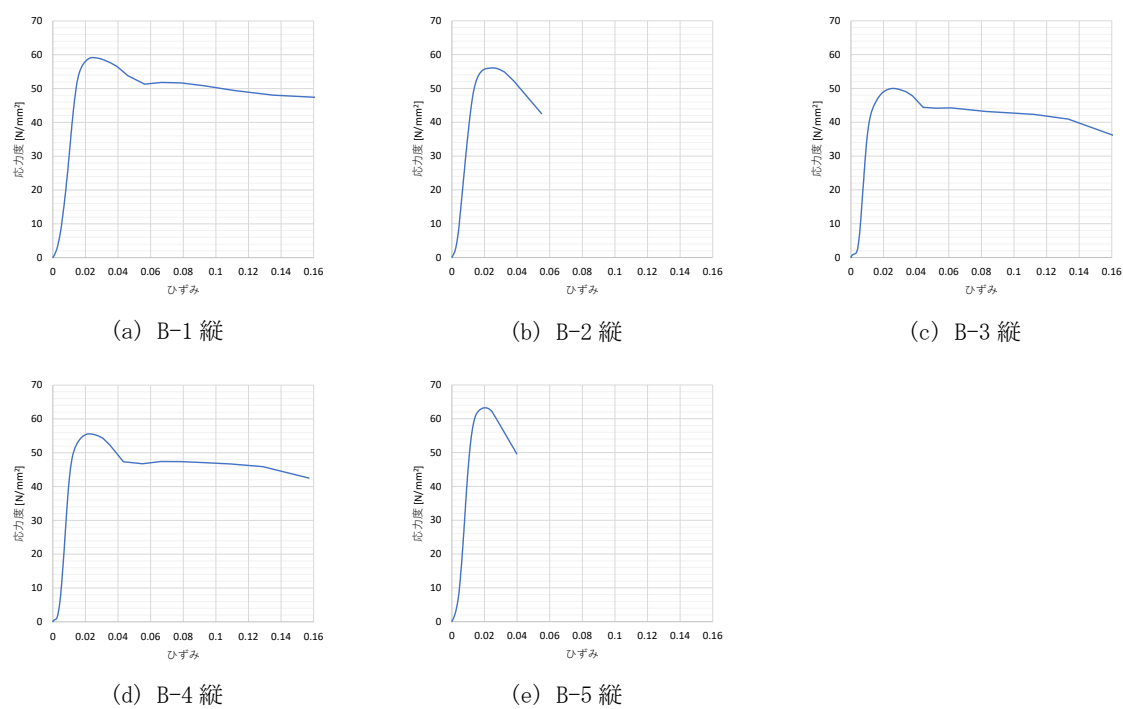


図 12 応力度－ひずみ関係_B-縦

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

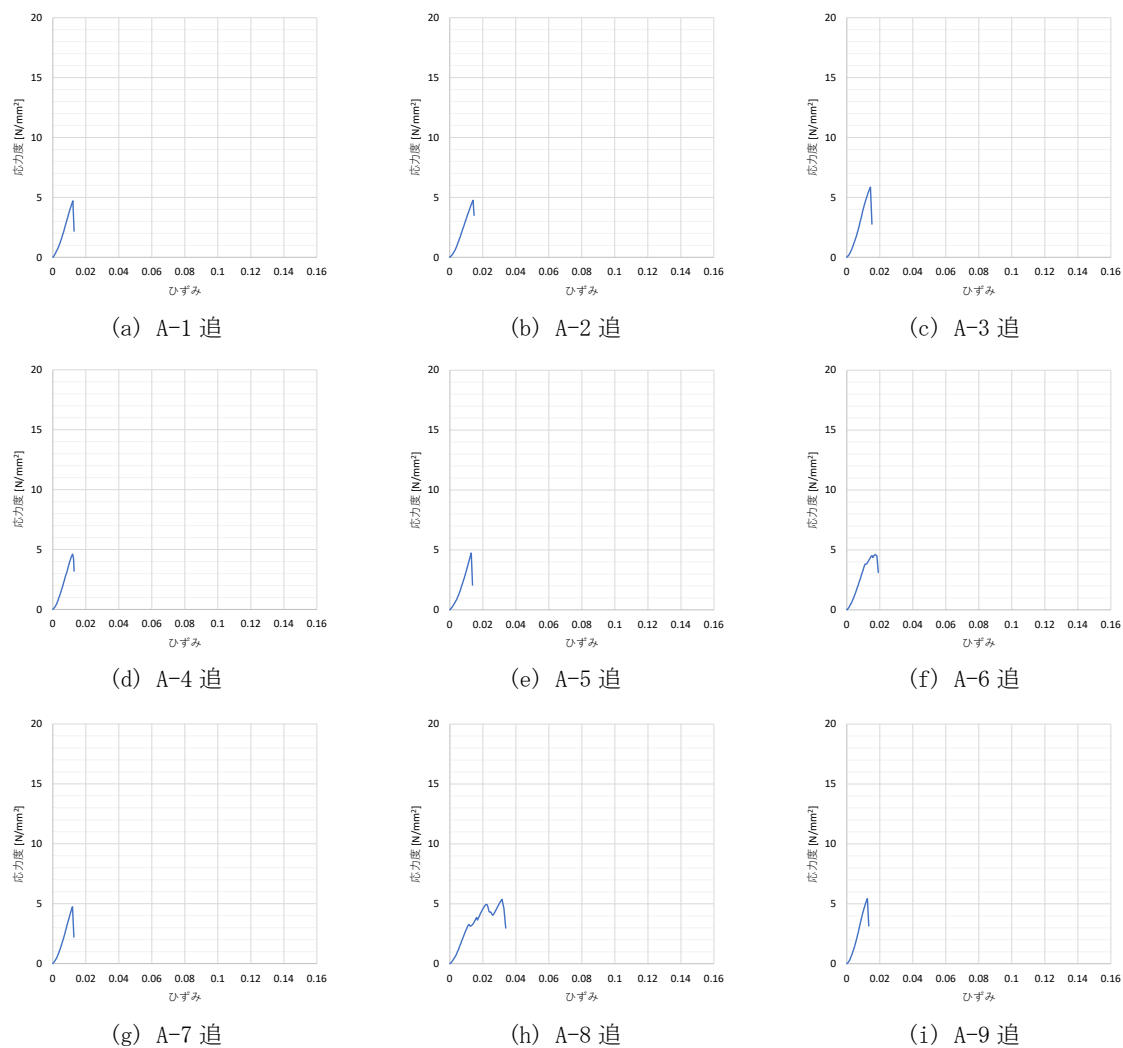


図 13 応力度－ひずみ関係_A-追

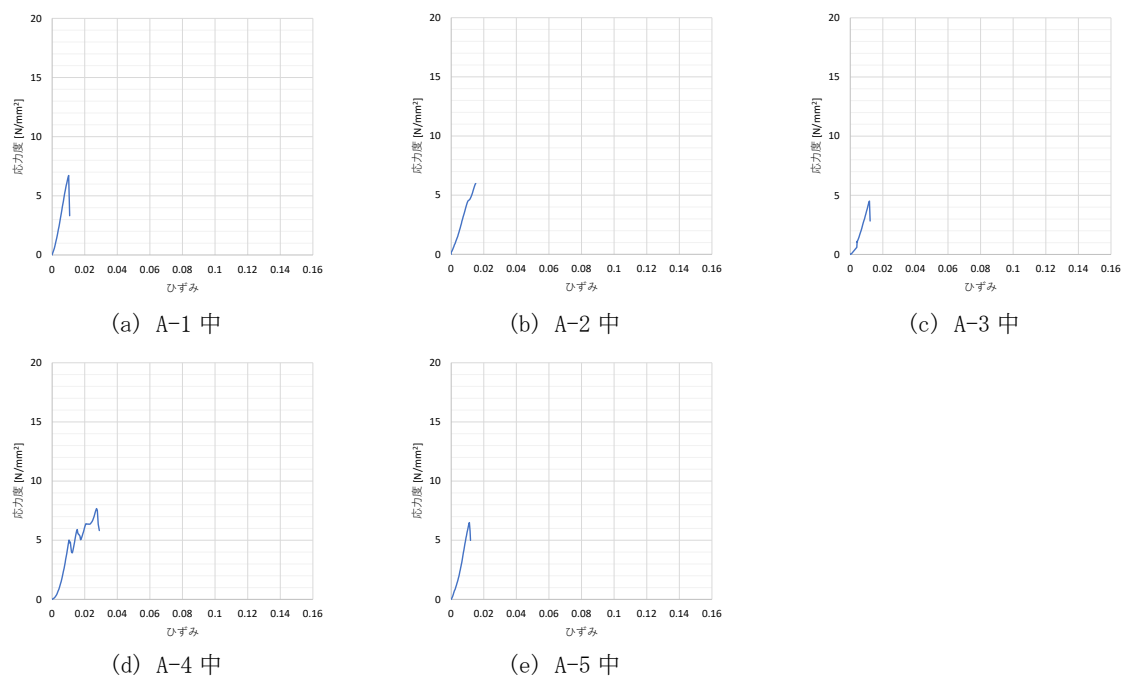


図 14 応力度－ひずみ関係_A-中

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

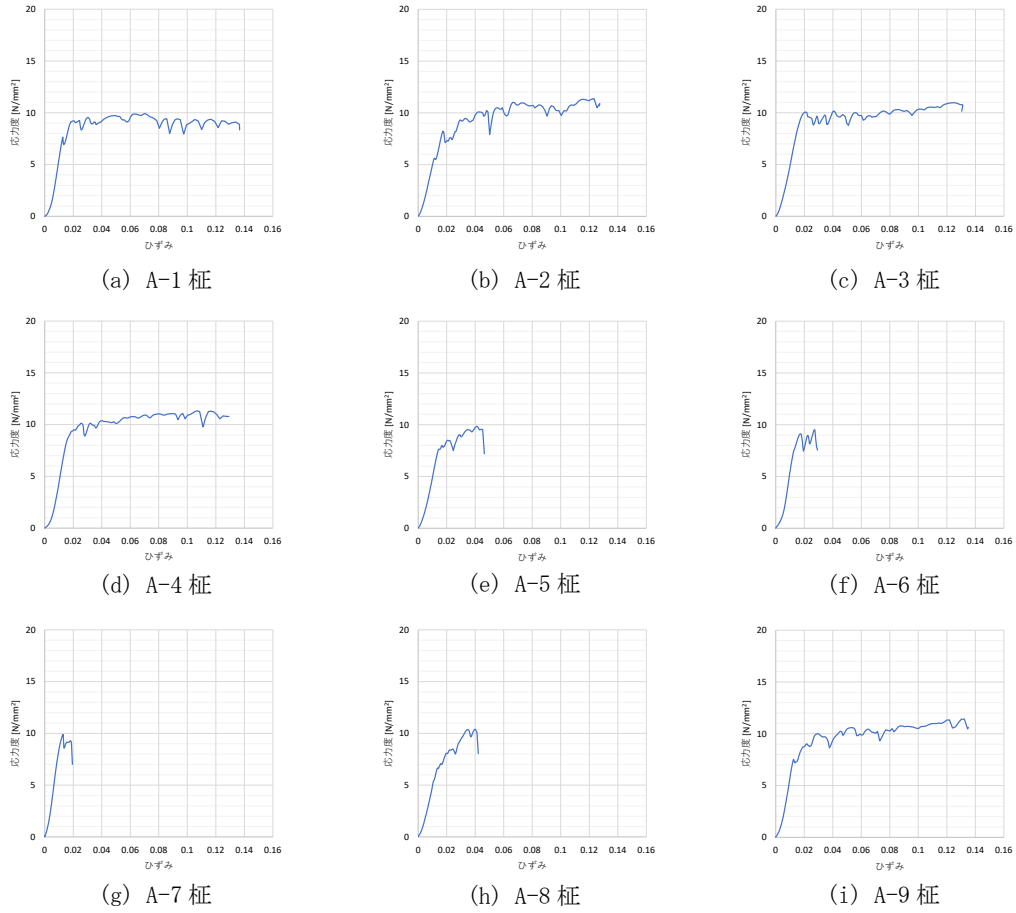


図 15 応力度－ひずみ関係_A-榫

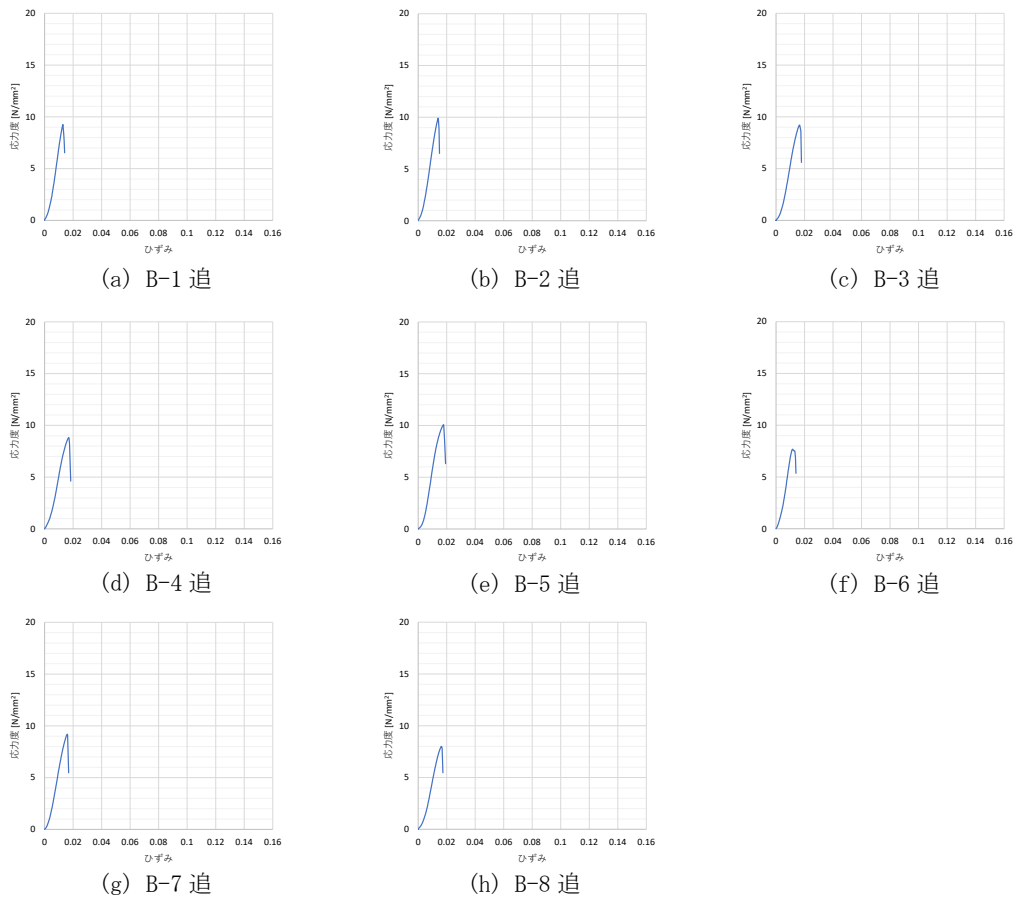


図 16 応力度－ひずみ関係_B-追

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

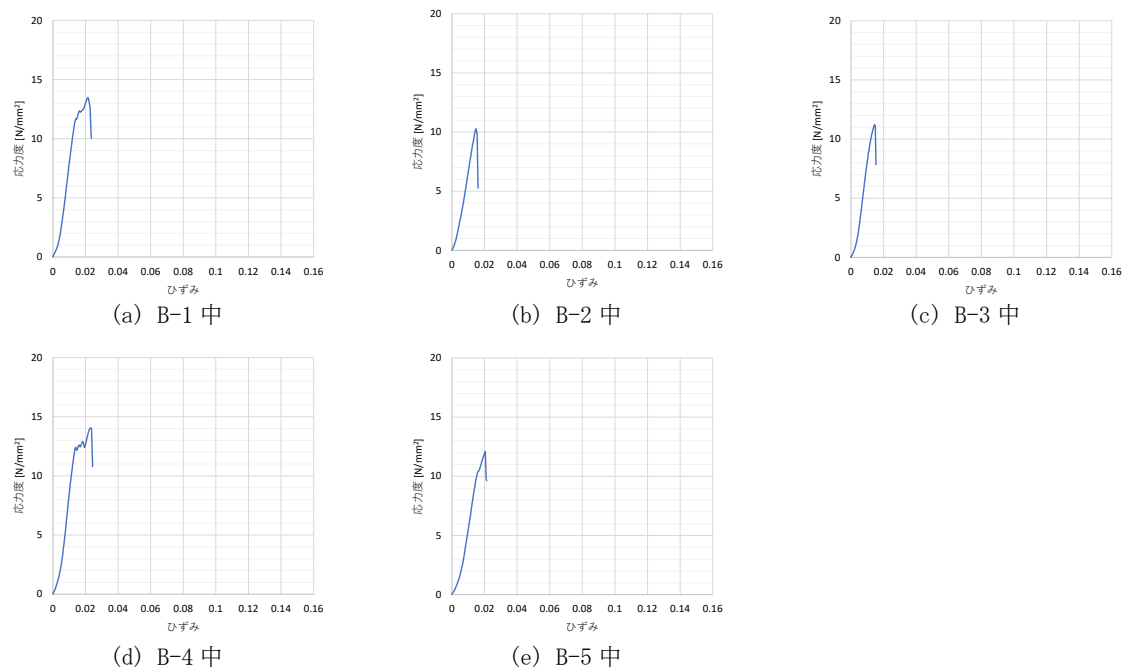


図 17 応力度－ひずみ関係_B-中

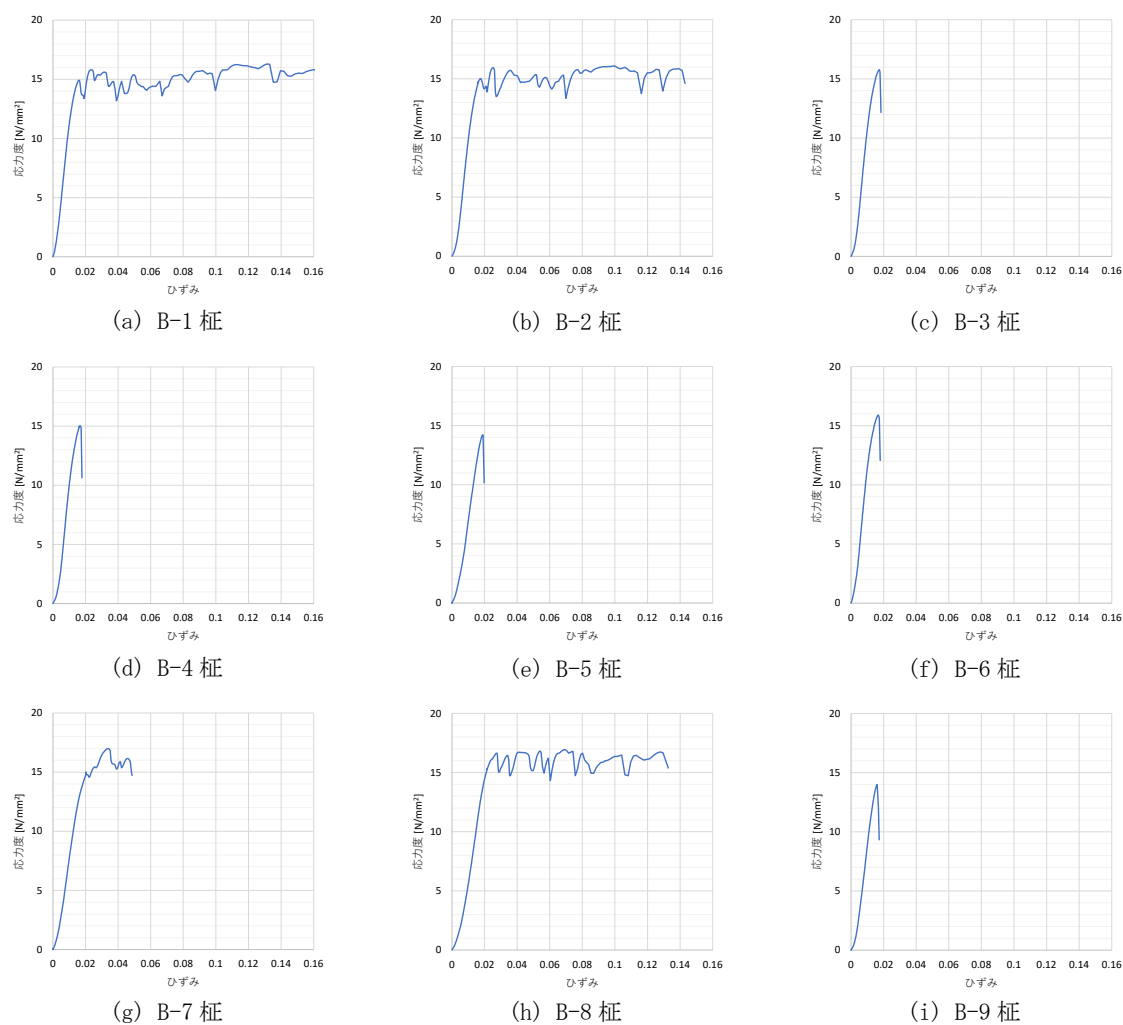


図 18 応力度－ひずみ関係_B-桁

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

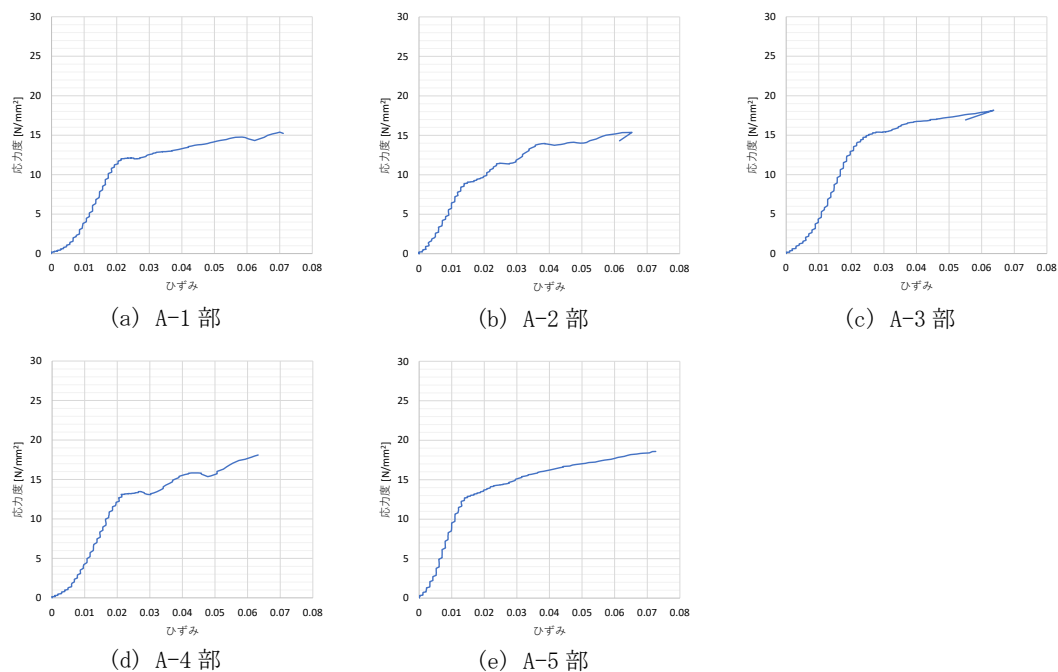


図 19 応力度－ひずみ関係_A部

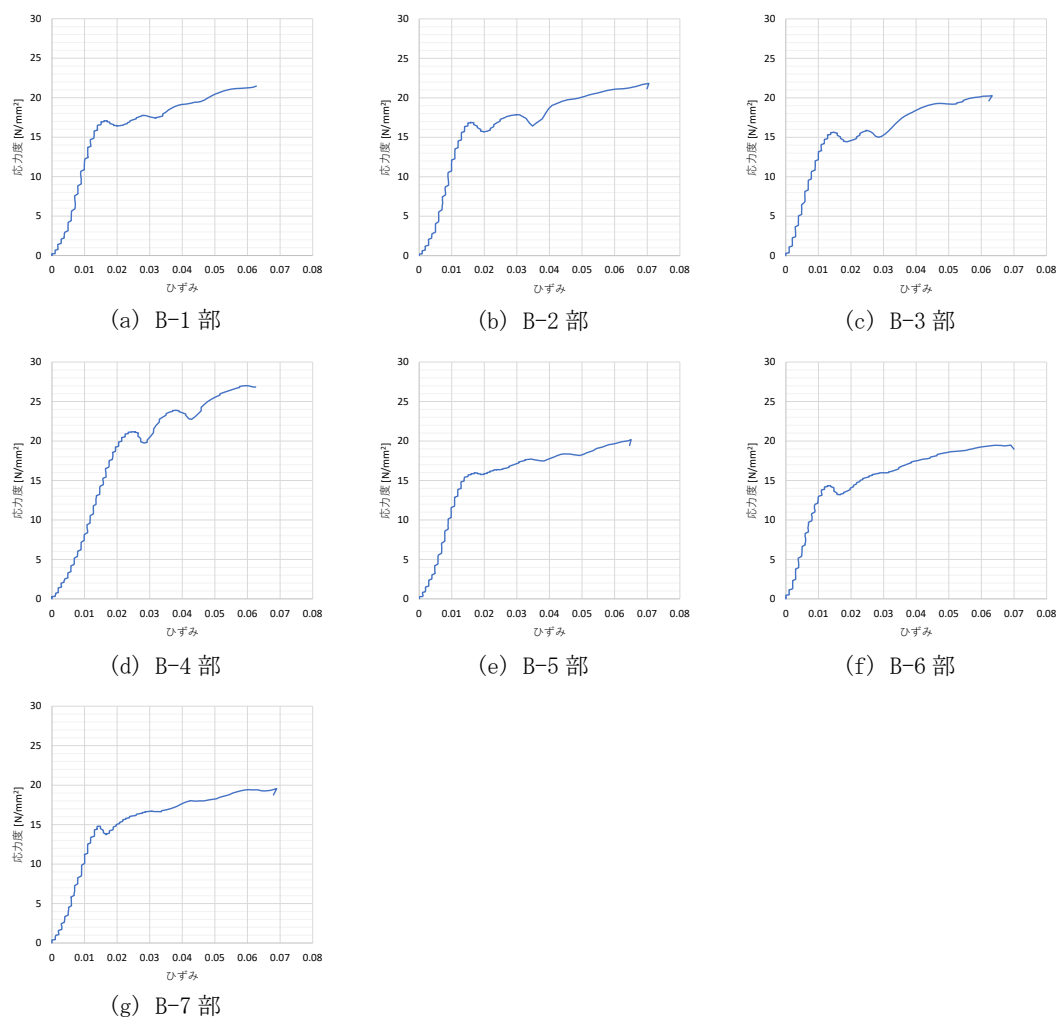
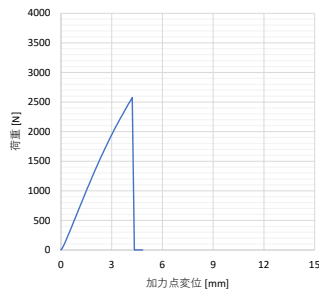
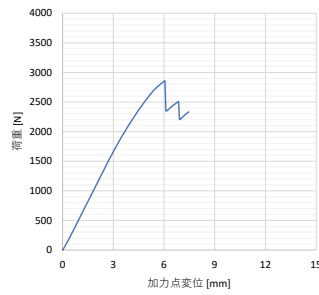


図 20 応力度－ひずみ関係_B部

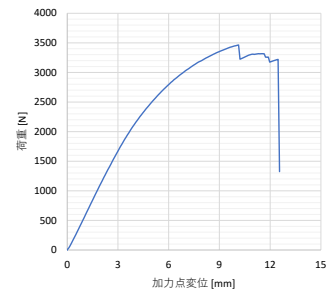
2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集



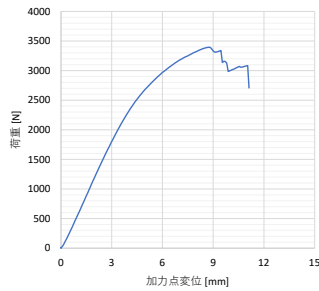
(a) A-1 曲げ (接線方向加力)



(b) A-2 曲げ

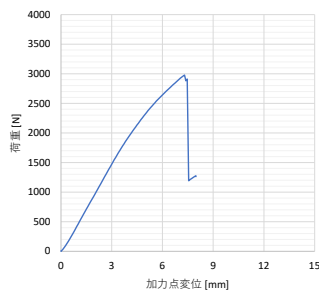


(c) A-3 曲げ

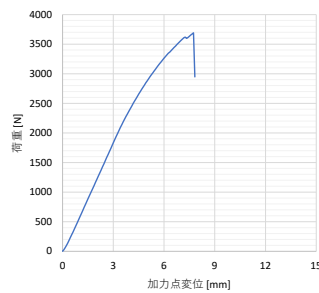


(d) A-4 曲げ

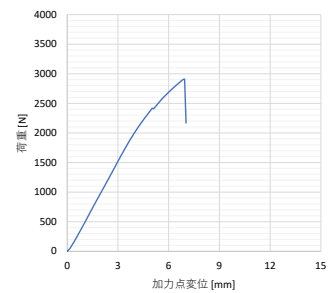
図 21 荷重変形関係_A-曲げ



(a) B-1 曲げ



(b) B-2 曲げ



(c) B-3 曲げ

図 22 荷重変形関係_B-曲げ

●破壊形状

写真 3～17 に各試験体の試験前後の状況を示す。



(a) 試験前

(b) 試験後

写真 3 試験体状況_A-縦

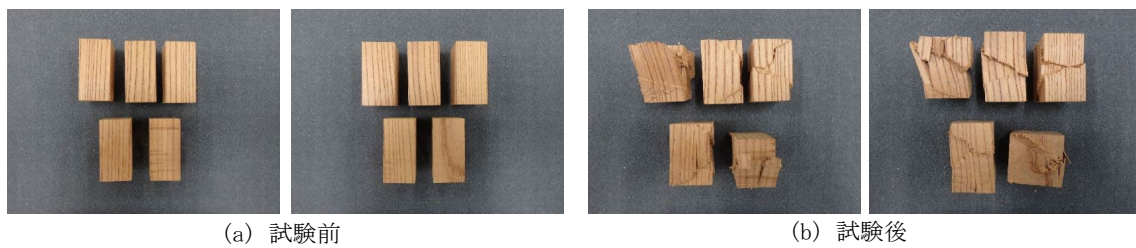


写真 4 試験体状況_B-縦

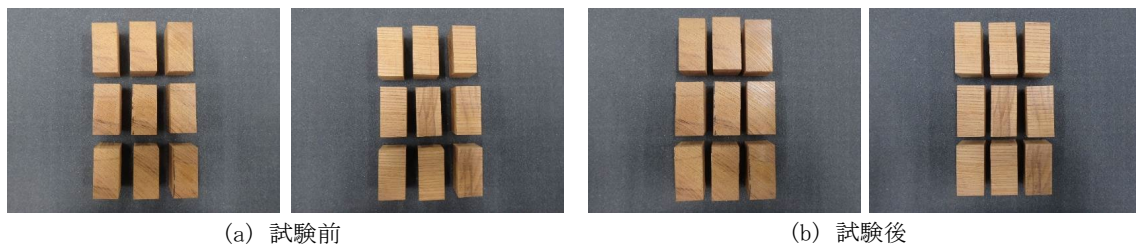


写真 5 試験体状況_A-追

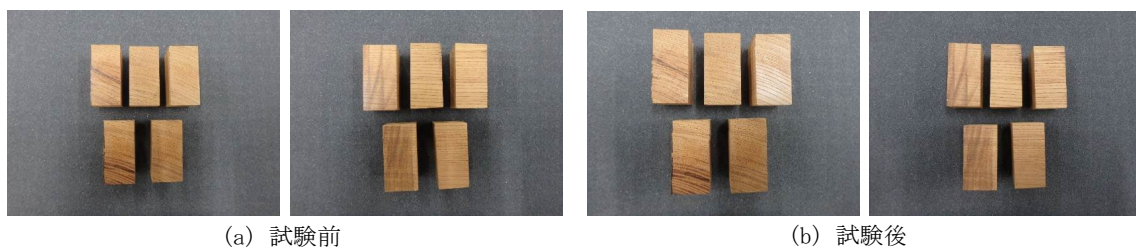


写真 6 試験体状況_A-中

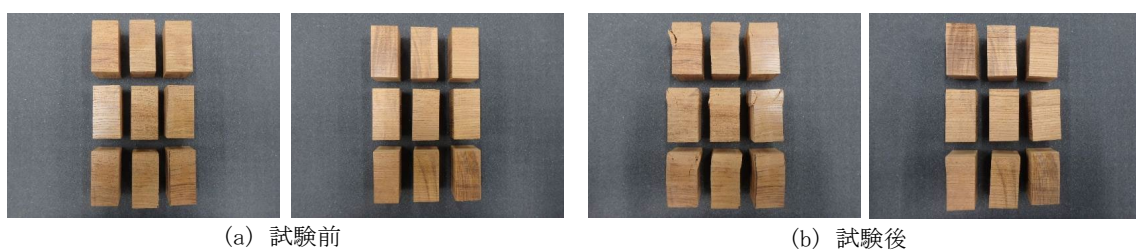


写真 7 試験体状況_A-柁

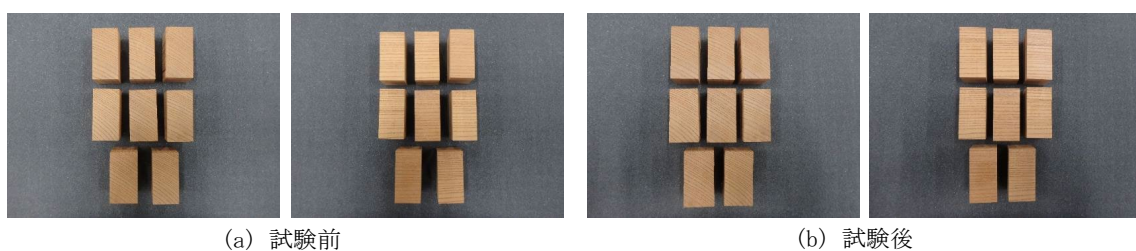


写真 8 試験体状況_B-追

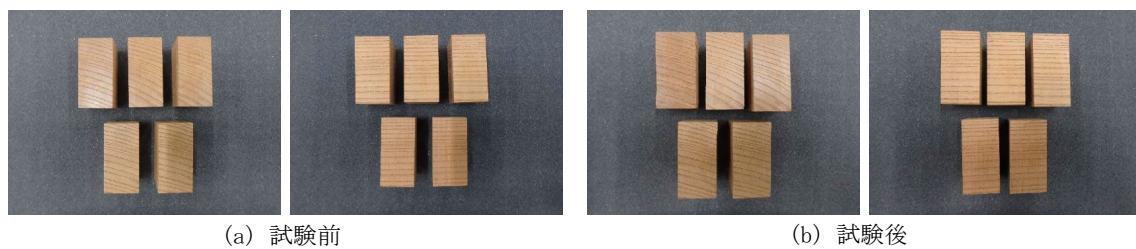


写真 9 試験体状況_B-中

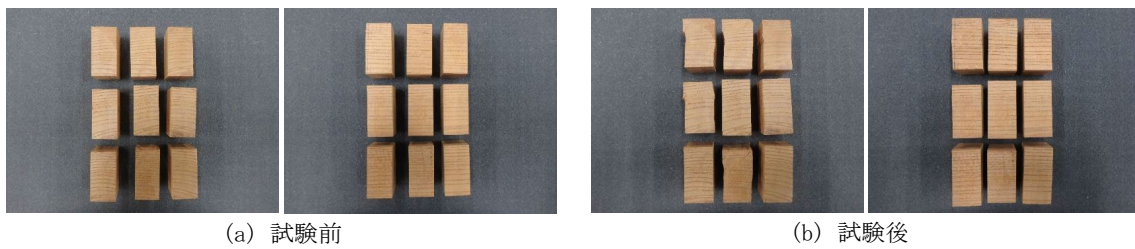


写真 10 試験体状況_B-桁

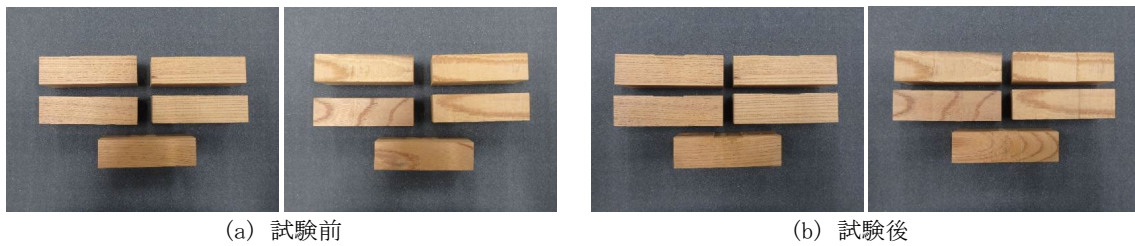


写真 11 試験体状況_A-部

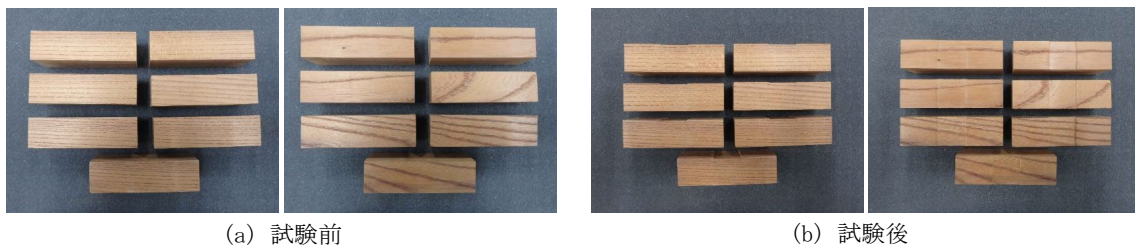


写真 12 試験体状況_B-部



写真 13 試験体状況_A-曲げ



写真 14 試験体状況_B-曲げ

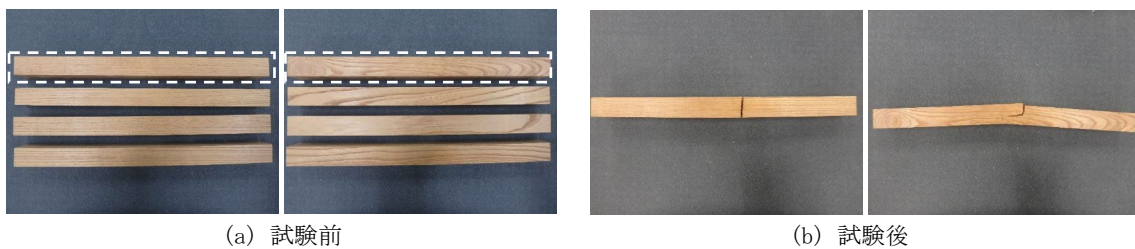


写真 15 試験体状況_A-1 曲げ（接線方向加力）

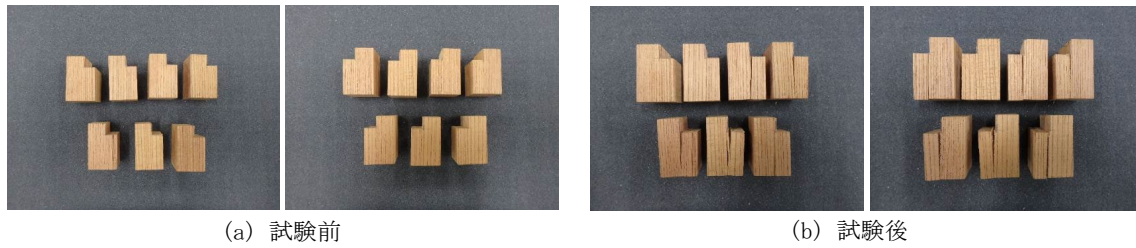


写真 16 試験体状況_A-せ

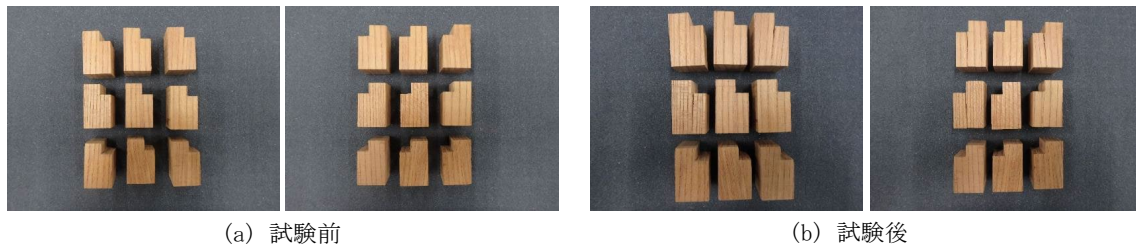


写真 17 試験体状況_B-せ

●理論式

—

●モデル化

—

●考察

表 13 に尾垂木上斗および枳肘木上巻斗の特性値の平均値および下限値を示す。また、図 23～図 32 には各試験における強度－密度およびヤング係数－密度の関係を示す。なお下限値について、強度特性値は信頼水準 75%における 95%下側許容限界値、弾性特性値は信頼水準 75%における 50%下側許容限界値を算出した。参考として、木質構造設計規準・同解説(2006)に記載される基準強度および基準ヤング係数を示す。

本試験で用いた試験体は試験前に恒温恒湿室にて保管していたため、いずれの試験体も 9～12%と低い含水率で安定していた。そのため、本試験体の密度は概ねその材の密実さと考えることができる。一般的に木材は密度と強度の相関性があり、本試験においても密度の高い試験体の強度およびヤング係数が高くなる傾向を示すことを確認した。

木質構造設計規準・同解説(2006)に記載されるケヤキの基準材料強度および基準ヤング係数と比較すると、縦圧縮のヤング係数および枳肘木上巻斗の曲げヤング係数を除いて基準値を上回る結果となった。縦圧縮試験体と曲げ試験体については、尾垂木上斗および枳肘木上巻斗の表層部に近い箇所から採取しており、変色部は取り除いているが、目視では判別不能な劣化が生じていた可能性がある。

検討のための基準となる強度として、古材においても現行の基準強度・基準ヤング係数を基に定めることができると考えられる。

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

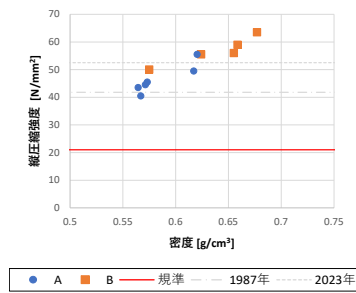


図 23 強度－密度関係__縦圧縮

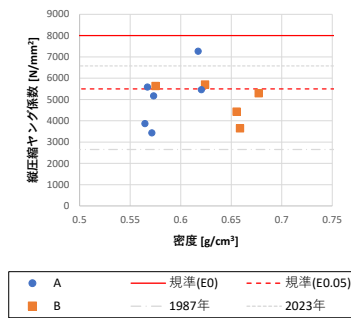


図 24 ヤング係数－密度関係__縦圧縮

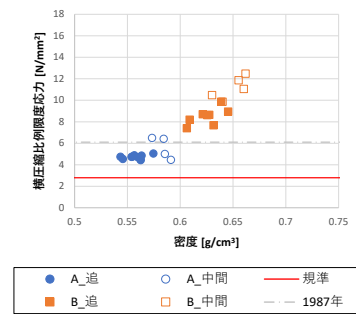


図 25 強度－密度関係__横圧縮

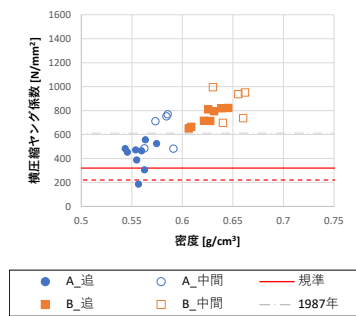


図 26 ヤング係数－密度関係__横圧縮

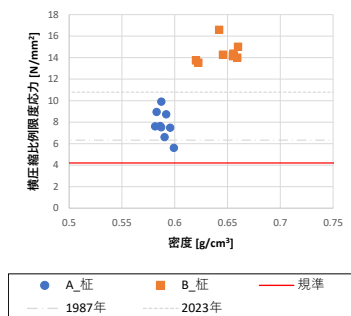


図 27 強度－密度関係__横圧縮

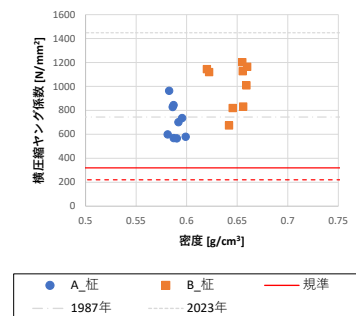


図 28 ヤング係数－密度関係__横圧縮

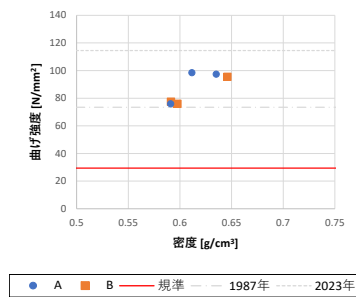


図 29 強度－密度関係__曲げ

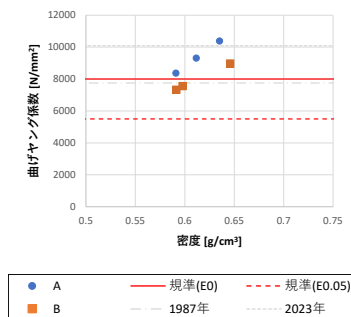


図 30 ヤング係数－密度関係__曲げ

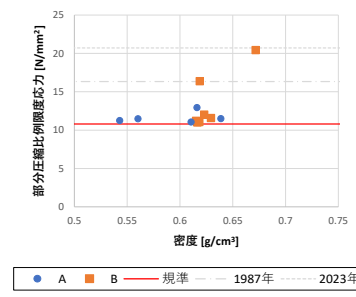


図 31 強度－密度関係__部分圧縮

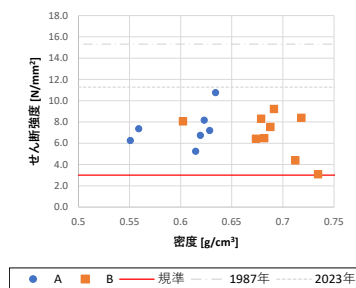


図 32 強度－密度関係__せん断

2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

表 13 特性値一覧

			A. 尾垂木上斗		B. 梓肘木上巻斗		基準値 ¹⁾
			(平均値)	(下限値)	(平均値)	(下限値)	(下限値)
縦圧縮		強度 [N/mm ²]	46.5	34.1	56.8	44.6	21.0
		比例限度 [N/mm ²]	38.4	22.7	50.4	30.2	-
		ヤング係数 [N/mm ²]	5134	4728	4945	4653	8000 (5500)* ¹
横圧縮	追衤	比例限度 [N/mm ²]	4.8	4.4	8.5	6.8	2.8* ²
		ヤング係数 [N/mm ²]	425	398	749	731	320* ³ (220)* ¹
	中間	比例限度 [N/mm ²]	5.4	2.9	11.2	8.6	2.8* ²
		ヤング係数 [N/mm ²]	640	592	863	818	320* ³ (220)* ¹
	衤	比例限度 [N/mm ²]	7.8	5.1	14.4	12.5	4.2
		ヤング係数 [N/mm ²]	710	675	1010	966	320* ³ (220)* ¹
部分圧縮		5%強度 [N/mm ²]	15.6	11.8	20.1	14.3	10.8
		比例限度 [N/mm ²]	11.6	9.8	13.4	5.2	-
曲げ		強度 [N/mm ²]	90.7	50.6	83.0	48.8	29.4
		比例限度 [N/mm ²]	58.5	52.2	60.3	39.5	-
		ヤング係数 [N/mm ²]	9354	8881	7951	7532	8000 (5500)* ¹
せん断		強度 [N/mm ²]	7.4	3.5	6.9	2.6	3.0
含水率 [%]			10.4	-	10.1	-	-
密度 [g/cm ³]			0.59	-	0.64	-	-

1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説―許容応力度・許容耐力設計法―、2006

*1 ()内は信頼水準 75%における 95%下側許容限界値を示す

*2 受圧面が追衤の場合は、基準材料強度の 2/3 として適用する

*3 繊維に直交方向の弾性係数は、繊維方向の弾性係数の 1/25 とする