文化財建造物構造実験データ集　2025 年度登録リスト

※整理番号 25××は、2025 年度登録データの××番目を示す。

＜材料試験＞

〇木材

・2501 興福寺東金堂における巻斗（ケヤキ）の材料試験

＜要素試験＞

〇その他

・2502 興福寺五重塔の風洞実験

＜補強材料性能試験＞

〇接合部

・2503 ニッカウヰスキー余市蒸溜所施設リキュール工場における木造トラスと鉄骨補強部材接合部の性能試験

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（枠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（尾垂木上斗および枠肘木上巻斗。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。

・放射性炭素年代に基づくウィグルマッチング結果

	1σ 暦年代範囲	2σ 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_枠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	枠肘木上巻斗	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	追柾_放射方向＋約45°方向に加力
A-1~5中間				5	中間_柾目と追柾の中間
A-1~9柾				9	柾目_放射方向に加力
B-1~8追	枠肘木上巻斗	ケヤキ	25×25×50	8	追柾_放射方向＋約45°方向に加力
B-1~5中間				5	中間_柾目と追柾の中間
B-1~9柾				9	柾目_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	枠肘木上巻斗	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

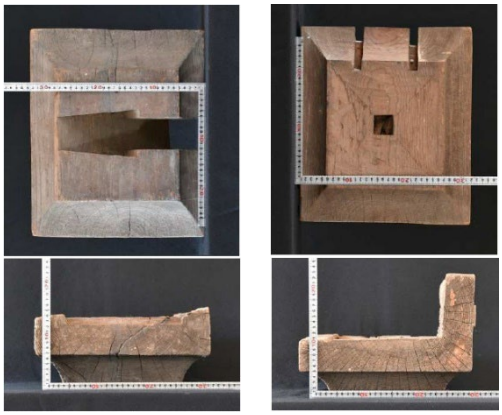
試験体	採取位置	樹種	寸法[mm]	試験体数	備考
A-1~4水	尾垂木上斗	ケヤキ	25×25×25	3	A曲げ試験片から採取
B-1~3水	枠肘木上巻斗			3	B曲げ試験片から採取

表 5　せん断試験_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 25×10×10	7	せん断面を板目面として繊維方向に加力
B-1~9せ	枠肘木上巻斗			9	せん断面を板目面として繊維方向に加力

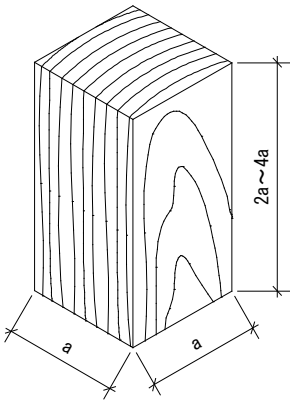
表 6　含水率試験_試験体一覧

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	枠肘木上巻斗			3	B曲げ試験片から採取



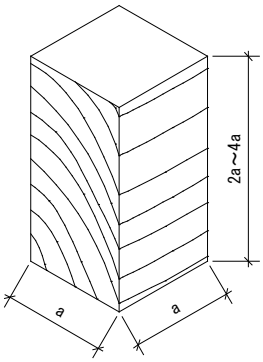
（a）尾垂木上斗　（b）枠肘木上巻斗

写真 1　東金堂に保管されていた二部材



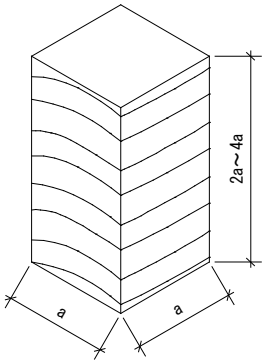
a=25mm，高さ H=2a=50mm

図 1　縦圧縮試験_試験体図



a=25mm，高さ H=2a=50mm

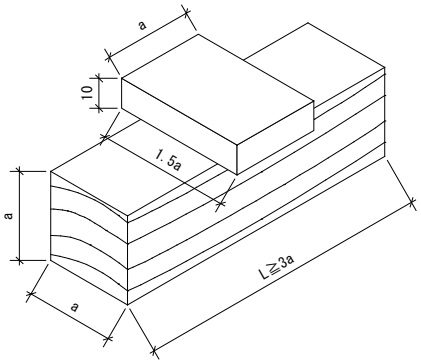
（a）追柾



a=25mm，高さ H=2a=50mm

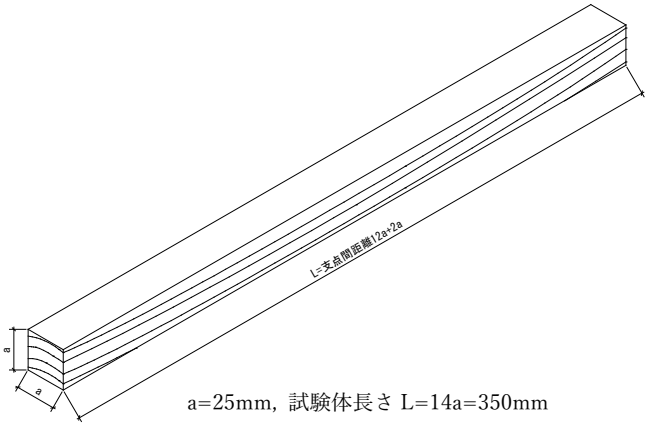
(b)柾目

図 2　横圧縮試験_試験体図



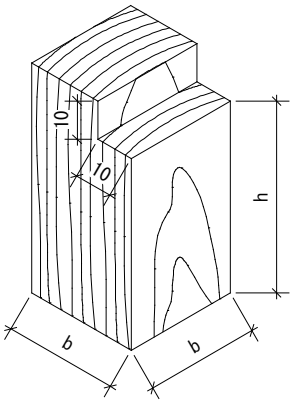
a=25mm，試験体長さ L≧3a=90mm

図 3　部分圧縮試験_試験体図



a=25mm，試験体長さ L=14a=350mm

図 4　曲げ試験_試験体図



b=25mm, h=40mm

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。

$$\sigma_c = \frac{P_{cm}}{A} \qquad \text{式 1}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{cp}}{A} \qquad \text{式 2}$$

$$E_c = \frac{\Delta P l}{\Delta l A} \qquad \text{式 3}$$

ここに，σ_c ：縦圧縮強さ [N/mm²]
P_{cm} ：最大荷重 [N]
A ：試験体の断面積 [mm²]
σ_{cp} ：縦圧縮比例限度応力 [N/mm²]
P_{cp} ：比例限度荷重 [N]
E_c ：縦圧縮弾性係数 [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]

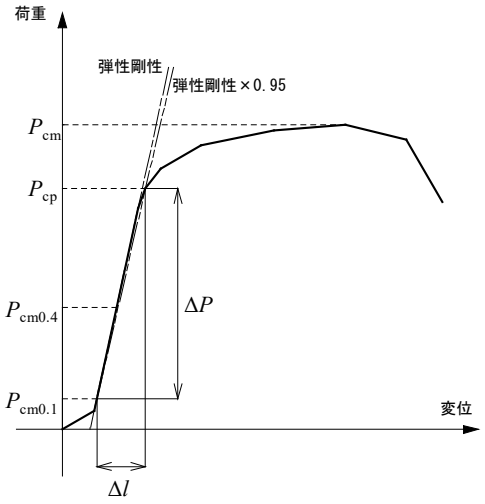


図 6　各記号の概念図_縦圧縮試験

2)横圧縮試験

試験は，追柾の試験体は放射方向＋約 45°方向、柾目の試験体は放射方向、中間の試験体は追柾と柾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。

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

$$E_{c90}=\frac{\Delta Pl}{\Delta lA} \qquad 式5$$

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］

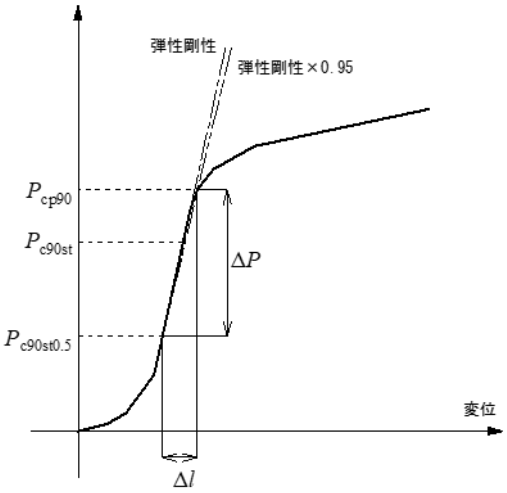


図7　各記号の概念図_横圧縮試験

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。

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

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

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]

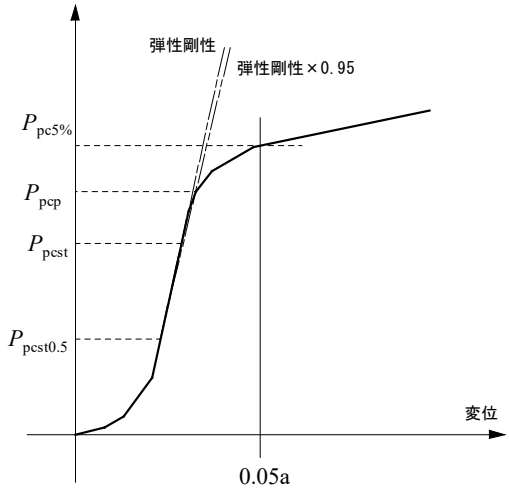


図8　各記号の概念図_部分圧縮試験

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。

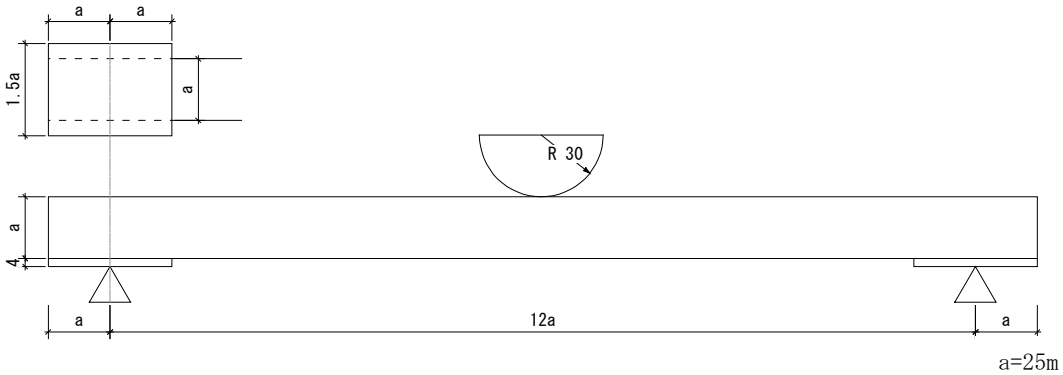


図 9　加力図

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 $E_{b\text{-}ap}$ 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。

$$\sigma_b = \frac{P_{bml}}{4Z} \qquad \text{式 8}$$

$$\sigma_{bp} = \frac{P_{bpl}}{4Z} \qquad \text{式 9}$$

$$E_{b\text{-}ap} = \frac{\Delta P l^3}{48 l \Delta y} \qquad \text{式 10}$$

ここに，σb　：曲げ強さ [N/mm²]
Pbm　：最大荷重 [N]
l　：支点間距離（12a = 300mm）[mm]
Z　：断面係数 Z = a3 / 6[mm³]
σbp　：曲げ比例限度応力 [N/mm²]
Pbp　：比例限度荷重 [N]
Eb-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 = a4 / 12[mm⁴]
Δy　：ΔP に対応するスパン中央のたわみ [mm]

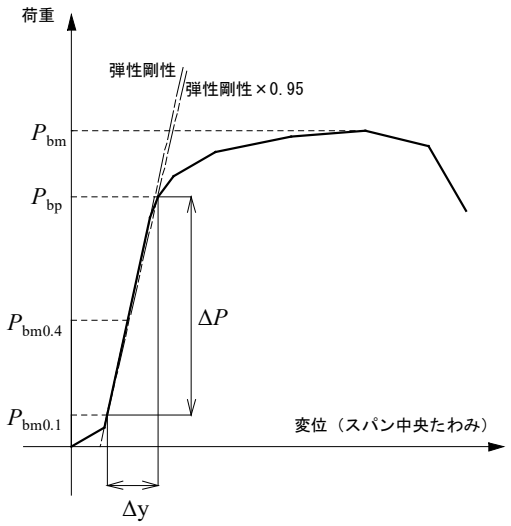


図 10　各記号の概念図_曲げ試験

5)せん断試験

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。

$$\tau_u = \frac{P_{\tau m}}{bh} \qquad \text{式 11}$$

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。

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

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柾目面の 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。

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

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。

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
				簡易計測	詳細計測				
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
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	10.7	649.1	56.8	50.4	4945
B-縦_標準偏差	(1.26)	(0.21)	(0.04)	(0.4)	標準偏差 (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
				簡易計測	詳細計測			
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
A-1追	17.88	31.96	0.56	10.1		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		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	11.5	630.7	6.4	752
A-2中間	18.80	31.80	0.59	11.2	11.5	631.3	4.5	483
A-3中間	18.25	32.45	0.56	11.1	11.0	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	平均	628.6	6.5	711
A-中間_平均	18.68	32.25	0.58	10.9	11.3	638.4	5.4	640
A-中間_標準偏差	(0.56)	(0.71)	(0.01)	(0.3)	標準偏差 (0.3)	(11.9)	(1.0)	(144)
A-1柾	20.09	34.26	0.59	9.7		677.5	7.6	828
A-2柾	20.20	33.71	0.60	9.4		671.4	5.6	580
A-3柾	20.12	34.26	0.59	10.1		681.2	9.9	569
A-4柾	19.81	33.47	0.59	9.6		662.8	8.7	701
A-5柾	19.73	33.94	0.58	10.1		673.8	7.6	600
A-6柾	19.84	33.78	0.59	10.4		675.5	7.5	844
A-7柾	19.16	32.88	0.58	10.4		642.7	8.9	963
A-8柾	18.97	32.12	0.59	9.4		641.0	6.6	566
A-9柾	19.97	33.53	0.60	9.8		665.1	7.5	735
A-柾_平均	19.76	33.55	0.59	9.9		665.7	7.8	710
A-柾_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
				簡易計測	詳細計測			
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
B-1追	20.46	31.70	0.65	9.9		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		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	10.5	653.6	9.9	698
B-3中間	20.73	32.89	0.63	9.9	10.5	647.4	10.5	995
B-4中間	21.10	31.87	0.66	10.0	11.0	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	平均	646.2	11.2	863
B-中間_標準偏差	(0.35)	(0.43)	(0.01)	(0.1)	10.7	(8.8)	(1.0)	(136)
B-1柾	21.02	33.90	0.62	9.5	標準偏差 (0.3)	673.7	13.7	1144
B-2柾	20.49	32.92	0.62	9.5		652.1	13.5	1119
B-3柾	20.87	31.86	0.66	9.8		631.4	14.1	1202
B-4柾	21.24	32.41	0.66	9.8		639.8	14.4	1127
B-5柾	21.42	32.65	0.66	10.1		645.9	14.2	832
B-6柾	21.41	32.44	0.66	10.0		644.8	15.0	1164
B-7柾	20.98	32.50	0.65	10.1		644.0	14.3	820
B-8柾	20.36	31.72	0.64	9.6		626.3	16.6	674
B-9柾	21.38	32.44	0.66	10.2		642.4	14.0	1009
B-柾_平均	21.02	32.54	0.65	9.8		644.5	14.4	1010
B-柾_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
				簡易計測	詳細計測			
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
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	11.3	635.0	11.6	15.6
A-部_標準偏差	(2.55)	(0.81)	(0.04)	(0.5)	標準偏差 (0.3)	(4.0)	(0.7)	(1.5)
B-1部	35.17	56.90	0.62	11.1		627.6	11.1	20.4
B-2部	35.29	57.04	0.62	11.3	10.5	627.3	16.4	20.1
B-3部	35.79	57.45	0.62	11.5	10.5	628.9	12.0	19.2
B-4部	39.33	58.57	0.67	10.4	11.0	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	平均	633.0	11.0	18.6
B-7部	35.55	57.79	0.62	12.0	10.7	632.5	11.2	18.2
B-部_平均	36.18	57.65	0.63	11.5	標準偏差 (0.3)	630.5	13.4	20.1
B-部_標準偏差	(1.45)	(0.58)	(0.02)	(0.7)		(2.5)	(3.6)	(2.6)

表 11　結果一覧_曲げ試験

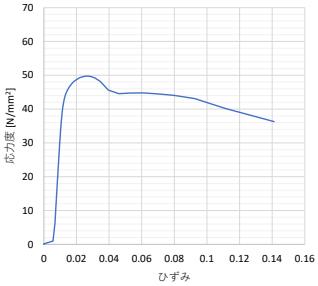
試験体	質量	体積	密度	含水率		断面係数	断面2次モーメント	曲げ強さ	曲げ比例限度応力	曲げヤング係数
				簡易計測	詳細計測					
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm³]	[mm⁴]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
A-1曲げ	158.6	231.6	0.68	10.2	11.5	2823	36222	69.0	49.0	10293
A-2曲げ	136.5	231.0	0.59	10.4	11.5	2816	36147	76.0	58.5	8373
A-3曲げ	135.5	221.6	0.61	10.2	11.0	2640	33071	98.5	56.5	9308
A-4曲げ	139.2	219.2	0.64	11.2	平均	2608	32626	97.5	60.5	10382
A-曲げ_平均	137.1	223.9	0.61	10.6	11.3	2688	33948	90.7	58.5	9354
A-曲げ_標準偏差	(1.9)	(6.2)	(0.02)	(0.5)	標準偏差 (0.3)	(112)	(1917)	(12.7)	(2.0)	(1005)
B-1曲げ	138.8	234.7	0.59	10.5	10.5	2885	37297	77.5	54.5	7327
B-2曲げ	152.5	236.1	0.65	9.3	10.5	2911	37746	95.5	67.5	8969
B-3曲げ	139.5	233.4	0.60	10.1	11.0	2873	37190	76.0	59.0	7557
B-曲げ_平均	143.6	234.7	0.61	10.0	平均 10.7	2890	37411	83.0	60.3	7951
B-曲げ_標準偏差	(7.7)	(1.3)	(0.03)	(0.6)	標準偏差 (0.3)	(20)	(295)	(10.9)	(6.6)	(889)

表 12　結果一覧_せん断試験

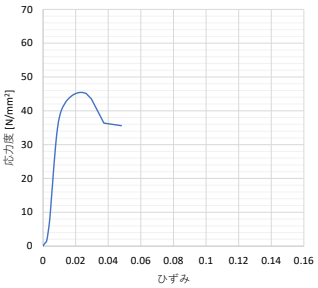
試験体	質量	体積	密度	含水率		せん断面面積	せん断強さ
				簡易計測	詳細計測		
	[g]	[cm³]	[g/cm³]	[%]	[%]	[mm²]	[N/mm²]
A-1せ	13.14	23.86	0.55	10.7		774.6	6.3
A-2せ	14.44	23.17	0.62	10.0	11.5	765.5	8.2
A-3せ	15.10	23.80	0.63	10.4	11.5	782.7	10.8
A-4せ	14.75	23.47	0.63	12.2	11.0	765.6	7.2
A-5せ	12.95	23.16	0.56	10.5		764.6	7.4
A-6せ	14.42	23.28	0.62	10.6	平均	782.6	6.7
A-7せ	14.65	23.83	0.61	11.0	11.3	773.9	5.2
A-せ_平均	14.21	23.51	0.60	10.8	標準偏差 (0.3)	772.8	7.4
A-せ_標準偏差	0.83	0.32	0.03	0.7		(7.9)	(1.7)
B-1せ	16.26	23.51	0.69	9.9		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	10.5	763.2	8.4
B-4せ	14.33	23.78	0.60	9.7	10.5	787.3	8.1
B-5せ	16.22	23.90	0.68	10.0	11.0	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	平均	788.9	6.4
B-8せ	17.30	23.55	0.73	10.1	10.7	765.6	3.1
B-9せ	17.18	24.11	0.71	9.7	標準偏差 (0.3)	780.1	4.4
B-せ_平均	16.34	23.79	0.69	10.0		774.9	6.9
B-せ_標準偏差	0.89	0.19	0.04	0.2		(10.7)	(2.0)

●荷重変形

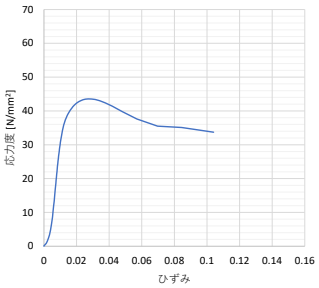
図 11～図 22 に各試験体の応力度－ひずみ関係または荷重変形関係を示す。



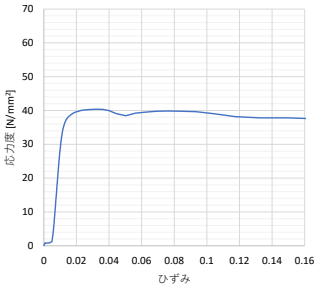
（a） A-1 縦



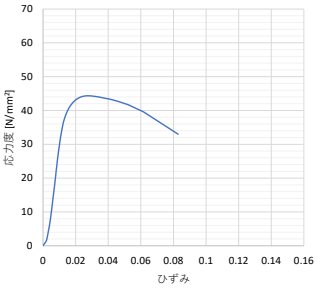
（b） A-2 縦



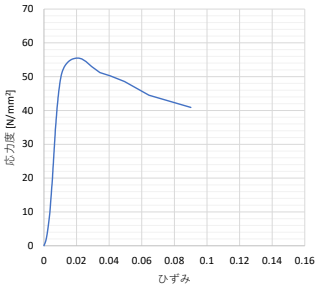
（c） A-3 縦



（d） A-4 縦

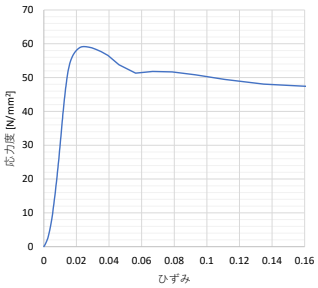


（e） A-5 縦

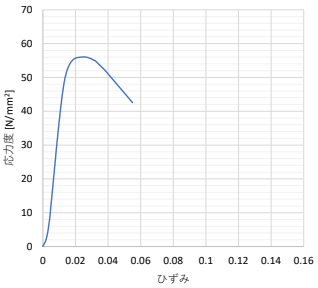


（f） A-6 縦

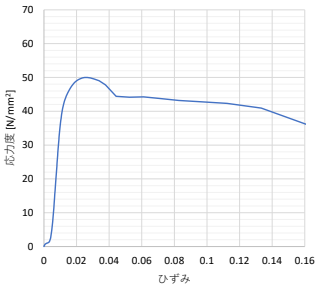
図 11　応力度－ひずみ関係_A-縦



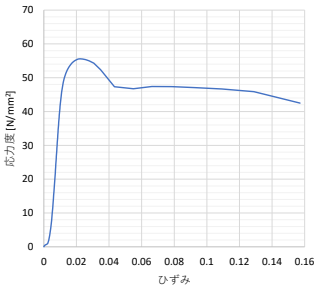
（a） B-1 縦



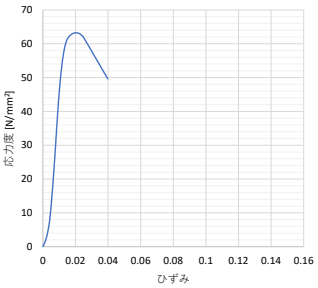
（b） B-2 縦



（c） B-3 縦

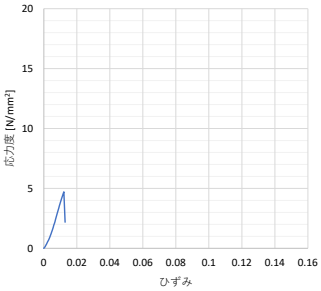


（d） B-4 縦

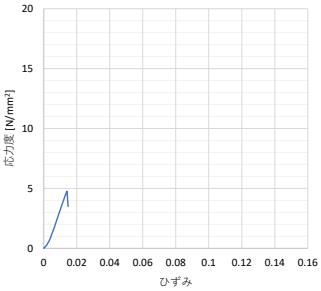


（e） B-5 縦

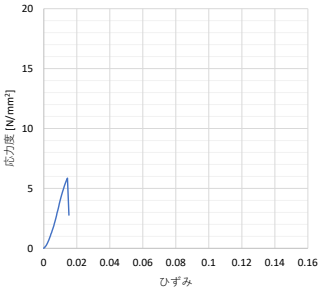
図 12　応力度－ひずみ関係_B-縦



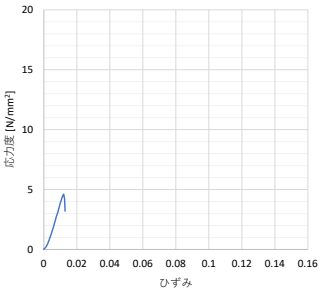
(a) A-1 追



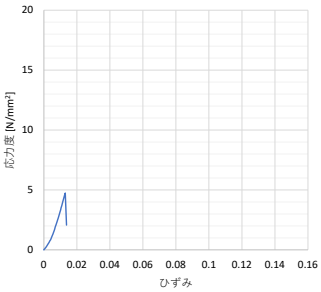
(b) A-2 追



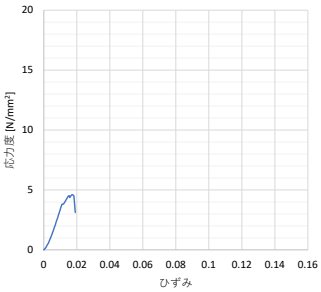
(c) A-3 追



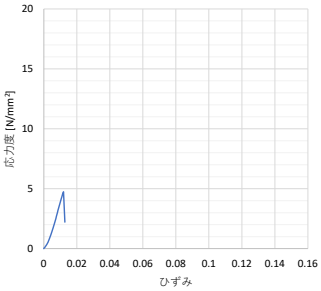
(d) A-4 追



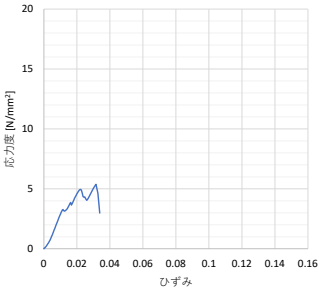
(e) A-5 追



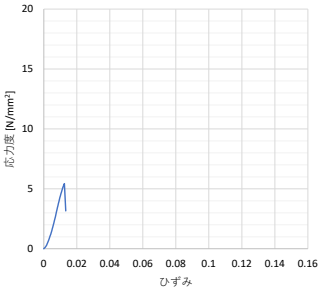
(f) A-6 追



(g) A-7 追

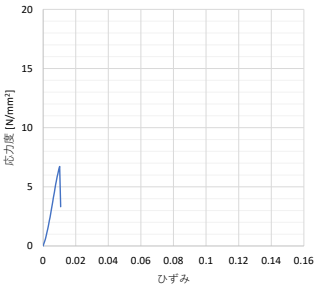


(h) A-8 追

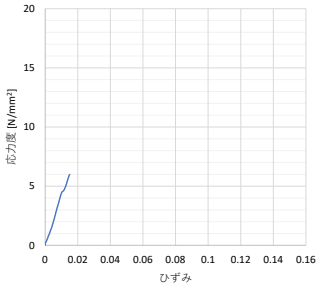


(i) A-9 追

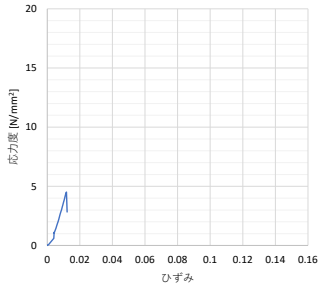
図 13　応力度－ひずみ関係_A-追



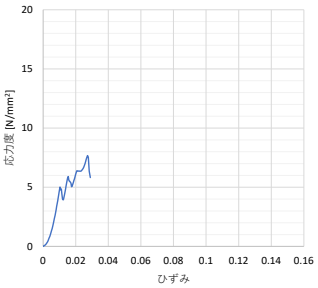
(a) A-1 中



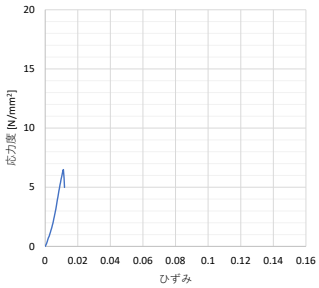
(b) A-2 中



(c) A-3 中

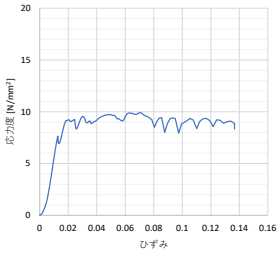


(d) A-4 中

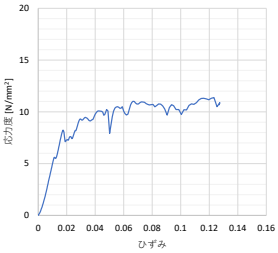


(e) A-5 中

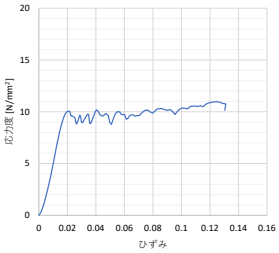
図 14　応力度－ひずみ関係_A-中



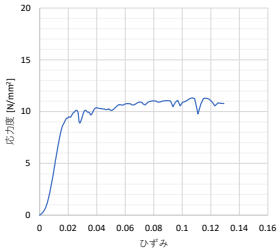
(a) A-1 柾



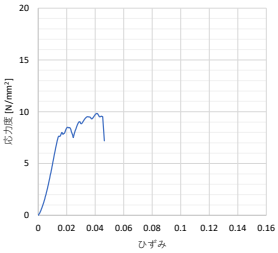
(b) A-2 柾



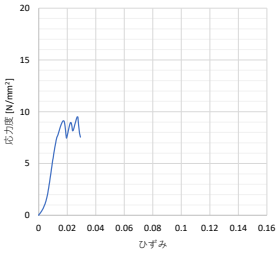
(c) A-3 柾



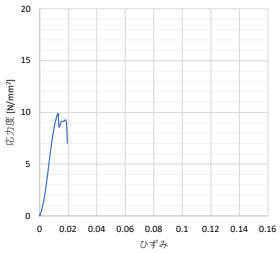
(d) A-4 柾



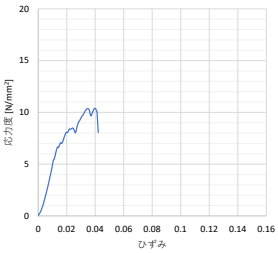
(e) A-5 柾



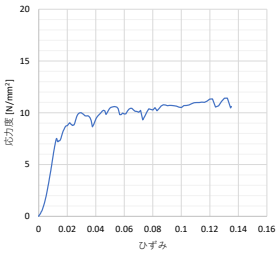
(f) A-6 柾



(g) A-7 柾

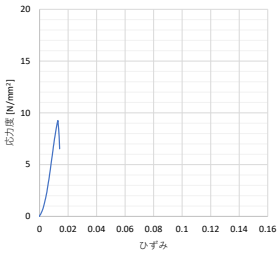


(h) A-8 柾

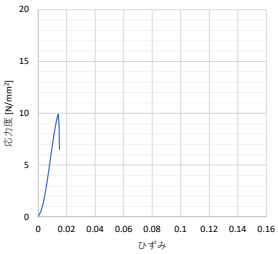


(i) A-9 柾

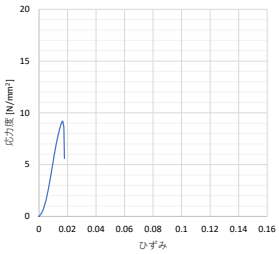
図 15　応力度－ひずみ関係_A-柾



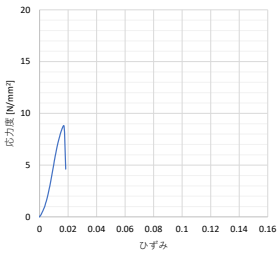
(a) B-1 追



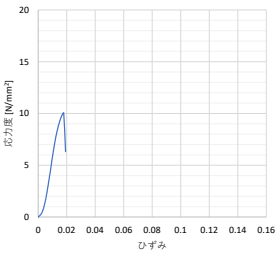
(b) B-2 追



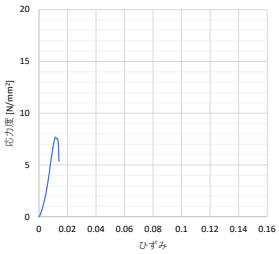
(c) B-3 追



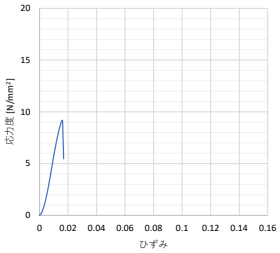
(d) B-4 追



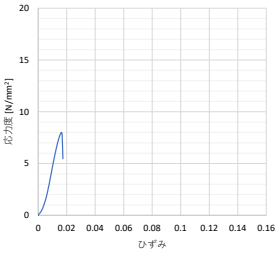
(e) B-5 追



(f) B-6 追

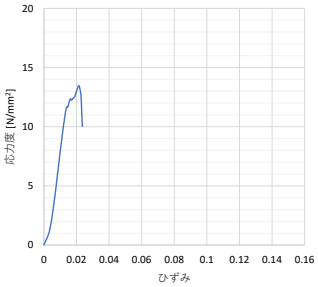


(g) B-7 追

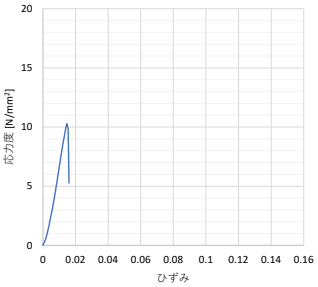


(h) B-8 追

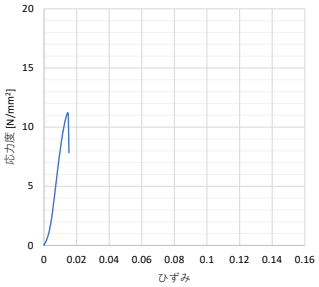
図 16　応力度－ひずみ関係_B-追



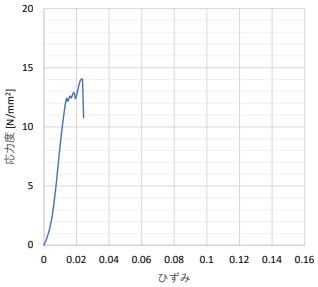
(a) B-1 中



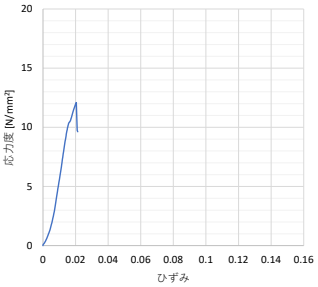
(b) B-2 中



(c) B-3 中

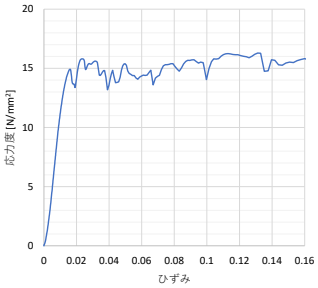


(d) B-4 中

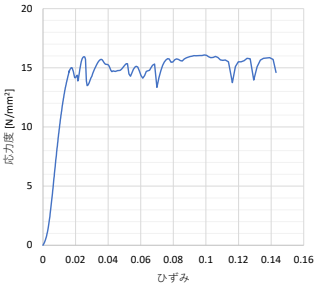


(e) B-5 中

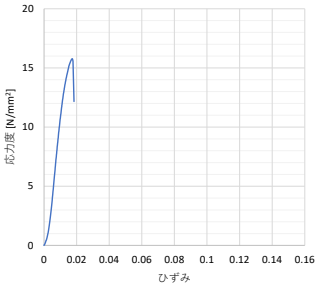
図 17　応力度－ひずみ関係_B-中



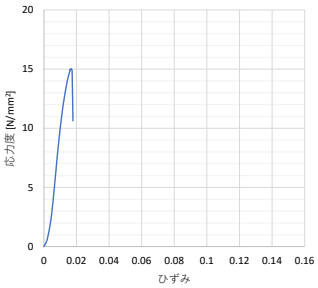
(a) B-1 柾



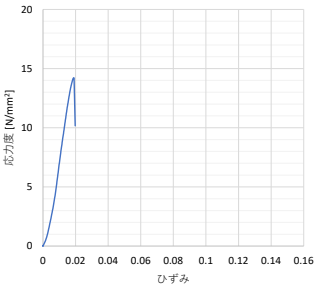
(b) B-2 柾



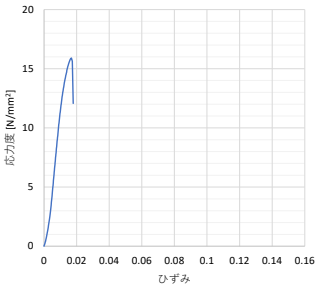
(c) B-3 柾



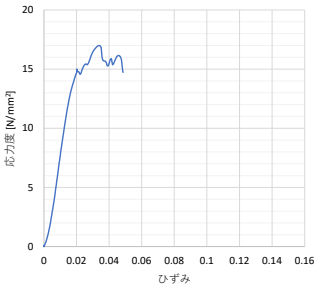
(d) B-4 柾



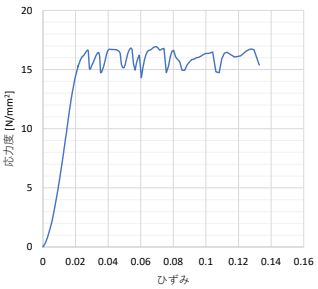
(e) B-5 柾



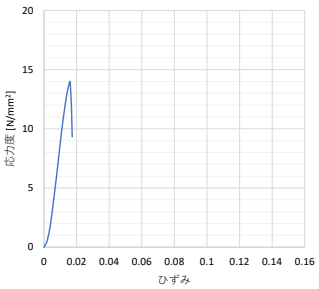
(f) B-6 柾



(g) B-7 柾

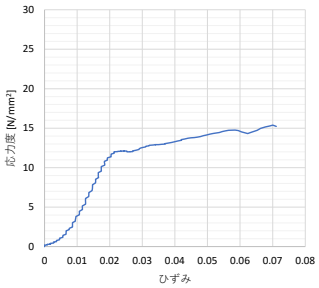


(h) B-8 柾

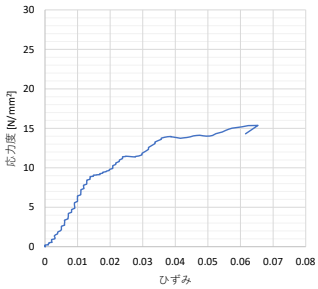


(i) B-9 柾

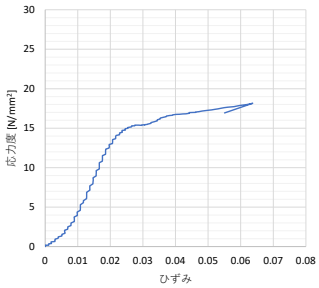
図 18　応力度－ひずみ関係_B-柾



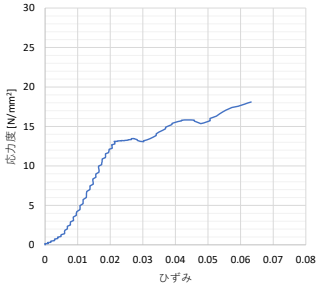
(a) A-1 部



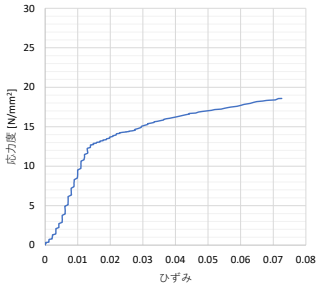
(b) A-2 部



(c) A-3 部

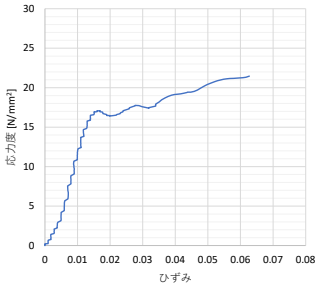


(d) A-4 部

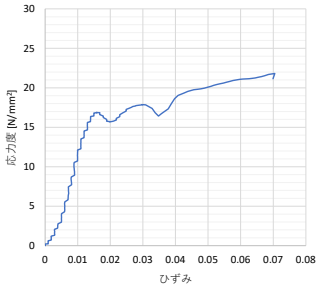


(e) A-5 部

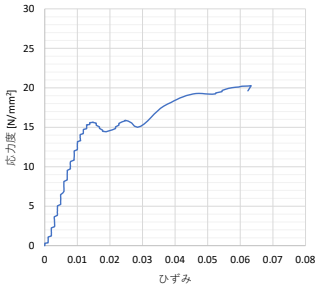
図 19　応力度－ひずみ関係_A-部



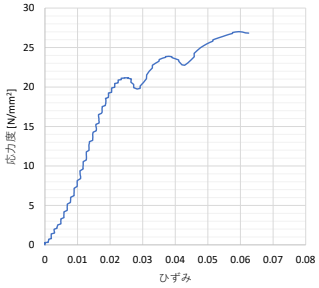
(a) B-1 部



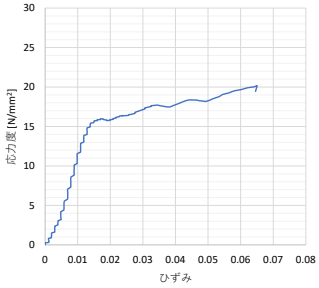
(b) B-2 部



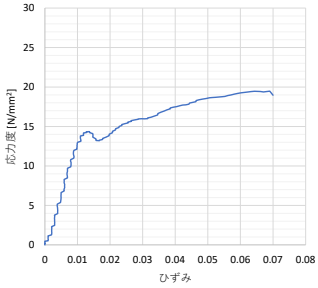
(c) B-3 部



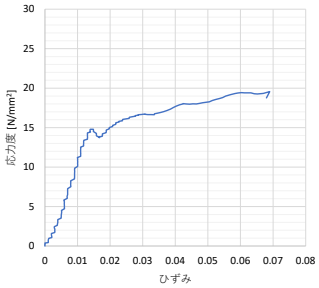
(d) B-4 部



(e) B-5 部

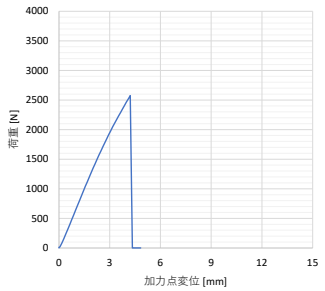


(f) B-6 部

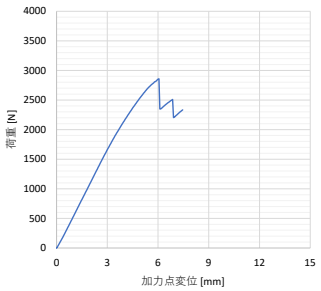


(g) B-7 部

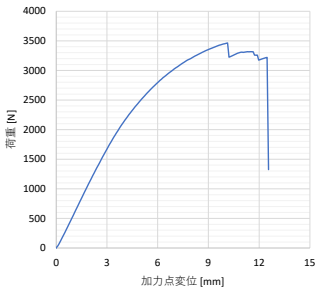
図 20　応力度－ひずみ関係_B-部



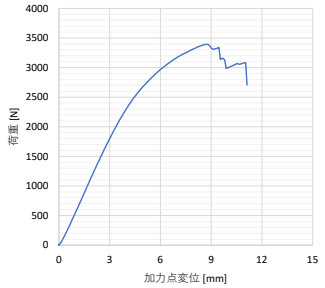
（a）A-1 曲げ（接線方向加力）



（b）A-2 曲げ

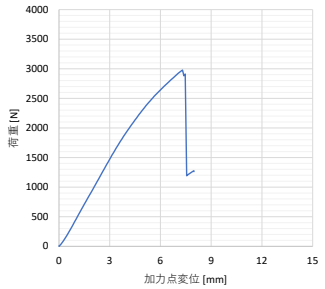


（c）A-3 曲げ

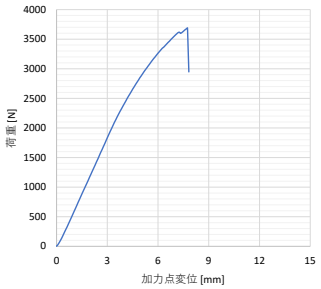


（d）A-4 曲げ

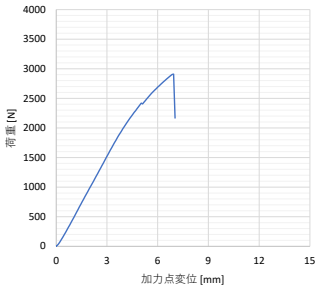
図 21　荷重変形関係_A-曲げ



（a）B-1 曲げ



（b）B-2 曲げ

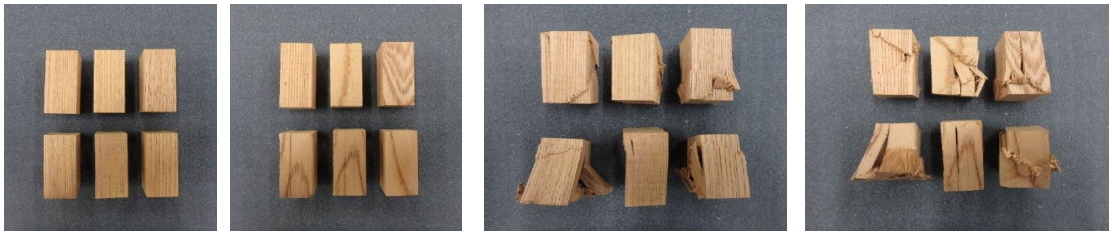


（c）B-3 曲げ

図 22　荷重変形関係_B-曲げ

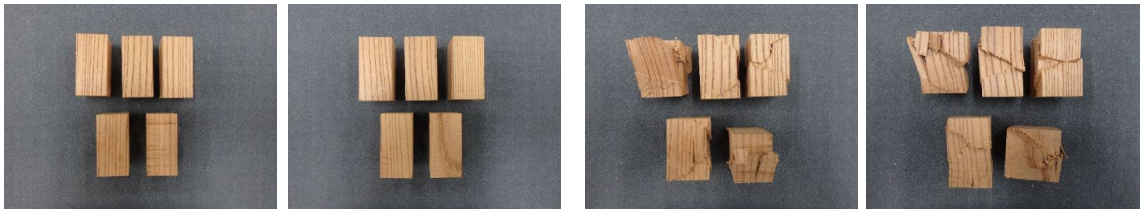
●破壊形状

写真 3～17 に各試験体の試験前後の状況を示す。



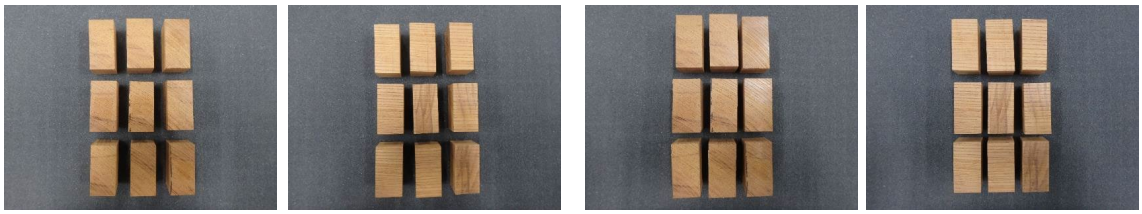
（a）試験前　　（b）試験後

写真 3　試験体状況_A-縦



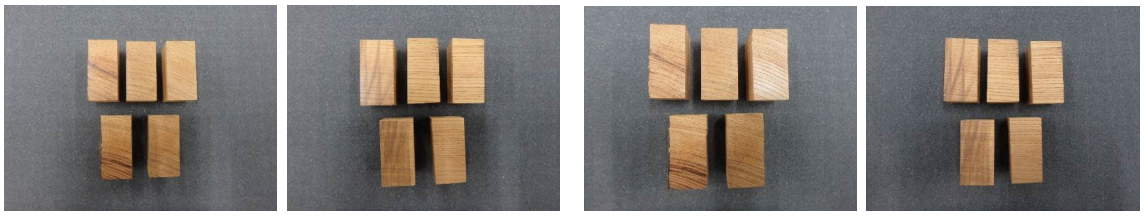
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 4　試験体状況_B-縦



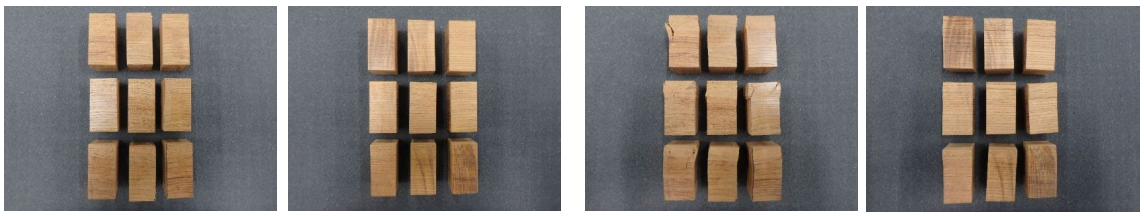
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 5　試験体状況_A-追



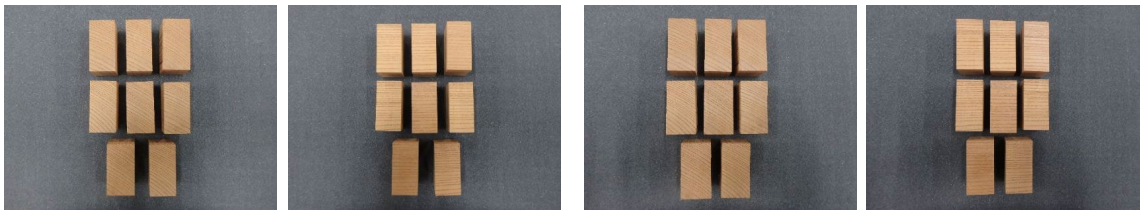
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 6　試験体状況_A-中



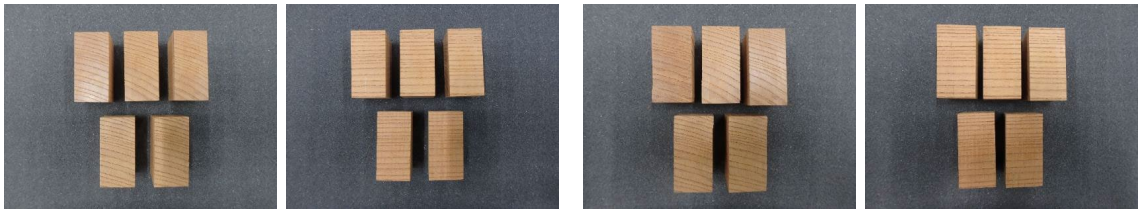
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 7　試験体状況_A-柾



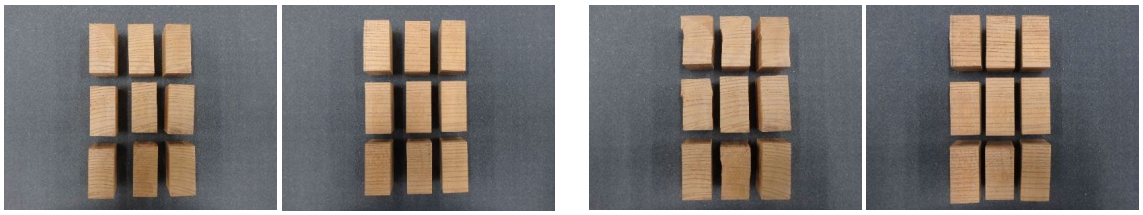
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 8　試験体状況_B-追



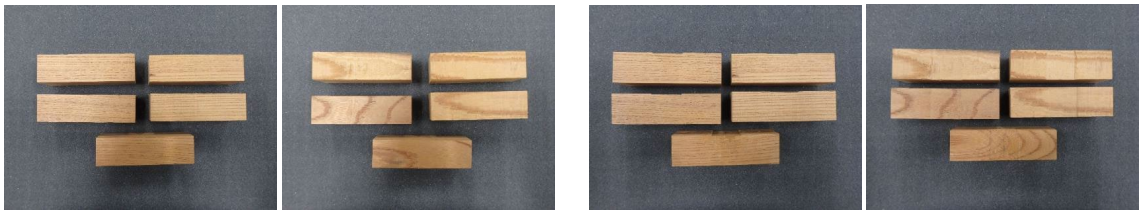
(a) 試験前　(b) 試験後

写真 9　試験体状況_B-中



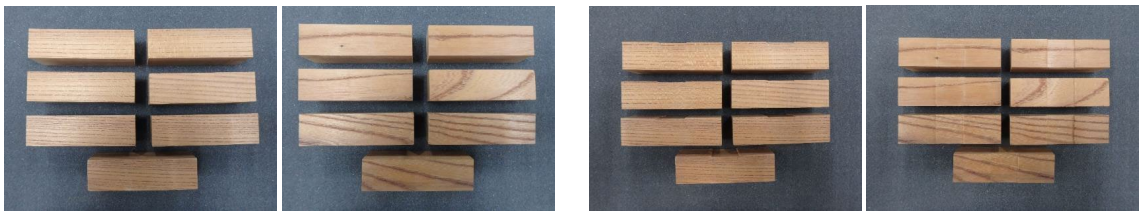
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 10　試験体状況_B-柾



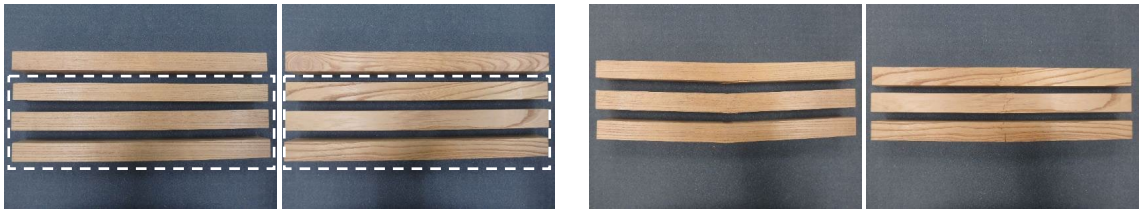
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 11　試験体状況_A-部



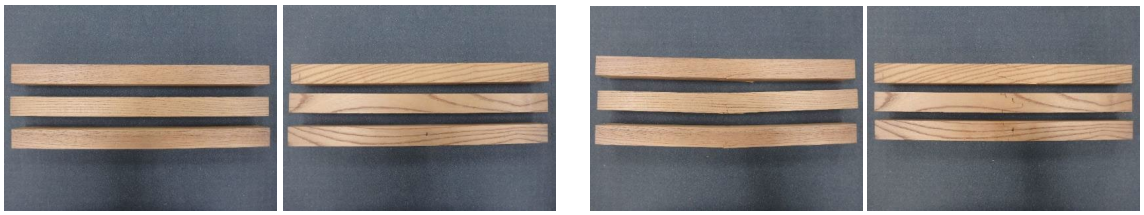
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 12　試験体状況_B-部



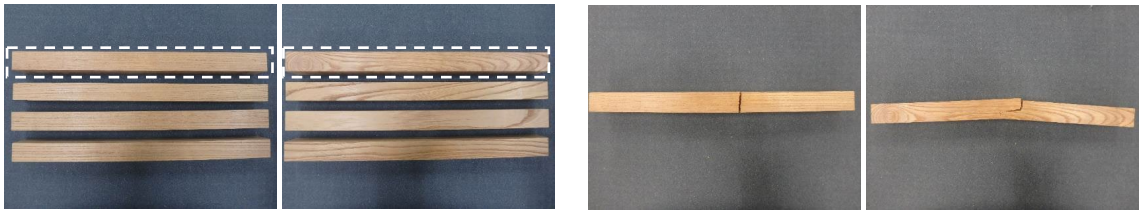
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 13　試験体状況_A-曲げ



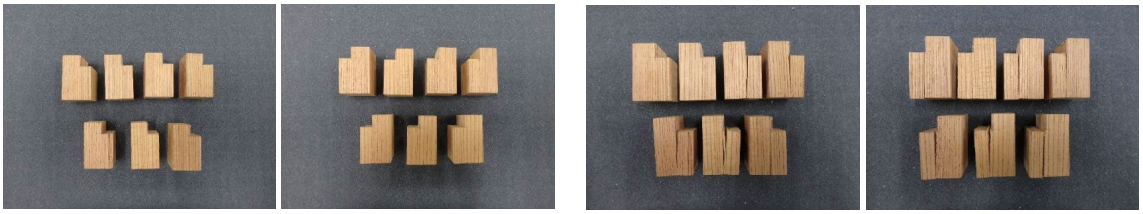
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 14　試験体状況_B-曲げ



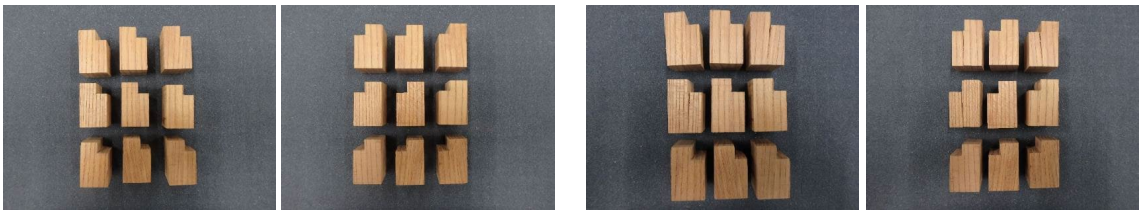
(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 15　試験体状況_A-1 曲げ（接線方向加力）



(a) 試験前　　(b) 試験後

写真 16　試験体状況_A-せ



(a) 試験前　　(b) 試験後

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枠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枠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、尾垂木上斗および枠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。

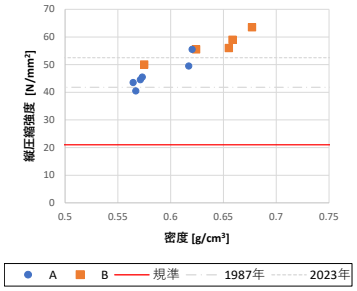


図 23　強度－密度関係__縦圧縮

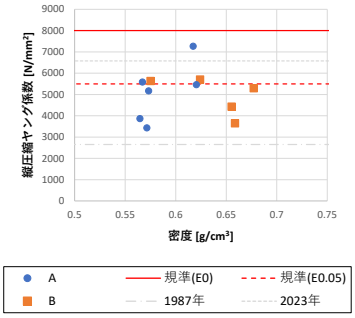


図 24　ヤング係数－密度関係__縦圧縮

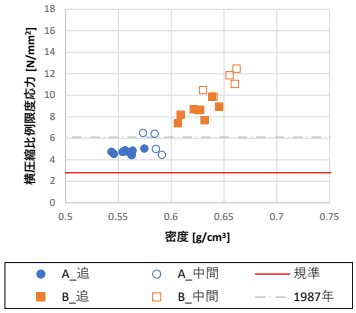


図 25　強度－密度関係__横圧縮

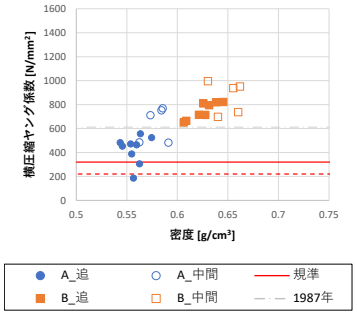


図 26　ヤング係数－密度関係__横圧縮

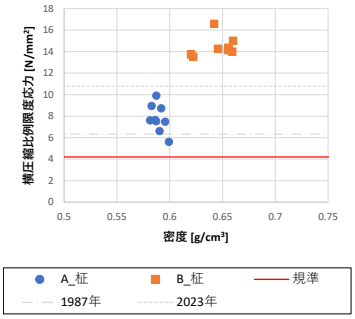


図 27　強度－密度関係__横圧縮

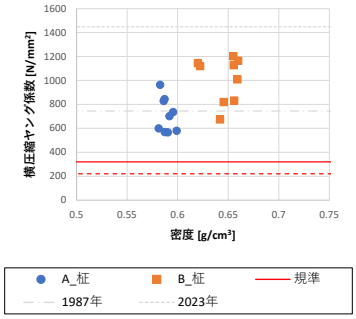


図 28　ヤング係数－密度関係__横圧縮

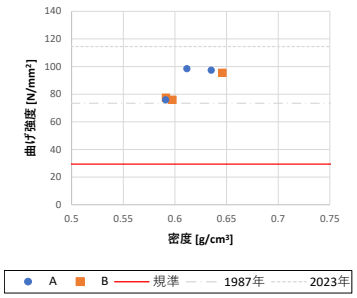


図 29　強度－密度関係__曲げ

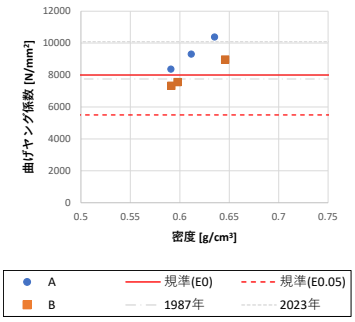


図 30　ヤング係数－密度関係__曲げ

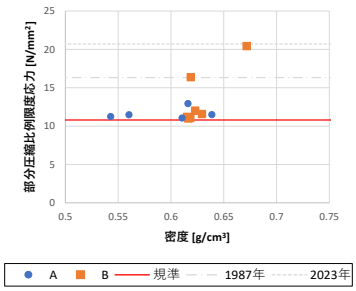


図 31　強度－密度関係__部分圧縮

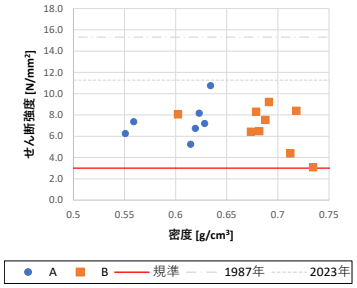


図 32　強度－密度関係__せん断

表 13　特性値一覧

			A. 尾垂木上斗		B. 枠肘木上巻斗		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	追柾	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]
	柾	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 受圧面が追柾の場合は、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

興福寺五重塔の風洞実験

●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：興福寺五重塔
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）
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：三間五重塔婆、本瓦葺
建築年：室町時代　応永 33 年（1426 年）
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：同技術研究所
実験年月日：令和 5 年 11 月 6 日～21 日
引用・参考文献：『史跡興福寺旧境内保存活用計画』（法相宗大本山興福寺 令和 4 年 3 月）

●実験に至る経緯と目的

興福寺五重塔の暴風時における耐風力診断実施にあたり、時刻歴風応答解析に用いる風外力データの計測を目的として、五重塔を中心に周辺建造物の形状や周辺地形の高低差を再現した縮小模型を製作して風洞実験を行う。

基本的には現在の周辺地形、伽藍状況による影響を調べることを目的とするが、「史跡興福寺旧境内保存活用計画」によると、南大門・中金堂中門・同回廊などの建物復元を目指すとされているため、将来的に伽藍復元が成った場合の状況も併せて確認する。

●姿図・寸法

興福寺五重塔の風洞実験模型は，図 1 に示す模型縮尺 S=1/75 で屋根・壁面の風圧力を評価する風圧模型と塔の水平風力を評価する風力模型の 2 種を用いた。また，周辺環境の影響を評価するため塔を中心とする直径 225mの範囲を考慮したボリューム模型として敷地および周辺地形の大きな高低差を再現した。特に図 2 に示す南側 12mの高低差に着目して作成した。

図 1 風洞実験模型（風力模型）

図 2 南側 12mの高低差

【使用材料】

風圧模型：屋根および外壁は樹脂製（一部 3Dプリンターで製作），
内部の圧力計測用チューブ（塩ビ製），圧力タップは銅パイプ

風力模型：屋根および外壁は木製，内部フレームは鉄製

周辺模型：基部円盤と周辺建物は木製，地形形状：塩ビ板，スタイロホーム

【試験体寸法】

風圧・風力模型：模型縮尺 1/75（高さ 681cm，幅（初重）272mm）

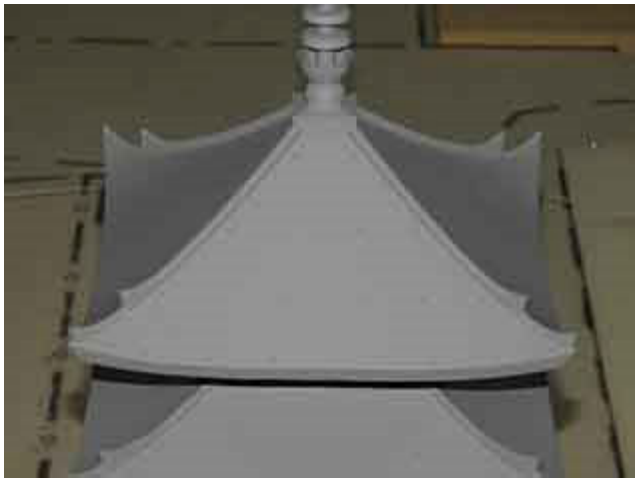
周辺模型：直径 3000mm

各模型の概要を以下に示す。

・風圧模型

風圧実験では図 3 の五重塔の屋根（表裏）および壁面に作用する風圧力（外圧・内圧）を計測した。風圧力の計測は，屋根・壁面に測定孔を設置し，表面にかかる風圧を導圧管および導圧管チューブを介して圧力センサーに導き測定した。ただし，この測定方法は模型縮尺や離散的な測定孔の配置，測定孔の数の制約から細部形状の計測には適さないため屋根全体に作用する風力計測を目的とし，屋根軒下の斗拱等，壁面凹凸の細部は再現しないボリューム形状とした。模型製作は 3Dプリンター（樹脂製）とアクリルを用いて製作を行った。測定孔は 972 点を配置した。

(a) 模型外観



(b) 風圧測定孔

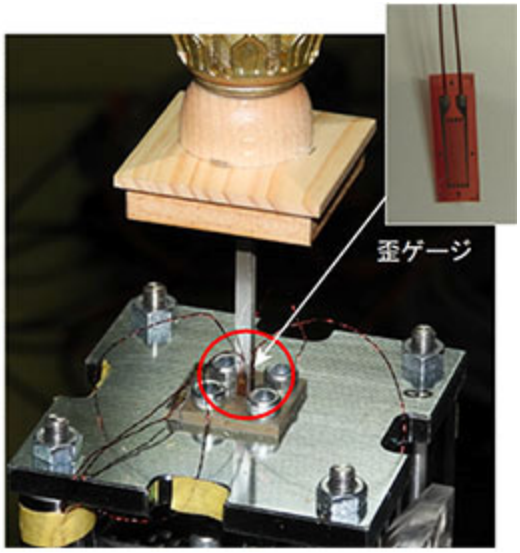
図 3 風圧模型

・風力模型

風力模型は図 4 に示す縮尺 1/75 の縮小模型として外装は市販模型（ウッディジョー：興福寺 五重塔 木製模型 組立キット）を転用した。模型の外壁（屋根，壁面）は軽量なバルサ材を用いた木製で，軒先等の斗拱（大斗、肘木、尾垂木斗拱），手摺等の細部まで再現した形状とした。模型内部は剛な鋼鉄製のフレームで構成し，各層レベルに床板と外壁を支持する柱を設けている。更に柱脚部は歪ゲージを設置して外壁（屋根・壁面）に作用する水平力を計測する。歪ゲージは相輪の根元，五重，四重～初重の 6 層（各 x,y 成分の 12 成分）とした。

(a) 外観

(b) 内部



(c) 水平力計測部

図 4 風力模型

・周辺模型

周辺建物は，敷地内の北側に東金堂（*H*=16m)，国宝館（*H*=13m)，北西側には中金堂（*H*=20m），建物周辺には築地塀，基壇が点在する。また，南側に中低層の市街地が散在する。周辺地形は，南側に高低差 12m 程度の傾斜地を有し，猿沢池が広がる。東側には小地形，その他の方向は平らな形状となる。

上記の周辺環境を考慮して図 5 に示す五重塔を中心とする縮尺 1/75 とした直径 225m の範囲を考慮して簡略化した以下の 3 種のボリューム模型とした。

a) 周辺なし

五重塔周辺の建物なし，市街地と敷地の高低差はありとして地形の影響を把握する形状とした。ただし，南側の市街地は周辺地形と見なして再現した。

b) 現状（周辺あり）

周辺なし模型に加えて現状建物として中金堂，国宝館，東金堂，築地塀等をボリュームで表現した。上記の形状は 2023 年 12 月時点の現状を再現した周辺環境である。

c) 復元伽藍

現状模型に加えて復元予定の南大門，中門，回廊等をボリュームで表現。建物形状については参考資料の「奈良県時代の興福寺伽藍復元　建物想定断面規模」を元にボリューム形状で再現した。

(a) 周辺なし　(b) 現状（周辺あり）　(c) 復元伽藍

図 5 周辺模型

●実験概要

風洞実験では，五重塔の周辺風環境を評価するために五重塔を中心とする直径 225m の周辺市街地を縮小模型により再現。模型中央には五重塔の縮小模型（風圧・風力模型）を設置して五重塔に作用する風力係数の計測を行う。上記の縮小模型は斗拱や壁面の凹凸を省略した簡略形状の風圧模型と斗拱等の詳細形状を再現した風力模型を用いる。

ここで，風圧実験では，模型壁面へ離散点に測定孔（圧力チューブ）を配置するため細部に測定孔を設けることが物理的に不可能である。このため複雑形状を有する建物に作用する風力計測には適さない。ただし，測定孔を多数配置することで面的な風外力を計測することが可能な計測手法である。

風力実験は実建物の形状を細部まで再現した模型（風力模型）を用いることで高精度の風力係数を測定する最適な手法である。

本検討では，風圧実験の測定点 1000 点程度を配置した簡略模型を用いて屋根・壁面の外圧分布を計測，この結果を集約することで水平・鉛直方向の風力を算定。詳細模型を用いた風力実験では五重塔の水平風力を計測する。更に，風力実験で計測した水平力を元に風圧実験で計測した水平力を補正することで詳細形状と同等の興福寺五重塔に作用する水平・鉛直成方向の風力を推定した。

●実験方法

風洞実験は，図 6 の清水建設(株)技術研究所の耐風実験用風洞装置（回流式閉鎖型境界層風洞）を用いた。風洞実験装置の概要は測定部の寸法は，幅 3.5m，高さ 2.5m，長さ 20m で，模型を設置するターンテーブルは直径 3m である。以下に実験条件を示す。

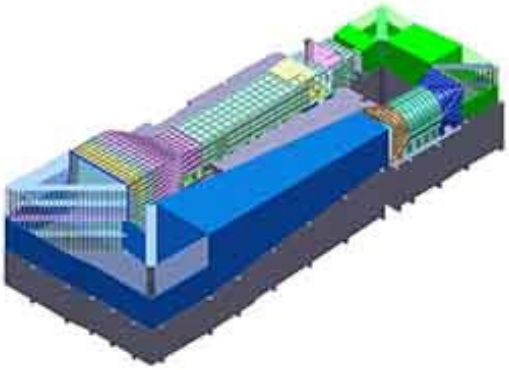


図 6 風洞実験装置の概要

・風洞気流

建設地周辺の状況を勘案して，風の鉛直方向の風速プロファイルは地表面粗度区分 III(べき指数 α=0.2)を用いた。風洞気流は，図 7 に示す測定部の床にラフネスブロック，スパイヤーを設置することによって作成した。

・実験風向

10 度ピッチの 36 風向

・計測条件（風圧実験）

測定孔 972 点の時系列および基準速度圧の平均値

サンプリング周波数およびサンプル数 ：400Hz×160000 個のデータ

サンプリング時間：400 秒（実時間 116 分相当）

・計測条件（風力実験）

相輪，五重から初重の各層に作用する x,y 方向の平均風力(12ch)

サンプリング周波数およびサンプル数 ：200Hz×120000 個のデータの平均値

サンプリング時間：600 秒（実時間 108 分相当）

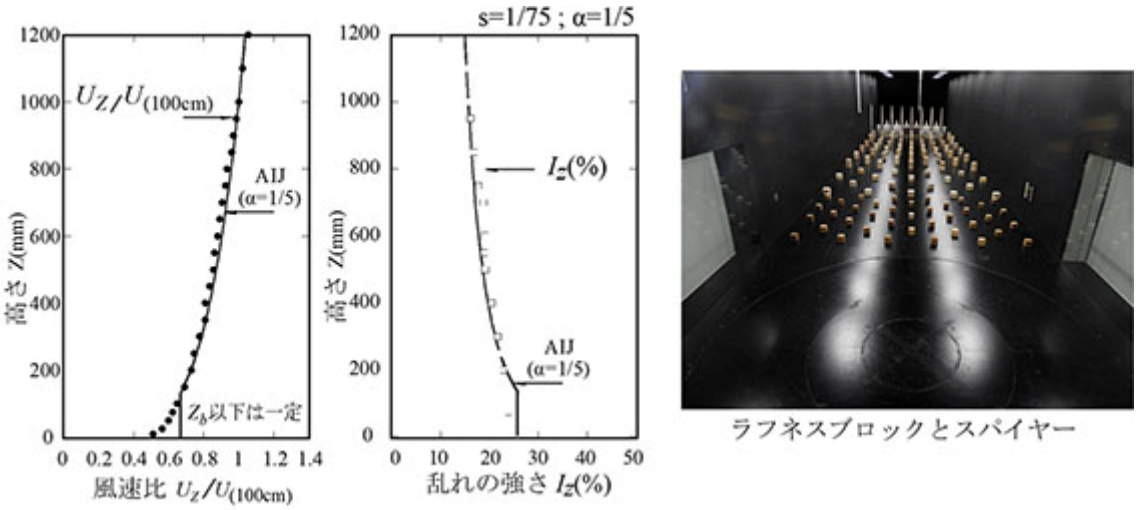
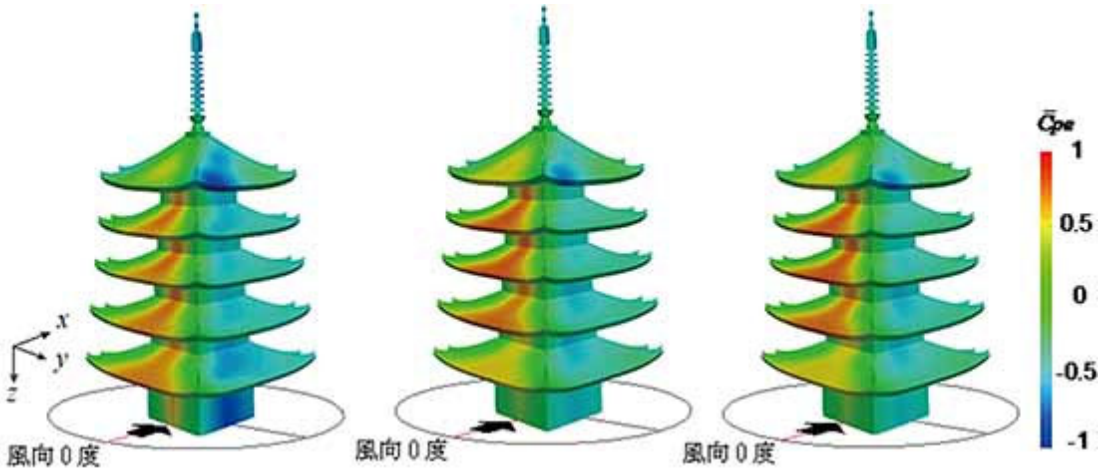


図 7 実験気流

●実験結果・考察

風圧実験で計測した屋根壁面の外圧係数分布の一例を図 8 に示す。屋根面に作用するピーク外圧係数は一般的に負圧側が支配的であるが，屋根勾配が大きい場合は正圧も作用する。実験結果から外圧係数は五重に比べ四重の値が大きく，高さが低くなるに連れて小さくなる傾向がある。ピーク外圧係数は荷重指針の壁面の値に近似する傾向を示し，負圧側は屋根端部で局部負圧が生じ，正圧と同様に高さが低くなるに連れて小さくなる傾向がある

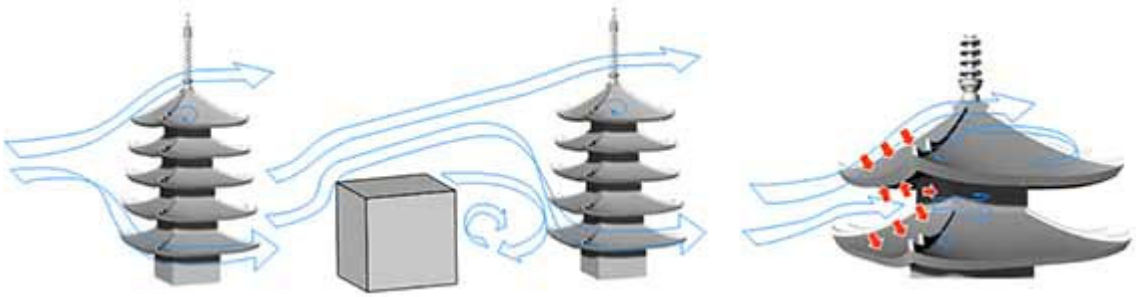
図 9(a)に周辺建物の有無による流れ場のイメージを示した。風上側に建物がある場合は風上側の建物と塔の間で逆流が発生し，建物間隔が広い場合は風速が低減するなど屋根壁面に作用する外圧が変化する。この現象は図 8 の現状・復元伽藍では風上側建物（東金堂）の影響で初重に作用する外圧係数が低減する。



(a) 周辺なし　　(b) 現状（周辺あり）　　(c) 復元伽藍

図 8 屋根壁面の外圧係数分布（風向：建物正面）

また，屋根面の風力係数（表裏の差圧）は，図 8 に示す風上側の屋根面，壁面と軒下面で正圧（面を押す力）が生じており，図 9(b)に示す加力方向から風上屋根に作用する風荷重（差圧）は低減する傾向にある。

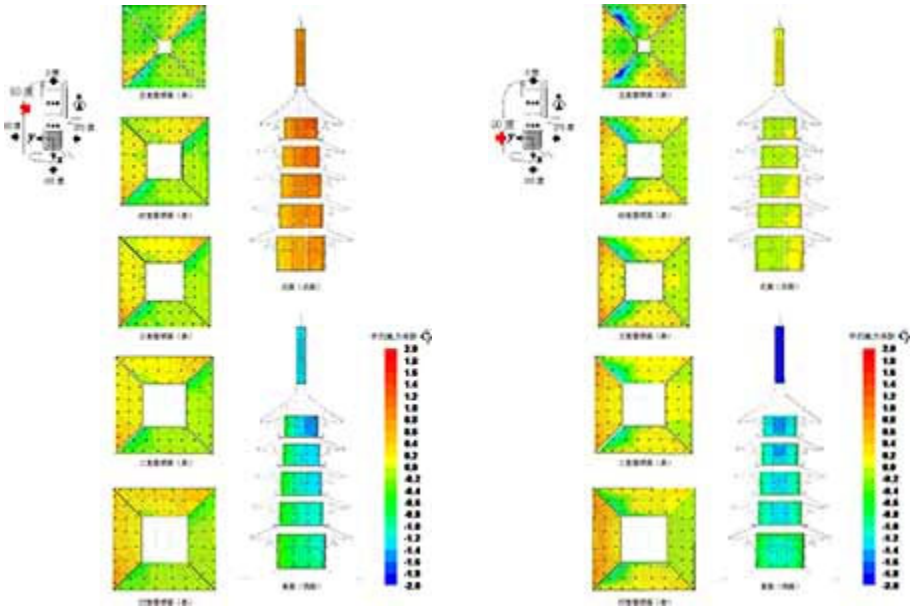


(a) 建物周辺の流れ（単体と建物あり）　　(b) 屋根・壁面周辺の圧力分布

図 9 流れのメカニズム

五重塔の複雑な屋根形状に作用する風力係数の一例として風圧実験の結果から得られた鉛直成分を示す。周辺地形の影響の少ない風向 0～90 度において、塔全体に作用する平均風力係数は上向きに 0.3～0.4 程度となる（初重屋根の水平投影面積で基準化した値）。

図 10(a),(b)に、層ごとに作用する平均風力係数分布を示す。周辺地形の影響の少ない風向 0～90 度において、風上側で正圧、風下側で負圧となる。特に隅棟の風下側の負圧が顕著で上層ほどその程度は大きく、結果として層ごとの鉛直方向の平均風力係数は三重以上で上向きとなり五重で最大、初重では逆に吹き下げとなる。



(a)風向 50 度　　(b)風向 90 度

図 10　平均風力係数分布（周辺なし）

その他、五重塔の形態に起因する風圧力の特性について、実験結果より以下のことが読み取れる。

・ 風向 0～90 度の風力係数（各方向とも塔平面に正対する見付面積で基準化）は同程度の大きさとなっており、正対方向と斜め 45 度方向とで作用する風力に大きな差異は生じていない。また、その値は 1.2 程度で、整形な外形状の建物壁面に適用する静的な値と同等である。
・ 五重屋根風下側の負圧は陸屋根形状に比べ小さい。
・ 風向方向に作用する外力が支配的で、風向直行方向の振動は励起されにくい。

図 11 に風力・風圧実験の結果から五重塔の全体に作用する風力係数分布を示す。「現状（周辺あり）」の中金堂，東金堂の設置，復元伽藍の中門，南大門がある周辺環境では，これらの建物が風上側となる風向で風力係数の低減が顕著に見られ，風向 0～100 度，風向 300～0 度付近では風力係数が半減程度まで減少している。

風向 130～140 度付近では，市街地と中門，南大門の谷間の位置することで谷間風が生じ，更に地形の影響を受けて増速が加わり風力係数は最大値を示している。

周辺建物の変化から「周辺なし」が最大値を示し，周辺建物の増加に伴い「現状（周辺あり）」，「復元伽藍」と風力係数の値が減少する傾向が確認できた。

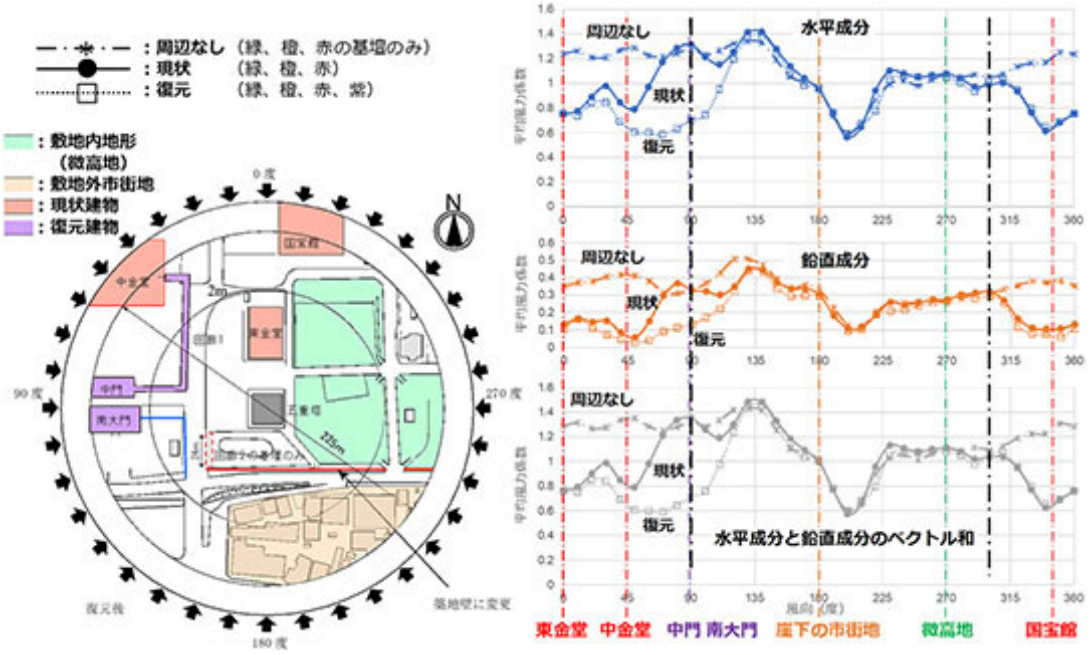


図 11 周辺環境による風力係数の変化（水平成分：x,y 方向の 2 乗和）

図 12 に現状（周辺あり）における各層に作用する風力係数の風向変化を示した。実験結果から五重から初重に作用する風力係数は風速分布に類似して高層部ほど大きな値を示す。周辺建物や地形により塔に作用する風力係数に変化が見られ，特に風向 140 度では南側地形および市街地建物の影響で下記に示す風速変化が生じていると考えられる。

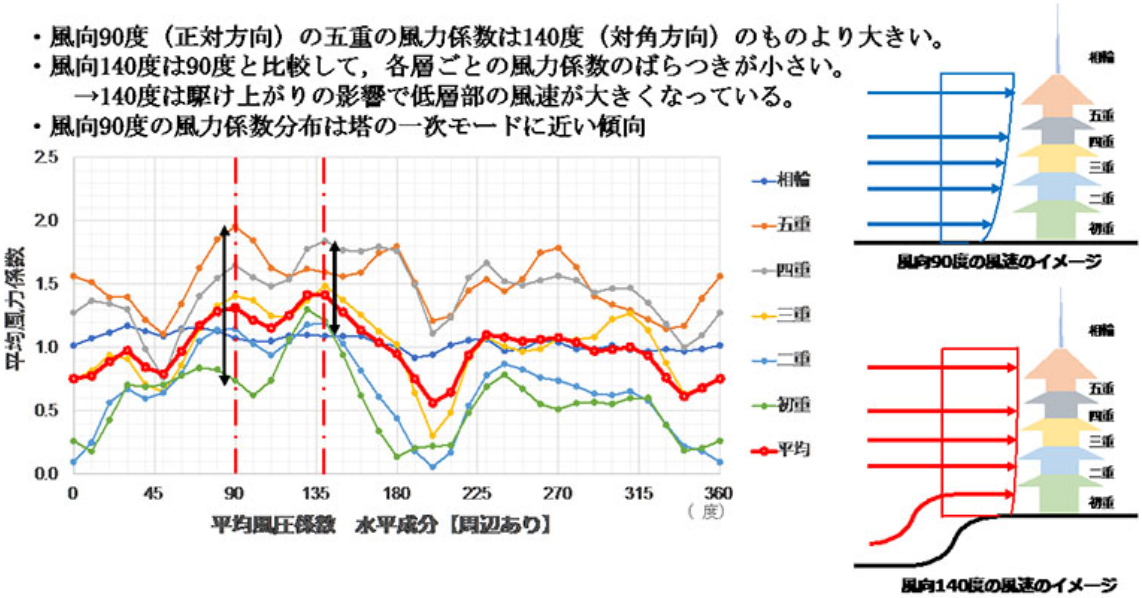


図 12 各層に作用する風力係数の変化

●実験結果を用いた暴風時診断の結果概要

風洞試験により得られる風圧模型の計測点ごとの風力係数に、別途算定した速度圧および負担面積を乗じることで、解析モデルの節点位置に応じた時刻歴の風圧力を設定し、これを外力とする時刻歴応答解析を行った。

速度圧 q は日本建築学会 2015 年版荷重指針に準拠して、基本風速 34m/s（地上 10m における 10 分間平均風速）から設計用再現期間 500 年を想定、奈良県の風向低減係数を考慮して算出した（当該地は奈良地方気象台から直線距離約 900m で平坦地のつづく立地条件）。

実験結果による風圧係数は、前述のとおり南西風向（風向 130～140 度）で最大値を示すが、風向低減係数を考慮すると塔平面に正対する方向の風力が大きくなる。解析の結果、最大応答層間変形角は初重で 1/47（柱の傾斜は 1/25）となり、倒壊の可能性は低いと判断された。

ニッカウヰスキー余市蒸溜所施設リキュール工場における木造トラスと鉄骨補強部材接合部の性能試験

●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：ニッカウヰスキー余市蒸溜所施設リキュール工場
文化財種別（指定年月日）：重要文化財（令和 4 年(2022 年)2 月 9 日）
所在地：北海道余市郡余市町黒川町 7 丁目 6
所有者：ニッカウヰスキー株式会社
構造形式：木骨石造、平屋建、梁間 8.72m、桁行 27.73m、切妻造、鉄板葺、小屋組キングポストトラス
建築年：昭和 14 年（1939 年）
事業名称：重要文化財（建造物）ニッカウヰスキー余市蒸溜所施設リキュール工場耐震診断事業
事業期間：令和 6 年 4 月 1 日～令和 7 年 3 月 31 日
工事種別：耐震診断
事業者：ニッカウヰスキー株式会社
技術指導：株式会社文化財保存計画協会
実験計画者：株式会社コンステック
実験機関：北海学園大学工学部山鼻キャンパス 3 号館地下 1 階 大型振動実験室
実験年月日：2025 年 1 月 24 日、25 日、26 日
引用・参考文献：

「木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-」（日本建築学会、2006）（以下、「木規準」と略記）
「中大規模木造建築物の構造設計の手引き 改訂版」(彰国社、稲山正弘、2019)
「半剛節接合部を持つ木造フレームの変形挙動：(1)釘打ちガセット接合工法による梁およびラーメン型フレームの曲げ変形」（北海道大学農学部演習林研究報告第 44 巻第 1 号、平井卓郎、1987）
「木造建築物の一歩進んだ構造設計入門」（（一社）北海道建築技術協会、平井卓郎、2019）
「木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017 年版）」(公益財団法人日本住宅・木材技術センター、2017)

●実験に至る経緯と目的

・本建物の耐震補強計画では、鉄骨造ラーメン架構の補強フレームを建物内部に設けて木骨柱頂部近傍の梁材と接続し、補強することとしている。

・補強部材と既存木造軸組を接続する方法として、補強フレーム鉄骨柱頂部の周囲に鉄製アングル材によるトラス部材を配置し、トラス部材の端部と既存木造軸組をガセット付き鋼板を介して、木質構造用ねじで接続する方法として計画を立案している。

・引用・参考文献により机上での検討によって接合部の詳細仕様を定めたものの、

①使用を想定している木ねじはメーカーからは 1 本あたりの強度は示されているものの、複数打ち込んだ場合の資料がない

②打ち込み間隔は「木規準」及び「中大規模木造建築物の構造設計の手引き」を参考に定めたものの、その妥当性や母材への影響(破壊に至った際の割裂状況)に関する資料が少ない

③木ねじの引抜方向に対して、傾斜して引抜力が加わった場合に、各ねじに均等に力が分配されないことの影響に関する資料がない

④メーカーによって多少ではあるものの性能に差があることが想定されるが、その選定を行うための資料が少ない

といった問題点がある。よって、実験によりデータを収集することで種々の資料の補完を行い、接合部の仕様について妥当性を判断し、内容を詰める必要がある。

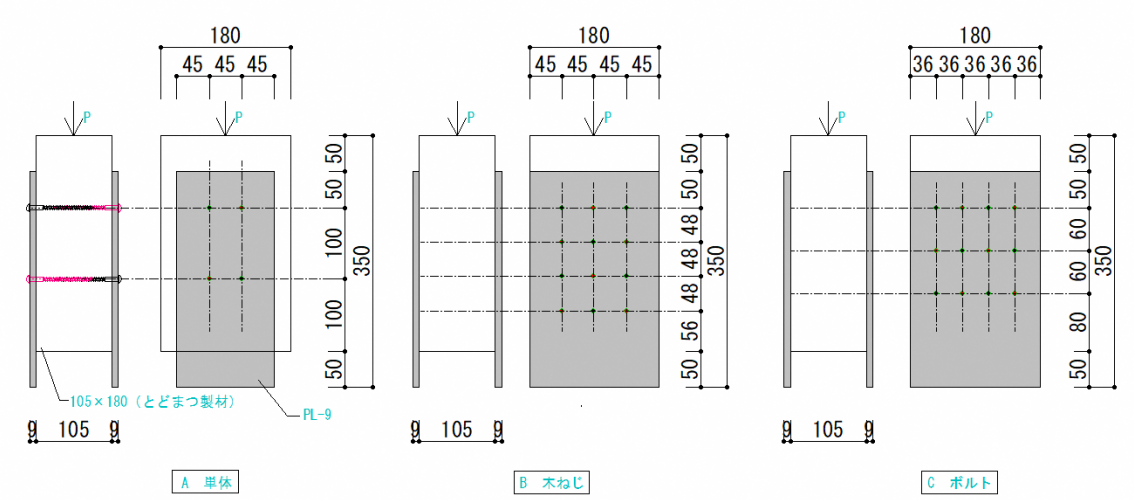
・実験は接合部の木質構造用ねじにおいて、せん断力と引張力の複合応力および、ねじの配置による耐力の影響を確認するために、既存はり部材に用いられていると想定されるえぞまつを母材として、ねじ接合部のせん断試験、引張試験、傾斜引張加力試験を行うことを計画した。

●実験方法

1)せん断強度試験

木質構造用ねじの間隔は、A 単体、B 木ねじ（木規準を参考にした標準的なもの）、C ボルト（中大規模木造建築物の構造設計の手引きを参考にしたもの）の 3 種類で実施する。

木質構造用ねじは S 社製および W 社製の 2 種類で、試験体数は各 6 体の計 36 体である。一面せん断とし、変位計測は柱の軸芯で前後 2 箇所計測し、接合部変位は 2 箇所の平均値を用いた。



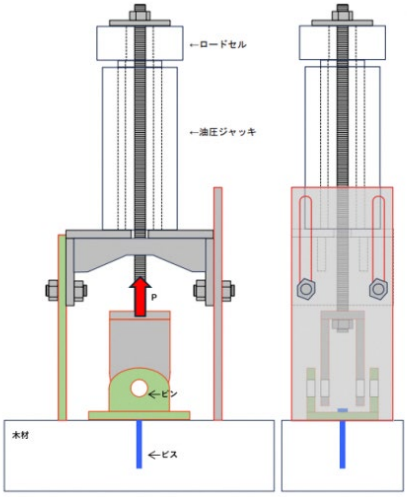
※A 単体について、両サイドから互い違いに木ねじを打ち込むため、片側 2 本となる。

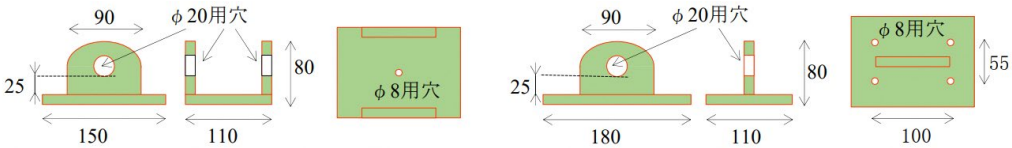
※B 木ねじについて、両サイドから互い違いに木ねじを打ち込むため、片側での木ねじ間隔は横方向 90 ㎜、縦方向 96 ㎜となる。片側 6 本の打ち込みを行う。

※C 木ねじについて、両サイドから互い違いに木ねじを打ち込むため、片側での木ねじ間隔は横方向 72 ㎜、縦方向 120 ㎜となる。(反対側の木ねじとの間隔を 60㎜＞7d としている）片側 6 本の打ち込みを行う。

2)引張強度試験

木質構造用ねじはS社製およびW社製の2種類、ねじ本数は1本および4本の2種類で、試験体数は各6体の計24体を実施する。変位計測は柱の軸芯で前後2箇所計測し、接合部変位は2箇所の平均値を用いた。



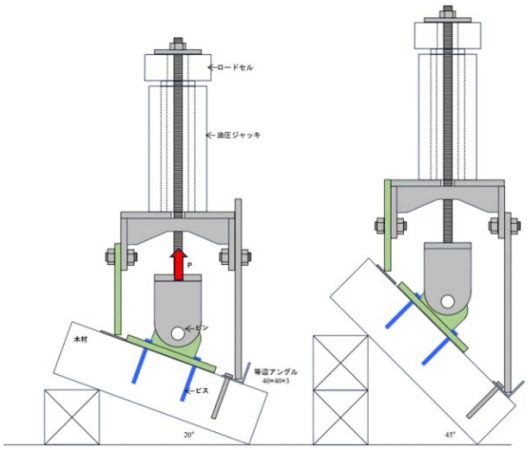


*鋼板 t=12mm

*傾斜引張強度試験も共通

3)傾斜引張強度試験

架台の傾斜角度は20°および45°の2種類、木質構造用ねじはS社製およびW社製の2種類で、試験体数は各6体の24体を実施する。変位計測は柱の軸芯で前後2箇所計測し、接合部変位は2箇所の平均値を用いた。



傾斜 20°

傾斜 45°

●使用材料

木材：えぞまつ製材（無等級）、105×180mm

木質構造用ねじ：径 8mm、長さ 90mm

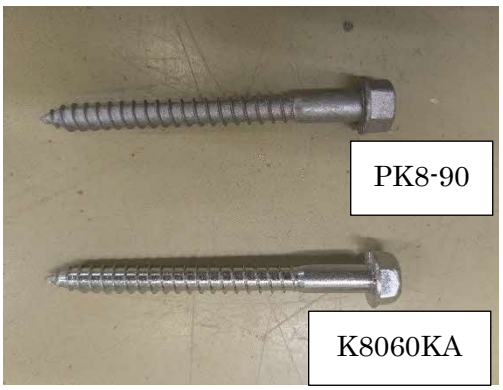
① S 社製　「PK8-90」

② W 社製　「K8060KA」

鋼材：A.せん断強度試験　鋼板 PL-9mm

B.引張強度試験　鋼板 PL-12mm

C.傾斜引張強度試験　鋼板 PL-12 mm



●使用試験機：アムスラー型万能試験機、センターホール型油圧ジャッキ、
ロードセル（容量：50kN）、ひずみ変換型変位計（容量：100mm、50mm）
木材水分計（高周波容量式、20MHz）

●試験体数

1)せん断強度試験

		ねじ配置			合計（体）	
		A	B	C		
ビスメーカー	S 社	6	6	6	18	36
	W 社	6	6	6	18	

2)引張強度試験

		ねじ本数		合計（体）	
		1 本	4 本		
ビスメーカー	S 社	6	6	12	24
	W 社	6	6	12	

3)傾斜引張強度試験（複合応力）

		傾斜		合計（体）	
		20°	45°		
ビスメーカー	S 社	6	6	12	24
	W 社	6	6	12	

＊試験体記号　[S:S 社製、W：W 社製]

せん断試験　A、B、C（配列）－ S、W （メーカー）

引張試験　T-S、W（ねじ本数、1 本：無記入、4 本：4）

傾斜引張試験　M-S、W-20、45（傾斜角）

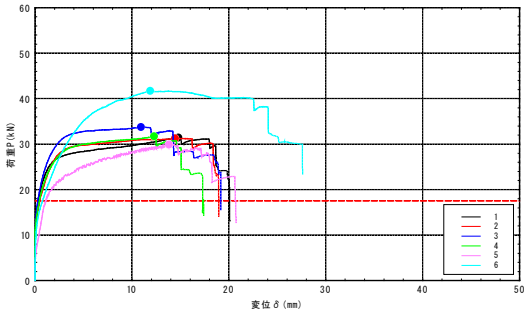
●試験結果

短期基準接合耐力の算定は、「公益財団法人日本住宅・木材技術センター木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017 年版）」における第 4 章 試験方法と評価方法 4.4 継手・仕口接合部の試験の評価方法に準じて行う。

図中の赤点線は設計に採用した S 社の社内実験値（短期許容耐力）である。

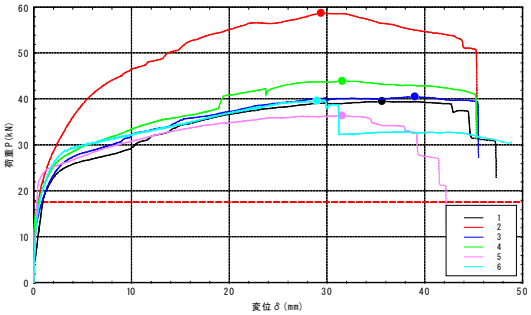
せん断耐力：4.37kN,　引張耐力：3.97kN　※W 社の社内実験値は無い。

なお、傾斜引張試験においては、木ねじ打ち込み面に対する鉛直成分が支配的となるため、ここでは参考値として、実験時の荷重値に cosθ（θ：傾斜角）を乗じた値に変換して、引張耐力（短期許容耐力）とを比較した。



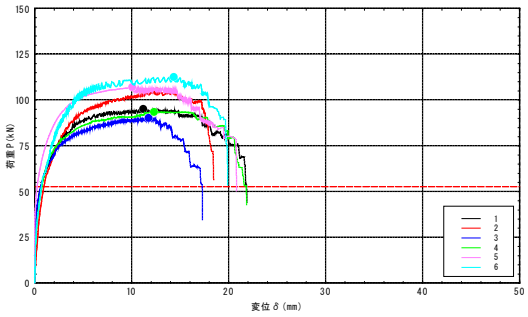
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

A-S



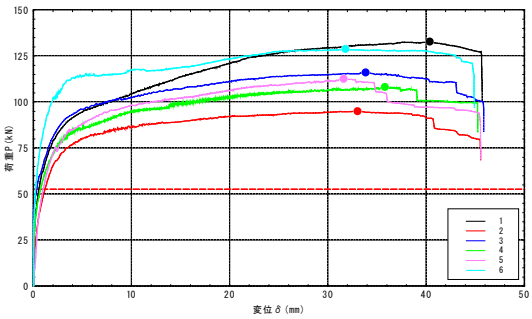
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

A-W



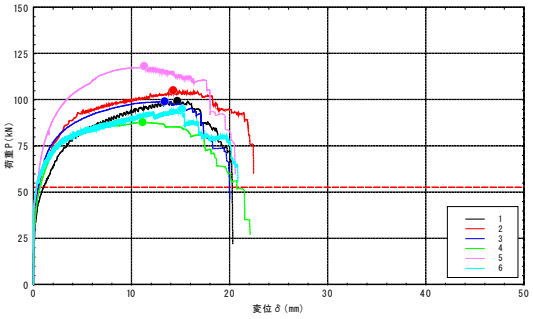
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

B-S



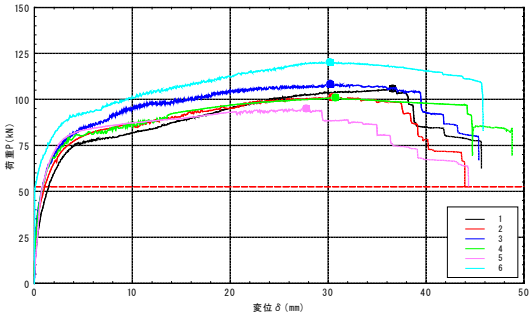
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

B-W



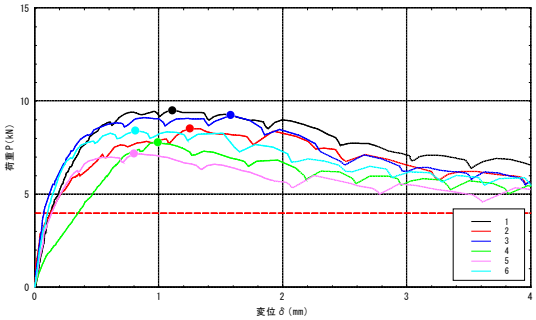
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

C-S



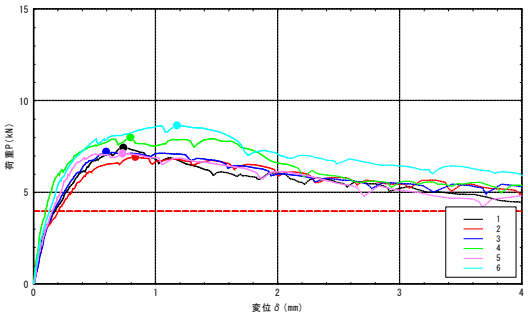
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

C-W



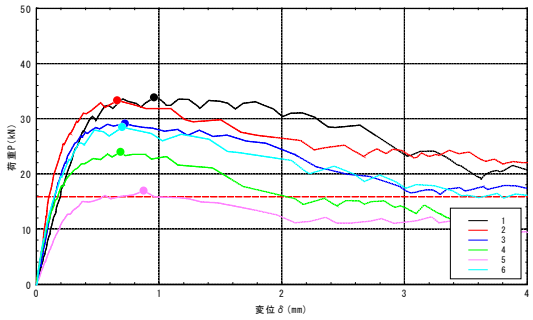
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

T-S



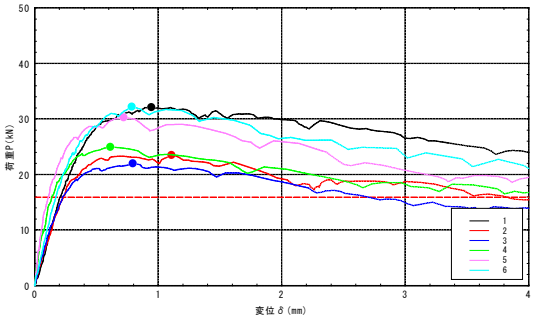
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

T-W



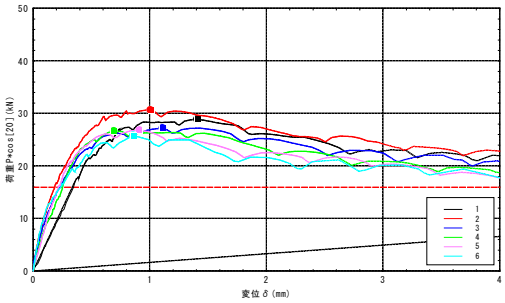
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

T4-S



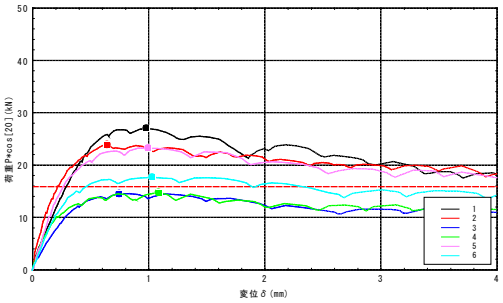
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

T4-W



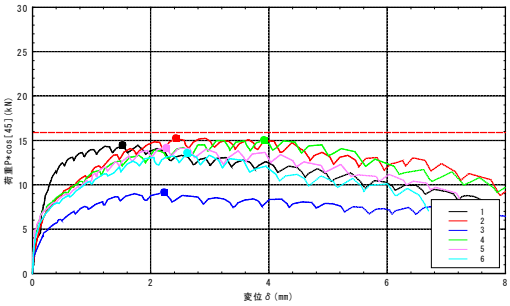
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

M-S-20



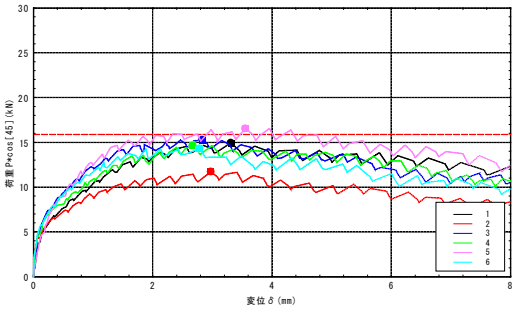
（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

M-W-20



（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

M-S-45



（注）図中の●印は，Pmax時を示す。

M-W-45

・木材の見掛け密度（g/cm³）

試験体記号			1	2	3	4	5	6
A	S		0.39	0.39	0.39	0.40	0.42	0.46
	W		0.41	0.47	0.41	0.43	0.41	0.41
B	S		0.41	0.43	0.40	0.40	0.43	0.42
	W		0.44	0.42	0.42	0.43	0.43	0.44
C	S		0.44	0.39	0.44	0.44	0.44	0.37
	W		0.40	0.42	0.43	0.46	0.43	0.43
T	S		0.58	0.60	0.60	0.55	0.56	0.61
	W		0.54	0.57	0.55	0.55	0.61	0.61
M	S	20	0.61	0.55	0.55	0.54	0.58	0.55
		45	0.56	0.57	0.56	0.59	0.57	0.54
	W	20	0.54	0.57	0.54	0.56	0.60	0.59
		45	0.57	0.54	0.60	0.61	0.60	0.60

平均値＝0.50（ g/cm³）

・木材の含水率（%）

試験体記号			1	2	3	4	5	6
A	S		20.6	17.9	19.8	20.0	19.8	22.9
	W		－	－	－	－	－	－
B	S		20.3	23.0	18.3	19.0	21.6	21.4
	W		－	－	－	－	－	－
C	S		23.1	19.0	35.7	26.7	18.8	14.8
	W		－	－	－	－	－	－
T	S		18.6	25.5	25.1	21.7	24.2	25.2
	W		17.8	18.2	22.3	21.1	24.2	26.8
M	S	20	21.6	21.8	24.8	16.5	20.1	26.6
		45	18.7	22.4	17.8	19.5	20.8	19.8
	W	20	13.5	21.5	19.4	19.5	24.2	23.5
		45	16.7	22.3	25.1	21.4	22.3	24.1

＊［ － ］は計測未実施。

平均値＝21.4（%）

●考察

・せん断強度試験および引張強度試験において、各々の供試体において木ねじ１本に対するメーカー（S 社）の社内実験値（短期許容耐力）を上回る P-δ曲線が得られた。

・傾斜引張試験における、M-W-20、M-S-45、M-W-45 では、メーカーの社内実験値よりも下回る供試体が見られた。ただし、含水率が高かったことを踏まえると、実験値は過少評価になっている可能性がある。含水率の平均値は 21.4%であったため、昭 62 建告第 1898 号における含水率 15 %以下の規定に対して 6.4%多いことや、本実験における含水率測定が木材表面での測定であることから、木材内部はさらに高かったと推察される。

・木ねじを複数打ち込んだせん断試験において、木ねじ１本の耐力より換算した値が実験値と大きく異なる様子は見られなかった。配置による違いについても特筆する違いは見られなかった。また、メーカーの社内実験値より計算した接合部耐力に対して、木ねじ本数の減らすことを検討できるような試験結果までは得られなかった。

・その他、破壊性状においては、いずれの場合も木材が割裂せず、脆性的な破壊をしないこと、また、せん断特性については W 社の木ねじの靭性が高いことを確認した。

以上より、接合部の検討にあたっては、以下の通りとする。

〇接合部の検討において、メーカー（S 社）の社内実験値を採用する。社内実験値を下回る供試体が見られたことから、本来であればこれらを勘案して導き出した数値を用いて、安全率を考慮した上で計算を行うべきである。しかしながら、今回は文化財を対象とした検討であることから、特に既存躯体に孔明するような補強は最小限であることが求められる。そういった観点からは必ずしも安全率を見込むことが正しいとは言い難く、過剰設計となる可能性もある。また、メーカーに拠る社内実験値は 5%下限値を見込んでおり、一定程度信頼できる数値と考えられる。その他、接合部の検討にあたっては Ds 値を 0.55 と安全側に設定している（補強鉄骨フレームは Ds=0.40）。以上の見解を踏まえて、総合的に判断してメーカー社内実験値を用いて構造検討を行うこととした。

〇いずれの試験でも母材が割裂することはなかった。よって、木ねじの打ち込み間隔は「木規準」及び「中大規模木造建築物の構造設計の手引き」によって示された間隔を採用する。

〇メーカーによる差異については、どちらかの優位性を判断するまでの資料は得られなかったことから、各メーカーの同等製品の両方を用いることができるように仕様書を作成する。