

薬師寺東塔における心柱（スギ）、丸桁桔（マツ）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：薬師寺東塔

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 26 年 12 月 9 日）

所在地：奈良県奈良市

所有者（管理団体）：宗教法人 薬師寺

構造形式：三間三重塔婆、每重もこし附、本瓦葺

建築年：奈良時代（天平 2 年（730）頃建て始め）

事業名称：国宝薬師寺東塔保存修理事業

事業期間：平成 21 年 7 月～平成 33 年 3 月

工事種別：解体修理

事業者：宗教法人 薬師寺

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：平成 30(2018)年 2 月 16 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（2006 年）
- 2) 東洋書店 建築に役立つ木材・木質材料学（今村祐嗣ほか編著 1999 年）

●実験に至る経緯と目的

構造診断業務の中で、心柱と丸桁桔の強度を評価するためにサンプル試験を実施した。これにより古材の経年劣化の推定検証と再用の妥当性を確認する。

● 姿図・寸法

【使用材料】

縦圧縮試験体 $l*w*h=60*20*20(mm)$

曲げ試験体 $l*w*h=320*20*20(mm)$

表 1 に試験体の一覧を示す。

表 1 試験体一覧

採取個所	試験種別	No.	載荷面	樹種
心柱 (14 世紀頃)	縦圧縮試験	A-1	木口面	スギ
		A-2	木口面	スギ
		A-3	木口面	スギ
	曲げ試験	B-1	柁目面	スギ
		B-2	柁目面	スギ
		B-3	柁目面	スギ
丸桁桔 (明治)	縦圧縮試験	C-1	木口面	マツ
		C-2	木口面	マツ
		C-3	木口面	マツ
	曲げ試験	D-1	柁目面	マツ
		D-2	柁目面	マツ
		D-3	柁目面	マツ

【試験体寸法】

図 1、図 2 に示す通り。

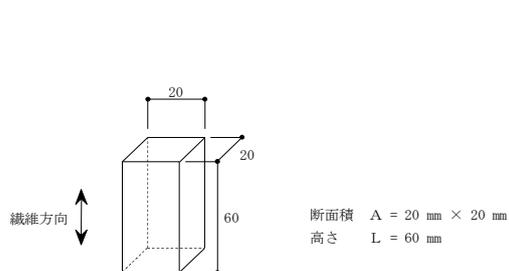


図 1 縦圧縮試験体

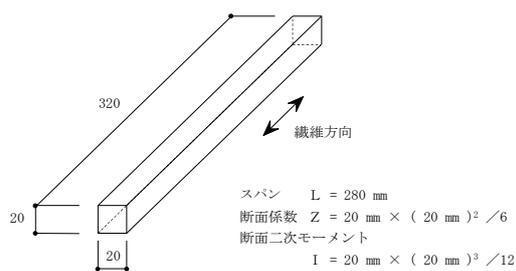


図 2 曲げ試験体

● 概要

本試験では、薬師寺東塔改修工事にて再用する木材の一部を用いて材料試験を実施し、材料定数の確認を行なう。求められた材料定数は、東塔の骨組解析などに反映させる。なお、心柱(スギ)の年代は、放射性年代測定により、1339-1366(95.4%)と判定され、丸桁桔(マツ)の年代は明治期である。

●実験方法

JIS Z2101-2009 に準拠した縦圧縮試験・曲げ試験を行なう。各試験の方法は以下の通りである。

・縦圧縮試験

JIS Z2101-2009 に準拠して縦圧縮試験を行なう。試験体は図1に示したものを用い、材の繊維方向に圧縮荷重をかける。荷重は清水建設（株）技術研究所多機能実験棟岩石ブロックの MTS 500 kN 万能試験機により載荷する。載荷点の鉛直方向変位は変位計（（株）東京測器 CDP50 ）により測定する。各試験体については、密度および含水率の測定も行なう。

・曲げ試験

JIS Z2101-2009 に準拠して曲げ試験を行なう。試験体は図2に示したものを用い、材の桁目面より荷重をかける。荷重は清水建設（株）技術研究所多機能実験棟岩石ブロックの MTS 500 kN 万能試験機により載荷する。載荷点は図3に示すように試験体の中央位置とし、載荷点の鉛直方向変位は変位計（（株）東京測器 CDP50 ）により計測する。各試験体については、密度および含水率の測定も行なう。

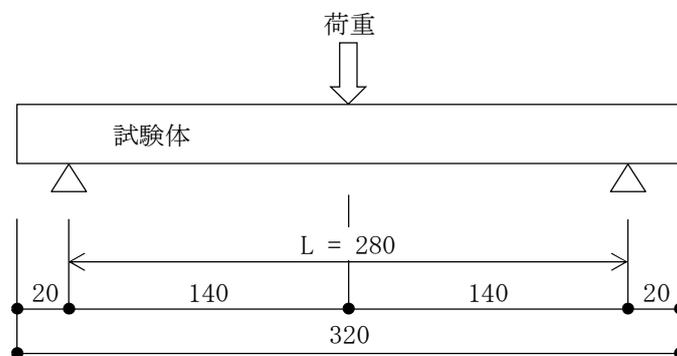


図3 曲げ試験体の載荷方法

試験より求まる諸数値の算定方法は以下の通りとした。

[強さ，比例限度，ヤング係数]

・縦圧縮試験（JIS Z2101-2009 によった）

図1および図4を参照して、
以下の通りとした。

$$\text{縦圧縮強さ} = \frac{P_{\max}}{A}$$

$$\text{縦圧縮比例限度} = \frac{P_a}{A}$$

$$\text{縦圧縮ヤング係数} = \frac{\Delta Y / \Delta Y}{A/L}$$

ここに、

P_{\max} : 最大荷重

P_a : 比例限度荷重

A : 断面積（図1を参照）

L : 試験体高さ（図1を参照）

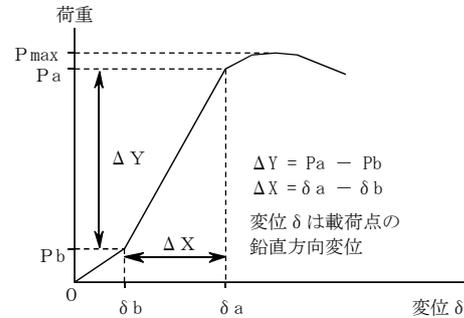


図4 縦圧縮試験より求まる荷重—変形関係の模式図

・曲げ試験（JIS Z2101-2009 によった）

図2および図5を参照して、
以下の通りとした。

$$\text{曲げ強さ} = \frac{P_{\max} \cdot L/4}{Z}$$

$$\text{曲げ比例限度} = \frac{P_a \cdot L/4}{Z}$$

$$\text{曲げヤング係数} = \frac{(\Delta Y / \Delta X) \cdot L^3}{48 \cdot I}$$

ここに、

P_{\max} : 最大荷重

P_a : 比例限度荷重

L : スパン（図3を参照）

Z : 断面係数（図2を参照）

I : 断面二次モーメント（図2を参照）

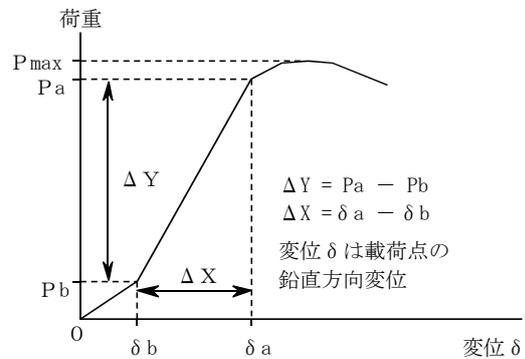


図5 曲げ試験より求まる荷重—変形関係の模式図

[密度]

JIS Z2101-2009 に基づき以下の手順で算定した密度の値とした。

$$\text{密度} = W / V$$

ここに、W は試験時の試験体重量 (g)、V は試験体の体積 (cm³) である。

[含水率]

含水率計（株）ケット科学研究所 MT700）により測定した。

●物性値

表 2 に縦圧縮試験、表 3 に曲げ試験の結果一覧をそれぞれ示す。また、本試験結果の比較対象として、標準的なスギ・マツの材料定数 1) 2) 3) の例を表 4 に示す。本試験体のマツについては、くわしい種類が不明であるが、表 4 にはアカマツの数値を示す。

本試験で取り扱った木材はすべて既存の建築物から取り出された古材であり、表 2・表 3 と対応する数値は普通構造材であるが、表 4 では参考として甲種構造材一級の繊維方向特性値の値も示している。表 2、表 3 の数値と表 4 の数値の対応は表 5 の通りである。

表 2 縦圧縮試験結果

採取 個所	樹種	試験体	含水率 ^{***)} (%)	密度 (g/cm ³)	縦圧縮 強さ (N/mm ²)	縦圧縮 比例限度 (N/mm ²)	縦圧縮 ヤング係数 (kN/mm ²)
心柱	スギ	A-1	5%未満	0.42	49.1	26.3	5.6
		A-2	7.1	0.40	44.7	22.7	4.8
		A-3	7.4	0.40	44.4	23.3	4.8
		平均値	—	0.41	46.1	24.1	5.1
		95%下限 ^{*)}	—	—	37.7	18.0	3.7
		50%下限 ^{**)}	—	—	44.8	23.2	4.9
丸桁桔	マツ	C-1	5%未満	0.49	52.5	29.0	5.8
		C-2	5%未満	0.50	61.4	38.7	7.7
		C-3	5%未満	0.51	54.0	28.3	6.1
		平均値	—	0.50	56.0	32.0	6.5
		95%下限 ^{*)}	—	—	41.0	13.7	3.4
		50%下限 ^{**)}	—	—	53.7	29.3	6.1

*) 信頼水準 75 %における下側 95 %許容限界値

***) 信頼水準 75 %における下側 50 %許容限界値

****) 使用した含水率計の測定可能範囲 (5~40 %) を下回った場合は「5%未満」と記載

表3 曲げ試験結果

個所	樹種	試験体	含水率 ^{***)} (%)	密度 (g/cm ³)	曲げ 強さ (N/mm ²)	曲げ 比例限度 (N/mm ²)	曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)
心柱	スギ	B-1	7.6	0.41	74.3	33.7	7.7
		B-2	8.0	0.44	81.9	39.6	8.3
		B-3	8.1	0.46	81.9	38.1	8.6
		平均値	—	0.44	79.4	37.2	8.2
		95%下限 ^{*)}	—	—	65.5	27.5	6.7
		50%下限 ^{**)}	—	—	77.3	35.7	7.9
丸桁桔	マツ	D-1	5%未満	0.5	78.5	29.8	10.1
		D-2	8.4	0.51	84.4	31.1	10.0
		D-3	7.7	0.52	96.0	39.0	10.8
		平均値	—	0.51	86.3	33.3	10.3
		95%下限 ^{*)}	—	—	58.3	17.6	9.0
		50%下限 ^{**)}	—	—	82.1	30.9	10.1

*) 信頼水準 75 %における下側 95 %許容限界値

***) 信頼水準 75 %における下側 50 %許容限界値

****) 使用した含水率計の測定可能範囲 (5~40 %) を下回った場合は「5%未満」と記載

表4 標準的な材料定数

樹種	種別	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げヤング係数	
				50%下限 ^{*)} (kN/mm ²)	95%下限 ^{**)} (kN/mm ²)
スギ	普通構造材 ^{*1)}	17.7	22.2	7.0	4.5
	甲種構造材一級 ^{*2)}	21.6	27.0	7.0	4.5
	参考値 ^{*3)}	33.3	64.7	7.8	
アカマツ	普通構造材 ^{*1)}	19.2	25.2	8.0	5.5
	甲種構造材一級 ^{*2)}	27	33.6	10.0	6.5
	参考値 ^{*3)}	44.1	88.3	11.3	
比較対象		A-1, 2, 3	C-1, 2, 3	B-1, 2, 3	D-1, 2, 3

*) 信頼水準 75 %における下側 95 %許容限界値

***) 信頼水準 75 %における下側 50 %許容限界値

*1) 日本建築学会木質構造設計規準・同解説 (2006年) p. 399 資料表 1.6 「日本建築学会木質構造設計規準・同解説」普通構造用材の繊維方向特性値の基準材料強度・基準弾性係数による

*2) 日本建築学会木質構造設計規準・同解説 (2006年) p. 395 資料表 1.1 「製材の日本農林規格」目視

等級区分構造用製材の繊維方向特性値の基準材料強度・基準弾性係数による

- *3) 東洋書店 建築に役立つ木材・木質材料学（今村祐嗣ほか編著，1999年） p.336，p.339 <付録>
主要木材の性質と用途の圧縮強さ・曲げ強さ・曲げヤング係数による（単位を重力単位から SI 単位に変換）

表5 標準的な材料定数と試験結果による値との比較

		標準的な材料定数（表3）		試験結果による値（表1 or 表2）			
心柱	普通構造材	圧縮強度	17.7 (N/mm ²)	表1	縦圧縮強さ	95%下限	37.7 (N/mm ²)
		曲げ強度	22.2 (N/mm ²)	表2	曲げ強さ	95%下限	65.5 (N/mm ²)
		曲げヤング 50%下限	7.0 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	50%下限	7.9 (kN/mm ²)
		曲げヤング 95%下限	4.5 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	95%下限	6.7 (kN/mm ²)
	参考値	圧縮強度	33.3 (N/mm ²)	表1	縦圧縮強さ	平均値	46.1 (N/mm ²)
		曲げ強度	64.7 (N/mm ²)	表2	曲げ強さ	平均値	79.4 (N/mm ²)
		曲げヤング係数	7.8 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	平均値	8.2 (kN/mm ²)
丸桁桔	普通構造材	圧縮強度	19.2 (N/mm ²)	表1	縦圧縮強さ	95%下限	41.0 (N/mm ²)
		曲げ強度	25.2 (N/mm ²)	表2	曲げ強さ	95%下限	58.3 (N/mm ²)
		曲げヤング 50%下限	8.0 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	50%下限	10.1 (kN/mm ²)
		曲げヤング 95%下限	5.5 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	95%下限	9.0 (kN/mm ²)
	参考値	圧縮強度	44.1 (N/mm ²)	表1	縦圧縮強さ	平均値	56.0 (N/mm ²)
		曲げ強度	88.3 (N/mm ²)	表2	曲げ強さ	平均値	86.3 (N/mm ²)
		曲げヤング係数	11.3 (kN/mm ²)	表2	曲げヤング	平均値	10.3 (kN/mm ²)

●荷重変形

図6に縦圧縮試験の応力-ひずみ関係を、図7に曲げ試験の応力-変位関係をそれぞれ示す。

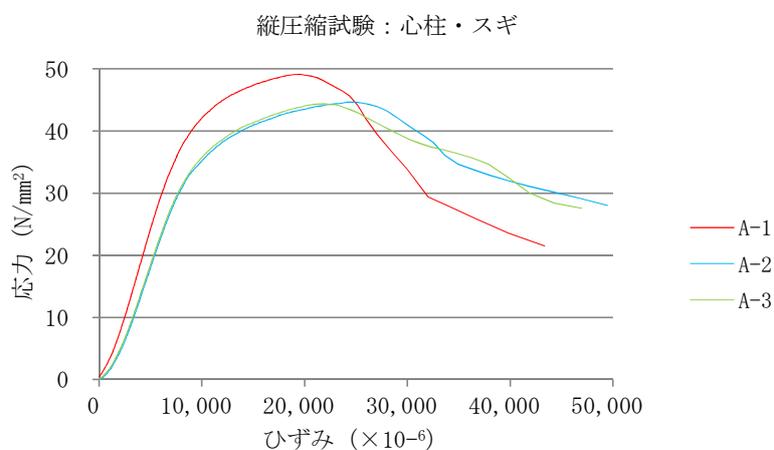


図6. 1：縦圧縮試験の応力－ひずみ関係
(A-1,2,3)

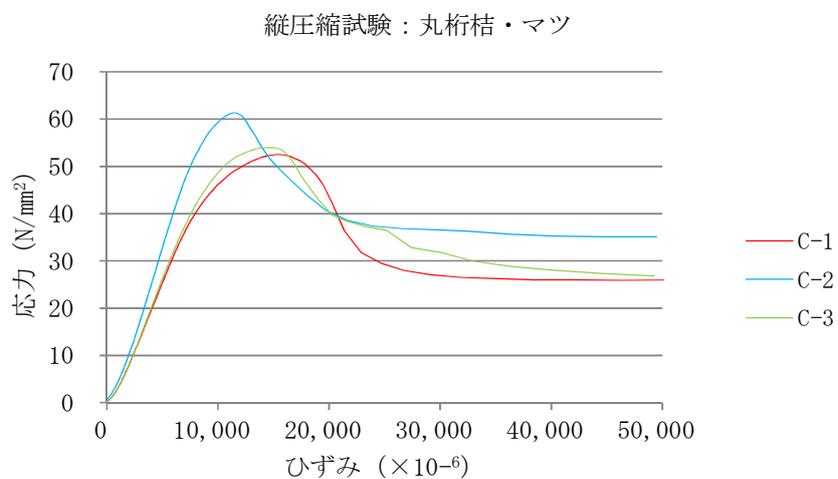


図6. 2：縦圧縮試験の応力－ひずみ関係
(C-1,2,3)

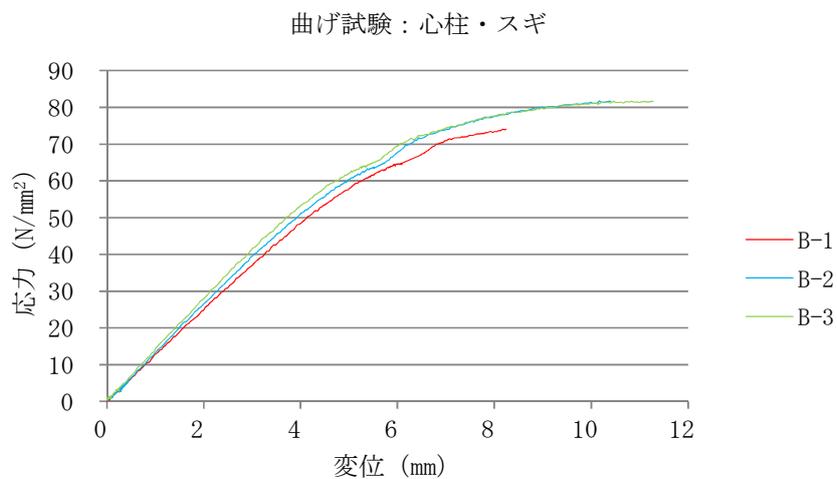


図 7. 1：縦圧縮試験の応力-ひずみ関係
(B-1,2,3)

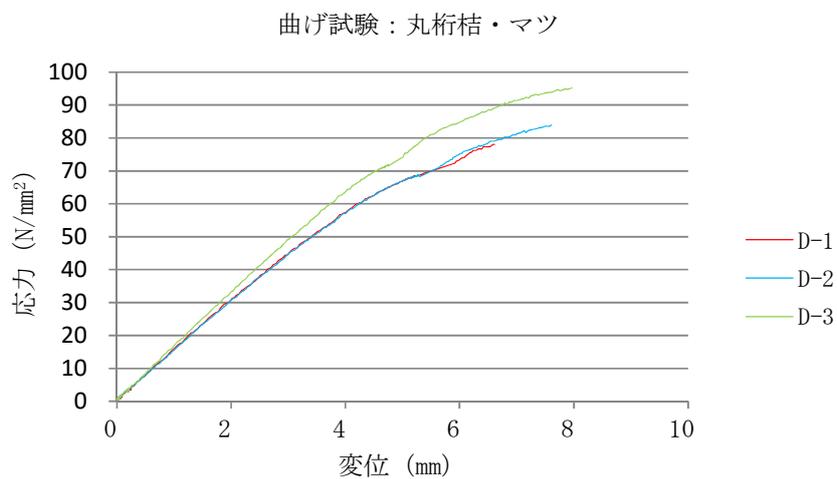


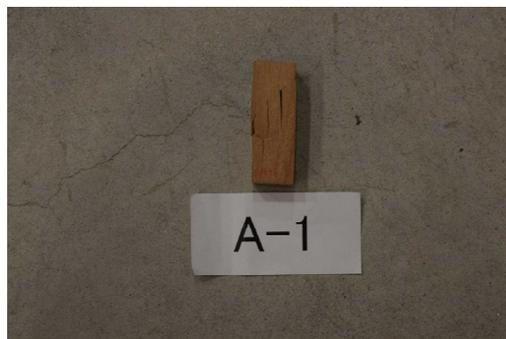
図 7. 2：縦圧縮試験の応力-ひずみ関係
(D-1,2,3)

●破壊形状

写真1～3に各試験における破壊状況と試験の実施状況の写真を示す。

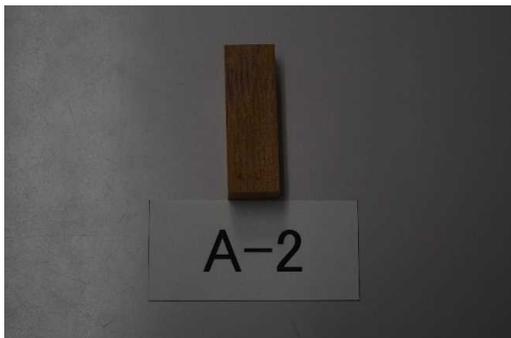


試験前

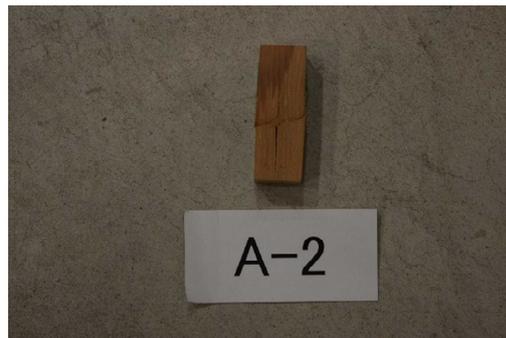


試験後

写真1. 1 : 縦圧縮試験体(A-1)

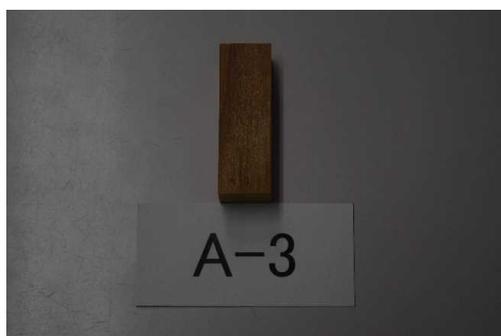


試験前



試験後

写真1. 2 : 縦圧縮試験体(A-2)



試験前



試験後

写真1. 3 : 縦圧縮試験体(A-3)



試験前



試験後

写真 1. 4 : 縦圧縮試験体(C-1)



試験前



試験後

写真 1. 5 : 縦圧縮試験体(C-2)



試験前



試験後

写真 1. 6 : 縦圧縮試験体(C-3)



試験前



試験後

写真2. 1 : 曲げ試験体(B-1)



試験前



試験後

写真2. 2 : 曲げ試験体(B-2)

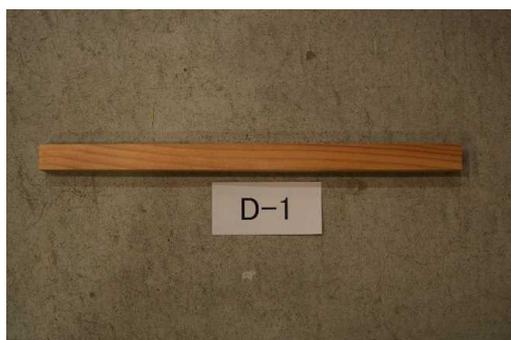


試験前



試験後

写真2. 3 : 曲げ試験体(B-3)



試験前



試験後

写真2. 4 : 曲げ試験体(D-1)



試験前



試験後

写真2. 5 : 曲げ試験体(D-2)



試験前



試験後

写真2. 6 : 曲げ試験体(D-3)

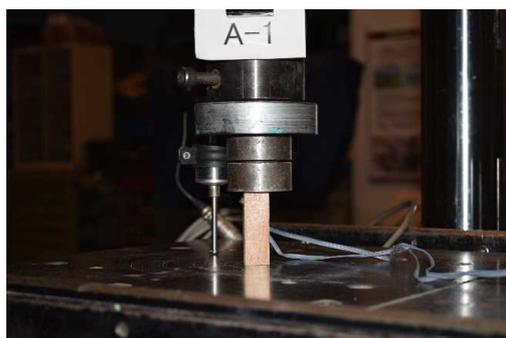


写真3. 1：縦圧縮試験状況



写真3. 2：曲げ試験状況

●理論式

—

●モデル化

—

●考察

本試験より、薬師寺東塔で使用された木材の材料定数が表2、表3のように求まった。表5より、本試験による材料定数と標準的な材料定数の値を比較してみると、丸桁桔のマツ材の曲げ強度・曲げヤング係数の平均値で本試験の値の方が若干だけ小さめの値となっているが、その差はさほど大きくはなく、概ね同等の数値とみなしてよいものと思われる。それ以外の、縦圧縮強度、曲げ強度、曲げヤング係数の値は心柱のスギ材、丸桁桔のマツ材のいずれとも標準的な材料定数の値を上回っている。以上より、本試験による各試験体の材料定数は、標準的な数値と同等かそれ以上とみなしても差し支えないものと思われる。

密度（≒比重）については、標準的な数値として、例えば、参考文献2)による気乾比重を参照すると、スギは0.38、アカマツは0.53であり、表2、表3に示した本試験の計測値はこれと概ね同程度の値（スギが縦圧縮試験体で0.41、曲げ試験体で0.44、マツが縦圧縮試験体で0.50、曲げ試験体で0.51）となっており、各材の健全部分に関しては新材と同等の値とみなしてよいものと思われる。

含水率については、スギ、マツとも、含水率が最大のものでも8.4%程度となっており、かなり乾燥した材となったが、試験の実施時期が冬場の乾燥した時期であったこと、試験体が小さく乾燥しやすい状態であったことなどが影響しているものと思われる。