

常称寺本堂の古材（アカマツ）の材料試験及び非破壊強度推定試験

- 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：重要文化財 常称寺本堂

文化財種別（指定年月日）：2007 年 12 月 4 日

所在地：広島県尾道市西久保町 8-3

所有者（管理団体）：宗教法人常称寺（時宗）

構造形式：一重入母屋造本瓦葺

建築年：16 世紀初頭

事業名称：重要文化財常称寺本堂ほか 2 棟 保存修理事業

事業期間：平成 28 年 11 月～令和 6 年 12 月

工事種別：解体修理

事業者：宗教法人常称寺

設計監理：(公財)文化財建造物保存技術協会、(有)安芸構造計画事務所（構造）

実験計画者：(公財)文化財建造物保存技術協会 園田誠嗣

(有)安芸構造計画事務所 古川 洋

広島県立総合技術研究所・林業技術センター 渡辺靖崇 齋藤一郎、山本 健

森林総合研究所 木材研究部門 加藤英雄、小島瑛里奈

実験機関：広島県立総合技術研究所・林業技術センター、森林総合研究所 木材研究部門

実験年月日：令和 2 年 7 月 1 日～令和 6 年 8 月 31 日

関連文献：

1) International Journal of Architectural Heritage 24 Nov 2024

Mechanical Properties of Wooden Structural Members from a Historical Japanese Temple
Under Renovation and the Effect of Criss-Sectional Voids and Aging、Erina Kojima etc

2) 木材学会誌 71 巻 4 号(2025 年 10 月)

“築 500 年以上の木造建築より採取したアカマツ（Pinus densiflora）及びヒノキ
（Chamaecyparis obtusa）材の強度性能 “ 渡辺靖崇 他

●実験に至る経緯と目的

建物の全解体修理は 200～300 年毎に行われるのが一般的で、次回までの修理期間や部材の用途を考慮しながら、取り替え部材の選定や修繕が行われている。常称寺本堂の全解体修理において、化粧材としては柱を含めた軸組材や肘木、化粧垂木が取り替えられ、廃材として処理される状況になった。その中で一部通し肘木を含めて化粧垂木 130 本の廃材を利用して、500 年以上経たアカマツ材の強度性能の確認を目的に、古材の実大曲げ、圧縮試験と古材の無欠点小試験体を作製し、曲げ、圧縮、引張、せん断、部分圧縮試験を行った。併せて、非破壊検査として縦振動法と応力波速度測定器(FAKOP)による動的ヤング係数を測定し、曲げ強度や静的ヤング係数との相関性を確認した。実際の材料試験と強度性能の検証は、広島県立総合技術研究所・林業技術センターおよび森林総合研究所・木材研究部門にて行い、その結果をここに報告する。

●供試体の選定と試験体

供試体として用いた化粧垂木の解体前の状況を写真 1 に、解体収納状況を写真 2 に示した。解体収納した化粧垂木には茅負や木負への釘止めの痕跡に加え、大半の部材に虫害の痕跡が確認された。再利用の選定した結果 130 本が再利用不可と判断さて、この度の供試体と提供された。その中には数本のヒノキ材も含まれ、アカマツ材と同様に強度性能を確認したが、ここでは試験体数が少ないので報告を省略する。



写真 1 化粧垂木の状況

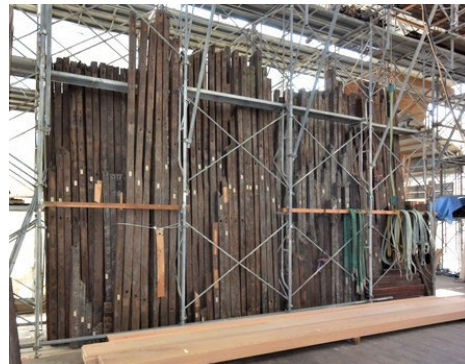


写真 2 化粧垂木等の収納状況

各種試験の試験体の寸法、試験体数、試験に際して測定した密度を表 1 に示した。強度試験前に、部材断面と長さ、重量を測定した上で、縦振動法と応力波速度測定器 (FAKOP) を用いて動的ヤング係数を測定した。測定の様子を写真 3、4 に示した。FAKOP の測定では、標準的に用いられる金槌の打撃のほかに、ノック式ボールペンを改造した装置で打撃するMM法による測定も行った。

提供された部材のうち長さが 2.7m を超えるものは曲げ試験用に、それ以外を圧縮試験に振り分け、劣化した古材の実大部材の強度試験を行った。更に、実大部材の非破壊部分から古材の無欠点小試験体を製作し、曲げ試験、圧縮試験を実施した。曲げ、圧縮、引張試験については、新材試験を行い古材との比較を行った。また実大曲げ試験の非破壊部分から、2 段階にわたって損傷部分を取り除き密度と縦振動法により動的ヤング率を測定し、密度と動

表 1 各試験体の寸法形状、試験体数、試験体数と平均密度

単位:mm、kg/cm³

	試験種別	試験片の断面	長さ	試験体数	密度	備 考
実大 試験体	曲げ試験	88.0~128.6x84.3~144.9	1800	72	474	3等分荷重
	圧縮試験	61.7~107.8x98.1~129.4	≒540	55	494	中央180mmの縮み
無欠点 の 小試 験体	曲げ試験	20.0x20.0	320	62	525	L=280の中央荷重
	圧縮試験	20.0x20.0	60	55	518	材面間の平均縮み
	引張試験	20.2x 5.0	500	100	533	中央5d平均伸び
	せん断	幅(1)x厚さ(5、6)x高さ(2、3)				
	LT面	20.0x20.1、9.9x30.0、20.1		113	522	いす型板目
	LR面	20.0x19.9、9.9x30.0、20.1		113	521	いす型柱目
	部分圧縮	幅x厚さx長さ				
	LR面	20.0x20.0x59.9		48	517	柱目
	LT面	20.0x20.0x59.9		48	513	板目



写真3 縦振動法によるヤング係数の測定



写真4 FAKOP によるヤング係数の測定

的ヤング係数の相関を確認した。更に、欠点を出来るだけ除去した無欠点小試験体で引張試験を実施した。

図1に示すように、曲げの無欠点小試験体の非破壊検査部分をよりいす型せん断試験片と部分圧縮試験片を製作した。いす型せん断試験片の形状を図2に示した。

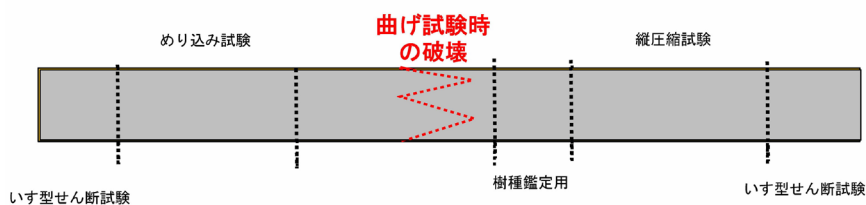


図1 せん断試験片、縦圧縮試験片、部分圧縮試験片の採取要領

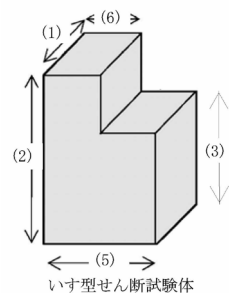


図2 いす型試験体

●実験方法

実大の曲げ試験は、梁成を 100mm と想定し支点間距離を 1800mm とし、写真 5 に示すように、3 等分加力とした。加力装置は 1000kN 実大強度試験機 (IP-10B-B2、(株)前川試験機製作所) を使用し、変位計 (SDP-50、(株)東京測器研究所) を用いて変位量を測定した。実大の圧縮試験は、2000kN 実大圧縮試験機 (A-200-B1、(株)前川試験機製作所) を用い、試験体長さ 540mm の中央 180mm 間の縮み量を変位計 (CDP-25、(株)東京測器研究所) を用いて測定した。

小試験体曲げ、圧縮、部分圧縮試験は 100kN 万能試験機 (AL-100kN、ミネビアミツミ (株)) を用いて写真 7～10 に示すような治具を取り付けて、変位計 (SDP-50) を用いて変形量を計測した。曲げ試験は中央集中荷重とし、せん断試験と部分圧縮試験は板目面と柃目面に対して行った。



写真 5 実大曲げ試験



写真 6 実大圧縮試験

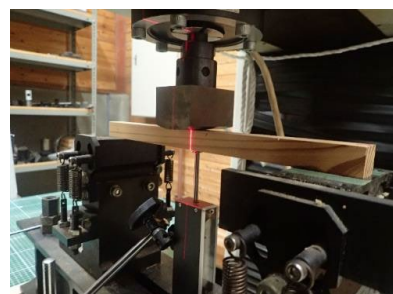


写真 7 小試験体曲げ試験



写真 8 小試験体
圧縮試験



写真 9 小試験体
部分圧縮試験



写真 10 小試験体
せん断試験

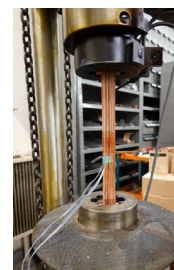
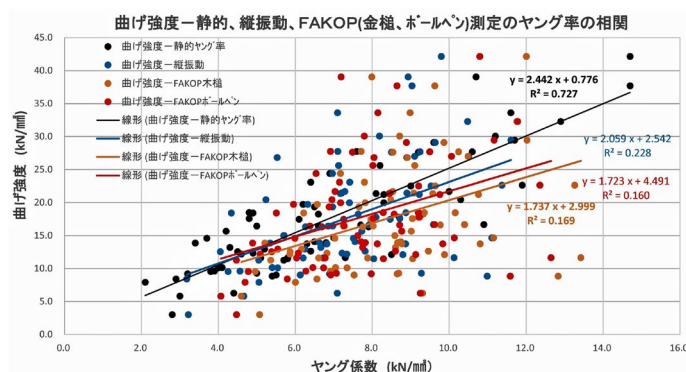


写真 11 小試験体
引張試験

●古材の実大曲げ・圧縮強度と動的ヤング係数の測定結果

実大曲げ及び圧縮試験の結果を無欠点小試験体の結果と共に表 2 に示した。古材の実大曲げ試験結果から得られた曲げ強度と静的ヤング係数に、古材の実大曲げ試験に先だって測定したそれぞれの古材の動的ヤング係数を併記して図 3 に示した。また、試験体毎の静的ヤン



グ係数と動的ヤング係数の相関を図4に示した。曲げ強度と静的ヤング係数の線形近似曲線の相関係数： $R=(0.727)^{0.5}=0.853$ となり相関が高く、静的ヤング率を求めることで曲げ強度を推定することが可能であることが分かった。縦振動法やFAKOP（金槌、ボールペン）によって求めた動的ヤング係数との相関性は $R^2=0.228, 0.169, 0.160$ となり、相関係数がほぼ同じであることが分かった。静的ヤング係数と動的ヤング係数の相関は、縦弾性法、FAKOP（金槌、ボールペン）共に $R^2=0.382, 0.399, 0.382$ と殆ど変わらなかった。

図5に示した圧縮強度とヤング係数の相関は、静的ヤング係数との相関係数 $R^2=0.148$ 、縦振動法やFAKOP（金槌、ボールペン）の動的ヤング係数の測定でも $R^2=0.231, 0.167, 0.079$ と相関性は曲げ試験に比べて低い結果となった。特に、圧縮強度と静的ヤング係数の相関性の低さは、試験体の中間に取り付けた測定治具の取り付けに問題があった可能性が高いことが、試験者により報告されている。

曲げ試験結果についてみると、蟻害や劣化の進んだ古材についても、曲げ強度と静的ヤング係数には高い相関があり、静的ヤング率を測定することで曲げ強度の推定は可能と判断できる。縦振動法やFAKOPにより測定した動的ヤング係数と曲げ強度には高い相関があるとは認められない。静的ヤング係数と動的ヤング係数との間にはある程度の相関は認められるので、古材を含めた静的ヤング係数と曲げ強度の相関図があれば、動的ヤング率を測定することで曲げ強度の推定も可能と考えられる。

●経年使用に伴う損傷を有する部材性能の確認

ここでは非破壊検査法として、動的ヤング係数を測定することで、古材の経年使用に伴う性能を確認すること目標とした。杢や切り欠き、虫食いある古材の使用状態を損傷大、杢や切り欠きを除去した状態を損傷小、虫食いや釘穴等も除した状態を損傷無として、それぞれの試験体を切り出して製作し、密度、縦振動法により動的ヤング係数を測定した。併せて、新材の無使用の板と損傷無の試験体の密度、動的ヤング率を測定した。古材及び新材の損傷

図3 曲げ強度と静的・動的ヤング係数の相関図

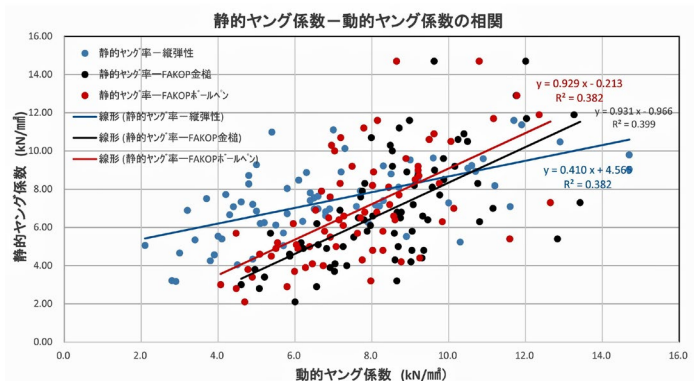


図4 静的ヤング係数と動的ヤング係数の相関図

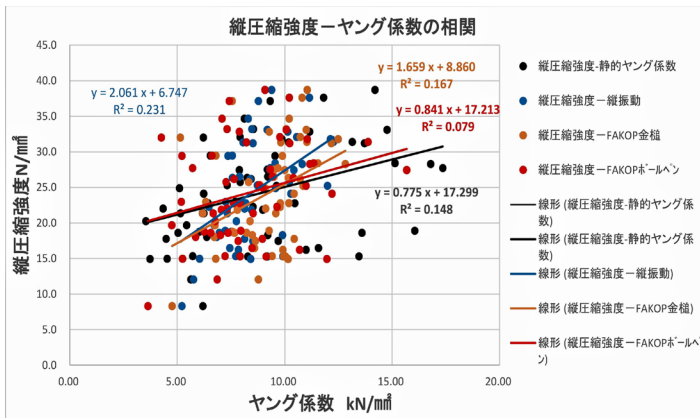


図5 圧縮強度と静的・動的ヤング係数の相関図

無の試験体から引張試験の小試験体を製作し引張試験を行った。

古材の各損傷大 77 体、損傷小 106 体、損傷無 102 体、新材の板材 33 体、小試験体 66 体の密度、動的ヤング係数の測定結果を図 6、図 7 に累積頻度として示した。明らかに損傷が減じることで、密度、動的ヤング係数は向上していることが確認できる。

図 8 に古材の密度と動的ヤング係数の相関を示した。○内に示したように通常のアカマツ材に比べ密度の高い材が含まれている。動的ヤング係数は密度に比して小さく、樹脂による高密度化は動的ヤング係数への影響が小さいと考えられる。密度が高くなれば動的ヤング係数は増加するが、密度と動的ヤング係数の相関性が高いとは認められなかった。

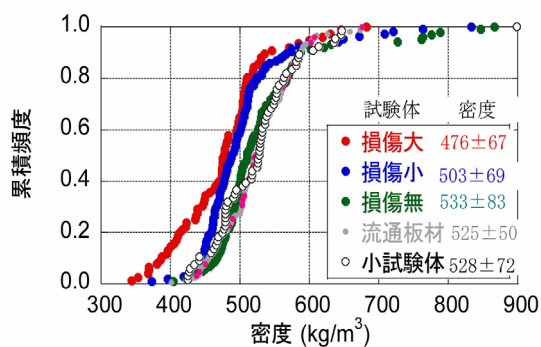


図 6、密度の累積頻度

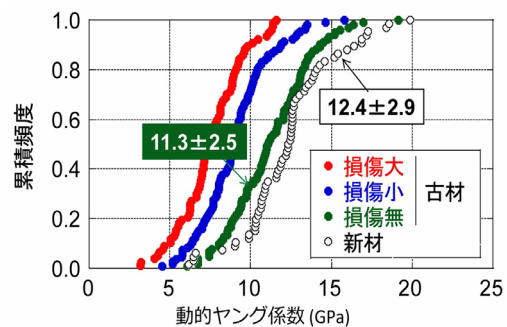


図 7 動的ヤング率の累積頻度

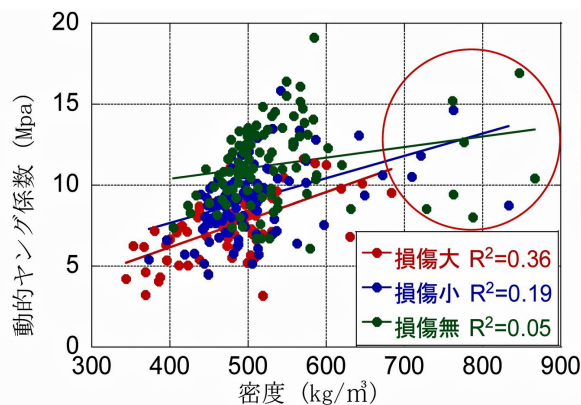


図 8 古材の密度－動的ヤング率の相関図

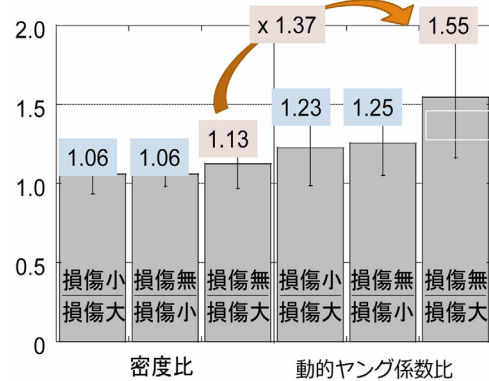


図 9 損傷試験体の密度、動的ヤング係数比

図 9 に損傷度合いの密度比と動的ヤング係数比を示した。損傷無／損傷大の密度比は 1.13 倍に対し、動的ヤング係数比は 1.55 となり、図 6、図 7 の累積頻度のグラフと同じような結果となった。また、動的ヤング率の測定結果では、古材と新材の損傷無小試験体の動的ヤング係数を比較すると、古材の動的ヤング係数が 10% 程度の低下が認められるが、図 14 に示した引張試験より求めた静的ヤング係数は 4% の低下に留まっていた。非破壊検査方法の精度を検討するためにも今後のデータの蓄積に期待する。

●無欠点少試験体の曲げ・圧縮強度の試験結果

実大試験体から曲げ試験用の無欠点小試験体(20mm×20mm×320mm) 62 体を製作し、支点間距離：14d(=280mm)の中央荷重方式として、曲げ強度と中央部の変形を測定し静的ヤング係数を算定した。その結果は古材の実大材の試験結果共に表 2 に示した。

古材の実大試験の結果と森林総合研究所で行われたアカマツ材の新材の結果を併記して、曲げ強度と静的ヤング係数の相関を図 10 に示した。古材実大や新材小試験体の曲げ試験結果の曲

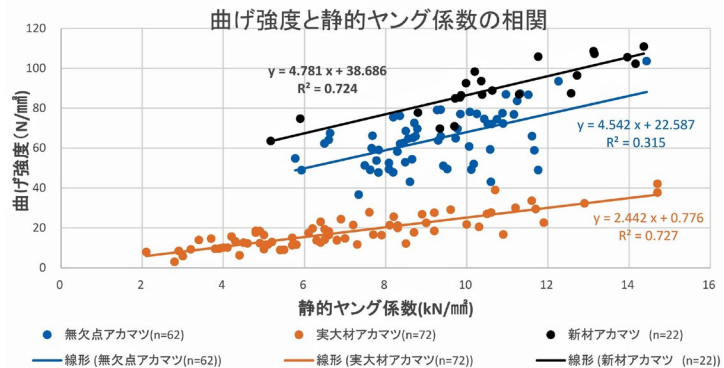


図 10 曲げ強度－静的ヤング係数の相関図

げ強度と静的ヤング係数の相関係数： $R^2=0.727$ 、 0.724 に比べ、古材小試験体の曲げ強度と静的ヤング係数の相関係数： $R^2=0.315$ は低い結果となった。また、古材実大、古材及び新材小試験体の曲げ強度の平均値は 17.8N/mm^2 、 64.8N/mm^2 、 90.6N/mm^2 で、廃材にした古材実大材の曲げ強度は虫害等により大きく低下していること、古材の無欠点小試験体の曲げ強度は新材に比べ約 30%低下していることが確認できた。また、古材実大の曲げ強度と静的ヤング係数の線形近似曲線の傾きは新材の約 1/2 で、虫害等に断面欠損の影響が大きいことが分かる。無欠点小試験の古材及び新材の線形近似曲線の傾きはほぼ同じあることは、古材の静的ヤング率も曲げ強度と同程度低下していると考えられる。

縦圧縮試験についても、古材の実大圧縮試験と新材小試験体の圧縮試験結果を併記して、縦圧縮強度と縦圧縮ヤング係数の相関を図 11 に示した。古材及び新材の無欠点小試験体の縦圧縮強度と縦圧縮ヤング係数の相関係数： $R^2=0.396$ 、 0.651 と実大材に比べて高い相関を示してい

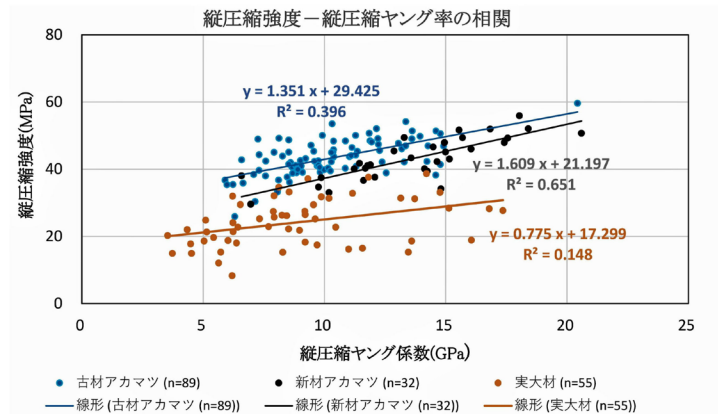


図 11 圧縮強度－縦圧縮ヤング係数の相関図

る。実大材及び古材、新材小試験体の縦圧縮強度の平均値は 24.2N/mm^2 、 43.4N/mm^2 、 43.2N/mm^2 で、実大材の縦圧縮強度は虫害等により小さいが、小試験体の縦圧縮強度は古材も新材も変わらない結果となった。試験体個々の結果をみると、新材は近似曲線を挟んで分布し縦圧縮ヤング係数の平均値が 13.3N/mm^2 であるのに対し、古材の小試験体は分散傾向にあり縦圧縮ヤング係数が 10.1N/mm^2 と、25%程度低いことが分かる。

●無欠点少試験体の引張強度の
試験結果

古材を２段階に分けて損傷部分を取り除いて、材の密度と縦振動法により動的ヤング係数を測定した部材から引張用小試験体：20mmx5mmx500mm を100体製作し、引張試験を行った。比較のために新材アカマツの無欠点小試験体64体を製作し引張試験を行った。新材と古材の引張強度と引張静的ヤング係数の相関を図12に示した。

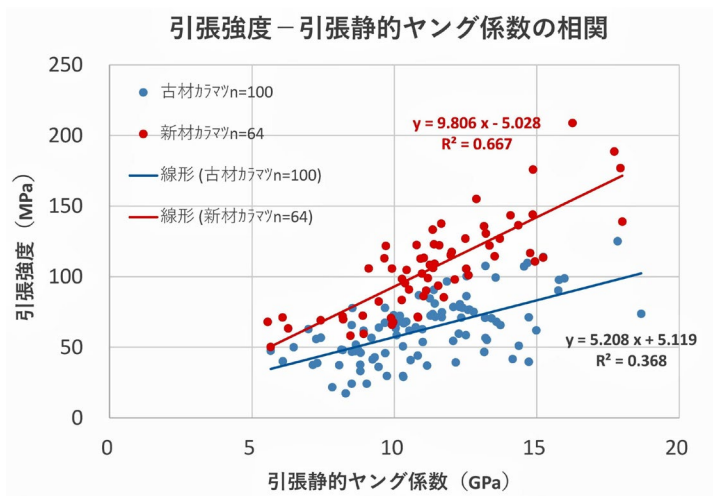


図12 引張強度－引張静的ヤング係数の相関図

新材の引張強度と引張静的ヤング係数の相関係数 $R^2=0.667$ と高い相関性が認められるが、古材については $R^2=0.368$ と相関性は低下することが分かる。古材の平均引張強度と引張静的ヤング係数は 62.5Mpa 、 11.0Gpa に、新材は 107.1Mpa 、 11.4Gpa であった。図12の古材と新材の分布をみると、引張静的ヤング係数の最小・最大値はほぼ同じ領域にあり、引張強度は明らかに新材が古材に比べ高強度である。古材と新材の引張耐力と引張静的ヤング係数の累積頻度を図13、図14に示した。

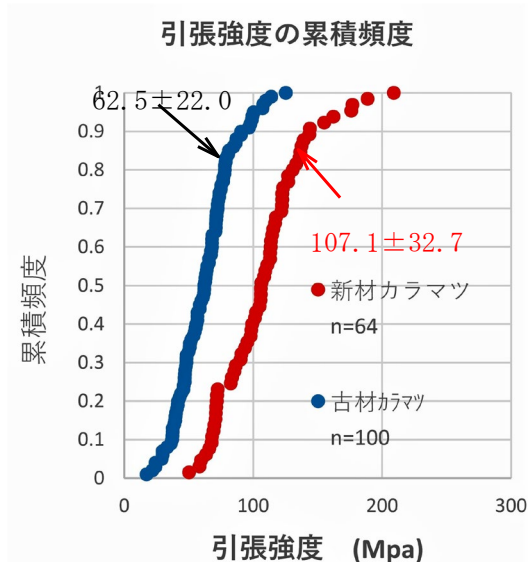


図13 引張強度の累積頻度

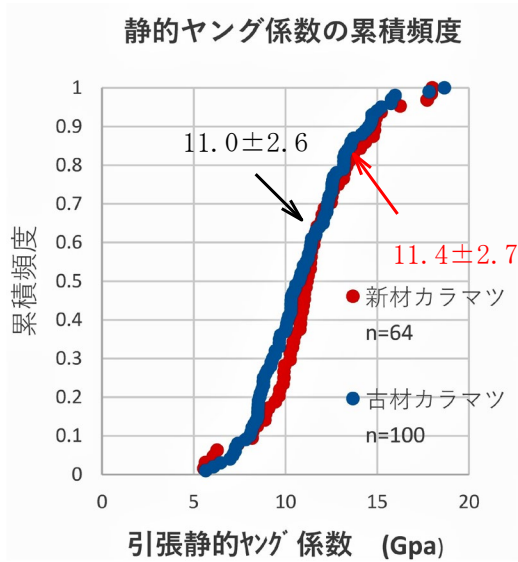


図14 引張静的ヤング率の累積頻度

静的ヤング係数の分布は古材が $11.0 \pm 2.6\text{Gpa}$ 、新材が $11.4 \pm 2.7\text{Gpa}$ と殆ど変わらないのに対して、引張強度の分布は古材が $62.5 \pm 22.0\text{Mpa}$ 、新材が $107.10 \pm 32.7\text{Mpa}$ となり、引張強度だけが低下していることが確認された。明らかにエイジングによる引張強度の低下と判断される。

更に、引張小試験体の破断形状にも古材と新材の差は認められた。写真12に代表的な破

断性状を、図 15 に破断長さを 5mm 未満、5mm～25mm、25mm 以上に分類したときの割合を示した。古材では 5mm 未満の破断長が 4 割を越え、新材では 25mm 以上の破断が 4 割を超えることが確認された。明らかに古材の破断は脆く、新材の破断は靱性が期待できることが想像できる。

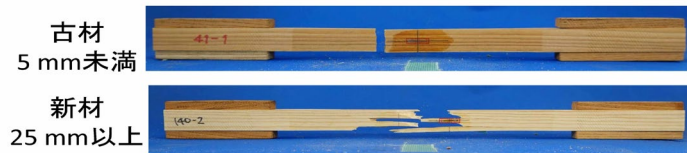


写真 12 小試験体の破断形状

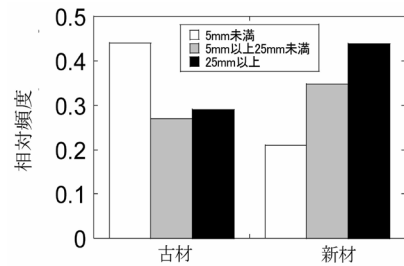


図 15 引張破断長の相対頻度

●無欠点少試験体のせん断強度の試験結果

板目面と柾目面のせん断の試験結果を表 3 に、せん断強度と密度の相関を図 16 に示した。

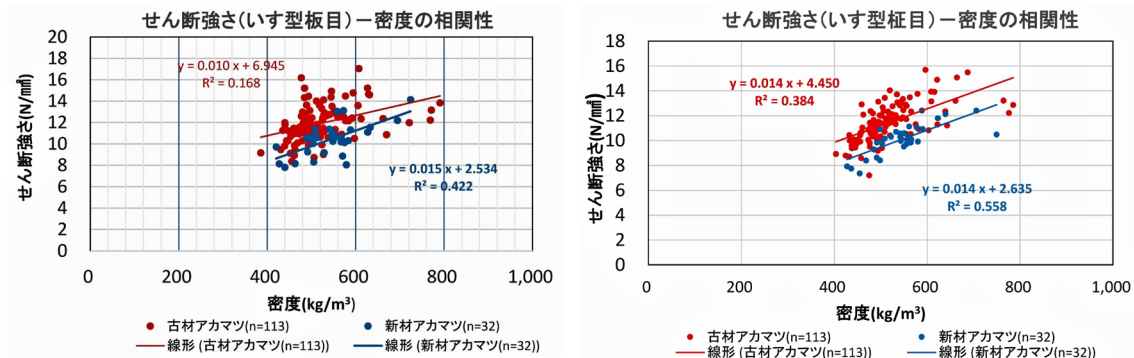


図 16 せん断強さ－密度の相関図

古材小試験体の板目面と柾目面のせん断強さは 9.09N/mm²、8.83N/mm²で、新材の 10.4N/mm²、10.1N/mm²よりは 10%程度低い結果となった。密度についても古材の 517kg/m³、516kg/m³に対して、新材は 544kg/m³、546kg/m³と、強度同様になり 10%程度低い結果となった。密度との相関についても古材は新材に比べて低い結果となった。

●無欠点少試験体の部分圧縮強度の試験結果

板目面と柾目面の部分圧縮試験結果を表 3 に、部分圧縮強度と密度との相関を図 17 に示した。

板目面と柾目面の部分圧縮強度の平均値は 11.7N/mm²、12.3N/mm²と柾目面の方が若干の高い結果となった。密度との相関については、板目面の方が柾目面より高い結果となった。

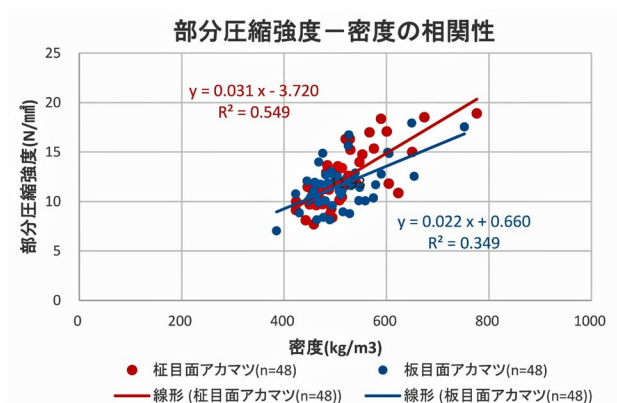


図 17 部分圧縮強度－密度の相関図

●古材の基準強度について

古材の実大曲げ、圧縮強度、無欠点小試験体の曲げ、圧縮、引張、せん断、部分圧縮の試験結果を基に、平均値、標準偏差、変動係数を算定し、試験体数に基づいて強度については信頼水準 75% の 95% 下限値の基準強度特性を、静的ヤング係数は信頼水準 75% の 50% 下限値のヤング係数を算定した。欠損を含む実大試験結果に対しては欠点による低減率を 1.00 として基準強度を算定した。無欠点小試験体には 1980 年～1988 年の新耐震基準による許容応力の改定に際して用いられた欠点による低減定数を基準強度特性値に乗じて基準強度を算定し、表 2、表 3 に示した。

表 2 古材の曲げ強度、圧縮強度の一覧

	古材の実大試験体				古材の無欠点小試験体			
試験	曲げ試験		圧縮試験		曲げ試験(良)		圧縮試験	
試験体数	71		55		67		55	
MOR/MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE
最小値 N/mm ²	3.01	2.10	8.3	3.54	36.64	5.77	25.93	5.90
最大値 N/mm ²	42.14	14.70	38.7	17.36	103.55	14.43	59.63	20.43
平均値 N/mm ²	17.84	6.99	24.2	8.93	64.77	9.29	43.36	10.32
標準偏差 N/mm ²	8.20	2.86	7.02	3.49	12.94	1.55	5.51	2.57
変動係数 %	45.9	41.0	29.0	39.1	19.98	16.7	12.7	24.9
95%, 50% 下限値	1.789	0.084	1.806	0.093	1.806	0.084	1.806	0.093
バラツキ係数	0.18	0.97	0.48	0.96	0.64	0.99	0.77	0.98
強度特性値 N/mm ²	3.20	-	11.5	-	41.6	-	33.4	-
ヤング係数 N/mm ²	-	6.75	-	8.60	-	9.16	-	10.08
欠点低減係数	1.00	-	1.00	-	0.45	-	0.62	-
基準強度 N/mm ²	3.20	-	11.5	-	18.7	-	20.7	-
(無等級) N/mm ²	28.2	-	22.2	-	28.2	-	22.2	-

表 3 古材の引張強度、せん断強度、部分圧縮強度

	古材の無欠点小試験体						
試験	引張試験		せん断試験		部分圧縮		
試験体数	100		113		48		
MOR/MOE	MOR	MOE	板目面	柃目面	板目面	柃目面	
最小値 N/mm ²	17.24	1.66	8.37	7.21	7.05	7.70	
最大値 N/mm ²	125.20	12.56	17.03	15.70	17.93	18.90	
平均値 N/mm ²	62.49	6.29	11.92	11.48	11.69	12.30	
標準偏差 N/mm ²	21.99	2.22	1.64	1.51	2.39	2.50	

変動係数 %	35.20	35.24	23.52	13.15	20.41	23.07		
95、50%下限値	1.758	0.068	1.755	1.755	1.816	1.816		
バラツキ係数	0.38	0.98	0.76	0.78	0.63	0.58		
強度特性値 N/mm ²	23.82	-	9.09	8.83	7.36	7.15		
ヤング係数 N/mm ²	-	6.14	-	-	-	-		
欠点低減係数	0.65	-	0.50	0.50	1.00	1.00		
基準強度 N/mm ²	15.48	-	4.55	4.42	7.36	7.15		
(無等級) N/mm ²	17.7	-	2.40	2.40	9.0	9.0		

欠点による低減係数は、曲げ強度 0.45、圧縮強度 0.62、引張強度 0.65、せん断強度 0.50 を採用した。部分圧縮強度は低減係数が見当たらなかったもので 1.00 とした。

この表から以下のことが確認できた。

- ①実大試験の曲げ強度と縦圧縮強度の基準強度を比較すると、縦圧縮強度は虫害や劣化による断面性能の低下があつて、現行基準法の基準強度の半分程度の性能は確保されているが、曲げ強度は 1/10 近くまで強度が低下している。部材の曲げ性能としては、部材表面の虫害の影響が大きく、40%を超える変動係数となり基準強度の低下に大きく影響していることが分かる。
- ②無欠点小試験体の曲げ、縦圧縮、引張試験の結果をみると、それぞれの基準強度特性値は無等級の基準強度の 1.48 倍、1.51 倍、1.32 倍と大きく変わらないが欠点による低減係数の差が基準強度の差となっていることが分かる。
- ③いす型試験機による無欠点小試験体のせん断強度は、板目面と柾目面の差は小さく、現行基準法のせん断の基準強度を大きく上回る結果となった。
- ④無欠点小試験体による部分圧縮強度は、欠点による低減係数を考慮しなければ、現行基準法の基準強度の 80%の性能が確認できている。

以上の結果より、古材の力学性能を評価するにあたって、部材の曲げ耐力を低下が最も大きな要因で、木材表面の虫害や断面欠損、使用箇所配慮することが必要である。

●さいごに

廃材とはいえ、500 年を超える 130 本の部材を提供頂いた常称寺、(公財)文化財建造物保存協会の皆様に感謝致します。一本一本の重量を拾い、縦振動法と FAKOP を用いて動的ヤング係数を測定し、実大曲げと圧縮試験を行い、破損した実大材から小試験体を製作して各種材料試験に加え、比較のために新材の試験を行い、最新の知見を持って性能を評価して頂いた広島県立総合技術研究所及び森林総合研究所の皆様に御礼申し上げます。

500 年を超えて屋根を支え続けてきた部材には、虫害等による断面性能の低下に加え、一事例ながら、エイジングによる性能の低下も明らかになりました。そのエイジングによる性能の低下は曲げ、圧縮、引張、それぞれの応力により異なる結果でした。部材応力のクライ

テリアを考慮すれば、曲げ応力を注視すれば良いとの考えもありますが、今後の更なるデータの蓄積が必要と感じている。

本実験のもう一つの目標であった、非破壊検査、縦振動法と応力波速度測定器(FAKOP)により動的ヤング係数を測定し、部材耐力、特に曲げ耐力を推定する方法については、ある程度の相関は確認できました。適用を検討する貴重なデータとなったと確信しているが、今後のデータの蓄積、研究成果に期待する。（文責 古川 洋）