

旧名手本陣妹背家住宅主屋における衝撃弾性波を用いた木材の曲げヤング係数及び曲げ強度推定試験

- 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：旧名手本陣妹背家住宅 主屋

文化財種別（指定年月日）：重要文化財（昭和44年3月12日）

所在地：和歌山県紀の川市名手市場

所有者（管理団体）：紀の川市

構造形式：居室部 桁行 16.8 メートル、梁間 13.1 メートル、入母屋造、棧瓦葺
南・西面庇本瓦葺、玄関附属

座敷部 桁行 14.9 メートル、梁間 9.0 メートル、北端入母屋造、南
端居室部に接続、棧瓦葺、東面および北面土庇付、こけら葺

建築年：居室部 享保3年（1718）、座敷部 延享3年（1746）

事業名称：重要文化財(建造物)旧名手本陣妹背家住宅主屋ほか1棟保存修理事業

事業期間：平成29年4月3日～令和元年12月31日

工事種別：屋根葺替・部分修理

事業者：紀の川市

設計監理：公益財団法人和歌山県文化財センター

実験計画者：紀の川市

実験機関：京都大学大学院工学研究科建築学専攻建築保全再生学講座

実験年月日：平成30年3月10日～4月

引用・参考文献：1) 速水紀文, 村瀬詩織, 杉野未奈, 林康裕：衝撃弾性波を用いた大径木材の完全非破壊型材料特性推定に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第24巻, 第57号, pp.649-654, 2018.6

2) 杉野未奈, 李想, 結城啓司, 立石一, 林康裕：衝撃弾性波を用いた伝統木造建物の柱の材料定数評価法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第759号, pp.667-684, 2019.5.

●実験に至る経緯と目的

伝統木造建築において、垂壁は主要な構造要素のひとつであるが、地震時には垂壁に取りつく柱が折損することで耐力が急激に低下し、建物の倒壊が発生する恐れがある。そうした伝統木造建築の耐震診断を実施する場合、木材の曲げ強度は JAS 規格における無等級材の値を用いることが多い。しかし、文化財建造物では上質の木材が使用されていることが多く、実際の曲げ強度を反映しているとは言い難い。また、診断により曲げ折れの可能性があるとして診断されると構造補強の実施が求められるが、正確な耐力の把握に基づかない補強は耐力不足による危険や、過剰な補強となり文化財的価値を損なう可能性がある。

本実験では、個々の現状部材の材料定数の評価法を確立することを目的に、現地における非解体・非破壊の衝撃弾性波試験と端材を用いた室内試験によって、軸組材の曲げヤング係数 E_b および曲げ強さ σ_b の推定を行った。

●姿図・寸法

【使用材料】

1. 現地試験

対象建物の柱計 30 本を対象とした (図 1)。樹種はマツ・ツガ・スギ・ヒノキ・カヤ・ケヤキ・クリ。計測対象の柱は、曲げに対する基準強度を無等級材などと仮定して耐震診断を行った結果、地震時に折損する可能性があるとして評価されたものを中心に選定した。

2. 室内試験

1992 年に実施された対象建物の修理工事で生じた 7 本の端材を切断して製作した小試験体 152 本。樹種はマツ。

【試験体寸法】

1. 現地試験

柱径 105~164mm の四角柱。

2. 室内試験

木口面 25×25mm、材長 650~900mm 程度。

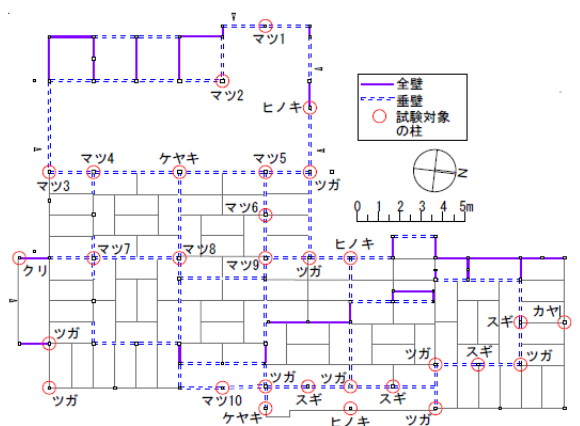


図 1：平面図および計測対象の柱位置

●概要

以下の手順で行った。

1. 現地試験
柱に対して衝撃弾性波試験を実施した。
2. 室内試験
小試験体に対して衝撃弾性波試験・曲げ実験・密度の算定を行った。その結果をもとに、回帰分析により材料定数の関係式を算定した。
3. 材料定数の評価
実験の結果をもとに、まず動的ヤング係数 E_p を算定した。その後、 E_p を用いて曲げヤング係数 E_b および曲げ強さ σ_b の評価を行った。

●実験方法

1. 現地試験（図2）

柱に押し当てた打撃用治具を直径5mmのハンマーで打撃し、柱の材軸方向に衝撃弾性波を発生させる。繊維方向に600mm離して柱に押し当てた2つの加速度センサ間における衝撃弾性波の伝播時間の差から、衝撃弾性波の伝播速度を算出した。各柱につき、1面1回ずつ、計4回計測し、4回計測した伝播速度の平均値を平均伝播速度 V_{ave} とした。ただし、柱の4面のうち、配管や壁などで伝播速度が計測困難な面は計測していない。

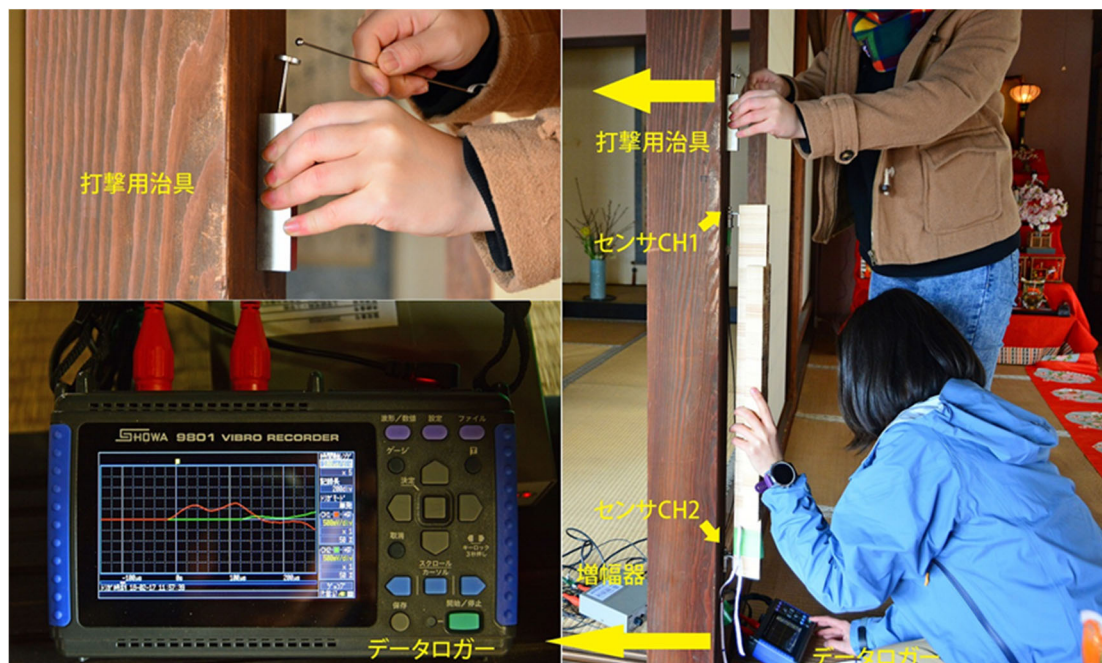


図2：現地実験の様子

2. 室内試験

(a) 衝撃弾性波試験

現地試験と同様に各小試験体につき、1面1回ずつ、計4回の衝撃弾性波試験を行い、4回計測した伝播速度の平均値を平均伝播速度 V_{ave} とした。

(b) 曲げ試験

衝撃弾性波試験後の小試験体に対して、スパン 350mm の3点曲げ試験を行った。スパンが衝撃弾性波試験のセンサ間距離 600mm の範囲内かつ、可能な限りスパン中央から節・割れや生物劣化による断面欠損を避けてスパンを決定した。木表側からスパン中央に荷重を加え、スパン中央における荷重とたわみを計測した。せん断変形は考慮せず、曲げ変形のみが生じていると仮定して、荷重とたわみの比例域より曲げヤング係数 E_b を算定した。断面2次モーメントはスパン中央における幅とせいの実測値から求めたが、生物劣化等による断面欠損は考慮していない。

(c) 密度算定

曲げ試験実施後の小試験体から各辺 25mm の密度算定用試験体を切り出した。節・割れや生物劣化による断面欠損が含まれないこと、衝撃弾性波試験のセンサ間距離 600mm の範囲内から切り出すこと、の2点を密度算定用試験体の条件とした。ただし、節・割れや生物劣化による断面欠損を避けることができない場合は、一辺 25mm よりも小さくした。得られた密度算定用試験体の体積、質量より密度 ρ を算定した。

●特性値

1. 現地試験

マツの各柱の各計測回の伝播速度と平均伝播速度 V_{ave} を図3に、計測した全ての柱の平均伝播速度 V_{ave} を樹種ごとに分けて図4に示す。

2. 室内試験

小試験体の室内試験より得られた平均伝播速度 V_{ave} 、密度 ρ 、曲げヤング係数 E_b 、曲げ強さ σ_b について、端材ごとの平均値および変動係数を表1にまとめて示す。なお、表中の「Selected」は回帰分析に用いる小試験体を、また「Total」は全ての試験体を指している。また、図6に E_b と σ_b との関係を示す。

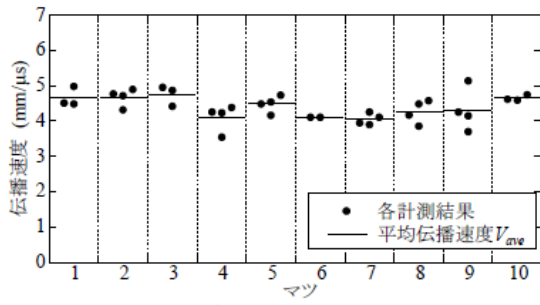


図 3：マツの各柱の伝播速度と
 平均伝播速度 V_{ave}

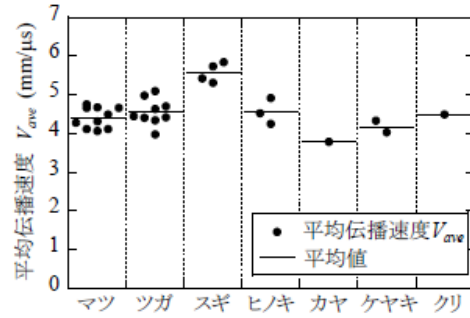


図 4：計測した全ての柱の樹種別平均
 伝播速度 V_{ave}

表 1：室内試験の結果一覧

| 端材 | 用途 | 端材の断面寸法(mm) | 小試験体数 | | V_{ave} (mm/μs) | | ρ (t/m ³) | | E_b (kN/mm ²) | | σ_b (N/mm ²) | |
|-------|----|-------------|------------|------------|-------------------|---------------|----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | Total | Selected | Total | Selected | Total | Selected | Total | Selected | Total | Selected |
| 1 | 柱 | 160x146 | 15 [15] | 11 [11] | 4.7 (0.05) | 4.7 (0.06) | 0.45 (0.04) | 0.45 (0.05) | 8.7 (0.14) | 8.6 (0.16) | 63.5 (0.28) | 65.0 (0.31) |
| 2 | 柱 | 127x128 | 12 [12] | 7 [7] | 5.3 (0.05) | 5.3 (0.06) | 0.55 (0.10) | 0.57 (0.11) | 11.9 (0.12) | 12.5 (0.10) | 86.0 (0.16) | 94.6 (0.07) |
| 3 | 柱 | 148x147 | 10 [10] | 3 [3] | 5.1 (0.07) | 5.2 (0.00) | 0.50 (0.05) | 0.52 (0.02) | 9.4 (0.31) | 11.5 (0.06) | 46.3 (0.36) | 59.2 (0.07) |
| 4 | 梁 | φ 162 | 13 [11] | 9 [7] | 5.5 (0.06) | 5.4 (0.07) | 0.50 (0.07) | 0.50 (0.07) | 11.1 (0.21) | 11.1 (0.21) | 74.4 (0.24) | 78.2 (0.22) |
| 5 | 梁 | φ 166 | 14 [12] | 8 [7] | 5.0 (0.11) | 5.2 (0.10) | 0.49 (0.08) | 0.47 (0.04) | 10.2 (0.19) | 10.7 (0.20) | 72.6 (0.27) | 77.8 (0.23) |
| 6 | 梁 | 210x131 | 14 [14] | 7 [7] | 5.3 (0.08) | 5.1 (0.01) | 0.61 (0.08) | 0.60 (0.09) | 12.8 (0.19) | 13.3 (0.18) | 91.0 (0.31) | 100.0 (0.22) |
| 7 | 柱 | 137x150 | 20 [0] | 9 [0] | - | - | - | - | 7.7 (0.32) | 8.4 (0.22) | 55.7 (0.45) | 73.2 (0.23) |
| Total | | | 98 [74] | 54 [42] | 5.1 (0.09) | 5.1 (0.09) | 0.52 (0.13) | 0.51 (0.13) | 10.1 (0.27) | 10.6 (0.24) | 69.6 (0.36) | 78.5 (0.27) |

※ []内の数字は衝撃弾性波試験が行われた試験体数を示す。()内の数字は変動係数を示す。

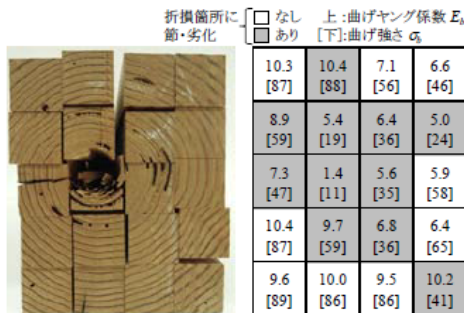


図 5：曲げ試験結果の断面分布(マツ 6 端材)

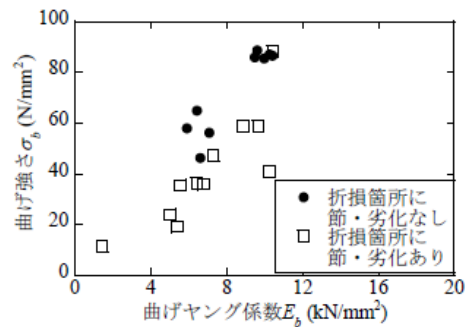


図 6：曲げヤング係数 E_b - 曲げ強さ σ_b

●荷重変形

—

●破壊形状

—

●理論式

動的ヤング係数 E_p は、式(1)のように密度 ρ と平均伝播速度 V_{ave} より算定する。その結果を図 7 に示す。

$$E_p = \rho V_{ave}^2 \quad (1)$$

また、この E_p と E_b の関係は図 8 のように表される。同図では、曲げ試験において外見上、節・割れや生物劣化位置で折損していない小試験体を「選択」と図示し、回帰直線を算定した。なお、回帰分析に用いない小試験体は「非選択」として図示している。また、ヒノキに対する既往の実験結果¹⁾から得られた回帰直線を併せて示している。

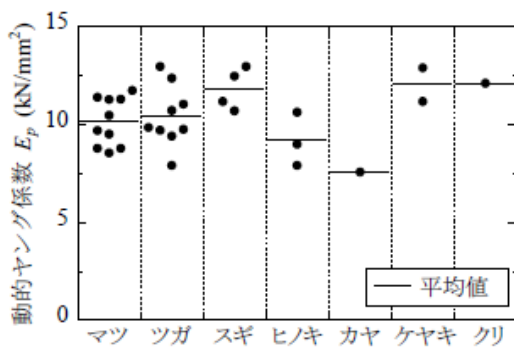


図 7 : 動的ヤング係数 E_p

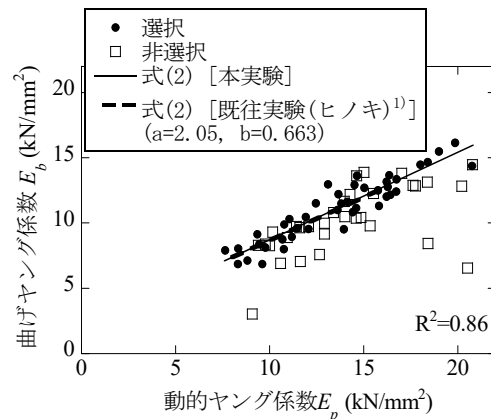


図 8 : 曲げヤング係数 E_b ・動的ヤング係数 E_p

●モデル化

図 8 の回帰直線より、曲げヤング係数 E_b と動的ヤング係数 E_p について式(2)の関係が求まる。

$$E_b = a + b \cdot E_p \quad (2)$$

ここで、最小 2 乗法により、 $a=2.01$ 、 $b=0.671$ と求まる。

また、曲げ強さ σ_b と曲げヤング係数 E_b との関係式は、

$$\sigma_b = c + d \cdot E_b - f(E_b) \quad (3)$$

と表される。なお、 $f(E_b)$ は、 σ_b の推定誤差値を示す。 $f(E_b)$ は次のように与えられる。

$$f(E_b) = t_{n-2, \alpha/2} \cdot \sqrt{s^2 \{1 + 1/n + (E_b - \bar{E}_b)^2 / S_{xx}\}} \quad (4)$$

ここで、算定に用いた小試験体のサンプル数を n とし、各小試験体の曲げヤング係数を $E_{bi}(i = 1 \sim n)$ 、曲げ強さを $\sigma_{bi}(i = 1 \sim n)$ とする。 \bar{E}_b は $E_{bi}(i = 1 \sim n)$ の平均値である。 $t_{n-2, \alpha/2}$ は、自由度 $n - 2$ のt分布の上側 $100(\alpha/2)\%$ 点であり、 $\alpha = 0.05$ とする S_{xx} は次式より求める。

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (E_{bi} - \bar{E}_b)^2 \quad (5)$$

s^2 は残差分散であり、次式より求める。

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \{\sigma_{bi} - (c + d \cdot E_{bi})\}^2 / (n - 2) \quad (6)$$

このように評価される σ_b は、柱固有の断面欠損や節、生物劣化の影響があると考えられるため、寸法効果による曲げ強さの低減係数を予め乗じることとしない。よってこのモデルを使用する場合は、使用者が状況に応じて σ_b の低減を判断する必要がある。

●考察

曲げヤング係数 E_b の評価式(2)は、図8で示したように本実験のマツと文献1)のヒノキによって殆ど差が確認されなかった。そこで、曲げヤング係数 E_b の推定は樹種に関わらず同一の関係式が適用できると仮定すれば、図4に示した柱の平均伝播速度を用いて曲げヤング係数 E_b や曲げ強度 σ_b を推定することができる。