

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19580186

研究課題名（和文）木質構造部材の保有強度・損傷に関する非破壊評価法の開発と応用

研究課題名（英文） Development and application of nondestructive evaluation method on strength and damage of structural wood

研究代表者

佐々木康寿（SASAKI YASUTOSHI）

名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授

研究者番号：90154004

研究成果の概要：木造建築物，特に古刹の改修・改築等における部材（古材）再使用の可否については熟練大工の目視と経験により決定しており，強度安全性に関する科学的検証は行われていない．これに関して研究代表者は，部材中を伝播する応力波の速度を測定することにより部材のヤング率を推定する方法を新しく開発した．古寺院の解体修理において，構造部材の応力波伝播速度を測定し，開発した方法を用いてヤング率を推定した．この結果をもとに古材の再利用により建物を再建するという実績を残した．新開発の方法は密度測定を必要とせず，現場における容易で正確な測定が可能な応力波伝播速度のみを用いてヤング率を安価ですばやく正確に推定することができる画期的な方法である．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：強度・木質構造・非破壊検査・ヤング率・密度・応力波伝播速度・モンテカルロシミュレーション・木材強度データベース

1. 研究開始当初の背景

我が国には古来より現在に至るまで木材を構造材料として利用してきた長い歴史がある．特に文化財建造物に多く見られる寺院建造物をはじめとして古民家などを含む多くの木造建築には，台風・地震など幾多の災害を乗り越えて現代までその姿を残しているものが多い．これらでは，断面寸法の大きい豪壮長大な部材が使用されているため，その視覚的な迫力や質感，長い年月にわたる使

用感が現代人の関心を呼び，近年移築やリフォームなど，解体古材を再使用する場面が見受けられるようになってきた．木材の長期使用は環境保全の観点からも好ましく，こうした風潮は推進すべきである．しかし，再使用の際，古材の強度性能を適切に判断することなく再使用の判断がなされることは問題である．古民家の移築やリフォーム後の構造安全性を確保するためには，これら古材の保有強度の把握や損傷探査を何らかの方法によ

りできるだけ簡便に行う必要がある。このような部材の使用・再使用に当たっては、熟練大工の目視・経験による可否判定の行われる場合が多く、保有強度・損傷に関する科学的な数値化は未だ成されていない。また、解体前の構造体の状態で非破壊的に部材の強度特性を知ることは実現していない。

2. 研究の目的

本研究では、木造建築物の修理・改築・建替え等において、使用されている構造部材の強度性能を非破壊的に確かめ、安全かつ合理的に利用するシステムを確立することを目的とし、解体前の構造体の状態で、応力波を用いることにより部材（木材）の強度性能を推定する方法を開発した。築年数の長い寺院建造物や古民家等で大量に使用されている木材の保有強度・損傷を評価し、再使用に供することは、CO₂の固定機能を持つ木材の低環境負荷性を最大限に活かすことにも貢献するものである。この報告では、推定方法を提示するとともに、実際の検査事例について紹介する。

3. 研究の方法

(1) 保有強度の評価方法

木材の強度パラメータとして最も一般的なヤング率を対象とした場合、これを求める方法としては(i)負荷法、(ii)周波数解析(打撃法)、(iii)超音波法、(iv)応力波法などがある。このうち(i)では、材料の断面形状を特定する必要があり、また、構造体のままで試験することは不可能である。(ii)では、材料の支持方法が問題となるため、構造体のままの状態での実施はやはり不可能である。材料の密度も必要である。(iii)は、材料(木材)とセンサーの接触(密着)性に難があり、材料の密度も知る必要がある。技術的には実験室レベルを超えておらず、現場での使用は未だ困難である。これらに対して(iv)は、作業(応力波伝播速度の測定)は簡便であり、材料の支持方法も不問であるため、現場での簡便な測定法として非常に優位となる。

以上のようなことから、本研究では応力波法を対象としている。ただし、打撃法により固有振動数を知ることができれば、後述する応力波伝播速度の代わりにこれを使うことも可能である。材料中を伝播する応力波の速度と材料の密度が分かればヤング率を求めることができる。この場合、密度を求めるには材料全体、または、小切片を採取し、その体積と重量を計測することが考えられるが、作業は面倒であり、特に小試片により得られる密度は材の局所的な値であり、必ずしもその材を代表する値であるわけではない。このようなことから、本研究で提示する方法は、研究蓄積が多く、報告例の多い木材強度に関するデータベースを利用することにより、密度を測定することなく、応力波伝播速度(あ

るいは固有振動数)のみからヤング率を推定しようとするものである。

(2) ヤング率の推定方法

材料のヤング率 E 、密度 ρ 、応力波伝播速度 v との間には $E = \rho v^2$ の関係が、また材の長さ l と固有振動数 f を考慮すると $E = \rho (2lf)^2$ の関係があるが、ここで提示するヤング率の推定法は、測定された「応力波伝播速度(または固有振動数)」から考え得る「ヤング率と密度」の組み合わせを、「ヤング率と密度に関するデータベース」をもとにモンテカルロ・シミュレーションにより推定するというのが基本的な考え方である。

モンテカルロ・シミュレーションは、現実の分布を模擬する任意の密度分布を乱数発生法により求めるものであるが、一般には、現実の分布を正規分布等の理論分布で表し、これを用いて模擬することが多い。しかし、木材を対象とする場合、その物性や力学特性値を理論分布で正確に表現するためには相当多数の実測値が必要であり、これを省略した解析は仮定としての域を脱し得ないものである。そこで、ここでは、現実の分布に対して理論分布の適用は行わず、データベースの充実を図り、実験値分布そのものの累積度数を用いることにする。ただし、データベースが十分に充実した折には、これを理論分布で表現することも可能となるであろう。

具体的手順を以下に説明する。ここでは、応力波伝播速度を用いるものとする。まず、樹種別等のヤング率-密度関係のデータベースを用意する。

① 密度データ(実測値)を準備する。

② 任意の密度 ρ_i をノンパラメトリックに抽出する。すなわち、区間 $[0, 1]$ の乱数を発生させてこれを①の密度データの累積頻度曲線に当てはめ、対応する密度データ ρ_i を得る。

③ データベースの「ヤング率-密度」関係について回帰直線を求める。この場合、データのばらつきが不均一である(任意の密度に対して一定のヤング率分布を示していない)など、「ヤング率-密度」関係を単純な回帰直線で表すことが不相当であると判断される場合には、これを是正するために重み付き回帰分析(加重回帰分析)等の処理を行う。この回帰直線を用いて、抽出した密度データ ρ_i に対応するヤング率の平均値 $E_{i,ave}$ を求める。

④ 次に回帰残差を任意抽出し、これを③で求めたヤング率の平均値 $E_{i,ave}$ に加えて所定のヤング率 E_i を求める。ここで、任意の密度 ρ_i に対応するヤング率の回帰残差は正規分布(平均値 $=E_{i,ave}$ 、分散 $=SD_i^2$)をなすものと仮定する。具体的には、中心極限定理を用いた複数の乱数による方法で標準正規確率変数 V を計算し、これにデータベース「ヤング率-

密度」関係から求めたヤング率の残差標準偏差 SD_i を乗じて求める。すなわち、回帰残差 $= V \cdot SD_i$ で求められる。ここで、 SD_i は i データベース「ヤング率-密度」関係のデータのばらつきが均一な場合は、 $SD_i = \text{ヤング率データの標準偏差} \times (1 - \text{「ヤング率-密度」関係の決定係数})^{1/2}$ 、ii) データのばらつきが不均一な場合は、個々の ρ_i に対応する SD_i である。このようにして得られた回帰残差を平均値 $E_{i,ave}$ に加え、これを②で任意に抽出した密度 ρ_i に対するヤング率 E_i とする。

なお、標準正規確率変数 V に関する式中、 r_j は j 個目の乱数を意味し、第 1 項は区間 $[0, 1]$ の一様乱数 (r_1, r_2, \dots, r_n) n 個の和である。また、 n は通常は $n=12$ 程度で十分とされている。④の操作は、「平均値 ave と分散 SD^2 とによって決定される正規分布 $N(ave, SD^2)$ 」と「平均値が 0、分散が 1 である標準正規分布 $N(0, 1)$ 」との関係によるものである。

⑤ 一方、ヤング率 E 、密度 ρ 、応力波伝播速度 v の関係式は $\rho_k = E_i / v^2$ で表される。すなわち、④で求めたヤング率群 E_i に実測した応力波伝播速度を対応させることにより、密度 ρ_k を推定することができる。

⑥ ②~⑤を十分多数回 (例えば 5000 回) 繰返し、 (ρ_k, ρ_i, E_i) に関する推定データ群を得る。

⑦ ⑥で得られた推定群のうち、二つの密度 (ρ_k, ρ_i) がある誤差範囲 (例えば 1%) に収まるものを、応力波伝播速度、密度、ヤング率の三者の関係をより充足しうるものとし、推定値として絞りこむ。

以上のプロセスを「ヤング率推定用プログラム」として作成し PC にインストールした。なお、シミュレーションにおける乱数の発生には表計算ソフト EXCEL (Microsoft 社製) の RAND() 関数を用い、また、繰返し計算の回数は 5000 回とした。

(3) 応力波伝播速度の測定

応力波伝播速度の測定には、ハンディタイプの応力波伝播時間測定器 (FAKOPP) を使用した。本機は打ち込み専用センサーに衝撃を加えると発生するエネルギー (応力波) が受信センサーに到達するまでの時間 (μs) を測定するものである。前節に示す推定手順 (計算プログラム) を収めた PC に、2 個のセンサー間の距離と応力波伝播時間を入力すれば直ちにヤング率 (および密度) の推定値が得られる。

4. 研究成果

善光寺三門 (重要文化財、長野市、築後経過年数 260 年) を始めとする築後経過年数が 100~300 年の古寺院および古民家において構造材の検査を行った。いずれの物件についても、検査対象としたのは柱、梁などの構造部材で、主たる樹種はアカマツ、ヒノキ、ツ

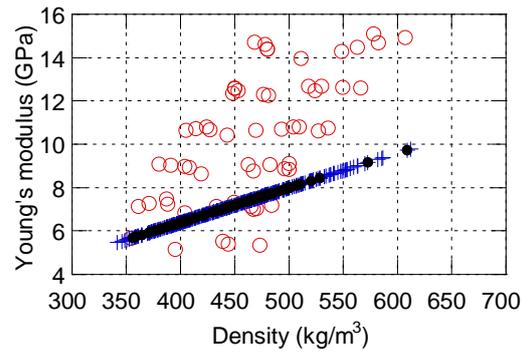


Fig. 1. Base data of MSR lumber and estimated Young's modulus.

ガ、ケヤキであった。応力波は部材 (木材) の長軸 (繊維) 方向および半径方向に伝播させ、上記の方法でヤング率を推定するとともに、内部損傷等の探査も併せて試みた。

(1) ヤング率の推定に及ぼすデータベースの影響

部材のヤング率を推定する場合、木材強度 (ヤング率と密度の関係) に関するデータベースを使用することになる。

測定の具体例を示す前に、ヤング率の推定に及ぼすデータベースの影響を検討した。ここで使用したデータベースは、森林総研発行の製材の強度性能に関するデータベース (機械等級区分データ) からの抜粋と著者らの研究室で蓄積のある古材 (アカマツ、ケヤキ) の強度性能に関するものである。ここでは応力波伝播速度を 4000 m/s と仮定した場合のヤング率推定値について検討した。Fig. 1 の ○印は基準としたデータベースである。これをもとにして推定したヤング率を +印 (許容誤差 5%) と ●印 (同 1%) で示した。これより使用するデータベースが異なると、応力波伝播速度が同じであってもヤング率は異なると推定されることがわかった。 $E = \rho v^2$ を原理とする推定であるので、Fig. 1 のようにヤング率と密度は比例関係を示している。また、密度が許容誤差範囲に収まる有効データ率も異なり、許容誤差を厳しくすると有効データ率は低くなる。ただし、ヤング率の推定幅はほとんど変わらない。

さて、本推定法では測定された唯一の応力波伝播速度に対して可能性のあるヤング率の分布を与えるため、ヤング率を唯一の値で示すことはできない。したがって、ある値で代表値を示す必要がある場合には、どの値をもって代表するかが問題となるが、安全側評価の一案として推定ヤング率データの 5% 下限値をもって代表値とすることが考えられる。そこで、上記 2 種のデータベースをもとにした推定データ (許容誤差 5 及び 1%) の分布を求めた。これらに関して分布形 (正規、対数正規、2P 及び 3P ワイブル) の適合性

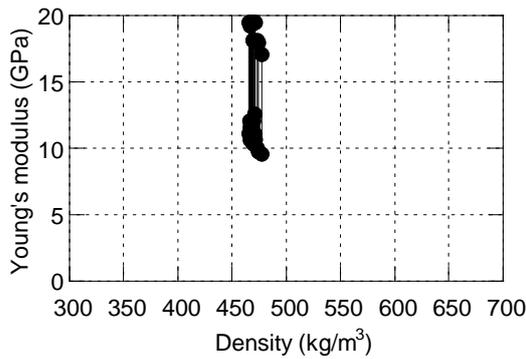


Fig. 2. Estimation of Young's modulus of columns in Zenkouji, Nagano.

を調べ、このときの適合度が最も良い分布形をもとに下限値を求めた。このように、使用するデータベースやどの値をもって代表値とすべきかは今後の検討課題である。

(2) ヤング率の推定例

善光寺大本願明照殿（長野市、築後経過年数約 90 年）内の構造材のうち、予定されている改築時の再使用を検討している本殿内部の柱材（ヒノキ、17cm 角）11 本のヤング率推定結果を Fig. 2 に示す。図には 11 本の柱材に関して推定されたヤング率の上・下限値と平均密度との関係を示した。また、推定の際に基準としたデータベースも併せて示した。応力波伝播速度の測定値および推定ヤング率は平均値±標準偏差で、それぞれ 5629 ± 158.1 m/s, 14.9 ± 0.8 GPa であった。ヤング率推定値は基準としたデータベースに比べて上方にプロットされており、推定下限値が市場流通製材（データベース）の平均値程度、また推定平均値が市場流通製材の上限値程度であるなど、これらの材のヤング率はかなり大きく推定された。これに関して、これらの材は表面の繊維感がなく、また、測定時のセンサーの打ち込み感触が概ね硬めであったことから材の年輪幅は密であり、質の高い材料であったと推察される。さらに、推定ヤング率の変動係数が小さく（5%）、材料間のばらつきがほとんど認められないなど、粒のそろった材料を用いて建立されていることが示唆された。

Fig. 3 に、寺院（佐久市）で使われていた柱、梁（アカマツ）に関するヤング率推定値の分布を示す。図中 A はアカマツ古材のデータベースによるもの、B は製材の強度性能に関するデータベースによるものである。これによれば広範囲な推定幅となっているが、A, B 共に推定範囲（8~15 GPa）、平均値（12 GPa 台）はほぼ同じであり、推定分布形もほぼ同じと見なせる。これは、樹種が特定できない場合には既存のデータベースを使用しても推定可能であることを示唆している。ただし、樹種が特定できる場合には、該当樹種のデータベースによる方が推定幅を絞ることがで

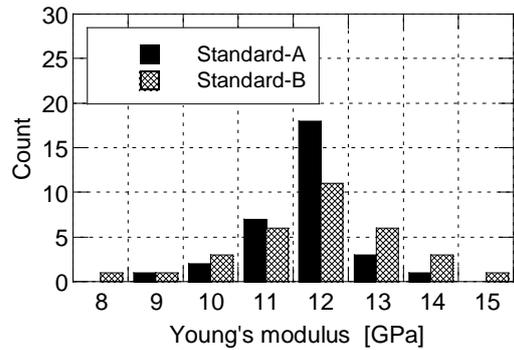


Fig. 3. Effect of data-base on the estimation of Young's modulus.

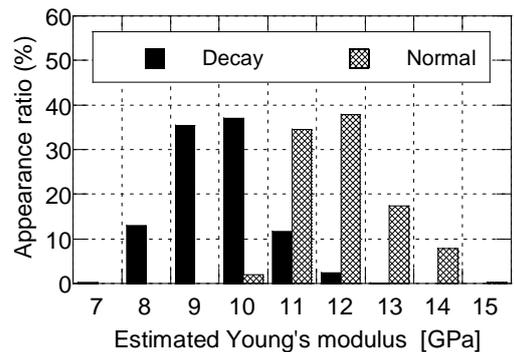


Fig. 4. Comparison between decayed- and normal-wood.

きるなど推定精度の点から当然好ましい。

Fig. 4 は、古民家（豊田市、明治 27 年築）に使われていた土台（ヒノキ）に関するヤング率の推定値の分布である。目視により健全であると判断された材は、ヒノキのヤング率としては若干大きめ（10~14GPa）ではあるが、ほぼ常識的な値が推定された。対して、目視により明らかに腐朽していた材のヤング率は、健全材の約 75% に推定している。

(3) 損傷の探査

応力波は木材中を伝播するとき、亀裂等の損傷・欠陥が存在すればこれを迂回して伝播する。この場合、健全材に比べて伝播時間が長くなる。この現象を利用すれば、内部損傷を探査することができる。

一例として、Fig. 5 に寺院建築（須坂市）の構造部材の横断（半径）方向に伝播させた応力波速度とヤング率換算値（密度を 500kg/m^3 と仮定）を示す。図は小屋梁の同一部位（1-a）で各方向から伝播させた場合、伝播速度は遅く、それぞれ異なる値を示しており、内部損傷の存在を示唆している。これに対し、同一部材の異なる部位（1-b）を示しており、内部損傷の存在を示唆している。これに対し、同一部材の異なる部位（1-b）においては、他の健全材（2, 3, 4）と同様、常識的な値となっている。

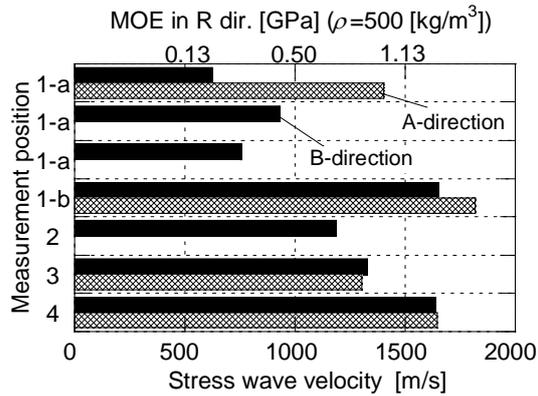


Fig. 5. Inspection of inner defect.

(4) 古寺院庫裏の改修に伴う構造部材の非破壊強度検査

解体前に部材（古材）の強度的性能に関する事前検査を実施し、同時に、この事前検査の検証も兼ねて、解体時に現場にて実大の曲げ実験を行った。ここでは、曲げ剛性について、応力波伝播速度による剛性の推定値と比較、検討した。なお、検査対象となったのは柱、梁の構造部材で、樹種はアカマツ、ケヤキであった。

まず、測定された応力波伝播速度は 3268～5089 m/s であった。これをもとに前報の方法によりヤング率を推定したところ、5.64～11.8 GPa のようであった。アカマツ、ケヤキのヤング率としては少し小さめに推定されているものもあるが、概ね常識的な値と考えられた。

次に、「応力波伝播速度より推定したヤング率と外形断面寸法をもとにした断面二次モーメントの両者より計算（推定）した曲げ剛性」と、「曲げ試験時の荷重-たわみ曲線より得られた曲げ剛性」の両者を比較したのが Fig. 6 である。応力波を伝播させた範囲や断面二次モーメントの評価方法により 4 通りのプロットがあるが、全体的に見て、両者の間には約 3 倍の差がある。これは、断面二次モーメントに関して、材に存在する切欠

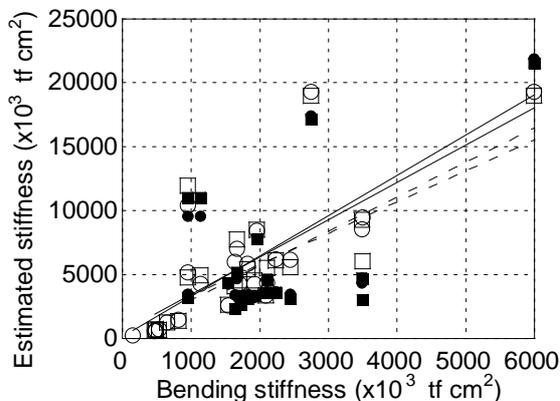


Fig. 6. Comparison of stiffness.

や欠損を無視しているため、正しく評価できていないからである。解体材は、特に寺院建築等に使われていた古材の類は、断面が不定形である場合が多く、しかも切欠きや欠損を含んでいる。したがって、断面二次モーメントを正しく評価することは難しい。

杉山らは、切欠きを持つ製材の曲げの問題について、曲げたわみに関する実験式を提案している。実験条件等が異なるので少し無理があるが、これを参考にして、次のような曲げ剛性推定式を考えた。

$$EI_v/EI_b = 1 + A(d/h)^2$$

式中、 EI_v は推定剛性（応力波伝播速度をもとに推定する剛性）、 EI_b は（曲げ試験より求められる）曲げ剛性、 h は梁背、 d は（最も影響が大きいと考えられる）切欠きの深さである。A は補正係数で、杉山らは切欠き長さや梁背とスパンの比によって 8.5, 10.5, 18.2, 22.9 などの値を示し、適用可能であるとしている。ここでは A として 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25 を設定し、考察した。

各試験体について EI_v/EI_b （縦軸）と A（横軸）の関係を Fig. 7 に示す。これによれば、A が大きくなると EI_v/EI_b は 1 に近づくことがわかる。A=15, 20, 25 のときの比（縦軸）の平均値は $EI_v/EI_b=1.23, 1.06, 0.92$ で、A=20 前後とする時に、応力波伝播速度をもとに推定する剛性（ EI_v ）は曲げ剛性（ EI_b ）に近い値となる。これより、今回の場合、補正係数として 20 を採用すれば、応力波伝播速度から材のおおよその剛性を推定できることになる。ただし、補正係数 A を材の形状、切欠きや欠損の大きさ・位置に応じてどのように評価するかについては今後の検討課題である。

(5) 結言

構造体の状態で部材の保有強度を推定する方法と測定例を示した。本方法によれば、材料の密度を知ることなく、応力波伝播速度のみから部材ヤング率を推定することが可能であり、木質建造物の保守管理に役立つものと期待される。

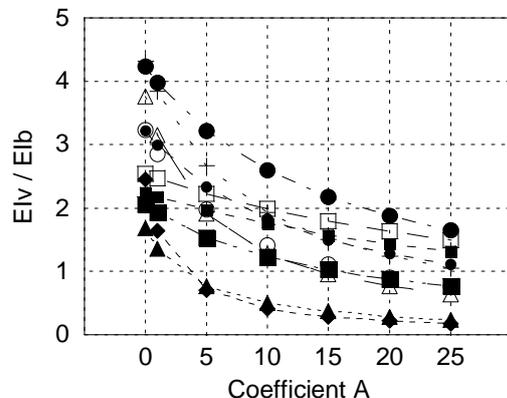


Fig. 7. Stiffness ratio.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計7件)

1. 木造建築における構造部材の応力波伝播特性, 山崎真理子, 日本材料学会第3回東海支部学術講演会, 2009年3月13日, 名古屋
2. 木質建造物の改築・改修における応力波を用いた構造部材の非破壊検査, 山崎真理子, 日本建築学会 2007年度大会(九州)学術講演会, 2007年8月29日, 福岡
3. 古寺院庫裏の改修に伴う構造部材の非破壊強度検査, 佐々木康寿, 第56期日本材料学会学術講演会, 2007年5月20日, 名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 康寿 (SASAKI YASUTOSHI)

名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

研究者番号: 90154004

(4) 研究協力者

山崎 真理子 (YAMASAKI MARIKO)

岐阜工業高等専門学校・建築学科・助教

研究者番号: 70346170