

名古屋大学 ○佐々木康寿, 名古屋工業大学 山崎真理子

Nondestructive Inspection for Strength of Structural Members in Wood Construction

Yasutoshi SASAKI and Mariko YAMASAKI

1 緒 言

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と呼び、近年移築やリフォームなど、解体古材を再使用する場合が多く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。このような部材の利用・再利用に当たっては、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。

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て、解体前の構造体のままの状態、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（特許出願準備中、3月上旬に出願予定）。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、再利用に供することは、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。

2 方 法

木材の強度パラメーター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①負荷法、②周波数解析（打撃法）、③超音波法、④応力波法などがある。このうち①では、材料の断面形状を特定する必要がある。また、構造体内での試験は不可能である。②では、材料の支持方法が問題となるため、構造体内での実施は不可能である。材料の密度も必要である。③は、材料（木材）とセンサーの接触（密着）性が問題であり、材料の密度も必要である。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④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。そこで、本報告では応力波法を採用した。

3 推定方法

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、必ずしもその材の代表値であるわけではない。このようなことから、本方法は研究蓄積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、応力波伝播速度のみからヤング率を推定するものである（特許出願中：特願 2006-058443）。

4 測定方法

応力波伝播速度の測定には、Fig. 1 に示す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（ μ s）を測定するものである。2 個のセンサー間の距離と応力波伝播時間を、ヤング率推定用計算プログラムをインストールした PC に入力すれば、直ちにヤング率（および密度）の推定分布値が求められる。

5 検査例

現在、半解体修理中の善光寺三門（長野市）を始めとする築後経過年数が 100～300 年の寺院、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、ケヤキであった。応力波は部材（木材）の長軸



Fig.1. Stress wave measurement by using FAKOPP.

(繊維)方向および半径方向に伝播させた。

5.1 ヤング率の推定に及ぼすデータベースの影響

本推定法により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。そこで、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)¹⁾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^{2,3)}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. 2 の○印は基準としたデータベース¹⁾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。 $E = \rho v^2$ を原理とする推定であるので、Fig. 2 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った。ただし、ヤング率の推定幅はほとんど変わらなかった。また、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って推定される。

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、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。例えば、Fig. 2 の●印で示される許容誤差 1% における推定値は対数正規分布に最も良く適合しており、5% 下限値は 5.85 GPa であった。

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るかは、実大材の曲げヤング係数との比較検討ともあわせて今後の検討課題である。

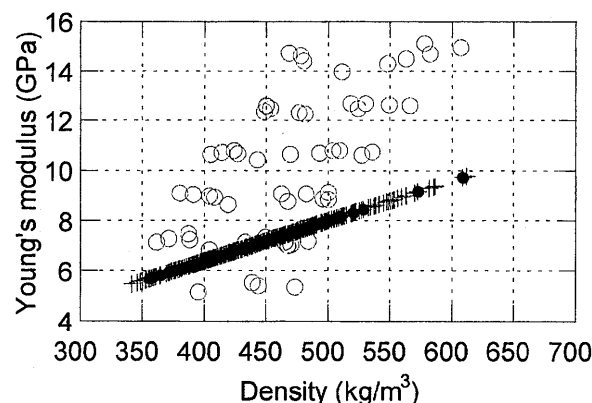


Fig. 2. Base data of MSR lumber and estimated Young's modulus.

5.2 ヤング率の推定例

善光寺大本願明照殿 (長野市) 内の構造材のうち、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. 3 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¹⁾ (○) 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ていることがわかる。これらの材は、表面の繊維感はなく、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ることが推察された。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。

6 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、木質構造物の保守管理に役立つものと期待される。

謝 辞

寺院、古民家の調査機会を与えられ、測定に協力された榊中村建築研究所 (長野市)、榊明城 (安城市) に感謝いたします。

参考文献

- 1) 森林総研強度性能研究会:「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>, (2005).
- 2) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 古材の強度特性 (第 3 報), ケヤキおよびアカマツの静的曲げ強度特性および衝撃曲げ強度, 木材学会誌, 51 (3), 146~152, (2005).
- 3) 山崎真理子, 平嶋義彦, 佐々木康寿: 建築解体木材の強度特性, 日本建築学会構造系論文集, 588, 127~132, (2005).

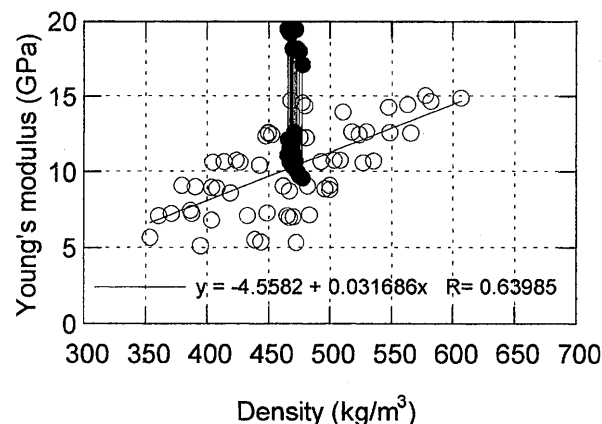


Fig. 3. Estimation of Young's modulus of columns in Zenkouji, Nagano.