

木材弾性係数の非破壊計測のための工学実験教育における打撃音法の利用

岩井 哲*・大林 眞*

(平成18年10月30日受理)

Use of the Acoustic Grading Method as Nondestructive Inspection to Measure the Elastic Modulus of Timbers for Experimental Education in Engineering

Satoshi IWAI and Makoto OHBAYASHI

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

The quality assurance of architectural timbers becomes more important because the Building Standard Law was revised in 2000 and the House Quality Assurance Law was enforced. There are two indices to timber strength. One is “Young’s modulus” as the index at an initial deformation, and the other is “ultimate strength” as the index of failure. Recently, the Young’s modulus can be measured by the Acoustic Grading Method. This is one of the so-called nondestructive inspection methods, which is to measure the sound while beating the timber side, and detect predominant frequency using FFT (Fast Fourier Transform) analysis. The Young’s modulus obtained by the Acoustic Grading Method is compared with the moduli detected by the axial compression and flexural failure tests of the timbers.

Key Words: acoustic grading method, elastic modulus, timber, experimental education, nondestructive inspection

1. はじめに

2000年の建築基準法の改正，住宅品質確保促進法の施行により，木材の品質保証がますます重要となってきた。木材の機械的性質の強度の指標として2つある。1つは，初期変形の指標としての「ヤング係数（弾性係数）」，もう1つは，破壊の指標としての「終局強度」である。木材の強度はヤング係数と高い相関関係が認められる。打撃音法，あるいは縦振動法などと言われる動的な方法により，ヤング係数を非破壊で測定できる方法が一般的に普及しつつある。木材の木口面などをたたいて音を測定し，ヤング係数を割り出す手法である。工学実験教育において，強度に関する非破壊検査法の導入を図った。その利用方法を紹介すると共に，古典的な圧縮試験や曲げ破壊試験を併行して実施し，打撃音法による推定結果をこれらと比較させるものである。

2. 縦振動法によるヤング係数測定

木質材料のヤング係数の非破壊測定法として，「縦振動法」(図1)と「横振動法（曲げ振動法）」(図2)がある。いずれも木材をハンマーによって打撃し，発生する音の周波数をFFT (Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換) スペクトルアナライザ (=周波数解析器；

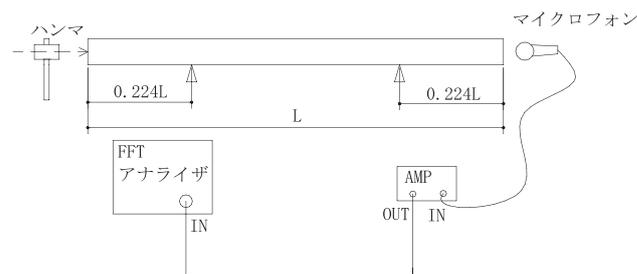


図1 縦振動法によるヤング係数測定

* 広島工業大学工学部建築工学科

小野測器 CF-5220Z) により計測するもので、打撃音法 (acoustic grading method) あるいはタッピング法 (tapping method) とも言われる。材料の共振現象を利用し、安定した計測が可能とされ、大きな材にも容易に適用できる特徴がある。FFT スペクトルアナライザーによる固有 (共振) 振動数と質量から、ヤング係数を求めるものである。

FFT は、離散 Fourier 変換を高速に行う技法である。離散 Fourier 変換 (Discrete Fourier Transform) とは、通常の Fourier 変換の無限区間積分を有限の和で書き換えたもので、時間領域、周波数領域ともに離散化された Fourier 変換のことである。

材のヤング係数 E (N/m²) を求めるには、固有 (共振) 振動数 f (Hz) と質量 w (kg) の 2 つのパラメータを測定しなければならない。この場合、木材は曲げ剛性が一定であること、即ち材が均質で同じ太さの断面をもつことが条件として挙げられる。その計測の根拠は以下のようなものである。

縦振動による引張の慣性力が材中 (材軸 x , 時刻 t とする) を伝わる現象に対して、ダランベール (d'Alembert) の原理を用いて縦方向変位 u に関する振動方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

が立てられ、固有振動数 f (Hz) が次式で与えられる。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで、 ρ は密度 (kg/m³) で $\rho = w / (L \cdot A)$, L は材長 (m), A は断面積 (m²), $n = 1, 2, 3, \dots$ である。このとき材のヤング係数 E (N/m²) は

$$E = (2L \cdot f)^2 \rho = \frac{4L \cdot f^2 w}{A}$$

で与えられる。¹⁾

3. 横振動法 (曲げ振動法) によるヤング係数測定

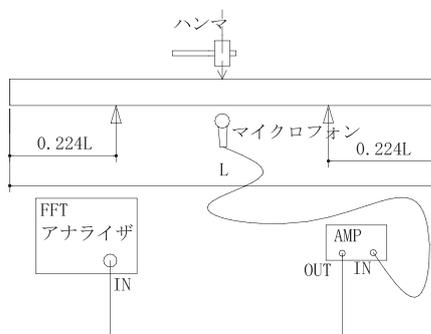


図2 横振動法によるヤング係数測定

使用器具は 2. と同じで、試験体を両端で単純支持し、図 2 のように材の中央をハンマーで軽く打撃して打音を測定する方法である。この場合、横振動によるはり分布荷重

p が慣性力に置き換えられる。ダランベールの原理を用いて横方向変位 y に関する振動方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -p = -\rho A \frac{\delta^2 y}{\delta t^2}$$

が立てられる。 I は断面 2 次モーメント (m⁴) である。固有振動数 f (Hz) が次式で与えられる。

$$f = \frac{i \cdot m^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで、 $i^2 = \frac{I}{A} = \frac{D^2}{12}$, π は円周率, m は振動次数によ

て決まる定数 (両端自由もしくは両端固定の場合 $m_1 = 4.730$), D は断面せい (m) である。このとき材のヤング係数 E (N/m²) は

$$E = \frac{(2\pi)^2 \cdot L^4 \cdot f^2 \cdot \rho}{i^2 \cdot m^4} = \frac{48\pi^2 \cdot L^4 \cdot f^2 \cdot \rho}{D^2 \cdot 4.730^4}$$

で与えられる。

4. 木材の軸圧縮破壊実験によるヤング係数計測

先の 2., 3. で得られるヤング係数を、実際の破壊にまで至る縦圧縮試験による応力—ひずみ曲線から求めたヤング係数と比較する。スギ・ヒノキ・ベイマツ (ダグラスファー) の 3 樹種に対して計測する。工学実験教育の一貫として、日本建築学会の建築材料実験用教材²⁾を参考にし、木材の次の諸量も同時に計測している。

4.1 平均年輪幅測定

1/20mm 精度のバーニヤ付キャリパース (実験では 1/100mm 精度のデジタルノギス) を使用して、平均年輪幅 = 木口面上で年輪に垂直な方向の年輪幅 (a mm) / 年輪数 (n) を、mm 単位で小数点以下 1 位までをとる。

4.2 含水率測定

高周波誘電率方式の木材水分計 (フソー株式会社 ワカール・スーパー FSK-118) を用いて、測定深度が約 50mm の含水率を計測する。

4.3 密度測定

秤量 200g, 感量 0.01g の調剤天秤と、1/20mm 精度のバーニヤ付キャリパース (4.1 と同じデジタルノギス) を使用し、試験体の各辺をノギスで測定して容積 v を求め、質量 w を秤量して密度 ρ (kg/m³) = w/v を小数点以下 2 位まで求める。

4.4 縦圧縮試験ならびに横圧縮試験

図 3, 写真 1 の装置で縦圧縮試験・横圧縮試験を実施する。計測結果の例を図 4 と図 5 に示す。

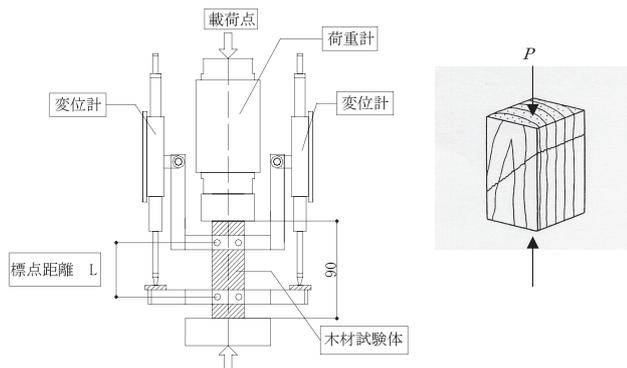


図3 縦圧縮試験によるヤング係数測定

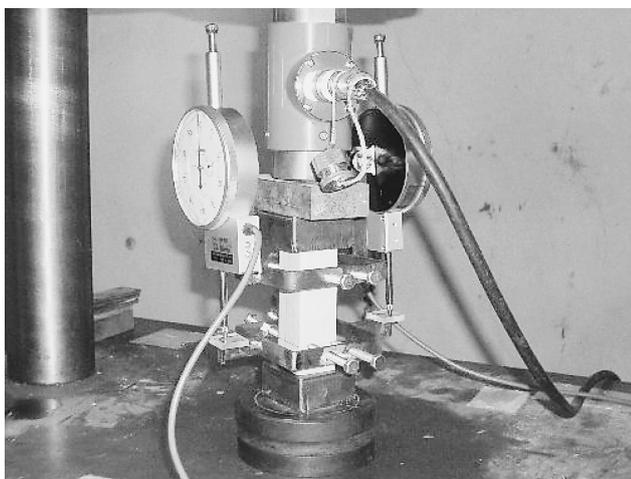
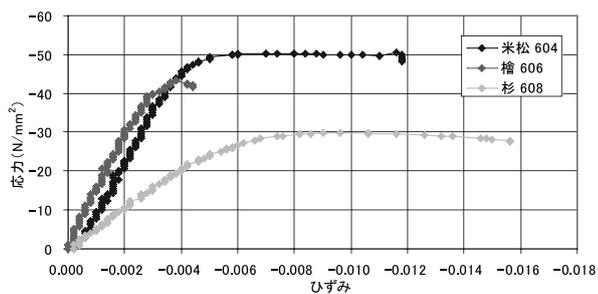


写真1 縦圧縮試験 (標点距離 $L = 50\text{mm}$)



縦圧縮試験結果 応力-ひずみ関係

図4 縦圧縮試験による応力-ひずみ関係

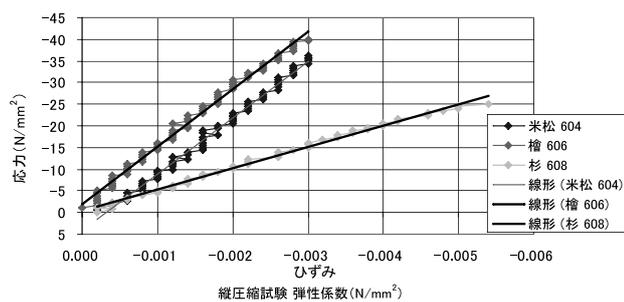


図5 縦圧縮試験によるヤング係数測定

5. 木材の曲げ破壊実験によるヤング係数

日本建築学会の建築材料実験用教材を参考にして、はりの曲げ強度試験を実施する。木材の曲げ試験に用いる試験体の含水率・断面寸法を測定し、曲げ载荷試験装置(図6、写真2)によって、荷重-たわみ曲線、曲げ強度、曲げ比例限度、曲げヤング係数を求める。木材は縦圧縮試験と同じくスギ、ヒノキ、ベイマツの3種を使用した。荷重を500N刻みで計測し、その時のより両側面のたわみをダイヤル・ゲージ式変位計で読みとる。これより得られた荷重-たわみ曲線の計測結果の例を図7に示す。

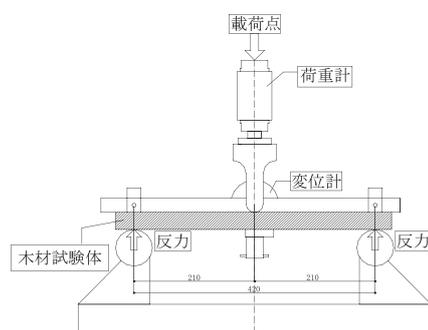


図6 曲げ破壊実験によるヤング係数測定

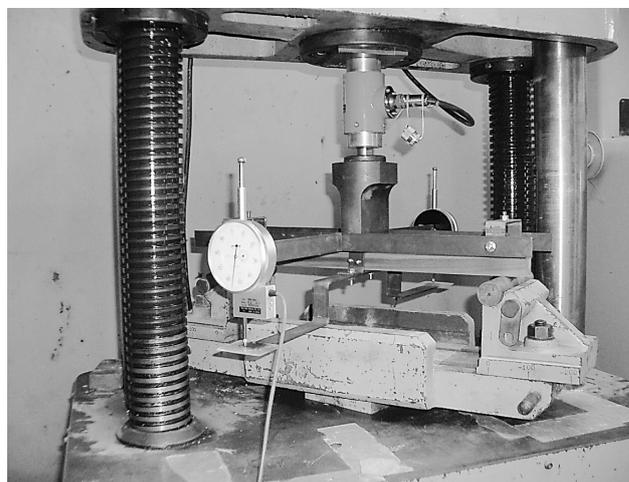


写真2 曲げ破壊実験によるヤング係数測定

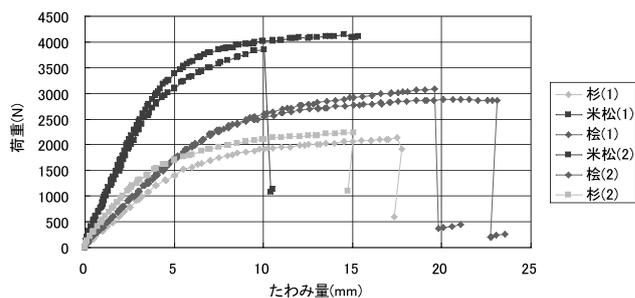


図7 曲げ破壊実験による荷重-たわみ関係

6. 打撃音法による木材の曲げヤング係数の計測



写真3 打撃音法によるヤング係数測定の様相



写真4 FFTスペクトルアナライザ

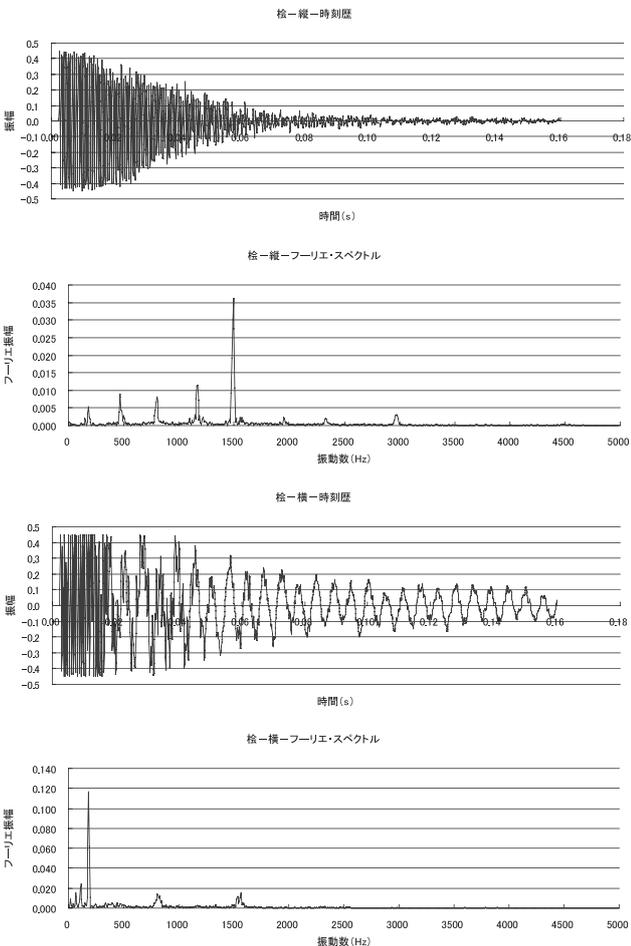


図8 打撃音法による計測波形の例とスペクトル

打撃音法によるヤング係数測定の様相を写真3に、FFTスペクトルアナライザを写真4に、打撃音法による計測波形とスペクトルの例を図8に、それぞれ示す。

7. おわりに

打撃音法は実社会でもある程度利用されており、現在では全く新しい非破壊検査法ではない。ただし、ヤング係数や、それに基づく強度の推定精度に関してはいろいろな意見がある。本報告は、木材のヤング係数の非破壊計測の手法の紹介に留めた。ヤング係数の計測値の樹種ごとの比較や、推定精度の検証は研究的内容になるため、別途にまとめる計画である。工学実験教育としては、木材の曲げヤング係数の新しい計測手法の認識をもつことと、実験データの精度・ばらつき具合を調べるのが目的となる。また今後、節がある材、穴がある材、試験片寸法の大小で差が出るか否か、端部にほぞがある場合に計測上の問題はないか、などを確認していく計画がある。非破壊検査法であることは非常に重要で、木材を等級（グレード）に分けることができ、検査した材そのものを実際に使えることになる。現実的な利用方法として、古材などの木材の再利用の際に、品質を調べ等級区分する方法としての利活用など、様々な利用方法が展開できると考える。

謝 辞

今回導入した打撃音法の器具一式は、建築工学科の平成18年度施行カリキュラムの教育実施のために、必要な設備計画として申請し、導入を図ったものである。関係各位に深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 秋田県立大学木材高度加工研究所編：「コンサイス木材百科」, 改訂版, 2002年9月, pp.228-229.
- 2) 日本建築学会：建築材料実験用教材.