

打撃音法を用いた木材の弾性係数の非破壊検査測定精度の調査

川 上 和 貴*・岩 井 哲**

(平成19年10月31日受理)

Investigation of Nondestructive Measuring Accuracy of the Elastic Modulus of Timbers Using the Tapping-Tone Method

Kazuki KAWAKAMI and Satoshi IWAI

(Received Oct.31,2007)

Abstract

In this study, the estimation accuracy of the elastic modulus of timbers by a tapping-tone method used as a nondestructive test was examined against the real elastic modulus by the destructive test, changing section size, specimen length and kind of the timbers named Douglas fir, *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*. The elastic modulus were measured by two different types of tapping-tone method: the longitudinal vibration method and the transverse vibration method. The conclusions are as follows: it is found that the transverse vibration method predicts remarkably well the elastic modulus by the destructive test, regardless of the section size and the length of the specimen. On the other hand, the longitudinal vibration method to the small-size specimen (specimen with 480 mm length) shows, in certain cases, wrong estimation against the elastic modulus of the destructive test.

Key Words: tapping-tone method, nondestructive test, elastic modulus, timber

1. 研究目的

打撃音法は、固有振動数と質量（密度）から弾性係数を求める非破壊測定法である。材料の共振現象を利用するもので、木材をハンマーによって打撃して発生する音の振動数をFFTスペクトルアナライザーにより取得し、安定した計測が可能とされる。打撃音法には木材の材軸方向に打撃する縦振動法と、木材の材中央を垂直方向に打撃する横振動法がある。建材の実寸サイズにおいては圧縮試験や曲げ試験などの破壊試験により求めた弾性係数と、非破壊試験である打撃音法より求めた弾性係数は近似することが認められている。しかし、JIS規格で定められている小サイズ曲げ試験用試験体(30mm×30mm×480mm)で打撃音法を

使ったところ、弾性係数が著しく低く出ることが生じた。本研究はこのような小サイズの試験体を含め、断面寸法、部材長さ、樹種を変えて同じ材で非破壊試験と破壊試験の両方を実施し、弾性係数の測定精度を調べたものである。^{1),2)}

2. 研究方法

2.1 試験体

調査対象とした材は代表的な建築材料の米松、桧、杉の3種である。全角材(105mm×105mm×1,680mm)を用意し、桧と杉は各1体、米松は2体を切り出して米松A、米松Bと区別している。打撃音法試験用として、全角材について計測調査を行った後、その全角材1本から太長材(50mm×50

* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

** 広島工業大学工学部建築工学科

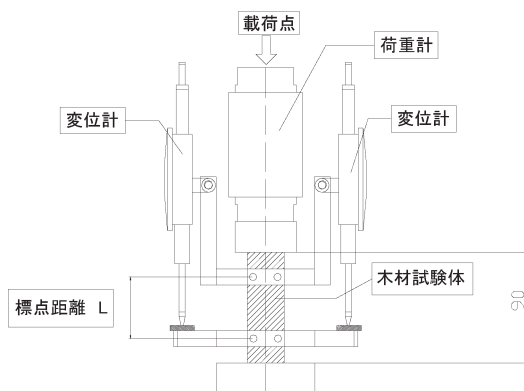


図1 圧縮試験による弾性係数測定

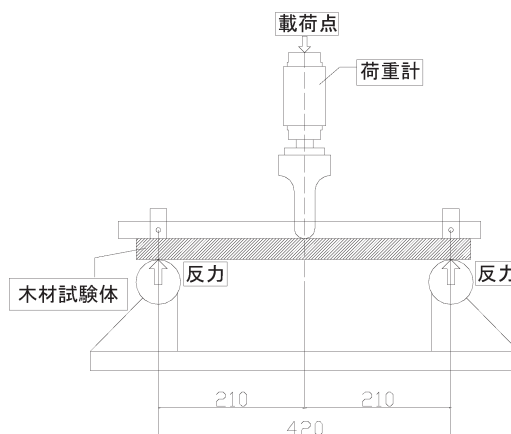


図2 曲げ試験による弾性係数測定

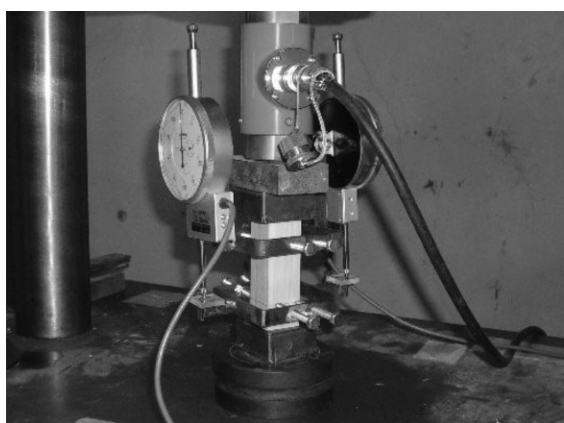


写真1 縦圧縮試験 (L=50mm)

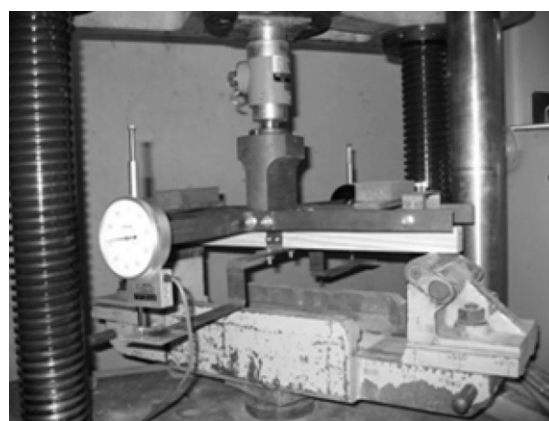


写真2 曲げ破壊試験

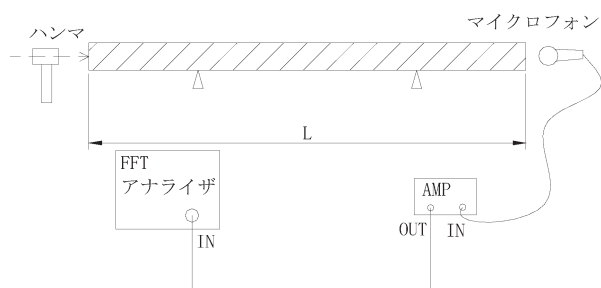


図3 縦振動法によるヤング係数測定

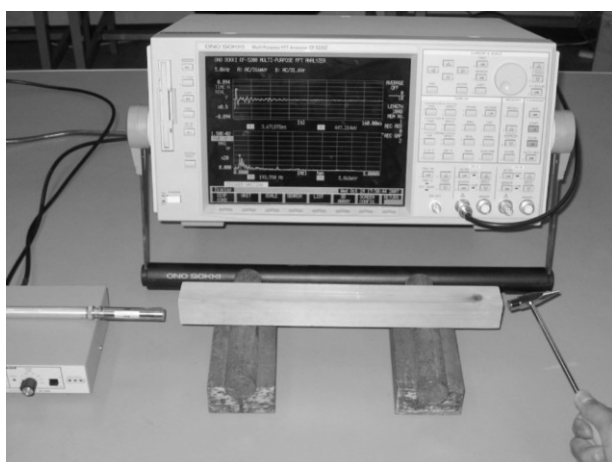


写真3 縦振動法によるヤング係数測定状況

mm×800mm), 細長材(30mm×30mm×800mm), 太短材(50mm×50mm×480mm), 細短材(30mm×30mm×480mm)の4種別を各3体, 圧縮試験用試験片(30mm×30mm×90mm)を3体, 曲げ試験用試験片(30mm×30mm×480mm)を3体切り出した。いずれも形状・寸法はJIS規格で定められているものをもとにし, 木材の切り出しはすべて木材業者に任せた。

2.2 破壊試験方法

アムスラー型万能試験機により, 圧縮試験用試験片を用いて木材の繊維方向に圧縮する縦圧縮試験を行い(図1, 写真1), 圧縮弾性係数と圧縮強度を求めた。標点距離は50mmとし, 50mm間でのひずみを求め, 応力-ひずみ曲線の弾性域の傾きより縦圧縮弾性係数を求めた。また同じ万能試験機で曲げ試験用試験片を用いて曲げ試験を行い(図2, 写真2), 荷重-たわみ曲線, 曲げ強度, 曲げ比例限度, 曲げ弾性係数を求めた。

2.3 打撃音法試験

縦振動法では, 材軸方向に打撃し, 発生した音の振動数をFFT(Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換)スペクトルアナライザ(=周波数解析機; 小野測器 CF-5220 Z)から求めた(図3, 写真3)。5回の打撃で得た波形

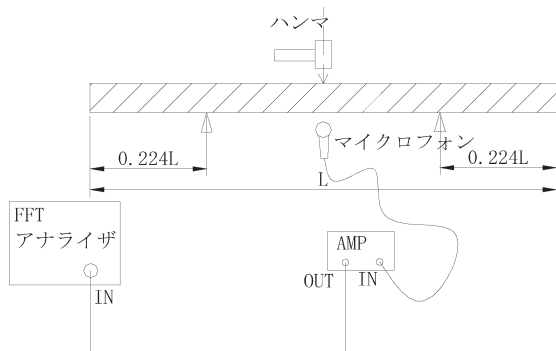


図4 横振動法によるヤング係数測定



写真4 横振動によるヤング係数測定の状態

を平均化した波形から固有振動数を求めている。縦振動法による弾性係数の推定式は

$$E = (2Lf)^2 \rho \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $E(\text{N/mm}^2)$ は弾性係数、 $L(\text{mm})$ は試験体の材長、 $f(\text{Hz})$ は固有振動数、 $\rho(\text{kg/mm}^3)$ は試験体の密度である。

横振動法では、材中央を垂直方向に打撃し、発生した音の基本振動数解析から固有振動数を求める。5回の打撃で得た波形を平均化した波形から固有振動数を求めている。横振動法による弾性係数の推定式は

$$E = (2\pi)^2 L^4 f^2 \rho / (i^2 m^4) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $i(\text{mm})$ は断面2次半径、 m は振動次数によって決まる定数である。ここでは1次振動数で支持方法は両端自由梁としたので4.73となる。(図4、写真4)。

3. 弾性係数の測定結果

3.1 破壊試験結果

縦圧縮弾性係数と密度の関係を図5に示す。回帰直線の相関係数 R^2 が0.36である。相関はあるが高くない。曲げ弾性係数と密度の関係を図6に示す。回帰直線の相関係数

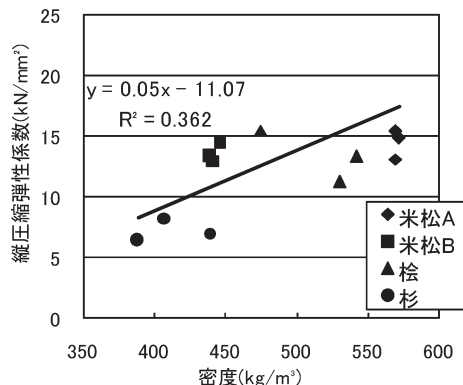


図5 縦圧縮弾性係数－密度関係

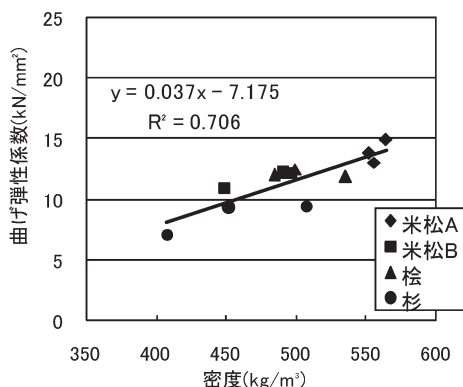


図6 曲げ弾性係数－密度関係

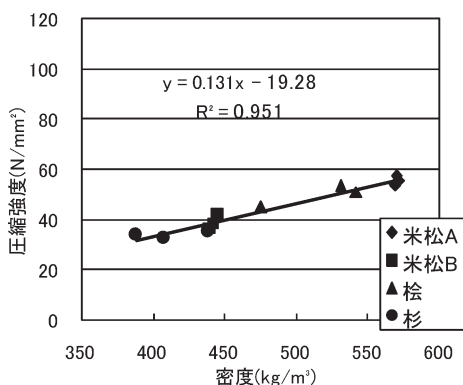


図7 圧縮強度－密度関係

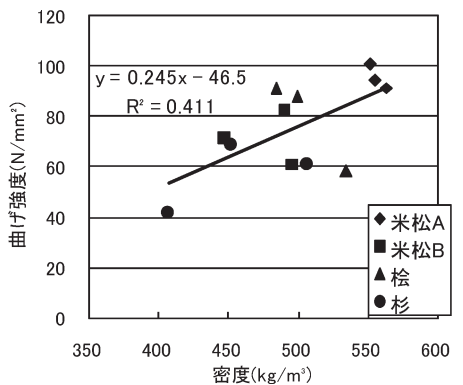


図8 曲げ強度－密度関係

R^2 は0.71である。縦弾性係数と密度の関係よりも相関は高い。次に、圧縮強度と密度の関係を図7に示す。回帰直

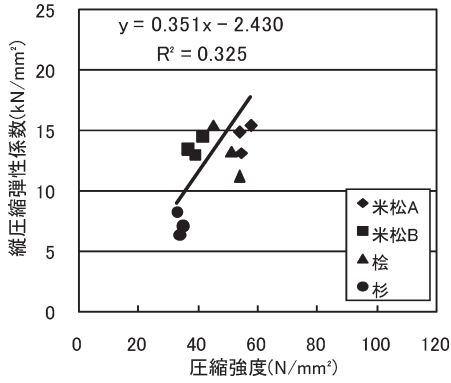


図9 縦圧縮弾性係数—圧縮強度

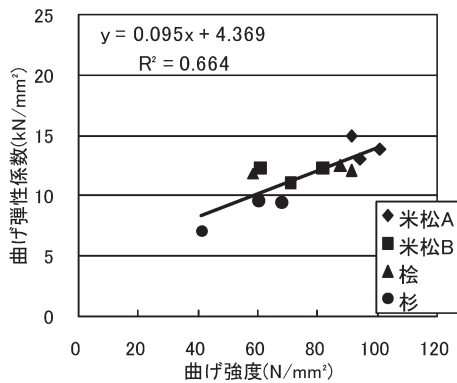


図10 曲げ弾性係数—曲げ強度

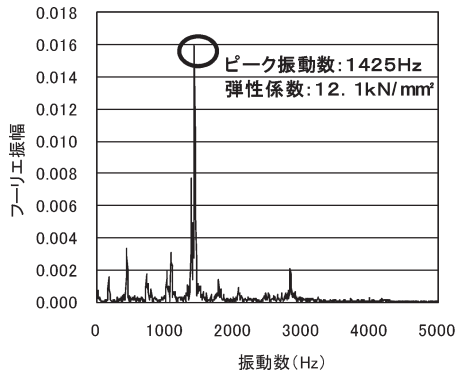


図11 全角材の縦振動フーリエスペクトル (米松B)

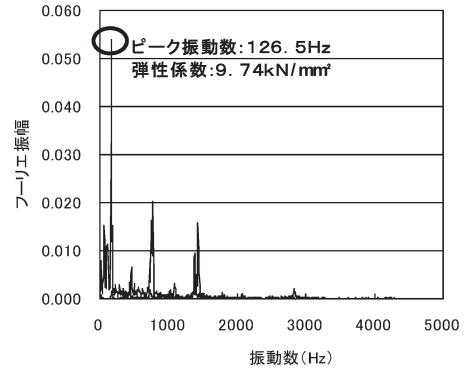


図12 全角材の横振動フーリエスペクトル (米松B)

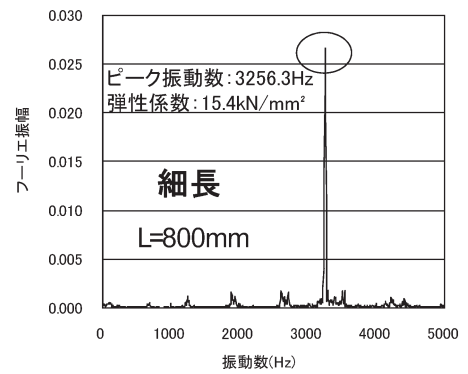


図13 材長800mmの縦振動フーリエスペクトル (米松A)

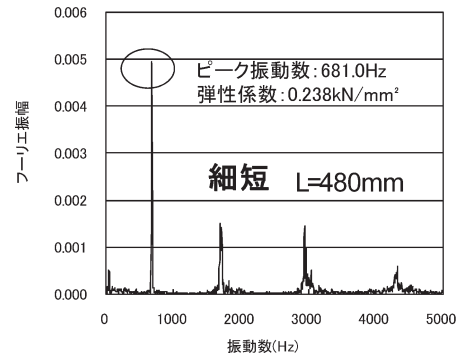


図14 材長480mmの縦振動フーリエスペクトル (米松A)

線の相関係数 R^2 が0.95でかなり高い。曲げ強度と密度の関係を図8に示す。回帰直線の相関係数 R^2 は0.41である。曲げ強度のばらつきがやや大きく、圧縮強度と密度の関係に比べ相関は低い。縦圧縮弾性係数と縦圧縮強度の関係を図9に示す。一般的に木材では弾性係数が高いと強度も高いとされるが、回帰直線の相関係数 R^2 は0.33である。曲げ弾性係数と曲げ強度の関係を図10に示す。回帰直線の相関係数は0.66である。図9, 10より弾性係数と強度にも相関が認められ、特に曲げ弾性係数と曲げ強度の相関は比較的良い。

3.2 打撃音法試験結果

縦振動法により求めたフーリエスペクトルの例を図11

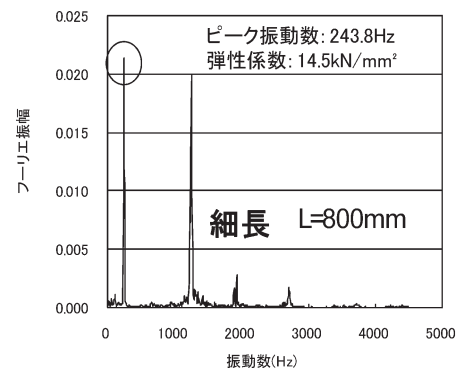


図15 材長800mmの横振動フーリエスペクトル (米松A)

と図13, 14に示す。全角材では弾性係数が12.1kN/mm²となり(表1)破壊試験で得られた弾性係数(13.0~15.4kN/mm²)

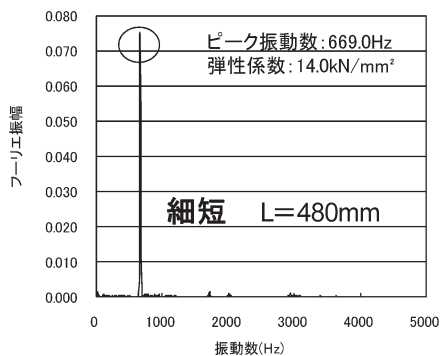


図 16 材長 480mmの横振動フーリエスペクトル (米松A)



図 17 各試験による弾性係数 (米松A)

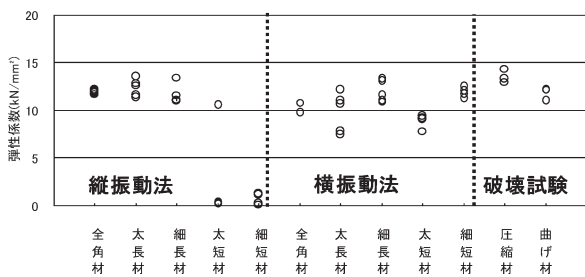


図 18 各試験による弾性係数 (米松B)

と近い値が得られている(表3)。長さ 800mmの細長材では、弾性係数が 15.4kN/mm²となり、破壊試験で得られた弾性係数に近い値が出ているのに対し、長さ 480mmの細短材では弾性係数が 0.238kN/mm²と著しく低い値となった。これは 1次ピーク振動数が低く出たため弾性係数も低く出たもので、米松B、桧、杉でも同様の結果となった。

一方、横振動法により求めたフーリエスペクトルの例を図12、15、16に示す。横振動法の場合は材長が 800mmでも 480mmでも、弾性係数が 14.0~14.5kN/mm²となり破壊試験から得られた弾性係数(13.0~15.4 kN/mm²)に近い値が得られた。全角材はやや低い弾性係数となっている。

3.3 破壊試験と打撃音法の比較

破壊試験と打撃音法から求めた全試験体の弾性係数を表1~3、図17~20に示す。縦振動法、横振動法、破壊試験から求めた弾性係数を材種別に示した。前述のように横振動法では材長による弾性係数の大きな違いは見られなかった。打撃音法で用いた材と同一の材を破壊して曲げ強度と

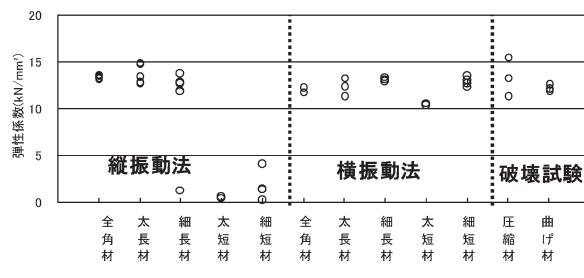


図 19 各試験による弾性係数 (檜)

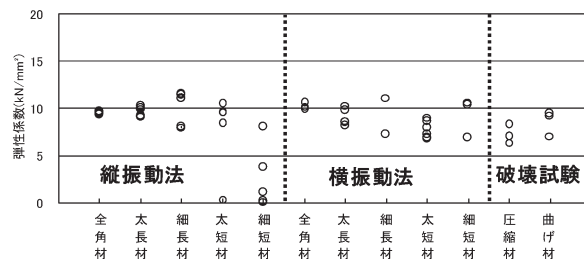


図 20 各試験による弾性係数 (杉)

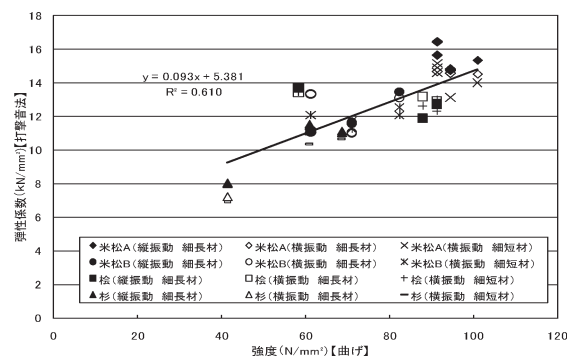


図 21 打撃音法の弾性係数と曲げ強度の関係

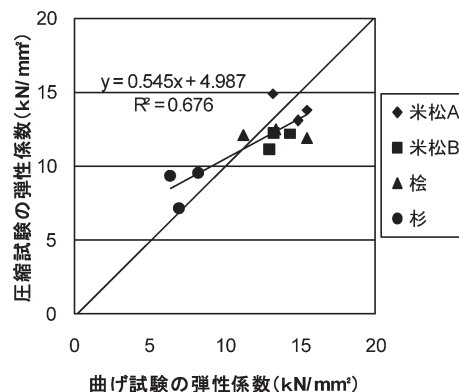


図 22 曲げ試験の弾性係数と圧縮試験の弾性係数の関係

弾性係数のそれぞれの関係を調べたものを図21に示す。弾性係数が高くなると強度も高くなり、近似直線の相関係数 R² は 0.61 と高い相関を示している。曲げ試験と圧縮試験から求めた弾性係数の関係を図22に示す。曲げ試験よりも圧縮試験のほうが弾性係数が高く出ている。近似直線の相関係数 R² は 0.68 となった。打撃音法と破壊試験から求めた弾性係数の比較を図23、24に示す。打撃音法の弾性係数

表1 打撃音法試験結果

試験体名	米松A		米松B		桧		杉	
	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法
	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
全角材1	—	—	12.14	9.740	13.09	11.77	9.325	9.884
全角材2	—	—	11.77	10.86	13.64	12.22	9.666	10.22
全角材3	—	—	11.93	9.749	13.21	11.77	9.335	9.928
太長材1-1	14.26	13.19	11.57	7.810	14.82	13.29	10.00	9.803
太長材1-2	14.26	13.19	11.37	7.494	14.92	13.29	10.00	9.803
太長材1-3	14.37	13.19	11.57	7.810	14.92	13.29	10.04	8.540
太長材2-1	17.69	15.51	13.51	12.15	12.68	11.27	10.24	8.693
太長材2-2	17.69	15.51	12.93	12.15	12.73	11.27	10.24	10.35
太長材2-3	17.69	15.51	12.67	12.15	12.68	11.27	10.20	10.35
太長材3-1	13.56	12.37	11.62	11.00	13.31	12.26	9.241	8.190
太長材3-2	13.61	12.78	11.62	11.00	13.31	12.26	9.283	8.496
太長材3-3	13.61	12.78	11.62	10.65	13.31	12.26	9.159	8.496

表2 打撃音法試験結果

試験体名	米松A		米松B		桧		杉	
	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法	縦振動法	横振動法
	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
細長材1-1	15.35	14.53	11.63	10.98	1.294	12.91	8.047	7.238
細長材1-2	15.35	14.53	11.63	11.02	12.78	12.91	8.010	7.238
細長材1-3	15.35	14.53	11.63	11.58	12.68	12.91	8.010	7.238
細長材2-1	16.43	14.67	13.47	13.10	11.89	13.18	11.14	270.7
細長材2-2	16.49	14.67	13.47	13.10	11.84	13.18	11.14	270.7
細長材2-3	15.65	14.67	13.47	13.10	11.84	13.18	11.05	273.6
細長材3-1	14.81	14.56	11.20	13.34	13.66	13.42	11.46	11.15
細長材3-2	14.81	14.56	11.05	13.34	13.66	13.42	11.55	11.15
細長材3-3	14.75	14.56	11.06	13.31	13.71	13.42	11.55	11.15
太短材1-1	0.523	11.72	0.362	9.098	0.490	10.59	8.394	6.895
太短材1-2	0.529	11.72	0.362	7.875	0.484	10.59	8.394	6.794
太短材1-3	0.529	12.76	0.362	9.098	0.490	10.59	8.394	7.955
太短材2-1	0.551	12.20	0.419	9.438	0.527	10.35	9.540	8.611
太短材2-2	0.558	12.20	0.301	9.438	0.472	10.35	9.643	7.288
太短材2-3	0.551	12.20	10.56	9.438	0.472	10.35	9.617	8.611
太短材3-1	0.569	13.08	0.417	9.183	0.490	10.59	0.350	9.05
太短材3-2	0.583	12.62	0.417	9.183	0.490	10.59	10.47	9.05
太短材3-3	0.583	12.62	0.416	9.183	0.502	10.59	10.47	9.05
細短材1-1	0.237	14.00	0.195	11.27	0.221	12.34	8.092	6.933
細短材1-2	0.237	14.00	1.179	11.71	0.210	12.99	8.092	6.933
細短材1-3	0.237	14.00	1.165	11.27	4.048	12.34	0.121	6.933
細短材2-1	0.248	15.16	0.212	12.53	0.217	12.64	1.141	10.68
細短材2-2	1.562	14.60	1.297	12.06	0.217	12.64	1.141	10.68
細短材2-3	0.248	14.90	0.208	12.53	0.217	12.64	0.182	10.68
細短材3-1	0.216	13.13	0.203	12.06	1.323	13.47	3.741	10.38
細短材3-2	1.394	13.13	0.222	12.06	1.421	13.47	0.185	10.38
細短材3-3	1.428	13.13	0.222	12.06	1.421	13.47	0.174	10.38

表3 破壊試験結果

試験体名	米松A		米松B		桧		杉	
	弾性係数 kN/mm ²	強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	強度 N/mm ²
圧縮試験体1	15.44	57.53	13.01	38.72	11.22	53.66	7.049	35.05
圧縮試験体2	13.16	54.29	13.34	36.72	13.36	51.18	6.397	33.96
圧縮試験体3	14.85	55.36	14.41	41.59	15.49	45.03	8.272	32.67
曲げ試験体1	13.83	101.0	11.06	71.08	12.04	91.35	7.099	41.37
曲げ試験体2	14.90	91.44	12.18	82.34	12.49	87.97	9.303	68.68
曲げ試験体3	13.04	94.54	12.21	61.26	11.85	58.40	9.450	60.94

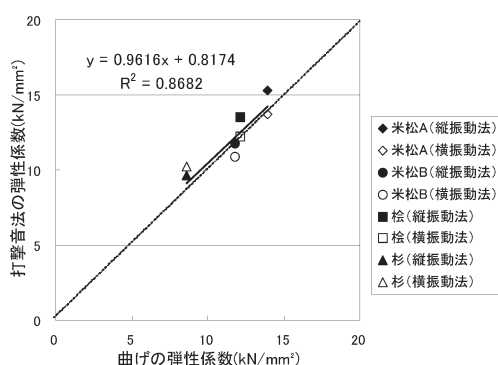


図23 打撃音法の弾性係数と曲げの弾性係数の関係

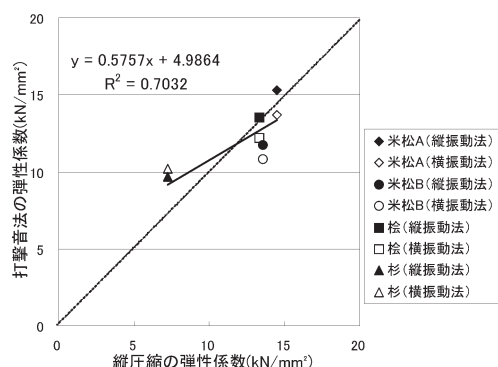


図24 打撃音法の弾性係数と縦圧縮の弾性係数の関係

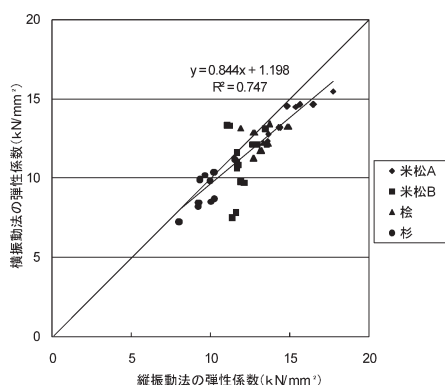


図25 縦振動法の弾性係数と横振動法の弾性係数の関係

は曲げの弾性係数と1対1の相関が強いことがわかる。近似直線の相関係数 R² は図23では0.87、図24の近似直線

の相関係数は0.70となった。縦振動法と横振動法から求めた弾性係数の関係を図25に示す。縦振動法の弾性係数は横振動法の弾性係数よりもやや高く出る傾向にある。近似直線の相関係数 R² は0.75となった。

今後は480mmの材で打撃音法を行ったときに弾性係数が低く出る原因と、破壊試験と近い弾性係数を得るための解決法を探りたい。

4. 結論

木材の圧縮と曲げ破壊試験で弾性係数を求め、30mm角～105mm角材の打撃音法による弾性係数の計測精度を検証した。また樹種を変え、その影響を検証した。

- 1) 全角材においては縦振動法、横振動法ともに破壊試験で得られる弾性係数に近い値が求まった。横振動法では試験体サイズを問わず破壊試験と近い弾性係数が得られた。
- 2) 縦振動法においては30mm角の800mm材長では破壊試験と近い値が得られるが、480mmの材長では弾性係数が著しく低く出ることがわかった。
- 3) 縦振動法の弾性係数は横振動法の弾性係数よりもやや高く出る傾向がある。縦振動法で得られた弾性係数は破壊試験の圧縮試験で得られた弾性係数に近い値が出て、横振動法で得られた弾性係数は破壊試験の曲げ試験で得られた弾性係数に近い値が出る傾向がある。
- 4) 1)～3)の傾向は材種を変えても同様の結果が得られた。

文 献

- 1) 岩井 哲, 大林 真: 木材弾性係数の非破壊測定のための工学実験教育における打撃音法の利用, 広島工業大学紀要教育編, 第6巻, pp.15-18, (2007)
- 2) 柏田貴志, 川上和貴: 打撃音法を用いた木材の力学特性の非破壊検査精度の調査, 広島工業大学卒業論文, (2007)
- 3) 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)

- 4) 祖父江信夫：タッピング 木材材料の弾性係数測定，
レオロジー研究資料，(1993)