

1. アカマツ大断面・長尺材の製造過程と強度特性の調査

上野文明

要約

アカマツ大断面・長尺材の製造技術と強度特性に関するデータを得るため、断面寸法 120mm×300mm、材長 6m以上の平角材を製造し、立木から製材までの製造過程を追跡し、ヤング係数等の強度特性を調査した。製造過程では、製造する平角材のサイズを得るための目安として、立木では胸高直径 50cm以上、丸太では末口径 40cm以上が概ね必要と考えられた。強度に関して、立木の応力波伝播速度と丸太の縦振動ヤング係数に相関が認められた。また、丸太、平角生材、平角乾燥材、平角仕上げ材の各段階間で縦振動ヤング係数に強い相関が認められたことから、丸太から平角材の強度を推定できると考えられた。平角仕上げ材の曲げ試験結果では、見かけの曲げヤング係数で J A S 機械等級区分を見ると、E70 から E130 まで出現し、それらの曲げ強さは基準強度を満たすものであった。

I はじめに

公共建築物の構造部材にスギやアカマツ等の県産材の製材品を使う場合、調達あるいは供給可能な製材品の条件を把握しておくことが必要である。その条件は、製品サイズ（断面寸法、材長）や強度性能、供給能力（量、納期）などである。具体的には、製材品は生産される丸太に依存するため、製品サイズには限界があると同時に、強度性能には丸太の材質を反映した範囲がある。供給能力は製材工場の機械・設備（製材能力、乾燥機など）や丸太の確保状況などによる。特に、住宅に比べて広い空間を持つ公共建築物では、構造を支えるために製品サイズの大きい部材（大断面・長尺材）を使うことが想定されるため、製材品でどこまで対応できるか把握しておくことが重要と考えられる。しかし、大断面・長尺材の生産や強度性能に関する県産材の知見やデータは十分でない。

そこで、当林業研究所では公共建築に対応した大断面・長尺材の生産技術の開発や強度特性の把握を目的とした調査・研究に取り組むこととし、平成26年度から平成27年度にかけて、スギ心持ち平角材について調査を行った。本研究は、平成27年度から平成28年度にかけてアカマツを対象に調査を行ったものである。

本研究では、アカマツ大断面・長尺材の製造技術と強度特性に関するデータの収集を目的とし、断面寸法 120×300mm、材長 6m以上の平角材を製造し、立木から製材までの製造過程と強度特性を調査することとした。平角材のサイズは、生産現場（森林組合、製材工場）で量的に供給可能な最大級のサイズとして考えた。

製造過程では、製造する平角材のサイズを得るために必要な立木や丸太のサイズ、製材寸法を調査した。

強度特性では、立木から丸太、平角材にかけて製造過程を追跡してヤング係数等の強度を計測し、各製造段階間の強度の相関や変動について検討した。平角材では、ヤング係数と曲げ強さを計測して強度性能を確認するとともに、材軸方向の部位における強度の差異を検討した。また、計測方法の異なるヤング係数間の比較を行った。

II 方法

1. 供試材および製材作業

供試材とした立木は、三戸郡五戸町の林齢約 70 年生のアカマツ林のものである。平成 27 年 11 月下旬に現地を調査し、材長 6m 以上、末口径 40cm 以上の丸太が得られるように 10 本を選木した。その立木を伐採して丸太を採材し、断面寸法 120mm×300mm、材長 6m 以上の平角材を得るように製材作業を進めた。製材作業は、同年 12 月中旬に粗挽き、12 月下旬に人工乾燥、翌年 1 月初旬に修正挽きを行った。

人工乾燥は、高温減圧乾燥機（ヒルデブランド社製スーパーハイドライヤー HD03/SHD）を使って、目標含水率 20% とし、処理時間に減圧・加圧処理 11 時間、120℃ の高温セット 24 時間、乾燥 92 時間をかけた。

立木伐採から製材作業まで、三八地方森林組合に依頼して行った。

2. 立木の測定

胸高直径と応力波伝播速度を計測した。応力波伝播速度は、応力波速度測定機（FAKOPP 社製）を用いて、地際からの高さが概ね 2m 以内に 1m 間隔のセンサーを打ち付けて、そのセンサー間における応力波伝播時間を測定し（図-1）、伝播速度を計算した。伝播時間は、立木 1 本につき、山側から見て左側と右側の 2 面で、それぞれ 3 回ずつ測定し、平均値を採用した。



図-1 立木の応力波伝播速度測定

3. 丸太の測定

元口径、中央径、末口径、材長、重量を測定し、見かけの密度を算出した。また、FFTアナライザ（小野測器社製 CF-4500）を用いて固有振動数を測定し、縦振動法によるヤング係数（縦振動ヤング係数 E_{fr} ）を算出した。

4. 平角材の測定

平角材は、製造段階を追って、粗挽き・乾燥前のものを平角生材、人工乾燥後のものを平角乾燥材、修正挽きしてさらにプレーナー仕上げしたものを平角仕上げ材と区分し、次のように測定した。

1) 平角生材

断面寸法（短辺、長辺）、材長、重量を測定し、見かけの密度を算出した。また、FFTアナライザ（小野測器社製 CF-4500）を用いて固有振動数を測定し、縦振動法によるヤング係数（縦振動ヤング係数 E_{fr} ）を算出した。

2) 平角乾燥材

平角生材と同様の測定を行った。

3) 平角仕上げ材

平角生材と同様の測定を行ったほか、次のような試験を行った。

(1) 応力波伝播法によるヤング係数（応力波ヤング係数 E_{ws} ）の計測

応力波ヤング係数 E_{ws} を元口側、中央部、末口側の3箇所計測した。その計測は、「構造用木材の強度試験マニュアル」（財団法人日本住宅木材・技術センター、2011）の応力波伝播法に従い、応力波速度測定機（FAKOPP社製）を用いて、測定する面に1 m 間隔のセンサーを打ち付けて応力波伝播速度を計測し（図-2）、見かけの密度との関係から E_{ws} を算出した。センサー間には節がなるべく入らないような部分を選んだ。測定した面は、短辺2面で、それぞれ3回ずつ応力波伝播時間を測定し、その平均値から伝播速度を計算した。

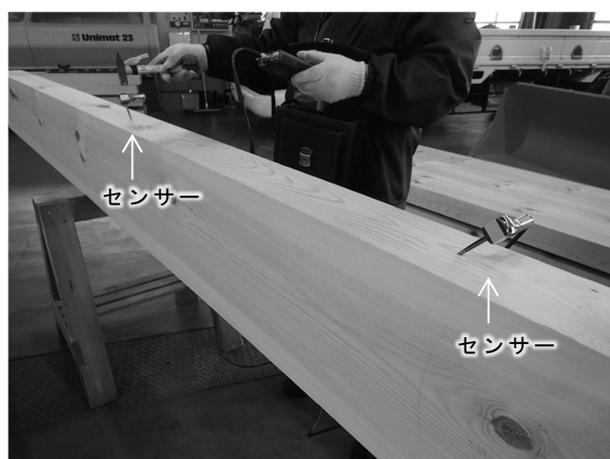


図-2 平角材の応力波伝播速度測定

(2) 荷重区間を移動する曲げ試験

実大木材強度試験機（島津製作所社製 UH-100A）を用いて、1本の試験体につき元口側、中央部及び末口側の3回、荷重の区間を水平に移動させて曲げ試験を行った（図-3）。この曲げ試験では、スパン長 4,500mm、支点-荷重点間距離 1,500mm の3等分点4点荷重、ストローク速度 10mm/min で加力し、スパン中央の全体たわみ（変位量）から、見かけの曲げヤング係数 E_m を算出した。計算に用いる荷重の増分は、5kN から 15kN の区間とし、最大 20kN で加力を戻し比例限度内で破壊に至らないように行った。

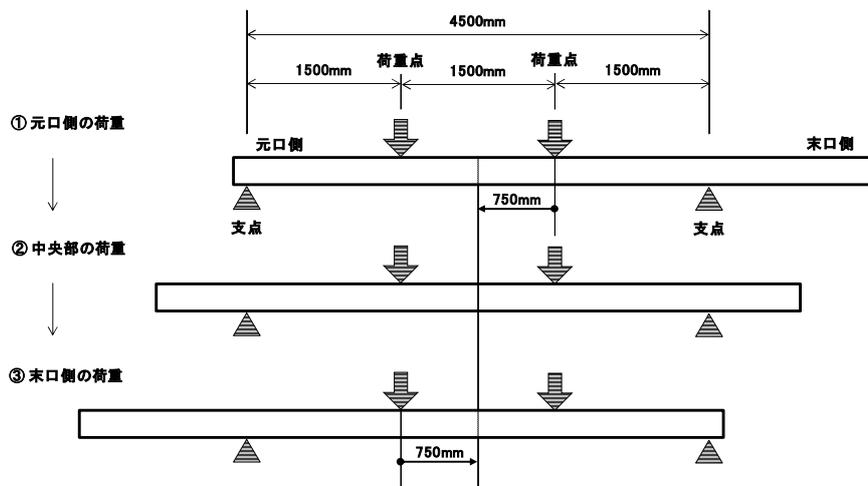


図-3 荷重区間を移動する曲げ試験のイメージ

(3) 変動スパン法による曲げ試験

同じ試験体を用いて中央集中荷重による曲げ試験をいくつかのスパン条件で行う変動スパン法では、曲げヤング係数（純曲げヤング係数 E ）とせん断ヤング係数 G を同時に算出することができる（「構造用木材の強度試験マニュアル」）。今回、実大木材強度試験機（島津製作所社製 UH-100A）を用いて、スパン長を材長 6 m の試験体では梁せいの 19.3、14、10、8 倍の 4 段階、材長 7 m の試験体では同様に 22、14、10、8 倍とし（図-4）、ストローク速度 10mm/min で加力した。スパン中央の全体たわみ（変位量）から曲げヤング係数（見かけの曲げヤング係数 E_m ）を算出するときの計算に用いた荷重の増分は、5kN から 15kN の区間とし、15kN を越えて直ちに加力を戻し比例限度内で破壊に至らないように行った。 E と G の計算方法は、 $y=1/E_m$ 、 $x=(d/L)^2$ 、 $y=a+bx$ とおいて、 y と x の関係を最小 2 乗法によって直線回帰したときに $E=1/a$ 、 $G=1.2/b$ として求められる。

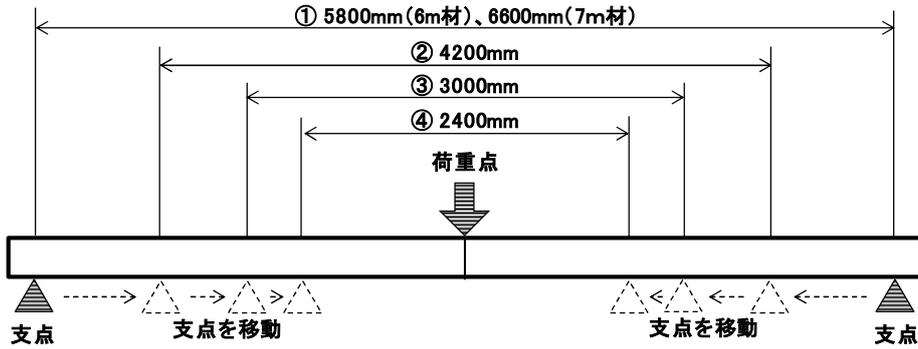


図-4 変動スパン法のイメージ

(4) 曲げ破壊試験

実大木材強度試験機（島津製作所社製 UH-100A）を用いて、スパン長 5,400mm の 3 等分点 4 点荷重、ストローク速度 10mm/min で破壊に至るまで加力し（図-5）、曲げヤング係数と曲げ強さ f_m を算出した。曲げヤング係数は、スパン中央の全体たわみを測定してせん断影響を含んだ曲げヤング係数（見かけの曲げヤング係数 E_m ）と、試験体の圧縮面上に変位計を取り付けた袴型治具（スパン 600mm）を用いて荷重点間のたわみを測定してせん断影響を含まない曲げヤング係数（真の曲げヤング係数 E_b ）を算出した（図-6）。計算に用いる荷重の増分は、最大荷重の 10% と 40% の区間とした。

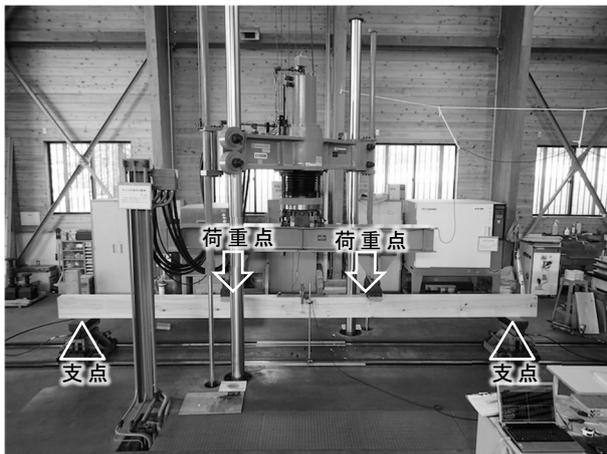


図-5 実大木材強度試験機による曲げ試験

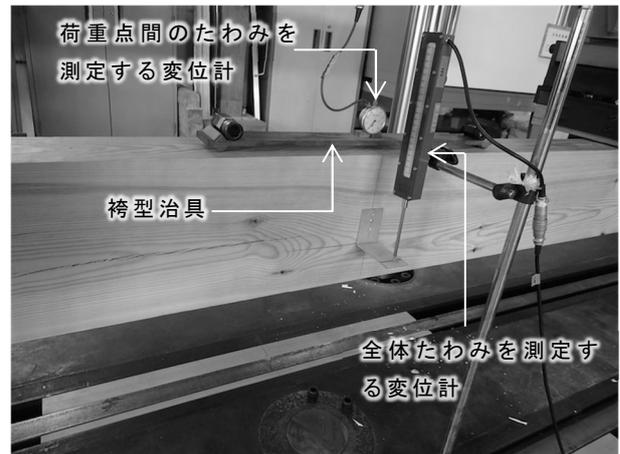


図-6 袴型治具と変位計

(5) 欠点、含水率、年輪幅の測定

製材の日本農林規格（製材 J A S）に従って材面の節等の欠点を調査した。節については、節径比を測定した。

曲げ破壊試験終了後、破壊した付近から厚さ 3cm の試験片を採取し、含水率（全乾法）と年輪幅を測定した。

Ⅲ 結果と考察

1. 製造過程の本数、大きさ、製材寸法

立木から丸太、平角生材、平角仕上げ材にかけての製造過程における本数とサイズを図-7に示す。

立木は胸高直径 49.7cm 以上で、材長 6m 以上の 1 番玉のみ採れたものが 7 本、材長 6m 以上の丸太を 2 番玉まで採れたものが 2 本あった。その結果、丸太は合計 12 本を得ることができた。

丸太のうち、末口径 56.3cm の 1 番玉から心去り材 2 本を製材することができた。その結果、平角材は合計 13 本を得ることができた。

粗挽き寸法は、短辺では仕上げで 120mm を得るために 180mm となった。長辺では最大寸法を得るようにした結果、心持ち材が平均 364mm、心去り材は 470mm と 540mm になった。

平角仕上げ材で断面寸法 120×300mm、材長 6m 以上を得るように製材作業を進めたが、丸太の曲がりや乾燥後のねじれが原因で断面の長辺が 300mm を満たさず 270mm となったものが 1 本あった。また、粗挽き段階で材長 7m であったもののうち、曲がりやねじれのために材長を 6m に落として断面寸法を確保したものが 2 本あった。

今回の調査では、製品サイズで断面寸法 120×300mm、材長 6 m 以上の平角材を製造する目安として、立木では胸高直径で概ね 50cm 以上、丸太では末口径で概ね 40cm 以上が必要と考えられた。なお、幹の曲がりがあったり、太い枝が付いていたりして、6m 以上の通直な丸太を得るためには立木をよく見て選ぶ必要があった。製材作業では、粗挽き寸法で短辺 180mm、長辺 330mm 以上が必要になると見込まれた。

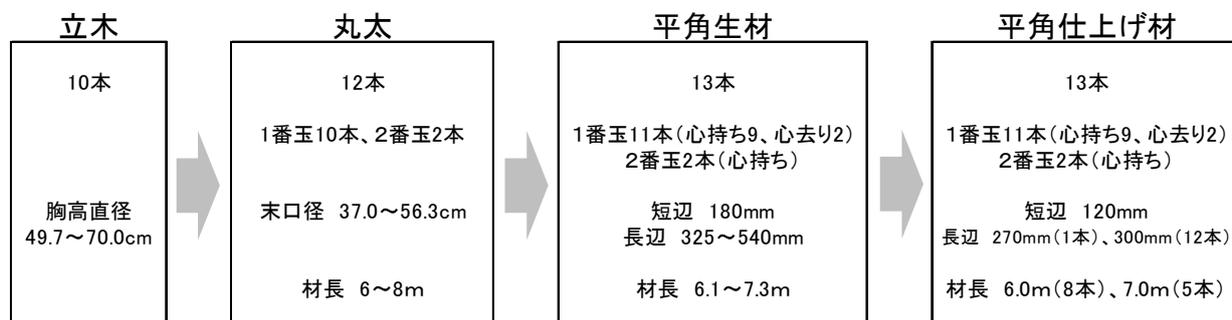


図-7 製造過程の本数と材の大きさ

2. 強度特性

試験体毎の結果を本報告の末尾に付表として示す。

以下に考察を加えた結果を示す。

1) 立木強度の検討

立木の強度的性質を評価する方法として、応力波伝播法によるヤング係数（応力波ヤング係数 E_{ws} ）を計測する方法がある。応力波ヤング係数は、応力波伝播速度 v と材の密度 ρ から、式 $E_{ws} = v^2 \rho$ で算出することができる。

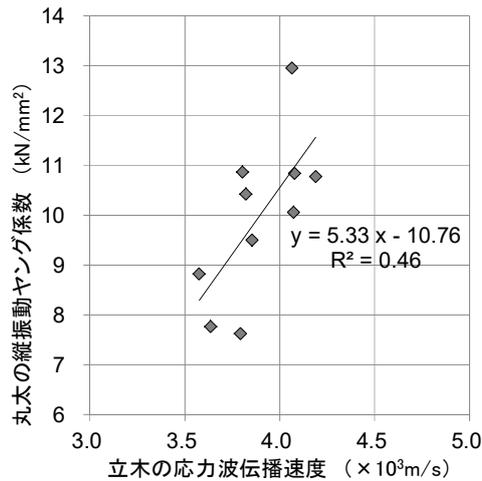
立木状態で材の密度を精度良く計測することは困難であるが、今回調査では、立木を伐倒して丸太の重量を測定し、丸太の見かけの密度を算出している。そこで、丸太1番玉の見かけの密度を使って立木の応力波ヤング係数を計算したところ、平均で 12.01 kN/mm^2 となり、丸太の縦振動ヤング係数より約 20% 高い値となった（表-1）。

立木の応力波ヤング係数については、含水率や密度の扱い方の問題があるが、相対的な材質の比較が可能であるとの報告がある（名波ら、1993）。また、応力波伝播速度も材質の評価に有効であり、応力波伝播速度と丸太の縦振動ヤング係数、平角材の曲げヤング係数との間に有意な相関関係が認められている（池田ら、2000）。

そこで、立木の応力波伝播速度と丸太1番玉の縦振動ヤング係数の関係を検討してみる（図-8）。単回帰分析による両者間の相関係数は 0.678（無相関の検定により有意水準 5% で差がある。）で、有意な相関関係が認められた。このことから、立木の応力波伝播速度から丸太の縦振動ヤング係数をある程度予測できると考えられた。

表-1 立木と丸太1番玉の測定結果

項目	立木		丸太1番玉	
	応力波伝播速度 v (m/s)	応力波ヤング係数 E_{ws} (kN/mm^2)	見かけの密度 ρ (kg/m^3)	縦振動ヤング係数 E_{fr} (kN/mm^2)
平均値	3889	12.01	791	9.96
最大値	4190	13.73	856	12.95
最小値	3576	9.68	732	7.62
標準偏差	204	1.53	36	1.61
変動係数(%)	5.3	12.7	4.6	16.1
標本数	10	10	10	10



図－8 立木の応力波伝播速度と丸太の縦振動ヤング係数の相関

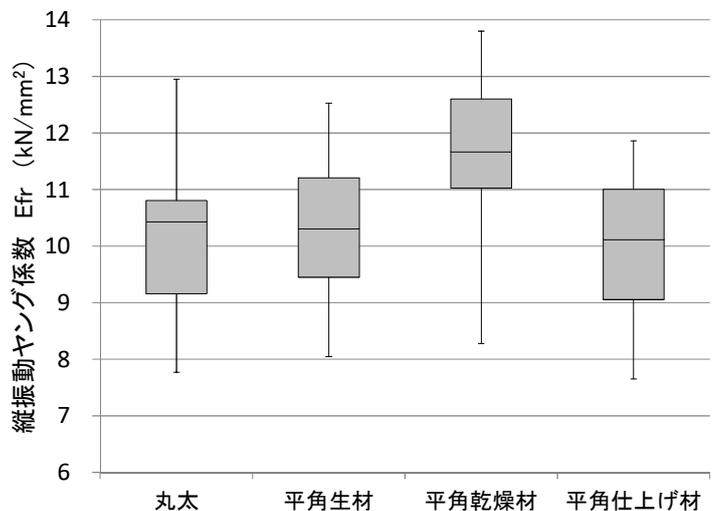
2) 製造過程における縦振動ヤング係数の変動と相関

製造過程の各段階における縦振動ヤング係数 E_{fr} の出現範囲を図-9 に示す。図のデータは心持ち材 11 本のものである。製造過程で E_{fr} が変動する状況を概観すると、丸太 E_{fr} と平角生材 E_{fr} はあまり変わらず、平角生材 E_{fr} から平角乾燥材 E_{fr} にかけて上がり、平角乾燥材 E_{fr} から平角仕上げ材 E_{fr} にかけて下がる傾向が見られた。平角生材から平角乾燥材にかけて E_{fr} が増えるのは、人工乾燥により含水率が下がることに伴うものと考えられる。また、平角乾燥材から平角仕上げ材にかけて E_{fr} が下がるのは、修正挽きにより材の外側にある、強度の高い成熟材部分が削られた影響があるものと考えられる。

丸太－平角生材、平角生材－平角乾燥材、平角乾燥材－平角仕上げ材の相関を図-10 に示す。図のデータは心持ち材 11 本のデータである。単回帰分析による相関係数は、丸太－平角生材が 0.92、平角生材－平角乾燥材が 0.98、平角乾燥材－平角仕上げ材が 0.96 で、どの関係も強い相関が見られた。

強い相関性があることを利用し、丸太 E_{fr} から平角仕上げ材 E_{fr} を推定することが可能と考えられた。

心持ち材 2 本の E_{fr} は、各段階とも数値で見れば全体の中で低いほうに位置したが、丸太から平角仕上げ材にかけての変動は心持ち材と同様の傾向を示した。



図－9 縦振動ヤング係数の出現範囲

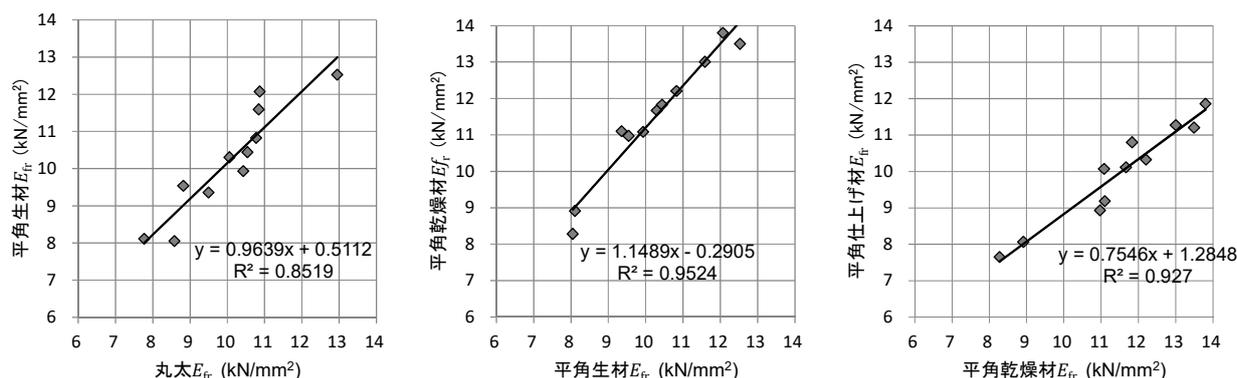


図-10 縦振動ヤング係数の相関

3) 平角仕上げ材の品質

平角仕上げ材 13 本について、日本農林規格（J A S）の目視等級による材面品質の基準で節径比を確認した結果を表-3 に示す。集中節が全ての材に見られ、広い材面の中央部におけるその最大節径比は平均 44% であった。5% を越える繊維傾斜が 5 本で見られた。心去り材にはねじれが確認された。

J A S 目視等級の甲種Ⅱで区分すると、2 級が 9 本、3 級が 2 本、等級外が 2 本になる。

表-2 J A S 目視等級による節径比

項目	節径比			集中節径比		
	狭い材面	広い材面		狭い材面	広い材面	
		材縁部	中央部		材縁部	中央部
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
平均値	33	7	10	23	1	44
最大値	75	21	13	70	16	63
最小値	12	0	4	0	0	27
標準偏差	14	7	2	27	4	10
変動係数(%)	43.3	104.7	24.5	17.0	360.6	23.6
標本数	13	13	13	13	13	13

4) 平角仕上げ材の強度特性

(1) 曲げ破壊試験の結果

心持ち材に係る曲げ破壊試験の結果を表-2 に示す。せん断影響を含む見かけの曲げヤング係数 E_m は平均 10.27 kN/mm^2 であった。せん断影響を含まない真の曲げヤング係数 E_b は平均 11.33 kN/mm^2 で、 E_m に比べて 16% 高い値を示した。曲げ強さ f_m は平均 38.98 N/mm^2 であった。

心去り材は、2 本の平均値が E_m 、 E_b 、 f_m 、それぞれ 7.15 kN/mm^2 、 8.05 kN/mm^2 、 24.28 N/mm^2 で、心持ち材より低い値となった。平均年輪幅は 4.7 mm と 7.2 mm で、心持ち材より大きい。この心去り材は丸太の縦振動ヤング係数 E_{fr} が試験体中最も低い値であったことから、丸太そのものにおいて強度性能の低いものであったと考えられる。

曲げ破壊試験で得られた E_m を用いて J A S の機械等級を見ると、心持ち材は、E90 が 3 本、E110 が 7 本、E130 が 1 本に区分される。心去り材 2 本は E70 になる。これらの f_m は建築基準法施行令に基づく機械等級区分材に対応する基準強度を上回るものであった。

表-3 曲げ破壊試験の結果

項目	見かけの曲げ ヤング係数 E_m (kN/mm^2)	真の曲げ ヤング係数 E_b (kN/mm^2)	曲げ強さ f_m (N/mm^2)	含水率 MC (%)	平均年輪幅 ARW (mm/本)
平均値	10.27	11.33	38.98	16.71	3.83
最大値	12.11	15.31	48.48	18.08	4.65
最小値	7.88	9.08	31.14	14.80	3.02
標準偏差	1.34	2.22	5.91	0.97	0.52
変動係数(%)	13.0	19.6	15.2	5.8	13.6
標本数	11	11	11	11	11

(2) 縦振動ヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの相関

縦振動ヤング係数 E_{fr} 、見かけの曲げヤング係数 E_m 、曲げ強さ f_m の相関を図-11 に示す。データは心持ち材 11 本のものである。相関係数は、 $E_{fr}-E_m$ が 0.94 で強い相関を示したが、 E_m-f_m は 0.64、 $E_{fr}-f_m$ は 0.52 で中程度の相関であった。このことから、 E_{fr} から E_m を推定する場合、その推定の精度は高いが、 E_{fr} や E_m から f_m を推定する場合にはバラツキが大きく精度が落ちると考えられた。バラツキが大きいのは、破壊時の最大荷重から計算される f_m では、実際の破壊が荷重点間の節付近から起きるものが多く、 f_m は荷重点間の節の大きさ、形状、位置に影響されたものと考えられた。

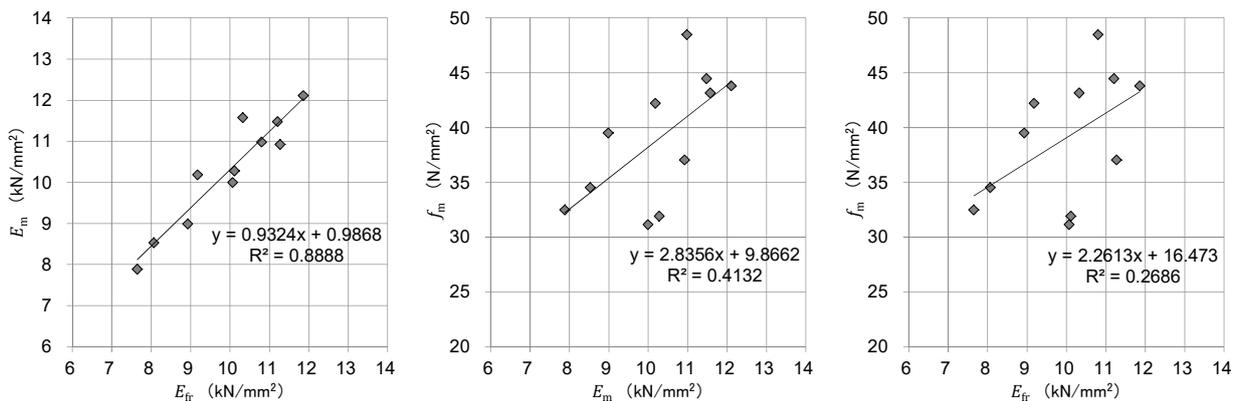


図-11 平角仕上げ材における縦振動ヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの相関

(3) 見かけの密度、平均年輪幅と強度の相関

見かけの密度、平均年輪幅と強度との相関性を単回帰分析の相関係数によって確認すると、表-4 のようになる。データは心持ち材 11 本のものである。見か

けの密度と縦振動ヤング係数 E_{fr} は強い正の相関、見かけの密度と見かけの曲げヤング係数 E_m は中程度の正の相関が認められた。見かけの密度と曲げ強さ f_m の相関性は認められなかった。平均年輪幅と E_{fr} 、平均年輪幅と E_m は中程度の負の相関が認められた。平均年輪幅と f_m の相関性は認められなかった。表には示していないが、平均年輪幅と見かけの密度の相関係数は -0.68 で、中程度の負の相関が認められた。これらのデータでは、いわゆる目の詰んだ材で重い材はヤング係数が高めに出る傾向はあるが、曲げ強さに年輪幅や重さは関係しないということを示唆しているように見える。しかし、標本数が少ないことやデータにバラツキがあることから、今後データを積み重ねて検証していく必要があると思われる。

表-4 見かけの密度、平均年輪幅と強度の相関

項目	縦振動ヤング係数	見かけの曲げヤング係数	曲げ強さ
見かけの密度	0.80 **	0.74 **	0.24
平均年輪幅	-0.64 *	-0.65 *	-0.05

※ 相関係数の検定 **:1%水準で有意、*:5%水準で有意

(4) 材軸方向の部位による強度の差異

平角仕上げ材で計測した応力波ヤング係数 E_{ws} の出現範囲を図-12に、荷重区間を移動する曲げ試験で計測した曲げヤング係数 E_m の出現範囲を図-13に示す。データは心持ち材 11 本のものである。

E_{ws} は元口側より末口側が平均値で 0.89kN/mm^2 大きくなったが、検定では有意な差は認められなかった (1 標本 t 検定、 $p > 0.05$)。 E_m も検定では有意な差は認められなかった (1 標本 t 検定、 $p > 0.05$)。

本研究と同様の方法でスギを計測した事例では、 E_{ws} 、 E_m とも末口側がやや高い傾向があった (上野ら、2016) が、今回のアカマツについては、そのような傾向はデータとして現れなかった。アカマツはスギと材質特性が異なるためと考えられるが、その理由は検証できなかった。

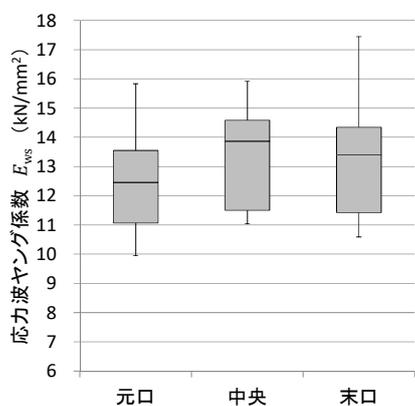


図-12 平角仕上げ材の応力波ヤング係数の出現範囲

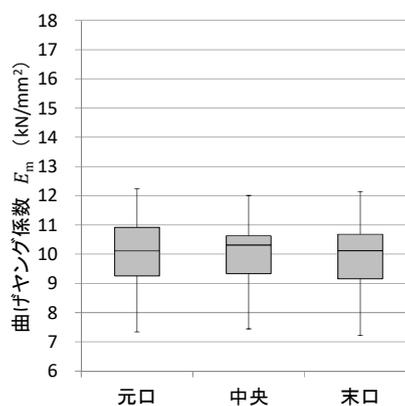


図-13 平角仕上げ材の曲げヤング係数の出現範囲

(5) 変動スパン法による曲げ試験の結果

平角仕上げ材 13 本のうち、断面寸法の長辺（梁せい）が 300mm のもの 12 本で試験を行った。「構造用木材の強度試験マニュアル」では試験において純曲げヤング係数 E とせん断ヤング係数 G の計算過程における回帰直線 $y=1/E+(1.2/G)x$ の決定係数 R^2 が 0.95 を下回る場合は再試験を行うことが望ましいとされており、今回は 12 本のうち 11 本で R^2 が 0.95 以上となった。その 11 本のうち、心持ち材 9 本について、結果を表-5 に示す。

表-5 変動スパン法による純曲げヤング係数とせん断ヤング係数

項目	純曲げヤング係数	せん断ヤング係数	比
	E (kN/mm ²)	G (kN/mm ²)	E/G (kN/mm ²)
平均値	11.68	0.37	33.37
最大値	13.30	0.60	44.33
最小値	8.77	0.27	21.52
標準偏差	1.49	0.12	8.67
変動係数(%)	12.7	31.3	26.0
標本数	9	9	9

(6) 計測方法の異なるヤング係数の比較

平角仕上げ材では同じ試験体から計測方法の異なるヤング係数を得たので、各ヤング係数間の比較を行った。比較したヤング係数は表-6 のとおりである。各ヤング係数の平均値の比と、各ヤング係数間の単回帰分析による相関係数を表-7 に示す。データは心持ち材のものである。応力波ヤング係数 E_{ws} は、元口側、中央部、末口側の 3 つの平均値を使った。純曲げヤング係数 E は、断面 120×300mm の心持ち材 9 本のデータである。

動的ヤング係数では、縦振動ヤング係数 E_{fr} に比べて E_{ws} のほうが高い値を示し、その差は平均値で 3.08kN/mm²、平均値の比 (E_{ws}/E_{fr}) では 1.31 であった。 E_{fr} は材全体の平均的な材質を反映したのに対し、 E_{ws} はセンサー間の材質、すなわち強度の高い成熟材を持つ材の外側（樹心から離れた表面側）が測定されたためと考えられる。

静的ヤング係数では、見かけの曲げヤング係数 E_m に比べて真の曲げヤング係数 E_b のほうが高くなる試験体が多く、その差は平均値で 1.06kN/mm²、平均値の比 (E_b/E_m) では 1.10 であった。 E_b は、他のヤング係数との相関係数が比較的小さく、また他に比べてデータのバラツキが多かった。 E は、 E_{fr} 、 E_m と相関性が高かった。

表－6 平角仕上げ材から計測したヤング係数

種別	測定方法	本報告における呼称と記号	
動的ヤング係数	縦振動法	縦振動ヤング係数	E_{fr}
	応力波伝播法	応力波ヤング係数	E_{ws}
静的ヤング係数	曲げ破壊試験	見かけの曲げヤング係数	E_m
		真の曲げヤング係数	E_b
	変動スパン法	純曲げヤング係数	E

表－7 各種ヤング係数の比較

$\begin{matrix} b \\ a \end{matrix}$	E_{fr}	E_{ws}	E_m	E_b	E
E_{fr}	—	$\frac{1.31}{0.801^{**}}$	$\frac{1.03}{0.943^{**}}$	$\frac{1.14}{0.685^*}$	$\frac{1.16}{0.919^{**}}$
E_{ws}	$\frac{0.76}{0.801^{**}}$	—	$\frac{0.79}{0.875^{**}}$	$\frac{0.87}{0.784^{**}}$	$\frac{0.89}{0.832}$
E_m	$\frac{0.97}{0.943^{**}}$	$\frac{1.27}{0.875^{**}}$	—	$\frac{1.10}{0.797^{**}}$	$\frac{1.13}{0.941^{**}}$
E_b	$\frac{0.88}{0.685^*}$	$\frac{1.15}{0.784^{**}}$	$\frac{0.91}{0.797^{**}}$	—	$\frac{1.02}{0.716^*}$
E	$\frac{0.86}{0.919^{**}}$	$\frac{1.13}{0.832^{**}}$	$\frac{0.89}{0.941^{**}}$	$\frac{0.98}{0.716^*}$	—

上段:ヤング係数間の比 b/a 下段:相関係数

相関係数の検定 **:1%水準で有意、*:5%水準で有意

IV おわりに

本研究では、立木 10 本から丸太 12 本を造材し、その丸太から断面寸法 120×300mm、材長 6m 以上の平角材 13 本を製造し、製造過程と強度特性を調査した。調査結果をまとめると、以下のようなになる。

- ・ 製造過程の調査から、この平角材サイズの製造には立木で胸高直径 50cm 以上、丸太で末口径 40cm 以上がおおよその目安になるものと考えられた。また、立木では幹の曲がりや太い枝が付いていることも多く、材長 6m 以上の通直の材を得るには立木を良く見て選ぶ必要があると考えられた。
- ・ 各製造段階間の強度の相関を検討した結果、丸太と平角材の縦振動ヤング係数に強い相関性が認められたことから、丸太段階で測定することにより、平角材の縦振動ヤング係数をある程度推定することができるものと考えられた。また、丸太と平角材の相関性ほどではないが、立木の応力波伝播速度と丸太の縦振動ヤング係数に相関性が認められたことから、応力波伝播速度から立木の強度を相対的に評価することにより、その立木から得られる丸太の強度（縦振動ヤング係数）をおおまかに掴むことができるものと

考えられた。

- ・ 平角材の曲げ試験結果では、見かけの曲げヤング係数で J A S 機械等級区分を見ると、E70 から E130 まで出現し、それらの曲げ強さは、対応する基準強度を満たすものであった。このことから、大断面・長尺材であっても十分な強度が得られることが分かった。
- ・ 材軸方向の部位（元口側と末口側）における強度の差異を応力波ヤング係数と曲げヤング係数で検討したが、有意な差は認められなかった。スギでは末口側がやや高くなることが報告されている（上野ら、2016）が、アカマツでは異なると考えられた。
- ・ 平角材では、各種強度試験を行ったことにより、縦振動ヤング係数、応力波ヤング係数、見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、純曲げヤング係数、せん断ヤング係数の 6 種のヤング係数をデータを得ることができた。

強度特性の調査では、得られたデータに 1 番玉と 2 番玉、心持ち材と心去り材が混在した。本研究では、1 番玉と 2 番玉の違い、心持ち材と心去り材の違いについては検証できなかった。これらの違いについて、考察では影響のないよう検討したところであるが、今後データを集積して検証することにより強度特性をさらに明らかにできるものと思われる。

引用・参考文献

- 池田潔彦・有馬孝禮（2000）応力波伝播速度による立木材質の評価と適用（第 2 報）－応力波伝播速度によるスギ林分の評価と平角製材製造への適用－．木材学会誌 46(3)：189-196.
- 名波直道・中村昇・有馬孝禮・大熊幹章（1993）応力波による立木の材質測定（第 3 報）－林分としての立木材質評価－．木材学会誌 39(8)：903-909.
- 製材の日本農林規格（2007）農林水産省告示第 1083 号.
- 上野文明・守田託満（2016）スギの大径・長尺材から得られた平角材の強度特性．青森県産業技術センター林業研究所報告 65：11-28.
- 財団法人日本住宅木材・技術センター（2011）構造用木材の強度試験マニュアル.

付表－1 立木と丸太の測定結果

試験体 番号	立木				試験体 番号	採材 位置	丸太					
	胸高 直径	応力波 伝播時間	応力波 伝播速度	応力波 ヤング係数			元口径	中央径	末口径	長さ	見かけの 密度	縦振動 ヤング係数
	DBH (cm)	t (s)	v (m/s)	E_{ws} (kN/mm ²)			d_b (cm)	d_m (cm)	d_t (cm)	l (m)	ρ (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)
1	52.5	246	4065	13.73	1-1	1番玉	56.9	56.9	41.0	6	831.0	12.95
2	50.0	245	4079	13.09	2-1	1番玉	55.8	55.8	39.8	6	787.0	10.84
3	60.0	280	3576	9.72	3-1	1番玉	64.4	64.4	46.6	8	760.0	8.82
					3-2	2番玉	46.5	46.5	41.3	6	866.0	8.58
4	51.8	246	4073	13.41	4-1	1番玉	57.5	57.5	42.0	7	808.0	10.06
5	70.0	264	3793	11.01	5-1	1番玉	73.5	73.5	56.3	8	765.0	7.62
6	49.7	239	4190	13.61	6-1	1番玉	56.1	56.1	40.5	7	775.0	10.77
7	56.5	275	3636	9.68	7-1	1番玉	58.8	58.8	39.0	8	732.0	7.77
8	53.7	263	3805	11.38	8-1	1番玉	55.7	55.7	42.0	7	786.0	10.87
					8-2	2番玉	41.1	41.1	37.0	6	834.0	10.54
9	50.8	260	3854	12.02	9-1	1番玉	49.0	49.0	39.3	8	809.0	9.50
10	56.7	262	3822	12.50	10-1	1番玉	54.5	54.5	45.0	7	856.0	10.43
個数	10	10	10	10			12	12	12		12	12
平均値	55.2	258	3889	12.01			55.8	55.8	42.5		800.8	9.90
最大値	70.0	280	4190	13.73			73.5	73.5	56.3		866.0	12.95
最小値	49.7	239	3576	9.68			41.1	41.1	37.0		732.0	7.62
標準偏差	6.2	14	204	1.53			8.3	8.3	5.1		40.7	1.52
変動係数(%)	11.2	5.3	5.3	12.7			14.8	14.8	11.9		5.1	15.4

付表－2 平角生材と平角乾燥材の測定結果

試験体 番号	番玉	心持ち 心去り 種別	平角生材					平角乾燥材				
			短辺	長辺	長さ	見かけの 密度	縦振動 ヤング係数	短辺	長辺	長さ	見かけの 密度	縦振動 ヤング係数
			b (mm)	d (mm)	l (mm)	ρ (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	b (mm)	d (mm)	l (mm)	ρ (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)
1-1-1	1番玉	心持ち	181	387	6221	752.2	12.53	177	379	6230	583.4	13.50
2-1-1	1番玉	心持ち	180	325	6141	705.5	11.59	173	321	6135	562.1	13.00
3-1-1	1番玉	心持ち	181	441	7156	688.9	9.54	173	432	7152	492.5	10.97
3-2-1	2番玉	心持ち	181	397	6230	710.9	8.05	181	394	6225	473.0	8.28
4-1-1	1番玉	心持ち	180	362	7218	720.2	10.30	173	359	7215	502.2	11.66
5-1-1	1番玉	心去り	183	540	6135	706.3	7.75	177	495	6095	486.0	8.95
5-1-2	1番玉	心去り	179	470	6140	702.9	7.39	176	463	6153	492.1	8.31
6-1-1	1番玉	心持ち	180	339	7327	691.6	10.83	175	335	7323	541.8	12.20
7-1-1	1番玉	心持ち	180	334	7145	578.3	8.11	176	329	7140	437.6	8.91
8-1-1	1番玉	心持ち	179	375	7270	760.8	12.08	173	365	7267	552.1	13.80
8-2-1	2番玉	心持ち	180	349	6307	729.0	10.44	173	341	6303	499.5	11.83
9-1-1	1番玉	心持ち	181	366	7156	719.3	9.36	172	357	7147	487.0	11.10
10-1-1	1番玉	心持ち	180	332	7377	735.9	9.93	176	328	7371	544.4	11.08
個数			13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
平均値			180	386	6756	707.8	9.84	175	377	6750	511.8	11.05
最大値			183	540	7377	760.8	12.53	181	495	7371	583.4	13.80
最小値			179	325	6135	578.3	7.39	172	321	6095	437.6	8.28
標準偏差			1	63	545	44.5	1.68	3	55	546	41.4	1.91
変動係数(%)			0.6	16.4	8.1	6.3	17.1	1.4	14.6	8.1	8.1	17.3

付表－3 平角仕上げ材の測定結果と曲げ破壊試験結果

試験体 番号	平角仕上げ材					曲げ破壊試験					
	短辺	長辺	長さ	見かけの 密度	縦振動 ヤング係数	見かけの曲げ ヤング係数	真の曲げ ヤング係数	最大荷重	曲げ強さ	含水率	平均年輪幅
	<i>b</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	ρ (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	E_b (kN/mm ²)	F_{ult} (kN)	f_m (N/mm ²)	MC (%)	ARW (mm/本)
1-1-1	120	299	6000	607.1	11.20	11.48	11.09	85.65	44.47	18.1	3.6
2-1-1	120	270	5999	562.7	11.27	10.92	10.93	59.00	37.04	17.9	3.1
3-1-1	120	300	6999	495.2	8.93	8.99	9.08	78.00	39.50	17.1	4.4
3-2-1	119	300	6000	484.8	7.65	7.88	9.24	62.48	32.48	17.2	4.6
4-1-1	120	300	6999	514.6	10.11	10.28	9.61	63.20	31.92	17.2	3.9
5-1-1	120	300	5996	498.2	7.11	7.38	8.89	50.70	25.89	16.6	4.7
5-1-2	119	301	6000	496.9	6.83	6.93	7.21	43.60	22.67	17.2	7.2
6-1-1	121	300	6999	548.2	10.32	11.58	14.78	86.60	43.15	16.5	3.0
7-1-1	120	300	6000	447.1	8.07	8.53	9.75	68.35	34.53	16.5	3.9
8-1-1	120	300	7000	564.8	11.86	12.11	15.31	88.65	43.82	16.4	3.7
8-2-1	121	300	6000	498.3	10.80	10.98	13.58	96.55	48.48	14.8	4.2
9-1-1	121	300	6999	483.4	9.18	10.18	10.24	85.00	42.21	15.4	4.3
10-1-1	121	299	6000	561.1	10.07	9.99	11.00	61.05	31.14	16.7	3.4
個数	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
平均値	120	298	6384	520.2	9.49	9.79	10.82	71.45	36.71	16.7	4.2
最大値	121	301	7000	607.1	11.86	12.11	15.31	96.55	48.48	18.1	7.2
最小値	119	270	5996	447.1	6.83	6.93	7.21	43.60	22.67	14.8	3.0
標準偏差	1	8	506	44.6	1.67	1.69	2.39	16.36	7.75	0.9	1.1
変動係数(%)	0.5	2.8	7.9	8.6	17.6	17.3	22.1	22.9	21.1	5.4	25.6

付表－4 J A Sに基づく最大節径比と目視等級

試験体 番号	節径比			集中節径比			等級判定 (甲種Ⅱ)
	狭い材面	広い材面		狭い材面	広い材面		
		材縁部	中央部		材縁部	中央部	
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1-1-1	27	21	10	45	0	27	2級
2-1-1	12	3	9	36	0	43	2級
3-1-1	23	6	11	70	0	41	3級
3-2-1	37	0	9	0	0	49	2級
4-1-1	30	0	13	0	0	61	3級
5-1-1	75	8	13	0	0	40	等級外
5-1-2	33	10	4	0	0	63	3級
6-1-1	33	0	10	56	0	43	2級
7-1-1	38	14	9	48	0	32	2級
8-1-1	37	0	9	46	0	52	2級
8-2-1	35	13	12	0	0	35	2級
9-1-1	23	18	12	0	0	50	2級
10-1-1	31	0	8	0	16	42	2級
個数	13	13	13	13	13	13	
平均値	33	7	10	23	1	44	
最大値	75	21	13	70	16	63	
最小値	12	0	4	0	0	27	
標準偏差	14	7	2	27	4	10	
変動係数(%)	43.3	104.7	24.5	117.0	360.6	23.6	

付表-5 応力波ヤング係数と曲げヤング係数

試験体 番号	応力波ヤング係数				曲げヤング係数			
	元口	中央	末口	平均	元口	中央	末口	平均
	E_{ws} (kN/mm ²)	E_{ws} (kN/mm ²)	E_{ws} (kN/mm ²)	E_{ws} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)
1-1-1	13.94	15.18	16.69	15.27	10.86	10.58	11.05	10.83
2-1-1	13.42	12.58	14.15	13.39	10.98	10.59	10.25	10.60
3-1-1	11.18	11.28	10.81	11.09	8.74	8.82	8.37	8.64
3-2-1	10.95	11.04	10.59	10.86	7.34	7.44	7.22	7.33
4-1-1	10.19	11.49	11.26	10.98	10.11	10.04	9.94	10.03
5-1-1	8.95	10.34	10.28	9.86	7.42	7.16	7.23	7.27
5-1-2	9.38	9.00	10.14	9.51	6.40	6.46	6.43	6.43
6-1-1	15.83	15.46	12.86	14.72	12.24	11.38	10.79	11.47
7-1-1	9.95	11.52	11.60	11.02	8.49	8.36	8.14	8.33
8-1-1	12.46	15.91	17.44	15.27	11.69	12.01	12.15	11.95
8-2-1	13.68	13.87	13.40	13.65	10.71	10.67	10.57	10.65
9-1-1	12.44	13.88	13.48	13.27	9.77	10.31	10.12	10.07
10-1-1	13.07	13.99	14.54	13.87	9.89	9.84	9.97	9.90
個数	13	13	13	13	13	13	13	13
平均値	11.96	12.73	12.87	12.52	9.59	9.51	9.40	9.50
最大値	15.83	15.91	17.44	15.27	12.24	12.01	12.15	11.95
最小値	8.95	9.00	10.14	9.51	6.40	6.46	6.43	6.43
標準偏差	2.05	2.15	2.39	2.04	1.79	1.72	1.74	1.74
変動係数(%)	17.1	16.9	18.5	16.3	18.7	18.0	18.5	18.3

付表-6 変動スパン法による曲げ試験結果

試験体 番号	スパン L (mm)	見かけの曲げ ヤング係数 E_m (kN/mm ²)	回帰式			純曲げ ヤング係数 E (kN/mm ²)	せん断 ヤング係数 G (kN/mm ²)	比 E/G
			切片 a	傾き b	決定係数 R^2			
1-1-1	5800	11.68						
	4200	10.58	0.0752	4.0076	0.997	13.30	0.30	44.33
	3000	8.57						
	2400	7.35						
—	—	—						
3-1-1	6600	9.05						
	4200	8.42	0.0997	4.1230	0.991	10.04	0.29	34.62
	3000	7.22						
2400	6.04							
3-2-1	5800	8.01						
	4200	7.55	0.1178	3.5228	0.977	8.77	0.34	25.79
	3000	6.92						
	2400	5.85						
—	—	—						
4-1-1	6600	10.42						
	4200	9.38	0.0861	4.1730	0.996	11.61	0.29	40.03
	3000	7.97						
	2400	6.58						
—	—	—						
5-1-1	5800	7.77						
	4200	7.38	0.1158	4.0500	0.983	8.64	0.30	28.80
	3000	6.59						
	2400	5.54						
—	—	—						
5-1-2	5800	6.74						
	4200	6.45	0.1373	3.4371	0.960	7.28	0.35	20.80
	3000	6.05						
	2400	5.18						
—	—	—						
6-1-1	6600	11.82						
	4200	10.85	0.0811	2.2601	0.970	12.33	0.53	23.26
	3000	9.35						
	2400	8.75						
—	—	—						
7-1-1	5800	8.82						
	4200	8.95	0.0949	3.6986	0.753	10.53	0.32	32.91
	3000	8.67						
	2400	6.18						
—	—	—						
8-1-1	6600	12.26						
	4200	11.27	0.0775	1.9963	0.987	12.91	0.60	21.52
	3000	10.47						
	2400	9.13						
—	—	—						
8-2-1	5800	11.40						
	4200	11.05	0.0765	3.5740	0.972	13.07	0.34	38.44
	3000	8.64						
	2400	7.66						
—	—	—						
9-1-1	6600	10.16						
	4200	9.51	0.0861	4.4127	0.987	11.62	0.27	43.04
	3000	7.77						
	2400	6.39						
—	—	—						
10-1-1	5800	10.32						
	4200	9.86	0.0874	3.0873	0.995	11.44	0.39	29.33
	3000	8.46						
	2400	7.38						
—	—	—						
個数			12	12	12	12	12	12
平均値			0.0946	3.5285	0.9639	10.96	0.36	31.91
最大値			0.1373	4.4127	0.9965	13.30	0.60	44.33
最小値			0.0752	1.9963	0.7529	7.28	0.27	20.80
標準偏差			0.0196	0.7533	0.0675	1.94	0.10	8.29
変動係数(%)			20.7	21.3	7.0	17.7	28.4	26.0