

論文 (Original article)

大径丸太から採材された心去りヒノキ製材品 および無欠点小試験体の強度性能[†]

井道 裕史^{1)*}、長尾 博文¹⁾、加藤 英雄¹⁾

Strength properties of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) pithless lumber and small clear specimens sawn from a large diameter log[†]

Hirofumi IDO^{1)*}, Hirofumi NAGAO¹⁾ and Hideo KATO¹⁾

Abstract

The purpose of this study was to determine the strength properties of Japanese cypress logs (*Chamaecyparis obtusa*) and pithless lumber sawn from the same. The result of measuring Young's modulus for 433 large diameter logs by using a longitudinal vibration method revealed that these logs did not show high Young's modulus values compared with those of common medium and small diameter logs. Strength tests were conducted on 30 regular square (120 × 120 mm) and 30 square (120 × 180 mm) pithless lumber specimens sawn from large diameter logs, for which a machine grade of E90 or higher under the "Japanese agricultural standards for lumber" is targeted. Following a bending test, the bending strength of lumber used in this study showed relatively smaller values compared with common Japanese cypress lumber having a Young's modulus equivalent to those covered by this study. In terms of compressive strength parallel to the grain, the strength values of both regular square and square lumber were equivalent to those of common Japanese cypress lumber. In terms of shear strength and compressive strength—parallel and perpendicular to the grain, respectively—the strength values of lumber in this study were smaller than those recorded in literature for boxed lumber. However, it was considered to be one of the reasons that density that has large influence on both strengths was lower in this study than in other literature. The strength tests conducted on small clear specimens revealed higher density and strength properties for specimens taken from the pith side of lumber than those of specimens taken from the bark side. However, in terms of comparing specific levels of strength, virtually no differences were found between specimens taken from the bark side and those taken from the pith side.

Key words : Japanese cypress, large diameter log, pithless, strength property

要旨

本研究は、大径ヒノキ丸太およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにすることを目的とした。ヒノキ大径丸太 433 本について縦振動法によるヤング係数を測定した結果、ヤング係数は一般的な中小径木に比べて高くはないことがわかった。これらの丸太のうち、「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材の等級が E90 以上のものを得ることを目標に採材した、心去り正角 30 体、心去り平角 30 体について、各強度試験を行った。曲げ試験の結果、ヤング係数が本試験体とほぼ同等である一般的なヒノキ製材品と比べて、本試験体の曲げ強度は若干低いことがわかった。縦圧縮強度は、正角、平角とも一般的なヒノキ製材品とほぼ同等であった。せん断およびめり込み強度は、心持ち材を用いた文献値よりも低かった。ただし、両強度に大きな影響を及ぼす密度が文献値より小さかったことも上記の要因と考えられた。無欠点小試験体の各強度試験の結果、樹皮側から採取した試験体よりも髓側から採取した試験体の方が、密度と各強度が大きかった。ただし、比強度で比較すると、樹皮側の試験体と髓側の試験体との間には各強度ともほぼ差異は認められなかった。

キーワード : ヒノキ、大径丸太、心去り、強度性能

1. はじめに

我が国では、スギと同様、戦後を中心に拡大造林された高齢級のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl.) 人工林が次第に増加している (林野庁, 2011)。これらの高齢級の大径材から伐採される木材は、今後構造部材としての利用が期待される。一方、ヒノキ製材品の強度データは森林総研を始めとした研

究機関によって蓄積されてきたが、そのほとんどが中小径丸太から採材された心持ち柱材を中心とした強度試験結果である。そのため、大径丸太およびそれから採材される大断面材を含む心去り材のヤング係数や強度は明らかにされていない。

そこで、本研究は、大径ヒノキ丸太およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにするこ

[†] 本研究結果の一部は、第 60 回日本木材学会大会 (2010 年 3 月、宮崎) において発表した。

原稿受付：平成 23 年 10 月 21 日 Received 21 October 2011 原稿受理：平成 24 年 4 月 20 日 Accepted 20 April 2012

1) 森林総合研究所構造利用研究領域 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp

とを目的とした。また、心去り製材品の髓側および樹皮側から無欠点小試験体を採取し、各強度性能および採取位置の違いによる各強度性能の違いについて検討した。

2. 実験

2.1 供試材

高知県および奈良県内の製材所に集積された大径のヒノキ丸太 433 本を対象として、縦振動法によるヤング係数を測定した。なお、高知県内の製材所に集積されたヒノキ丸太は全国広域から集められたものである。奈良県内の製材所に集積されたヒノキ丸太のほとんどは、東吉野村大又の 115 年生あるいは黒滝村楨尾の 120 年生の 3 番玉で、一部 4 番玉を含んでいた。測定したヒノキ丸太の一部を Photo 1 に示す。

これらヒノキ丸太の一部から、縦振動法によるヤング係数の値を元にして、「製材の日本農林規格」(農林水産省, 2007) の機械等級区分構造用製材の等級が E90 (以下 E90 と称する) 以上のものに対応した、心去り正角および心去り平角を採材することを試みた。縦振動法によりヤング係数を測定した丸太のうち、正角用 30 体、平角用 30 体、合計 60 体を選択した。その後、断面寸法が 130mm×130mm (正角) および 130mm×190mm (平角) に製材し、供試材とした。すべての供試材の材長は 4000mm である。製材後の平角試験体を Photo 2 に示す。すべての供試材は吉野銘木製造販売 (株) で製材され、再度縦振動法によるヤング係数を測定した後、森林総合研究所に搬入した。3~4ヶ月間実験棟内に棧積み状態で天然乾燥後、断面寸法を 120mm×120mm (正角) および 120mm×180mm (平角) に挽き直した。各試験体の採取方法を Fig. 1 に示す。正角からは、曲げ試験体、縦圧縮試験体、めり込み試験体、いす型せん断試験体を採取した。平角からは、曲げ試験体を採取した。また、平角の曲げ試験後の非破壊部分から縦圧縮試験体を採取した。

2.2 製材品の強度試験

2.2.1 曲げ試験

正角の曲げ試験体の寸法は、幅 120mm×高さ 120mm×長さ 2400mm とした。平角の曲げ試験体の寸法は、幅 120mm×高さ 180mm×長さ 3600mm とした。曲げ試験に先立ち、「製材の日本農林規格」の甲種構造用 II に従って節等の欠点を測定し、目視等級区分を行った。正角についてのみ、縦振動法によるヤング係数の平均値と変動係数が等しくなるような 10 体ずつの 3 グループに仕分け、グループごとに荷重面をそれぞれ木表、木裏、柾目面とした。曲げ試験は ISO 13910 (ISO, 2005) に従い、支点間距離を材せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式とした。平角の加力には最大容量が 20tf の材料試験機 (東京衡機製造



Photo 1. 大径のヒノキ丸太
Large diameter Japanese cypress logs



Photo 2. 平角試験体
Test specimens of square lumber

所) を用い、正角の加力には最大容量が 10tf の材料試験機 (ミネベア、TCM-10000) を用いた。試験体の支点間中央部に変位計 (東京測器研究所、CDP-100) を設置し支点間のたわみを測定するとともに、試験体の圧縮面上に変位計 (東京測器研究所、CDP-10) を取り付けた袴型治具 (スパン 400mm) で、荷重点間におけるたわみを測定した。平角の曲げ試験の様子を Photo 3 に示す。試験終了後、支点間のたわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、曲げ比例限度応力、曲げ強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。なお、曲げ試験体の含水率測定の結果、含水率の平均値が 20% 以上であったため、縦圧縮試験体、めり込み試験体、せん断試験体については恒温恒湿室において再度調湿した後に試験を行った。

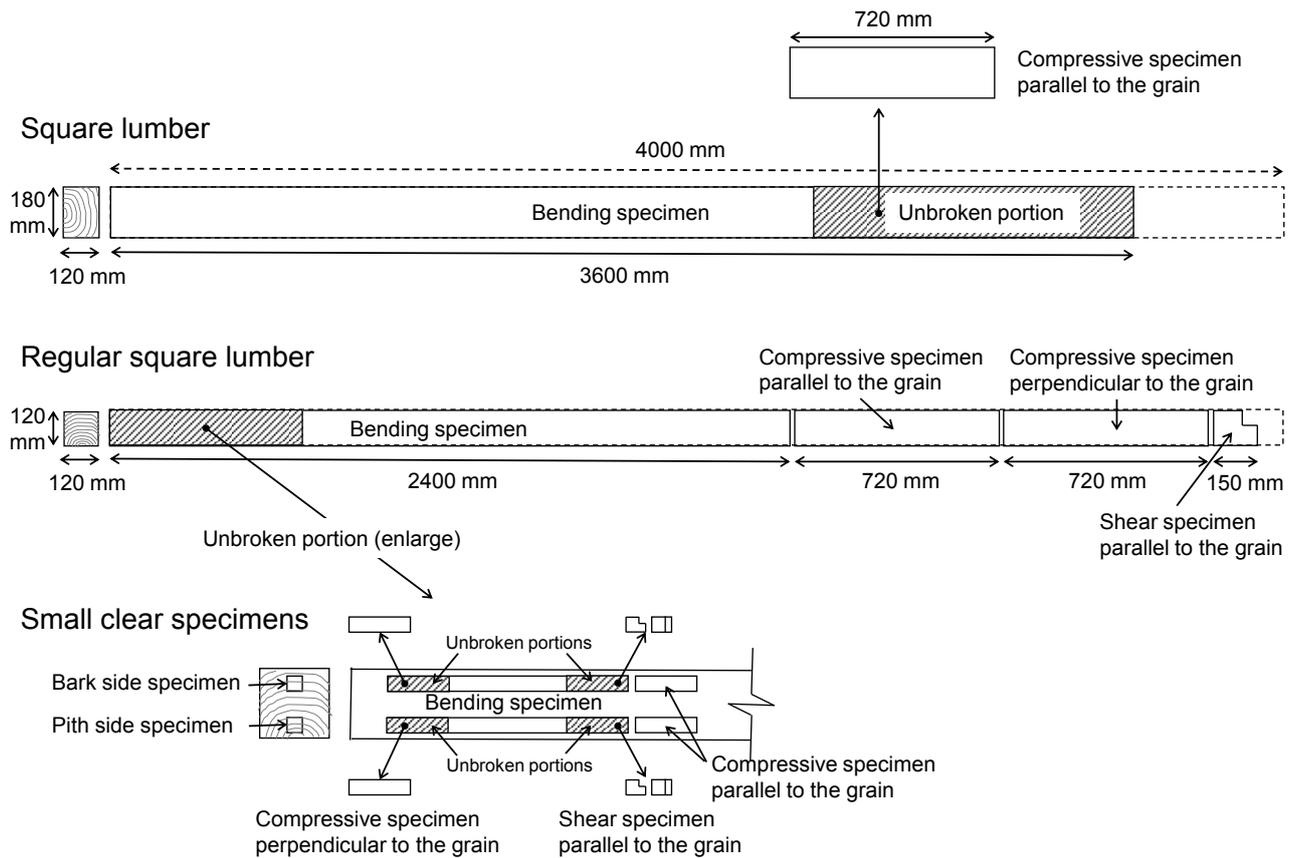


Fig. 1. 各試験体の採取方法
Method of collecting each test specimen



Photo 3. 平角の曲げ試験
Bending test of square lumber

2.2.2 縦圧縮試験

正角の縦圧縮試験体の断面寸法は 120mm×120mm、長さは 720mm とした。平角の縦圧縮試験体の断面寸法は 120mm×180mm、長さは 720mm とした。縦圧縮試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数を測定した。縦圧縮試験は「構造用木材の強度試験法」(日本建

築学会, 2003) に従い、材長を短辺の 6 倍とした短柱圧縮 (細長比 ≈ 20) で行った。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、A-300-B4) で、荷重レンジを 1500kN に設定して加力し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。正角については、試験体の長さ方向における中央部の相対する 2 材面に、標点間距離を 150mm とした変位計 (東京測器研究所、CDP-10) を設置し、両変位の平均値を試験体の変形とした。正角の縦圧縮試験の様子を Photo 4 に示す。試験終了後、正角は縦圧縮ヤング係数、縦圧縮比例限度応力、縦圧縮強度、平角は縦圧縮強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.2.3 せん断試験

せん断試験は実大いす型せん断試験 (井道ら, 2004a) を採用した。切り欠き部分のない側の試験体長さは 150mm、切り欠き部分の長さは 30mm、せん断面積は 120mm×120mm とした。各試験体のせん断断面は、曲げ試験体の曲げ試験時の中立軸に一致させた。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、



Photo 4. 正角の縦圧縮試験
Compressive test parallel to the grain of regular square lumber

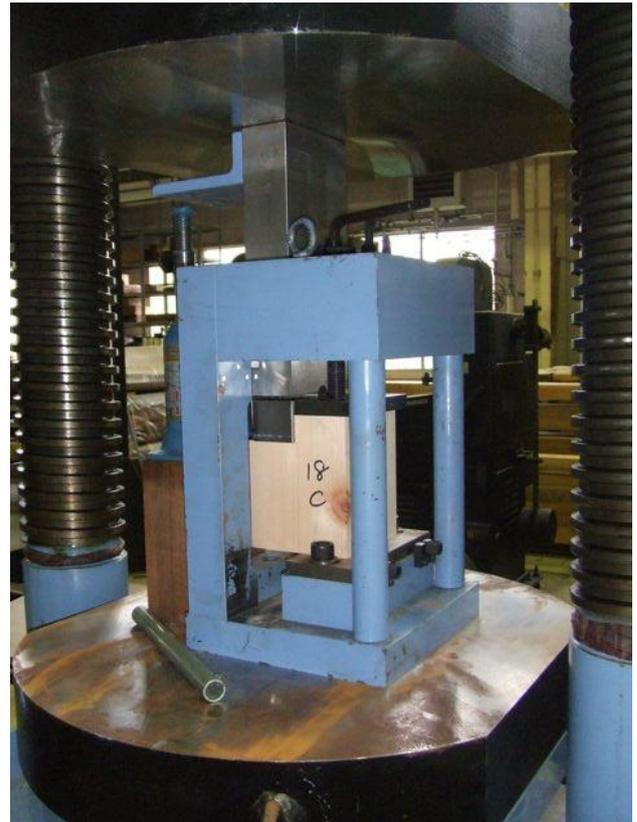


Photo 5. 正角の実大いす型せん断試験
Full-scale block shear test of regular square lumber

A-300-B4) で、荷重レンジを 150kN に設定して加力し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。せん断試験の様子を Photo 5 に示す。試験終了後、せん断強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.2.4 むり込み試験

むり込み試験体の断面寸法は 120mm×120mm、長さは 720mm とした。むり込み試験は ISO 13910 (ISO, 2005) に従い、長さが 90mm の鋼製荷重ブロックを試験体中央部の上下に設置する、上下加力方式とした。上部の加力面は、曲げ試験体の曲げ試験時の荷重面に一致させた。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、A-300-B4) で、荷重レンジを 300kN に設定して加力し、むり込み変位量が 20mm に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。試験体の長さ方向の中央部両脇にそれぞれ変位計 (東京測器研究所、CDP-50) を設置し、クロスヘッドの移動量を測定した。両変位計の平均値をむり込み変位量とした。むり込み試験の様子を Photo 6 に示す。試験終了後、むり込み強度、むり込み降伏強

度、むり込み剛性を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.3 無欠点小試験体の各強度試験

正角の曲げ試験後の試験体のうち、非破壊部分が存在する試験体から可能な限り曲げおよび縦圧縮の無欠点小試験体を Fig. 1 に従って採取した。試験体は、正角の曲げ試験体 1 体から樹皮側と髓側のそれぞれ 2 体ずつ採取した。各試験体は 2 方桁とした。無欠点小試験体の曲げ試験後、さらにその非破壊部分からせん断面が桁目面および板目面となる 2 種類のせん断無欠点小試験体を採取した。すなわち、樹皮側の試験体と髓側の試験体を含めると、1 体の正角試験体から最大 4 体のせん断無欠点小試験体を採取した。また、曲げ無欠点小試験体の非破壊部分からむり込み試験体も採取した。その際、樹皮側の試験体と髓側の試験体とを、試験体番号順に交互に 2 グループに振り分け、一方を半径方向に加力する試験体とし、他方を接線方向に加力する試験体とした。

各強度試験は、JIS Z 2101 (日本規格協会, 2009) に従った。曲げ試験体の寸法は 25mm (R 方向) × 25mm



Photo 6. 正角のめり込み試験

Compressive test perpendicular to the grain of regular square lumber

(T方向)×400mm(L方向)とした。支点間距離は辺長の14倍とした。加力にはオルセン式材料試験機(森試験機製作所、最大容量:1tf)を用いた。試験体中央下部に変位計(東京測器研究所、CDP-50)を設置して、荷重とスパン中心部のたわみを測定した。縦圧縮試験体の寸法は25mm(R方向)×25mm(T方向)×75mm(L方向)とした。両板目面の中央部分にゲージ長が20mmのひずみゲージ(東京測器研究所、PFL-20-11)を貼付し、荷重とひずみを測定した。せん断試験は、せん断面を板目面および柁目面の2面とし、せん断面の寸法は25mm(RまたはT方向)×25mm(L方向)とした。めり込み試験の加力方向は、半径方向および接線方向の2方向とし、試験体の寸法は25mm(R方向)×25mm(T方向)×75mm(L方向)とした。加圧板の両端に変位計(東京測器研究所、CDP-50)を設置し、荷重と加圧板両端の変位を測定した。縦圧縮試験、せん断試験、めり込み試験の加力には、オルセン式万能試験機(森試験機製作所、最大容量:5tf)を用いた。なお、平均年輪幅は曲げ試験体と縦圧縮試験体で測定し、せん断試験体、めり込み試験体の平均年輪幅は、曲げ試験体と同一の値であると見なした。試験後、全乾法により各試験体の含水率を測定した。

3. 結果と考察

3.1 ヒノキ丸太の縦振動法によるヤング係数および製材品の目視等級区分

丸太433本の非破壊試験結果をTable 1に示す。末口径、材長の平均値(最小値~最大値)はそれぞれ49cm(35cm~82cm)、4.9m(2.1m~11.6m)であった。縦振動法によるヤング係数の平均値は9.14kN/mm²であり、5.29kN/mm²から13.0kN/mm²の範囲にあった。一般のヒノキ製材品の縦振動法によるヤング係数の平均値は11.81kN/mm²(強度性能研究会,2005)であり、丸太が生材であることを考慮に入れても、ヒノキ大径丸太のヤング係数はそれほど高いものでないことがわかった。

製材した正角および平角に対して、「製材の日本農林規格」の甲種構造用IIの目視等級区分を行った。その結果、全長における等級の割合は、正角では、1級が1本(3.3%)、2級が6本(20.0%)、3級が9本(30%)、格外が14本(46.7%)であった。平角では、1級が4本(13.3%)、2級が7本(23.3%)、3級が11本(36.7%)、格外が8本(26.7%)であった。正角、平角ともほぼ節径比により等級が決定づけられ、繊維傾斜によるものはそれぞれ1体ずつのみであった。

3.2 製材品の強度性能

3.2.1 曲げ強度性能

製材品の曲げ試験の結果をTable 2に示す。正角、平角ともに含水率の平均値が20%を上回っていた。試験後に測定した気乾密度の平均値は、正角が473kg/m³、平角が488kg/m³であった。平均年輪幅を、一般のヒノキ製材品による「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>(以下、データ集と称す)(強度性能研究会,2005)と比較すると、本試験体の平均値2.00mm(正角)、2.15mm(平角)はデータ集の平均値3.3mmの60~65%程度であった。大径化に伴う年輪幅の減少と考えられる。

平均含水率が20%を超えていたため、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、曲げ強度をASTM D2915-98(ASTM International,1998)に従って含水率15%時の値に補正した。結果をTable 3に示すとともに、含水率補正後の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度との関係をFig. 2に示す。見かけのヤング係数がE90の下限值である7.8kN/mm²を下回ったものは平角の1体のみであった。含水率補正後の縦振動法によるヤング係数および見かけの曲げヤング係数をデータ集の値と比較した。ただし、本試験体はE90以上の材料を想定したものであり、データ集は等級区分を行っていない1274体の平均値である。また、データ集の曲げヤング係数の平均値は、ASTM D2915-98に従って含水率15%時の値に補正し、かつ、荷重条件が、本試験と同一

Table 1. 丸太の非破壊試験結果

Results of non-destructive tests for logs					
n = 433	材長	末口直径	元口直径	見かけの密度	縦振動法によるヤング係数
	Length	Diameter of top end	Diameter of bottom end	Apparent density	E_{fr}
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)	(kN/mm ²)
Mean	4865	487	566	598	9.14
C.V.(%)	29.2	15.6	16.5	15.5	16.3

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, E_{fr} : Young's modulus by longitudinal vibration method

Table 2. 製材品の曲げ試験の結果

Results of bending tests for lumber									
		ρ_{test}	MC	ARW	E_{fr}	E_{b-app}	E_{b-true}	σ_{bp}	σ_b
		(kg/m ³)	(%)	(mm)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
正角 (全試験体)									
Regular square lumber	Mean	507	22.8	2.00	10.9	9.59	10.4	30.9	43.8
(All specimens)	C.V.(%)	7.53	7.14	11.3	9.02	8.66	12.2	14.0	13.5
n = 30									
正角 (木裏荷重)									
Regular square lumber	Mean	507	23.4	1.98	10.9	9.65	10.5	30.2	44.7
(Loading on inner surface)	C.V.(%)	7.24	5.42	10.7	8.95	9.33	12.6	15.2	13.9
n = 10									
正角 (木表荷重)									
Regular square lumber	Mean	509	22.7	1.99	10.9	9.61	10.4	32.6	44.8
(Loading on outer surface)	C.V.(%)	8.64	8.21	11.7	8.66	7.09	11.9	12.0	11.8
n = 10									
正角 (柵目面荷重)									
Regular square lumber	Mean	504	22.3	2.02	11.0	9.51	10.4	29.8	41.7
(Loading on radial surface)	C.V.(%)	7.43	7.35	12.7	10.3	10.2	13.4	14.3	15.1
n = 10									
平角 (全試験体)									
Square lumber	Mean	518	27.2	2.15	11.3	9.65	11.2	28.5	38.5
(All specimens)	C.V.(%)	8.04	12.4	12.3	9.50	10.0	14.2	19.4	19.1
n = 30									

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, ρ_{test} : 試験時の密度 Density at testing, MC: 含水率 Moisture content, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_{fr} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_{b-app} : 見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending, E_{b-true} : 真の曲げヤング係数 True Young's modulus in static bending, σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 Bending stress at the proportional limit, σ_b : 曲げ強度 Bending strength

Table 3. ASTM D2915-98 によって含水率 15% 時の値に補正した場合の曲げ強度性能

Results of strength properties of bending for lumber adjusted to 15% moisture content by ASTM D2915-98

		$E_{fr-15\%}$	$E_{b-app-15\%}$	$E_{b-true-15\%}$	$\sigma_{b-15\%}$
		(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	12.4	10.9	11.8	53.3
n = 30	C.V.(%)	9.20	8.88	12.4	13.4
平角 Square lumber	Mean	12.8	11.0	12.7	47.2
n = 30	C.V.(%)	9.51	9.93	14.3	19.1

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, $E_{fr-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method adjusted to 15% moisture content, $E_{b-app-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending adjusted to 15% moisture content, $E_{b-true-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した真の曲げヤング係数 True Young's modulus in static bending adjusted to 15% moisture content, $\sigma_{b-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した曲げ強度 Bending strength adjusted to 15% moisture content

の、スパンを材せいの18倍とした3等分点4点荷重方式による値に補正した(日本建築学会, 2003)ものである。縦振動法によるヤング係数の平均値は、データ集の11.81kN/mm²に対し、正角が12.4 kN/mm²、平角が12.8 kN/mm²であり、いずれもデータ集とほぼ同等か、若干上回った。見かけの曲げヤング係数の平均値は、データ集の11.01kN/mm²に対し、正角が10.9kN/mm²、平角が11.0 kN/mm²であり、いずれもデータ集とほぼ同等の値であった。すなわち、大径丸太から採材した製材品のヤング係数は、E90以上を想定した材料であるという偏りはあるが、一般的なヒノキ製材品と比べてほぼ同等であることがわかった。

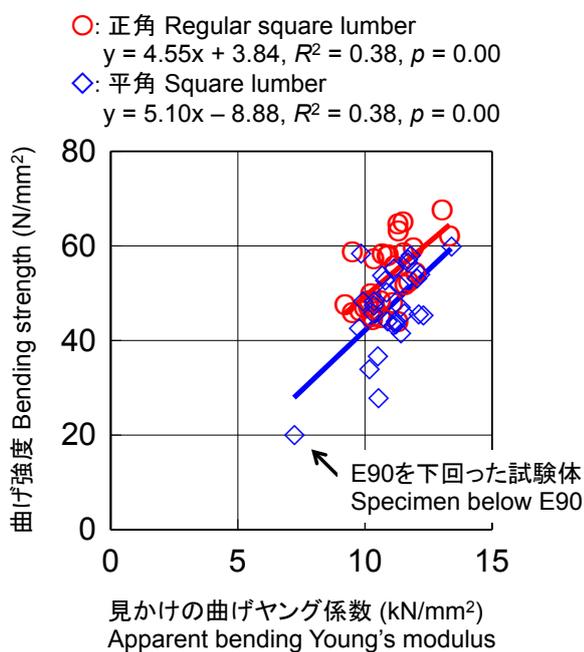


Fig. 2. 製材品の含水率補正後の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度との関係

Relation between apparent bending Young's modulus and bending strength of lumber adjusted to 15% moisture content

曲げ強度については、含水率補正後の正角および平角の平均値はそれぞれ53.3N/mm²、47.2N/mm²となり、材せいによる寸法効果が認められた。データ集の曲げ強度の平均値は「構造用木材の強度試験法」に従って材せいを150mmに補正した値である。含水率補正後の本試験体の平均値も同様の方法で補正すると、曲げ強度の平均値は正角、平角でそれぞれ51.0N/mm²、49.1 N/mm²となり、データ集の56.9 N/mm²をいずれも下回った。すなわち、本試験体とデータ集の見かけのヤング係数の平均値はほぼ同等であるとして曲げ強度を比較すると、本試験体は一般的なヒノキ製材品よりも、曲げ強度が若干低いことがわかった。ただし、見かけの曲げヤング係数がE90の基準下限値である7.8kN/mm²を下回った平角1体を除いた試験体について、E90に対応した基準強度30.6N/mm²(建設省, 2000)と比較すると、平角1体を除いたすべての試験体が曲げの基準強度を上回った。また、正角の曲げ強度について荷重方向による明確な差は認められなかった。

3.2.2 縦圧縮強度性能

製材品の縦圧縮試験の結果をTable 4に示す。含水率が20%を上回った試験体が、正角および平角で各1体ずつあったが、それ以外の試験体はすべて含水率が20%以下であった。曲げ強度と同様の方法で、縦圧縮強度を含水率15%時の強度値に補正すると、正角および平角の平均値はともに33.4N/mm²となった。曲げ強度とは異なり縦圧縮強度の寸法効果は認められなかった。データ集の縦圧縮強度の平均値は33.1 N/mm²であるので、本試験体の縦圧縮強度は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等の値を示した。すべての試験体における含水率補正後の縦圧縮強度は、見かけの曲げヤング係数がE90を下回った平角1体も含め、E90に対応した圧縮の基準強度24.6N/mm²を上回った。

含水率補正を行わない状態での、正角の縦圧縮ヤン

Table 4. 製材品の縦圧縮試験の結果
Results of compressive tests parallel to the grain for lumber

		MC (%)	ρ_{test} (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_{cp} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	18.7	498	10.9	10.4	15.5	26.5
n = 30	C.V.(%)	5.34	7.53	9.38	17.0	27.5	10.3
平角 Square lumber	Mean	16.9	487	11.5	-	-	29.9
n = 30	C.V.(%)	5.46	8.66	13.8			12.5

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ_{test} : 試験時の密度 Density at testing, E_{fr} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_c : 縦圧縮ヤング係数 Compressive Young's modulus parallel to the grain, σ_{cp} : 縦圧縮比例限度応力 Compressive stress at the proportional limit, σ_c : 縦圧縮強度 Compressive strength parallel to the grain

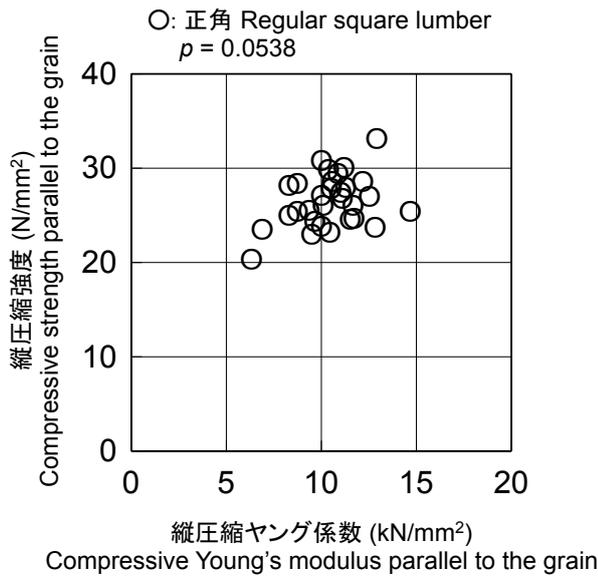


Fig. 3. 正角の縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との関係
Relation between compressive Young's modulus parallel to the grain and compressive strength parallel to the grain

グ係数と縦圧縮強度との関係を Fig. 3 に示す。一般的には縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との間には相関関係が認められることが多いが、本試験では、有意水準 95% において、縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との間には相関関係は認められず、含水率補正を行った場合も同様に相関関係は認められなかった。

試験体数は少ないが、各試験体の分布を正規分布と仮定して、含水率補正を行った曲げおよび縦圧縮強度について信頼水準 75% における 5% 下限値を算出した (ASTM International, 2010)。正角、平角それぞれについて縦圧縮強度の 5% 下限値 / 曲げ強度の 5% 下限値を算出すると、正角では $26.6/39.9=0.67$ 、平角では $26.2/30.4=0.86$ となった。スギ正角材を対象とした同強度の比 0.84 (中井, 1988) に対して、本試験体の正角では若干小さく、平角ではほぼ同等の値であった。

3.2.3 せん断強度性能

製材品のせん断試験の結果を Table 5 に示す。心去り材による本試験の結果を心持ち正角によるヒノキの実大いす型せん断試験の結果 (井道ら, 2006; 山裾ら, 2010, 2011) と比較した。文献のせん断強度の平均値はそれぞれ 8.74N/mm^2 、 6.79N/mm^2 、 6.68N/mm^2 であり、本試験体の平均値 6.14N/mm^2 は、これらを下回った。ただし、せん断強度は密度の影響を大きく受ける (森田ら, 2006)。本試験体の密度の平均値が 491kg/m^3 なのに対して、文献の密度の平均値はそれぞれ 515kg/m^3 、 513kg/m^3 、 529kg/m^3 であり、いずれの文献値の密度も本試験の密度より大きいことがせ

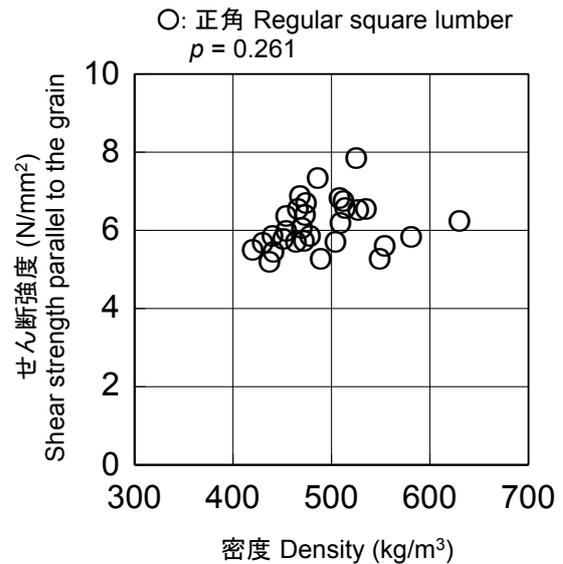


Fig. 4. 正角の密度とせん断強度との関係
Relation between density and shear strength parallel to the grain

ん断強度の違いに影響していると考えられる。正角の密度とせん断強度との関係を Fig. 4 に示す。本試験では、有意水準 95% において相関関係は認められなかったが、密度が約 550kg/m^3 以上の試験体を除くと、密度が大きくなるにつれてせん断強度も大きくなる傾向にあった。

なお、ヒノキのせん断の基準強度は、無等級材 (建設省, 2000)、目視等級区分製材、機械等級区分製材ともに 2.1N/mm^2 であるが、すべての試験体がせん断基準強度を上回った。

3.2.4 むり込み強度性能

製材品のむり込み試験の結果を Table 6 に示す。「製材のむり込みの基準強度」(国土交通省, 2001) のヒノキの基準強度は 7.8N/mm^2 であるが、この値は本試験と試験方法および特性値の算出方法が異なるため (長尾, 2010)、単純には比較できない。そこで、本試験と同様の試験方法で行った心持ち正角によるヒノキのむり込み試験 (山裾ら, 2010, 2011) の結果を用いてむり込み強度を比較した。本試験のむり込み強度の平均値 9.81N/mm^2 に対して、文献の平均値は 10.18N/mm^2 、 11.81N/mm^2 であり、本試験の平均値は文献値よりも小さかった。ただし、せん断強度と同様、むり込み強度も密度の影響を大きく受ける (藤原ら, 2000; 森田ら, 2003; 井道ら, 2004b, 2010)。本試験の密度が 499kg/m^3 であるのに対して、文献値の密度の平均値はそれぞれ 511kg/m^3 、 517kg/m^3 であり、文献値の密度が大きいこともむり込み強度の大きさに影響してい

Table 5. 製材品のせん断試験の結果
Results of shear tests parallel to the grain for lumber

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	τ (N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	17.0	491	6.14
n = 30	C.V.(%)	4.09	9.70	10.3

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, τ : せん断強度 Shear strength parallel to the grain

Table 6. 製材品のめり込み試験の結果
Results of compressive tests perpendicular to the grain for lumber

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	$f_{c,90}$ (N/mm ²)	$f_{c,90,y}$ (N/mm ²)	$K_{c,90}$ (N/mm ³)
正角 Regular square lumber	Mean	18.5	499	9.81	6.00	4.52
n = 30	C.V.(%)	4.89	8.06	26.5	22.7	22.6

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, $f_{c,90}$: めり込み強度 Compressive strength perpendicular to the grain, $f_{c,90,y}$: めり込み降伏強度 Yield strength perpendicular to the grain, $K_{c,90}$: めり込み剛性 Compression perpendicular to the grain stiffness

ると考えられる。また、「製材のめり込みの基準強度」でヒノキと同じ樹種群のカラマツ (伊東ら, 2005) およびヒバ (鈴木ら, 2006) のめり込み強度の平均値は、それぞれ 9.28N/mm²、11.1N/mm² であり、本試験の平均値 9.81N/mm² はこの範囲にあった。

3.3 無欠点小試験体の強度性能

無欠点小試験体の曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み強度試験の結果を、それぞれ Table 7～10 に示す。

見かけの曲げヤング係数および曲げ強度の平均値はそれぞれ 10.7kN/mm²、82.4N/mm² であり、「木材工業ハンドブック」(森林総合研究所, 2004) のヒノキの各平均値 9.0kN/mm²、75N/mm² を上回っていた。樹皮側の試験体と髓側の試験体との各強度値を比較すると、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ比例限度応力、および曲げ強度は、有意水準 95% において (以下すべて同様)、ともに髓側の試験体の平均値が樹皮側の試験体のそれより大きかった。一般の針葉樹材では、樹幹内半径方向に髓から樹皮側に向かって品質が向上する未成熟材部と品質が安定する成熟材部が存在し、髓付近の材よりも樹皮に近い材の方向が物理的・力学的性質が優れているとされている。しかし、通常の樹種では髓から樹皮側に向かって密度が上昇していく一方、スギ、ヒノキでは、髓付近の密度が高く、外周に向かって低下し、やがて安定する (小田, 2007 など) ことが多い。本試験体においても、樹皮側の試験体と髓側の試験体とでは、密度の平均値はそれぞれ 449kg/m³、506kg/m³ であり、樹

皮側よりも髓側の試験体の密度のほうが有意に大きかった。また、曲げ以外の縦圧縮強度、せん断強度についても同様の傾向がみられた。特に小試験体においては、密度が強度に及ぼす影響は大きく、樹皮側よりも髓側の密度が大きかったことが、樹皮側よりも髓側の各強度が大きかった原因であると考えられる。そこで、各強度値から密度の影響を除去したそれぞれの比強度 (強度/密度) を Table 11 に示す。すべての比強度について、樹皮側の試験体と髓側の試験体との間でほぼ差異は認められず、ほぼ等しい値であった。髓付近の密度が同じように高いスギでは、髓付近に比べて樹皮側の比強度が高いため、例えば、渡辺ら (1964) は未成熟材部と成熟材部との境界を求めるための指標として比縦ヤング係数や比縦圧縮強度を採用し、その境界を明確化している。一方、太田 (1972) は、同様の方法でヒノキの未成熟材部と成熟材部との境界を検討した結果、スギと比べて境界の区分が困難であることを指摘している。本研究の結果はヒノキのこのような特性が影響しているものと推察される。

せん断試験の結果、せん断強度の平均値は、柾目面および板目面せん断でそれぞれ 9.29N/mm²、10.1N/mm² であり、板目面せん断の平均値が柾目面せん断のそれより有意に大きかった。

めり込み試験の結果、辺長の 5% めり込み強度は、半径方向加力および接線方向加力でそれぞれ、10.9N/mm²、9.98N/mm² であり、めり込み比例限度応力ともに半径方向加力と接線方向加力の間有意差はなかった。めり込み強度性能についても密度との相関が高いことが

知られており、中井ら (1982) は、針葉樹 11 種について、比重と柢目面 (接線方向加力) における比例限度応力および 5% めり込み強度についての実験式を示している。

$$\sigma_p = -44.8 + 211 R_u \quad (1)$$

$$\sigma_{5\%} = -91.3 + 415 R_u \quad (2)$$

ここで、 σ_p はめり込み比例限度応力、 $\sigma_{5\%}$ は辺長の 5% めり込み強度、 R_u は比重である。これらの式に本試験の接線方向加力での比重の平均値を代入すると、 $\sigma_p = 54.6 \text{kgf/cm}^2 \approx 5.35 \text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{5\%} = 104 \text{kgf/cm}^2 \approx 10.2 \text{N/mm}^2$ となる。これらの値は本試験の平均値、 5.84N/mm^2 、 9.98N/mm^2 に非常に近い値であり、本試

験で使用した試験体でもほぼこの実験式に従うことがわかった。

実大試験体と、実大試験体と同一の試験体から採取した無欠点小試験体について、強度比 (実大試験体の強度 / 無欠点小試験体の強度) を算出した。なお、1 体の実大材から採取した無欠点小試験体が複数あるものは、各無欠点小試験体強度を平均した。その結果、曲げ、縦圧縮、せん断の強度比はそれぞれ 0.53、0.65、0.64 となった。無等級材 (普通構造材) における曲げ、縦圧縮の強度比はそれぞれ 0.45、0.62 である (日本建築学会, 2010) ので、本ヒノキの強度比は、無等級材の強度比に比べて、曲げが若干大きく、縦圧縮

Table 7. 無欠点小試験体の曲げ試験の結果
Results of bending tests for small clear specimens

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	ARW (mm)	E_{fl} (kN/mm ²)	E_{b-app} (kN/mm ²)	σ_{bp} (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)
全試験体 All specimens n = 49	Mean	11.5	477	2.06	12.0	10.7	43.9	82.4
	C.V.(%)	4.97	11.8	27.5	11.9	11.5	14.3	12.4
樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	11.4	449	1.69	11.3	10.1	41.4	76.7
	C.V.(%)	4.70	9.69	22.6	11.9	11.8	15.7	9.67
髄側試験体 Specimens on the pith side n = 24	Mean	11.5	506	2.44	12.8	11.3	46.5	88.4
	C.V.(%)	5.32	10.7	19.2	8.83	8.21	10.7	10.6

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_{fl} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_{b-app} : 見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending, σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 Bending stress at the proportional limit, σ_b : 曲げ強度 Bending strength

Table 8. 無欠点小試験体の縦圧縮試験の結果
Results of compressive tests parallel to the grain for small clear specimens

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	ARW (mm)	E_c (kN/mm ²)	σ_{cp} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
全試験体 All specimens n = 50	Mean	12.7	468	2.07	12.0	30.0	40.6
	C.V.(%)	1.97	11.3	27.3	13.4	26.1	11.3
樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	12.8	446	1.70	11.2	27.8	38.4
	C.V.(%)	1.85	10.2	22.3	13.0	20.4	8.61
髄側試験体 Specimens on the pith side n = 25	Mean	12.7	490	2.43	12.9	32.2	42.7
	C.V.(%)	2.09	10.4	19.8	9.89	28.3	11.0

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_c : 縦圧縮ヤング係数 Compressive Young's modulus parallel to the grain, σ_{cp} : 縦圧縮比例限度応力 Compressive stress parallel to the grain at the proportional limit, σ_c : 縦圧縮強度 Compressive strength parallel to the grain

Table 9. 無欠点小試験体のせん断試験の結果
Results of shear tests parallel to the grain for small clear specimens

			MC (%)	ρ (kg/m ³)	τ (N/mm ²)
柁目面 Radial surface	全試験体 All specimens n = 49	Mean	11.9	462	9.29
		C.V.(%)	1.77	11.4	14.7
	樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	12.0	438	8.77
		C.V.(%)	1.59	9.82	12.4
	髄側試験体 Specimens on the pith side n = 24	Mean	11.9	486	9.84
		C.V.(%)	1.91	10.7	14.5
板目面 Tangential surface	全試験体 All specimens n = 49	Mean	11.9	463	10.1
		C.V.(%)	1.87	10.8	15.9
	樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	11.9	441	9.35
		C.V.(%)	1.70	10.2	13.1
	髄側試験体 Specimens on the pith side n = 24	Mean	11.8	486	10.8
		C.V.(%)	2.05	9.42	15.0

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, τ : せん断強度 Shear strength parallel to the grain

Table 10. 無欠点小試験体のめり込み試験の結果
Results of compressive tests perpendicular to the grain for small clear specimens

			MC (%)	ρ (kg/m ³)	σ_{ep} (N/mm ²)	$\sigma_{e5\%}$ (N/mm ²)
半径方向加力 Loading in the radial direction n = 25		Mean	12.4	464	5.52	10.9
		C.V.(%)	2.02	11.2	28.5	22.3
接線方向加力 Loading in the tangential direction n = 25		Mean	12.4	471	5.84	9.98
		C.V.(%)	2.12	10.2	19.9	19.1

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, σ_{ep} : めり込み比例限度応力 Compressive stress perpendicular to the grain at the proportional limit, $\sigma_{e5\%}$: 辺長の5%めり込み強度 Compressive strength when compressed to 5% of side length

Table 11. 各強度における樹皮側試験体と髄側試験体との比強度 (強度 / 密度) の比較 (平均値)
Comparison of average specific strength between specimens on the bark and pith sides, respectively, at each strength

	曲げ Bending	縦圧縮 Compression parallel to the grain	せん断 (柁目面) Shear parallel to the grain (Radial surface)	せん断 (板目面) Shear parallel to the grain (Tangential surface)
樹皮側試験体 Specimens on the bark side	0.171	0.0865	0.0200	0.0212
髄側試験体 Specimens on the pith side	0.175	0.0876	0.0202	0.0222

はほぼ同程度であった。ただし、この結果は含水率調整をしていない値であるので、気乾状態で比較した場合は、実大試験体の強度が増加するため強度比も増加すると考えられる。せん断について、無欠点小試験体の採取位置やせん断面積は若干異なるものの、本試験と同じ試験方法で行った各樹種の結果と比較すると、スギ、ペイマツ、ペイツガ、ペイヒバにおける各強度比は 0.85、0.80、0.79、0.64 (井道ら, 2006, 2011) であり、本ヒノキの強度比 0.64 はペイヒバと同程度であった。

4. まとめ

本研究は、今後伐採量が増加すると見込まれる大径ヒノキ丸太、およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにすることを目的とした。また、強度試験後の心去り製材品の非破壊部分から、髓側および樹皮側において無欠点小試験体を採取して各強度試験を行い、各強度性能および試験体の採取位置の違いによる強度性能の違いについて検討した。結果を以下に示す。

ヒノキ大径丸太 433 本について縦振動法によるヤング係数を測定した結果、ヤング係数の平均値は 9.14kN/mm^2 であり、一般的な中小径木に比べて高くはないことがわかった。これらの丸太のうち、「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材の等級が E90 以上のものを得ることを目標に採材した、心去り正角 30 体、心去り平角 30 体について、各強度試験を行った。曲げ試験の結果、縦振動法によるヤング係数および見かけの曲げヤング係数の平均値は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等であった。曲げ強度は、ヤング係数が本試験体とほぼ同等である一般的なヒノキ製材品と比べると、若干低かった。縦圧縮試験の結果、縦圧縮強度は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等の値を示した。せん断試験およびめり込み試験の結果、両強度は、心持ち材を用いた文献値よりも低い値を示した。ただし、両強度に大きな影響を及ぼす密度が文献値より小さかったことも上記の要因と考えられた。

基準強度に対しては、曲げ、縦圧縮、せん断ともほぼすべての試験体が当該基準強度を上回った。めり込みの基準強度の算出方法は本試験方法とは異なるが、本試験と同じ方法で行ったヒノキと同じ樹种群であるカラマツおよびヒバに対して、ヒノキの平均値は両樹種の平均値の範囲内にあった。

無欠点小試験体の各強度試験の結果、樹皮側から採取した試験体よりも髓側から採取した試験体の方が、密度、ヤング係数、曲げ強度、縦圧縮強度、せん断強度が大きかった。ただし、比強度で比較すると、樹皮側の試験体と髓側の試験体との間には各強度ともほぼ差異は認められなかった。実大試験体と無欠点小試験

体の強度から強度比を算出した結果、無等級材 (普通構造材) の曲げ、縦圧縮の強度比と比較すると、本試験体の強度比は、曲げが若干大きく、縦圧縮はほぼ同程度であった。

謝辞

本研究は松井建設 (株) との共同研究「大径ヒノキ丸太及び採材された製材品の強度特性の解明」(平成 20 ~ 21 年度) で実施した。また、東長寺 (福岡市博多区) において、2011 年に建立した五重塔に使用された材料の一部を試験体として供した。

引用文献

- ASTM International (1998) "Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber", ASTM D2915-98.
- ASTM International (2010) "Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products", ASTM D2915-10.
- 藤原拓哉・長尾博文・東野 正・橋爪丈夫・池田潔彦・山吉栄作・飯島泰男 (2000) 構造用木材のめり込み強度性能, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 50, E3008.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2004a) 実大いす型せん断治具を用いたスギ製材品のせん断強度の評価, 木材学会誌, 50, 220-227.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2004b) 試験条件の違いがペイマツ実大材のめり込み性能に及ぼす影響, 森林総合研究所研究報告, 3(4), 349-363.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2006) 試験方法の違いによる製材品のせん断性能の評価, 木材学会誌, 52, 293-302.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2010) 超音波伝播法によるめり込み性能の評価, 木材工業, 65, 448-451.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2011) ペイヒバ無欠点小試験体の強度性能 —曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み—, 森林総合研究所研究報告, 10(3), 173-181.
- International organization for standardization (2005) "ISO 13910 Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation", ISO, 22pp.
- 伊東嘉文・吉田孝久・橋爪丈夫 (2005) カラマツの乾燥条件別縦圧縮及びめり込み強度試験, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 55, E70945.
- 建設省 (2000) "木材の基準強度 F_c 、 F_t 、 F_b 及び F_s を定める件", 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第

- 1452号.
- 国土交通省 (2001) “特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件”, 平成13年6月12日国土交通省告示第1024号.
- 強度性能研究会 (2005) “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 <7>”, 独立行政法人森林総合研究所構造利用研究領域内強度性能研究会事務局編, 56pp.
- 森田秀樹・藤元嘉安・飯村 豊・荒武志朗 (2003) 宮崎県産低曲げヤング係数スギラミナのめり込み及びせん断性能, 木材工業, 58, 311-317.
- 森田秀樹・藤元嘉安・村瀬安英 (2006) 宮崎県産低曲げヤング係数スギラミナの実大ブロックせん断性能評価, 木材工業, 61, 52-57.
- 農林水産省 (2007) “製材の日本農林規格”, 平成19年8月29日農林水産省告示第1083号.
- 日本建築学会 (2003) “木質構造限界状態設計指針(案)・同解説”, 日本建築学会編, 丸善, 336-359.
- 日本建築学会 (2010) “木質構造基礎理論”, 日本建築学会編, 丸善, 40-41.
- 日本規格協会 (2009) “JIS Z 2101 木材の試験方法”, 日本規格協会, 66pp.
- 長尾博文 (2010) 製材のせん断及びめり込み基準強度の誘導根拠についての検討, “木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会 平成21年度 報告書”, 木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会, 50-53.
- 中井 孝 (1988) 製材, 木質構造研究会編著 “木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて”, 井上書院, 122.
- 中井 孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要35樹種の強度的性質, 林業試験場報告, 319, 13-46.
- 小田一幸 (2007) 生物材料としての特徴, 日本木材学会編 “木質の物理”, 文永堂出版, 9-10.
- 太田貞明 (1972) スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究, 九州大学農学部演習林報告, 45, 1-80.
- 林野庁 (2011) “平成23年度版 森林・林業白書”, 林野庁編, 全国林業改良普及協会, 10.
- 森林総合研究所 (2004) “木材工業ハンドブック”, 改訂4版, 森林総合研究所監修, 丸善, 192-195.
- 鈴木修治・松元 浩 (2006) 能登ヒバのめり込み強度性能, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 56, PE009.
- 渡辺治人・堤 寿一・松本 昴・太田貞明 (1964) 未成熟材に関する研究(第2報) スギ樹幹内の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布, 木材学会誌, 10, 125-130.
- 山裾伸浩・岸本勇樹 (2010) 紀州材の強度性能に関する研究 和歌山県産スギ・ヒノキのせん断強度及びめり込み強度(1), 和歌山県林試業報, 67, 21-24.
- 山裾伸浩・岸本勇樹 (2011) 紀州材の強度性能に関する研究(第2報) 和歌山県産スギ・ヒノキのせん断強度及びめり込み強度(2), 和歌山県林試業報, 68, 33-36.