「森林総合研究所研究報告」(Bulletin of FFPRI) Vol.12 No.3 (No.428) 143 - 152 September 2013

論　文（Original article）

クリ製材品の強度性能 —曲げ、縦圧縮、縦引張り、せん断、めり込み—†

井道 裕史[1)*]、三浦 祥子[2)]、長尾 博文[1)]、加藤 英雄[1)]

Strength properties of kuri (Japanese chestnut, *Castanea crenata*) timber - Bending strength, compressive strength parallel to the grain, tensile strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, and compressive strength perpendicular to the grain -†

Hirofumi IDO[1)*], Sachiko MIURA[2)], Hirofumi NAGAO[1)] and Hideo KATO[1)]

Abstract

Kuri (Japanese chestnut, *Castanea crenata*) timber is commonly used for the sills of wooden houses. The existing referenced strength for non-graded timber as determined by the Construction Ministry was based on test results on small clear specimens. Little strength data exists on timber-sized specimens of hardwood, including kuri, and the validity of existing referenced strength values, the effects of defects on strength properties, and the relation between characteristic strength values of bending, compression parallel to the grain, and tension parallel to the grain have yet to be clarified. To clarify these matters, bending, compression, tension and shear parallel to the grain, and compression perpendicular to the grain were tested using kuri. The results of these strength tests revealed that the characteristic strength values of bending, compression and shear parallel to the grain, and compression perpendicular to the grain all exceeded or matched the referenced strength, while that of tension parallel to the grain fell below the referenced strength. The strength of the timber specimens was also graded visually relative to bending and tensile strength parallel to the grain, revealing that higher-grade timber tended to have higher average strength, and that such visual strength grading was effective for hardwood timber. The ratios of strength characteristic values of bending, compression, and tension parallel to the grain were 1, 0.89, and 0.48, respectively, thus differing from the same ratios for softwood (at 1, 0.8, and 0.6) as calculated from sugi (Japanese cedar) timber. However, the moisture content of the tensile specimens used to test testing strength parallel to the grain was less than that under the air-dried condition, hence the need to verify whether these results were appropriate after understanding the relation between moisture content and tensile strength parallel to the grain for hardwood timber, including kuri.

Key words : kuri, Japanese chestnut, bending strength, compressive strength parallel to the grain, tensile strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, compressive strength perpendicular to the grain

要旨

現在、木造住宅の土台等には広葉樹材であるクリが広く用いられている。しかしながら、クリを含む広葉樹材においては実大材による強度データがほとんどない。そのため、無欠点小試験体による強度試験結果から誘導されている現行の無等級材の基準強度との妥当性、欠点等が強度性能に及ぼす影響、曲げ・縦圧縮・縦引張りの各強度特性値の相互関係などの事項が不明である。そこで、本研究ではクリの実大材を用いて、曲げ・縦圧縮・縦引張り・せん断・めり込みの各強度試験を実施し、以上の事項を明らかにすることを目的とした。各強度試験の結果、曲げ・縦圧縮・せん断・めり込みの強度特性値は、基準強度に対して同等以上であったが、縦引張り強度特性値は基準強度を下回った。曲げ・縦引張り強度について目視等級区分ごとに平均値を求めた結果、等級が上位になるほど強度の平均値が高くなる傾向にあり、広葉樹材においても目視等級区分が強度選別に有効であることが明らかになった。また、曲げ：縦圧縮：縦引張りにおける各基準特性値の比率は 1：0.89：0.48 となり、スギから求めた針葉樹材の 1：0.8：0.6 とは異なった。ただし、縦引張り試験体の含水率が気乾状態に達していなかったため、今後、クリを含む広葉樹材における含水率と縦引張り強度との関係を把握した上で、以上の結果が妥当であるか再検証する必要がある。

キーワード：クリ、曲げ強度、縦圧縮強度、縦引張り強度、せん断強度、め り込み強度

---

† 本研究結果の一部は、第62回日本木材学会大会 (2012年3月、札幌) および第63回日本木材学会大会 (2013年3月、盛岡) において発表した。
原稿受付：平成 25 年 5 月 16 日 Received 16 May 2013　原稿受理：平成 25 年 6 月 20 日 Accepted 20 June 2013
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)
2) 林野庁森林整備部 Private Forest Department, Forestry Agency
* 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

1. はじめに

現行の広葉樹材 (無等級材) の基準強度は、無欠点小試験体で得られた強度に強度比を乗じて算出される。その強度比は、針葉樹材と同じ値が使用されているが、広葉樹材の実大材による強度データがほとんどないため、その妥当性は検証されていない。また、広葉樹材の強度に及ぼす品質あるいは節等の欠点の影響についても明らかにされていないため、等級区分法を確立するための基礎データがない。さらに、現行の「製材の日本農林規格」(農林水産省 2007) の針葉樹材では、スギの試験結果を参考に、曲げ・縦圧縮・縦引張り強度特性値 (下限値) の比率として 1：0.8：0.6 の関係が採用されているが、広葉樹材ではこの関係について実験的に検証されていない。

そこで、広葉樹材の中ではケヤキ (井道ら 2012) と並んで利用量が多く、木造住宅の土台等に広く使用されるクリを対象として、実大材による曲げ・縦圧縮・縦引張り・せん断・めり込みの各強度試験を実施し、以上の事項について明らかにすることを目的とした。

2. 実験

2.1 供試材

供試材購入から各強度試験までの流れを Fig. 1 に示すとともに、詳細を以下に説明する。山形県金山町、埼玉県飯能市、熊本県あさぎり町の 3 地域の製材業者から、それぞれ 70 本、50 本、50 本、合計 170 本の供試材を購入した。供試材の断面寸法は約 145mm×145mm、長さは約 4000mm であった。発注から納品までの期間が短かったため、十分に乾燥された、すなわち気乾状態の供試材はなかった。ただし、埼玉県および熊本県の供試材がほとんど製材直後に納品されたものであるため、ほぼ生材状態であるのに対し、山形県の供試材は製材後に低温乾燥されていたため、他の 2 業者の供試材に比べて乾燥していた。

森林総合研究所の実験棟に搬入後、直ちに見かけの密度および縦振動法によるヤング係数の非破壊測定 (1 回目) を行った。結果を Table 1 (2011 年 5 月測定分) に示す。山形県の供試材は、低温乾燥された影響により見かけの密度は他の購入地域のものより小さい値であったが、ヤング係数についてはほぼ 9.5kN/mm^2 と購入地域の間で違いはみられなかった。

非破壊測定後、約 5 ヶ月間の天然乾燥を実施した。山形県の供試材と埼玉県および熊本県の供試材とでは含水率状態が異なっていたため、前者は屋内で、後者は屋根をかけて屋外での天然乾燥とした。

天然乾燥後、非破壊測定 (2 回目) を行った。結果を Table 1 (2011 年 10 月測定分) に示す。5 ヶ月間の天然乾燥によって山形県の供試材で 24%、埼玉県および熊本県の供試材で 29%、重量が低下し、天然乾燥後の見かけの密度は平均値で 598 〜 624kg/m^3 であった。「木材工業ハンドブック」(森林総合研究所 2004) によると、クリの無欠点小試験体の気乾比重は 0.44 〜 0.60

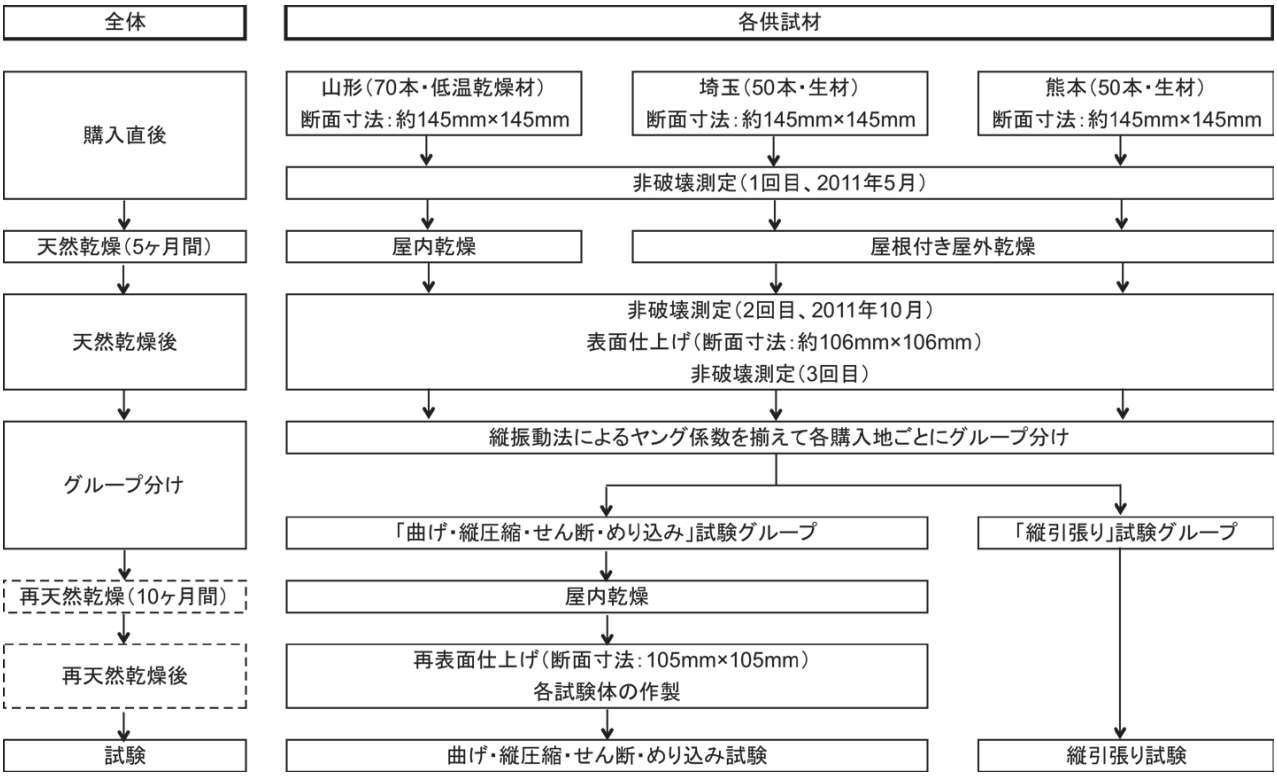

Fig. 1. 供試材購入から各試験までの流れ

Table 1　天然乾燥前後の供試材の物性値 (平均値)

測定年月	購入地域	試験体数	幅 (mm)	厚さ (mm)	重量 (kg)	ρ (kg/m^3)	*fr-L* (Hz)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	備考
2011 年	山形	70	119.9	119.9	45.0	766	432	9.55	低温乾燥材
5 月	埼玉	50	129.1	129.0	56.8	825	408	9.37	伐採直後
	熊本	50	124.5	124.5	53.7	856	413	9.56	伐採直後
2011 年	山形	70	118.5	118.5	34.4	598	497	9.88	屋内乾燥後
10 月	埼玉	50	127.5	127.3	40.3	600	491	9.84	屋根付き屋外乾燥後
	熊本	50	122.9	123.1	38.2	624	494	9.97	屋根付き屋外乾燥後

注 ρ：見かけの密度、*fr-L*：縦振動法による 1 次固有振動数、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数

～ 0.78 (最小～平均～最大) となっており、供試材は気乾状態に近い状況と推察されたため、乾燥を終了し、試験体の作製に移った。供試材をバンドソーで挽き直した後、モルダーがけを行なった結果、すべての供試材の仕上がり断面寸法は約 106mm×106mm となった。表面仕上げされた供試材について非破壊測定を実施し (3 回目) 、購入地ごとに、縦振動法によるヤング係数の平均値と変動係数がほぼ等しい 85 本ずつの 2 グループに分け、一方を「曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み」試験グループ、他方を「縦引張り」試験グループとした。

「曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み」試験グループの試験体作製前に縦引張り試験を実施し、全乾法により含水率を測定したところ、縦引張り試験体が気乾状態に達していないことが明らかとなった。「木材工業ハンドブック」の気乾比重を参考に、供試材がほぼ気乾状態であると判断したが、試験後に測定した試験体の気乾密度の平均値は約 540kg/m^3 であり、文献の平均値よりも低い値であったことが原因であった。そのため、「曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み」試験グループの供試材は屋内にてさらに約 10 ヶ月間の天然乾燥を追加した後、曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み試験体を作製し各試験を実施した。ただし、再天然乾燥後、改めて表面仕上げを行ったため、この試験グループの断面寸法は約 105mm×105mm となった。「曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み」試験グループおよび「縦引張り」試験グループの試験体の採取方法を Fig. 2 に示す。すなわち、各試験体の状態は、縦引張り試験体については断面寸法が約 106mm×106mm で気乾状態に達しておらず、曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み試験体については断面寸法が約 105mm×105mm で気乾状態であった。

2.2 試験方法

各強度試験は ISO 13910 (ISO 2005) および「構造用木材の強度試験マニュアル」(日本住宅・木材技術センター 2011) に準じて行った。

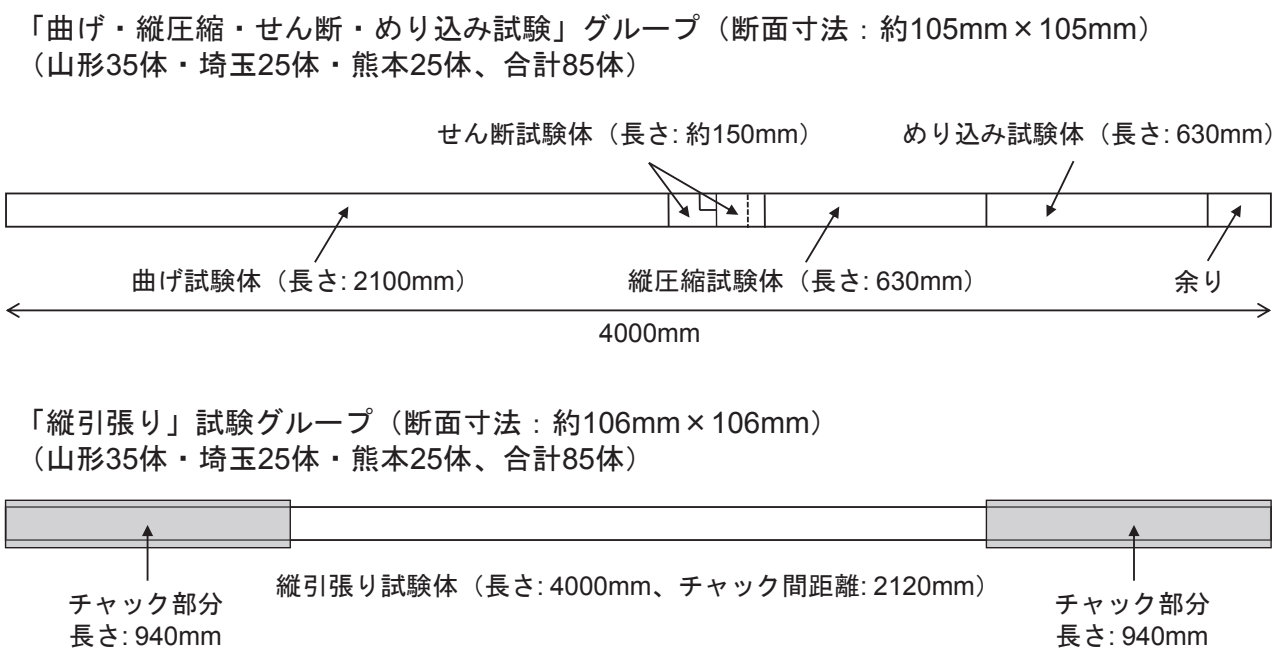

Fig. 2. 各試験体の採取方法

2.2.1 曲げ試験

曲げ試験に先立ち、荷重点間において、「製材の日本農林規格」の目視等級区分構造用製材甲種構造用 II に準じて目視等級区分を行った。測定した項目は、節径比、集中節径比、丸身、割れ、繊維傾斜である。繊維傾斜の測定には、繊維傾斜測定器 (Metriguard 製、Model 511) を用いた。各材面の材中央部と荷重点下の繊維傾斜を測定し、最も大きい値をその試験体の繊維傾斜とした。また、縦振動法によるヤング係数を測定した。

曲げ試験は、荷重点間を材せいの 6 倍 (630mm) 、支点間距離を材せいの 18 倍 (1890mm) とした 3 等分点 4 点荷重方式で行った。最大容量が 10tf (約 98kN) の材料試験機 (ミネベア株式会社製、TCM-10000) により載荷した。クロスヘッド速度は 10mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計 (東京測器研究所製、CDP-100) を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計 (東京測器研究所製、CDP-10) を取り付けた袴型治具 (スパン 401mm) を乗せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全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、曲げ比例限度応力および曲げ強度を算出した。試験後、破壊部近傍から長さが約 20mm 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。

2.2.2 縦圧縮試験

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。縦圧縮試験は材長を木口面の一辺の 6 倍 (630mm) とした短柱圧縮試験体で行った。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所製、A-300-B4) を用いて、荷重レンジを 600kN に設定して載荷し、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。試験体の長さ方向における相対する 2 材面の中央部に、標点間距離を 150mm とした、変位計 (東京測器研究所製、CDP-10) を取り付けた治具を設置して縮みを測定した。2 材面の縮みの平均値を試験体の縮みとした。試験終了後、縦圧縮ヤング係数、縦圧縮比例限度応力および縦圧縮強度を算出した。試験後、破壊部近傍から長さが約 20mm 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 縦引張り試験

縦引張り試験に先立ち、「製材の日本農林規格」の目視等級区分構造用製材甲種構造用 II に準じて、つかみ部分を除いたチャック間における目視等級区分を行った。測定した項目は、曲げ試験体と同様、節径比、集中節径比、丸身、割れ、繊維傾斜である。繊維傾斜の測定には、繊維傾斜測定器 (Metriguard 製、Model 511) を用いた。各材面の材中央部とチャック間両端部の繊維傾斜を測定し、最も大きい値をその試験体の繊維傾斜とした。また、縦振動法によるヤング係数を測定した。

縦引張り試験はチャック間距離を長辺の 20 倍 (2120mm) 、片側のチャック部分の長さを 940mm とした。試験機には最大容量が 2000kN の横型引張り試験機 (前川試験機製作所製、HZS-200-LB4) を用いた。試験体の長さ方向における相対する 2 材面の中央部に、標点間距離を 1000mm とした、変位計 (東京測器研究所製、CDP-10) を取り付けた治具を設置して伸びを測定した。2 材面の伸びの平均値を試験体の伸びとした。試験終了後、縦引張りヤング係数、縦引張り比例限度応力および縦引張り強度を算出した。試験後、破壊部近傍から長さが約 20mm 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 せん断試験

せん断試験は実大いす型せん断方式 (井道ら 2004) により行った。供試材には、割れ、節等、せん断試験に対して欠点となりうるものが存在していたため、Fig. 2 に示したように、1 本の供試材からエンドマッチでせん断面を材軸方向を中心に 90° 回転させて 2 体の試験体を採取した。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 45mm、せん断面積は 105mm×105mm とした。両せん断面の試験体について、実大いす型せん断試験治具を最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所製、A-300-B4) に設置してせん断試験を行った。荷重レンジを 150kN に設定して載荷し、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。せん断試験後、破断面を観察し、割れ、節、木理の影響が小さい方の試験体をその供試材のせん断試験結果とした。試験後、せん断面を含む部分から長さが約 20mm 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。

2.2.5 めり込み試験

めり込み試験は長さが断面の 6 倍 (630mm) の試験体に対し、長さ 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圧方式で行った。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所製、A-300-B4) を用いて、荷重レンジを 300kN に設定して載荷し、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。試験体の長さ方向の中央部付近両脇に 2 か所に変位計 (東京測器研究所製、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めり込み変形量とした。試験終了後、めり込み比例限度応力、めり込み強度、めり込み降伏強度、めり込み剛性を算出した。破壊部近傍から長さが約 20mm 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。

3. 結果と考察

3.1 曲げ試験

曲げ試験の結果を Table 2 に示す。曲げ強度特性値 (正規分布と仮定した場合の信頼水準 75％における 95％下側許容限界値、以下同様) は 29.4N/mm^2 となり、現行の無等級材の基準強度 (広葉樹 II 類 (くり、なら、ぶな、けやき) 、以下同様) (建設省 2000) F_b=29.4N/mm^2 と同等であった。

「製材の日本農林規格」の目視等級区分構造用製材甲種構造用 II に準じて、荷重点間における目視等級区分を行った結果、1 級、2 級、3 級、格外はそれぞれ 14 体 (16％) 、37 体 (44％) 、27 体 (32％) 、7 体 (8％) であった。等級ごとの曲げ試験の結果をそれぞれ Table 3 に示す。曲げ強度の平均値は、同じ順に 53.0、50.2、46.5、42.4N/mm^2 となり、等級が上がるごとに平均値も上がり、針葉樹材と同様、広葉樹材においても目視等級区分が曲げ強度の選別に有効であることが明らかになった。

3.2 縦圧縮試験

縦圧縮試験の結果を Table 4 に示す。縦圧縮強度特性値は 26.3N/mm^2 となり、現行の無等級材の基準強度 F_c=21.0N/mm^2 以上であった。

3.3 縦引張り試験

縦引張り試験の結果を Table 5 に示す。試験時の含水率の平均値は約 32％となり、気乾状態には達していなかった。縦引張り強度特性値は 14.1N/mm^2 となり、現行の無等級材の基準強度 F_t=18.0N/mm^2 よりも低い値を示した。曲げや縦圧縮強度では、含水率の上昇に伴って強度は低下する。一方、縦引張り強度では、針葉樹材であるスギ、カラマツ、ベイマツの各製材品について、乾燥に伴う強度の増加が認められないことが明らかになっている (Green et al. 1990, 長尾ら 2001) 。そのため、縦引張り強度特性値が基準強度を下回ったことについての含水率の影響は小さいと考えられる。また、曲げ・縦圧縮・縦引張り強度の統計的下限値の相対的比率の検討に対して、縦引張り試験体の含水率が気乾状態に達していなかったことは影響しないと考えられる。このように、縦引張り強度に及ぼす含水率の影響は小さいと考えられるが、クリを含めた広葉樹材では含水率と縦引張り強度との関係は実験的に明らかになっていないため、今後検証が必要である。

「製材の日本農林規格」の目視等級区分構造用製材甲種構造用 II に準じて、チャック間における目視等級区分を行った結果、1 級、2 級、3 級、格外はそれぞれ 12 体 (14％) 、37 体 (44％) 、24 体 (28％) 、12 体 (14％) であった。等級ごとの縦引張り試験の結果をそれぞれ Table 6 に示す。縦引張り強度の平均値は、同じ順に 27.3、27.1、25.9、22.9N/mm^2 となり、曲げ強度と同様、等級が上がるごとに縦引張り強度の平均値が高くなることがわかった。

また、縦引張り試験の結果、通常の針葉樹の破壊形態とは異なる破壊形態が見られた。すなわち、節等の欠点が確認できない個所で破壊が生じ、破壊形態を観察すると、試験体の破断面の長さが短く、脆弱的に見える破壊であった。曲げ試験体でもそのよう破壊形態を示した試験体は数体存在したが、縦引張り試験体ほど顕著ではなかった。各試験体の破壊形態を節による破壊、繊維傾斜による破壊、無欠点部での破壊に分け、等級ごとに示したものを Table 7 に示す。また、それぞれの破壊形態の例を Photo 1 に示す。複合的な破壊要因によると見られるものも存在したが、その場合は主要な要因と思われるものを一つ選択した。各等級の試験体数が少ないために明確ではないが、破壊の割合を見ると、等級が低いほど節による破壊が多く、等級が高いほど無欠点部での破壊が多い傾向にあることがわかる。等級が高いほど欠点が少なくなるため、等級の高い試験体では無欠点部での破壊が増加することは予想できるが、脆弱的に見えるような破壊形態となる原因は現在のところ明らかではない。縦引張り試験体の含水率が高かったこと、広葉樹は針葉樹に比べて繊維が短いことなどの理由も考えられるが、今後の検討課題である。

Table 2　曲げ試験の結果

	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	*MOE*-app (kN/mm^2)	*MOE*-true (kN/mm^2)	σ_{bp} (N/mm^2)	*MOR* (N/mm^2)
試験体数	85	85	85	85	85	85	85
平均値	15.4	540	10.3	9.61	10.1	32.8	48.8
最小値	14.5	452	7.08	6.62	6.57	12.6	17.5
最大値	17.6	667	13.4	13.1	13.0	46.3	73.2
標準偏差	0.538	38.7	1.29	1.21	1.50	6.24	11.0
変動係数 (%)	3.50	7.18	12.5	12.6	14.8	19.0	22.5

記号 *MC*：含水率、ρ：試験時の密度、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数、*MOE*-app：見かけの曲げヤング係数、*MOE*-true：真の曲げヤング係数、σ_{bp}：曲げ比例限度応力、*MOR*：曲げ強度

Table 3　目視等級区分ごとの曲げ試験の結果

1 級	*MC* (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	*MOE*-app (kN/mm^2)	*MOE*-true (kN/mm^2)	σ_{bp} (N/mm^2)	*MOR* (N/mm^2)
試験体数	14	14	14	14	14	14	14
平均値	15.4	524	10.8	10.2	10.9	35.8	53.0
最小値	14.5	480	9.29	8.62	9.11	22.7	34.3
最大値	16.2	578	13.3	13.1	12.8	46.3	71.9
標準偏差	0.464	27.7	1.08	1.08	1.00	6.85	10.4
変動係数 (%)	3.01	5.29	10.0	10.6	9.16	19.2	19.5
2 級	*MC* (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	*MOE*-app (kN/mm^2)	*MOE*-true (kN/mm^2)	σ_{bp} (N/mm^2)	*MOR* (N/mm^2)
試験体数	37	37	37	37	37	37	37
平均値	15.4	539	10.4	9.69	10.2	33.2	50.2
最小値	14.5	454	8.25	8.00	7.53	23.6	31.9
最大値	16.2	602	12.5	11.6	12.6	45.8	73.2
標準偏差	0.444	37.9	1.21	1.09	1.26	5.52	10.7
変動係数 (%)	2.89	7.03	11.6	11.2	12.4	16.6	21.3
3 級	*MC* (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	*MOE*-app (kN/mm^2)	*MOE*-true (kN/mm^2)	σ_{bp} (N/mm^2)	*MOR* (N/mm^2)
試験体数	27	27	27	27	27	27	27
平均値	15.3	542	10.2	9.46	10.1	31.5	46.5
最小値	14.5	452	7.08	6.62	6.57	19.3	31.3
最大値	17.1	667	13.4	12.1	13.0	42.1	62.2
標準偏差	0.599	42.7	1.41	1.21	1.72	5.52	9.50
変動係数 (%)	3.91	7.88	13.8	12.8	17.0	17.5	20.4
格外	*MC* (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	*MOE*-app (kN/mm^2)	*MOE*-true (kN/mm^2)	σ_{bp} (N/mm^2)	*MOR* (N/mm^2)
試験体数	7	7	7	7	7	7	7
平均値	15.7	566	9.27	8.46	8.75	30.2	42.4
最小値	15.3	506	7.87	6.85	6.82	12.6	17.5
最大値	17.6	626	11.1	10.2	10.9	43.6	61.1
標準偏差	0.838	36.8	1.16	1.40	1.86	9.60	16.1
変動係数 (%)	5.33	6.49	12.5	16.6	21.3	31.8	38.0

記号 *MC*：含水率、ρ：試験時の密度、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数、*MOE*-app：見かけの曲げヤング係数、*MOE*-true：真の曲げヤング係数、σ_{bp}：曲げ比例限度応力、*MOR*：曲げ強度

Table 4　縦圧縮試験の結果

	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	σ_{cp} (N/mm^2)	σ_c (N/mm^2)
試験体数	85	85	85	85	85	85
平均値	15.5	539	10.4	10.0	20.1	32.3
最小値	14.2	461	5.11	4.95	10.9	19.7
最大値	16.9	633	13.5	14.0	34.9	39.3
標準偏差	0.604	39.0	1.24	1.54	5.50	3.38
変動係数 (%)	3.89	7.22	11.9	15.4	27.4	10.4

記号 *MC*：含水率、ρ：試験時の密度、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数、E_c：縦圧縮ヤング係数、σ_{cp}：縦圧縮比例限度応力、σ_c：縦圧縮強度

Table 5　縦引張り試験の結果

	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_t (kN/mm^2)	σ_{tp} (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
試験体数	85	85	85	84	84	84
平均値	31.9	611	9.72	8.53	18.0	26.2
最小値	21.1	471	7365	6.28	7.12	13.9
最大値	55.2	776	12.5	11.3	40.0	42.8
標準偏差	6.97	55.3	1.03	1.04	8.18	6.72
変動係数 (%)	21.9	9.05	10.6	12.2	45.4	25.6

記号 MC：含水率、ρ：試験時の密度、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数、E_t：縦引張りヤング係数、σ_{tp}：縦引張り比例限度応力、σ_t：縦引張り強度
注　E_t、σ_{tp}、σ_t の試験体数がそれぞれ 1 体ずつ少ないのは、測定機器の不具合により測定ができなかったためである。

Table 6　目視等級区分ごとの縦引張り試験の結果

1 級	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_t (kN/mm^2)	σ_{tp} (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
試験体数	12	12	12	12	12	12
平均値	30.8	584	10.3	9.14	18.3	27.3
最小値	22.9	531	9.12	8.14	7.87	16.8
最大値	42.3	643	11.3	10.2	39.8	40.6
標準偏差	5.47	39.9	0.631	0.651	11.0	7.45
変動係数 (%)	17.8	6.83	6.11	7.12	60.2	27.3

2 級	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_t (kN/mm^2)	σ_{tp} (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
試験体数	37	37	37	37	37	37
平均値	31.6	609	9.90	8.69	18.5	27.1
最小値	21.6	471	8.05	6.66	7.12	15.3
最大値	55.2	738	12.5	11.3	40.0	42.8
標準偏差	7.63	56.2	1.08	1.04	8.39	7.10
変動係数 (%)	24.1	9.22	10.9	12.0	45.4	26.2

3 級	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_t (kN/mm^2)	σ_{tp} (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
試験体数	24	24	24	23	23	23
平均値	32.4	613	9.43	8.29	18.7	25.9
最小値	21.2	519	7.90	6.56	8.22	17.6
最大値	52.6	776	11.4	10.3	34.1	39.2
標準偏差	6.93	59.2	0.887	0.900	7.34	5.72
変動係数 (%)	21.4	9.67	9.41	10.9	39.2	22.1

格外	MC (%)	ρ (kg/m^3)	$E_{fr\text{-}L}$ (kN/mm^2)	E_t (kN/mm^2)	σ_{tp} (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
試験体数	12	12	12	12	12	12
平均値	32.8	640	9.16	7.91	14.9	22.9
最小値	21.1	565	7.65	6.28	7.51	13.9
最大値	42.8	703	11.0	10.6	27.5	32.7
標準偏差	6.83	48.6	1.06	1.25	5.73	6.18
変動係数 (%)	20.8	7.60	11.6	15.8	38.6	27.0

記号 MC：含水率、ρ：試験時の密度、$E_{fr\text{-}L}$：縦振動法によるヤング係数、E_t：縦引張りヤング係数、σ_{tp}：縦引張り比例限度応力、σ_t：縦引張り強度

Table 7　縦引張り試験における等級ごとの破壊形態の数と割合

	節による破壊	繊維傾斜による破壊	無欠点部での破壊
すべての試験体	55 体 (65%)	19 体 (22%)	11 体 (13%)
1 級	5 体 (42%)	4 体 (33%)	3 体 (25%)
2 級	22 体 (59%)	10 体 (27%)	5 体 (14%)
3 級	19 体 (79%)	4 体 (17%)	1 体 (4%)
格外	9 体 (75%)	1 体 (8%)	2 体 (17%)

a) 節による破壊

b) 繊維傾斜による破壊

c) 無欠点部での破壊

Photo 1. 縦引張り試験による破壊形態の例

3.4 せん断試験

せん断試験の結果を Table 8 に示す。せん断強度特性値は 6.12N/mm^2 であり、現行の無等級材の基準強度 F_s = 3.0N/mm^2 を 2 倍以上上回っていた。しかしながら、無等級材のせん断基準強度は、基準強度値 (無欠点小試験体の平均値) ×4/5×1/2×1/1.5 で誘導されていると考えられることから (長尾 2010, 2013a) 、実際のせん断強度に比べてかなり低く抑えられていると推察される。そこで、本試験と同様の実大いす型せん断方式で行った他樹種の結果と比較したものを Table 9 に示す。なお、文献値の下限値は正規分布を仮定した 75% 信頼水準の 5% 下限値である。クリの下限値 / 基準強度を他樹種と比較すると、クリは 2.0 と他樹種の 2.4 ～ 2.7 よりは小さかった。この理由として、一般的にせん断強度と密度とは相関があり、前述したように「木材工業ハンドブック」に示されたクリの気乾密度の平均値は約 600kg/m^3 であるため、本試験で用いたクリの試験時の密度が 543kg/m^3 と「木材工業ハンドブック」の値より低かったことが考えられる。

Table 8　せん断試験の結果

	MC (%)	ρ (kg/m^3)	σ_s (N/mm^2)
試験体数	85	85	85
平均値	15.3	543	8.63
最小値	14.2	447	4.27
最大値	16.3	660	12.6
標準偏差	0.385	46.2	1.42
変動係数 (%)	2.52	8.51	16.4

記号 *MC*：含水率、ρ：試験時の密度、σ_s：せん断強度

3.5 めり込み試験

めり込み試験の結果を Table 10 に示す。めり込み試験は試験方法や特性値の算出方法で結果が異なるため、得られた特性値と基準強度とを単純に比較できない。そのため、過去に同じ ISO 13910 の試験方法で行った他樹種の結果と比較したものを Table 11 に示す。文献で下限値が記載されているものはその値を、記載されていないものは正規分布を仮定し信頼水準 75% の 5% 下限値を求めた。めり込み基準強度 (国土交通省 2001) は平均値から誘導されていると考えられる (長尾 2010, 2013b) ため、下限値とともに平均値について比較した。その結果、めり込み強度の平均値 / 基準強度、めり込み強度の下限値 / 基準強度とも既往のデータの範囲内に入っており、現行のクリの基準強度 10.8N/mm^2 は妥当であると考えられる。

3.6 曲げ・縦圧縮・縦引張りの強度特性値の比較

現行 JAS の針葉樹の製材品では、スギの試験結果 (中井 1988) を参考に、曲げ・縦圧縮・縦引張り強度特性値 (下限値) の比率として 1：0.8：0.6 の関係が採用されている。しかしながら、広葉樹材ではこの関係について実験的に検証されていない。本試験の結果、クリの曲げ・縦圧縮・縦引張り強度特性値の比率は、29.4N/mm^2：26.3N/mm^2：14.1N/mm^2 ＝ 1：0.89：0.48 であった。スギ製材の試験結果と比較すると、曲げに対して、縦圧縮が大きく、縦引張りが小さい値となった。現在この理由は明らかではないが、広葉樹材の各強度特性値間の比率は、スギを参考とした現行 JAS の比率とは異なる可能性があるため、今後他樹種においても同様の検討が必要である。

Table 9　実大いす型せん断試験方式で行った他樹種との比較

樹種	試験体数	密度 (平均値)	せん断強度 (N/mm²)		基準強度	下限値 / 基準強度
		(kg/m³)	下限値 (N/mm²)	変動係数 (%)	(N/mm²)	
クリ	85	543	6.12	16.4	3.0	2.0
ベイマツ a)	50	519	5.79	13.3	2.4	2.4
ヒノキ a)	40	515	5.73	18.8	2.1	2.7
ベイツガ a)	49	477	5.42	15.3	2.1	2.6
ベイヒバ b)	100	514	5.21	13.9	(2.1)	2.5
スギ a)	51	414	4.82	13.8	1.8	2.7

文献 a) 井道ら (2006)、b) 井道ら (2010)
注 基準強度は「建設省 (2000) “木材の基準強度 Fc、Ft、Fb 及び Fs を定める件”, 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号」による。ベイヒバの基準強度は存在しないが、強度試験結果 b) より 2.1N/mm² と仮定した。

Table 10　めり込み試験の結果

	MC (%)	ρ (kg/m³)	σ_{cvp} (N/mm²)	$f_{c,90}$ (N/mm²)	$f_{c,90,y}$ (N/mm²)	$K_{c,90}$ (N/mm³)
試験体数	85	85	85	85	85	85
平均値	15.2	543	6.26	13.3	8.54	4.52
最小値	14.0	475	4.59	10.3	6.38	2.34
最大値	17.3	654	8.77	19.8	12.7	8.60
標準偏差	0.582	42.2	1.02	1.99	1.35	1.22
変動係数 (%)	3.84	7.78	16.3	15.0	15.8	27.1

記号 *MC*：含水率、ρ：試験時の密度、σ_{cvp}：めり込み比例限度応力、$f_{c,90}$：めり込み強度、$f_{c,90,y}$：めり込み降伏強度、$K_{c,90}$：めり込み剛性

Table 11　ISO 13910 のめり込み試験方式で行った他樹種との比較

樹種	試験体数	密度 (平均値)	ISO 方式によるめり込み強度			基準強度	平均値	下限値
		(kg/m³)	平均値 (N/mm²)	下限値 (N/mm²)	変動係数 (%)	(N/mm²)	/ 基準強度	/ 基準強度
クリ	85	543	13.3	9.75	15.0	10.8	1.2	0.9
カラマツ a)	15	—	9.28	7.77	8.2	7.8	1.2	1.0
ヒバ b)	31	500	11.1	6.52	17.3	7.8	1.4	0.8
ベイヒバ c)	100	513	9.48	6.51	17.8	(7.8)	1.2	0.8
スギ d)	38	400	8.22	6.37	—	6.0	1.4	1.1
ベイツガ e)	50	483	9.37	5.03	25.6	6.0	1.6	0.8

文献 a) 伊東ら (2005)、b) 鈴木・松元 (2006)、c) 井道ら (2010)、d) 田中・荒武 (2005)、e) Ido et al. (2007)
注 基準強度は「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」による。ベイヒバの基準強度は存在しないが、強度試験結果 c) より 7.8N/mm² と仮定した。

まとめ

木造住宅の土台等に使用されるクリを対象として、実大材による曲げ・縦圧縮・縦引張り・せん断・めり込みの各強度試験を実施し、現行の基準強度の妥当性、欠点等が強度性能に及ぼす影響、各強度特性値の相互関係について検証した。

各強度試験の結果、曲げ・縦圧縮・せん断・めり込みの強度特性値は、基準強度に対して上回るか同等であったが、縦引張り強度特性値は基準強度を下回った。曲げ・縦引張り強度について、目視等級区分ごとに平均値を求めた結果、等級が上位になるほど強度の平均値が高くなる傾向にあり、広葉樹材においても目視等級区分が強度選別に有効であることがわかった。また、曲げ：縦圧縮：縦引張りにおける各基準特性値の比率は 1：0.89：0.48 となり、スギから求めた針葉樹材の 1：0.8：0.6 とは異なった。そのため、各強度特性値の比率は、現行針葉樹 JAS の比率とは異なる可能性があることがわかった。

ただし、縦引張り試験体の含水率が気乾状態に達していなかったため、今後、クリを含む広葉樹材における含水率と縦引張り強度との関係を把握した上で、以上の結果が妥当であるか再検証する必要がある。

謝辞

本研究は国土交通省「平成 23 年度 木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会」の一部として行った。なお、実験にあたっては、(独) 農林水産消費安全技術センターの下田優子氏にご協力を頂いた。

引用文献

Green, D. W., Pellerin, R. F., Evans, J. W. and Kretschmann, D. E. (1990) Moisture content and tensile strength of Douglas fir dimension lumber. Res. Pap. FPL-RP-497, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 33 pp.

井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2004) 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 (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 (2012) ケヤキ実大材の曲げおよび縦圧縮強度 . 木材学会誌 , 58, 144-152.

Ido, H., Nagao, H. and Kato, H. (2007) Comparison between compression strength perpendicular to the grain and shear strength parallel to the grain of Western hemlock lumber. Bulletin of FFPRI, 402, 71-76.

井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2010) ベイヒバ製材品の強度性能 ―曲げ、縦圧縮、縦引張り、せん断、めり込み―. 森林総合研究所研究報告 , 9(3), 125-148.

International Organization for Standardization (2005) “ISO 13910 Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation”. ISO, 22 pp.

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 Fc、Ft、Fb 及び Fs 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 .

長尾博文・井道裕史・加藤英雄・菅原弥寿夫・宮崎茂雄 (2001) 製材品の縦引張り強度に及ぼす含水率の影響 . 日本木材学会大会研究発表要旨集 , 51, 95.

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”. 一般社団法人 建築性能基準推進協会 , 50-53.

長尾博文 (2013a) 構造用木材としての製材 (10) 製材の基準強度 . 住宅と木材 , 424, 4-5.

長尾博文 (2013b) 構造用木材としての製材 (12) 製材の基準強度 . 住宅と木材 , 426, 4-5.

中井　孝 (1988) 製材 . 木質構造研究会編 “木質構造研究読本 ティンバーエンジニアリングのすべて”. 井上書院 , 122.

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 . 日本住宅・木材技術センター , 162 pp.

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 .

森林総合研究所 (2004) 主要樹種の性質表 . 森林総合研究所編 “改訂 4 版 木材工業ハンドブック”. 丸善 , 192.

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.

田中　洋・荒武志朗 (2005) 宮崎県産スギ正角のめり込み性能 (1). 日本木材学会大会研究発表要旨集 , 55, E71015.