

### 第3章 広葉樹材の品質制御方法に関する検討

## 第3章 広葉樹材の品質制御方法に関する検討

### 3.1 クリ製材品の強度性能

#### 3.1.1 目的

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ることによって算出されている。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、その妥当性について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 JAS の針葉樹の製材品では、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、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、以上の事項について明らかにすることを目的とした。

#### 3.1.2 実験

##### 3.1.2.1 供試材

金山森林組合（山形県金山町）、大河原木材（埼玉県飯能市）、中球磨木材（熊本県あさぎり町）の3地域から、それぞれ70、50、50本、合計170本の供試材を購入した。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るので、他の2業者の供試材に比べて乾燥していた。担当者によると含水率は30～35%との話であった。

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を測定した。結果の概要を表3.1に示す（2011年5月測定分）。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<sup>2</sup>と購入地の間で違いはみられなかった。

縦振動法によるヤング係数の測定後、天然乾燥を約5か月実施した。なお、前述したように、山形県の供試材と埼玉県および熊本県の供試材と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、再度非破壊試験を行った。結果を表3.1（2011年10月測定分）に示す。5か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%、重量が低下した。「木材工業ハンドブック」によると、クリの無欠点小試験体の気乾比重は0.44～0.60～0.78（最小～平均～最大）となっており、天然乾燥後の見かけの密度は平均値で598～624kg/m<sup>3</sup>であったため、気乾状態に近い状況と推察された。

表 3.1 天然乾燥前後の供試材の物性値（平均値）

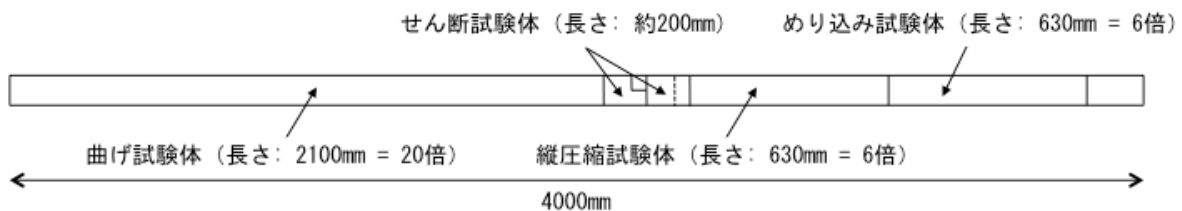
測定年月	購入地	試験体数	幅 (mm)	厚さ (mm)	重量 (kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_r$ (Hz)	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	備考
2011年 5月	山形	70	119.9	119.9	45.0	766	432	9.55	低温乾燥材
	埼玉	50	129.1	129.0	56.8	825	408	9.37	伐採直後
	熊本	50	124.5	124.5	53.7	856	413	9.56	伐採直後
2011年 10月	山形	70	118.5	118.5	34.4	598	497	9.88	屋内乾燥後
	埼玉	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  $\rho$  : 見かけの密度、 $f_r$  : 縦振動法による 1 次固有振動数、 $E_{fr}$  : 縦振動法によるヤング係数

天然乾燥後、森林総合研究所と距離が近い製材業者において賃挽きによるモルダーがけを行った。ただし、乾燥による曲がりが多い材が多く、直接モルダーがけを行うことが困難とのことであった。そこで、再度バンドソーで挽き直した後、モルダーがけを行なった。その結果、すべての供試材の仕上がり断面寸法は約 106mm となった。

モルダー仕上げされた供試材 170 体について再度縦振動法によるヤング係数を測定し、購入地別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 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。各グループから図 3.1 に示したように、曲げ・縦引張り・縦圧縮・めり込み・せん断試験体を採取し、各強度試験に供した。しかしながら、最初に行った縦引張り試験の結果、含水率が気乾状態に達していないことが明らかとなった。これは、当初「木材工業ハンドブック」を参考にして気乾密度を平均値の 600kg/m<sup>3</sup>程度と見積もり、見かけの密度がこの程度に下がった時点で縦引張り試験を行ったが、実際には、本試験体の気乾密度の平均値は約 540kg/m<sup>3</sup>と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 か月間の天然乾燥を追加した後、曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み試験を行った。ただし、追加の天然乾燥後に、再度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 となった。

曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み試験体グループ (105mm角)  
(山形35体・埼玉25体・熊本25体、合計85体)



縦引張り試験体グループ (106mm角)  
(山形35体・埼玉25体・熊本25体、合計85体)



図 3.1 各試験体の採取方法と寸法

### 3.1.2.2 試験方法

試験方法は基本的に「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）に準じた。

#### 3.1.2.2.1 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、集中節、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。容量が 10tf（約 98kN）の材料試験機（NMB 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、試験体の圧縮面上に変位計（東京測器製、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。曲げ試験の様子を写真 3.1 に示す。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。

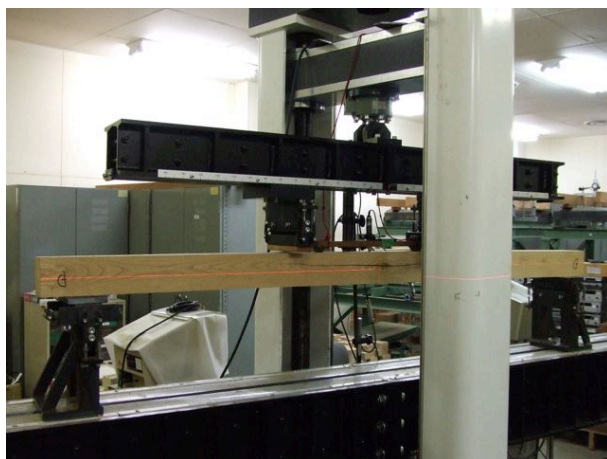


写真 3.1 曲げ試験の様子

#### 3.1.2.2.2 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断面の 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中央部の平行な 2 材面に、標点間距離が 150mm で変位計（東京測器製、CDP-10）を設置して変形を測定した。両変位の平均を標点間での試験体の変位とした。縦圧縮試験の様子を写真 3.2 に示す。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。



写真 3.2 縦圧縮試験の様子

### 3.1.2.2.3 縦引張り試験方法

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、集中節、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部先端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)、片側のつかみ部分の長さを 940mm とした。試験機には最大容量が 2000kN の横型引張り試験機 (前川製作所製、HZS-200-LB4) を用いた。試験体の長さ方向における中央部の平行な 2 材面に、標点間距離が 1000mm で変位計 (東京測器製、CDP-10) を設置して変形を測定した。両変位の平均を標点間での試験体の変位とした。縦引張り試験の様子を写真 3.3 に示す。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。

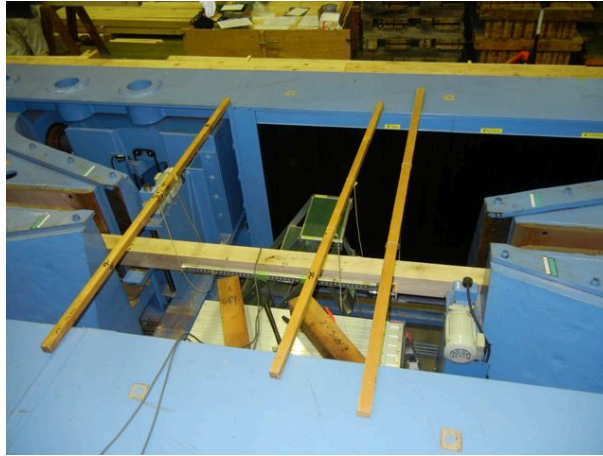


写真 3.3 縦引張り試験の様子

#### 3.1.2.2.4 せん断試験

せん断試験は実大いす型せん断方式により行った。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、図 3.1 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  $90^\circ$  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  $105 \times 105\text{mm}$  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（前川製作所製、A-300-B4）に設置して用い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。

#### 3.1.2.2.5 むり込み試験

む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。両変位計の平均をむり込み変形量とした。むり込み試験の様子を写真 3.4 に示す。試験終了後、むり込み比例限度応力、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。

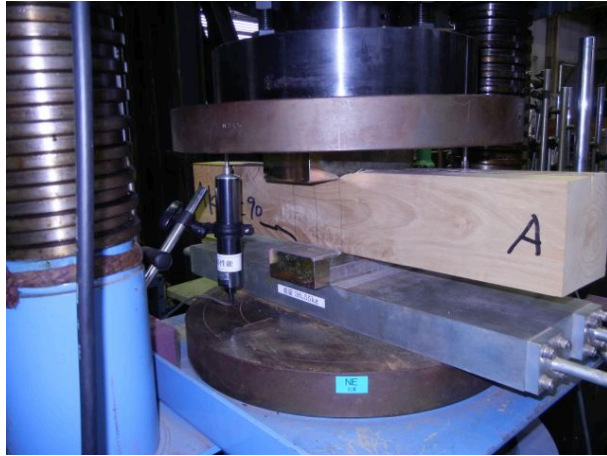


写真 3.4 むり込み試験の様子

### 3.1.3 結果

#### 3.1.3.1 曲げ試験の結果

曲げ試験の結果を表 3.2 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  $29.4\text{N/mm}^2$  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） $F_b=29.4\text{N/mm}^2$  と同等の値を示した。

表 3.2 曲げ試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )
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（表 3.3～3.6 も同様） MC：含水率、 $\rho$ ：試験時の密度、 $E_{fr}$ ：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、 $\sigma_{bp}$ ：曲げ比例限度応力、MOR：曲げ強度

「製材の日本農林規格の目視等級区分構造用製材構造用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表 3.3～3.6 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<sup>2</sup>となり、等級が上がるごとに平均値も上がり、広葉樹材においても目視等級区分が適用できることが示された。



表 3.3 目視等級区分が 1 級の試験体の曲げ試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.4 目視等級区分が 2 級の試験体の曲げ試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.5 目視等級区分が 3 級の試験体の曲げ試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.6 目視等級区分が格別の試験体の曲げ試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )
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

### 3.1.3.2 縦圧縮試験の結果

縦圧縮試験の結果を表 3.7 に示す。縦圧縮強度特性値は 26.3N/mm<sup>2</sup>となり、現行の無等級材の基準強度 $F_c=21.0\text{N/mm}^2$ を上回る値を示した。

表 3.7 縦圧縮試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{cp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
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、 $\rho$ ：試験時の密度、 $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数、 $E_c$ ：縦圧縮ヤング係数、 $\sigma_{cp}$ ：縦圧縮比例限度応力、 $\sigma_c$ ：縦圧縮強度

### 3.1.3.3 縦引張り試験の結果

縦引張り試験の結果を表 3.8 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<sup>2</sup>となり、現行の無等級材の基準強度 $F_t=18.0\text{N/mm}^2$ 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。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ついて、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。しかしながら、含水率と縦引張り強度との関係は、クリを含めた広葉樹材では実験的に明らかになっていないため、この点についてはさらに検討する必要がある。

表 3.8 縦引張り試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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 (表 3.9~3.12 も同様) MC：含水率、 $\rho$ ：試験時の密度、 $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数、 $E_t$ ：縦引張りヤング係数、 $\sigma_{tp}$ ：縦引張り比例限度応力、 $\sigma_t$ ：縦引張り強度

注  $E_t$ 、 $\sigma_{tp}$ 、 $\sigma_t$ 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。

「製材の日本農林規格の目視等級区分構造用製材構造用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。等級ごとの曲げ試験の結果をそれぞれ表3.9～3.12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<sup>2</sup>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上昇することがわかった。

表 3.9 目視等級区分が 1 級の試験体の縦引張り試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.10 目視等級区分が 2 級の試験体の縦引張り試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.11 目視等級区分が 3 級の試験体の縦引張り試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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

表 3.12 目視等級区分が格別の試験体の縦引張り試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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

また、クリの縦引張り試験においては、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、節等の欠点を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な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表 3.13 に示す。また、それぞれの破壊形態の例を写真 3.5～3.7 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こと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。

表 3.13 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%)



写真 3.5 節による破壊



写真 3.6 繊維傾斜による破壊



写真 3.7 無欠点部での破壊

### 3.1.3.4 せん断試験の結果

せん断試験の結果を表 3.14 に示す。せん断強度特性値は  $6.12\text{N/mm}^2$  であり、無等級材の基準強度のクリのせん断基準強度  $3.0\text{N/mm}^2$  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） $\times 4/5 \times 1/2 \times 1/1.5$  で誘導されると考えられ、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定される。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表 3.15 に示す。なお、文献値の下限值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  $600\text{kg/m}^3$  であるため、本試験で用いたクリの試験時の密度が  $543\text{kg/m}^3$  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。

表 3.14 せん断試験の結果

	MC (%)	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\sigma_s$ ( $\text{N/mm}^2$ )
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、 $\rho$ ：試験時の密度、 $\sigma_s$ ：せん断強度

表 3.15 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) ( $\text{kg/m}^3$ )	せん断強度 ( $\text{N/mm}^2$ )		基準強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	下限値/基準強度
			下限値 ( $\text{N/mm}^2$ )	変動係数 (%)		
クリ	85	543	6.12	16.4	3.0	2.0
ベイマツ	50	519	5.79	13.3	2.4	2.4
ヒノキ	40	515	5.73	18.8	2.1	2.7
ベイツガ	49	477	5.42	15.3	2.1	2.6
ベイヒバ	100	514	5.21	13.9	2.1	2.5
スギ	51	414	4.82	13.8	1.8	2.7

文献 ベイヒバ：井道ら、森林総研研究報告、9(3)、125-148、2010、その他の樹種：井道ら、木材学会誌、52、293-302、2006

注 ベイヒバの基準強度は存在しないが、強度試験結果より  $2.1\text{N/mm}^2$  と仮定した。

### 3.1.3.5 むり込み試験の結果

むり込み試験の結果を表 3.16 に示す。む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表 3.17 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。

めり込み基準強度は平均値から誘導されていると考えられるため、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、実大試験から見た現行のクリの基準強度 10.8N/mm<sup>2</sup>は妥当であると考えられる。

表 3.16 めり込み試験の結果

	MC (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{cvp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
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、 $\rho$ :試験時の密度、 $\sigma_{cvp}$ :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

表 3.17 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) (kg/m <sup>3</sup> )	ISO方式によるめり込み強度			基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均値 /基準強度	下限値 /基準強度
			平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)			
クリ	85	543	13.3	9.75	15.0	10.8	1.2	0.9
カラマツ	15	-	9.28	7.77	8.2	7.8	1.2	1.0
ヒバ	31	500	11.1	6.52	17.3	7.8	1.4	0.8
ベイヒバ	100	513	9.48	6.51	17.8	7.8	1.2	0.8
スギ	38	400	8.22	6.37	-	6.0	1.4	1.1
ベイツガ	50	483	9.37	5.03	25.6	6.0	1.6	0.8

文献 カラマツ:伊東ら、木材学会要旨、55、E70945、2005、ヒバ:鈴木ら、木材学会要旨、26、PE009、2006、ベイヒバ:井道ら、森林総研研究報告、9(3):125-148、2010、スギ:田中ら、木材学会要旨、55、E71015、2005、ベイツガ:Ido et al., Bull. of FFPRI, 402:70-76, 2007

注 ベイヒバの基準強度は存在しないが、強度試験結果より 7.8N/mm<sup>2</sup>と仮定した。

### 3.1.3.6 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。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<sup>2</sup>:26.3N/mm<sup>2</sup>:14.1N/mm<sup>2</sup>=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、各強度特性値間の比率は、広葉樹材と針葉樹材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。

### 3.1.4 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適用できることがわかった。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とは若干異なったため、各強度特性値の比率は広葉樹材と針葉樹材とは異なる可能性がある。

ただし、本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。



### 3.2 広葉樹の構造用製材の日本農林規格（目視等級）および基準強度の設定について

木造建築物の構造設計に際して、時刻歴応答計算や限界耐力計算、エネルギー法を適用した場合を除いた全ての場合、建築基準法施行令（以下、「令」と称する）第3章第3節の仕様書規定が適用されるが、令第46条第2項を適用して、S62建設省告示（以下、「建告」と称する）第1898号の構造計算、すなわち許容応力度計算を行えば多くの仕様規定が適用除外される。しかしながら、その際、使用される材料はS62建告第1898号に掲げる日本農林規格（JAS）を適用した製材（含水率15%または20%以下）、集成材、LVL等に限定される。一方、「製材の日本農林規格（以下、製材JAS）」において構造用製材として対象とされているのは針葉樹材のみであり、広葉樹材は対象外となっている。したがって、広葉樹製材の基準強度は無等級材として規定されているが、日本農林規格に対応した基準強度は設定されていない。

そこで、本事業で実施した強度試験によって得られたケヤキ製材およびクリ製材の曲げ・縦圧縮・縦引張り強度（ケヤキ製材は曲げ試験のみ）に基づいて、広葉樹製材の品質基準及びそれに対応した強度特性値（75%信頼水準95%下側許容限界値、基準強度に相当）について検討した。

#### 3.2.1 広葉樹の構造用製材の品質基準

針葉樹を対象とした現行の製材JASの構造用製材には、目視等級区分構造用製材と機械等級区分構造用製材の2種類がある。今回得られた試験結果において、曲げヤング係数と曲げ強度との関係において、ケヤキ製材は一定の相関係数が得られたが、クリ製材においては曲げヤング係数の出現範囲が狭かったこともあり、明確な相関関係がみられなかった。また、広葉樹製材が大量生産されることは予想し難いため、製造工場がグレーディングマシンを導入し、広葉樹材の機械等級区分製材を生産することは考えにくい。そこで、本研究では広葉樹材の目視等級区分構造用製材のみを検討対象とした。

製材JASの目視等級区分構造用製材では、主として梁、桁など曲げ部材としての利用を想定した「甲種構造材」と、主に柱などの圧縮部材としての利用を想定した「乙種構造材」の2種類に分けられ、それぞれの構造材において3つの等級が設定されている。しかし、本事業で得られた強度データは試験体を3つの等級に区分するほど十分な試験体数とは言えないため、品質・歩留りの両面から考慮した結果、現行の乙種構造材2級を基とした1等級とした。

広葉樹製材の品質基準(案)を表3.18に示した。なお、平均年輪幅については、旧版の「木質構造設計規準・同解説(1995年版)」を参考にして、環孔材の年輪幅の極度の減少による密度や強度の低下を考慮し、1mm以上とした。

表 3.18 広葉樹の目視等級区分構造用製材の品質基準 (案)

区分	基準	
節	径比が 40%以下であること。	
集中節	径比が 60%以下であること。	
丸身	20%以下であること。	
貫通割れ	木口	木口の長辺の寸法の 1.5 倍以下であること。
	材面	材長の 1/6 以下であること。
目まわり	木口の短辺の寸法の 1/2 以下であること。	
繊維走行の傾斜比	1 : 8 以下であること。	
平均年輪幅	ケヤキなどの環孔材にあつては 1mm 以上であること。	
腐朽	1 程度の軽い腐れの面積が割れの存する材面の面積の 10%以下であること。 2 程度の重い腐れがないこと	
曲がり	0.5%以下であること。ただし、仕上げ材にあつては、0.2%以下であること。	
狂い及びその他の欠点	顕著でないこと。	

### 3.2.2 広葉樹の構造用製材の強度特性値

3.2.1 で仮設定した品質基準にしたがって、その基準を満足した強度データから強度特性値 (75%信頼水準 95%下側許容限界値、基準強度に相当) を算出した(表 3.19)。なお、強度データから算出したのは曲げヤング係数、曲げ強度の特性値のみで、縦圧縮強度および縦引張り強度の特性値は、3.1.6 に示したクリ製材の各特性値の比率を参考に、ケヤキ、クリの両樹種とも、曲げ強度 : 縦圧縮強度 : 縦引張り強度を 1 : 0.8 : 0.5 として算出した。なお、曲げ試験体の品質区分には、曲げ試験時の荷重点間における最大単独節径比 (40%以下)、最大集中節径比 (60%以下)、繊維傾斜 (1/8 以下) によって実施した。また、全試験体に対する品質基準を満足した割合は、ケヤキの曲げ試験体で 83% (25 体/30 体)、クリの曲げ試験体で 86% (73 体/85 体)、クリの縦引張り試験体 (チャック間の品質) で 69% (59 体/85 体) であった。

表 3.19 本事業で得られた強度データから算出したケヤキ、クリの強度特性値と現行の基準強度及び基準弾性係数

樹種 (曲げ強度の試験体数)	強度特性値					弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
	縦圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	縦引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数		
					平均値	下限値	
ケヤキ (25 体)	26.1	16.3	32.6	-	9.5	7.1	
クリ (73 体)	25.8	16.1	32.2	-	9.8	7.8	
樹種	現行の基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 <sup>*</sup> (kN/mm <sup>2</sup> )		
	$F_c$	$F_t$	$F_b$	$F_s$	$E_0$	$E_{0.05}$	
ケヤキ、クリ	21.0	18.0	29.4	3.0	8.0	5.5	

\* 「木質構造設計規準・同解説」(日本建築学会) より