

論文 (Original article)

CLT 用スギフィンガージョイントラミナの加力方向による 曲げ強度性能の違い

小木曾 純子¹⁾、井道 裕史²⁾、長尾 博文^{2)*}、原田 真樹²⁾、
加藤 英雄²⁾、宮武 敦³⁾、平松 靖³⁾

要旨

「直交集成板の日本農林規格」では、ラミナの曲げヤング係数やたて継ぎラミナの曲げ強度は、平使いの曲げ試験によって格付け検査が実施されている。しかし、ラミナへ負荷される方向でみたとき、CLT の曲げ性能のうち面外曲げには一致するものの、ラミナが縦使い方向で負荷される面内曲げとは一致していない。本研究では、ラミナの強度特性値から推定される CLT の面内曲げ強度の精度向上を目指し、スギフィンガージョイントラミナの曲げ強度性能について平使い方向と縦使い方向とで比較した。その結果、縦使い方向の曲げヤング係数の平均値が平使い方向のそれに比べて約 7% 高く、曲げ強度の平均値は、平使い方向の方が 20% 程度高いことがわかった。そこで、ラミナの平使い方向の曲げヤング係数及び曲げ強度を用いた CLT の面内曲げヤング係数及び曲げ強度推定式を作成し、その検証を行った。その結果、曲げヤング係数、曲げ強度の推定値と実測値がほぼ一致し、本推定法の妥当性が実証された。

キーワード：直交集成板、スギ、フィンガージョイントラミナ、加力方向、面内、曲げ

1. はじめに

クロス・ラミネイティド・ティンバー（直交集成板：以下、CLT）は、国産材の利用拡大が期待できる新たな木材製品として、その利用技術の開発や供給体制の整備などが急速に推進されている。材料強度については、平成 25 年末に制定された「直交集成板の日本農林規格（平成 25 年 12 月 20 日、農林水産省告示第 3079 号）」（農林水産省 2013）（以下、JAS 規格）の CLT の各等級及び構成に対応した基準強度の設定を目的に、現在、様々な強度試験（面外曲げ、面内曲げ、引張り、圧縮、せん断等）が森林総合研究所を中心に大学や公立試験研究機関によって実施されている（森林総合研究所ほか 2016）。その際、特に CLT の曲げ・引張り・圧縮強度については、現行の集成材の基準強度と同様、CLT を構成するラミナ等級の強度特性値から CLT の各強度を推定する方法が提案され、平成 28 年 3 月 31 日に国土交通省から一部の等級及び構成について CLT の基準強度の告示が出された（国土交通省 2016）。

一方、CLT の曲げ性能については、ラミナの積層面に直交して加力する面外曲げ（以下、面外曲げ）、及びラミナの積層面に平行して加力する面内曲げ（以下、面内曲げ）の 2 種類がある。CLT を用いた建築物においては使用される部位によって曲げ荷重が負荷される方向が異なるため、面外曲げ及び面内曲げのい

ずれの強度も構造計算では必要とされる。しかしながら、JAS 規格の格付け検査方法において、ラミナの曲げヤング係数は B 試験、たて継ぎラミナの曲げ強度は C 試験、すなわちいずれの試験方法も平使い方向に負荷されるように規定されており、ラミナへ負荷される方向でみたとき、CLT の曲げ性能のうち面外曲げには一致するものの、ラミナが縦使い方向で負荷される面内曲げとは一致していない。また、一般にラミナは節などの欠点除去や曲がり等の矯正による歩留り向上の目的（森林総合研究所 2004）からフィンガージョイント（以下、FJ）等のたて継ぎを施される場合が多いが、たて継ぎ材のフィンガー形状（垂直型、水平型）による曲げ強度の違いについてはいくつか研究報告（例えば、星・千葉 1973）がみられるものの、たて継ぎラミナそのものについて曲げ強度に関する加力方向の違いの影響を検討した研究報告は見当たらない。

本研究では、ラミナの強度特性値から推定される CLT の強度の精度向上を目指し、CLT 用のスギの FJ ラミナの加力方向による曲げ強度性能の違いについて比較を行った。また、これらの結果からラミナの平使いの曲げ強度特性値から CLT の面内曲げ性能の推定式を作成し、CLT の面内曲げ性能についての既報のデータと比較し、その妥当性について検証した。

原稿受付：平成 28 年 5 月 17 日 原稿受理：平成 28 年 7 月 14 日

1) 林野庁林政部木材利用課（元森林総合研究所）

2) 森林総合研究所構造利用研究領域

3) 森林総合研究所複合材料研究領域

* 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

2. 実験

2.1 試験体の採取

本試験は人工乾燥・モルダー加工されたスギラミナを対象とし、JAS 規格にしたがって、機械等級によって M30（曲げヤング係数 $3.0 \sim 6.0 \text{ kN/mm}^2$ ）及び M60（同 $6.0 \sim 9.0 \text{ kN/mm}^2$ ）に区分してたて継ぎされたラミナ（断面寸法 $30 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ 、材長 4000 mm ）について、それぞれ 30 体及び 54 体を供試材とした。たて継ぎはフィンガー長 15.0 mm の垂直型 FJ で、接着剤は水性高分子ーイソシアネート系樹脂であった。すべてのラミナから、荷重点間に FJ が含まれるように材長を材せいの 23 倍（縦使い試験体（以下、EW 試験体）: 2415 mm 、平使い試験体（以下、FW 試験体）: 690 mm ）とした EW 試験体及び FW 試験体をそれぞれ 1 体ずつ切り出した。すなわち、EW 試験体、FW 試験体のいずれも、試験体数は M30 および M60 について、それぞれ 30 体、54 体であった。

2.2 試験方法

曲げ試験に先立ち、すべての試験体について密度及び縦振動法によるヤング係数を測定した。曲げ試験は、Fig.1 に示したように、JAS 規格にしたがって支点間距離を材せいの 21 倍（EW: 2205 mm 、FW: 630 mm ）とした 3 等分点 4 点荷重方式で実施し、比例限区間における荷重及び試験体中央部のたわみ量からみかけの曲げヤング係数（以下、曲げヤング係数）、最大荷重から曲げ強度を算出した。曲げ試験には、最大容量が 100 kN の材料試験機（ミネベア株式会社製、TCM-10000）を用い、クロスヘッドスピードを $7 \sim 10 \text{ mm/min}$ として载荷した。なお、EW 試験体の曲げ試験には、曲げ载荷時に試験体の横座屈を防止する目的でラテラルサポート（横座屈防止治具）を設置した。試験終了後、すべての試験体について、破壊部近傍から長さ約 20 mm の含水率測定用の試験体を採取し、全乾法により含水率を測定した。

3. 結果と考察

3.1 試験結果

EW 試験体及び FW 試験体の曲げ試験の結果を Table 1 及び Table 2 に、それぞれの試験体について曲げヤング係数と曲げ強度との関係を Fig. 2 に示した。それぞれの試験体間において、縦振動法によるヤング係数の平均値はほぼ等しいにもかかわらず、曲げヤング係数は EW 試験体の平均値が FW 試験体のそれに比べて約 7% 高い結果となった。一般的な木取り方法で採材されるラミナは板目板となる場合が多く、長辺方向でみたとき、両材縁部はラミナ中心部に比べて髄からの距離が長いいためヤング係数がやや高い傾向がある。したがって、ラミナの長辺方向と加力方向とが直交する FW 試験体が髄から材縁部までが一樣に曲げ応力が負荷されるのに対して、長辺方向に沿って負荷される EW 試験体ではその両材縁部が曲げ試験時に最大の引張り応力及び圧縮応力が生じる位置と一致し、FW 試験体よりも曲げヤング係数が高くなった（田中ら 2005）と推察される。一方、曲げ強度は、FW 試験体の平均値が EW 試験体のそれに比べて 20% 程度高い結果となった。この結果は、枠組壁工法構造用たて継ぎ材（206 材、断面寸法: $38 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ）を対象として曲げ試験を実施した報告（全国木材協同組合連合会 2011）とほぼ同様の結果であり、FJ の形状に対する加力方向の違い（滝本ら 2015）や FW 試験体が EW 試験体よりも材せいが小さいことによる寸法効果などが影響しているものと推察される。また、試験体数として十分とは言えないものの、それぞれの等級及び試験条件下での曲げ強度について確率分布（正規分布、対数正規分布）によるパラメータ及びノンパラメトリック手法により 75% 信頼水準における 95% 下側許容限界値（下限値）を算出した。それぞれの試験体の正規分布による曲げ強度下限値を等級ごとに比較すると、FW 試験体の曲げ強度に対する EW 試験体のその比率（EW / FW）は M30、M60 でそれぞれ 0.78、0.73 となり、平均値の違い（それぞれ 0.81、0.84）以上に大きな差異が認められた。

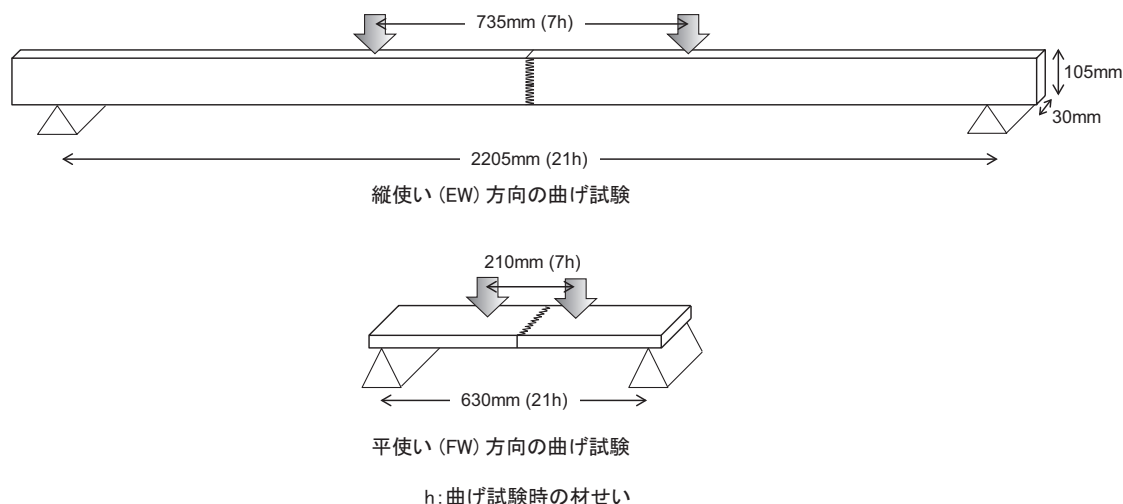


Fig. 1. ラミナの曲げ試験方法

Table 1. EW 試験体の曲げ試験結果

ラミナ 種類	試験 体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m ³)	縦振動法による ヤング係数 (kN/mm ²)	みかけの曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度下限値※ (N/mm ²)
M30	30	平均値	9.15	384	6.79	6.43	26.8	正規 17.4
		最小値	7.97	334	5.16	5.20	16.1	対数 18.3
		最大値	12.1	441	8.27	7.90	41.4	NPE 16.2
		変動係数(%)	8.97	6.82	12.0	11.4	18.8	
M60	54	平均値	9.58	428	9.00	8.51	35.9	正規 23.7
		最小値	7.96	385	6.99	6.43	18.5	対数 24.8
		最大値	15.2	491	10.7	10.2	55.1	NPE 26.4
		変動係数(%)	11.8	6.15	9.24	10.1	18.9	

※正規: 正規分布による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

対数: 対数正規分布による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

NPE: ノンパラメトリック法による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

Table 2. FW 試験体の曲げ試験結果

ラミナ 種類	試験 体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m ³)	縦振動法による ヤング係数 (kN/mm ²)	みかけの曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度下限値※ (N/mm ²)
M30	30	平均値	8.97	373	6.72	5.98	33.2	正規 22.4
		最小値	7.61	311	5.64	4.70	24.6	対数 24.1
		最大値	12.0	458	8.00	7.86	48.4	NPE 24.7
		変動係数(%)	10.9	8.97	11.1	13.1	17.4	JAS 14.5
M60	54	平均値	9.18	416	8.88	7.97	42.5	正規 32.6
		最小値	7.67	371	7.21	6.18	31.5	対数 33.3
		最大値	11.0	489	10.2	10.6	53.9	NPE 32.4
		変動係数(%)	9.43	6.03	7.57	10.6	12.9	JAS 20.0

※正規: 正規分布による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

対数: 対数正規分布による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

NPE: ノンパラメトリック法による下限値(75%信頼水準における95%下側許容限界値)

JAS: JAS規格に規定された下限値

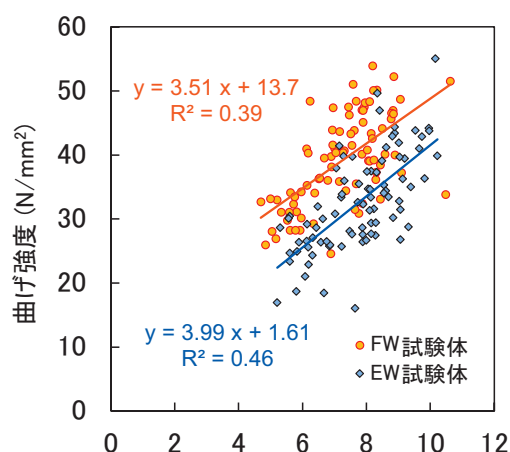


Fig.2. EW 試験体及びFW 試験体の曲げヤング係数と曲げ強度との関係

3.2 CLT 面内曲げ性能の推定

既述したように、JAS 規格における 2 種類のラミナの曲げ試験ではいずれも平使用による試験が採用され、それぞれ基準値が規定されている。そこで、平使用の曲げ強度性能から、ラミナが縦使用される CLT の面内曲げ性能を推定することを試みた。具体的には、3.1 で得られたラミナの FW 試験体の曲げヤング係数及び曲げ強度の M30 と M60 のデータをまとめた平均値に対する EW 試験体の平均値の比 (EW/FW)、すなわち 1.07、0.83 を用いて、その値から CLT の曲げヤング係数及び曲げ強度を推定する式を作成し、その検証を行った。

強軸方向ラミナを m プライ、弱軸方向ラミナを n プライで構成される CLT の面内方向における曲げヤング係数及び曲げ強度を推定するための算出式を式 (1) 及び式 (3) に示した。なお、ラミナの繊維に直交方向の曲げヤング係数は、CLT Handbook (FPInnovations 2011) にしたがって繊維に平行方向の曲げヤング係数の 1/30 とした。また、CLT の面内曲げ試験において荷重たわみ曲線が試験開始から破壊するまでほぼ直線的

であったこと、及び弱軸方向ラミナが CLT の変形に対して寄与するか否かに関わらず破壊たわみは同じであると仮定し、CLT の面内方向における曲げ強度は、強軸方向ラミナのみ強度から算出した曲げ強度に、強軸方向ラミナのみ曲げヤング係数より算出した CLT の曲げヤング係数推定値 (式 (2)) に対する、弱軸方向ラミナの曲げヤング係数も考慮した CLT の曲げヤング係数推定値 (式 (1)) の比率 ($\frac{E_{CLT}}{E'_{CLT}}$) を乗じた値 (式 (3)) とした。

$$E_{CLT} = \sum_{i=1}^m (E_{lama_i} \times 1.07 \times A_{lama_i}) + \sum_{j=1}^n (E_{lami_j} \times 1.07 \times 1/30 \times A_{lami_j}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E'_{CLT} = \sum_{i=1}^m (E_{lama_i} \times 1.07 \times A_{lama_i}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{bCLT} = \sum_{i=1}^m (\sigma_{blama_i} \times 0.83 \times A_{lama_i}) \times \frac{E_{CLT}}{E'_{CLT}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

E_{lama} : 強軸方向ラミナの曲げヤング係数 (平使い・強軸方向の曲げヤング係数)

E_{lami} : 弱軸方向ラミナの曲げヤング係数 (平使い・強軸方向の曲げヤング係数)

A_{lama} : CLT の全断面積に対する強軸方向ラミナの断面積割合

A_{lami} : CLT の全断面積に対する弱軸方向ラミナの断面積割合

σ_{blama} : 強軸方向ラミナの曲げ強度 (平使い・強軸方向の曲げ強度)

1.07: ラミナの曲げヤング係数の EW/FW 比

0.83: ラミナの曲げ強度の EW/FW 比

E_{CLT} : 強軸及び弱軸方向ラミナの曲げヤング係数より算出した CLT の面内方向における曲げヤング係数の推定値

E'_{CLT} : 強軸方向ラミナのみ曲げヤング係数より算出した CLT の面内曲げ方向における曲げヤング係数の推定値

σ_{bCLT} : CLT の面内方向における曲げ強度の推定値

提案式の適合性を検証するため、既報 (森林総合研究所ほか 2015) の結果によって得られたラミナの平使い方向の曲げ試験結果 (M30、M60 の曲げヤング係数の平均値: 5.58 kN/mm²、7.09 kN/mm²、M30、M60 の曲げ強度の平均値: 31.1 N/mm²、38.4 N/mm²) を用いて、スギ FJ ラミナで構成された CLT の面内方向における曲げヤング係数及び曲げ強度の推定を行った。なお、本検証に使用した CLT の強度等級は Mx60、ラミナは幅はぎ未接着、ラミナ構成は 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライの 5 種類、面内曲げの加力は強軸及び弱軸方向の 2 種類であった (森林総合研究所ら 2015)。CLT の面内方向に

おける曲げヤング係数及び曲げ強度について、推定値と実測された平均値との関係をそれぞれ Fig.3、Fig.4 に示した。曲げヤング係数、曲げ強度のいずれにおいても推定値と実測値がほぼ一致しており、本推定法の妥当性が実証された。

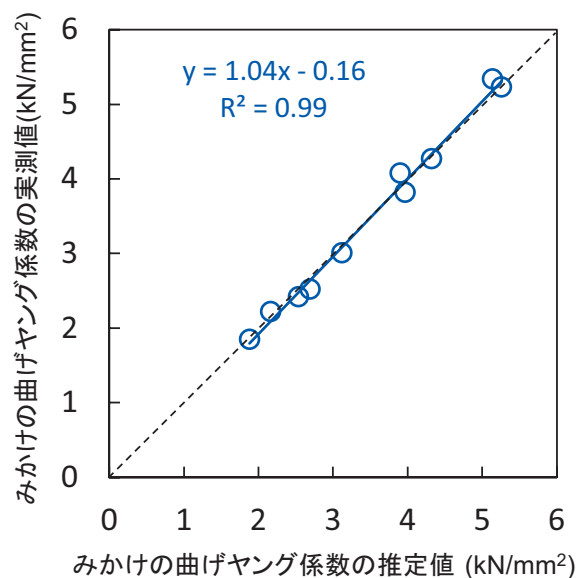


Fig.3. CLT の面内曲げにおける曲げヤング係数の推定値と実測値との比較

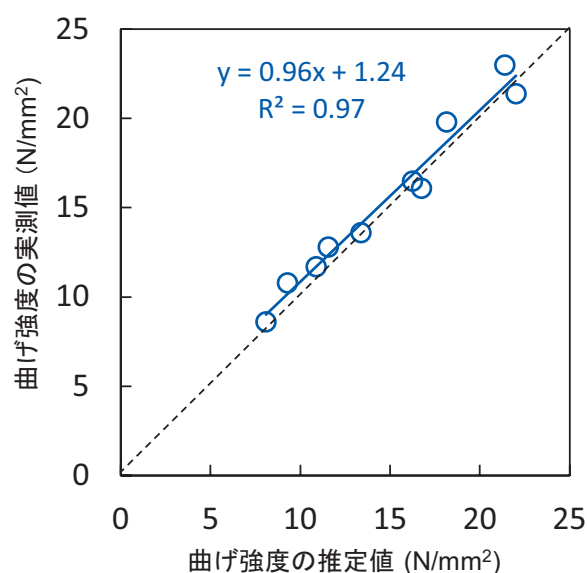


Fig.4. CLT の面内曲げにおける曲げ強度の推定値と実測値との比較

4. おわりに

本研究では、ラミナの強度特性値から推定される CLT 強度の精度向上を目指し、CLT 用スギのフィンガージョイントラミナの加力方向による曲げ強度性能の違いを明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて、ラミナの平使いの曲げ特性値を用いた CLT の面内曲げ性能の推定式を作成し、CLT の面内曲げ性能についての既報のデータと比較し、その妥当性について検証を行った。以下のことが明らかになった。

(1) スギ FJ ラミナの曲げ強度性能について平使い方向と縦使い方向とで比較した結果、縦使い方向の曲げヤング係数の平均値が平使い方向のそれに比べて約 7% 高い結果となった。一方、曲げ強度の平均値は、平使い方向の方が 20% 程度高い結果となった。

(2) ラミナの平使い方向の曲げヤング係数及び曲げ強度を用いた CLT の面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強度推定式を作成し、その検証を行った。その結果、曲げヤング係数、曲げ強度の推定値と実測値がほぼ一致しており、本推定法の妥当性が実証された。

なお、今回 3.1 で得られた FJ ラミナの FW 試験体の曲げヤング係数及び曲げ強度に対する EW 試験体のそれぞれの比 (EW/FW) はラミナの樹種・寸法形状 (幅/厚さ比) や FJ 形状等に影響されると推察される。また、推定式の適合性の検証に用いた試験データは幅はぎ未接着のラミナから構成された CLT 試験体による試験結果であり、今後、条件の異なるラミナ試験体によるデータ収集や幅はぎ接着ラミナを使用した CLT への適合性について検証していく必要がある。

謝辞

本研究は平成 26 年度林野庁委託事業「CLT 等新たな製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進」により実施した。また、本実験作業に協力いただいた岩手県林業技術センター後藤幸広氏に感謝する。

引用文献

- FPInnovations (2011) “CLT Handbook (3) Structural”, 62.
- 星 通・千葉 保人 (1973) ミニフィンガージョイントの形状と性能. 木材工業, 28(8), 23-25.
- 国土交通省 (2016) “建築基準法施行令第 94 条及び 99 条に基づき、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 年国土交通省告示第 1024 号) の一部改正”. 平成 28 年 3 月 31 日国土交通省告示第 562 号.
- 農林水産省 (2013) “直交集成板の日本農林規格”. 平成 25 年 12 月 20 日農林水産省告示第 3079 号.
- 森林総合研究所 (2004) たて継ぎ加工. “改訂 4 版 木材工業ハンドブック”. 森林総合研究所編, 丸善, 442.
- 森林総合研究所・北海道立総合研究機構・日本 CLT 協会 (2015) “平成 25 年度補正林野庁委託事業「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進 (強度データの収集・分析)」成果報告書”. 19-27, 112-114.
- 森林総合研究所・秋田県立大学・北海道立総合研究機構・日本 CLT 協会・日本木材加工技術協会 (2016) “平成 27 年度林野庁委託事業「CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業 (強度データ収集)」成果報告書”, 175pp.
- 滝本 裕美・松元 浩・石田 洋二 (2015) フィンガージョイントでたて継ぎした石川県産スギ接着重ね梁の製造と曲げ強度性能. 第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM), D17-P-S11.
- 田中 洋・大熊 幹章・有馬 孝禮 (2005) スギ厚板を木ダボで接合した合わせ材の力学的性能 (第 1 報). 木材学会誌, 51 (4), 249-256.
- 全国木材協同組合連合会 (2011) “平成 21 年度林野庁補助事業「2 × 4 住宅部材の開発事業」成果報告書”, 343-390.

Difference of bending performance by loading directions using sugi finger-jointed laminae for Cross Laminated Timber

Junko OGISO¹⁾, Hirofumi IDO²⁾, Hirofumi NAGAO^{2)*}, Masaki HARADA²⁾,
Hideo KATO²⁾, Atsushi MIYATAKE³⁾ and Yasushi HIRAMATSU³⁾

Abstract

In accordance with the “Japanese Agricultural Standard for Cross Laminated Timber,” the bending Young’s modulus of laminae and the bending strength of finger-jointed laminae are graded by a bending test in a flat-wise direction. When a Cross Laminated Timber (CLT) was loaded in an out-of-plane direction, laminae in the CLT are loaded in a flat-wise direction and this direction matches with the direction of the bending test for the laminae. In contrast, when a CLT was loaded in an in-plane direction, laminae in the CLT are loaded in an edge-wise direction and this direction does not match with the direction of the bending test for the laminae. This study assessed the improvement in the accuracy of in-plane bending strength of CLT and compared the bending strength in flat- and edge-wise directions. The results showed that the average of Young’s modulus of sugi finger-jointed laminae in the edge-wise direction was 7% higher than that in the flat-wise direction, while the average of the bending strength of sugi finger-jointed laminae in the flat-wise direction was 20% higher than that in the edge-wise direction. Using bending Young’s modulus and bending strength of laminae in the flat-wise direction, an equation for bending Young’s modulus and bending strength of CLTs was derived and verified. Consequently, the estimated value of bending Young’s modulus and bending strength was well fitted with that of the measured value, and this estimation was also validated.

Key words : Cross laminated timber, sugi, finger-jointed lamina, loading direction, in-plane, bending

Received 17 May 2016, Accepted 14 July 2016

1) Wood Utilization Division, Forest Policy Planning Department, Forestry Agency(Former Forestry and Forest Products Research Institute)

2) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) Department of Wood-based Materials, FFPRI

* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: hn0829@affrc.go.jp