

論文 (Original article)

層構成とラミナの等級の違いがスギ CLT の面内方向の曲げヤング係数と曲げ強さに及ぼす影響

平松 靖^{1)*}、宮武 敦¹⁾、玉置 教司²⁾、新藤 健太¹⁾、
井道 裕史³⁾、長尾 博文³⁾、原田 真樹³⁾、小木曾 純子⁴⁾

要旨

スギを用いたクロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) について、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方向が、ラミナの積層接着面に平行方向 (面内方向) の曲げヤング係数、曲げ強さに及ぼす影響を明らかにするために、強度等級を Mx60、層構成を 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 構成、外層のラミナの方向を長辺方向に対して平行方向 (強軸方向)、直交方向 (弱軸方向) の 2 方向とした 10 シリーズの試験体を、幅 105 mm × 厚さ 30 mm のラミナ (ラミナ同士の幅はぎはしていない) を用いて作製し、縦振動法及び曲げたわみ振動法 (T. G. H. 法) を用いて動的なヤング係数の測定をした後、面内方向の曲げ試験に供した。その結果、以下のことが明らかになった。(1) CLT の面内方向の曲げヤング係数、曲げ強さは、層構成、ラミナの等級、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合に影響をうける、(2) ラミナの曲げヤング係数、曲げ強さから CLT の面内方向の曲げヤング係数、曲げ強さをおおよそ推定可能である、(3) CLT の面内方向の静的な曲げヤング係数は、動的な測定方法により推定することが可能である、(4) CLT の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さの相関は高い、(5) 破壊形態は強軸方向のプライの引張り側にあるフィンガージョイントを含むものが多く、試験体の上部まで破断するものが多かった。

キーワード：直交集成板、スギ、面内、曲げ、層構成、強度等級

1. はじめに

クロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) は 1996 年にドイツとオーストリアで開発され、以来、欧州では建築構造部材として中層集合住宅や学校、高齢者用住宅、商業用建築物に広く普及している (武川 2010)。欧州では 2005 年に CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure, European Technical Assessments (ETA) 2005) が、2015 年に欧州規格 (European committee for standardization 2015) が制定された。北米では 2011 年に ANSI/APA 規格 (APA - The Engineered Wood Association 2011) が制定され、さらに CLT の構造設計、耐火設計、振動特性、音伝達、建物外皮、環境性能を網羅した CLT Handbook (FPIInnovations 2011) が出版される等、CLT の普及に向けた制度が整えられてきた。

日本国内では、1990 年から 1993 年に実施された農林水産技術会議の特別研究において、大架構を構成する床版等へ利用するための大断面部材の開発を目的として、厚さ 20 mm、33 mm のひき板を幅方向にならべ、それらを直交方向に 3 層、あるいは 5 層積層接着させ

た材料 (直交積層板) について、寸法安定性の評価、FRP を用いた接合について検討された (藤井・宮武 1995)。また、スギ中径木を利用した意匠性も有した仕上げ材料となり得て、耐力壁、剛床を構成する部材となる構造用面材の開発を目的として、厚さ 12 mm 程度のひき板を幅はぎし、幅はぎ板を直交方向に 3 枚積層接着したスギ 3 層クロスパネル及びその製造機械の開発が行われ (社団法人全国木工機械工業会 1998, 1999, 2000)、優良木質建材認証 (AQ 認証) において「床用 3 層パネルの品質性能試験の試験項目、試験方法及び判定基準」(財団法人日本住宅・木材技術センター 1999) が定められたほか、壁倍率の大臣認定 (建設省 静住指発第 6 号 2000) を取得した企業もある。曲げ強度性能、耐力壁や床利用のための研究、寸法安定性、温度特性に関する研究 (池田ら 2000, 朴ら 2001, 2002, 2005, 内迫ら 2002, 川上ら 2005a, b, 2007) も進められ、スギだけでなく、内層にスギ、外層にヒノキやアカマツを使用した 3 層クロスパネルの曲げ強度特性についても検討がなされている (後藤ら 2014)。

日本国内において欧州のように建物の主要構造部に

原稿受付：平成 28 年 11 月 2 日 原稿受理：平成 29 年 7 月 19 日

1) 森林総合研究所 複合材料研究領域

2) 愛媛県農林水産研究所林業技術センター

3) 森林総合研究所 構造利用研究領域

4) 林野庁林政部木材利用課

* 森林総合研究所 複合材料研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

CLT を利用することについては、“木の家づくりから林業再生を考える委員会”（国土交通省住宅局）第4回（2010年6月30日）においてCLTが紹介されたのを一つの契機とし、それ以降、産学官が連携した材料規格や構造設計法などの整備に向けた取り組みが急ピッチで進められ（宮武 2013）、接着性能の評価（例えば、森林総合研究所 2014）、材料強度データの整備（例えば、森林総合研究所ほか 2015）、接合部性能の検証（例えば、木構造振興株式会社 2012）等がプロジェクトや事業で実施された。2013年にCLTを対象とする直交集成板の日本農林規格（農林水産省 2013）が制定され、ラミナの強度等級区分、直交集成板の層構成、強度等級等に関する基準が示され、2016年にCLT材料の品質（国土交通省 2016a）及び強度（国土交通省 2016b）、CLTを用いた建築物の一般設計法（国土交通省 2016c）に関して建築基準法に基づく告示が公布・施行された。

CLTはひき板（ラミナ）をその繊維方向を直交させ積層接着した材料であるため、荷重を受ける方向、ラミナの向き、ラミナの強度等級、層構成によってその強度特性は異なると考えられる。CLTを壁などの鉛直構面に使用して開口部を設けた場合、CLTは、はりやまぐさとして使用される。そのため、ラミナの積層接着面に平行方向（面内方向）の荷重に対するCLTの強度特性を明らかにする必要がある。Flaig and Blass（2014）は厚さの異なるノルウェースプルース（*Picea abies*）ラミナで構成されたCLTの面内方向の曲げ強さに関して、長さ方向のラミナの強度に対する直交層の補強効果、強軸方向の層数やせいの方向のラミナの枚数の影響、シミュレーションによる検討を行った。平松ら（2013）は全層にスギ（*Cryptomeria japonica*）を用いた5層5プライ、7層7プライの同一等級構成、異等級構成CLTの面内方向の曲げ試験（面内曲げ試験）を行い、CLT試験体の長さ方向に配置されたラミナが主としてCLTの強度性能に寄与し、それらのラミナの強度性能と層数から、CLTの面内曲げ強度特性をおおむね推定できるとしている。しかしながら、ラミナの等級区分やラミナの等級構成は直交集成板の日本農林規格に従ったものではなかった。また、平松ら（2014）は全層にスギ、及び外層にヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）、内層にスギを用いた5層5プライのCLTを直交集成板の日本農林規格に基づいて作製し、CLT試験体の長さ方向に配置されたラミナが主としてCLTの強度性能に寄与すること、外層の強軸方向に強度性能の高いラミナを配置することにより、CLTの面内及び面外方向の強度性能を向上させられること、ラミナの強度性能からCLTの面内曲げ強度性能をおおむね推定できるが、弱軸方向の強度性能についてはさらに検討が必要であることを明らかにした。

このように国産材を用いたCLTの面内方向の曲げ強度特性に関しては、5層5プライ、7層7プライの2種

類の構成についてしか検討されておらず、特に直交集成板の日本農林規格に従ったものは5層5プライしか検討されていない。そこで本研究では、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方向が面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さに及ぼす影響を検討することを目的として、直交集成板の日本農林規格に従って、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種類のラミナ構成のスギCLTを作製し、面内方向の曲げ試験（面内曲げ試験）を実施した。

2. 試験体及び試験方法

2.1 試験体の作製

連続式グレーディングマシンを用いてスギラミナの曲げヤング係数の長さ方向の平均値を測定し、測定された曲げヤング係数（ E_{gm} ）が6.0～9.0 kN/mm²のラミナを直交集成板の日本農林規格における強度等級M60A、2.5～6.0 kN/mm²のラミナをM30Aとして区分した。強度等級区分したラミナを垂直型フィンガージョイント（フィンガー長さ15.0 mm）によってたて継ぎした後、幅105 mm×厚さ30 mmに仕上げた。たて継ぎ用の接着剤には、水性高分子ーイソシアネート系樹脂接着剤（株式会社オーシカ製 主剤MK200、硬化剤H-30）を用いた。

たて継ぎしたスギラミナを用いて、Fig. 1に示すCLTパネルを作製した。強度等級は外層にM60Aのラミナ、内層にM30Aのラミナを用いた直交集成板の日本農林規格におけるMx60とし、層構成は、3層3プライ（パネル寸法：厚さ90 mm×短辺1995 mm×長辺6030 mm）、3層4プライ（パネル寸法：厚さ120 mm×短辺2110 mm×長辺6030 mm）、5層5プライ（パネル寸法：厚さ150 mm×短辺2310 mm×長辺6030 mm）、5層7プライ（パネル寸法：厚さ210 mm×短辺2625 mm×長辺6030 mm）、7層7プライ（パネル寸法：厚さ210 mm×短辺2625 mm×長辺6030 mm）の5構成とし、外層のラミナの方向を長辺方向に対して平行（強軸方向）、長辺方向に対して直交方向（弱軸方向）の2方向とした計10シリーズのCLTパネルをそれぞれ3枚、銘建工業株式会社にて作製した。CLTパネルの積層接着時の圧縮圧力は、3層3プライ及び3層4プライについては0.6 N/mm²、その他の構成については0.8 N/mm²とし、圧縮時間は層構成によらず40分とした。ラミナの積層接着には水性高分子ーイソシアネート系樹脂接着剤（アイカ工業株式会社製 主剤AUX160、硬化剤AUH16）を用いた。なお、ラミナの幅方向の接着（幅はぎ）は行わなかった。

各CLTパネルから、積層方向の厚さはパネル寸法のままで、短辺方向（試験体の高さ）300 mm、長辺方向（試験体の長さ）6030 mmの試験体を2体切り出し、各シリーズについて計6体の試験体を準備した。各シリー

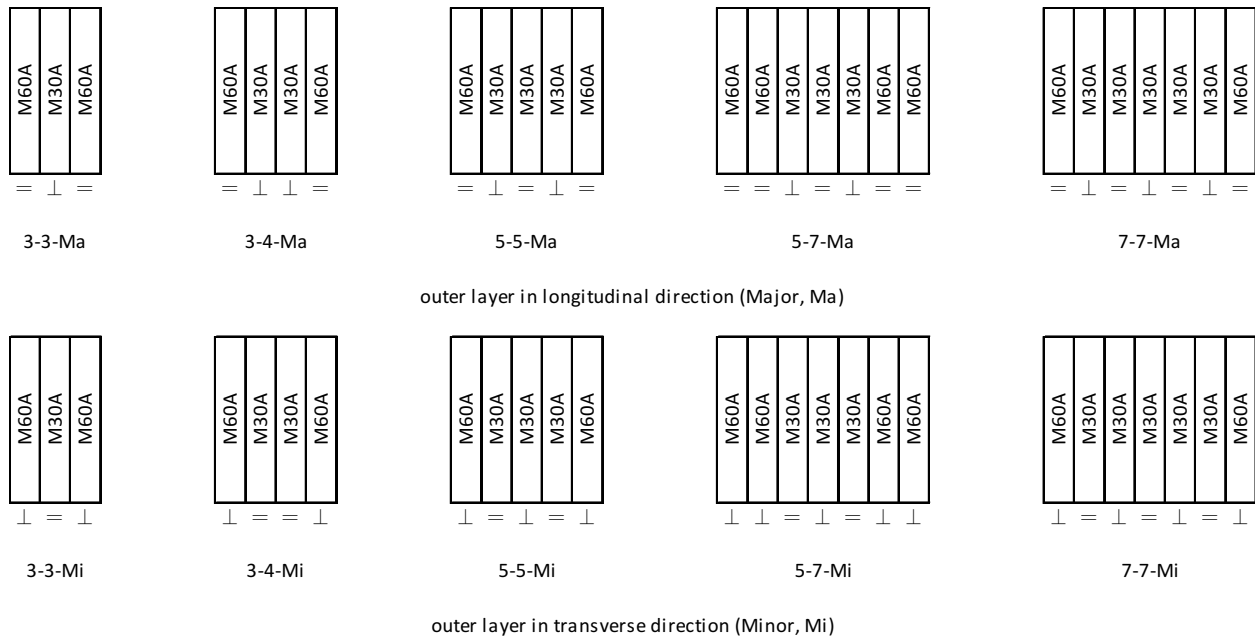


Fig. 1. CLT パネルの層構成

Layups of the CLT panels

Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1

= : layer in longitudinal direction

⊥ : layer in transverse direction

Table 1. CLT試験体の寸法

Dimensions of CLT specimens

Abbreviated name	Layup	Direction of outer layers	Thickness (mm)	Beam Depth (mm)	Length (mm)
3-3-Ma	3-layer 3-ply	Major	90	300	6030
3-3-Mi		Minor			
3-4-Ma	3-layer 4-ply	Major	120	300	6030
3-4-Mi		Minor			
5-5-Ma	5-layer 5-ply	Major	150	300	6030
5-5-Mi		Minor			
5-7-Ma	5-layer 7-ply	Major	210	300	6030
5-7-Mi		Minor			
7-7-Ma	7-layer 7-ply	Major	210	300	6030
7-7-Mi		Minor			

"Major" corresponds to the general direction of the grain, wherein the outer layer is in longitudinal direction of the CLT.

"Minor" corresponds to the general direction of the grain, wherein the outer layer is in transverse direction of the CLT.

ズの試験体の寸法を Table 1 に示す。なお、各試験体の高さ方向の端部の切り出し位置はラミナの幅方向のほぼ中央とした。

2.2 非破壊試験

縦振動法（財団法人日本住宅・木材技術センター 2011）により試験体の縦方向ヤング係数（ E_r ）を、Timoshenko のたわみ理論に基づく Goens-Hearmon 回帰法による曲げたわみ振動法（T. G. H. 法）（財団法人日本住宅・木材技術センター 2011）により、試験体のラミナの積層面に平行方向（面内方向）の曲げヤング

係数（ E_{t-h} ）とせん断弾性係数（ G_{t-h} ）、及び積層面に直交方向（面外方向）の曲げヤング係数（ E_{t-v} ）とせん断弾性係数（ G_{t-v} ）を求めた。両測定法において、共振周波数は高速フーリエ変換（FFT）コンパレータ（株式会社小野測器製 CF-4500）を用いて求め、縦振動法については 1 次の共振周波数を、T. G. H. 法については 1 ～ 9 次の共振周波数のうち、明確に判別できた周波数を用いて各ヤング係数、弾性係数を求めた。ただし、3 層 3 プライ及び 3 層 4 プライの弱軸方向の試験体については、T. G. H. 法による測定において、面外方向での共振周波数の判別が困難であったため、 E_{t-v} と G_{t-v} は算出しなかった。

2.3 面内曲げ試験

面内曲げ試験の概略を Fig. 2 に、試験の様子の一例を Fig. 3 に示す。試験は、最大容量が 200 kN の実大強度試験機（株式会社東京衡機製造所製）を用いて、3 等分点 4 点荷重方式で実施した。全スパンは試験体の高さ 300 mm の 18 倍の 5400 mm とし、荷重点間距離は 1800 mm とした。試験機の荷重点幅は 150 mm、支点の幅は 180 mm であった。全スパン中央部のたわみは、試験体の長さ及び高さの中央に L アングルをビス留めし、試験体の両側面でそれぞれ変位計（株式会社東京測器研究所製 SDP-200D あるいは CDP-100）の測定子を L アングルに上部から接触させて測定した。見かけの曲げヤング係数（ E_{a-h} ）は、最大荷重の 10 ～

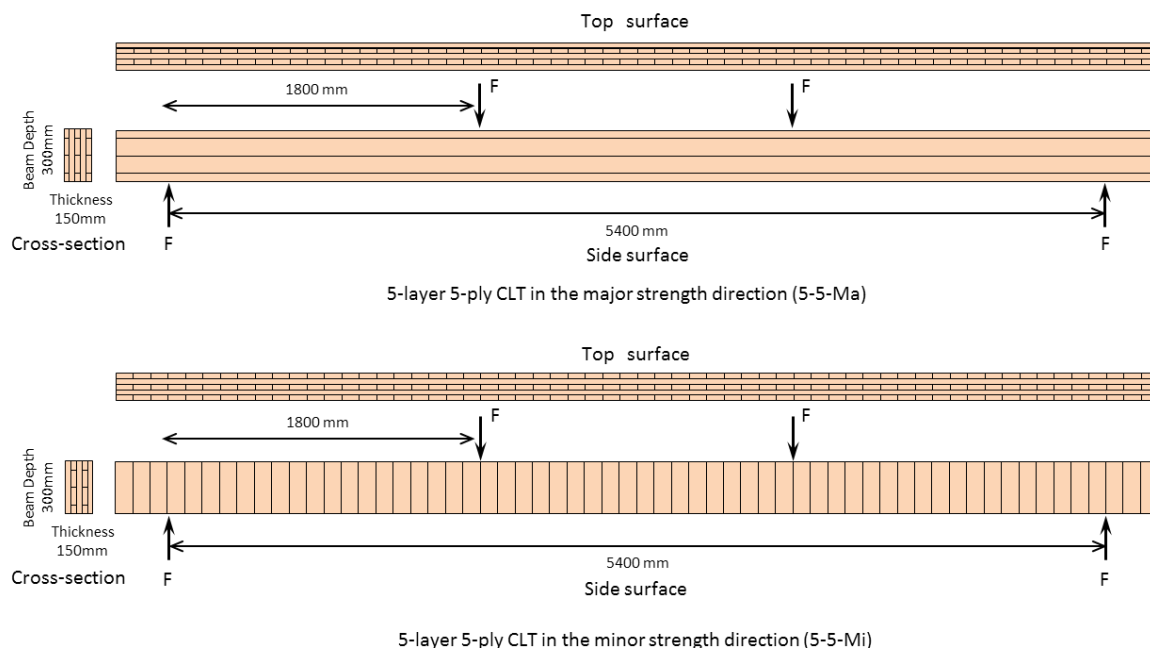
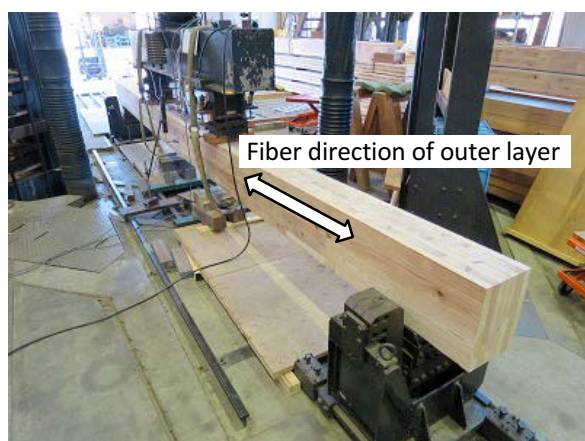


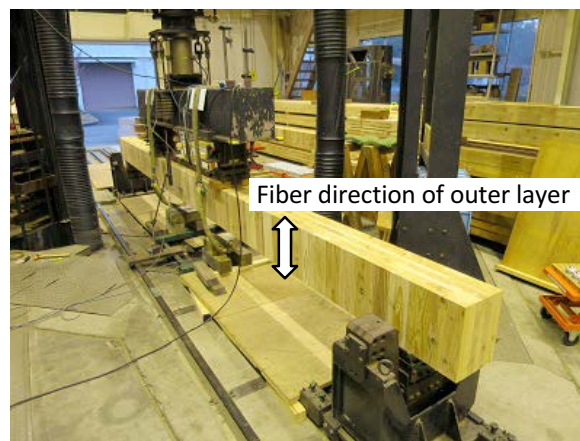
Fig. 2. CLT 試験体の面内曲げ試験（5層5プライの例）

In-plane bending test of the CLT specimens (Examples of 5-layer 5-ply CLT specimens)

Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1



7-layer 7-ply CLT in the major strength direction (7-7-Ma)



5-layer 7-ply CLT in the minor strength direction (5-7-Mi)

Fig. 3. CLT 試験体の面内曲げ試験の様子

Examples of in-plane bending test of the CLT specimens

Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1

40% の範囲における荷重と全スパン中央部のたわみとの関係から求め、最大荷重から曲げ強さ (σ_{b-h}) を算出した。また、試験体の荷重点間上部中央にスパン 1000 mm のはかま型治具を設置して、その中央の相対変位を変位計（株式会社東京測器研究所製 CDP-10）で測定し、最大荷重の 10 ~ 40% の範囲における荷重と相対変位との関係から真の曲げヤング係数 (E_{true-h}) を求めた。なお、試験時の荷重、たわみ、相対変位は静ひずみ測定器（株式会社東京測器研究所製 TDS-303）

を用いて 1 秒間隔で収録した。試験後、破壊部の近傍から長さ方向に約 30mm の材を切り出し、全乾法で含水率を求めた。なお、非破壊試験、面内曲げ試験による各係数を求める際には試験体の全断面積を用いた。

2.4 CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの推定

CLT パネルの製造に使用したラミナと同じロットの垂直型フィンガージョイントラミナの平使い（FW）方

向の曲げ試験の結果、M60A ラミナの見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ 7.09 kN/mm^2 、 38.4 N/mm^2 、M30A ラミナの見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ 5.58 kN/mm^2 、 31.1 N/mm^2 であった（森林総合研究所ほか 2015）。これらの値を用いて、既報（平松ら 2013, 2014）と同じ式（式 1、式 2）により、CLT の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さを推定した。その際、フィンガージョイントラミナの FW 方向に対する縦使い（EW）方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの比（ $K_{e\text{-edge}}$ 、 $K_{s\text{-edge}}$ ）は、幅 140 mm × 厚さ 38 mm （206 材）のスギフィンガージョイント材の FW 方向、EW 方向の曲げ試験結果（全国木材協同組合連合会 2011）を参考にして、それぞれ 0.95、0.80 とした。求めた推定値と実験値を比較した。

（CLT 試験体の見かけの曲げヤング係数）＝（CLT 試験体の強軸方向の各等級のラミナの FW 方向の見かけの曲げヤング係数の平均値）×（強軸方向の各等級のラミナの全断面積に占める割合）× $K_{e\text{-edge}}$
（式 1）

（CLT 試験体の曲げ強さ）＝（CLT 試験体の強軸方向の各等級のラミナの FW 方向の曲げ強さの平均値）×（強軸方向の各等級のラミナの全断面積に占める割合）× $K_{s\text{-edge}}$
（式 2）

ここで、 $K_{e\text{-edge}}=0.95$ 、 $K_{s\text{-edge}}=0.80$ である。

3. 結果と考察

3.1 非破壊試験結果

試験体の密度及び非破壊試験の結果を Table 2 に示す。強軸方向の試験体においては、密度、縦振動法によるヤング係数（ E_{fr} ）、T. G. H. 法による面内方向の曲げヤング係数（ E_{t-h} ）、面外方向の曲げヤング係数（ E_{t-v} ）、面内方向のせん断弾性係数（ G_{t-h} ）、面外方向のせん断弾性係数（ G_{t-v} ）は、3 層 3 プライ構成の G_{t-v} を除いて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、 E_{fr} と E_{t-h} はほぼ同じ値であった。一方、 E_{t-v} は E_{t-h} よりも高い値となった。外層のラミナの強度等級が高く、変形が生じにくいことが影響していると考えられる。 G_{t-h} は G_{t-v} よりも高く、層構成による差はあまり見られなかった。同様に G_{t-v} も層構成による差はあまり見られなかった。

弱軸方向の試験体においては、密度、 E_{fr} 、 E_{t-h} 、 E_{t-v} 、 G_{t-h} 、 G_{t-v} は 5 層 5 プライ構成の G_{t-h} 、5 層 7 プライ構成の G_{t-v} をのぞいて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、強軸方向の試験体と同様に E_{fr} と E_{t-h} はほぼ同じ値であった。 E_{t-v} は E_{t-h} より低い値となった。外層ラミナが長さ方向に対して直交して配置されており、変形しやすかったためと思われる。 G_{t-h} は強軸方向の試験体に比べて、各層構成の CLT 間での差が大きく、特に 5 層 7 プライ構成の G_{t-h} は他に比べて低い値となった。 G_{t-v} は強軸方向の試験体と同程度であった。

Table 2. CLT 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験結果の平均値
Average of non-destructive tests and in-plane bending tests for CLT specimens

Type of CLT	$\rho (\text{kg/m}^3)$	Non-destructive Test						Bending Test			MC (%)
		$E_{fr} (\text{kN/mm}^2)$	In-plane		Out-of-plane			In-plane			
			$E_{t-h} (\text{kN/mm}^2)$	$G_{t-h} (\text{kN/mm}^2)$	$E_{t-v} (\text{kN/mm}^2)$	$G_{t-v} (\text{kN/mm}^2)$		$E_{a-h} (\text{kN/mm}^2)$	$E_{true-h} (\text{kN/mm}^2)$	$\sigma_{b-h} (\text{N/mm}^2)$	
3-3-Ma	417 (2.21)	5.92 (5.09)	5.71 (5.35)	0.828 (3.17)	7.90 (3.83)	0.275 (21.70)		5.34 (4.75)	5.69 (6.35)	23.0 (17.3)	12.0 (5.73)
3-4-Ma	411 (1.39)	4.52 (4.22)	4.35 (3.53)	0.818 (5.33)	7.07 (5.35)	0.196 (9.93)		4.08 (4.20)	4.40 (4.57)	16.5 (3.61)	12.0 (2.80)
5-5-Ma	413 (1.98)	4.67 (4.66)	4.65 (2.61)	0.863 (3.91)	6.58 (6.69)	0.250 (3.58)		4.27 (3.02)	4.52 (3.30)	19.8 (11.8)	11.8 (6.82)
5-7-Ma	414 (2.19)	5.74 (1.67)	5.60 (1.94)	0.838 (3.22)	7.13 (3.60)	0.305 (3.91)		5.23 (2.33)	5.58 (1.15)	21.4 (6.37)	11.8 (2.79)
7-7-Ma	407 (1.01)	4.33 (3.92)	4.17 (3.22)	0.837 (2.58)	5.63 (4.60)	0.263 (2.35)		3.82 (4.15)	3.95 (4.91)	16.1 (9.11)	11.0 (2.67)
3-3-Mi	416 (1.07)	2.46 (6.54)	2.42 (4.83)	0.732 (6.05)	-	-		2.22 (5.19)	2.32 (7.94)	10.8 (14.6)	12.0 (4.89)
3-4-Mi	412 (1.45)	3.39 (5.62)	3.22 (6.74)	0.968 (11.0)	-	-		3.01 (6.54)	3.16 (6.31)	13.6 (12.5)	11.3 (2.22)
5-5-Mi	406 (1.41)	2.69 (4.53)	2.60 (6.58)	0.882 (16.80)	1.55 (4.38)	0.172 (7.00)		2.42 (5.69)	2.48 (6.19)	11.7 (7.31)	12.0 (2.11)
5-5-Mi	412 (1.17)	2.14 (6.72)	2.15 (4.05)	0.562 (9.12)	0.720 (3.68)	0.250 (17.40)		1.85 (2.47)	1.94 (3.28)	8.60 (5.63)	11.5 (3.35)
7-7-Mi	407 (0.75)	2.92 (4.58)	2.82 (5.19)	0.786 (3.20)	2.01 (5.65)	0.213 (11.70)		2.52 (6.86)	2.61 (7.77)	12.8 (9.69)	11.5 (4.06)

Values in bracket shows the coefficient of variation, in %. Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1.

ρ density at the test, E_{fr} Young's modulus determined by using the longitudinal vibration method, E_{t-h} true in-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, G_{t-h} in-plane shear modulus determined by T. G. H. method, E_{t-v} true out-of-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, G_{t-v} out-of-plane shear modulus determined by T. G. H. method, E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, E_{true-h} true Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength, MC moisture content determined by using the oven-dry method

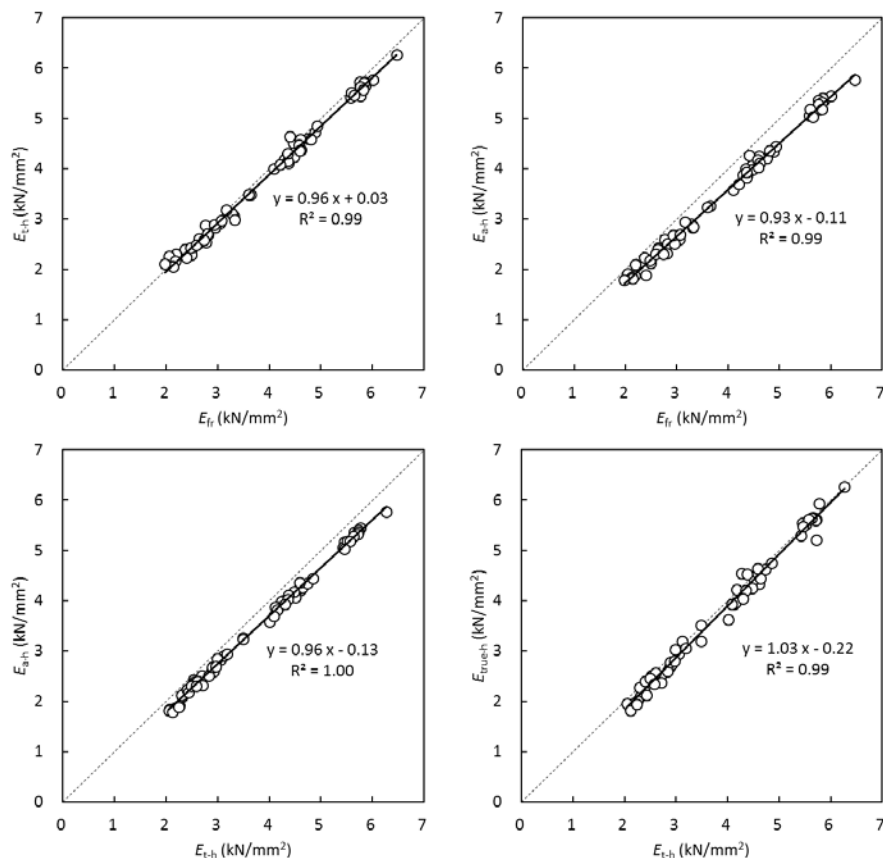


Fig. 4. 動的な方法で測定したヤング係数 (E_{fr} 、 E_{t-h}) と面内曲げ試験時に測定したヤング係数 (E_{a-h} 、 E_{true-h}) の関係
Relationships among Young's moduli measured by the dynamic method and the in-plane bending tests

E_{fr} Young's modulus determined by using the longitudinal vibration method, E_{t-h} true in-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, E_{true-h} true Young's modulus determined by static in-plane bending test

3.2 面内曲げ試験結果

3.2.1 ヤング係数と曲げ強さの関係

面内曲げ試験の結果を Table 2 に示す。強軸方向、弱軸方向のいずれの試験体も層構成によらず、面内曲げ試験による E_{a-h} のばらつきは小さかった。 σ_{b-h} は 3 層 3 プライを除いて、各構成においてばらつきは小さかった。

各層構成の試験体について、非破壊試験で求めた E_{fr} 及び E_{t-h} と面内曲げ試験で求めた E_{a-h} 及び E_{true-h} との関係を図 4 に示す。それぞれ相関が高く、CLT の面内方向の静的な曲げヤング係数は、動的な測定方法により推定できることがわかる。CLT 試験体の E_{a-h} 及び σ_{b-h} の関係を Fig. 5 に示す。これらの相関は高く、Fig. 4 の結果もあわせて考えると、動的あるいは静的な測定方法によって求めた CLT の面内方向のヤング係数から、CLT の面内方向の曲げ強さをおおよそ推定できると考えられる。

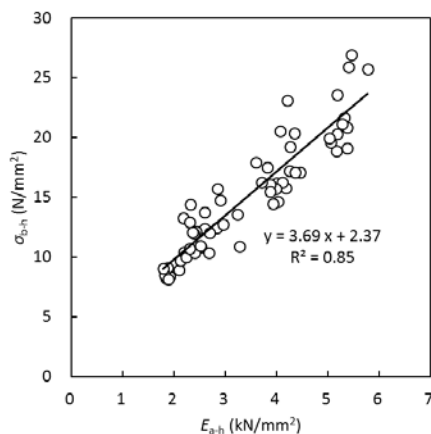


Fig. 5. CLT 試験体の見かけの曲げヤング係数 (E_{a-h}) と曲げ強さ (σ_{b-h}) の関係
Relationship between E_{a-h} and σ_{b-h} of CLT specimens

E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

3.2.2 層構成の曲げヤング係数、曲げ強さへの影響

Ido ら (2016) が CLT の層構成と引張り強さの関係を検討した方法と同様の方法で、層構成と E_{a-h} 及び σ_{b-h} との関係について検討した。その結果を Fig. 6 に示す。強軸方向の試験体のほうが、弱軸方向試験体に比べて E_{a-h} 、 σ_{b-h} ともに高く、また、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合が高いほど、 E_{a-h} 、 σ_{b-h} は高い傾向にある。これらの結果から、強軸方向のラミナが CLT の面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さに寄与し、弱軸方向のラミナの寄与は強軸方向に比べてかなり小さいと考えられる。全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合がともに 0.50 である 3 層 4 プライの試験体を比較すると、 E_{a-h} も σ_{b-h} も強軸方向の試験体のほうが高い。これは強軸方向の試験体では外層を構成する M60A のラミナの曲げヤング係数及び曲げ強さの寄与が大きく、弱軸方向の試験体では外層の M60A のラミナの寄与はかなり小さく、内層の M30A が曲げ荷重を負担しているからであろう。これらの結果は、CLT の面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さが、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合、及び強軸方向に配置されたラミナの強度等級の影響を受けることを示している。

3.2.3 荷重変形関係と破壊形態

各シリーズの試験体について、面内曲げ試験時の荷重と全スパン中央部のたわみの関係を Fig. 7 に示す。層構成、強軸方向、弱軸方向ごとの最大荷重時の全スパン中央部のたわみの平均値は 90 mm ~ 109 mm であった。各層構成内で比較すると、強軸方向では 3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライで、最大荷重時の全スパン中央部のたわみが最大のものと最小のものとで約 30 mm の差が見られ、弱軸方向では 3 層 3 プライ、

3 層 4 プライ、7 層 7 プライで、最大荷重時の全スパン中央部のたわみが最大のものと最小のものとで 40 mm 以上の差が見られた。

CLT 試験体の破壊形態の例を Fig. 8 に示す。CLT 試験体の破壊は、強軸試験体では 30 体のうち 29 体が、弱軸試験体では 30 体のうち 25 体が試験体下部にあるフィンガージョイントを含む破壊であった。弱軸試験体では外層あるいは内層の弱軸方向のラミナのつなぎ目に沿って破壊する際に、内層の強軸方向のラミナがフィンガージョイントからはなれた本部で破壊した状態も見られた。そのほか材縁部の節の影響が考えられる破壊は 3 体 (5 層 5 プライ強軸試験体 2 体、7 層 7 プライ強軸試験体 1 体) であった。全試験体 60 体のうち 35 体は荷重点間で、18 体は荷重点下で、7 体はその両方で破壊が生じた。強軸試験体では全 30 体のうち 20 体で Fig. 8 のように上部まで破断が生じた。弱軸試験体ではすべての試験体で上部まで破断が生じた。

3.3 面内方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの推定

CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの推定値と実験値の平均値との関係を Fig. 9 に示す。見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの推定値は実験値よりもやや低く、見かけの曲げヤング係数については強軸、弱軸方向それぞれ実験値の 0.87 倍、0.86 倍であり、曲げ強さについては強軸、弱軸方向それぞれ実験値の 0.93 倍、0.84 倍であった。これらの結果から、ラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強度から CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強度をおおよそ推定できると考えられる。

本報告と同じ方法で 5 層 5 プライ、スギ異等級構成の CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ

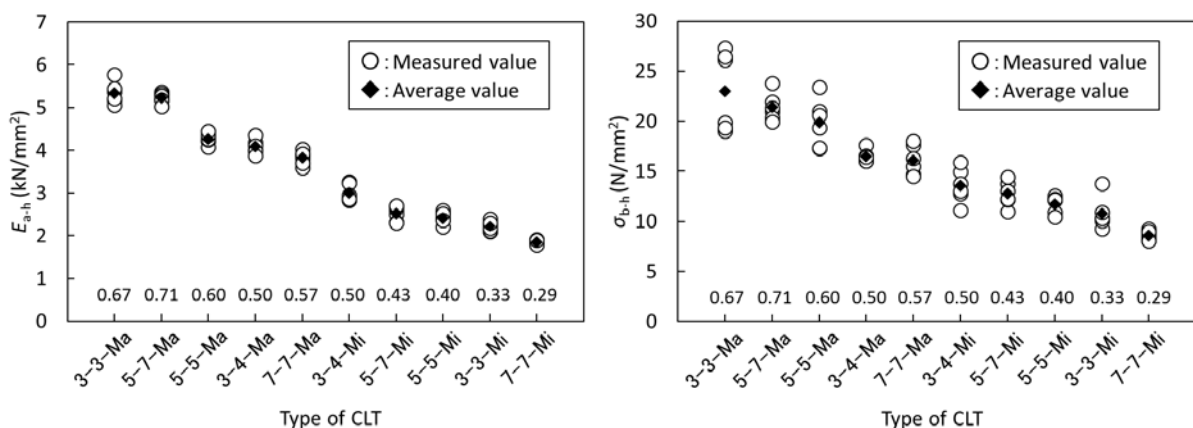


Fig. 6. CLT 試験体の層構成と見かけの曲げヤング係数 (E_{a-h}) および曲げ強さ (σ_{b-h}) の関係

Relationship between the layout of CLT and E_{a-h} and σ_{b-h}

The numerical values in the graph are ratios of the major strength direction in the crosssection. Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1.

E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

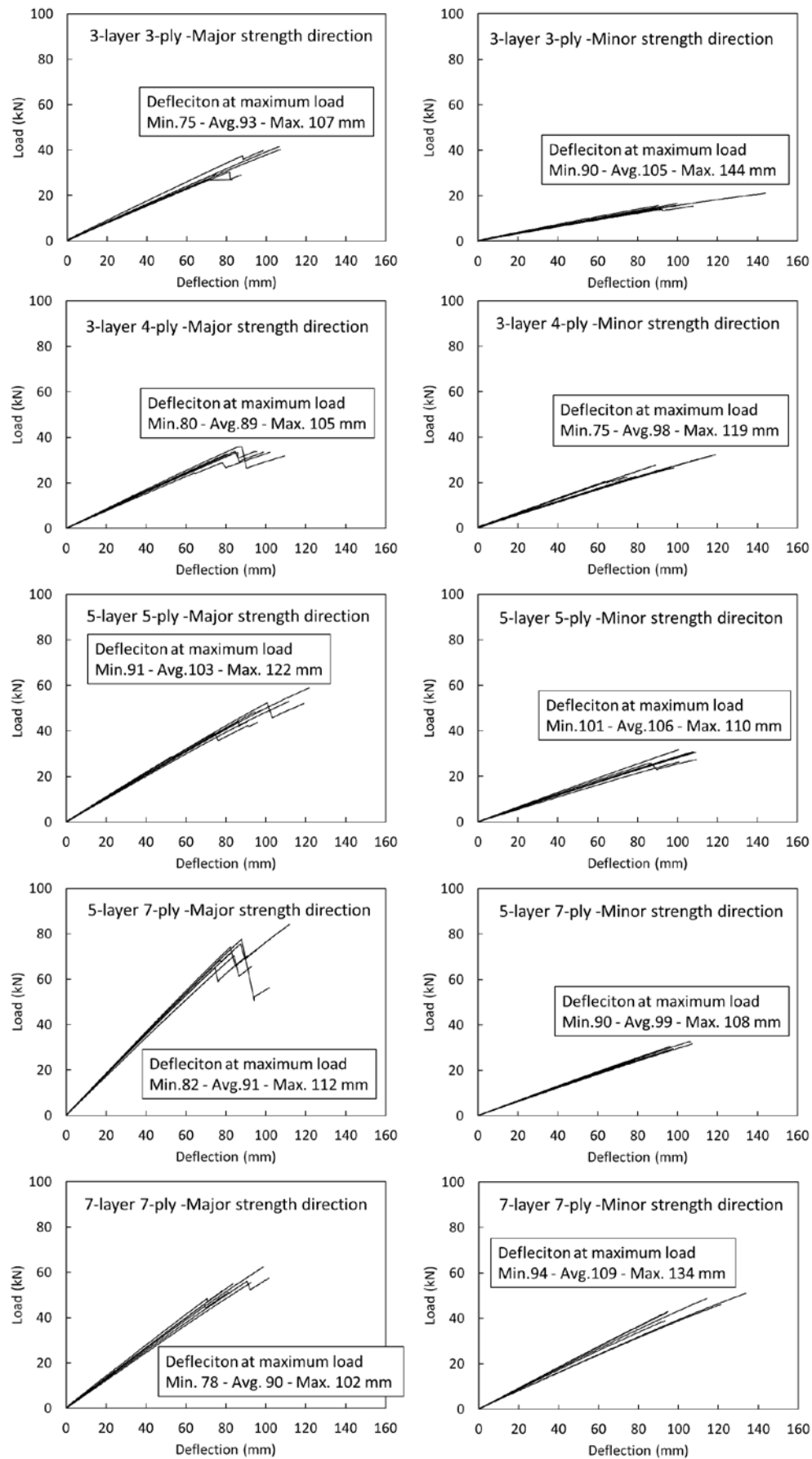


Fig. 7. 面内曲げ試験における CLT 試験体の荷重と全スパン中央部のたわみの関係
Relationships between load and deflection for each type of CLT specimens under in-plane loading



7-layer 7-ply CLT in the major strength direction
(7-7-Ma)



5-layer 7-ply CLT in the minor strength direction
(5-7-Mi)

Fig. 8. CLT 試験体の破壊の様子
Examples of failure of CLT specimens

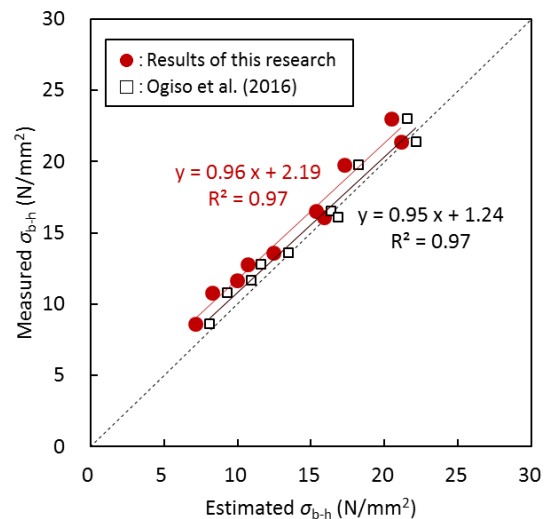
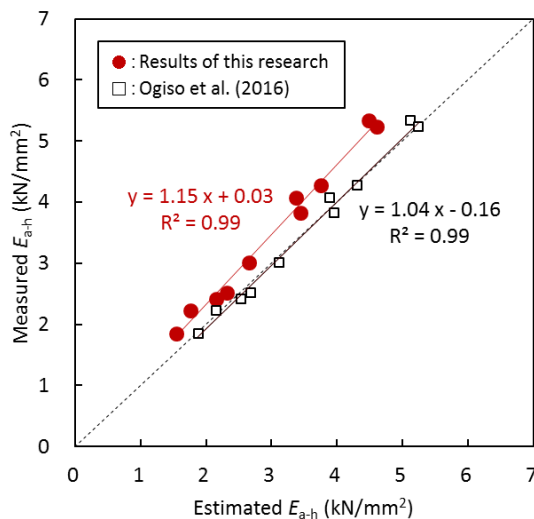


Fig. 9. CLT の面内曲げ試験における見かけのヤング係数 (E_{a-h}) および曲げ強さ (σ_{b-h}) の推定値と実測値の比較
Comparison between the estimated and measured E_{a-h} and σ_{b-h}

E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

強さについて推定を行った既報（平松ら 2014）の結果では、強軸方向については見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ実験値の 0.97 倍と 0.99 倍、弱軸方向ではともに 0.71 倍であった。

小木曾ら（2016）は、本報告で CLT パネルに使用したラミナと異なるロットのスギフィンガージョイントラミナ（幅 105 mm × 厚さ 30 mm）について、FW 方向と EW 方向の曲げ試験を行い、FW 方向に対する EW 方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの比はそれぞれ 1.07、0.83 であるという結果を得た。さらに、これらの比と本報告で CLT パネルの作製に使用したラミナと同ロットのラミナの曲げ試験結果（森林総合研究所ほか 2015）を用いて、CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さを推定し、実験値と比較した。その結果を Fig. 9 に示す。見かけの曲げヤン

グ係数及び曲げ強さの推定値は実験値のそれぞれ 1.01 倍、0.96 倍であり、推定値と実験値がほぼ等しいという結果を得て、精度の高い推定が可能であることを示している。

本報告と小木曾ら（2016）の推定結果に差が生じた要因として、推定に用いたラミナの見かけの曲げヤング係数の EW 方向と FW 方向の比の影響が考えられる。また、弱軸方向のラミナの見かけの曲げヤング係数を強軸方向の 30 分の 1 とした小木曾ら（2016）の推定値と実験値がかなり近いこと、平松ら（2014）の弱軸方向の推定値が実験値の約 0.7 倍と低いことから、今後、弱軸方向のラミナの寄与について、より詳細に調べる必要がある。

本研究の結果から、幅 105 mm、厚さ 30 mm のスギラミナを使用し、幅はぎをしていない CLT の面内方向

の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さを、各等級のラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さから、おおそ推定できると考えられる。一方、CLTの強度特性への影響が考えられる因子は、樹種、ラミナの強度特性、ラミナの幅や厚さ及びそれらの比、ラミナ同士の幅はぎ（幅はぎプライ）、CLTの層・プライ構成等、多数あることから、本研究で用いた推定式が、本研究で試験したCLTとは異なるCLTについても適用可能であるかどうか、その適用範囲を検討し、適用範囲の広い推定方法を確立していくことが今後の課題であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方が、CLTの面内方向の曲げヤング係数および曲げ強さに及ぼす影響を明らかにするために、強度等級をMx60、層構成を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構成、外層のラミナの方を強軸方向、弱軸方向としたスギCLT試験体を幅105 mm、厚さ30 mmのフィンガージョイントラミナを用いて作製し、面内方向の曲げ試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。(1) CLTの面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さは、層構成、ラミナの等級、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合に影響をうける、(2) ラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さからCLTの面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さをおおそ推定することが可能である、(3) CLTの面内方向の静的な曲げヤング係数は動的な測定法により推定することが可能である、(4) CLTの面内方向の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さの相関は高い、(5) 破壊形態は強軸方向のプライの引張り側にあるフィンガージョイントを含むものが多く、試験体の上部まで破断するものが多かった。

謝 辞

本研究は平成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)」により実施した。

引用文献

- APA – The Engineered Wood Association (2011) ANSI/APA PRG 320-2011: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber.
- European Technical Assessments (ETA) (2005) CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure), ETA request No. 03.04/06, Version June 2005: Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings.
- European committee for standardization (2015) EN 16351:2015 Timber structures. Cross laminated timber.
- Flaig, M. and Blass, H. J. (2014) Bending strength of cross laminated timber beams loaded in plane. Proceedings of WCTE 2014 (World Conference on Timber Engineering).
- FPIInnovations (2011) CLT Handbook. Chapter 1-12.
- 藤井 毅・宮武 敦(1995) 2. 大断面部材の集成加工技術及び耐久処理技術の開発. 農林水産技術会議事務局研究成果 296 木質系新素材による高強度・高耐久, 環境調和型架構技術の開発, 19-36.
- 後藤 崇志・福島 亮・中山 茂生・古野 毅(2014) スギを内層に構成した異樹種3層CLTの曲げ性能. 木材学会誌, 60 (6), 336-345.
- 平松 靖・宮武 敦・新藤 健太・渡部 博(2013) スギを用いたCLTの面内曲げ性能. 木材工業, 68(11), 532-537.
- 平松 靖・宮武 敦・松原 恵理・末吉 修三・井道 裕史・長尾 博文・高麗 秀昭・新藤 健太・原田 真樹・加藤 英雄・上川 大輔・中島 洋・藤田 和彦・野沢 浩二(2014) スギ及びヒノキを用いたCLTの面内曲げ性能. 木材工業, 69 (9), 384-389.
- Ido, H., Nagao, H., Harada, M., Kato, H., Ogiso, J., Miyatake, A. (2016) Effects of the width and lay-up of sugi cross-laminated timber (CLT) on its dynamic and static elastic moduli, and tensile strength. J. Wood Sci., 62, 101-108
- 池田 潔彦・溝口 忠・宇田 孝彦・浅井 正幸(2000) スギ3層クロスボードの開発. 木材工業, 55 (6), 280-284.
- 川上 敬介・古川 郁夫(2005a) 住宅部材としてのスギ3層クロスパネルの曲げおよび反り特性. 森林バイオマス利用学会誌, 1 (1), 9-14.
- 川上 敬介・古川 郁夫(2005b) スギ3層クロスパネルの反りに及ぼす温湿度の影響. 木材工業, 60 (5), 218-223.
- 川上 敬介・古川 郁夫・西野 吉彦(2007) スギ3層クロスパネルの住宅用下地材としての温度特性. 木材工業, 62 (5), 207-212.
- 建設省静住指発第6号(2000)“認定書”.
- 国土交通省(2016a) “建築物の基礎, 主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件” 平成12年建設省告示第1446号(最終改正: 平成28年3月31日).
- 国土交通省(2016b) “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(最終改正: 平成28年3月31日).
- 国土交通省(2016c) “CLTパネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件” 平成28年国土交通省告示第611号.
- 宮武 敦(2013) 1. CLT・直交集成板の定義. 木材工業, 68 (11), 468-471.

- 木構造振興株式会社 (2012) “CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書”.
- 農林水産省 (2013) 直交集成板の日本農林規格 (制定: 平成 25 年 12 月 20 日農林水産省告示第 3079 号, 最終改正: 平成 28 年 8 月 30 日).
- 小木曾 純子・井道 裕史・長尾 博文・原田 真樹・加藤 英雄・宮武 敦・平松 靖 (2016) 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. 森林総合研究所研究報告, 15 (3), 59-64.
- 朴 漢文・伏谷 賢美・大塚 武・中島 岳彦・佐藤 敬一・卞 熙燮 (2001) スギ材を用いた直交型積層材の静的曲げ強度性能に及ぼす年輪傾角の影響. 木材学会誌, 47 (1), 22-32.
- 朴 漢文・伏谷 賢美・久保 隆文・佐藤 敬一・卞 熙燮 (2002) スギ材を用いた直交型積層材の曲げクリープ性能. 木材学会誌, 48 (3), 166-177.
- 朴 漢文・伏谷 賢美 (2005) スギ材を用いた直交型 3 層積層材の曲げクリープ性能に及ぼす表・中層ラミナの構成割合の影響. 木材工業, 60 (12), 636-641.
- 社団法人全国木工機械工業会 (1998) “平成 9 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-28.
- 社団法人全国木工機械工業会 (1999) “平成 10 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-37.
- 社団法人全国木工機械工業会 (2000) “平成 11 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-33.
- 森林総合研究所 (2014) “森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果 No.56 スギ造林大径木を公共建築等において利用拡大するための技術開発”, 1-4.
- 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”, 1-122.
- 武川 朋子 (2010) クロスラミナパネルと大規模木造建築物. *Journal of Timber Engineering*, 23 (2), 53-56.
- 内迫 貴幸・徳田 迪夫・鈴木 直之・泉 貴史 (2002) スギ素材を仕上げて利用した木質面材料の開発ー スギ板積層ボードの材質特性ー. 三重大学生物資源学部演習林報告, 25, 19-33.
- 財団法人日本住宅・木材技術センター (1999) 優良木質建材等の品質性能評価基準 (品質性能試験の試験項目, 試験方法及び判定基準). 117-126.
- 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. 61-71.
- 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.

Effects of layup and grade of lumber on bending Young's modulus and bending strength of sugi (*Cryptomeria japonica*) cross laminated timber under in-plane loading

Yasushi HIRAMATSU^{1)*}, Atsushi MIYATAKE¹⁾, Takashi TAMAKI²⁾, Kenta SHINDO¹⁾, Hirofumi IDO³⁾, Hirofumi NAGAO³⁾, Masaki HARADA³⁾ and Junko OGISO⁴⁾

Abstract

Recently, in Japan, cross laminated timber (CLT) has been attracting attention as a structural material. Based on this, more test data are required on CLT consisting of Japanese wood species. CLT consists of several layers of lumber that are laminated by the gluing of longitudinal and transverse layers; therefore, their strength properties are influenced by the load direction, the direction of lumber, the grade of lumber, and layups. In this study, we prepared CLT specimens (symmetrical composition, 3-layer 3-ply, 3-layer 4-ply, 5-layer 5-ply, 5-layer 7-ply, and 7-layer 7-ply layups, and the Mx60 strength grade according to the Japanese Agricultural Standard for CLT) consisting of sugi (*Cryptomeria japonica*) finger jointed lumber (width 105 mm and thickness 30 mm), and conducted the bending tests under in-plane loading. The results were as follows: (1) Layers loaded parallel to the grain are mainly effective for the bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading. (2) Bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading can be estimated from those of lumber and number of layers loaded parallel to the grain. (3) Bending Young's modulus of CLT panels under in-plane loading can be measured by dynamic testing. (4) Bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading are strongly correlated. (5) Finger joints in lumber in the longitudinal direction on the tension side between loading points play a significant role in specimen failure.

Key words: cross laminated timber, sugi, in-plane, bending, layup, grade

Received 2 November 2016, Accepted 19 July 2017

1) Department of Wood-based Materials, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Ehime Forestry Research Center

3) Department of Wood Engineering, FFPRI

4) Wood Utilization Division, Forest Policy Planning Department, Forestry Agency

* Department of Wood-based Materials, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; yash@ffpri.affrc.go.jp