

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月19日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K07521

研究課題名(和文) 木材の年輪構造が直交集成板ラミナのローリングシア強度に与える影響

研究課題名(英文) Influence of annual ring structure of wood on the rolling shear properties of Cross Laminated Timber Lamina

研究代表者

宇京 斉一郎 (Ukyo, Seiichiro)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：70455260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、直交集成板(CLT)の原材料であるラミナのローリングシア挙動に着目し、スギ材ラミナの縦横の寸法比や、ラミナ断面に出現する年輪パターンがローリングシアの弾性係数や強度に与える影響について明らかにした。また、CLT断面内でのせん断応力分布の算出や、実際にせん断力を受けるCLTでのローリングシアのひずみ分布解析を行い、ラミナの強度特性に基づくCLTの強度予測方法について評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国産CLTの主原料であるスギ材ラミナについて、これまで網羅的な試験が行われておらずローリングシアの影響を受ける強度特性値がどのような範囲をとるか不明であった。また、スギの材料定数として報告されてきたローリングシアの弾性係数の値と、ラミナのサイズで実測される値が乖離していることが確認されていたが、その原因については明らかになっていなかった。本研究により、ラミナ断面の縦横比や年輪パターンがローリングシアの特性に与える影響が定量的に明らかになるとともに、そのメカニズムについても明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：The study focuses on the rolling shear properties of lamina used for the production of cross laminated timber. Influence of the aspect ratio of the cross section and annual ring geometry of a lamina on the shear properties has been clarified. To evaluate the prediction method of the shear strength of CLT based on the strength characteristic of laminae, strain analysis of CLT and calculation of stress distribution in the CLT cross section have been performed.

研究分野：木材工学

キーワード：直交集成板(CLT) ローリングシア 年輪構造 スギ 画像相関法 有限要素法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、比較的新しい木質建材である直交集成板（以下、CLT）に特有な材料挙動に着目し、そのメカニズムを、原材料となる木材の組織構造との関係から明らかにすることを目的とした。

CLT は、ひき板（以下、ラミナ）を水平方向に並べて層を作り、隣り合う層を互いに直交させながら接着して作られる面材料である。木材の繊維はラミナの長手方向に平行に走っており、強度的な性能はこの方向に高い。CLT では、ラミナの長手方向が板面内の横方向にも縦方向にも配置されていることから、パネルに受ける力を両方向に分散することが可能となる。一方で、板面に垂直な方向にたがい違いの向きに力が加わると、直交する層で、ラミナが転がるように大きく変形する場合がある（図1）。この転がる様な挙動は、ローリングシアと呼ばれ、他の方向に力が作用する場合よりも、変形量が大きく、強度も著しく小さい。

ローリングシア自体は、木材の細胞構造に由来した材料挙動であり CLT のみで生じるわけではないが、従来の木質系構造材料では、ラミナのような大きさの断面にローリングシアが作用する利用法が想定されてこなかったため、ラミナの断面サイズでの挙動については解明されてこなかった。

このラミナのローリングシアの挙動については、CLT を開発した欧州で先行して検討が行われた。ローリングシアによる変形量については、ラミナ断面に出現する年輪パターンに大きく影響を受け、その最大値と最小値では4倍以上の差が生じることが報告されている。一方で、ローリングシアによる破壊強度と年輪パターンとの関係については明らかとなっておらず、年輪パターンによって強度がどの程度ばらつくかは不明であった。

国内では、CLT の強度データの整備を目的として、実大 CLT での材料試験が行われてきており、ローリングシアが関係する CLT パネル面外へのせん断試験についても、様々な条件で試験が実施されてきた。一方、原材料であるラミナの縦横の寸法比、年輪パターンといった特性が CLT の強度に与える影響については未解明であった。原料を有効に用いるためには、ラミナレベルでの強度発現メカニズムの解明とそれに基づく CLT の材料設計が求められる状況にあった。

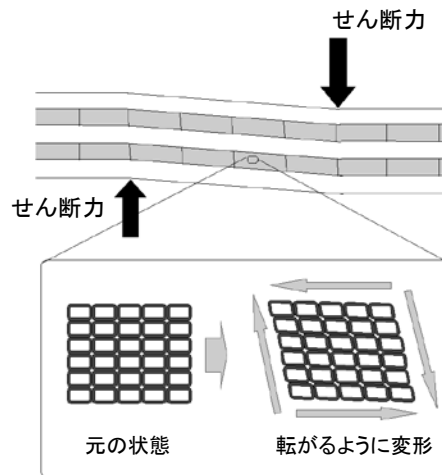


図1 CLT の直交層で生じるローリングシアの模式図

### 2. 研究の目的

(1) ラミナ単体でのローリングシアを評価するための材料試験には、規格等で定められた試験方法が存在していない。そこで、既存のせん断試験方法を参考に、ラミナが確実にローリングシアで破壊する試験方法を確立する。

(2) 国産 CLT で原料として多用されているスギ材ラミナのローリングシアの特性を明らかにし、ラミナの断面寸法や、ラミナ木口に現れる年輪パターンがローリングシア挙動に与える影響を解明する。

(3) CLT におけるローリングシア挙動を観察し、ラミナ単体の性能を基に CLT の強度性能の予測を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 面材料のローリングシアの試験法を定めた ASTM 規格 (ASTM D2718) および、製材の繊維方向のせん断試験法を定めた EN 規格 (EN408) 等、既存の材料試験規格を参考に、ラミナ単体をせん断破壊させる試験を実施し破壊性状の検証を行った。試験時には、デジタル画像相関法（以下、DIC）を用いて、ラミナ木口のひずみ分布の観察を行い、目的とした応力状態となっているかの確認を行った。

(2) CLT 製造用のスギ材ラミナからせん断試験体を作製し、(1) の成果に基づいて、EN408 に準じたせん断試験を行った。

ラミナ断面の縦横比が、せん断特性に影響を与えることが予想されたので、同じラミナから、厚さを一定、幅を3通りに変化させた試験体を用意した。また、ラミナ木口の年輪の幾何学的特徴から、ラミナが採取された元の丸太の髓の位置を推定した。

(3) 実大 CLT におけるローリングシアの挙動を観察するために、5層5プライの CLT のせん断試験を行い、DIC を用いて破壊プロセスをひずみ分布画像として記録観察した。ラミナ単体のせん断特性を CLT のせん断特性に結びつけるための方法として、有限要素法（以下、FEM）による応力解析と、FEM よりも簡便に計算できるシア・アナロジー法の二つを検討した。

#### 4. 研究成果

(1) ラミナのせん断試験方法の候補として、ASTM 規格の面材のローリングシアの試験方法 (ASTM D2718) に準拠した試験 (図 2 左)、および EN 規格にある製材の繊維方向のせん断試験方法 (EN408) を応用した試験 (図 2 右) を実施し、検証を行った。ラミナのローリングシア試験に両規格を適用した場合の適合性を表 1 に示す。ASTM D2718 の方式では、試験体長さに対して試験体長さを十分に確保する必要があるため、単一のラミナへの適用が難しい。本研究では、単一のラミナの評価を対象とするため、最終的には EN 規格の方式を採用することとした。EN408 方式のせん断試験について、ラミナのひずみ分布解析を行った結果、ラミナの断面には、おおむね均等にせん断応力が作用していることが確認できた (図 3)。

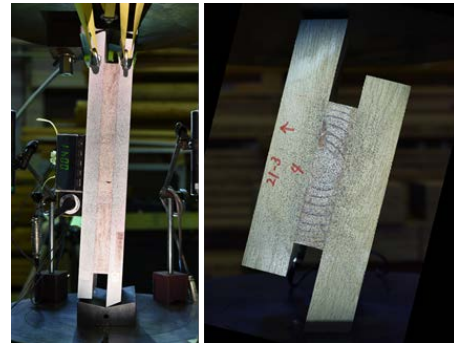


図 2 ラミナのローリングシアの試験  
(左: ASTM 方式、右: EN 方式)

※ASTM 方式では、試験体の縦横比の条件を満たすために、エンドマッチしたラミナ 3 枚を幅方向に接着している。EN 方式は図 3 写真に示すようにカメラを試験体に合わせて傾けて撮影したため、ここでは紙面鉛直方向と加力方向が平行となるよう、画像を回転させて表示している。

表 1 ラミナのローリングシア試験に対する既存規格の適用性

	単一ラミナ	複数ラミナ	せん断面法線方向への作用法線方向力/せん断力
ASTM D2718 方式	×	○	9%
EN 408 方式	○	△	25%

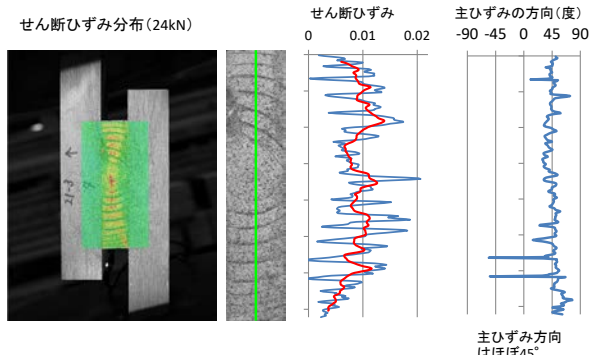


図 3 ラミナのひずみ分布。左はひずみ分布図。ラミナ木口画像中の緑の線で示した位置のひずみのプロファイルをその右に示す。せん断ひずみは、局所では年輪の組織構造の影響を受けるが、赤線の移動平均でみると概ね平坦に分布していることがわかる。

(2) ラミナ木口に含まれる年輪パターンがせん断特性に与える影響を調べるために、ラミナの採材位置が様々な試験体 (図 4) を用いせん断試験を行い、せん断弾性係数・せん断強度とともに、髄からの距離が大きくなるにつれて値が低下する傾向を明らかにした (図 5)。

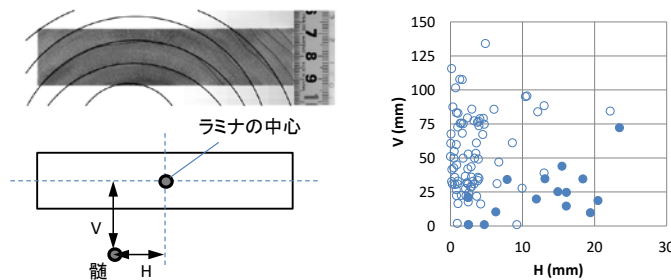


図 4 ラミナの髄の位置の推定

ラミナの木口の年輪に円弧をフィットすることで髄の位置を推定した。

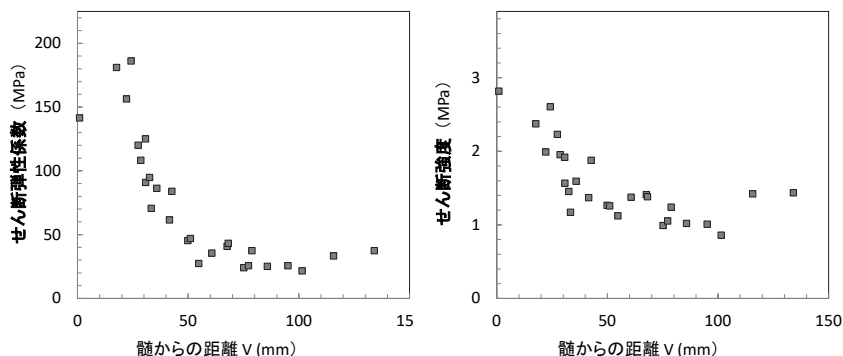


図 5 ラミナの採材位置 (髄からの距離) がローリングシアの特性に与える影響 (ラミナ断面 幅 62mm、厚さ 24mm)

これまで、ラミナのサイズでのせん断試験や CLT の実験結果から推定されたローリングシアの弾性係数は、純粋な材料定数として求められた弾性係数 ( $G_{RT}$ ) よりも大きくなる事が確認されており、本研究でも同様の結果が確認された。この原因は、ラミナ内で場所によって年輪の接線方向が力の向きに対して変化するため、局所での弾性係数が ( $G_{RT}$ ) より高くなるためであるとされるが、これまで、実験と解析の両面からの実証は行われてこなかった。そこで本研究では、ラミナのせん断弾性係数が示す傾向について、その理論的なメカニズムを明らかにするために、全試験体の髓の位置データを反映させた数値解析 (FEM) を実施し、実験結果との比較を行った。解析結果は実験と同様の傾向を示し、ラミナのせん断弾性係数は材料固有の値ではなく、断面内に含まれる年輪のパターンによって変動する値であることを示すことができた (図 6)。また、ラミナとしてのせん断弾性係数は、採材位置が髓から離れるに従って、材料定数である ( $G_{RT}$ ) に漸近していくことから、実用上、材料定数の ( $G_{RT}$ ) をラミナの弾性係数の下限値と見做しうることも確認できた。

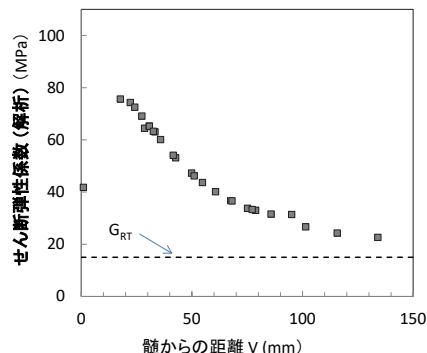


図 6 有限要素法解析によって求めたローリングシアの弾性係数と採材位置 (髓からの距離) の関係 (ラミナ断面 幅 62mm、厚さ 24mm)。個々のプロットは、図 4 で示した髓の位置情報を反映させた FEM 解析による値。髓からの距離が大きくなるにつれ、理論上の下限値である  $G_{RT}$  に漸近していく。

実験ではラミナの縦横比 (断面の厚さに対する幅の比) の影響も確認しており、縦横比が大きくなるにつれて (厚さが一定の場合は幅が広くなるにつれて)、ローリングシアの弾性係数、強度が大きくなる傾向を明らかにした。

(3) CLT にせん断力が作用したときの、個々のラミナに生じるローリングシアの応力について、既存の CLT での実験データを基に、FEM とシア・アナロジー法による算出結果の比較を行った。シア・アナロジー法は FEM と比べて、必要となる材料定数の数が少なく、計算コストも低い。両者の算出結果は概ね一致し、シア・アナロジー法の有用性を確認することができた。

実大 CLT のせん断試験では、試験体全長でのひずみ分布観察を行い、破壊プロセスの分析を行った。せん断力が最大となる区間に位置するラミナが破壊した後も、近傍のラミナがせん断力を負担し続け、荷重上昇を続ける様子が確認された (図 7)。正確な終局耐力の予測を行うためには、破壊過程を含めた解析を行う必要が有ることに加えて、ラミナのバラツキを加味する必要があるといえる。シア・アナロジー法により、ラミナのローリングシアの弾性係数・強度の平均値を用いて、CLT の剛性や破壊荷重の予測を行うと、概ね実験値と近い値が得られたが、破壊プロセスの観察結果を考慮すると、CLT の材料設計では、ばらつきを考慮してラミナのせん断強度の下限値等を用いて耐力予測を行うのが安全と考えられた。

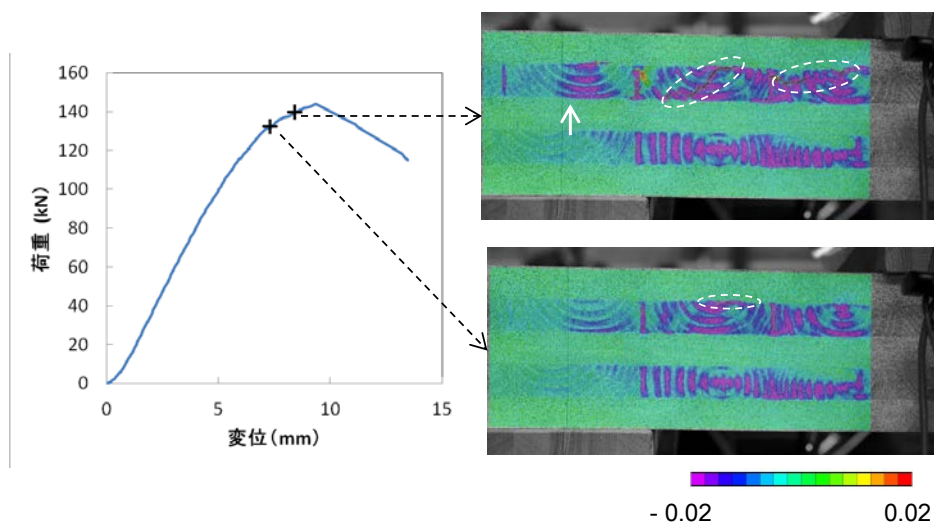


図 7 CLT のせん断試験におけるローリングシアの破壊プロセス。右に試験体片側のせん断ひずみ分布を示す。点線枠 (白) はき裂が発生した箇所を示す。加力点と支点の区間に位置するラミナで破壊が生じた後も、白矢印で示した支点上に位置するラミナがせん断力を負担し、荷重増加を続ける様子がわかる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 宇京齊一郎、宮武敦、新藤健太、直交集成板ラミナのローリングシア強度の評価ーラミナの年輪形状とせん断弾性係数の関係、第 69 回日本木材学会大会、D15-P-16、2019

- ② UKYO Seiichiro, SHINDO Kenta, MIYATAKE Atsushi, Evaluation of Rolling Shear Properties of the Lamina for CLT Made of Japanese Cedar, 2018 Society of Wood Science and Technology/Japan Wood Research Society International Convention, 61:708, 2018
- ③ 宇京齊一郎、新藤健太、宮武敦、直交集成板ラミナのローリングシア強度の評価-ラミナ採材位置の影響、第 68 回日本木材学会大会、D14-04-1600、2018
- ④ 宇京齊一郎、新藤健太、宮武敦、直交集成板ラミナのローリングシア強度の評価-ひずみ分布解析、第 67 回日本木材学会大会、D18-P1-12、2017

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：新藤 健太

ローマ字氏名：Shindo Kenta

所属研究機関名：国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

部局名：複合材料研究領域

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：10414484

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：宮武 敦

ローマ字氏名：Miyatake Atsushi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。