

CLT—集成材間のめり込み現象の数値解析

CLT 集成材 年輪傾斜  
初期剛性 降伏耐力 めり込み

準会員 ○難波 宗功\*1 正会員 光井 周平\*2  
正会員 森 拓郎\*3 正会員 井上 涼\*4  
正会員 田中 圭\*5 正会員 原田 浩司\*6  
正会員 腰原 幹雄\*7

1. はじめに

近年、CLT パネル工法が、工期の短縮、建設経費の削減等といった多くのメリットから、新木質工法としての注目を浴びている。一方で、この工法における大空間の実現の限界から、柱梁に LVL や集成材を用いた軸組構法を採用し、耐震壁として CLT を用いる併用構造の提案も増加している。その際に、剛性や耐力が高い CLT が横架材として用いる集成材や LVL に対してめり込むことから、このめり込み変形の評価が構造物全体の变形特性を評価する上で非常に重要となることが既往の研究から指摘されている。

本報では、CLT-集成材間で生じるめり込み現象を数値解析によって評価・再現する手法の確立を目的として、各種数値解析を行った結果について報告する。

2. 集成材の木口面における年輪傾斜の影響

2.1 集成材の全面圧縮実験結果

解析では集成材幅の増大に比例して試験体の剛性・耐力が増大する。一方、文献1)における実験では集成材幅の増大に伴ってめり込み剛性・耐力に有意な差が見られないという結果が得られた。実際の試験体の木口面は加圧方向が幅方向の中央部では半径方向、端部に向かうに従って半径方向から追衽へと変化するような木目となっている。こうした状況が、集成材幅が増大した場合にも剛性・耐力がそれほど向上しない原因であるものと予想される。この仮説を検証するために、2019年度に広島大学で実施された集成材の全面圧縮実験結果について数値解析による検証を行う。全面圧縮実験の試験体は、文献1)で行われためり込み実験に用いられた集成材の一部から製作された。実験結果を図1に示す。

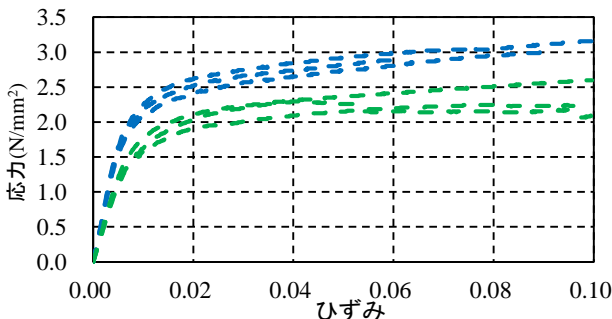


図1 集成材の全面圧縮試験

※青線…幅 150mm の集成材、緑線…幅 210mm の集成材

2.2 木口面の年輪傾斜のモデル化手法

めり込み現象を比較的实施が容易な二次元解析により評価するためには、木口面の材料特性としてどのような値を設定するかが重要となる。年輪傾斜の影響を考慮するために、図2の右端の例のように、加圧方向の年輪傾斜が変化する場合の全面圧縮時の応力-ひずみ関係を設定する。両端は年輪の半径(R)方向が加圧方向に対して20度傾斜し、中央部分はR方向と加圧方向が平行であるモデルを B150R060 と呼ぶこととする。分割数を増やして年輪傾斜をより実際のものに近づくようにすれば実験結果をより詳細に追跡できるものと思われるが、本報では実用性を考慮して3分割とすることとした。比較対象とするため、木口面全体で加圧方向と R 方向、接線(T)方向とが平行なケースについてもモデル化を行い、それぞれ B150R150、B150T150 と呼称する。

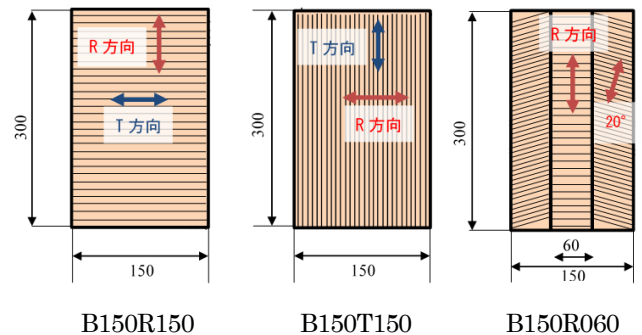


図2 解析モデルの概要(幅が150mmの場合)

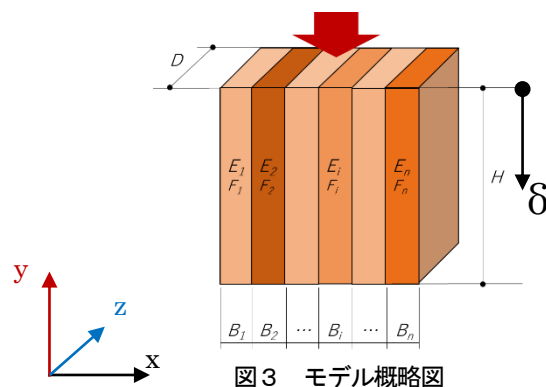


図3 モデル概略図

今、図3に示すような材料特性の異なるn個の層が並んで接着されている場合を考える。なお、図中に示す  $E_i$ ,  $F_i$  は、それぞれ  $i$  番目の材料の  $y$  方向に対するヤング係数、降伏応力を示

すものとする。図3の上面を均一に圧縮するものとし、 $n$  個の層は  $y$  方向に対して  $\delta$  だけ同様に变形するものと仮定すると、

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_i = \dots = \varepsilon_n = \frac{\delta}{H} \quad (1)$$

したがって

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \varepsilon_1 = E_1 \frac{\delta}{H} \\ \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2 = E_2 \frac{\delta}{H} \\ &\vdots \\ \sigma_i &= E_i \varepsilon_i = E_i \frac{\delta}{H} \\ &\vdots \\ \sigma_n &= E_n \varepsilon_n = E_n \frac{\delta}{H} \end{aligned}$$

したがって、上面にかかる荷重  $P$  は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot B_i \cdot D &= P \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot B_i &= \frac{P}{D} \end{aligned} \quad (2)$$

以上の式より、モデル全体としての  $y$  方向の等価なヤング係数は以下のように導出される。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n E_i \frac{\delta}{H} B_i &= \frac{P}{D} \\ \sum_{i=1}^n E_i B_i &= \frac{P}{D} \cdot \frac{H}{\delta} = \sigma_{ave} \cdot B \cdot \varepsilon \\ \sigma_{ave} &= \frac{\sum_{i=1}^n E_i B_i}{B} \varepsilon = E_{app} \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

ここに、

$$E_{app} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot B_i}{B} \quad (3)$$

空間座標系( $x, y$ )が図4に示すように直交異方性主軸に対して角度  $\theta$  だけ傾いているものとする、 $y$  方向に圧縮応力を受けた場合のヤング係数  $E_i$ 、降伏応力  $F_i$  は以下の(4)、(5)式で算出できる<sup>2)</sup>。なお、降伏後のヤング係数はひずみ硬化を考慮し、初期のヤング係数の 1/100 とする。

$$E_i = \frac{1}{\frac{\cos^4 \theta}{E_R} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left( \frac{1}{G_{RT}} - \frac{2\nu_{RT}}{E_R} \right)} \quad (4)$$

$$F_i = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^4 \theta}{F_R} - \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{F_R F_T} + \frac{\sin^4 \theta}{F_T} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{F_{RT}^2}}} \quad (5)$$

ここに、

$E_R$  : R 方向ヤング係数,  $F_R$  : R 方向降伏応力,  
 $E_T$  : T 方向ヤング係数,  $F_T$  : T 方向降伏応力,  
 $G_{RT}$  : RT 面せん断弾性係数,  $F_{RT}$  : RT 面せん断降伏応力,  
 $\nu_{RT}$  : RT 面ポアソン比

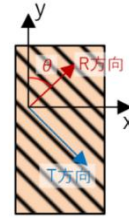


図4 解析モデルの年輪傾斜

## 2.3 材料定数の設定

木口面の材料特性の設定に必要なとなる繊維方向のヤング係数については、文献1)に示された  $7420 \text{ N/mm}^2$  を基本として、実験で測定されていない繊維直交方向やせん断に関する材料定数については文献3)を参考に算出した。結果を表1上段に示す。

文献1)に示されている実験結果の試験体は、木口面に年輪傾斜があるものと推定される。予備的に行った数値解析の結果から B150R060 と B150R150 とのヤング係数の比が  $1.00 : 1.73$ 、降伏応力の比が  $1.00 : 1.18$  となったことから、この比率に従って表1の数値を木口面の年輪傾斜の影響を排除した場合に換算し、表1下段の値を数値解析に用いる材料定数として採用する。

表1 集成材の材料定数

	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )			降伏応力(N/mm <sup>2</sup> )		
	$E_L$	$E_R$	$E_T$	$F_L$	$F_R$	$F_T$
換算前	7420.0	561.2	311.8	34.50	3.03	2.33
換算後	7915.0	598.6	332.6	35.29	3.10	2.38

## 2.4 全面圧縮試験の数値解析結果

### 2.4.1 試験体幅が150mmの場合

前節までに示した方法を用いて設定した応力-ひずみ関係と2.1節に示した全面圧縮試験の結果を図5及び表2に示す。なお、以降に示すヤング係数及び降伏応力は図3におけるモデル全体での見かけの値とする。

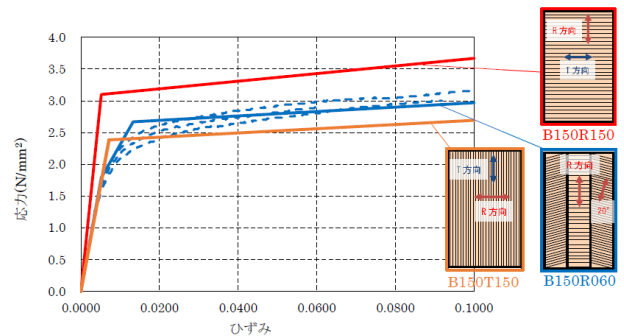


図5 集成材の全面圧縮解析・実験結果

表2 集成材の全面圧縮解析・実験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

	モデル名	ヤング係数	降伏応力
算定結果	B150R060	345.82 (1.00)	2.63 (1.00)
	B150R150	598.64 (1.73)	3.10 (1.18)
	B150T150	332.58 (0.96)	2.38 (0.91)
実験平均値		345.82 (1.00)	2.63 (1.00)

加圧方向全面において、半径(R)方向または接線(T)方向が広がっている場合を想定すると、過大評価、過小評価となってしまうことが分かる。

#### 2.4.2 試験体幅が210mmの場合

前項までに示した幅150mmの場合を踏まえ、幅210mmの場合について応力-ひずみ関係の算定を行う。解析モデルB150R060の両端に年輪傾角が45度の部分を付け足すことで、図6右側の解析モデルB210R060を設定した。

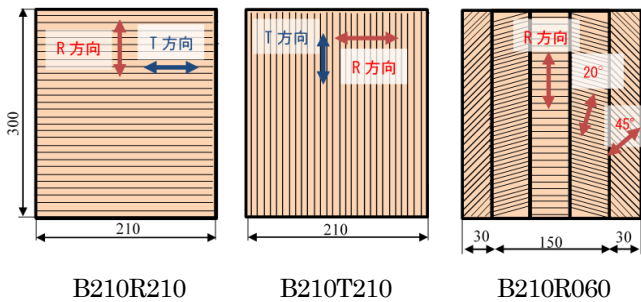


図6 解析モデルの概要(幅が210mmの場合)

前節の議論と同様に、予備的に行った数値解析の結果から、B210R060とB210R210のヤング係数の比が1.00:2.20、降伏応力の比が1.00:1.30であったことを踏まえ、木口面の年輪傾斜の影響を排除した場合に換算したものを材料定数として採用して応力-ひずみ関係を求める。算定結果を図7及び表3に示す。なお、括弧内には、実験結果を基準とした比率を示している。

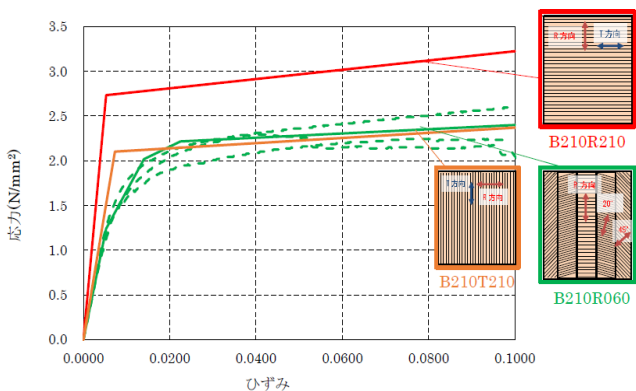


図7 集成材の全面圧縮解析・実験結果

表3 集成材の全面圧縮解析・実験結果 (N/mm²)

	モデル名	ヤング係数	降伏応力
算定結果	B210R060	235.59 (1.00)	2.14 (1.00)
	B210R210	519.05 (2.20)	2.74 (1.28)
	B210T210	288.36 (1.22)	2.10 (0.98)
実験平均値		235.59 (1.00)	2.14 (1.00)

幅150mmの場合よりも材料特性の低下率が大きくなっており、年輪傾斜の影響がより顕著となっていることが分かる。

以上の結果より、ヤング係数・降伏応力は年輪傾斜によるローリングシアーの影響を強く受け、幅の増大に伴ってヤング係数・降伏応力は比例的に増加しないことが明らかとなった。

### 3. むり込み試験体の数値解析

#### 3.1 解析モデル概要

前節の結果を踏まえ、図8に示すような解析モデルを採用して数値解析を行う。解析は平面応力状態を仮定した2次元解析とし、要素には9節点四角形要素を適用し、エネルギー積分には、(3×3)の積分点を有するGauss-Legendreの求積法を用いている。加圧側の材の上端全面に均等に強制変位を加えることにより載荷する。部材間の接触、分離現象の考慮に関しては、文献4)の手法を適用する。

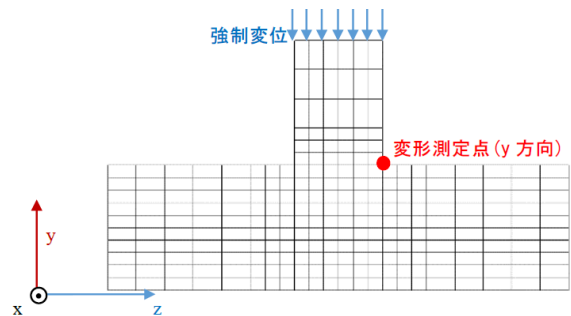


図8 解析モデル図(要素数128, 全自由度数1076)

#### 3.2 材料定数の設定

本節では、CLT及び集成材の材料定数として以下のような値を採用して解析を行う。

**CLT**: CLTの材料定数としては、『CLT設計施工マニュアル』<sup>5)</sup>に示されている方法に準じて算出した表4の値を採用するものとする。

**集成材**: 解析に採用する木口面の断面モデルについては、前節と同じモデルを採用する。加圧方向(図8中y方向)の繊維直交方向のヤング係数については、前節で示した算定結果を採用した。採用した集成材の材料定数を表5に示す。なお文献値については、ヤング係数・降伏応力については文献6)に記載された繊維方向、繊維直交方向の材料定数をもとに文献3)の方法を用いて算定したものと、前節で示した年輪傾斜を考慮したモデルを元に数値を更に低減させたケースについて数値解析を行う。

表4 CLT側の材料定数 (N/mm²)<sup>5)</sup>

弱軸	強軸	面内	弱軸	強軸	面内
1200	3000	500	4.68	8.10	2.70

表5 集成材の材料定数 (N/mm²)

	ヤング係数		降伏応力
	E <sub>z</sub>	E <sub>y</sub>	σ
B150R150	7915	598.64	3.10
B150R060	7915	345.82	2.63
B150T150	7915	332.58	2.38
B150R150_文献値 <sup>6)</sup>	6500	491.60	2.10
B150R060_文献値 <sup>6)</sup>	6500	223.45	1.78

### 3.3 数値解析結果

#### 3.3.1 試験体幅が 150mm の場合

数値解析結果を図 9、表 6 に示す。なお、降伏耐力は PickPoint<sup>7)</sup>により完全弾塑性モデルによって算定した。

B150R060 については、おおむね実験値に近い結果が得られた。実験値に比べるとやや低いが、これは年輪傾斜の影響が過大評価となったためと考えられる。加圧方向全体に半径(R)方向が広がっているケース B150R150 は、B150R060 に比べて剛性は約 7 割、降伏耐力は約 2 割大きい結果となった。

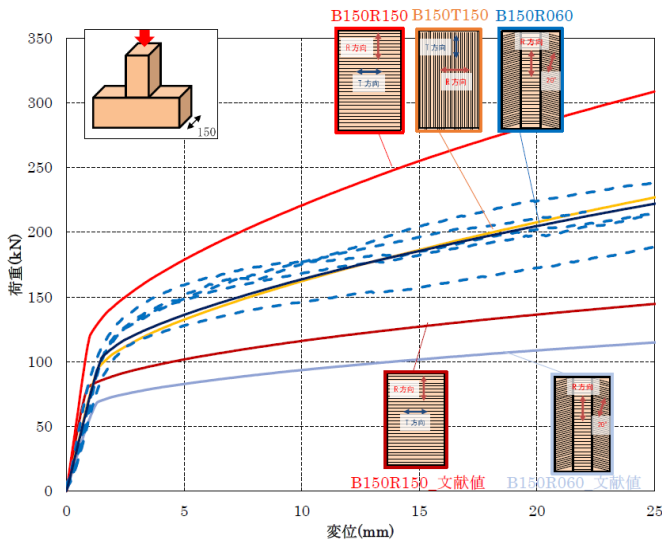


図 9 荷重－変形関係（幅 150mm）

表 6 初期剛性・降伏耐力（幅 150mm）

モデル名	初期剛性(kN/mm)	降伏耐力(kN)
B150R150	125.41 (1.68)	147.88 (1.19)
B150R060	73.03 (0.98)	118.17 (0.95)
B150T150	75.16 (1.01)	110.76 (0.89)
B150R150_文献値	102.52 (1.37)	84.26 (0.68)
B210R060_文献値	60.01 (0.80)	70.22 (0.56)
実験結果	74.66 (1.00)	124.67 (1.00)

#### 3.3.2 試験体幅が 210mm の場合

前節までの数値解析結果を踏まえ、幅 210mm の場合についての数値解析を行う。材料定数は、前節と同様の手順で求めるものとする。数値解析結果を図 10、表 7 に示す。

図 10、表 7 より、幅 150mm の場合と同様に、年輪傾斜の影響を考慮したモデル B210R060 の特性値が実験結果に非常に近い数値を示している。また、幅 150mm の場合よりも加圧全面を半径(R)方向とした場合との差が大きい。幅が大きいほど幅方向に占める半径(R)方向部分の割合が低くなり、ローリングシア一の影響を大きく受けることが要因として考えられる。

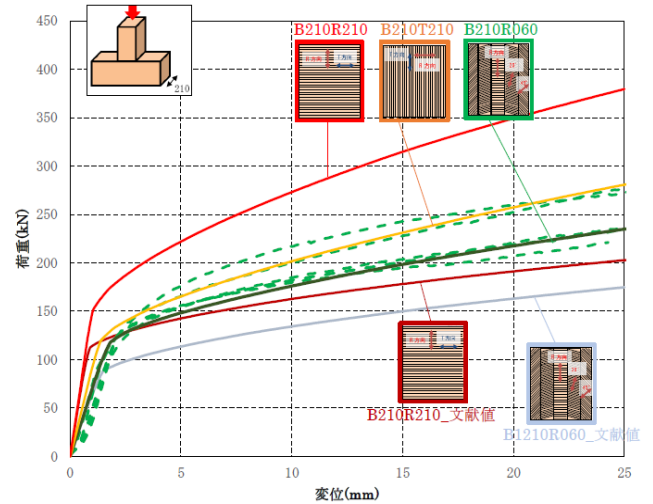


図 10 荷重－変形関係（幅 210mm）

表 7 初期剛性・降伏耐力（幅 210mm）

モデル名	初期剛性(kN/mm)	降伏耐力(kN)
B210R210	153.09 (2.05)	183.33 (1.24)
R210R060	70.16 (0.94)	129.88 (0.88)
B210T210	91.71 (1.23)	138.34 (0.94)
B210R210_文献値	144.35 (1.93)	120.84 (0.82)
B210R060_文献値	66.33 (0.89)	95.72 (0.65)
実験値	74.60 (1.00)	147.95 (1.00)

### 4. まとめ

本報では、集成材の幅が 150mm と 210mm の場合について、実験において幅の増大に伴って剛性・耐力が比例的に増加しないという現象については、年輪傾斜の影響を考慮することで解析的にも再現することができた。

### 謝辞

本研究は、林野庁補助事業の「林業成長産業化総合対策補助金等（中高層建築物を中心とした CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着事業）」のうち、「CLT・木質耐火部材等の製品・技術開発」で実施した。

### 参考文献

- 1) 木構造振興株式会社：燃えしろ設計を考慮した軸組併用型 CLT パネル工法の開発，2019 年
- 2) 堀文，光井周平，河内武，近藤一夫：木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析（その 8）強度比無次元化応力を用いた直交異方性降伏条件とひびき硬化則(続)，日本建築学会中国支部研究報告集，第 34 巻，pp.113-116，2011 年 3 月
- 3) 光井周平，金澤寛，南陽二，河内武，近藤一夫：木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析（その 3）弾塑性領域における定式化，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.337-338，2010 年 9 月
- 4) 光井周平，南陽二，河内武，近藤一夫：木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析（その 1）解析手法の概要と等変位めり込み試験解析，構造工学論文集，Vol.56B，pp.359-369，2010 年 3 月
- 5) CLT 設計施工マニュアル編集委員会編：2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル，pp.177-211，日本住宅・木材技術センター，2016 年
- 6) 日本建築学会編：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，2009 年
- 7) 「荷重変形曲線の特徴点抽出自動化ツール PickPoint」(参照 2019.11.27) <http://www.fipn-affrc.go.jp/labs/ctj/kanube/PickPoint/index-j.html>

\*1 呉工業高等専門学校 専攻科 専攻科生  
 \*2 広島工業大学・講師・博士（工学）  
 \*3 広島大学・准教授・博士（工学）  
 \*4 広島大学大学院 工学研究科 大学院生  
 \*5 大分大学・准教授・博士（工学）  
 \*6 木構造振興 客員研究員  
 \*7 東京大学生産技術研究所・教授・博士（工学）

\*1 Advanced Course Student, National Institute of Tech., Kure College  
 \*2 Lecturer, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.  
 \*3 Associate professor, Hiroshima University, Dr. Eng.  
 \*4 Graduate student, Hiroshima University  
 \*5 Associate professor, Oita University, Dr. Eng.  
 \*6 Assistant Research Engineer, Wood Structure Prom. Inc., Dr. Eng.  
 \*7 Professor, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng.