9層9プライヒノキCLTの面内せん断性能に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE IN-PLANE SHEAR PERFORMANCE OF 9 LAYERS 9 PLY JAPANESE CYPRESS CLT

荒木康弘 — * 1 中島昌一 — * 2
岡本滋史 — * 3 小谷竜城 — * 4

Yasuhiro ARAKI — * 1 Shoichi NAKASHIMA — * 2
Shigefumi OKAMOTO — * 3 Ryuki ODANI — * 4

キーワード：
CLT, 面内せん断強度, 鉛直荷重, 繰り返し載荷

Keywords:
CLT, Shear unit stress, Vertical load, Cyclic load

Regarding to the in-plane shear strength of CLT the authors proposed an equation for the in-plane shear strength in the width direction of CLT beams proposed by M. Flaig et al., and verified the validity of the proposed equation for Japanese cedar.

On the other hand it has not been confirmed whether the proposed equation is applicable to other wood species. In the past research the in-plane shear strength of CLT tested by one-way monotonic loading with no vertical load was only verified.

The aim of this study is to confirm the applicability of the proposed equation to Japanese cypress and for the testing condition that vertical load or repeated load is applied.

1. はじめに

CLTとは、Cross Laminated Timberの略称で、隣り合う層ごとのラミナの繊維方向が直交するように積層接着した木質構造材料である。1995年頃からオーストリアを中心として発展し、現在では欧州各国でも様々な建築物に使われている。また、カナダやアメリカでも規格づくりが行われ、カナダのブリティッシュコロンビア大学ではCLTを使用した18階建ての建築物も建設されているなど、CLTの利用は近年になり各国で急速な伸びを見せている。我が国でも、2016年4月1日にはCLTを用いた建築物の一般的な設計法等に関する告示¹⁾が公布・施行され、CLTを用いた構造設計技術の研究開発が精力的に行われている。

筆者らは、中高層CLT工法の一つとして横架材にH形鋼を用いた構造システムを提案した²⁾。横架材にH形鋼を用いた理由として、木造建築物の中高層化による壁・床間のめり込みによる鉛直構面の剛性低下や水平変位増大の防止が挙げられる。提案する構造システムの構造検討を行うためにモデルプランを作成した。平面図および立面図を図1に示す。モデルプランは、30m×12mの平面(1住戸6m×12m×5住戸)を有する6階建共同住宅であり、長辺方向の耐力壁線は3か所ある。図1の構造システムに示すように、鉛直力と水平力をCLT壁が負担し、横架材にH形鋼を用いる。またCLT壁が水平力を負担する時に働く引張力は、壁両端に配置したテンションロッドで負担する。CLT壁に働くせん断力は、テンションロッドを固定する箱型金物とCLT壁上下中央位置に配置するせん断金物で負担する。表1に構造検討結果に基づく建物仕様を示す。表中の「壁配置」について、例えば「中壁1.0m×2」は、中壁が幅1.0mのCLT壁2枚(ただしパネル間は接合しない)で構成されることを意味する。検討の結

図1 モデルプラン平面図・立面図と構造システム概要

果、耐震要素のCLT壁パネルには強度等級がMx90以上、層構成は9層9プライ必要であった。

構造検討に基づき、提案する構造システムの有効性を検証するための耐震壁の実験およびCLTのめり込み試験、圧縮試験、面内せん

¹⁾ 国土技術政策総合研究所建築研究部 主任研究官・博士(工学)
(〒305-0802 つくば市立原1)

²⁾ 国立研究開発法人建築研究所構造研究グループ 研究員・博士(農学)

³⁾ 大阪市立大学大学院生活科学研究科 講師・博士(工学)

⁴⁾ ㈱エヌ・シー・エヌ 博士(農学)

¹⁾ Senior Research Engineer, NILIM, Dr. Eng.

²⁾ Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Agr.

³⁾ Lecturer, Fac. of Human Life Science, Grad. School of Osaka City Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ New Constructor's Network, Dr. Agr.

断実験、面外せん断実験、接合部実験を計画した。本論文は、このうち面内せん断実験について報告するものである。

CLT の幅方向のせん断性能について、筆者らは M.Flaig らの提案する CLT 梁の幅方向のせん断強度算定式³⁾ (以下「CLT 幅方向のせん断強度算定式」とする) を修正した式を提案し、スギを用いた CLT の幅方向のせん断強度の算定に適用可能であることを報告している⁴⁾。一方、この CLT 幅方向のせん断強度算定式が、ヒノキ等のスギ以外の樹種について適用可能であるかどうかは確認されていない。また、既往の研究⁴⁾では鉛直荷重無しの一方向単調荷重による検討のみであるが、実際の CLT 壁パネルには地震時に鉛直力と水平力を同時に負担し、かつ繰り返しの荷重を負担するが、そのような状況での CLT パネルの構造性能は確認されていない。

そこで本研究は、CLT 幅方向のせん断強度算定式がヒノキにも適用可能であるか、また鉛直荷重および繰り返し荷重を受けた場合の CLT パネルの構造性能を実験的に確認することを目的とする。

2 面内せん断実験

2.1 試験体概要

図 2 に試験体図を示す。試験体形状は、幅 2000mm、高さ 1800mm の CLT パネルの中央に幅 840mm、高さ 430mm のくびれを設けたエ形とした。試験に用いた CLT の強度等級は S90 : A 種構成、層構成は 9 層 9 プライ、ラミナ厚は 30mm、ラミナ幅は 120mm である。積層層接着に用いた接着剤は水性高分子イソシアネート系接着剤で、幅はぎ接着は行っていない。

2.2 試験方法および試験パラメータ

図 3 に試験体セットアップ図を示す。試験体の外層ラミナの方向は、加力方向に対して直交する方向である。エ形の試験体下部は反力床および治具に緊結し、エ形の試験体上部は平行移動装置をとりつけた鋼製治具に緊結し、くびれ部分を強制的にせん断変形させる試験装置を用いた。

表 2 に試験パラメータを示す。パラメータは 3 仕様で、鉛直荷重の有無、加力方法の違い (単調・繰り返し) とした。「鉛直荷重無」では、鋼製治具の重量による鉛直力を除くため、治具重量分の鉛直荷重を鉛直ジャッキで上方向に加えた。一方「鉛直荷重有」では、試験設計で 1 階壁パネルが負担する長期荷重に相当する鉛直荷重 110kN (≒ 200kN/1.5m×0.84m) を一定保持し、試験体に向下向きに加えた。加力スケジュールについて、繰り返し加力では正負交番繰返し載荷とし、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 を各 3 回繰り返し載荷し、最後に 1 方向に加力する計画とした。

2.3 計測計画

パネルの平均せん断変形角を計測するため、試験体のくびれ部分に図 4 のように変位計を取り付けた。ジャッキにとりつけたロードセルをパネルのくびれ部分の全断面積で除した値を「せん断応力度 (τ)」、せん断水平変位 (Δ_{hs}) を計測部高さ (l_v) で除した値を「せん断変形角」、最大せん断応力度を τ_{max} とすると、せん断応力度-せん断変形角曲線上の $0.4\tau_{max}$ と $0.1\tau_{max}$ を結んだ線の傾きを「せん断弾性係数 G」、傾きがせん断弾性係数の 10% 下回る時の応力度を「比例限度応力度」と定義した。せん断応力度とせん断変形角の計算式を式(1)、

表 1 モデルプラン検討結果に基づく建物仕様概要

壁配置	CLT		梁	テンション ロッド
	X	Y		
側壁:1.0m×1 中壁:1.0m×2	Mx90-7-9 or S90-9-9 t=270mm	Mx90-5-7 t=210mm	H390×300 ×10×16 SN490	(最下層) SNR400B, M27×2 (最下層以外) PC-C 種 1 号 26mm×2
側壁:1.0m×1 中壁:1.5m×1				
側壁:1.0m×1 中壁:2.0m×1

図 2 試験体図

表 2 試験体仕様および加力方法・鉛直荷重の有無

試験体名	仕様	加力方法	鉛直荷重
S90-270-M0	t=270mm S90-9-9	1 方向 単調載荷	無
S90-270-M110		正負交番載荷	有(110kN)
S90-270-C0			無

図 3 試験体セットアップ

図 4 せん断変形角計測治具

(1) S90-270-M0

(2) S90-270-M110

(3) S90-270-C0

写真 1 破壊性状

(1) S90-270-M0

(2) S90-270-M110

(3) S90-270-C0

図 5 荷重変形角関係

(2)に示す。

$$\tau = \frac{P}{Bt}$$

$$\gamma = \frac{\Delta_{hs}}{l_v}$$

ここで、

P : 水平荷重 (N)

B : 試験体幅 (mm)

t : 試験体厚さ (mm)

Δ_{hs} : せん断水平変位 (mm)

l_v : 計測部高さ (mm)

Δ_{hs} は次式で表される。

$$\Delta_{ds} = \frac{\Delta_{dL} - \Delta_{dR}}{2} - \frac{\Delta_{hU} + \Delta_{hB}}{2} \cdot \cos R - \frac{\Delta_{vL} + \Delta_{vR}}{2} \cdot \sin R \quad (3)$$

$$\Delta_{hs} = \frac{\Delta_{ds}}{\cos R} \quad (4)$$

せん断弾性係数は次式のように定義した。

$$G = \frac{\tau_{04} - \tau_{01}}{\gamma_{04} - \gamma_{01}} \quad (5)$$

ここで、

τ_{04} : 最大せん断応力度 τ_{max} の 40% の応力度 (N/mm²)

τ_{01} : 最大せん断応力度 τ_{max} の 10% の応力度 (N/mm²)

γ_{04} : τ_{04} のときのせん断変形角 (rad)

γ_{01} : τ_{01} のときのせん断変形角 (rad)

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の実験終了時の破壊の様子を写真 1 に示す。いずれの試

験体も、変形の増加と共に外層ラミナに亀裂が生じ、終局時にはくびれ部分の木口面(側面)で加力方向と平行方向のラミナに階段状のずれが観察された。

(1)

(2) 3.2 せん断応力度-せん断変形角関係

図 5 に各試験体の荷重変形角関係と文献 5) に示される方法に準じて完全弾塑性モデルに置換した結果を示す。縦軸はロードセルの計測値、横軸は式(1)のせん断変形角である。いずれの試験体も 0.01rad を超えたところで最大せん断力に達し、その後緩やかに荷重低下した。S90-270-C0 では 0.0133 (1/75) rad に向かう途中で最大耐力に達し、その後荷重低下したため、繰り返し載荷をやめ一方に載荷した。最大荷重はいずれの試験体も 1000kN を超えていた。

4. 考察

4.1 強度特性値

表 3 に最大せん断応力度、比例限度せん断応力度、せん断弾性係数を示す。最大せん断応力度は 4.5~4.7N/mm²、比例限度せん断応力度は 1.87~1.92 N/mm²、せん断弾性係数は 655~707 N/mm² であった。また完全弾塑性モデルの終局荷重をくびれ部分の全断面積で除した値を「終局せん断応力度 (τ_u)」とすると、終局せん断応力度は 4.16~4.43 N/mm² であった。

表 3 強度特性値

試験体名	最大せん断 応力度 τ_{max} [N/mm ²]	終局せん断 応力度 τ_u [N/mm ²]	比例限度 せん断応力度 τ_{limit} [N/mm ²]	せん断 弾性係数 G [N/mm ²]
S90-270-M0	4.76	4.43	1.92	695
S90-270-M110	4.63	4.26	1.87	655
S90-270-C0	4.73	4.16	1.92	707

4.2 加力スケジュールの影響および鉛直荷重の影響

図 6 に各試験体のせん断応力-せん断変形角を同一のグラフにした図を示す。加力スケジュールおよび鉛直荷重の影響について、図 6 および表 3 より今回試験を行った範囲では、最大荷重、最大せん断応力度、比例限度せん断応力度、せん断弾性係数に影響はないと考えられる。一方終局せん断応力度については、繰り返し載荷や鉛直荷重により若干低下する傾向がみられた。

4.3 最大せん断応力度の実験値と計算値の比較

CLT の幅方向のせん断強度を式 (6-1) ~ (6-3) に示す。CLT の幅方向のせん断強度は、図 7 に示すような (I) ラミナのせん断強度 (式 6-1)、(II) 幅はぎ下にあるラミナの幅方向のせん断強度 (式 6-2)、(III) 交差面のねじり強度 (式 6-3) のうちの最小値で決まるとされている。

$$f_{v,CLT} = \begin{cases} f_{v,lam} & (6-1) \\ f_{v,lam90} \cdot \frac{t_{net}}{t_{gross}} & (6-2) \\ \frac{b \cdot n_{ca}}{t_{gross}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v,tor}} \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \cdot \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} & (6-3) \end{cases}$$

ここで、

$f_{v,lam}$: ラミナの繊維方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v,lam90}$: ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v,tor}$: 接着された直交する二つのラミナの交差面のねじりせん断強度 (N/mm²)

f_R : ローリングシア強度 (N/mm²)

n_{ca} : CLT の直交接着層の数

b : ラミナの幅 (mm)

t_{net} : 直交層の厚さの合計 (mm)

t_{gross} : CLT の厚さ (mm)

m : 各層ラミナの幅方向の枚数のうち最小値

各パラメータの値を表 4 に示す。 $f_{v,lam}$ はヒノキの構造用集成材のせん断の基準強度にばらつきを考慮した係数 (0.8) を割り戻した値、 $f_{v,lam90}$ は文献 6) に基づき $f_{v,lam}$ の 3 倍で $f_{v,lam}$ と同様にせん断の基準強度にばらつきを考慮した係数 (0.8) を割り戻した値である。 $f_{v,tor}$ および f_R は、ヒノキの実験データがないため、集成材のせん断強度で同じ樹種群となるカラマツのデータを用いることとし、 $f_{v,tor}$ は文献 7) に基づく値 (平均値)、 f_R は文献 8) に基づく値 (平均値) を用いた。

実験結果と計算値の比較した結果を表 5 に示す。計算値はいずれもモード I で 4.5N/mm² となった。3.1 節より、実験結果の破壊性状はいずれも変形の増加と共に外層ラミナに亀裂が生じ (モード I)、終局時にはくびれ部分の側面で階段状のラミナのずれが観察される (モード III) というものであり、計算値の破壊モードは実験結果と一致していると考えられる。また、実験値と計算値の比 (実験値/計算値) は 1.03~1.06 で、いずれの試験体においても計算値を実験値を精度よく推定することができた。なお、各一体ずつの試験結果との比較であるため、試験結果のばらつきの影響は今後の課題としたい。

5. まとめ

ヒノキを用いた 9 層 9 プライ CLT の面内せん断実験を実施し、以

図 6 せん断応力度せん断変形角関係

図 7 せん断破壊モードの定義

表 4 計算式に用いる数値

$f_{v,lam}$ [N/mm ²]	$f_{v,lam90}$ [N/mm ²]	$f_{v,tor}$ [N/mm ²]	f_R [N/mm ²]	n_{ca} -	b mm	t_{net} mm	t_{gross} mm	m -
4.5	13.5	4.7	1.66	8	120	120	270	7

表 5 実験値と計算値の比較

試験体名	計算値[N/mm ²]			実験値 [N/mm ²]	実験値/計算値
	Model I	Model II	Model III		
S90-270-M0	4.5	7.5	4.99	4.76	1.06
S90-270-M110				4.63	1.03
S90-270-C0				4.73	1.05

下の知見を得た。

- (1) 強度等級 S90A、9 層 9 プライの CLT の最大せん断応力度は 4.5~4.9N/mm²、面内せん断剛性は 650~700kN/mm² であった。
- (2) 今回実験した仕様に関しては、繰り返し載荷および鉛直荷重が最大荷重、最大せん断応力度、比例限度せん断応力度、せん断弾性係数に影響はないと考えられるが、終局せん断応力度については、繰り返し載荷や鉛直荷重により若干低下する傾向がみられた。
- (3) 既往の幅方向せん断強度算定式が、9 層 9 プライのヒノキをラミナを用いた CLT にも適用可能であることを確認した。

付記：本研究は、建築研究所研究課題「中高層木造建築物等の構造設計技術の開発」の一環で実施したものである。

参考文献

- 1) 平成 28 年国土交通省告示第 611 号、CLT パネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分雄構造方法に関する安全上必要な技術基準を定める件、2016 年 4 月

- 2) 荒木康弘、中島昌一、岡本滋史、小谷竜城、秋山信彦：横架材に鉄骨梁を用いた CLT 工法の開発、日本建築学会大会、学術講演梗概集 2018、C-1 構造 III、2018 年
- 3) M.Flaig, H.J.Blaß: Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane, proceedings of CIB-W18, 46-12-3, pp.1-14, 2013
- 4) 中島 昌一、荒木 康弘、孕石 剛志、中島 史郎、宮武 敦、CLT の面内せん断性能に層構成とラミナ等級が与える影響：日本建築学会学術講演梗概集 2015、C-1 構造 III、pp.25-26、2015.9
- 5) 枠組壁工法構造計算指針、社団法人日本ツーバイフォー協会 編、2007
- 6) 青木謙治：構造用材料としての木材・木質材料の現状と今後の課題、木材学会誌、Vol.61 No.3、pp.169-173,2015
- 7) 中島昌一、中島史郎、荒木康弘、軽部正彦、宮武 敦：樹種とラミナ幅が CLT の面内せん断性能に与える影響、日本木材学会大会発表要旨集、電子媒体 H28-17-1015、2017
- 8) Nakashima, S.; Araki, Y; Ohashi, Y; Nakajima, S; Miyatake, A.:Evaluation of In-Plane Shear Strength of CLT Panel with Horizontal Loading Shear Test, CD-ROM Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE2018), August 20-23, 2018, Seoul, Korea, ISBN: 979-11-6109-235-3

[2018 年 6 月 4 日原稿受理 2018 年 7 月 23 日採用決定]