開口を有する CLT パネルの開口低減係数に関する研究

STUDY ON THE OPENING REDUCTION COEFFICIENT OF CLT PANEL WITH OPENING

荒木康弘 ——— * 1 中島昌一 ——— * 2
 中島史郎 ——— * 3 山口修由 ——— * 4

Yasuhiro ARAKI ——— * 1 Shoichi NAKASHIMA ——— * 2
 Shiro NAKAJIMA ——— * 3 Yoshinobu YAMAGUCHI — * 4

キーワード：
 CLT, 有開口壁パネル, セン断耐力, 開口低減係数

Keywords:
 CLT, Shear wall with opening, Shear strength, Opening reduction coefficient

In order to propose the opening reduction coefficient of the 5layer 5ply CLT wall panel, in-plane shear tests of the CLT wall panel with openings were tested.

The knowledges are (1) the maximum shear unit stress of the CLT wall with opening excluding the opening area is from 2.0 to 2.2 N/mm², (2) the relationship between the opening coefficient of the CLT wall and the stress ratio, the relationship of $F=\gamma/(10-9\gamma)$ (at the real deformation angle) and $F=\gamma/(5-4\gamma)$ (at the apparent deformation angle) are the best to predict these relationships.

1. はじめに

クロス・ラミネイティド・ティンバー (以下、CLT) は、ひき板 (ラミナ) を互いに直交するように積層接着した木質パネルである。海外では中高層木造建築物を建設する際の主要な材料として使用されている。我が国においても、新たな工法として近年研究開発が精力的に行われ¹⁾、2016年4月にCLT工法の構造計算方法に関する技術基準告示等が新たに制定されている。

CLT を壁として用い、開口を設ける場合、無開口の大版パネルに開口をくり抜いて設ける方法と、開口を袖壁パネル・垂れ壁パネル・腰壁パネルを用いて構成する方法の2種類が考えられる。特に開口が小さい場合は、前者の方法が施工上のメリットも大きいと考えられるが、開口を設けることによる壁パネルの剛性や耐力等の構造性能の低下を適切に評価する必要がある。開口を有する耐力壁の構造性能評価方法として、例えば鉄筋コンクリート造では、無開口耐震壁のせん断強度に開口低減率を乗じて評価する方法が用いられている²⁾。一方、木質構造における有開口耐力壁の構造性能評価方法については、杉山ら³⁾⁴⁾により3種の異なる開口 (縦スリット型、窓型、ドア型) を有する枠組壁工法耐力壁について、開口部の形状寸法とせん断耐力の関係を与える推定式等が提案されている。また、CLT工法における有開口耐力壁については、岡部ら¹⁰⁾が3層3プライ CLT 壁パネルを用いて、比較的大きな開口 (幅 300mm×高 1000mm～幅 1000mm×高 1000mm) を有し、また壁頭壁脚部の接合金物により壁パネルの構造性能が決定している例について、開口形状と構造性能の関係について検討している。

そこで本研究は、現実的な窓サッシの開口寸法を想定した5層5プライ有開口 CLT 壁パネルの面内せん断実験を実施し、5層5プライ CLT 壁パネルにおけるせん断強度の開口低減係数を提案すること

を目的とする。

2. 有開口壁パネル面内せん断実験

2. 1 試験体概要

試験体は5層5プライのスギ CLT (Mx60A) で、試験体寸法は幅 3000mm、高さ 2700mm である。開口寸法を決定する際、サッシ窓の規格寸法を参考とした。表1が内法幅 260～805mm のサッシ窓の規格寸法である。この寸法を考慮して、試験体の開口寸法を内法幅 365mm、600mm、740mm の3種類、内法高さ 700mm、1100mm の2種類、合計6仕様とした。これに基準となる無開口壁パネルを加え、合計7仕様について各1体ずつ面内せん断実験を実施した。試験体図を図1に、試験体仕様を表2に示す。

表1 窓サッシ規格寸法 (内法幅 365～805mm)

		内法幅(mm)					
		260	365	600	690	740	805
内 法 高 (mm)	300						
	500						
	700		○	○		○	
	900						
	1100		○	○		○	
	1300						
	1500						
	1800						
	2000						
	2200						

¹⁾ 国立研究開発法人建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士 (工学) (〒305-0802 つくば市立原1)

²⁾ 宇都宮大学地域デザイン科学部建築都市デザイン学科 助教・博士 (農学)

³⁾ 宇都宮大学地域デザイン科学部建築都市デザイン学科 教授・博士 (農学)

⁴⁾ 国立研究開発法人建築研究所材料研究グループ 研究員・修士 (工学)

¹⁾ Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

²⁾ Ass. Prof., Sch. of Regional Design, Utsunomiya Univ., Dr. Agr.

³⁾ Prof., Sch. of Regional Design, Utsunomiya Univ., Dr. Agr.

⁴⁾ Research Engineer, Building Research Institute, M. Eng.

表 2 試験体仕様

試験体名	壁長×壁高 (mm)	開口幅×開口高 (mm)
仕様 0	3000 × 2700	-
仕様 1-1		365×700
仕様 1-2		600×700
仕様 1-3		740×700
仕様 2-1		365×1100
仕様 2-2		600×1100
仕様 2-3		740×1100

(1)仕様 0

(2)仕様 1-1

(3)仕様 2-1

(4)仕様 1-2

(5)仕様 2-2

(6)仕様 1-3

(7)仕様 2-3

図 1 試験体図

2. 2 加力方法

図 2 に、試験体セットアップ図を示す。試験は 1000kN 油圧ジャッキを用い、試験体を 1 方向（紙面右から左）に単調に加力した。ジャッキの先端に鋼製加力桁を取り付け、鋼製加力桁と試験体上面を、接合金物を介し Z マークビス（STS C65：短期許容せん断耐約 3kN、終局せん断耐力約 6kN）約 220 本で接続してジャッキの水平力を試験体に伝達した。加力桁による曲げ戻し効果を少しでも低減するために、開口部上部と鋼製加力桁の間には 12mm 程度の隙間を設けた。試験体下部は、反力床に固定された偏心除去版と接合金物を介して上部と同じ Z マークビス約 280 本で接続し、試験体に加わる水平力を反力床に伝達した。試験体の水平加力に伴う剛体回転による浮上

りに対しては、鉄骨桁を鋼製加力桁の上部に直交して設け、また鉄骨桁と鋼製加力桁の間にローラーを設置して、浮き上がり変位のみを拘束し、水平変位を拘束しないようにした。また、試験体の面外方向への移動を拘束するため、試験体の両側に面外拘束治具を設け、面外方向への変形を拘束した。試験体は外層ラミナが加力方向に対し直交する方向となるように設置した。

図 2 試験体セットアップ図

2. 3 計測計画

計測位置の配置例を図 3 に示す。試験体の水平変位（CH1、CH2：絶対変位）および鉛直変位（CH3、CH4：絶対変位）を、変位変換器を用いて計測した。また試験体の水平荷重は、油圧ジャッキに取り付けた荷重計により計測した。変位変換器および荷重計で計測した測定データは、スイッチボックス、データロガーを経由して計測コンピュータに転送した。

図 3 計測装置配置図（仕様 1-1 の例）

また図 3 に示すように、CLT パネルの各部のせん断変形量を計測するためにパイプ治具を取り付けた。図 4 に、くびれ部分の計測変位と寸法の定義を示す。図 3 の①～⑤にそれぞれ 4 つの標点を設け（①～⑤で隣り合う評点は重複）、標点間の鉛直、水平、対角の相対

変位を計測した。そして式 1 に示すようにパネル中央の平均せん断水平変位を標点間の鉛直方向の長さで除し、せん断ひずみ (γ) を求めた。

$$\gamma = \frac{\Delta_{hs}}{l_v} \quad (式 1)$$

ここで、 Δ_{hs} : 平均せん断水平変位 (mm)、 l_v : 計測部高さ (mm) である。 Δ_{hs} は式 2 および式 3 で表わされる。また記号の定義を図 4 に示す。

$$\Delta_{hs} = \frac{\Delta_{dS}}{\cos R} \quad (式 2)$$

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

図 4 各部の計測変位と寸法の定義

3. 実験結果

3. 1 破壊性状

無開口試験体 (仕様 0) について、900kN 近くまで加力したが、目立った損傷は確認されなかった。一方有開口試験体では、試験体の浮き上り防止治具によりパネル右上の浮上りが拘束されるため、パネル右上からパネル左下の脚部に沿って形成される、いわゆる圧縮ストラットの方向にパネルの割れが確認された (写真 1)。

1) 開口右上のパネルの割れ 2) 開口左下のパネルの割れ

写真 1 CLT の破壊性状

3. 2 荷重変形関係

図 5~8 に実験結果の荷重変形関係を示す。図 5、7 の横軸は試験体の真のせん断変形角 (単位: 10^{-3}rad)、図 6、8 の横軸は試験体のみかけのせん断変形角 (単位: 10^{-3}rad) である。真のせん断変形角は図 3 の $(CH1-CH2)/H - (CH3-CH4)/L$ から算出し、見かけのせん断変形角は図 3 の $(CH1-CH2)/H$ から算出した。また、図 5、6 の縦軸は壁パネル全長に対する荷重 (単位: kN) であり、図 7、8 の縦軸は壁パネルの開口部を除いた面積に対するせん断応力度 (単位: N/mm^2) である。

図 5、6 より、無開口の仕様 0 では、ほぼ直線的に荷重が増加しているのに対し、開口を有する仕様では、真のせん断変形角で 4mrad 程

図 5 荷重-真のせん断変形角の関係

図 6 荷重-見かけのせん断変形角の関係

図 7 せん断応力度-真のせん断変形角の関係

図 8 せん断応力度-見かけのせん断変形角の関係

度、見かけのせん断変形角では 6mrad 程度までは弾的に挙動した

後に剛性が低下していること、変形が大きいものでは真のせん断変形角で 20mrad 程度変形していることが確認できる。また図 7、8 より、開口を有する仕様では、最大せん断応力度が 2N/mm² 程度であること、仕様 1-3 を除いて概ね剛性が 0.3~0.4N/mm²/rad の間となることが確認できる。なお、図 5 および図 7 の仕様 0 で荷重変形関係が下に凸になるケースがみられるが、これは CH3 の計測データに不具合があったと考えられるが、適切な補正方法が考えられなかったため特に補正は行わなかった。また仕様 1-3 も、図 5 および図 7 において 1~3.5mrad の範囲で他の有開口も剛性が大きくなっており、この範囲で計測データに不具合があった可能性があるが、補正は行っていない。

3.3 各部のせん断変形角と全体変形角の関係

図 9 に、試験体の真のせん断変形角と仕様 1-1 について計測した各部のせん断変形角との関係、および各部のせん断変形量 Δ_{hs} の和を距離 l_v (2350mm) で除した値と全体変形角の関係を示す。横軸が 3.2 と同じ方法で算出した試験体の真の変形角、縦軸が図 4 に示す変形角 R である。試験体の真のせん断変形角で弾性範囲と考えられる 4mrad までで比較したところ、開口部脇のせん断変形角②、③が、他の部分に比べ大きいことが確認できた。また各部のせん断変形量から計算したせん断変形角は、概ね全体の変形角と一致していることが確認できた。

4. 考察

4.1 有開口 CLT 壁パネルの最大せん断応力度

表 3 に、各試験体の最大せん断応力度を示す。最大せん断応力度は、最大荷重を断面積(開口部を除く)で除して算出して計算した。曲げ成分は除去していない。なお、仕様 0 に関しては、CLT パネルに破壊が生じていないため、参考値として括弧で示す。

表より、開口を有する試験体の最大せん断応力度は 2.07~2.37N/mm² であることが確認できる。5 層 5 プライ CLT のせん断の基準強度は 2.2N/mm² であることから、開口を設けた仕様では、せん断の基準強度の 90%~105%程度のせん断応力度となっていた。

4.2 開口低減係数に関する考察

杉山らは、枠組壁工法耐力壁に関して式 4~6 に示す開口係数³⁾を提案し、無開口耐力壁と有開口耐力壁の見かけのせん断変形角 1/300rad 時の耐力の比 F と開口係数 γ と間には $F=3\gamma/(8-5\gamma)$ の関係がみられると報告している。

$$r = \frac{1}{1 + \alpha/\beta} \quad (\text{式 4}) \quad \alpha = \frac{\sum A_{\text{Openings}}}{A_{\text{Wall}}} \quad (\text{式 5}) \quad \beta = \frac{\sum L_{\text{full-height}}}{L_{\text{Wall}}} \quad (\text{式 6})$$

ここで、 γ : 開口係数

α : 開口面積比

β : 壁長比

A_{openings} : 開口部面積

A_{wall} : 開口部を含む壁面面積

$L_{\text{full-height}}$: 開口長

L_{wall} : 開口部を含む壁長

図 9 全体せん断変形角と各部のせん断変形角の関係

表 3 最大荷重と最大せん断応力度

試験体名	壁長 (mm)	開口幅 (mm)	パネル厚 (mm)	P_{max} (kN)	τ_{max} (N/mm ²)
仕様 0	3000	0	150	(905)	(2.01)
仕様 1-1	3000	365	150	819	2.07
仕様 1-2	3000	600	150	810	2.25
仕様 1-3	3000	740	150	803	2.37
仕様 2-1	3000	365	150	869	2.20
仕様 2-2	3000	600	150	746	2.07
仕様 2-3	3000	740	150	727	2.14

表 4 開口係数と耐力比

試験体名	L_{wall} (mm)	L_{openings} (mm)	A_{wall} (mm ²)	A_{openings} (mm ²)	α	β	γ
仕様 0	3000	0	8100000	0	0	0	1
仕様 1-1		365		255500	0.03	0.88	0.97
仕様 1-2		365		401500	0.05	0.88	0.95
仕様 1-3		600		420000	0.05	0.80	0.94
仕様 2-1		600		660000	0.08	0.80	0.91
仕様 2-2		740		518000	0.06	0.75	0.92
仕様 2-3		740		814000	0.10	0.75	0.88

開口を有する CLT においても耐力比 F と開口係数 γ の関係を検討した。表 4 に各試験体の開口係数 γ の計算結果を示す。表より、今回検討した試験体の開口係数が 0.88~0.97 程度であることが確認できる。次に図 10、11 に無開口壁パネルのせん断耐力に対する有開口壁パネルの耐力比 F と開口係数 γ の関係を示す。耐力比 F については、CLT は軸組工法や枠組壁工法の耐力壁よりも面材としての剛性が高いことから、真のせん断変形角および見かけのせん断変形角で 1/500rad (図 10(1)、図 11(1))、1/400rad (図 10(2)、図 11(2))、1/300rad (図 10(3)、図 11(3)) 時のせん断耐力比 F について検討を行った。図の横軸が開口係数 γ 、縦軸がせん断耐力比 F である。

図より、杉山らの提案式と CLT 有開口壁の耐力比との間では、実験値に対する相対誤差 ((実験値の耐力比-提案式の耐力比)/実験値の耐力比) が 35%~75%となり、過大に評価していることが確認できる。そこで、CLT 有開口壁の実験結果に適合するような開口係数と

(1) 1/500rad 時の耐力比

(1) 1/500rad 時の耐力比

(2) 1/400rad 時の耐力比

(2) 1/400rad 時の耐力比

(3) 1/300rad 時の耐力比

(3) 1/300rad 時の耐力比

図 10 開口係数と耐力比の関係（真のせん断変形角）

図 11 開口係数と耐力比の関係（見かけのせん断変形角）

耐力比の関係を試行錯誤的に検討した。その結果、真のせん断変形角で $F = \gamma / (10 - 9\gamma)$ とした場合、CLT 有開口壁の耐力比との間では相対誤差が 1~17%、見かけのせん断変形角で $F = \gamma / (5 - 4\gamma)$ とした場合、CLT 有開口壁の耐力比との間では相対誤差が 1~9%程度と良好に予測できていた（ただしいずれも仕様 1-3 を除く）。この時の各変形角時における開口係数と耐力比の関係をみると、真のせん断変形

角については 1/500rad、1/400rad、1/300rad 時でいずれも概ね 0.5~0.8 に同様に分布し、見かけのせん断変形角については概ね 0.6~1.0 に同様に分布していた。これより、1/500rad~1/300rad の範囲では、無開口 CLT パネル、有開口 CLT パネルともに弾性範囲であることが示唆された。

なお、図 10 (1) のみプロット数が 6（その他は 7）となっており、

また図 10 (2)、(3) および図 11 (1) ～ (3) においては、1 つだけ曲線から上に外れているプロットがある。これは仕様 1-3 であるが、図 5 からわかるように 1/250rad 程度までの同一変形角における荷重が無開口よりも大きく計測されているためである。

5. まとめ

5 層 5 プライ CLT 壁パネルの開口低減係数を提案するため、現実的な開口寸法を想定した 5 層 5 プライ有開口 CLT 壁パネルの面内せん断実験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1)開口幅を 365mm、600mm、740mm、開口高を 700mm、1100mm とした CLT 有開口壁の開口部を除く最大せん断応力度は $2 \sim 2.2 \text{ N/mm}^2$ であった。
- (2)CLT 壁の開口係数と耐力比の関係を検討した結果、今回検討した開口係数 0.88～0.97 の範囲でかつせん断変形角で 1/300rad までは、真のせん断変形角で $F=\gamma / (10-9 \gamma)$ 、見かけのせん断変形角で $F=\gamma / (5-4 \gamma)$ の関係が、両者の関係を良好に予測できていた。

付記：本研究は、建築研究所研究課題「CLT 等を構造材とする建築物の設計・評価技術の開発」の一環で実施したものである。

参考文献

- 1) 例えば加藤信一、中島昌一、荒木康弘、大島弘也、五十田博、腰原幹雄：CLT による構造の設計法検討のための実大震動台実験 その 1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 構造Ⅲ、pp.351-352、2015.9
- 2) (一財) 建築行政情報センター、(一財) 日本建築防災協会、2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書、pp.379
- 3) 杉山英男：壁式木質構造の保有水平耐力略算のための一提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2265-2266、1981.9
- 4) 安村基、杉山英男：RIGIDITY AND STRENGTH OF PLYWOOD-SHEATHED WALL PANELS UNDER REVERSED CYCLIC LOADING(NO.1)、日本建築学会論文報告集、第 329 号、PP.64-73、1983. 7
- 5) 安村基、杉山英男：SHEAR PROPERTIES OF PLYWOOD-SHEATHED WALL PANELS WITH OPENING、日本建築学会論文報告集、第 338 号、pp.88-98、1984. 4
- 6) 杉山英男、松本忠史：多数の開口を持つ合板釘打ち張り耐力壁のせん断耐力略算法 (第 1 報) 無開口壁ユニットのせん断耐力評価、木材学会誌、39 巻 1 号、pp.75-79、1993. 1
- 7) 杉山英男、松本忠史：多数の開口を持つ合板釘打ち張り耐力壁のせん断耐力略算法 (第 2 報) 開口を有する耐力壁のせん断力と変形の計算法、木材学会誌、39 巻 8 号、pp.924-929、1993. 8
- 8) 杉山英男、松本忠史：多数の開口を持つ合板釘打ち張り耐力壁のせん断耐力略算法 (第 3 報) 開口壁のせん断抵抗とパネル要素の挙動の解明、木材学会誌、40 巻 3 号、pp.280-286、1994. 3
- 9) 杉山英男、松本忠史：Empirical Equations for the Estimation of Racking Strength of a Plywood-Sheathed Wall with Openings、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、pp.89-90、1994. 9
- 10) 岡部実、安村基、小林研治：地域産材による直交集成板(CLT)の建築構造への適用 その 7 開口を有する CLT 壁体の正負繰り返し水平加力試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp.215-216、2014.9

[2017 年 6 月 6 日原稿受理 2017 年 8 月 19 日採用決定]