

交付番号	24-1-02
------	---------

2025年6月29日

朝日ウッドテック財団研究助成事業
2024年度 研究成果報告書

報告者

所属機関	国立大学法人宇都宮大学
職名	教授
氏名	中島史郎

研究課題

地域の木材産業の活性化に資する接着を用いない CLT(Cross Laminated Timber)
の開発

研究期間

2024年4月1日 ～2025年3月31日

[記入上の注意]

- この「研究成果報告書」は、当財団でとりまとめ、Webサイトや印刷物等で公表する予定です。
- 報告書はA4判（横書き）4枚程度にまとめ、必要に応じて図表等を挿入してください。
- 本助成金による研究の発表論文（発表予定を含む。）の別刷り又は作成した資料がありましたら、添付してください。

1 研究の背景と目的

木質構造材料は、木材の要素を接着剤を用いて貼り合わせて製造されるものがほとんどであるが、木材の接着には専用の設備と高度な接着技術が必要であり、製造可能な工場や企業が限定される。一方、釘接合などの機械接合を用いて木材の要素を接合して木質構造材料を製造する場合には専用の施設などを必要とせず、誰もがその製造に参入することが可能である。海外では、木質構造材料の一つである CLT について、機械接合を用いて挽板どうしを積層接合して製造している事例がある¹⁾。

本研究の目的は、①製材を機械接合により積層接合した木質部材として、製材を直交集成板 (CLT) のように各層で直交させて、製材が交差する部分をビス接合により接合した木質部材を製作し、②その面内せん断性状 (耐力・剛性・靱性) に関する知見を得て、③同部材を木造建築物の水平抵抗要素 (耐力壁) として用いるための技術的な知見を得るとともに、④その材料 (部材) 設計法を示すことにある。

2 研究方法・研究内容

2.1 ビス接合を用いて製材を積層接合した CLT の製作

図 1 に示すビス接合を用いて製材を積層接合した CLT (以下、Mechanically Jointed CLT の頭文字を取って MJCLT と呼ぶ) を製作した。製作した MJCLT は図 2 に示す 8 体の試験体であり、各試験体の諸元は表 1 に示すものとした。試験体の 3P-Gap と 5P-Gap には製材間の幅はぎ部分に 2mm の隙間を設けており、製材間に支圧が生じないようにした。また、3P-O-b、3P-O-c、3P-O-d は構成製材に縦継ぎを設け、短尺材を構成材として用いている。短尺材の長さは、b、c、d の順に短くした。なお、縦継ぎ位置のルールは表 2 に示すように定めた。

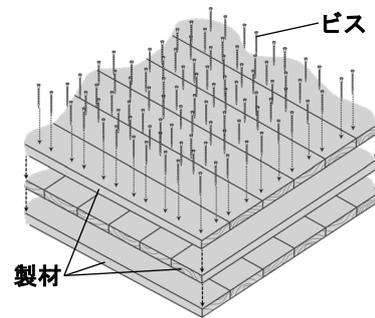


図 1 MJCLT の概念図
(解説) 製材を各層で直交させて積層し、その交点をビスにより接合する

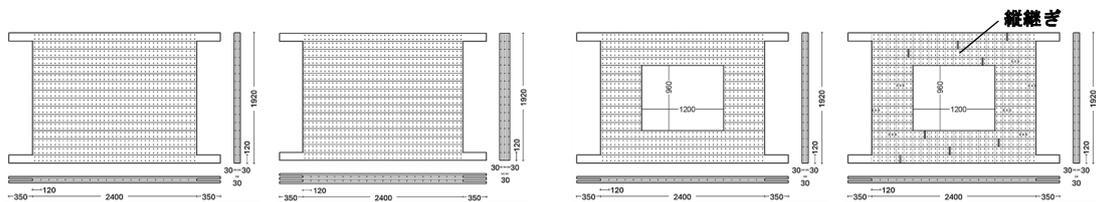
表 1 試験体の諸元

試験体名	3P	3P-Gap	5P	5P-Gap	3P-O-a	3P-O-b	3P-O-c	3P-O-d
層数	3層	3層	5層	5層	3層	3層	3層	3層
開口の有無	無	無	無	無	有	有	有	有
製材間隙間	無	有	無	有	無	無	無	無
製材縦継ぎ	無	無	無	無	無	有	有	有

(注1) 試験体の高さは 1920mm、長さは 2400mm とした。

(注2) 開口を有する試験体は、試験体中央に幅 1200mm、高さ 960mm の開口を設けた。

(注3) 試験体を構成する製材の樹種はスギ、密度平均: 376kg/m³、弾性係数平均: 9.03kN/mm² とした。



(a) 無開口 3 層

(b) 無開口 5 層

(c) 有開口 3 層

(d) 有開口 3 層縦継ぎ有

図 2 試験体の形状

(注) 図 d の記載した二重線は製材の縦継ぎ位置を示す。破線の二重線は中層を構成する製材の縦継ぎ位置を示す。

2.2 面内せん断試験の実施

製作した 8 体の試験体を面内せん断試験に供した。試験体の頂部を加力し、①試験体頂部と下部の水平変位、②試験体両端部の鉛直変位、③製材間の相対変位 (ず

れ)、④隣り合う層の製材間の回轉變位、⑤製材縦継ぎ部分の開き、⑥製材のひずみを各々測定した。図3に試験の様子を示す。

表2 縦継ぎのルール (試験体 3P-O-b~3P-O-d)

層の関係	幅はぎ方向の関係	間に設ける交差部の数		
		試験体 b	試験体 c	試験体 d
同一層内	同一線上の製材	9以上	5以上	3以上
	隣接する線上の製材	5以上	3以上	隣接しない
	隣接する次の線上の製材	2以上	1以上	制限なし
隣接する層内	同一線上の製材	2以上	2以上	隣接しない
	隣接する線上の製材	1以上	1以上	隣接しない
	隣接する次の線上の製材	制限なし	制限なし	制限なし



図3 試験の様子

加力は「木造耐力壁及びその倍率の試験・評価業務方法」に準じたスケジュールで行い、 $\pm 1/450$ 、 $\pm 1/300$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/150$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/75$ 、 $\pm 1/5$ 、 $\pm 1/30\text{rad}$ で折り返す、正負交番3回繰り返して加力とした。

2.3 MJCLT の面内せん断に係る荷重変位関係の算定

MJCLT を面内せん断試験に供したときの荷重変位曲線を、MJCLT を構成する釘接合部の荷重変位関係より推定する方法を提案し、荷重変位曲線を求めた。また、実験結果との比較により計算方法の妥当性についての確認を行った。さらに、面内せん断変形が大きい領域で、製材の幅はぎ部分に支圧が生じ、荷重が増分するという実験結果を再現するための計算方法を示し、その妥当性に関する検討を行った。内容については「3 研究成果」に記載する。

2.4 MJCLT を水平抵抗要素とする建物の試設計

MJCLT を水平抵抗要素(耐力壁)とする建物の試設計を行った。内容については「3 研究成果」に記載する。

3 研究成果

3.1 面内せん断試験の結果と考察

図4に各試験体の荷重変位曲線とその包絡線を示す。また、表3に各試験体の特性値を示す。荷重変位曲線と各特性値から以下の知見が得られた。

表3 各試験体の特性値

特性値	3P	3P-Gap	5P	5P-Gap	3P-O-a	3P-O-b	3P-O-c	3P-O-d
$P_y(\text{kN})$	71.6	72.6	124	102	35.3	34.3	32.2	32.1
$P_{1/120}(\text{kN})$	42.4	37.4	54.7	53.6	21.7	21.0	20.8	20.6
$3/2P_{\max}(\text{kN})$	98.3	81.2	161	140	50.9	46.3	42.6	42.6
$0.2P_u/D_s(\text{kN})$	50.2	50.6	67.5	61.9	23.0	21.4	20.3	20.3
降伏耐力(kN)	42.4	37.4	54.7	53.6	21.7	21.0	20.3	20.3
壁倍率	9.0	7.9	11.6	11.4	4.6	4.5	4.3	4.3
$K(\text{kN/mm})$	1.71	1.51	2.34	2.32	0.92	0.97	1.01	1.01

(注1) 降伏耐力は、 P_y 、 $P_{1/120}$ 、 $3/2P_{\max}$ 、 $0.2P_u/D_s$ の最小値とした。

(注2) 壁倍率は、降伏耐力を1.96で除した値を開口を含む壁長さで除した値とした。

- ① MJCLT の降伏耐力は壁の耐力を決める4つの指標のうち、主として見かけのせん断変形角が $1/120\text{rad}$ の荷重($P_{1/120}$)で決まり、一部の試験体については靱性を考慮した $0.2P_u/D_s$ で決まった。
- ② 降伏耐力は、5層の無開口、3層の無開口、3層の有開口の順に高い値であった。
- ③ MJCLT はせん断変形が大きくなると、製材の幅はぎ面に支圧が生じる。この支圧

により、変形が大きい領域で荷重が漸増する（図 3(a)）。一方、製材の幅はぎ面が接しないように隙間を設けると、製材間に支圧が生じないため、変形が大きい領域で荷重が漸増することはない（図 3(b)）。5 層構成の MJCLT は 3 層構成の MJCLT ほど顕著には支圧の影響が見られないが、同様の傾向を有する。

- ④ MJCLT を構成する製材に縦継ぎ（バットジョイント）を設けた場合、縦継ぎ間隔が小さいほど降伏耐力はやや小さくなるものの、ほとんど低下することはない（表 3 の試験体 3P-O-a~d）。

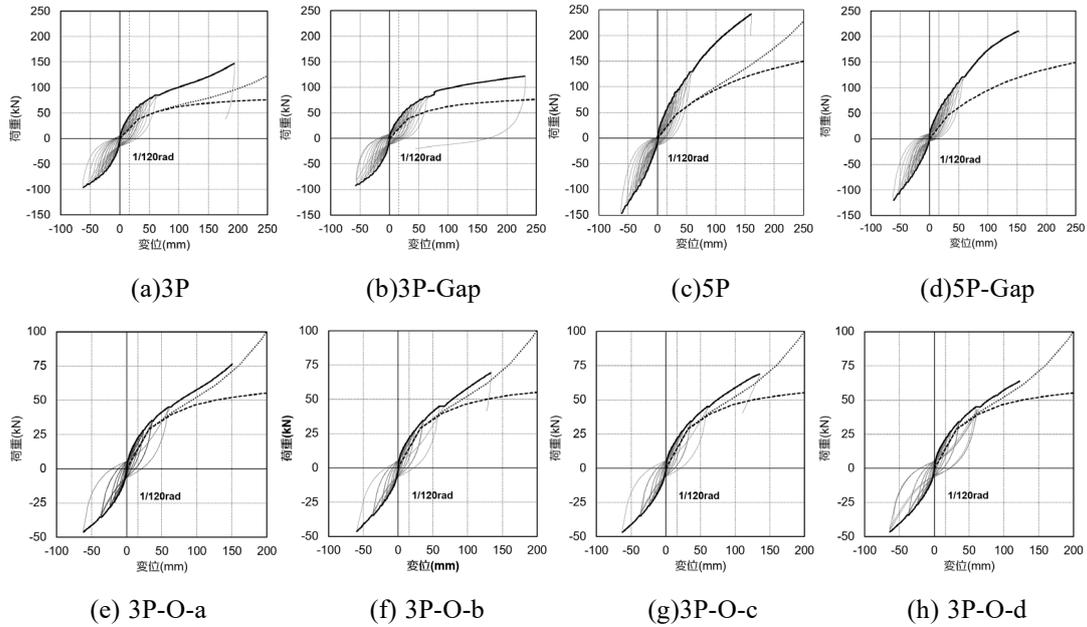


図 4 荷重変位曲線とその包絡線

3.2 荷重変位曲線の算定

図 5(a)に示すように面内せん断変形が生じる MJCLT をモデル化し、試験体の頂部に生じる水平変位 x と荷重 P との関係を以下に記す考え方により求めた。

試験体の水平変位 x はそのせん断変形角 θ と試験体を構成する製材の高さ方向の枚数 n 、製材の幅 $H_{element}$ を用いて式 1 により求まる。

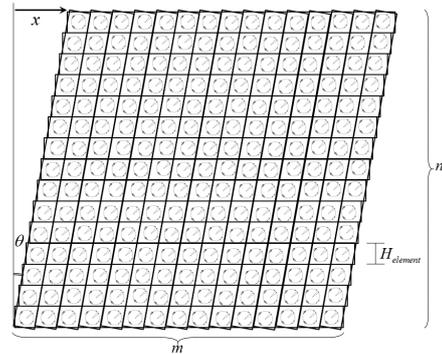
$$x = \theta \cdot (n \cdot H_{element}) \quad (1)$$

試験体にせん断変形角 θ が生じるときに、1 つのビス接合部に生じるせん断力 $F(\theta)$ は、ビス接合部の剛性 $K_s(\theta)$ (θ の関数) と図 5(b)に示す製材の回転中心からビス接合部までの距離 r を用いて式 2 により求まる。

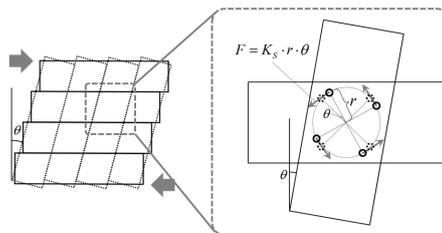
$$F(\theta) = K_s(\theta) \cdot r \cdot \theta \quad (2)$$

MJCLT を構成する全ビス接合部に変形を生じさせるのに必要な仕事量 E_{INT} は式 3 となる。

$$E_{INT}(\theta) = (m \times n) \cdot 4 \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} K_s(\theta) \cdot r \theta d\theta \quad (3)$$



(a) MJCLT 全体の変形のモデル化



(b) 製材間の回転と接合部の変形

図 5 MJCLT のモデル化

ここで、 $(m \times n)$ は試験体を構成する製材の交差部の数、数字4は1つの製材の交差部にあるビス接合部の数である。一方、試験体に θ のせん断変形を与えるために試験体頂部に加える水平力が行う仕事量は、水平荷重 $P(x)$ の関数を用いて式4より求まる。

$$E_{EXT}(\theta) = \int_{x1}^{x2} P(x) \cdot x dx \quad (4)$$

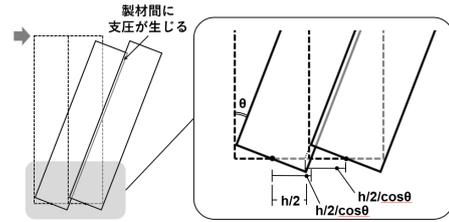


図6 製材間の支圧のモデル化

$E_{INT}=E_{EXT}$ よりビス接合部の荷重変位関係が既知であれば、変位増分解析によりMJCLTの荷重変位関係を求めることができる。

上記の方法により求めたMJCLTの荷重変位曲線を図4に破線にて示す。計算により求めた荷重変位曲線の荷重は、無開口試験体については実験により得た荷重の約2/3、有開口試験体については約4/5と求まった。MJCLTを構成する製材間に生じる摩擦や支圧などが計算では考慮されていないことがその要因と考えられるが、今後改善を行う必要がある。

一方、MJCLTにせん断変形が生じると、図6に示すように製材間の隙間が減少し、製材間に支圧が生じる。製材間に生じるめり込み深さ δ_{CV} は、製材幅 h とせん断変形角 θ を用いて式5により求まる。また、製材間のめり込みによって1つの支圧面に生じる支圧力 ${}_1F_{CV}$ は式6により求まる。式6の k_{CV} は支圧剛性、 $b \cdot L$ は支圧面積、 k は支圧面積を考慮した低減係数である。支圧面積を考慮した低減係数は製材間の全面に均等に支圧が生じないという考えのもと、支圧面積を低減するという意味を持つ。

$$\delta_{CV} = \left(\frac{h}{\cos \theta} - h \right) \times \cos \theta \quad (5)$$

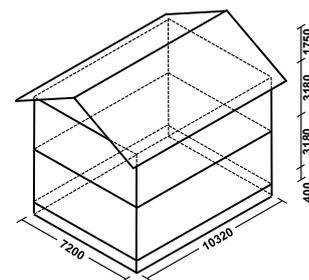
$${}_1F_{CV} = k_{CV} \times \delta_{CV} \times (b \cdot L) \times k \quad (6)$$

図4(a)、(c)、(e)、(f)、(g)、(h)に製材間の支圧を考慮した荷重変位曲線の計算値を点線にて示す。なお、荷重変位曲線は支圧面積を考慮した低減係数を0.2として求めている。製材間の支圧を考慮することにより、実験結果に近い荷重変位曲線を得ることができた。

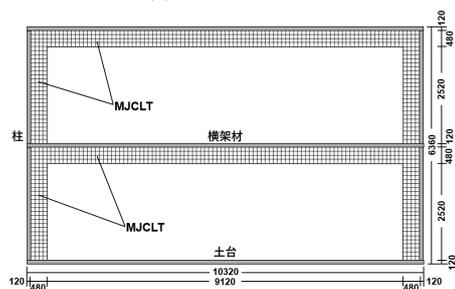
3.3 MJCLTを用いた建物の試設計

図7(a)に示す寸法形状の2階建ての建物について地震に対する試設計を行った。建物に作用する地震力は1階部分が約54kN、2階部分が約32kNとなる。3.2に記したようにMJCLTの面内せん断に係る降伏耐力が製材の交差部の数で決まるとすると、交差部1か所が負担する降伏耐力は、降伏耐力を交差部の数で除して求めることができる。例えば、開口を有する3層構成のMJCLTが約0.085kNとなる。

開口を有する3層構成のMJCLTを耐力要素とする場合のMJCLTの形状について検討した結果を以下に記す。例えば、建物の桁行方向の両外壁には、図7(b)に示す形状のMJCLTを水平抵抗要素として設ければ良いことになる。また、張間方向についても同数の交差部を有する



(a) 建物の概要



(b) 桁行方向の壁の構成

図7 試設計の対象とした建物

MJCLT を設ければ良く、大きな開口を確保する一つの方法となり得る。なお、MJCLT の面内曲げと MJCLT と架構とを接合する各接合部については別途検討を行う必要がある。

4 研究成果の活用と今後の見通し

4.1 研究成果の活用

研究の成果は、①戸建て住宅規模の建物に大きな開口を設ける場合に水平耐力を確保するための一手法として活用することができる。また、挽板の積層数を増やすことにより高耐力の構面を得ることができるので、②中層の木造建築物や鉄骨造の水平抵抗要素として活用できる可能性がある。さらに、①に記した特徴より、③木造住宅の耐震改修に活用できる可能性を有する。

4.2 今後の見通し

今後は、MJCLTと架構とのおさまり（接合部）について検討し、実建物への実装を視野に入れた検討を進める予定である。また、MJCLTの実務的な構造設計を行うにあたり、降伏耐力、剛性の簡易計算法の検討を行う予定である。

文献：

- 1) Petr Kuklík, Lukáš Velebil, Pavel Nechanický : Mechanically Jointed CLT Panels for Wall, Floor and Timber-Concrete Composite Structures, Proceedings of WCTE 2014, Electric Device, 2014.