

CLT 床版を対象とした高剛性ビス接合の開発

厚澤 瑛人^{*1}・相馬 智明^{*1}・安田 聰^{*1}・島村 高平^{*2}・高澤 昌義^{*3}

Keywords : CLT, deck, shear, inclined screw, angular accuracy, FEM analysis

CLT, 床版, せん断, 斜めビス, 角度精度, FEM 解析

1. はじめに

近年、国内森林資源の有効活用、二酸化炭素排出量の削減という観点で、CLTなどの大断面木質材料を活用した中大規模木造建築が実現している。特にCLTは大断面かつ長尺の木質パネルであり、比較的容易に構面を構築可能という特徴から、床版として用いられることが多い。中でもCLT床版相互のせん断接合には様々な形式が開発されており、構造用の釘やビスを使った接合は乾式工法で施工性も高く、実用に便利である。特に図-1(a)に示すような、長いビスを使ってCLT相互を接合する斜めビス接合（平面的斜めビス接合）¹⁾はビスの打込みが簡単であり、現場での施工性に優れている。一般的に利用されるこの平面的斜めビス接合は、接合面に直交する仮想平面に収まる形で、ビスを角度 γ 方向に斜め打ちする方法であり、せん断力をビスの断面で受け、曲げ降伏によって耐力が決まる。そのため高い剛性・耐力を得ることが難しく、結果的に必要ビス本数が増えてしまうこととなる。本研究ではこのような抵抗機構を改良するため、図-1(b)、写真-1に示すような立体的斜めビス接合を開発した。立体的斜めビスはせん断面に直交する仮想平面に対して角度 θ をつけてビスを打ち込む接合方法である。この方法ではビスの軸方向力としてせん断力の分力を負担するため、高い剛性が得られる。しかし、ビスを γ と θ の2方向に角度をつけて接合するため、ビスの打ち込み時の角度精度の確保が課題となる。本研究では、角度精度確保のための事前加工の考案および合理化を行い、実験およびFEM解析によって開発した接合方法のせん断性能を確認したので報告する。

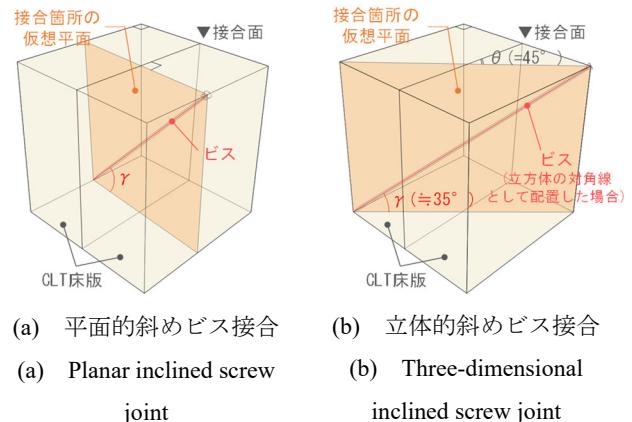


図-1 長ビスを用いたCLT床版相互のせん断接合部
Fig.1 Shear joint between CLT decks using long screws



写真-1 立体的斜めビス接合の施工の様子
Photo.1 Installation process of a three-dimensional inclined screw joint

2. 事前加工

2.1 角度精度確保のための事前加工の考案

ビスを斜めに打込むことで構造的なメリットが得られる一方、打込み位置と打込み角度を保って施工するのが難しいといった課題がある。写真-2に立体的斜め

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 木・鋼研究室

*2 設計本部

*3 設計本部構造設計第三部

ビスの打込み施工の失敗例を示す。写真-2 はビスを斜めに傾け CLT に打ち込む際、その打ち込み時の力の水平方向分力によりビスの先端が滑り、初期の打ち込み位置がずれてしまうとともに、打ち込み中にビスの角度を一定に保つことができず、打ち終わり位置がずれてしまった事例である。本来であれば A 点を打始め位置として B 点まで打込まれるはずであるが、打始め位置と打込み角度がずれてしまい、途中の位置でビスの先端が CLT から突き出てしまっていることが確認できる。

したがって、斜めビスの打込み位置がずれる主な原因はビスを打ち込む際の水平方向分力によるすべりおよび、打ち込み中の角度のずれである。そこで、そのすべり、角度ずれを抑えるため、図-2 に示すように、ビスの傾斜固定のための座彫り加工①および打ち込み精度向上のための先孔加工②、③による事前加工を考慮した。円形の座彫り加工の径と深さによってビス角度を決め（座彫り寸法 $\phi 20$ 、 $d=11mm$ でビス傾斜 γ が約 35° ）、打込み時の角度を固定できるようにした。加えて、打込み角度の精度を上げるために、座彫り孔の隅角部から機械加工によって必要な角度に傾斜した $\phi 5mm$ の先孔を深さ $25mm$ （加工機械の限界加工深さ）だけ空け、そこに手加工で $\phi 5, 75mm$ の先孔の追い加工を行った。これにより総長さ $100mm$ の先孔を座彫り孔の最深部から設けた。

2.2 角度精度の確認

2.1節における事前加工によるビスの打ち込み角度精度の確認のため、実際に CLT 床版に事前加工を施し、立体的斜めに打ち込まれたビスの角度を実測した。計測対象のビスはメーカーの異なる $\phi 8 \times 290mm$ および $\phi 10 \times 320mm$ の 2 種類であり、角度の理想値は立体方向 $\gamma = 35^\circ$ 、平面方向 $\theta = 45^\circ$ である。打ち込み角度の計測方法を写真-3 に示す。立体方向では、打ち込まれたビスを $200mm$ ほど引き抜き、デジタル角度計をビスの上に設置後、面外方向への傾きを L 型アングルで固定し計測した。平面方向の角度は、ビスと平行な線を引き、金尺を用い接合面からの 2 方向の距離を測定し算出した。計測本数は全部で 120 本であった。

計測結果のヒストグラムを図-3 に示す。計測結果のヒストグラムより、立体方向 γ 、平面方向 θ ともに理想値である 35° から概ね $\pm 5^\circ$ 以内に納まっており、事前加工によって $\pm 5^\circ$ の範囲で角度精度を確保できることが確認できた。

2.3 事前加工の合理化

2.1節では、角度精度確保のための方法として①座彫

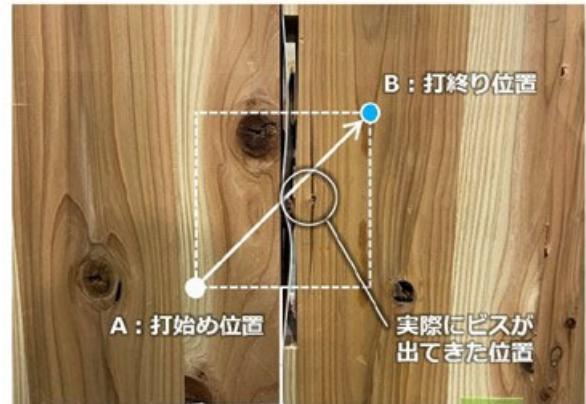


写真-2 ビスの打込み施工時の失敗事例

Photo.2 Failures in screw-in installation



図-2 施工精度向上のための事前加工

Fig.2 Pre-processing to improve construction accuracy

(a) 立体角度 γ (a) Stereo angle γ (b) 平面角度 θ (b) Plane angle θ

写真-3 各角度の計測方法

Photo.3 How to measure each angle

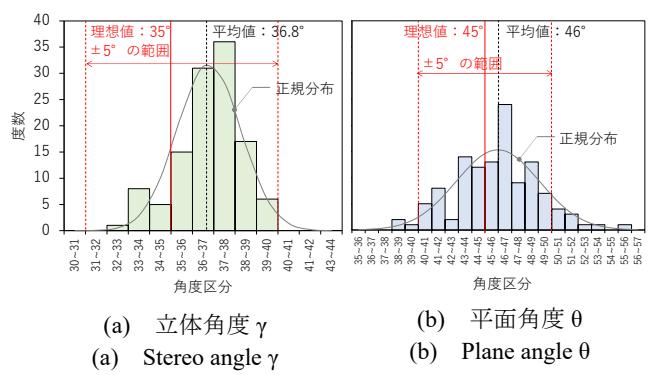


図-3 計測結果

Fig.3 Measurement results

り加工、②先孔機械加工、③先孔追い加工を実施した。①、②は機械で行うため高い精度が期待されるが、③は人力での施工となり精度にばらつきが生じやすく、写真-4に示すような、角度 γ がずれCLTを突き抜ける事例が確認されている。写真-4は、先孔追い加工時に本来の角度35°よりも角度を10°ほど大きくして加工してしまい、打ち込まれたビスがCLTを突き抜けてしまった事例である。角度が10°ずれたことで、10mm程度ビスが飛び出しているのが確認できる。

以上の事例を踏まえ、事前加工の精度向上と合理化を目的とし、①、②の加工のみで角度精度を保つことが可能か検証試験を行った。試験体一覧を表-1に示す。図-4に示すように、4本のビスが点対称となるよう打ち込まれた試験体を製作し、ビスを打ち込んだ状態でX線CTスキャンを行い、立体方向の角度 γ を計測した。試験体は加工が①、②のみのタイプA、①～③のタイプB、追い加工の際にガイドを用いたタイプCの3種類とした。試験体数は各3体とした。

角度精度の確認のため、写真-5に示すX線CT装置を用いて、X線CT撮影を行った。X線源とX線検出部の間に位置する回転ステージ上に、試験体を設置して撮影を行った。撮影画像による角度計測の方法を図-5に示す。(i)画像内のXYZ基準軸に対する直角線から2点を参照し、(ii)ビスと木材の境界として画像の輝度勾配の最大点を3点目として参考することで計測した。

図-6に角度計測の結果を示す。3タイプともに理想値である35°から±5°以内におさまった。また、タイプ



写真-4 先孔追い加工時の失敗事例

Photo.4 Examples of Failures during Predrilling

表-1 角度精度検証 試験体一覧

Table 1 Angle Accuracy Verification Test Specimen List

タイプ	事前加工の有無		
	①座影り	②先孔 機械加工	③先孔 追い加工
A	有	有	無
B	有	有	有
C	有	有	有(ガイドあり)

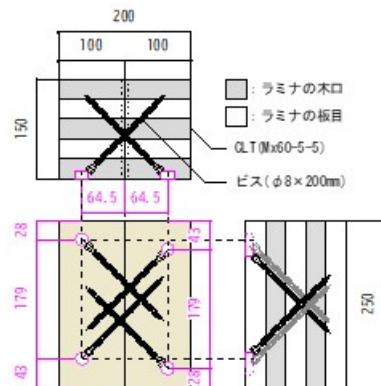


図-4 角度精度検証 試験体図

Fig.4 Angle accuracy verification Test specimen diagram

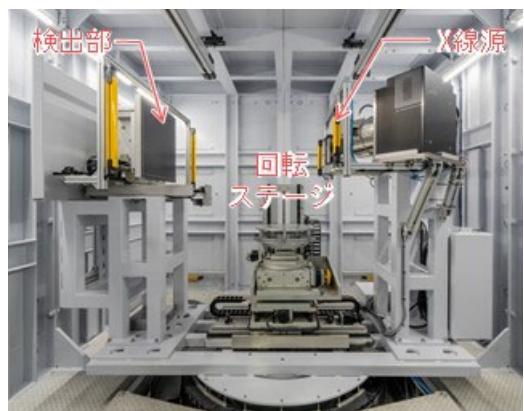


写真-5 X線CT装置

Photo.5 X-ray CT scanner

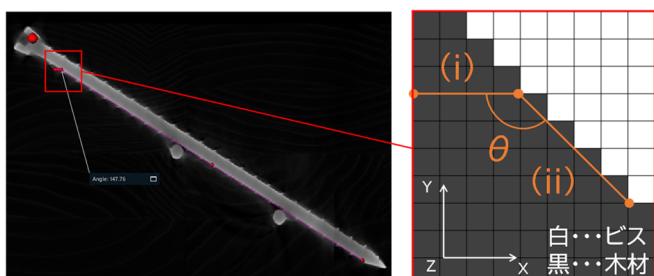


図-5 X線CTスキャンによる角度計測の方法

Fig.5 Method of angle measurement by X-ray CT scan

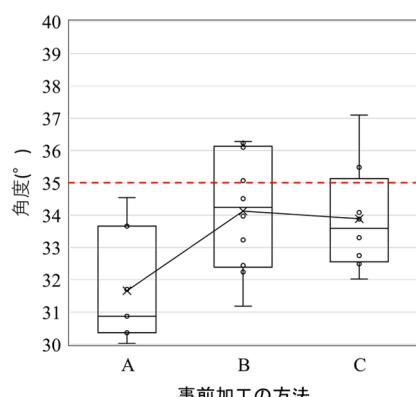


図-6 角度計測の結果

Fig.6 Angle measurement results

表-2 せん断試験 試験体一覧

Table.2 Shear test specimen list

試験体 No.	接合方法	CLT			ビス			平均密度 [kg/m ³]	平均含水率 [%]	パラメータ	
		規格	主材 繊維方向	側材 繊維方向	径[mm]	長さ[mm]	立体角度 γ [°]	平面角度 θ [°]			
1	従来型	Mx60-5-7	弱	弱	10	290	45	0	408	12	接合方法
2	改良型	Mx60-5-7	弱	弱	10	320	45	45	417	11	接合方法
3		Mx60-5-5	強	強	8	200	35	45	410	12	CLTの層構成
4		Mx60-5-5	弱	弱	8	200	35	45	413	11	CLTの層構成
5		Mx60-9-9	強	強	8	200	35	45	403	12	コントロール試験体
6		Mx60-9-9	強	強	8	200	45	45	403	12	立体角度 γ
7		Mx60-9-9	強	強	8	320	35	45	363	12	ビス長さ

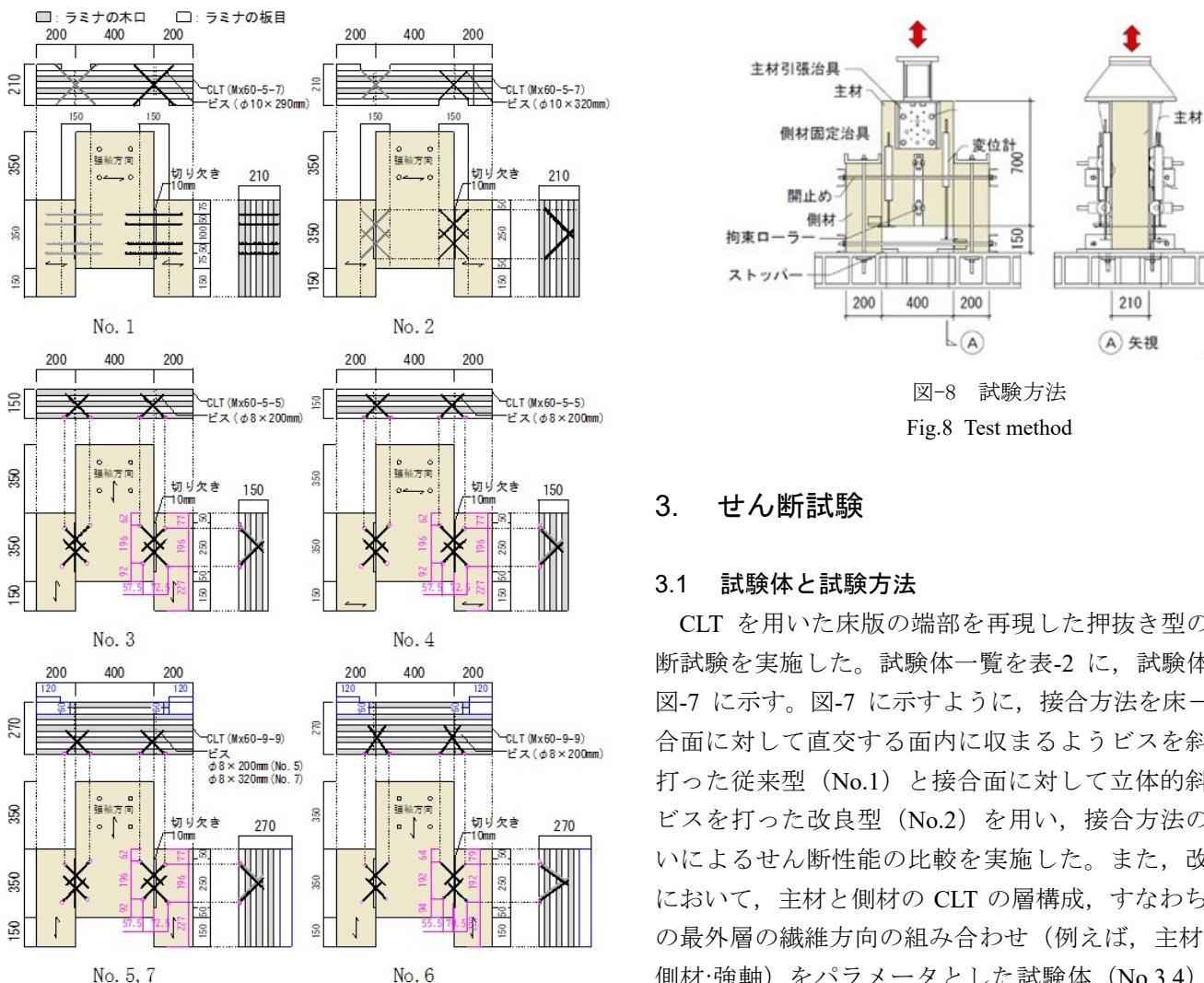


図-7 せん断試験 試験体一覧

Fig.7 Shear Test Specimen List

A では角度が小さくなる傾向があったものの、タイプ B,C と比較し大きな差は見られなかった。以上の結果から、事前加工の方法を先孔追い加工なし（タイプ A）とすることで、先孔追い加工あり（タイプ B,C）に対し、CLT への打ち込み角度精度を保ちつつ、加工工程の短縮による合理化が可能であることが確認できた。

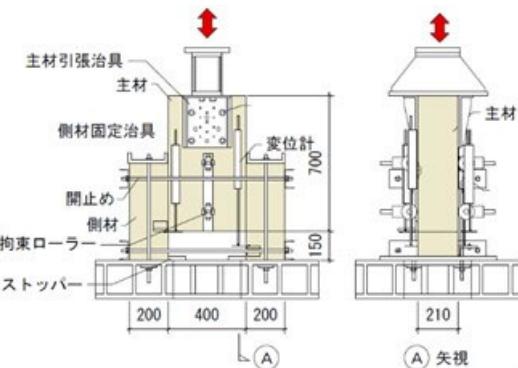


図-8 試験方法

Fig.8 Test method

3. せん断試験

3.1 試験体と試験方法

CLT を用いた床版の端部を再現した押抜き型のせん断試験を実施した。試験体一覧を表-2 に、試験体図を図-7 に示す。図-7 に示すように、接合方法を床-床接合面に対して直交する面内に収まるようビスを斜めに打った従来型（No.1）と接合面に対して立体的斜めにビスを打った改良型（No.2）を用い、接合方法のちがいによるせん断性能の比較を実施した。また、改良型において、主材と側材の CLT の層構成、すなわち CLT の最外層の繊維方向の組み合わせ（例えば、主材:強軸、側材:強軸）をパラメータとした試験体（No.3,4）を用い、CLT がせん断性能に与える影響を確認した。さらに CLT:Mx60-9-9（主材:強軸、側材:強軸）、ビス径 8mm、長さ 200mm、打ち込み角度 $\gamma=35^\circ$, $\theta=45^\circ$ の試験体 No.5 をコントロール試験体とし、ビスの打ち込み角度 γ をパラメータとした試験体（No.6）および、ビスの長さをパラメータとした試験体（No.7）を用いて、ビスの打ち込み角度や長さがせん断性能に与える影響を確認した。試験体数は No.1,2 で各 2 体、No.3~7 で各 6 体とした。CLT はスギ材とし、全試験体共通で異等級

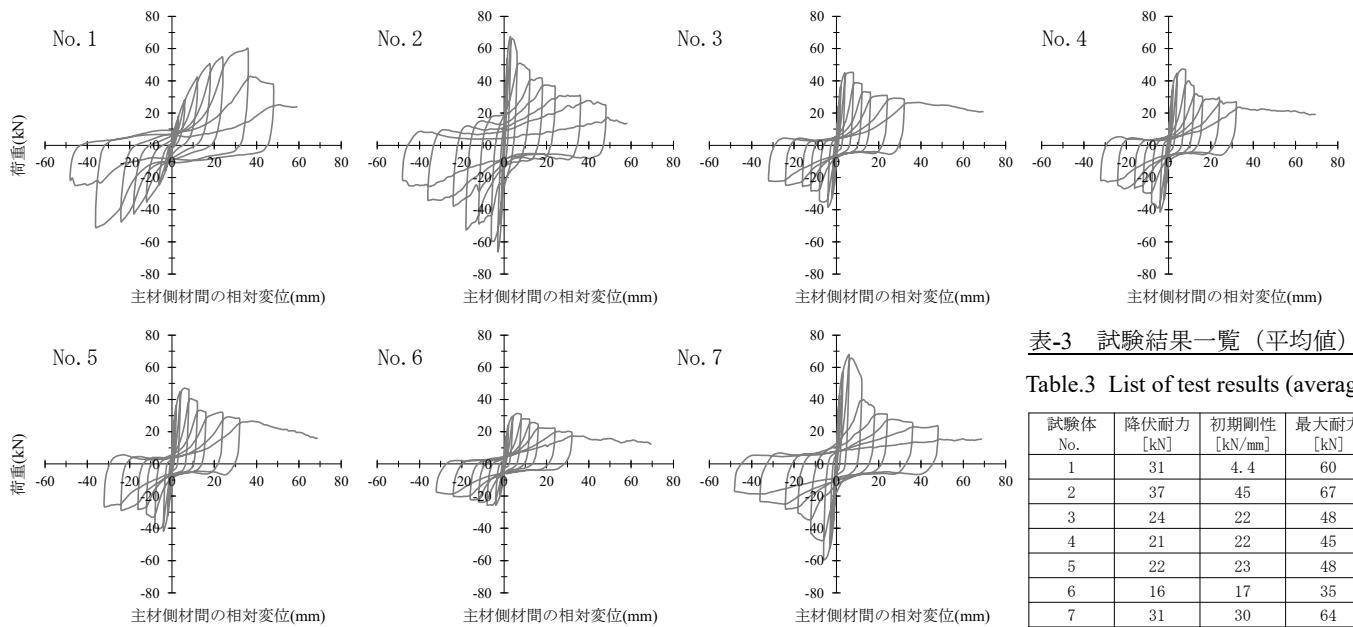


図-9 荷重-変位関係一覧

Fig.9 List of Force-Displacement Relationships

表-3 試験結果一覧 (平均値)
Table.3 List of test results (average)

試験体 No.	降伏耐力 [kN]	初期剛性 [kN/mm]	最大耐力 [kN]
1	31	4.4	60
2	37	45	67
3	24	22	48
4	21	22	45
5	22	23	48
6	16	17	35
7	31	30	64



写真-6 主な破壊性状

Photo.6 Main Fracture Properties

構成のものを用いた。主材と側材の間には、床版の施工誤差を考慮し 10mm の切欠きを設けた。また、ビスのみによるせん断性能を把握するため、接する面には摩擦力が小さくなるように PTFE シート ($t=1.0\text{mm}$) を各面に 2 枚配した。

載荷試験のセットアップを図-8 に示す。中央の主材上端を加力点としボルト止めしたプレートを介して、圧縮力と引張力を交互に加えることにより接合部に正負交番繰返しのせん断力を与えた。開き止めのための溝形鋼とボルトを配し、主材の面外方向のずれ止めのために拘束ローラーを設置した。繰返し履歴は単調加力試験で求めたせん断降伏変位 δ_y の $1/2$, 1 , 2 , 4 , 6 , 8 , 12 , 16 倍の順で 1 回ずつ繰返すことを基本とした。

3.2 試験結果

全試験体のビス 8 本分の試験体から得られた荷重-変位関係を図-9、試験結果を表-3、主な破壊性状を写

真-6 に示す。全ての試験体において、主な破壊性状として、ビスの中央部分での破断、切欠き近傍での曲げ降伏や、CLT のビスによるめり込み破壊が確認された。それぞれのパラメータによる比較の結果を次項に示す。

3.2.1 打ち込み方法のちがい (No.1,2)

従来型 (No.1) と改良型 (No.2) で弾性剛性を比較すると、改良型は従来型に比して 10 倍程度の向上が確認できた。一方、最大荷重は大きな違いが認められないものの、最大荷重時変位が極めて小さくなった。

3.2.2 CLT の層構成のちがい (No.3,4)

主材と側材における CLT の層構成をパラメータとした場合、最外層が強軸-強軸の組み合わせ (No.3) と弱軸-弱軸の組み合わせ (No.4) で比較すると、No.4 は No.3 に比べ耐力・剛性が約 10% 低下した。これは、ビスの曲げ降伏に伴う CLT へのめり込みが生じた位置の、ラミナの纖維方向のちがいが原因であると考えられる。実験結果より、ビスのめり込み位置における纖維方向を弱軸方向と考えることで安全側の評価となる。また、試験体 No.3 および No.5 の実験結果の比較より、CLT の層構成が同一であれば、厚みが変化しても構造性能は同一であることが確認された。

3.2.3 ビス角度のちがい (No.6)

試験体 No.5 と No.6 の比較から、改良型の打ち込み方法において、打ち込み時の立体方向の角度 γ が 10° 大きくなると耐力・剛性ともに約 30% 低下した。ビスの軸方向力で負担するせん断力は、幾何学的には γ の \cos

成分によって算定される。今回の γ の増分によるcos成分の低下率は約14%であり、実験結果の低下率と比較して小さくなつた。この原因として、纖維方向に対する角度変化による材料強度の低下や、せん断力の抗力として想定されるビスの引き抜き、めり込みの成分が複合的に変化したことが考えられ、角度 γ が構造性能に与える影響が大きいことが確認できた。

3.2.4 ビス長さのちがい (No.7)

試験体No.5とNo.7の比較から、改良型の打ち込み方法において、ビス長さが1.6倍長くなると、耐力・剛性ともに約1.3倍上昇した。既往研究²⁾より、ビスの軸方向の抗力である引き抜き耐力・剛性は、ビス長さに比例して上昇すると考えられる。しかし、改良型の打ち込み方法では、ビスの曲げ変形を伴いながら引き抜かれるため、接合部全体のせん断性能とビスの長さは純粹な比例関係ではないことが確認された。

4. せん断抵抗メカニズムの検証

4.1 FEM解析の実施

本接合部は立体的斜めにビスを打ち込んでおり、ビスに生じる応力は非常に複雑である。そこで、FEM解析によってビスに生じる応力状態を確認し、その構造メカニズムを検証した。解析ソフトにはAbaqusを用い、解析モデルを図-10に、材料の入力データを表-4に示す。解析モデルは3章における試験体No.3を対象とし、図中xy平面における対称条件を考慮した1/2モデルとした。CLTおよびビスは4面体2次要素、要素寸法はCLTは20mm程度、ビスは2mm程度に設定した。また、ビスのネジ部は、既往研究²⁾を参考に、高さ1mm、幅1.25mmの三角形断面を持つリング状として再現し、長さ方向に3.5mmピッチで配置した。ビスは弾性体とし、ヤング係数205,000N/mm²、ポアソン比0.3とした。CLTは集成材と同じラミナ配置とした直交異方性を持つ弾性体とし、ヤング係数、ポアソン比およびせん断弾性係数は文献³⁾に基づいた。ここでは纖維方向を加力方向とし、ビスとCLTの接触は既往研究²⁾を参考に摩擦係数 $\mu=0.25$ を用いて、ペナルティ法により求解した。また、主材-側材間同士の接触は実験時にPTFEシートを挿入したことを考慮し、摩擦係数を0とした。

4.2 解析結果

実験と解析で求めた荷重-変位関係を図-11に示す。解析値は実験値より小さく計算された。この原因の1つとして、解析上では主材-側材間の摩擦力を0としたが、実際にはPTFEシートを挿入したものの摩擦力が完

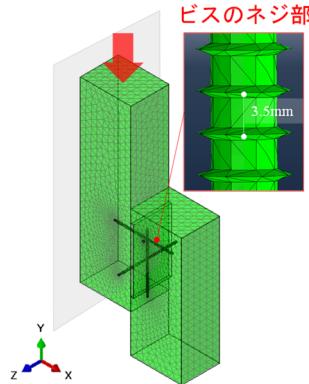


図-10 解析モデル

Fig.10 Analysis Model

材料	ビス	CLT		
		Ex	Ey	Ez
ヤング率	E			
N/mm ²	205000	7500	600	300
ポアソン比	v	vxy	vxz	vyz
-	0.3	0.4	0.6	0.9
せん断剛性	G	Gxy	Gxz	Gyz
N/mm ²	-	650	350	15

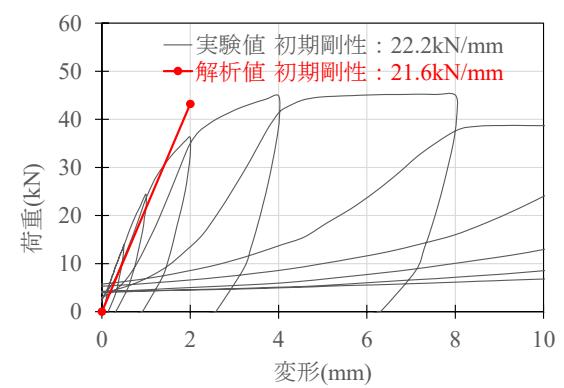


図-11 実験値と解析値の比較

Fig.11 Comparison of experimental and analytical values

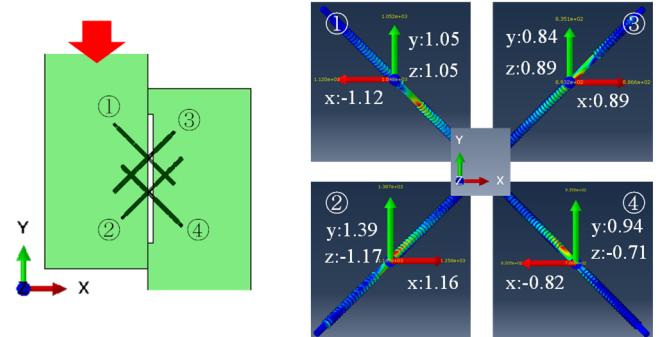


図-12 ビスに働く分力

Fig.12 Partial force acting on the screw

全には0にはならないため、その摩擦力分だけ解析値が小さくなつたことが考えられる。

図-12に、相対変位0.4mm時の4本の各ビス断面に働く分力を表した解析結果を示す。ビス4本(片面分)の分力の合計はx, y, z方向でそれぞれ0.1kN, 4.2kN, 0.07kNであり、ビスの対称配置によってx, y, z方向の分力がほぼ相殺されている。立体的斜めビスにせん断力が加わるとx, y, z軸方向にそれぞれ分力が生じ、ビスの傾き方向によって床同士(ここでは主材と側材)を離間、圧着したり面外にずらしたりする力が働くが、

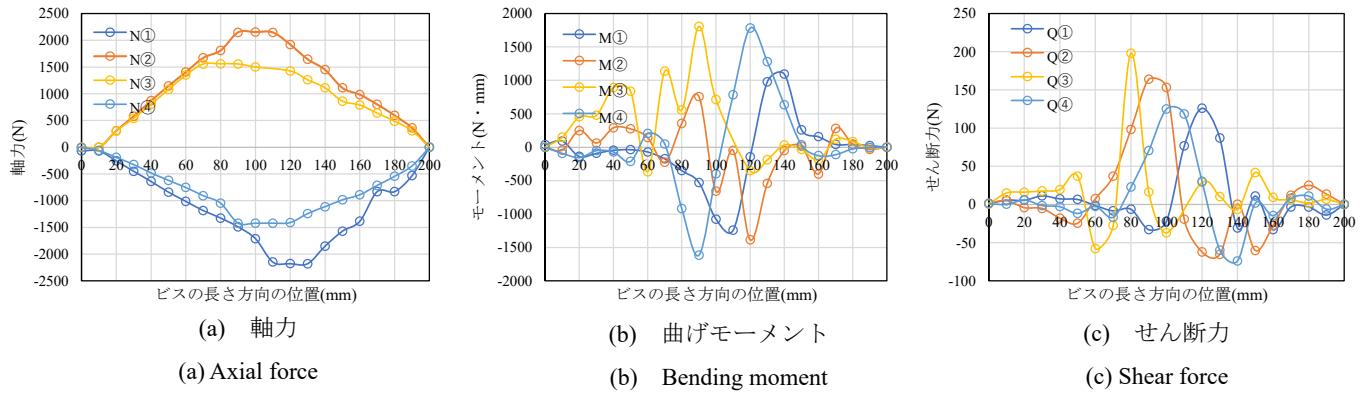


図-13 ビス長さ方向に生じる力

Fig.13 Force in the direction of screw length

ビス4本を1セットとして接合中心に対して点対称に配置することで、互いの分力が相殺され、床同士の離間と面外ずれ変形が抑えられることが確認できた。

また、図-13に各ビスの軸方向において生じている軸力、曲げモーメント、せん断力の値を示す。対角方向それぞれでビスの軸方向に圧縮力と引張力が生じており、それに対応する形で曲げモーメントのピーク値の正負の向きも対称となっている。また、すべてのビスで、曲げモーメントの値が100mm～120mm付近のクリアランス位置において卓越していることが確認できた。これは実験時に確認されたビスの曲げ降伏が生じた位置と概ね一致している。せん断力のピークの値は曲げモーメントの反曲点位置に対応しており、概ね切欠きの中央位置であった。また、各断面力の最大値は、軸力が2.2kN、曲げモーメントが1.8kN·m、せん断力が0.2kNとなっており、せん断力は軸力の約1/10の値であった。以上より、接合部全体のせん断性能は主にビスの軸力と曲げの2つの成分によって決定していることが確認できた。

5. まとめ

本研究ではCLT床版を対象とした、長ビスによる高耐力・高剛性せん断接合の開発を実施した。

施工精度の確保のため、座彫り加工と先孔加工によ

る事前加工を考案した。この事前加工によって、角度誤差が±5°の範囲に収まることを実測によって確認した。さらに、X線CTスキャンによって、機械加工のみで精度確保できることを確認し、事前加工の合理化を可能とした。

せん断性能を明かにするためにせん断要素実験を実施し、従来の平面的斜めにビスを打ち込む接合方法と比較して約10倍の剛性向上の効果が確認された。さらに、改良型接合部において構造性能に与える要素として立体角度γの影響が大きく、10°変化することで、耐力・剛性の値が30%ほど低下した。

FEM解析を実施し、ビスには軸力と曲げモーメントが断面力として主に生じており、この2つの成分によってせん断性能が決まっていることを確認した。また、ビスの対象配置によって、面外変形や接合面における離間の抑制効果が得られていることが確認できた。

参考文献

- 1) CLTを活用した建築物等実証事業に係るCLT接合部強度データ集, (公財)日本住宅・木材技術センター, pp.76-77, 2018.2
- 2) 本多 航: 木質構造用ビスの纖維直交方向引き抜き抵抗メカニズムと耐力推定式の提案, 木材学会誌, Vol.67, No.4, pp.178-187, 2021.
- 3) 森林総合研究所: 改訂4版木材工業ハンドブック, 森林総合研究所編, 丸善出版, 東京, p.135, 2004