

## 2枚合わせにした CLT 耐震壁の構造性能評価

## Structural Properties of Two-Panel CLT Shear Wall with Bolted Connection

日向 大樹 久保田 淳 島 啓 志  
高谷 真次<sup>1)</sup> 久田 昌典<sup>1)</sup>

## 要 約

近年、木質材料の積極利用の観点から、CLT（Cross Laminated Timber）パネルを用いた開発が盛んに行われており、特に耐震壁として採用されている。CLT 耐震壁を設置する際、建物躯体と CLT パネルを接合する従来方法にドリフトピン接合がある。しかし、この接合方法は建て方時に高い施工精度が要求されることから、より簡易な接合方法が求められていた。そこで、CLT パネルを2枚合わせにするとともにボルトを用いることで、従来工法よりも施工性を大きく改善した CLT 耐震壁を考案した。今回、その構造性能を把握することを目的に、ボルト接合部の要素実験、実大寸法による CLT 耐震壁の水平載荷実験を実施し、本耐震壁は十分な耐力および高い靱性能を有することを確認した。また、要素実験結果をもとに CLT 壁実験の FE 解析によるシミュレーションを実施し、解析結果および解析手法の妥当性を検証した。

## 目 次

- I. はじめに
- II. ボルト接合部要素実験
- III. 実大 CLT 耐震壁の構造実験とシミュレーション
- IV. おわりに

## I. はじめに

近年多くの国内企業で SDGs に基づいた環境配慮の活動が推進されており、建築業界においてもカーボンニュートラルの観点から、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少なく炭素貯蔵効果がある木造・木質建築の需要が高まっている。特に、板（ラミナ）の層を互いに直交するように積層接着した木質材料 CLT（Cross Laminated Timber）を使用した耐震壁は、近年、多くの適用実績がある。

建物躯体から突出する鋼板と CLT パネルを接合する従来工法にドリフトピン接合がある。この接合方法は、両部材の孔を貫通するように CLT パネルの先行孔と同径の鋼製ピンをハンマーで打ち込むことで、部材の一体化を図るものである。しかし、CLT パネルの先行孔と鋼板の孔位置を一致させるには、高い加工精度および施工精度が要求されることから生産性に課題があった。そこで、Fig. 1 に示すように、あら

かじめ躯体に取り付けたガセットプレートを2枚の CLT パネルで挟み、ボルトで締め付ける新たな接合部を考案した。この方法であれば、木材の先行孔に多少のクリアランスを持たせることが可能であり、現場での接合が容易となる。また、CLT パネルを2枚合わせにすることでパネル1枚当たりの重量が軽減されることに加え、周辺柱梁架構築後方にも CLT パネルを払込みで設置することが可能となり、現場での生産性向上が期待される。

本研究では、CLT パネルを2枚合わせにしたボルト接合部の要素実験を実施し、耐力および変形性能を確認した。さらに、実大寸法の CLT 耐震壁の水平載荷実験を実施し、その耐

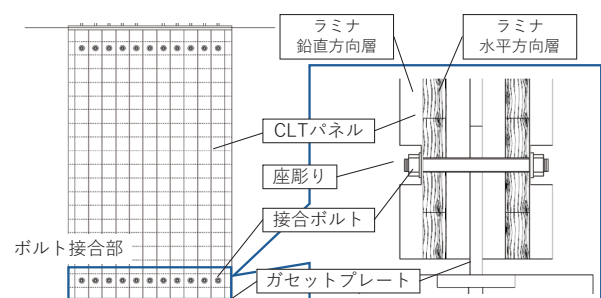


Fig. 1 CLT 耐震壁の立面図と接合部鉛直断面図  
(Elevation and Vertical Section of CLT Shear Wall)

1) 建築設計本部 Architectural Design Division

**キーワード** : CLT パネル, ボルト接合, 耐震壁水平載荷実験, 生産性向上, FE 解析

**Keywords** : CLT panel, bolted connection, shear wall experiment, increment of productivity, FE analysis

力、初期剛性および変形性能の評価を行った。また、要素実験結果をもとに CLT 壁実験の FE 解析によるシミュレーションを行い、解析結果および解析手法の妥当性を検証した。本報では、以上のことについて報告する。

## II. ボルト接合部の要素実験

### 1. 実験概要

ボルト接合部の要素実験の試験体一覧を Table 1 に、試験体形状を Fig. 2 に示す。試験体は 1 対の CLT パネル片で鋼板を挟み、ボルトで締め付けた要素試験体であり、試験区間と拡幅部から構成される。パラメータは CLT の強度等級とラミナ構成、CLT の材軸、ボルト径とボルト配置であり、試験体数は 7 ケース各 6 体の計 42 体である。使用した CLT は、3 層 3 プライ (S60-3-3, ラミナ幅 120mm, 幅はぎ接着なし)、合計 90mm 厚, および 5 層 5 プライ (S60-5-5, ラミナ幅 122mm, 幅はぎ接着あり), 合計 150mm 厚である。ボルトには両ねじボルトを使用し, M12, M16 は規格強度 400N/mm<sup>2</sup> 級材, M20 は 490N/mm<sup>2</sup> 級材を使用した。M20 については, CLT 強軸方向のボルト 2 列配置の試験体についても実験を行った。

ドリフトピン接合部を対象とした既往の実験結果から, ドリフトピンやボルトなどの曲げ接合具が CLT パネルの幅はぎ位置に配置されるとせん断耐力の低下およびばらつきの要因となることが知られている<sup>1)</sup>。そこで, それらの影響を排除するために, 本接合部はラミナ幅の中央にボルトを配置

することとした。これに従い, 要素試験体の試験区間の幅はラミナ幅としている。なお, 本ボルト接合部については既往の実験結果<sup>2)</sup>にて十分な構造性能が確認されているが, 今回, 見えがかりを考慮して CLT に座彫りを施し, ボルト頭が CLT パネルの面から突出しないディテールを採用した。

実験は試験体両側の鋼板部分を万能実験機で単調引張載荷して実施した。変位は, 試験区間側の鋼板のボルト位置と CLT パネル拡幅部の相対変位を幅方向の両端で計測した。

### 2. 実験結果

荷重-変位関係を Fig. 3 に, 終局耐力と信頼水準 75% の 95% 下側許容限界値 (5% 下限値)<sup>3)</sup>, および初期剛性の一覧を Table 2 に示す。なお, 今回対象としている CLT 耐震壁試験体 (Fig. 4) は, CLT パネル端部と上下の加力スタブが接触しないように, 40mm のクリアランスを設けている。ボルト接合部についても 40mm 以上の変形を想定していないことを踏まえ, 本実験結果は平均相対変位 40mm までのデータを用いることとした。また, 終局耐力および初期剛性は, 完全バイリニアモデル化<sup>3), 4)</sup>によって算出した。

試験開始後, 荷重はほぼ線形に上昇したが, 強軸試験体では内側 (鋼板と接する側) のラミナがボルト幅で抜け出し, 弱軸試験体では鋼板に近い内側のラミナが割裂破壊することで荷重低下が生じた。その後, 主に外側のラミナが抵抗することで荷重が再度上昇した (Photo 1)。また, 変形の増大とともに, ボルトの座金が CLT に大きくめり込む様子が確認

Table 1 要素試験体一覧  
(List of Bolted Connection Element Specimens)

ID	ボルト					CLT				試験体数
	種類	規格強度 (N/mm <sup>2</sup> )	本数@ピッチ	端あき (mm)	ボルト径 (mm)	強度等級 ラミナ構成	母材厚 (mm)	座彫り (径×深さ) (mm)	材軸	
90-M12S	M12	400	1	80	13	S60-3-3	2×90	φ36×29	強軸	6
90-M12W									弱軸	6
90-M16S	M16	400	1	80	17	S60-3-3	2×90	φ50×29	強軸	6
90-M16W									弱軸	6
150-M20S	M20	490	1	80	21	S60-5-5	2×150	φ55×50	強軸	6
150-M20W									弱軸	6
150-2xM20S			2-@120	120	強軸				6	

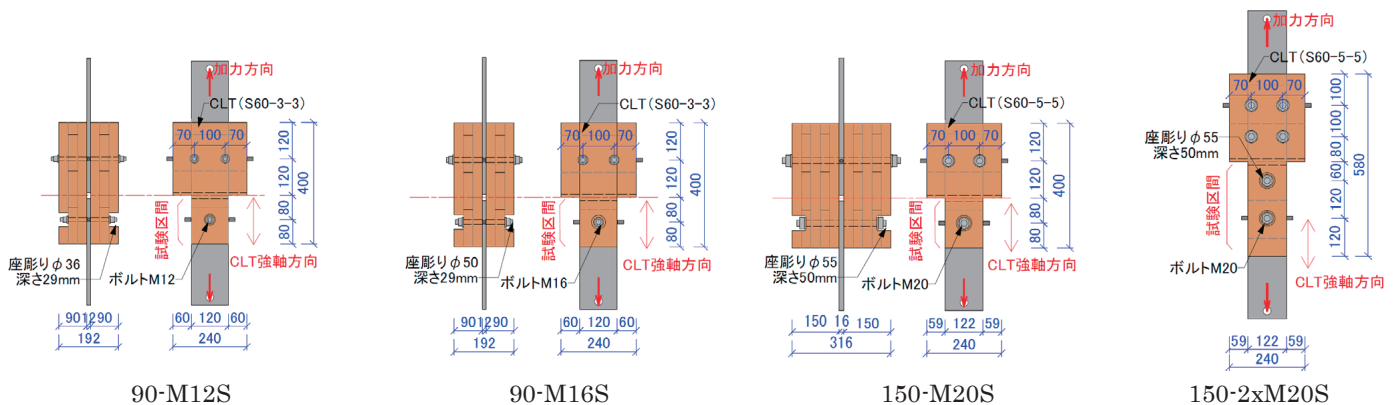


Fig. 2 ボルト接合部要素試験体形状  
(Configurations of Bolted Connection Element Specimens)

された。実験後、全ての試験体でボルトが大きく「く」の字形となるモードⅢ<sup>3)</sup>に変形していることを確認した。

M12 シリーズはボルト本数やCLTの材軸方向によらず、大変形においても顕著な荷重低下は確認されず、安定した性状を示した。M16 シリーズはボルト径が太いことで、M12 シリーズと比べて初期剛性が上昇したが、第2次勾配上でCLTパネル全層に破壊が進展して急激に荷重が低下した。M20 シリーズのCLTパネルは5層5プライと厚く、強軸試験体ではボルトを2列配置した場合にも変位40mm程度まで安定した性状を示した。一方、弱軸試験体では、変形5mm程度でラミナの損傷が進み終局状態に至った。各試験体において、それぞれ6体の試験体はおおよそ同様の性状を示した。完全弾塑性モデル化による終局耐力と初期剛性の算出結果を見ると、ボルト径が大きくなるほど、またCLTを強軸に配置したものが、値が大きくなる傾向にあることが分かる。ボルト2列配置とした試験体の耐力は、接合部の群効果によって1列配置の実験結果を2倍にした値よりも小さくなることも予想されたが、本実験の範囲では、ボルト2列配置とした試験体はボルト1列配置の試験体とおおよそ同様の破壊モードを示し、ボルト1列の耐力を2倍にした値よりもやや高い耐力を発揮した。

以上のことから、CLTを強軸に配置した本ボルト接合部は弾性限を超えた後も耐力低下の少ない靱性能のある性状を

示すことが確認された。一方、CLTを弱軸に配置した場合には、強軸の場合に比べて靱性能が乏しい傾向にあり、CLT耐震壁のボルト配置は、CLT弱軸方向の耐力に十分な余裕を持たせる必要がある。

### Ⅲ. 実大 CLT 耐震壁の構造実験とシミュレーション

#### 1. 構造実験概要

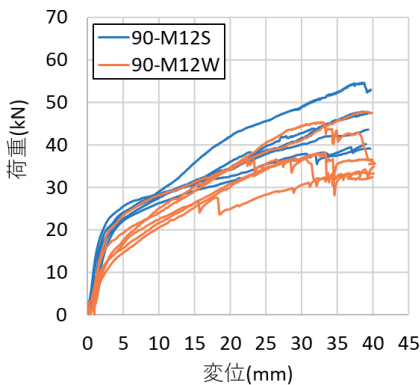
実大寸法のCLT耐震壁試験体一覧をTable 3に、試験体形状をFig. 4に示す。試験体は鋼製の加力スタブに取り付けたガセットプレート、2枚のCLTパネルおよびボルトから構成される。パラメータはCLTの縦横寸法、CLTの強度等級とラミナ構成、ボルト径とボルト配置とした。使用したCLTは、3層3プライ(S60-3-3、ラミナ幅120mm、幅はぎ接着なし)、合計90mm厚、5層5プライ(S60-5-5、ラミナ幅122mm、幅はぎ接着あり)、合計150mm厚である。CLTパネルは強軸方向が全て鉛直方向になるように配置した。要素試験体と同様に、ボルトはCLTの各ラミナ幅中央位置に配置した。CLTパネル端部と上下スタブ間には40mmのクリアランスを設け、変形が大きくなった際にもCLTパネルがスタブに接触して支圧力や摩擦力が生じないようにした。実験時は、試験体に水平力のみを作用させるため、鉛直ジャッキによって上下スタブの水平を維持しつつ、上下の移動は自由となるように制御した。加力は正負交番繰り返し载荷とし、 $\pm 1/600$ ,  $\pm 1/450$ ,  $\pm 1/300$ ,  $\pm 1/200$ ,  $\pm 1/150$ ,  $\pm 1/100$ ,  $\pm 1/75$ ,  $\pm 1/50$ rad.を3サイクル、 $\pm 1/30$ ,  $\pm 1/20$ rad.を2サイクル载荷した。実験結果は解析結果とまとめてⅢ. 3に示す。



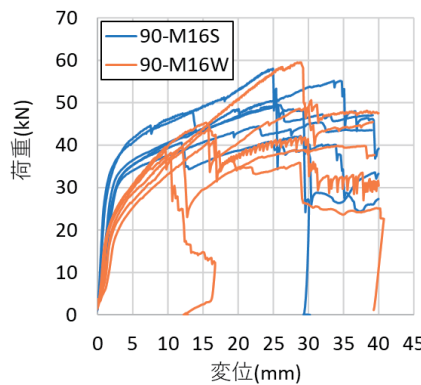
Photo 1 代表的な破壊形式 (Representative Failure Mode)

Table 2 要素試験の終局耐力と初期剛性 (List of Ultimate Failure Strength and Initial Stiffness of Bolted Connection Element Tests)

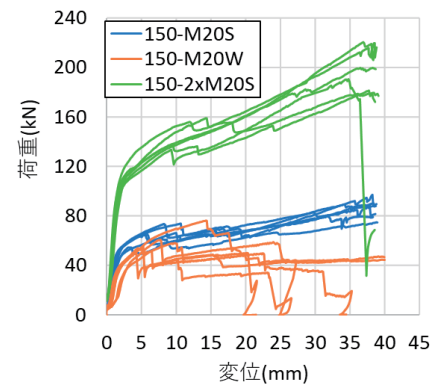
ID	終局耐力 (kN/mm)		初期剛性 (kN/mm)
	平均	5%下限値	
90-M12S	36.9	26.9	5.2
90-M12W	32.1	25.7	3.3
90-M16S	44.0	35.3	13.4
90-M16W	38.3	26.0	8.8
150-M20S	71.3	62.6	17.5
150-M20W	51.2	34.4	17.7
150-2xM20S	160.7	139.8	37.9



(a) ボルト M12



(b) ボルト M16



(c) ボルト M20

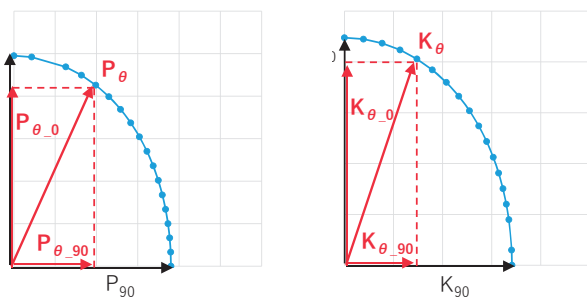
Fig. 3 要素実験の荷重-変形関係

(Relationship between Shear Force and Displacement of Element Specimens)

2. シミュレーション概要

本 CLT 耐震壁の解析手法を確立することを目的に、FE 解析によるシミュレーションを実施し、実験結果との比較および解析手法の妥当性検討を行った。解析には汎用解析ソフト MSC Nastran 2019.0 を用いた。解析モデルではガセットプレートと CLT パネルをそれぞれ弾性シェル要素で、ボルト接合部はガセットプレートと CLT パネルを繋いだ鉛直と水平方向の2方向の非線形バネ要素でモデル化した。CLT パネルのシェル要素は、直交異方性が考慮できる材料特性を用い、強軸、弱軸およびせん断の弾性係数には等級区分機による等

$$P_{\theta} = \frac{P_0 \cdot P_{90}}{P_0 \cdot \sin^2 \theta + P_{90} \cdot \cos^2 \theta}$$



(a) 耐力 (b) 剛性

Fig.5 ハンキンソン式と任意角度の特性値の算出方法概要 (Hankinson Formula and Calculation Method for Spring Properties on Specific Angle)

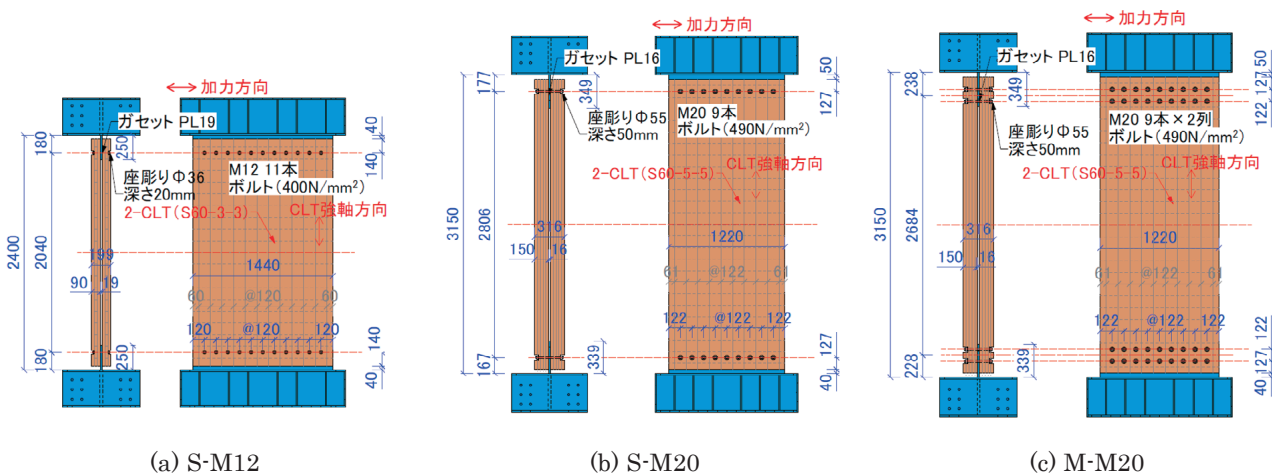
級の基準値<sup>4)</sup>をそれぞれ採用した。バネ要素の非線形復元力特性は完全弾塑性とし、耐力点および初期剛性は要素実験結果から算定した。ここで、ボルト接合部の要素実験から CLT 強軸方向と弱軸方向の特性値がそれぞれ得られているが、実際には強軸方向と弱軸方向の応力が複合的に作用することから、任意角度におけるボルト接合部の挙動を再現する必要がある。そこで今回、ハンキンソン式<sup>3)</sup>を用いて実験時のボルト接合部の挙動を推定した。算出方法概要およびハンキンソン式を Fig.5 に示す。それぞれの耐力点および初期剛性には、ハンキンソン式に要素実験結果の CLT 強軸・弱軸方向の終局耐力 (P<sub>0</sub>, P<sub>90</sub>)、初期剛性 (K<sub>0</sub>, K<sub>90</sub>) を入力して θ 方向の特性値 (P<sub>θ</sub>, K<sub>θ</sub>) を算出し、ベクトルを用いて鉛直方向成分と水平方向成分に分離した値 (P<sub>θ\_0</sub>, P<sub>θ\_90</sub>, K<sub>θ\_0</sub>, K<sub>θ\_90</sub>) を採用した。各ボルトの変形角度 θ は、全てのバネが変形適合条件と荷重の釣合いを満足するように収束計算して算出した。なお、本解析は単調載荷で実施した。

3. 実験結果およびシミュレーション結果とその考察

実大 CLT 壁実験のせん断力-部材変形角関係、その包絡線およびシミュレーション結果を Fig.6 に、完全パイリニアモデル化で算出した終局耐力と初期剛性の一覧を Table 4 に、代表として S-M12 試験体の +1/20rad 時の損傷状況を Photo 2 に、FE 解析から得られた S-M12 試験体の +1/20rad 時のせん断ひずみコンタ図を Fig.7 に示す。なお、部材変形角は上下スタブ間の水平変位を上下スタブ間距離で除して算出した。

Table 3 壁試験体一覧 (List of CLT Shear Wall Specimens)

ID	内法寸法		ボルト				CLT	
	W (mm)	H (mm)	種類	規格強度 (N/mm <sup>2</sup> )	配置	ボルト径 (mm)	強度等級 ラミナ構成	座彫り (径×深さ) (mm)
S-M12	1440	2400	M12	400	1列-11本	13	2x S60-3-3	φ 36×20
S-M16	1440	2400	M16	400	1列-11本	17	2x S60-3-3	φ 50×27
S-M20	1220	3150	M20	490	1列-9本	21	2x S60-5-5	φ 55×50
M-M20	1220	3150	M20	490	2列-9本	21	2x S60-5-5	φ 55×50



(a) S-M12 (b) S-M20 (c) M-M20

Fig. 4 CLT 耐震壁試験体形状 (Configurations of CLT Shear Wall Specimen)

全試験体において、正側荷重では大変形領域の 1/20 rad. まで耐力上昇を続け、顕著な耐力低下は確認されず、靱性に優れた履歴特性を示した。なお、S-M12 試験体および S-M16 試験体では、±1/20rad の大変形においても CLT パネルの損傷は見られなかった。S-M20 試験体は、-1/20rad ピーク時に最外縁の壁脚ボルト近傍で、要素試験で見られたような内側ラミナがボルト幅に抜け出す破壊が確認されたが、壁部材の荷重低下は見られなかった。M20 ボルトを 2 列配置した M-M20 試験体の耐力および初期剛性は、S-M20 試験体を 2 倍にした値よりやや高い傾向にあった。要素試験でも同じようにボルトを 2 列配置した試験体の方が耐力の大きい傾向が見られたが、壁試験体の場合にはその影響に加え、ボルト接合が 2 列になることで、壁上下のボルト接合部群の応力中心間距離が短くなったことも耐力増加に影響したものと考えられる。M-M20 試験体は 1/50rad. 時に 2 カ所、1/20rad. 時に 3 カ所のボルト

の変形による CLT パネルの端抜けが確認されたが、損傷の進展は僅かであった。また、それぞれの最終破壊状況は、ボルト頭の座金が CLT パネルに大きくめり込んでいるが、接合部の周辺以外に目立った損傷は見られなかった。CLT パネルに損傷が生じていないのは、終局耐力時の CLT パネルの平均せん断応力度が 0.66N/mm<sup>2</sup> 程度であり、CLT パネルの基準強度に対して余裕があったためだと考えられる。ボルト接合部の先行孔には+1mm のクリアランスを設けているが、実験を通じてそれによるスリップ性状は見られなかった。

各試験体におけるシミュレーション結果のせん断力-部材変形角関係は、実験の包絡線を良く再現していることが確認できる。解析上で最外縁ボルトが降伏する点と、実験の弾性限である点は概ね一致していることから、本試験体はボルトの降伏によって剛性が徐々に低下して最大耐力に到達したのと考えられる。以上のことから、解析のボルト耐力は妥当な値が設定されていたものと言える。初期剛性に注目すると、S-M16、S-M20、M-M20 試験体は、実験と解析の初期剛性が概ね一致した。S-M12 試験体は、解析の初期剛性が実験よりもやや低くなった。その一因として、M12 ボルトの要素実験結果を完全バイリニアモデル化して得られた初期剛性が、要素実験の弾性剛性よりも低く評価されたためだと考えられる。要素実験結果を設計施工マニュアル<sup>4)</sup>に則り完全バ

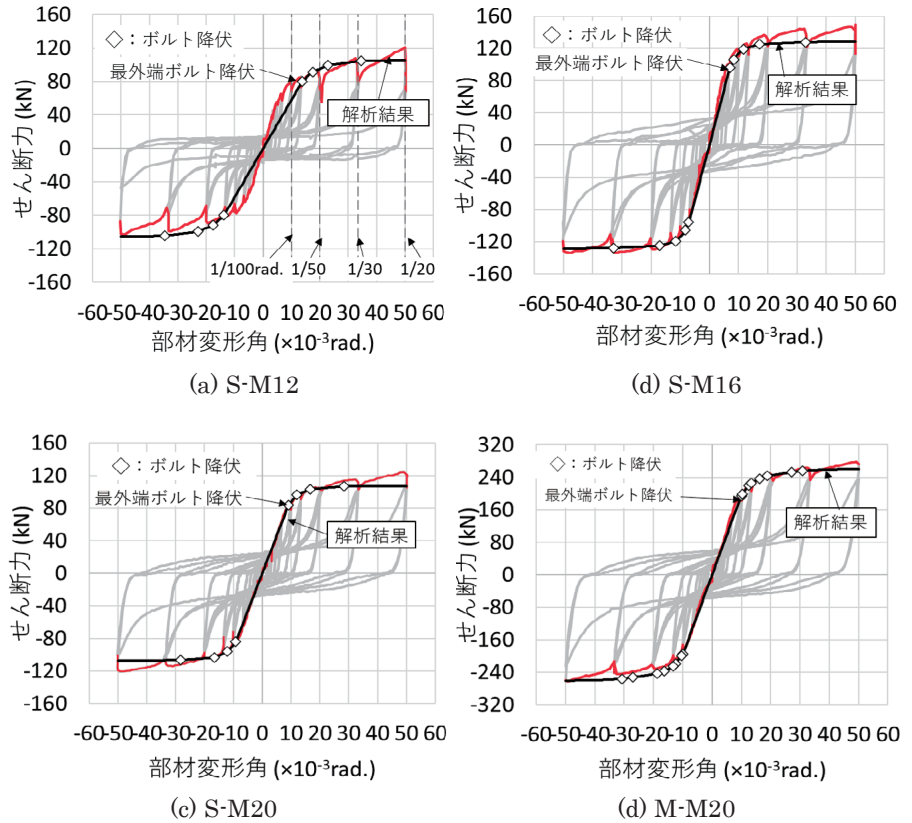


Fig. 6 CLT 実大壁実験のせん断力と部材変形角関係 (Shear Force and Rotation Angle Relationship)

Table 4 壁実験の終局耐力と初期剛性 (Ultimate Failure Strength and Initial Stiffness of CLT Shear Walls)

ID	終局耐力 (kN)		終局耐力時の応力度		初期剛性	
			曲げ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断 (N/mm <sup>2</sup> )	(kN/×10 <sup>-3</sup> rad)	
	正方向	負方向	絶対平均	絶対平均	正方向	負方向
S-M12	97.8	-88.6	1.53	0.36	9.0	8.8
S-M16	132.3	-128.5	2.14	0.50	14.4	14.9
S-M20	114.4	-110.2	2.12	0.31	8.7	9.2
M-M20	249.6	-235.5	4.67	0.66	18.4	18.2



Photo 2 損傷状況 (Damage Appearance of S-M12)

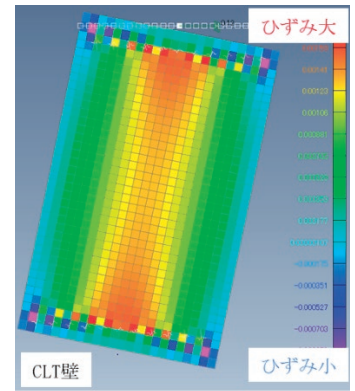


Fig. 7 せん断ひずみコンタ図 (Shear Strain Contour of S-M12)

イリニアモデル化する際、0.1Pmax と 0.4Pmax の点を結んだ傾きを基に初期剛性を算出するが、M12 の実験結果は剛性が変化し始める弾性限の耐力と最大耐力の差が大きく、0.4Pmax の点ではすでに剛性低下していたことが影響したものである。以上より、要素実験結果から本 CLT 耐震壁の初期剛性を推測することは可能だが、要素実験結果の初期剛性評価には適切な方法を用いる必要があると言える。

今回任意角度の耐力と剛性を算出する際に用いたハンキンソン式は、製材や集成材のような繊維方向が一定の材料を対象に提案されたものであり、CLT のような層ごとに繊維方向が直交する材への適用は想定されていない。ただし、本ボルト接合部は、ガセットプレートに近い側に位置するラミナが主に抵抗したことから集成材などに近い挙動を示し、ハンキンソン式によって算出した耐力および S-M12 を除く初期剛性が実挙動に近いものになったと推察される。このことから、本接合部においては任意の角度におけるバネ定数をハンキンソン式によって推定することが可能と考えられる。

Fig.7 に示すせん断ひずみコンタ図を見ると、ひずみがボルト接合部の壁中央に集中しており、荷重の大きい M-M20 試験体では最大で 2000 $\mu$  に近くなっていた。しかし、周辺部分のひずみは小さく抑えられており、実験で CLT パネルに損傷が見られなかった実験結果に一致する結果であると考えられる。一方、CLT パネルが大きく損傷するような場合には、シェル要素を非線形要素とする必要があると考えられる。

以上のことから、本シミュレーションは一部の剛性評価に課題は見られるものの、実大壁実験を実用上精度良く再現可能であり、解析手法は妥当なものであると考えられる。

#### IV. おわりに

本研究では、CLT パネルを 2 枚合わせとしてボルト接合する新たな CLT 耐震壁について、要素実験、実大 CLT 壁実験および FE 解析によるシミュレーションを実施した。得られた知見を以下に示す。

- ①要素実験の結果の範囲において、本ボルト接合部は CLT 強軸を加力した場合には弾性限後も大変形領域まで靱性能のある性状を示すことが確認された。
- ②実大 CLT 耐震壁の実験より、全ての試験体で 1/20rad. の大変形まで CLT パネルの損傷は見られず、耐力低下のない優れた靱性能を有することが示された。
- ③要素実験結果にハンキンソン式を適用してボルト接合部のバネ特性値を設定した FE 解析によるシミュレーション結果は、一部の初期剛性を除き、解析結果と実験結果が精度よく一致することを確認した。このことより、本シミュレーションは、実大壁実験を実用上精度良く再現可能であり、解析手法は妥当なものであると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 中辻享佑ほか；CLT における鋼板挿入ドリフトピン接合部のせん断性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 754 号，2018.12，pp.1811-1820.
- 2) 久保田淳ほか；CLT と鋼板間におけるボルト接合部の構造性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，2021.9，pp.311-312.
- 3) 日本建築学会；木質構造設計基準・同解説，2006.
- 4) 日本住宅・木材技術センター；2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル増補版，2016.

## Structural Properties of Two-Panel CLT Shear Wall with Bolted Connection

*Daiki Hinata, Jun Kubota, Takashi Shima, Shinji Takatani<sup>1)</sup> and Masanori Hisada<sup>1)</sup>*

The increasing demand for using timber structures as building structures has led to the development of many CLT shear wall systems including details on connecting the walls. However, these details are still not good enough for easy and quick installation purposes. Therefore, ways of improving the installation productivity on site are more and more required. Considering recent engineering developments, installing a pair of CLT panels as a single shear wall, that is, a “two-panel CLT shear wall,” with bolted connections is one of the best solutions. As CLT panels get heavier, installation work on-site becomes more difficult. If the panels are divided into two panels, they can be easier to handle due to the lower weight for each panel. Also, bolted connection is one of the easiest ways of installation on site. This paper presents the structural performances of a two-panel integrated CLT shear wall with bolted connection, which was investigated in element tests on bolted connections and full-scale wall tests. Furthermore, an FE analysis simulating two-panel CLT shear walls was conducted to investigate the stresses on the CLT panels and the ultimate behaviors.