

鉄骨建築物を対象とした CLT 耐力壁の開発

韌性型 LSB を用いて

加藤 圭^{*1}・一色 裕二^{*2}・坂口 裕美^{*2}・鈴木 直人^{*2}

Keywords : steel structure, cross-laminated timber, lag screw bolt, drift pin, structural experiment, shear wall
鉄骨造, CLT, ラグスクリューボルト, ドリフトピン, 構造実験, 耐震壁

1. はじめに

脱炭素社会の実現や国土保全の観点から、中大規模・中高層建築物に対する木材利用が望まれている。そのような背景の中、筆者らは鉄骨建築物に適用できる CLT 板（木板を互いに直交するように積層・接着した面状の木質系材料）を用いた耐力壁の開発を行ってきた^{1),2)}。本研究では、従来よりも韌性が高い CLT 耐震壁の構築を目指し、周囲の鉄骨架構との接合にボルト内蔵型のラグスクリューボルト（以下、LSB）を採用した新たな CLT 耐震壁（図-1）を提案する。

本構法は、従来技術に対して以下のような優位性を有する。

① 意匠性

CLT 耐力壁は、長期の荷重負担に期待しないことから耐火被覆を要求されず、木材をそのまま現しとできる。また、LSB は CLT 板の木口面からアクセスするできる接合具であり、接合部が見え掛りとならない優れた意匠性を得られる。

② 構造性能

ボルト内蔵型 LSB の採用により、降伏耐力を明確にし高い韌性を有する機構とできる（2 章で詳述）。

③ 施工性

本構法に採用する LSB 接合とドリフトピン接合は、接着剤などの湿式施工が不要である。また、これら接合部は予め工場で施工することで、現場では在来の鉄骨工事により建て方が可能である。

本開発では、LSB 接合とドリフトピン接合の構造特性を要素試験により把握した上で（3 章）、それらの接合部を採用した CLT 耐力壁を対象として架構実験を実

施し、構造性能を検証した（4 章）。



図-1 CLT 耐力壁の適用例
Fig.1 Application example of CLT shear wall

2. CLT 耐力壁の機構

本 CLT 耐力壁の機構を図-2 に示す。CLT 板の 4 角に LSB を配置し、上下の鉄骨梁と接続金物を介して接合する。層間変形時の部材の回転モーメントは主として、LSB による引張力と CLT 木口面の支圧による圧縮力によって負担させる。また、CLT 板の上下辺の中央には、鋼板挿入ドリフトピン接合を配置し、水平せん断力を負担させる機構とした。

特に LSB には「ボルト内蔵型」を採用した（写真-1）。同材は、中空に加工された LSB（外殻）の内部に、伸び性能を有する SNR490B 材のボルト（内蔵ボルト）を全長に渡って挿入し、先端で外殻と固定した接合具である（図-3）。ボルト内蔵型では、LSB が引張力を負担するとき、内蔵ボルトの降伏後にその全長に渡る長い範囲で伸び変形が生じることから、雌ねじ型や雄ねじ型などと比べて高い韌性を有する。

本開発では耐力壁のせん断力負担において、CLT 板のせん断降伏より、LSB の内蔵ボルトの引張降伏が先行して生じるように設計し、耐力壁の韌性確保を図る。

* 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 構造設計第二部

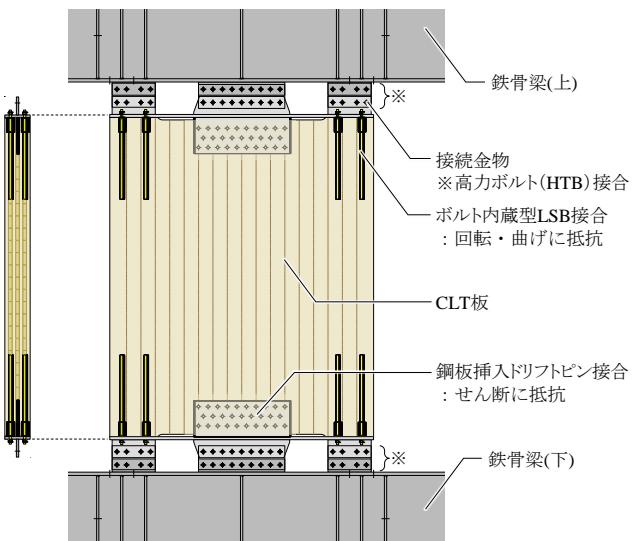


図-2 CLT 耐力壁の機構 (立面図)
Fig.2 Mechanism of the CLT shear wall



写真-1 LSB の種類
Photo.1 Types of LSB

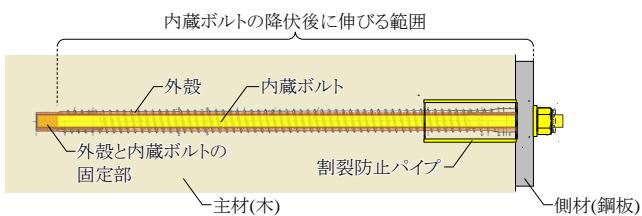


図-3 ボルト内蔵型 LSB の機構
Fig.3 Mechanism of the bolt-integrated LSB

3. 接合部の要素試験

3.1 LSB 引抜き試験

3.1.1 実験計画

耐力壁に用いる LSB 接合の引抜き耐力、剛性、変形性能、破壊性状などの構造性能を把握するため、CLT 板の木口面に打ち込んだ LSB を対象に、引抜き試験を実施した。

試験体一覧を表-1 に、形状・寸法を図-4 に示す。試験体は、強軸方向の長さを 1200mm 程度に加工した CLT に対して、その片端に LSB を打込み、もう一方の端には反力用の接合部を設けた形状とした。実験変数は、CLT の積層構成、LSB の本数と木口面内における配置とし、 n 数は 3 とした。すべての LSB には、木の

割裂の進展を抑制する機構として、木口面から深さ 120mm まで外殻ボルトの外側を覆うように $\phi 55\text{mm}$ のパイプ(割裂防止パイプ)を配置した。LSB の内蔵ボルトを万能試験機により単調引張載荷した。

表-1 LSB 試験体一覧
Table 1 List of specimens in LSB test

試験体No.	CLT	LSB			n
		仕様	本数	補強	
1-5.7	S60-5-7	外殻ボルト $\phi 30$	1本	割裂防止 パイプ $\phi 55 \times 14.0$ $\times L 120$	3
1-7.7			2本(ピッチ) SNR490B M18		
2-5.7p		2本(ピッチ) SNR490B M18	3		3
2-7.7p			3		3
2-5.7e		2本(端あき) SNR490B M18	3		3
2-7.7e			3		3

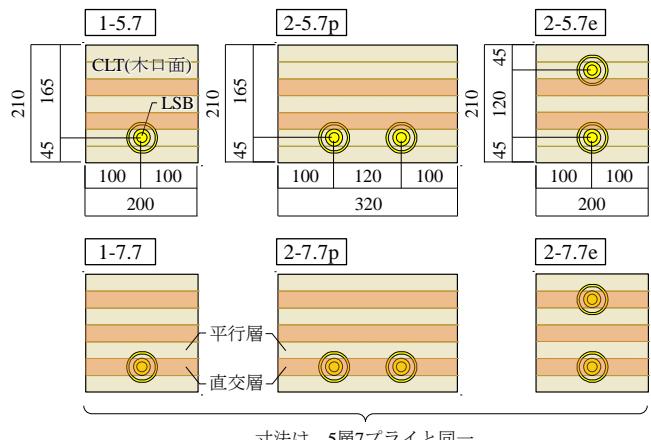


図-4 試験体形状・寸法
Fig.4 Specimen shape and dimensions

3.1.2 実験結果

実験結果一覧を表-2 に、荷重一変位関係を図-5 に、加力後の試験体の状態を写真-2 に示す。表中の各特性値は、文献 3)の手法により完全弾塑性モデルに置換することで求め、 n 体の平均値を示した。

全ての仕様において、初期剛性で荷重が増加した後、内蔵ボルトが降伏した。ひずみ硬化により再び荷重が増大し最大荷重に至った。終局では、内蔵ボルトの露出ねじ部で破断した(写真-2 左側)。

LSB 1 本では、平行層(試験体 1-5.7)・直交層(試験体 1-7.7)いずれのラミナに配置した場合にも、降伏荷重および最大荷重はほぼ同等であった。また、LSB 2 本の仕様ではいずれも、降伏荷重および最大荷重は、1 本の仕様のほぼ 2 倍であった。初期剛性は、直交層に打ち込んだ場合、引張時に繊維の束が潰れる方向に応力が伝達されることから、平行層に対して 5~15%程度低くなつた。

加力後、割裂防止パイプ周囲のラミナを切断しパイプを取り外したところ、パイプ内外とも木には割裂などの損傷は認められなかった（写真-2 右側）。今回採用した LSB の間隔（幅方向・積層方向とも 120mm）および端あき距離 45mm の条件では、木には十分な耐力が得られており、内蔵ボルトの降伏耐力および終局耐力により接合部の耐力が決まり、また、集合破壊も生じないものと判断される。

表-2 LSB 実験結果一覧
Table 2 Results of the LSB test

試験体No.	降伏荷重 [kN]	最大荷重 [kN]	2/3P _{max} [kN]	終局耐力 P _u [kN]	初期剛性 K [kN/mm]	塑性率 μ
1-5.7	73.3	109	72.8	98.5	42.7	38.0
1-7.7	72.5	109	72.8	98.3	36.7	33.2
2-5.7p	143	217	145	197	72.1	34.6
2-7.7p	143	218	145	197	65.7	31.3
2-5.7e	145	217	145	196	71.8	34.0
2-7.7e	144	216	144	196	68.1	33.0

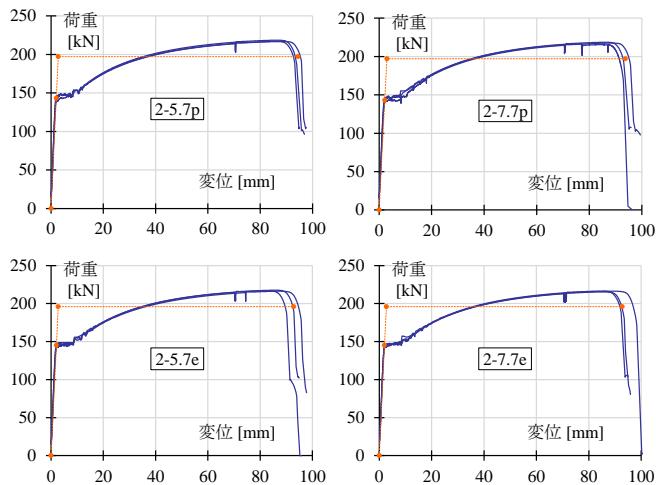


図-5 荷重一変位関係（抜粧）
Fig.5 Load-displacement relationship



写真-2 LSB 接合部の破壊性状
Photo.2 Failure behavior of LSB joint

3.2 ドリフトピンせん断試験

3.2.1 実験計画

耐力壁のせん断力の負担に用いる鋼板挿入ドリフトピン接合の構造性能を把握するため、押し抜き型のせ

ん断載荷試験を実施した。

試験体一覧を表-3 に、ドリフトピンの配置を図-6 に、セットアップ状況を写真-3 に示す。試験体は、CLT 板の左右両側に加工した幅 14mm のスリットに対して厚さ 12mm の鋼板をそれぞれ挿入し、 $\phi 20.2\text{mm}$ のドリフトピンを各 7 本（計 14 本）打ち込んだ形状とした。ドリフトピンを打ち込む孔の径は、CLT 板では $\phi 20.0\text{mm}$ 、挿入鋼板では 21.5mm とし、ピッチや端あきは耐力壁における配置を模擬した。実験変数は CLT 板の積層構成 2 種（5 層 7 プライと 7 層 7 プライ）とした。なお、ドリフトピンの長さは、部材の表面から見た際の意匠性を考慮して、CLT 板の厚さ 210mm を貫通させない長さ 198mm とした。

表-3 ドリフトピン試験体一覧
Table 3 List of the specimens in drift pins test

試験体No.	CLT	ドリフトピン		n
		仕様	本数	
14-5.7	S60-5-7	$\phi 20.2 \times L198$	14本 (片側7本×2)	5
14-7.7	S60-7-7			6

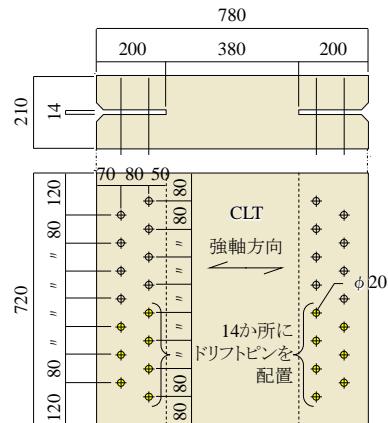


図-6 CLT 板におけるドリフトピンの配置
Fig.6 Arrangement of drift pins in CLT panel



写真-3 試験体のセットアップ
Photo.3 Setup of the drift pins test

3.2.2 実験結果

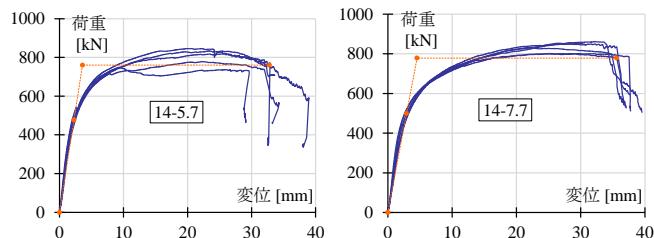
実験結果一覧を表-4 に、荷重-変位関係を図-7 に、加力後の試験体の状態を写真-4 に示す。表中の各特性値は、文献 3)の手法により完全弾塑性モデルに置換することを求め、 n 体の平均値を示した。

初期剛性は、7 層 7 プライでは 5 層 7 プライに対して 20%ほど低かった。降伏荷重は、7 層 7 プライでは 5 層 7 プライに対して、5%程度高くなった。いずれの試験体においても、ドリフトピンはその中央部（挿入鋼板と接触する位置）で折れ曲がり、「く」の字に変形した（写真-4 左側）。また、変形したドリフトピンが楔のように CLT のスリットを内側から押し広げ、左右のスリット間を横断するように割裂を生じて耐力が低下した（写真-4 右側）。同破壊モードは、左右のスリット間隔が小さいことが一因と考えられ、両スリット間隔を確保することで、更に韌性を増大できる可能性が考えられる。

表-4 ドリフトピン実験結果一覧

Table 4 Results of the drift pins test

試験体No.	降伏荷重 P_y [kN]	最大荷重 P_{max} [kN]	$2/3P_{max}$ [kN]	終局耐力 P_u [kN]	初期剛性 K [kN/mm]	塑性率 μ
14-5.7	477	805	536	760	213	9.2
14-7.7	499	832	555	778	172	7.9

図-7 荷重-変位関係
Fig.7 Load-displacement relationship写真-4 ドリフトピン接合部の破壊性状
Photo.4 Failure behavior of drift pins joint

4. 耐力壁の架構実験

4.1 実験計画

4.1.1 試験体

試験体の一覧を表-5 に、形状・寸法を図-8 に示す。CLT 板は、材料等級 S60-7-7 スギ材で、幅 2,200mm × 高さ 2,660mm とした。CLT 板の上下木口面に対し、周辺架構と接合するための接続金物を取り付けた。接続金物は厚さ 25mm の鋼板に対し、LSB の内蔵ボルトを通すためのボルト孔を設けるとともに、CLT 側の中央部にはドリフトピン接合のための挿入鋼板 PL-12 を溶接した。周辺架構との接合側には、高力ボルト接合（2 面摩擦）とするため厚さ 19mm のガセットプレートを設けた。

実験変数は、①ドリフトピンの長孔（ルーズホール）の有無 ②鉛直ジャッキの制御方法とし、試験体は各仕様 1 体ずつ、計 4 体とした。①②について以下に詳述する。

① ドリフトピンの長孔

本耐力壁においてドリフトピン接合は、せん断荷重の負担するシアキーのとして設計される。しかし実際には、CLT 板の回転により鉛直方向の変位が生じると、圧縮・引張荷重も負担してしまい、設計と不整合が生じる。そのため、より純粹なシアキーとして機能させる目的で、挿入鋼板のドリフトピン孔を縦方向の長孔とし、ドリフトピンの上下方向の変位に対してドリフトピン孔縁に接触せず荷重負担しない機構を提案する。本実験では、試験体 No.1・No.3 は一般的な丸孔を、No.2・No.4 では長孔を採用した。長孔の寸法は、ドリフトピンの上下変位が各 15mm（CLT 板の回転角 1/100 に相当）未満では接触しないよう設定した。

② 鉛直ジャッキの制御方法

本開発の耐力壁は、原則として長期鉛直軸力は負担させないが、水平荷重を負担する際には周辺架構の柱・梁などとの剛性のバランスにより、鉛直方向の荷重が入力されることが想定される。そこで、鉛直ジャッキの制御方法を実験変数とし、「階高変動」では架構が水平方向に変位しても加力梁は水平を保ちつつ上下方向へ変位することを許容し、鉛直荷重が生じないような制御を、「階高固定」では上下梁の間の内法寸法を一定に保ったまま加力梁を水平変位させ、鉛直荷重の変動を許容する制御とした。

表-5 耐力壁試験体一覧
Table 5 List of the specimens in shear wall test

試験体No.	CLT	LSB	ドリフトピン		鉛直ジャッキ制御
		仕様	仕様	鋼板の孔	
No.1	S60-7-7	4本/か所 内蔵ボルト SNR490B M18	29本/か所 φ 20.2 ×L198	丸孔 長孔	階高変動 (鉛直荷重なし)
No.2				丸孔 長孔	階高固定 (鉛直荷重変動)
No.3					
No.4					

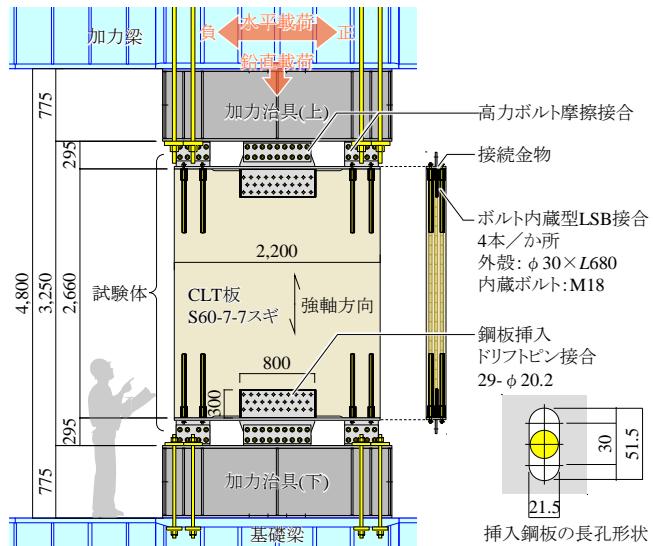


図-8 耐力壁試験体の形状・寸法とセットアップ
Fig. 8 Specimen shape, dimensions, and setup in the shear wall test

4.1.2 載荷計画

加力装置には鉛直荷重と水平荷重を同時に載荷できる試験機を用いた。鉄骨梁に見立てた加力治具を試験機の基礎梁および加力梁にPC鋼棒により固定し、加力治具と試験体を接続金物を介して固定（高力ボルト接合）した。

載荷は、正負交番で繰返し水平荷重を与える載荷とした。見かけのせん断変形角 $1/800 \cdot 1/400 \cdot 1/200 \cdot 1/100 \cdot 1/50\text{rad}$ でそれぞれ 3 回ずつ繰り返した後、正方向（紙面向かって右方向）へ引き切った。ここで、見かけのせん断変形角は、上下加力治具の水平方向のずれ量を両者の間の内法寸法 3,250mm で除すことで求めることとした。

4.2 実験結果

実験結果の一覧を表-6 に、各試験体の水平荷重-変位関係を図-9 に、その包絡線を図-10 に、試験体の破壊状況を写真-5,6 に示す。表中の各特性値は、実験で得られた荷重-変位関係のうち正加力側の包絡線を文献3)の手法により完全弾塑性モデルに置換することで求めた。ただし、試験体 No.2 については、履歴に明確な降伏点が認められたことから、個別に評価した。

(1) No.1・No.2 (階高変動)

試験体 No.1・No.2 ともに 1/400 のサイクルまではほぼ弾性であった。初期剛性は、No.2 は No.1 に対して 6%程度低かった。No.2 では 540kN 時に LSB の内蔵ボルトが降伏し、明確な剛性低下が認められた一方、No.1 では 700kN 程度で同様の降伏が認められたものの、明確な剛性低下にはならず、1/200～1/100 にかけ剛性が徐々に低下した。

同一変形角の繰返しでは、前回の荷重-変位のトップを指向する履歴となった。一度降伏し伸長した内蔵ボルトはその後に弾性変形以上に縮まないことから、繰返し時には引張側の内蔵ボルトに配したナット・座金が金物に接触するまでは水平荷重が生じず、スリップ型の履歴となった。この性状は No.2 の方がより強い傾向であった。

No.2 では、1/80 (水平変位 40mm) 程度からドリフトピンが挿入鋼板の長孔の縁に接触することにより鉛直方向の荷重を負担し始め、架構全体の剛性が増大する現象が見られた。その後、No.1 では 1/50 (同 65mm) で、No.2 では 1/32 (同 102mm) で、最大荷重に達した後、ドリフトピン接合部において CLT 面の急激なはらみ出しが生じ、耐力が徐々に低下した。引き切りの際、No.1 では 1/24 で、No.2 では 1/20 で、いずれも試験体向かって右上に配置された LSB 内蔵ボルトのねじ部が破断して、耐力が低下した。

No.2 は、No.1 に対してドリフトピンによる鉛直荷重の負担開始が遅れた分だけ、履歴全体がシフトした。

(2) No.3・No.4 (階高固定)

試験体 No.3・No.4 ともに階高を一定に保つ制御のため、No.1・No.2 に比べて CLT 板の回転変形や脚部の浮き上がり、LSB 内蔵ボルトの伸びが小さくなった。初期剛性は No.1 に比べて 1 割程度大きく、No.3 と No.4 は同程度であった。

両試験体とも、1/100 のサイクルから高力ボルトの摩擦接合面が滑ることにより、耐力が急激に低下する事象が断続的に見られた。これは、摩擦接合部がせん断荷重の負担に加え、CLT 板の圧縮ストラット形成による鉛直方向の荷重を同時に負担したことによるものと考えられる。

No.3 では 1/70 (水平変位 46mm) で、No.4 では 1/50 (同 65mm) で最大荷重に達した。最大荷重は No.1、No.2 に対して 14%程度増加した。その後、終局では両試験体とともに、CLT 板のラミナ同士の積層接着および幅はぎ接着の剥離とそれに伴うせん断変形が進行した。

表-6 耐力壁実験結果一覧
Table 6 Results of the shear wall test

試験体No.	降伏荷重 P_y [kN]	終局荷重 P_u [kN]	最大荷重 P_{max} [kN]	初期剛性 K [kN/mm]	塑性率 μ
No.1	836	1,102	1,268	50.9	5.00
No.2	540	1,035	1,320	47.7	6.78
No.3	1,020	1,344	1,447	55.5	2.70
No.4	877	1,162	1,500	56.0	3.15

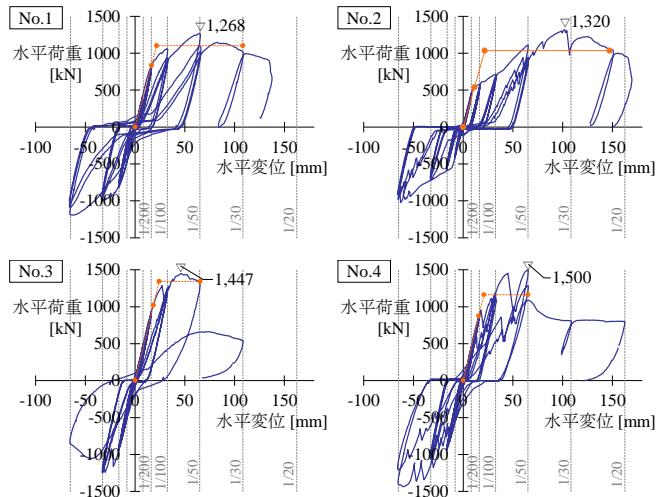


図-9 荷重一変位関係

Fig. 9 Load-displacement relationship

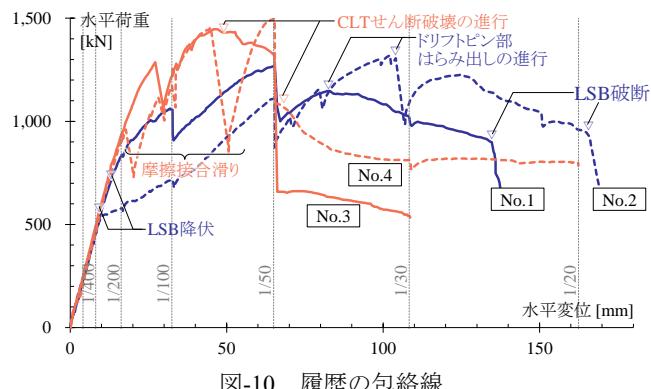


Fig. 10 Envelopes of load-displacement relationship in the shear wall test

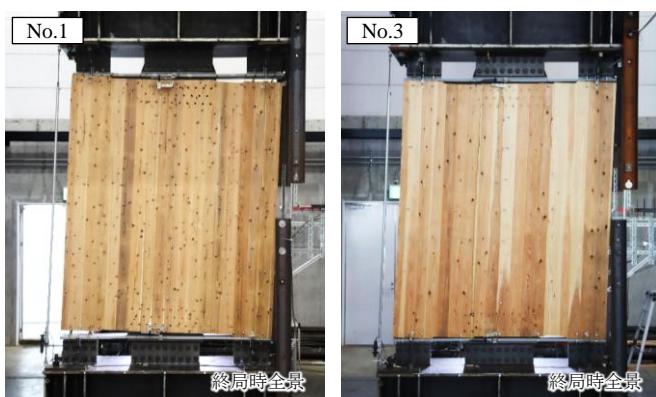


写真-5 耐力壁試験体の破壊状況（全景）

Photo.5 Failure behavior of the shear wall specimens

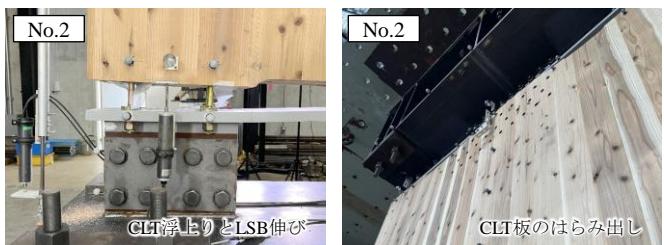


写真-6 耐力壁試験体の破壊状況（細部）

Photo.6 Detailed failure behavior of the shear wall specimens

(3) 鉛直ジャッキの制御方法の影響

架構に水平変位を生じさせる変形要素は、回転変形、CLT板のせん断・曲げ変形、ドリフトピン接合部のずれ変形、周辺架構との高力ボルト接合部のずれ変形に分類できる。これら変形要素の変位（積上げ）を縦軸に、架構全体の水平変位を横軸に取った図を、図-11に示す。

階高変動のNo.1・No.2では、全体水平変位における回転変形の占める割合は60～80%程度で、終局まで線形的に増大した。1/50以降ではCLT板のせん断・曲げ変形の増大が頭打ちとなる一方で、ドリフトピン接合の破壊によりそのずれ変形が増大した。

階高固定のNo.3・No.4では、回転変形は比較的小さく、変位の増大は1/50でほぼ頭打ちとなった。1/50以降の水平変位の増大の大部分は、CLT板のせん断・曲げ変形により生じた。周辺架構の拘束条件の差異により、耐力壁の性能に影響を与えることが認められた。

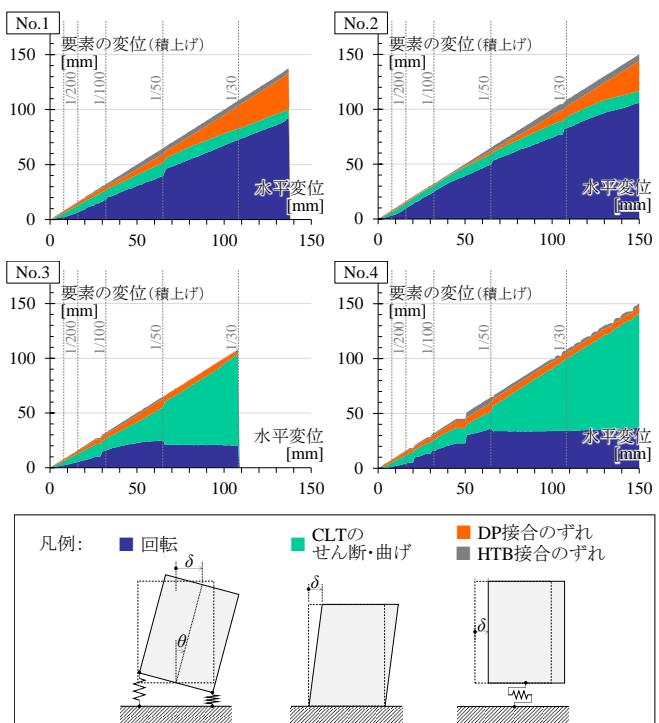


図-11 変形要素の変位の推移

Fig. 11 Displacement transitions of each deformation element

5. おわりに

高い韌性を有する CLT 耐震壁の構築を目指し、周囲の鉄骨架構との接合にボルト内蔵型 LSB を採用した新たな CLT 耐震壁を提案し、構造実験による構造性能の検証を実施した。検証の結果、以下の知見が得られた。

- ・ 階高変動（建物の水平変形に対して階高が変動しやすい場合）では、LSB 内蔵ボルトの降伏とその後の伸び変形によって、層間変形角 1/30 程度まで韌性が確保された。また、ドリフトピン接合の挿入鋼板に長孔を採用することで、架構の降伏耐力が明確になるとともに、さらに高い韌性を確保できることが認められた。
- ・ 階高固定（建物の水平変形に対して階高が変動しにくい場合）では、CLT 板の回転変形が拘束されて対角に圧縮ストラットが形成されることにより、架構の剛性と耐力が増大した。一方、LSB 内蔵ボルトの伸び変形が生じにくうことから架構の韌性は低下したものの、層間変形角 1/50 程度まで韌性

を有することを確認した。

- ・ 実建物においては、耐力壁周辺の架構の剛性をはじめとした条件により、両者の中間的な性状になるものと考えられる。

今後は、本構法の実用化を目指し、より安定した構造性能が発揮される機構の検討や耐力・韌性の評価方法の確立を進めていく。また、実施適用を通じて中大規模建築物への木材利用を促進する一助となるよう努めていきたい。

参考文献

- 1) 梅森浩、相馬智明、森田仁彦、坂口裕美、島村高平、米本和央、苅部泰輝：見えがかり配慮型接合金物を用いた CLT 耐力壁の開発 その 1～2、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018 年 9 月、pp.453-456
- 2) 梅森浩、森田仁彦、御所園武、稻山正弘：CLT を耐震壁とした中層鉄骨建物の開発 その 1～3、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019 年 9 月、pp.721-726
- 3) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計、2017 年、pp.300-301