

2.2 大成建設（株）技術センター

1. 建築物の仕様一覧

事業名		実験施設新築工事の建築設計実証		
実施者（担当者）		大成建設株式会社技術センター		
建築物の概要	用途	実験施設		
	建設地	神奈川県横浜市		
	構造・工法	CLTによる展開構造、壁式+トラス架構+軸組工法		
	階数	2		
	高さ（m）	9.15		
	軒高（m）	8.95		
	敷地面積（㎡）	34821.92		
	建築面積（㎡）	413.05		
	延べ面積（㎡）	488.68		
	階別面積	1階	413.05	
	2階	75.38		
	3階	-		
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、屋根	
	CLT使用量（㎡）		建築物使用量約200㎡	
	壁パネル	寸法	210mm厚	
		ラミナ構成	5層7プライ	
		強度区分	Mx60A相当	
		樹種	スギ	
	床パネル	寸法		
		ラミナ構成		
		強度区分		
		樹種		
屋根パネル	寸法	210mm厚		
	ラミナ構成	5層7プライ		
	強度区分	Mx60A相当		
	樹種	スギ		
木材	主な使用部位（CLT以外の構造材）		母屋：スギ、束：スギ、天井下地：スギ構造用合板（t=24mm）	
	木材使用量（㎡）※構造材、羽柄材、下地材、仕上材等とし、CLT以外とする		約20㎡	
仕上	主な外部仕上	屋根	シート溶着鋼板 t0.6	
		外壁	横葺フッ素ガルバリウム鋼板 t0.5	
		開口部	アルミカーテンウォール+Low-E複層ガラス（空気層12mm） アルミサッシ+Low-E複層ガラス（空気層12mm）	
	主な内部仕上	界壁	GB12.5×2+LGS100（GW24K100mm）+針葉樹合板 他	
		間仕切り壁	-	
		床	コンクリート金鍍仕上げ +ケイ酸塩系コンクリート表面強化剤	
	天井	CLT、構造用合板+SOP		
構造	構造計算ルート		時刻歴応答解析（性能評価+大臣認定ルート）	
	接合方法		ビス接合+LSB接合（インボルト式）	
	最大スパン		9.5m	
	問題点・課題とその解決策		展開構造による建て方を検討したが、実際の建築敷地に十分な施工面積が確保できないため、施工方法を変更する必要がある。近隣住民に配慮して十分な遮音性能を付与する。	
防火	防火上の地域区分		準防火地域	
	耐火建築物等の要件		無	
	本建築物の防耐火仕様		防火構造（延焼の恐れのある部分）	
	問題点・課題とその解決策			
温熱	建築物省エネ法の該当有無		届出対象	
	温熱環境確保に関する課題と解決策		-	
	主な断熱仕様（断熱材の種類・厚さ）	屋根（又は天井）	硬質ウレタンフォーム 保温板 2種 ・ 25mm	
		外壁	-	
床		押出法ポリスチレンフォーム 保温板 1種 ・ 20mm		
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		大判パネルの接合方法の再考が必要	
	建て方における課題と解決策		施工精度の事前検証、防腐防蟻処理実施	
	給排水・電気配線設置上の工夫			
	劣化対策		表面塗装処理	
工程	設計期間		H29.2月～H30.8月（19カ月）	
	施工期間		-	
	CLT躯体施工期間		-	
	竣工（予定）年月日		平成31年5月（予定）	
体制	発注者		大成建設株式会社	
	設計者（複数の場合はそれぞれ役割を記載）		基本設計、実施設計：大成建設株式会社一級建築士事務所	
	構造設計者		大成建設株式会社 一級建築士事務所	
	施工者		大成建設株式会社 横浜支店	
	CLT供給者		銘建工業株式会社	
	ラミナ供給者		銘建工業株式会社	

実証事業名：実験施設新築工事の建築設計実証

実施者／協議会運営者または担当者：大成建設株式会社 技術センター

1. 実証した建築物の概要

用途		実験施設		
建設地		神奈川県横浜市		
構造・工法		木造（CLT）		
階数		地上2階（木造部分は1層）		
高さ（m）		9.15	軒高（m）	8.95
敷地面積（㎡）		34,821.92	建築面積（㎡）	413.05
階別面積 （㎡）	1階	413.05	延べ面積（㎡）	488.68
	2階	75.38		
	3階	—		
CLT採用部位		壁、屋根		
CLT使用量（m ³ ）		約200		
CLTを除く木材使用量（m ³ ）		約20		
CLTの仕様	（部位）	（寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種）		
	壁	約2.4×9.0m B種構成 Mx60-5-7 スギ		
	床	—		
	屋根	約2.4×9.0m B種構成 Mx60-5-7 スギ		
設計期間		平成29年2月～平成30年8月		
施工期間		—		
CLT躯体施工期間		—		
竣工（予定）年月日		平成31年5月（予定）		

2. 実証事業の目的と設定した課題

本事業で建築予定の木造施設はCLTパネルを用いたトラス架構で構成されている。本構造は告示の工法とは異なる特殊な架構であるため、時刻歴応答解析を行い建築物の性能評価および大臣認定を得る予定である。本事業では、CLTトラス架構の部材間接合部の仕様を検討し、それらの構造特性値を求めた。また本建築物のもうひとつの特徴は、展開構造による省人で高速な施工を実現することである。その施工性を確認するためモックアップ施工実験を実施して課題抽出を行った。実施した具体的な内容は、以下のとおりである。

- 1) ビス止め鋼板添え板接合部のせん断試験
- 2) CLT耐力壁の面内せん断試験
- 3) インナーボルト式LSBの引張り試験
- 4) モックアップ施工実験

3. 実証事業の実施体制（または協議会構成員）

意匠設計	大成建設株式会社 設計本部	杉江大典、塔 真介、三浦有美子
構造設計	大成建設株式会社 設計本部	島村高平、坂口裕美、
試験計画	大成建設株式会社 技術センター	森田仁彦、相馬智明（進行管理）
材料	銘建工業株式会社	
金物	株式会社ダイロック、巴機械工業株式会社	
試験実施	大成有楽不動産株式会社、大成建設株式会社東京支店、 シネジック株式会社	

4. 課題解決の方法と実施工程

接合部の性能確認、施工性の確認等の課題解決は、実験的なアプローチにより知見を得ることで行った。実施工程としては7月の事業開始から随時実験を進め、2018年1月までにほぼすべての実施内容を完了している。

5. 得られた実証データ等の詳細

5. 1 ビス止め鋼板添え板接合部のせん断試験

1) はじめに

CLT トラス架構を構成する接合部のひとつである、ビス止め鋼板添え板接合部のせん断性能を明らかにするため、引張り型のせん断試験を実施した。

2) 試験体と試験方法

試験体と変位計取付け位置を図1に示す。CLT (Mx60B 5-7、 $t=210\text{mm}$) のサイズは $700 \times 1700\text{mm}$ とし、CLT の側面に左右から先孔を開けた2枚の鋼板 ($t=16\text{mm}$) を添えてフルスレッドビス (パネリード PX8-140) にて止めつけた。止めつける本数は、20本、40本、59本の3種類とし各1体試験体を用意した。加力は1方向繰返し加力とし、繰返しスケジュールはCLT マニュアルの方法 (P_{\max} もしくは P_y の倍数により決定) に準拠した。試験体数は計3体とした。

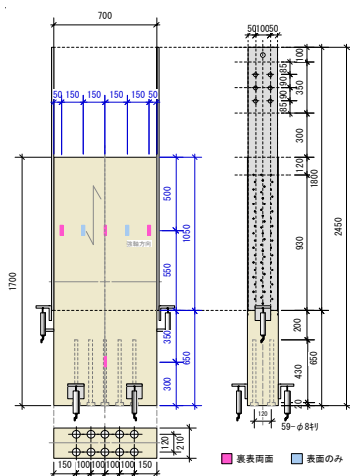


図1 鋼板添え板ビス止め接合部試験体

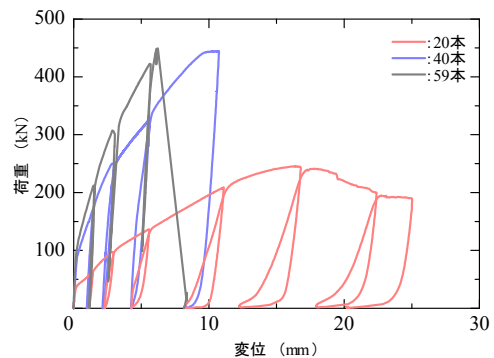


図2 試験結果

3) 結果と考察

引張り型のせん断試験の結果を図 2 に示す。以下の事項が確認された。

- 1) 20 本試験体から 1 本あたりの特性値を得た。
- 2) 40 本試験体から 20 本試験体よりも高い剛性、降伏耐力が得られた。このことから 20 本試験体のそれらを採用することで安全側であるといえる。

5. 2 ビス止め鋼板添え板接合部のせん断試験

1) はじめに

CLT トラス架構を構成する CLT 耐力壁の面内せん断性能を明らかにするため、CLT 耐力壁の面内せん断試験を実施した

2) 試験体と試験方法

試験体には壁長さ 2400mm、壁高さ 3600mm で長手方向を強軸とした 1 枚ものの CLT (Mx60B 5・7、 $t=210\text{mm}$) を用いた。試験体を図 3 に示す。壁脚の固定方法は $\phi 25.2\text{mm}$ 、 $L=430\text{mm}$ のインナーボルト式 LSB を用いた仕様とした。インナーボルト式 LSB とは、図 4 に示したように、中空に作られた LSB の内部に M18 ボルト (SNR490B) を挿入し挿入先で中空 LSB と機械的に”かきめて”固定されている接合金物である。

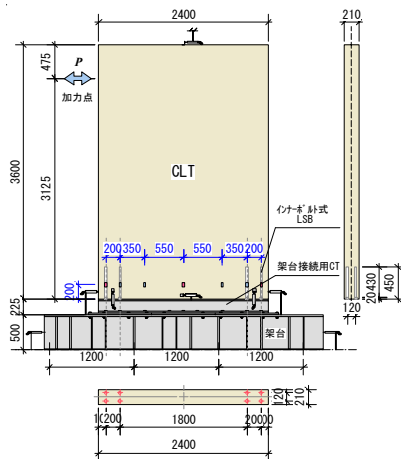


図 3 面内せん断試験体

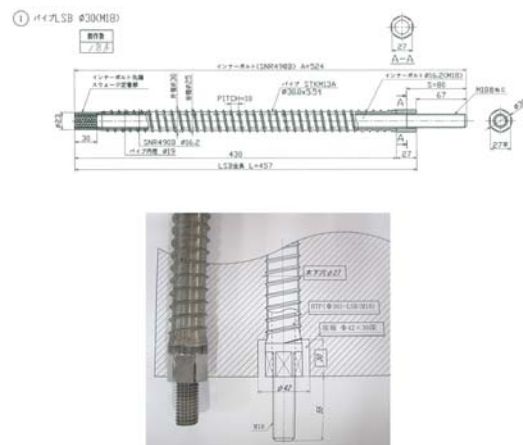


図 4 インナーボルト式 LSB

3) 結果と考察

得られた荷重変位関係はインナーボルトの伸びに起因する完全スリップ型となり、耐力を保ちながら大きく変形した。最終的な破壊は LSB と CLT との界面でのせん断破壊であり、引張側で CLT の割裂破壊が生じた。耐力壁の抵抗機構を表す力学モデルを構築して計算値と実験値を比較したところ、剛性・耐力ともによく一致した。剛性計算には CLT のせん断変形分を加味する必要があることが分かった。

5. 3 インナーボルト式 LSB の引張り試験

紙面の都合により割愛する。別途報告書を参照されたい。

5. 4 CLT トラス架構のモックアップ施工実験

1) はじめに

CLT トラス架構は展開構造として組み上げることができる。3枚のCLTの長手方向の端部をピン接合としてつなぎ1フレームを構成する。このフレームを数フレーム分、桁行方向に並べて、中央のCLTを吊り上げるか、左右2枚のCLTを引寄せせるかして、左右のCLTを鉛直に立ち上げる施工方法であり、これにより高速に架構を形成することができる。

2) 実験方法

本施工実験では実際の建物の1/2スケールで、6フレーム分のトラス架構を、前述の方法で立上げて施工した。吊上げは施工時の安全のために補助的に行い、基本的には左右のCLTを互いに引寄せせることでトラス架構を立ち上げた。建て方施工時の写真を図5に示す。

3) 結果と考察

CLT トラス架構のモックアップ施工実験により、以下の点が確認された。

- ・フレーム同士を頭頂部で繋ぐ金物が、施工時のずれを抑える重要な役割を果たす。
- ・フレーム間のクリアランスが必要である。



図5 CLT トラス架構のモックアップ施工プロセス

6. 本実証により得られた成果

実際に使用する各接合部の性能値を実験的に明らかにした。CLT 耐力壁については、せん断変形が無視できない程度であることが分かった。モックアップ施工実験によって、施工時のクリアランスや、部材の工場組立ての必要性が確認できた。

7. 建築物の平面図・立面図・写真等

本事業で建築計画している木造施設のパスを図6に示す。

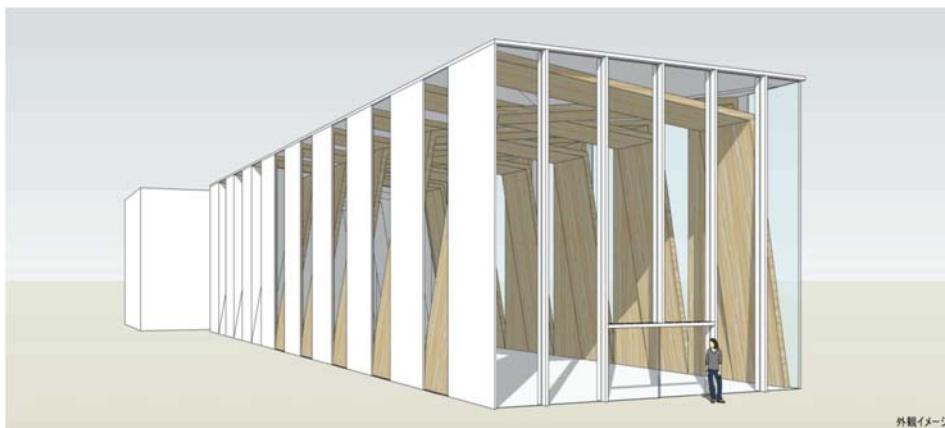


図6 仕上げ面を含む建物の外観

1. ビス止め鋼板添え板接合部のせん断試験

1.1 はじめに

CLT トラス架構を構成する接合部のひとつである、ビス止め鋼板添え板接合部のせん断性能を明らかにするため、引張り型のせん断試験を実施した。

1.2 試験体と試験方法

試験体と変位計取付け位置を図 1.1 に示す。CLT (Mx60B 5-7、 $t=210\text{mm}$) のサイズは $700\times 1700\text{mm}$ とし、CLT の側面に左右から先孔を開けた 2 枚の鋼板 ($t=16\text{mm}$) を添えてフルスレッドビス (パネリード PX8-140) にて止めつけた。止めつける本数は、20 本、40 本、59 本の 3 種類とし各 1 体試験体を用意した。図 1.2 左に示したようにビスの打込み位置は CLT ラミナの木口に位置しないようにラミナの板目面に打つようにした。また図 1.2 右に示したボルト配置に関する木規準を満足するように配慮し、割裂破壊を生じないよう繊維方向に 1 直線上にビスが並ぶ場合には、なるべくビス間距離が取れるようにした。また CLT 端部から 120mm の位置からビスが配置されるよう設定した。反力側は $L=430\text{mm}$ の LSB を 10 本打込み、M16 ボルトで加力用架台に取り付けた。加力は一方向繰返し加力とし、繰返しスケジュールは、集成材を対象としたビスのせん断実験で求められた δy の 1/2、1、2、4、6、8、12、16 倍の順で 1 回ずつ繰り返した。また試験体数は計 3 体とした。

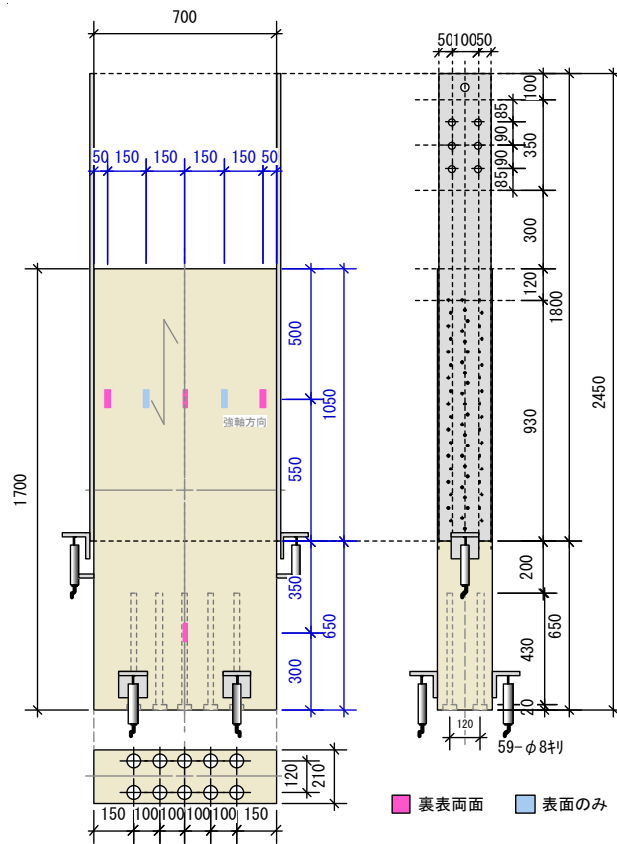
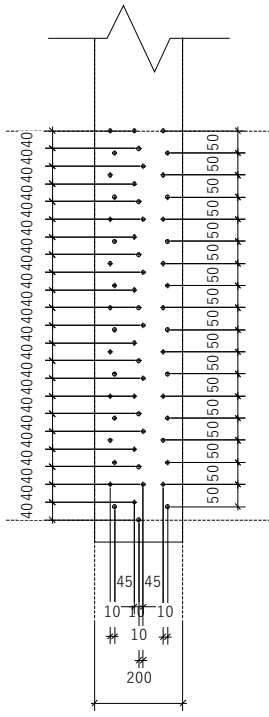


図 1.1 鋼板添え板ビス止め接合部のせん断試験体



ビス配置

表 6.7 せん断を受けるボルトの配置

距離・間隔	加 力 方 向		
	織 維 方 向	織 維 に 直 角 方 向	中 間 角 度
s	$7d$ 以上	$3d$ ($l/d=2$) $3d \sim 5d$ ($2 < l/d < 6$) $5d$ 以上 ($l/d \geq 6$)	角度に応じて織維方向と織維に直角方向の値の中間値をとる
r	$3d$ 以上	$4d$ 以上	
e_1	$7d$ 以上 (荷重負担側) $4d$ 以上 (荷重非負担側)	$7d$ 以上	
e_2	$1.5d$ 以上, $l/d > 6$ のときは $1.5d$ 以上かつ $r/2$ 以上	$4d$ 以上 (荷重負担側) $1.5d$ 以上 (荷重非負担側)	

[注] d : ボルト径
 l : 主材厚

木規準におけるボルト配置 (表 6.7)

図 1.2 鋼板添え板におけるビス配置とボルト配置の規準 (参考)

変位計は CLT-鋼板間のズレ 2 箇所と反力側壁脚の浮き上がり変形 4 箇所を測定した。また面内に生じる引張り力の分布を調べる目的で、図 1.1 に示した位置にひずみゲージを取付けた。

試験体セットアップの概要を図 1.3 に示す。H 鋼で構成された反力フレームにアクチュエータ (最大引張力 1MN、100tonf) を取付け、治具を介して CLT にビス止めされた鋼板をアクチュエータに接続した。加力はアクチュエータを引上げることで、鋼板に打ち込まれたビスにせん断力を与えた。

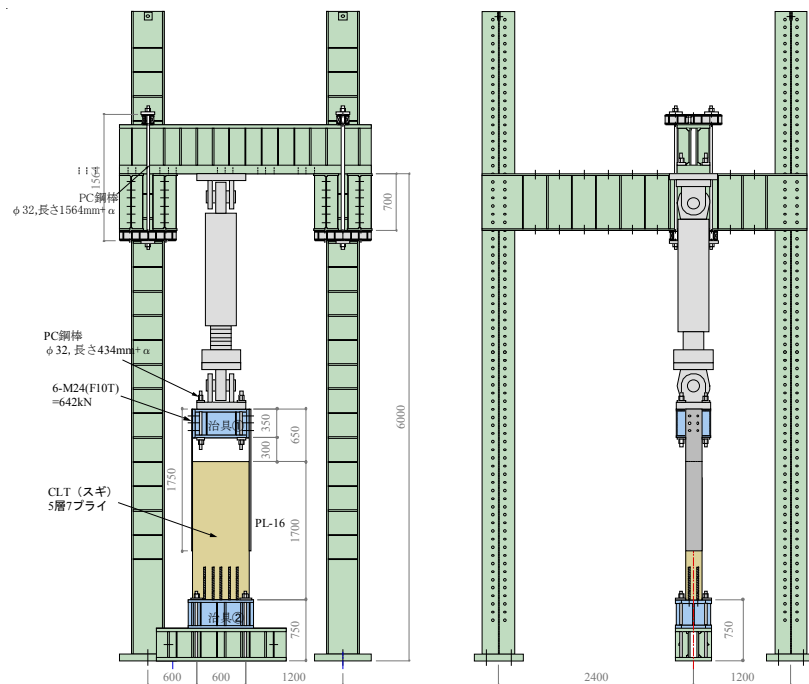


図 1.3 試験体セットアップ

1.3 結果と考察

1.3.1 荷重変位関係と破壊性状

鋼板 1 枚当たりに対する荷重変位関係を図 1.4 に示す。左図 a) は全変位における荷重変位関係であり、右図 b) はそのうち変位 5mm までを取り出したグラフである。

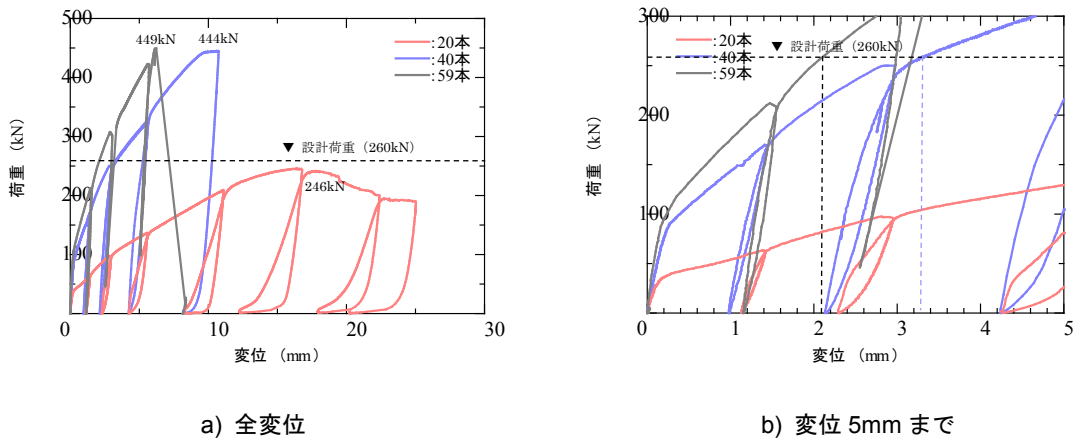


図 1.4 荷重変位関係

ビス本数によって実施した試験の結果が異なる。20 本では、荷重 P が $0.8 \times P_{max}$ になるまで引き切ることができた。40 本ではアクチュエーターの油圧容量の限界により鋼板 1 枚あたり 444kN で試験を中止した。2 次剛性が発揮されてはいるが、最大耐力を迎える前に加力終了とした。59 本では 1 本のアクチュエータに換えて、4 本のジャッキで静的加力する方式に変更した。しかし、引張力が一様にかからなかったためか、図 1.5 のとおり反力側脚部の反力用 LSB で破壊した。そのためおよそ 449kN で加力を終了した。

図 1.4 b) に見られるように、すべての試験体で変形の極めて小さな部分 (0.1mm 程度) で一度降伏しているように見られるが、これはビスの軸力に起因する木材-鋼板間の摩擦の降伏であり、木材や鋼材に永久変形が生じているわけではない。



図 1.5 鋼板の変形と 59 本試験体脚部の破壊性状

1.3.2 各試験体の特性値

各試験体の特性値を表 1.1 に示す。算定方法は CLT マニュアルに準拠した。

終局まで試験を実施した 20 本試験体の特性値は、集成材を用いた参考値 (PX8-110) に比して剛性が低いものの、その他の項目はほぼ同等であった。40 本、59 本ともに最大荷重まで試験を実施できていないため、現行の一般評価法¹⁾によって算出された初期剛性 (0.1-0.4 P_{max} における傾き) は、比較的大きく算出されてしまう結果となった。図 1.6 に評価法におけるバイリニアを示した。40 本、59 本については、試験終了時の荷重を最大耐力として算出しているため、初期剛性を取得する変位が特に小さい領域であることが分かる。

表 1.1 CLT 試験体におけるビス 1 本あたりの特性値

本数	P_{max} kN	P_y kN	δ_y mm	K kN/mm	P_u kN	δ_v mm	δ_u mm
20	12.3	5.44	3.56	1.53	12.8	8.38	22.4
40	11.1	5.51	2.21	2.50	9.8	3.94	10.5
59	7.6	3.86	1.72	2.24	6.5	2.91	6.23
PX8-110 (参考)	11.2	4.99	2.86	2.21	10.5	-	24.35

※集成材を対象として実験された少し短いビスの参考値

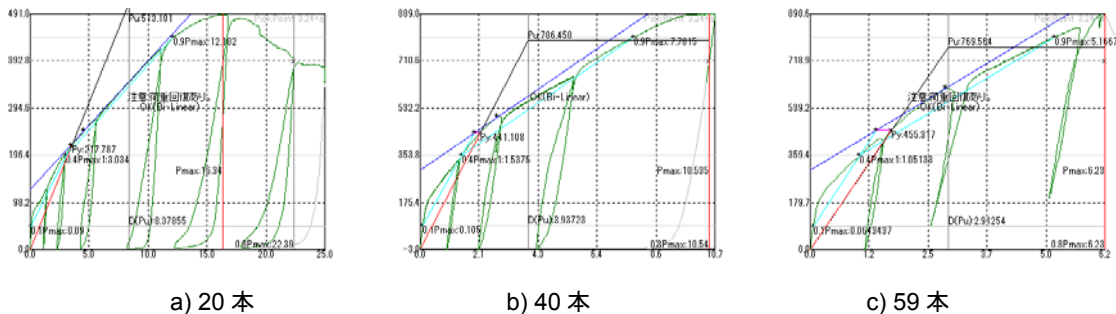


図 1.6 荷重変位関係と特性値

1.4 まとめ

ビス止め鋼板添え板接合部のせん断性能を明らかにするため、引張り型のせん断試験を実施したところ、以下の結果が確認された。

- 1) 20 本試験体から 1 本あたりの特性値を得た。
- 2) 40 本試験体から 20 本試験体よりも高い剛性、降伏耐力が得られた。このことから 20 本試験体のそれらを採用することで安全側であるといえる。
- 3) 59 本の試験体は反力側で破壊した。しかし少なくとも 449kN の最大耐力を有することが確認できた。

参考文献

- 1) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008 年版)、日本住宅・木材技術センター編

2. CLT 耐力壁の面内せん断試験

2.1 はじめに

CLT トラス架構を構成する CLT 耐力壁の面内せん断性能を明らかにするため、CLT 耐力壁の面内せん断試験を実施した。

2.2 試験体と試験方法

試験体には壁長さ 2400mm、壁高さ 3600mm で長手方向を強軸とした 1 枚ものの CLT (Mx60B 5-7、 $t=210\text{mm}$) を用いた。試験体を図 2.1 に示す。壁脚の固定方法は $\phi 25.2\text{mm}$ 、 $L=430\text{mm}$ のインナーボルト式 LSB を用いた仕様とした。インナーボルト式 LSB とは中空に作られた LSB の内部に、M18 ボルト (SNR490B) を挿入し挿入先で中空 LSB と機械的に固定 (スウェージ定着) されている接合金物である。図 2.1 右にその概要を示した。

壁脚部の詳細を図 2.2 に示す。インナーボルト式 LSB を CLT にねじ込み固定する。LSB から突出している M18 ボルトを上側 CT に止め付け、その CT を架台に対して固定された受け側の下側 CT に接続することで CLT を架台に緊結する。LSB とは別にせん断抵抗用の接合金物として CLT の中央部に計 54 本のフルスレッドビス (パネリード X、PX8-140) を架台の下側から打ち込んだ。試験体の組立の様子を図 2.3 に示す。

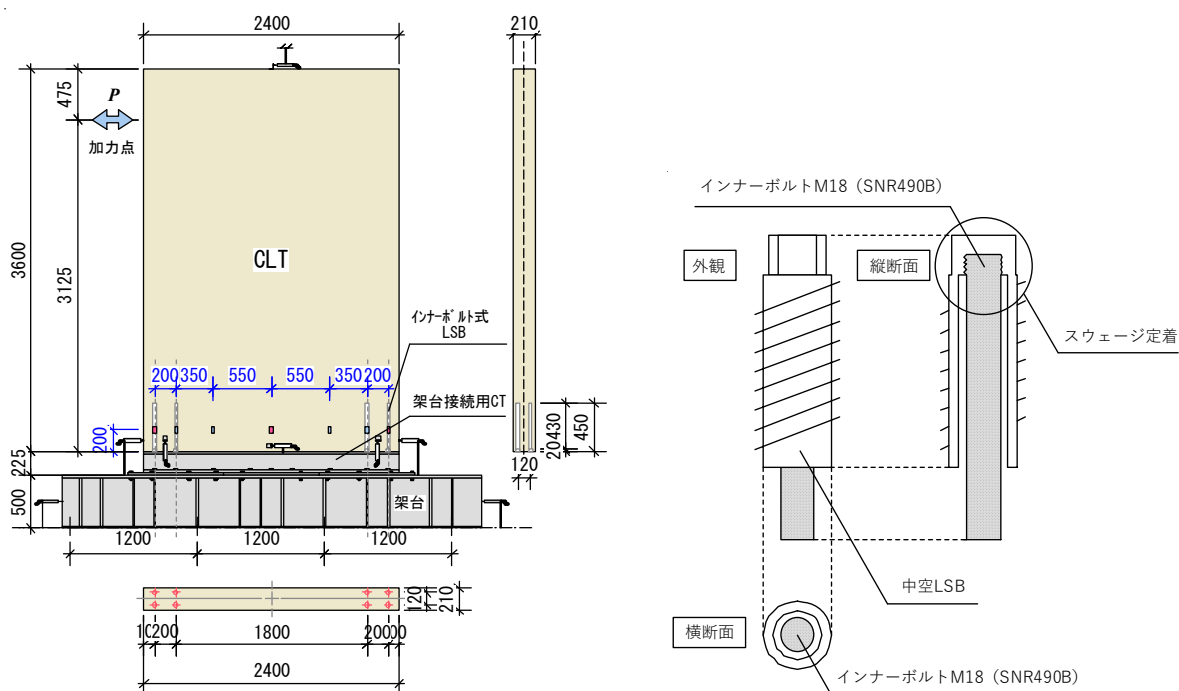


図 2.1 面内せん断試験体 (左) とインナーボルト式 LSB の概要 (右)

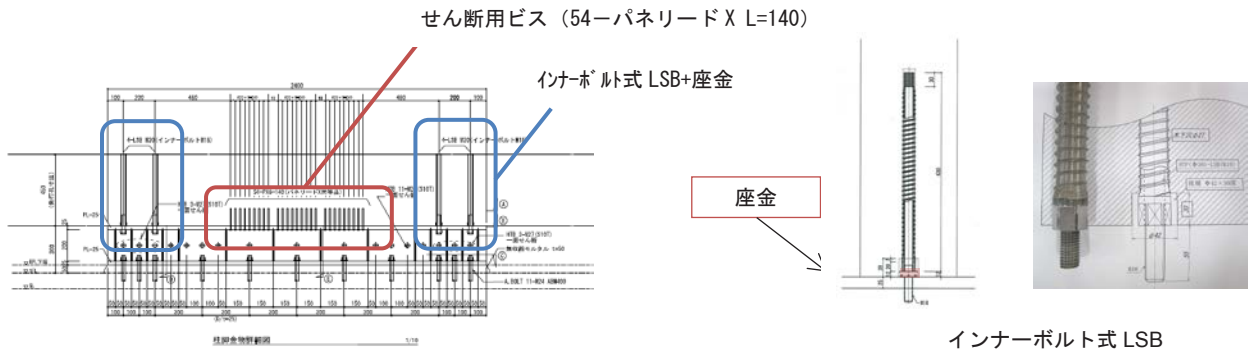


図 2.2 脚部の仕様



①CLTに上部 CT を取付ける ②架台に下部 CT を取付ける ③壁を載せる ④石膏で調整する

図 2.3 試験体の製作プロセス

図 2.3 に示したように、上部 CT を CLT の木口にビスで止め付け、架台上に固定された下部 CT に対して CLT 耐力壁を鉛直にして載せ、上部 CT と下部 CT のウェブ部に互いの位置が合うように空けられたボルト孔を利用して HTB で摩擦接合する。耐力壁の面外方向への倒れ角度は CT の作成精度で決まってしまうため、下部 CT と架台との間に石膏を流し込むことで CLT 耐力壁の面外方向の倒れを修正した。

試験体セットアップ時の写真を図 2.4 に示す。加力点は CLT の上端から 475mm 下の両側面とした。加力点にふたつの引張り用治具を配し、CLT をはさんで反対側のアクチュエーターにそれぞれボルト止めし、PC 鋼棒を取付けて引張ることで加力する。加力方法は正負交番 3 回繰返しとし、スケジュールは 1/600、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50rad とした。荷重が低下して最大耐力の 80%を下回るか 1/10 程度まで引切るまで加力した。試験体数は 1 体とした。変位計取り付け位置の概要は図 2.1 に併記して示した。

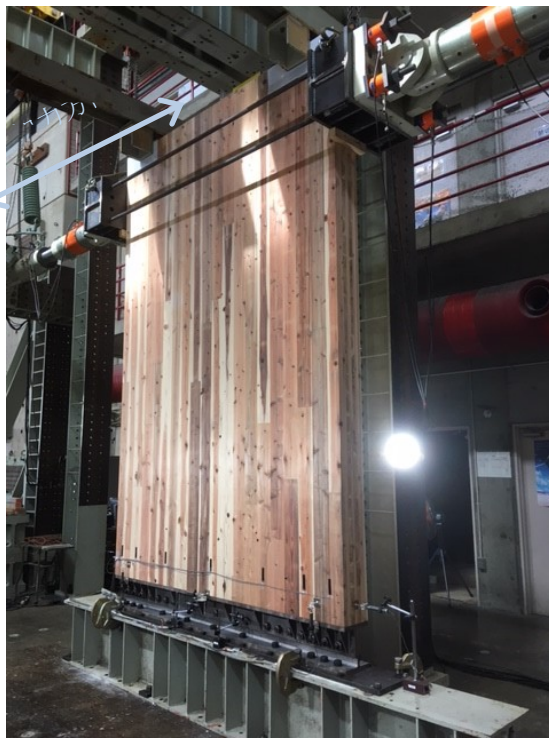


図 2.4 試験体セットアップ

2.3 結果と考察

2.3.1 荷重変位関係と破壊性状

得られた荷重変位関係を図 2.5 に示す。面内せん断試験においてすべての試験体はロッキング変形が主要な変形であり、次いで、CLT と上部 CT との間でのせん断ズレが大きい変形であった。一見 CLT はほぼ剛体回転をしている様子であったが、測定結果をみると CLT 自体の面内でのせん断変形も生じていた。弾性変形の主な挙動は、次のとおりである。

①CLT が回転して脚部圧縮側で CLT 木口のめり込みが生じ、引張側でインナーボルト式 LSB のせん断ズレとインナーボルトの伸びが生じていた。

②CLT と架台とのせん断ズレ

③CLT 版自体のせん断変形

荷重変位関係はインナーボルトの伸びに起因する完全スリップ型となり、降伏のあと耐力を保ちながら大きく変形した。破壊写真を図 6 に示す。最終的な破壊は LSB と CLT との界面でのせん断破壊であり、引張側で CLT の表層ラミナの幅つぎ位置で割裂破壊が生じた。

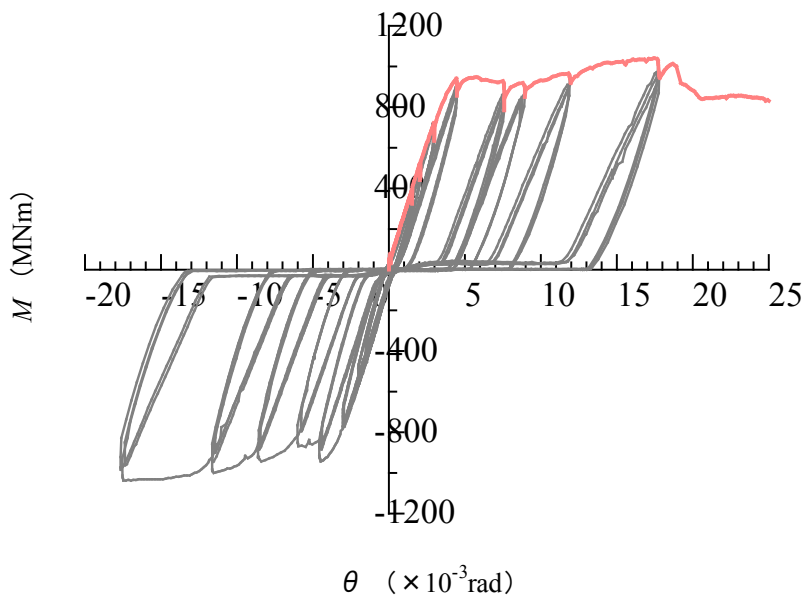


図 2.5 荷重変位関係 (赤は包絡線)



①せん断変位測定

②インナーボルトの伸び

③引張側割裂

④インナーボルトと座金

図 2.6 破壊性状

2.3.2 力学モデル

CLT 耐力壁について、図 2.7 のとおり力学モデルを作成した。同モデルは CLT を弾性体とし平面保持仮定が成り立つことを前提として構成している。モーメントと変形とのつり合いから、縁から回転中心までの距離 λ (mm) と回転剛性 K_{θ} (kNm/rad) について、以下のとおり求めることができる。

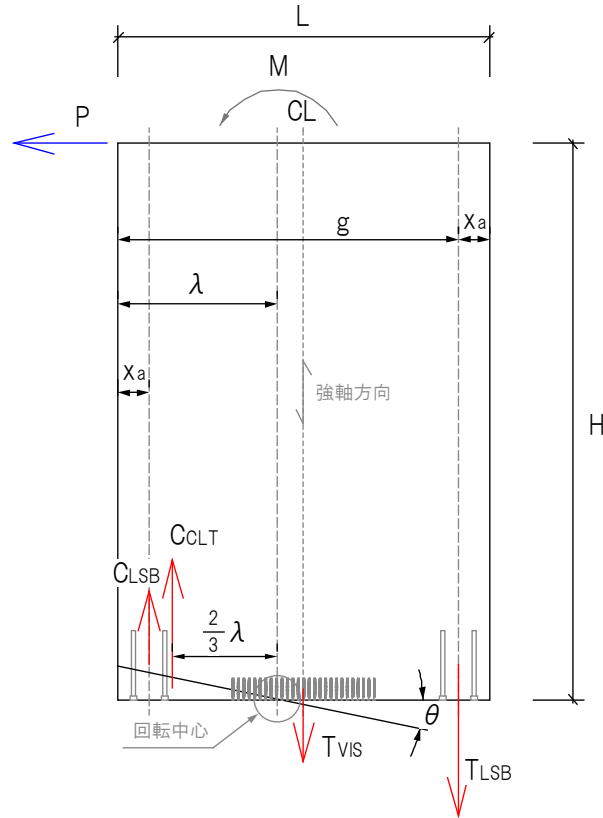


図 2.7 CLT 耐力壁の力学モデル

2.3.2.1 回転剛性 K_{θ} とせん断剛性 K_s からなる剛性 K_{ALL}

引張り側で LSB にかかる引張力 T_{LSB} (kN) とビスにかかる引張力 T_{VIS} (kN) からなる引張り合力 T (kN) は、次式で表せる。

$$\begin{aligned} \sum T &= T_{LSB} + T_{VIS} = \delta_{LSB} \cdot K + \delta_{VIS} \cdot K_{VIS} \\ &= (g - \lambda) \cdot \theta \cdot \left(\frac{1}{K_{LSB}} + \frac{1}{K_{M18}} \right) + \left\{ \frac{(g + x_a)}{2} - \lambda \right\} \cdot \theta \cdot K_{VIS} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで、 δ_{LSB} : LSB の変形量 (mm)、 δ_{VIS} : ビスの変形量 (mm)、 K : LSB 全体の引張剛性 (kN/mm)、 K_{LSB} : LSB と CLT 間のせん断ずれ剛性 (kN/mm)、 K_{M18} : インナーボルトの引張剛性 (kN/mm)、 K_{VIS} : ビスの引張剛性 (kN/mm)、 g : 縁から力線 T_{LSB} までの距離 (mm)、 λ : 縁から回転中心までの距離 (mm)、

θ : 変形角 (rad)、 x_a : 力線 T_{LSB} から反対側の縁までの距離 (mm) である。

圧縮力側の CLT の支圧反力 C_{CLT} (kN) と LSB の圧縮時のせん断抵抗力 C_{LSB} (kN) からなる圧縮合力 ΣN (kN) は、次式で表せる。

$$\Sigma N = C_{CLT} + C_{LSB} = \frac{b \cdot c \cdot k_0 \cdot \lambda^2}{2} \theta + K_{LSB} \cdot (\lambda - x_a) \cdot \theta \quad \dots (2)$$

ここで、 b : CLT の厚さ (mm)、 $c k_0$: CLT の支圧剛性 (kN/mm³) である。

回転剛性 K_θ (kNm/rad) はモーメントの総和を変形角で除し、次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} K_\theta &= \frac{\Sigma M}{\theta} \\ &= \frac{C_{CLT} \left(g - \frac{\lambda}{3} \right) + C_{LSB} (g - x_a) - T_{VIS} \left\{ \left(\frac{g + x_a}{2} \right) - x_a \right\}}{\theta} \\ &= \frac{b \cdot c \cdot k_0 \cdot \lambda^2}{2} \left(g - \frac{\lambda}{3} \right) + K_{LSB} \cdot (\lambda - x_a) (g - x_a) - K_{VIS} \cdot \left(\frac{g + x_a}{2} - x_a \right) \left(\frac{g + x_a}{2} - \lambda \right) \end{aligned} \quad \dots (3)$$

次に、縁から回転中心まで距離 λ を求める。 $\Sigma T = \Sigma N$ より、

$$\frac{b \cdot c \cdot k_0}{2} \cdot \lambda^2 + (K_{LSB} + K + K_{VIS}) \cdot \lambda - \left\{ K_{LSB} \cdot x_a + K \cdot g + K_{VIS} \frac{(g + x_a)}{2} \right\} = 0 \quad \dots (4)$$

(4) 式の λ に関する二次方程式を解くとき、計算の便宜上、複素数の取扱いをしないように各項を以下のおくくと、回転中心までの距離 λ を (5) 式のように得る。

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 2a = b \cdot c \cdot k_0 \\ B = b = K_{LSB} + K + K_{VIS} \\ C = -2c = 2 \left\{ K_{LSB} \cdot x_a + K \cdot g + K_{VIS} \frac{(g + x_a)}{2} \right\} \end{array} \right.$$

$$\lambda = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + AC}}{A} \quad \dots (5)$$

(5) 式から求めた回転中心までの距離 λ を、(3) 式に代入することで回転剛性 K_θ を求めることができる。

一方、実験により CLT 版のせん断変形が無視できないほど大きいことが確認されたことから、ここでは回転剛性に加えて、CLT 版のせん断剛性を考慮する。CLT 版のせん断剛性 K_s (kNm/ rad) は次式のとおり求められる。

$$K_s = \frac{\sum M}{\theta} = G \cdot A \cdot t \quad \dots (6)$$

ここで、 G : せん断弾性係数 (kN/mm²)、 A : CLT 耐力壁の見付け面積 (mm²)、 t : CLT の厚さ (mm) である。

(3) 式と (6) 式からそれぞれ得た回転剛性 K_θ およびせん断剛性 K_s を直列バネとして、全体の剛性 K_{ALL} (kNm/ rad) を次式のとおり得る。

$$K_{ALL} = \frac{K_\theta \cdot K_s}{K_\theta + K_s} \quad \dots (7)$$

2.3.2.2 降伏モーメント M_y

CLT 耐力壁の降伏モーメント M_y は、①圧縮側 CLT の三角形変位圧縮による降伏、②引張り側インナーボルト式 LSB のインナーボルトの降伏が決定すると考えられる。圧縮側のインナーボルト式 LSB の LSB-CLT 間のせん断抵抗による降伏も生じうるが、CLT の圧縮反力と並列して生じており、計算による耐力比でおよそ 1/8 倍であるため、ここでは無視できる現象として取扱うこととした。

① CLT の圧縮降伏

CLT の圧縮側縁応力度が短期許容圧縮応力度 f_c に達するときの θ を θ_y とすると、次式で計算できる。

$${}_c k_0 \cdot \theta_{yc} \cdot \lambda = f_c \cdot t$$

より、 $\theta_{yc} = \frac{f_c \cdot t}{{}_c k_0 \cdot \lambda}$. . . (8)

ここで、 θ_{yc} : 圧縮降伏時の変形角 (rad)、 f_c : 短期許容圧縮応力度 (kN/mm²) である。

また (6) 式で求めた降伏変形角と、(3) で求めた剛性を乗じて、圧縮側の降伏モーメント M_{yc} は以下のとおり求められる。

$$M_{yc} = K_\theta \cdot \theta_{yc} \quad \dots (9)$$

② インナーボルトの引張り降伏

インナーボルトは M18 で SNR490 材であることから、引張り降伏耐力 T_y は次式で求められる。

$$T_y = A_t \cdot F_{yt} \quad \dots (10)$$

ここで、 A_t : ボルトの有効断面積 (mm²)、 F_{yt} : ボルト鋼材の降伏応力度 (kN/mm²) である。

これより引張り側の降伏モーメント M_{yt} は、次式となる。

$$M_{yt} = T_y \cdot (g - \lambda) \quad \dots (11)$$

① と②から CLT 耐力壁の降伏モーメント M_y は次式で与えられる。

$$M_y = \min(M_{yc}, M_{yt}) \quad \dots (12)$$

2.3.2.3 終局モーメント M_u

CLT 耐力壁の終局モーメント M_u は、①圧縮側 CLT の等変位圧縮による終局耐力、②引張り側インナーボルト式 LSB のインナーボルトの終局耐力が決定すると考えられる。

① CLT の圧縮破壊

CLT 設計マニュアル¹⁾に基づき、CLT の圧縮力 C_{CLT} が基準強度 F_c に達するときに塑性化するものとし、次式で計算する。

$$C_u = 0.85^2 \times F_c \cdot t \cdot \lambda \quad \dots (13)$$

ここで、圧縮側の終局モーメント M_{uc} は以下のとおり求められる。

$$M_{uc} = C_u \cdot \left(\frac{0.85}{2} + 0.15 \right) \cdot \lambda \quad \dots (14)$$

② インナーボルトの引張り破壊

インナーボルトの引張り破壊耐力 T_u は次式で求められる。

$$T_u = A_t \cdot F_{ut} \quad \dots (15)$$

ここで、 A_t : ボルトの有効断面積、 F_{ut} : ボルト鋼材の引張り強度。

これより引張り側の降伏モーメント M_{ut} は、次式となる。

$$M_{ut} = T_u \cdot (g - \lambda) \quad \dots (16)$$

① と②から CLT 耐力壁の降伏モーメント M_u は次式で与えられる。

$$M_u = \min(M_{uc}, M_{ut}) \quad \dots (17)$$

2.3.3 実験値と計算値の比較

前項 3.2 の力学モデルに基づいて CLT 耐力壁の面内せん断剛性と耐力を計算した。実験による荷重変位関係と比較したグラフを図 2.8 に示す。また計算と実験から得た特性値を表 2.1 に示す。

図中赤線は、ボルトの降伏耐力および強度を公称値（降伏耐力は SNR490B の下限値とした。）から求めたものであり、青線は別途実施したインナーボルト式 LSB の引張り試験から求めたボルトの性能値を用いた結果である。両者とも、第 1 折れ点は M18 ボルトの降伏耐力、第 2 折れ点はボルトの降伏耐力にビスの引抜き時の終局耐力を加算した耐力（ここでは 54 本のうち 2/3 の 36 本が 1.5mm 変形時の耐力を発揮していると仮定した。）、最終点はボルトの引張り強度である。実験によるボルト性能は LSB 外側ネジ部と CLT とのせん断降伏が含まれており、また正負交番繰返し加力を行ったため、公称値よりも小さくなっている。

計算で求めた剛性は実験値とよく一致した。第 2 折れ点、終局耐力についても傾向はほぼ一致している。これらのことから、提案した力学モデルは CLT の面内せん断実験における各抵抗要素の変形を比較的正確に表しており、耐力壁のせん断抵抗機構をよく説明できているといえる。

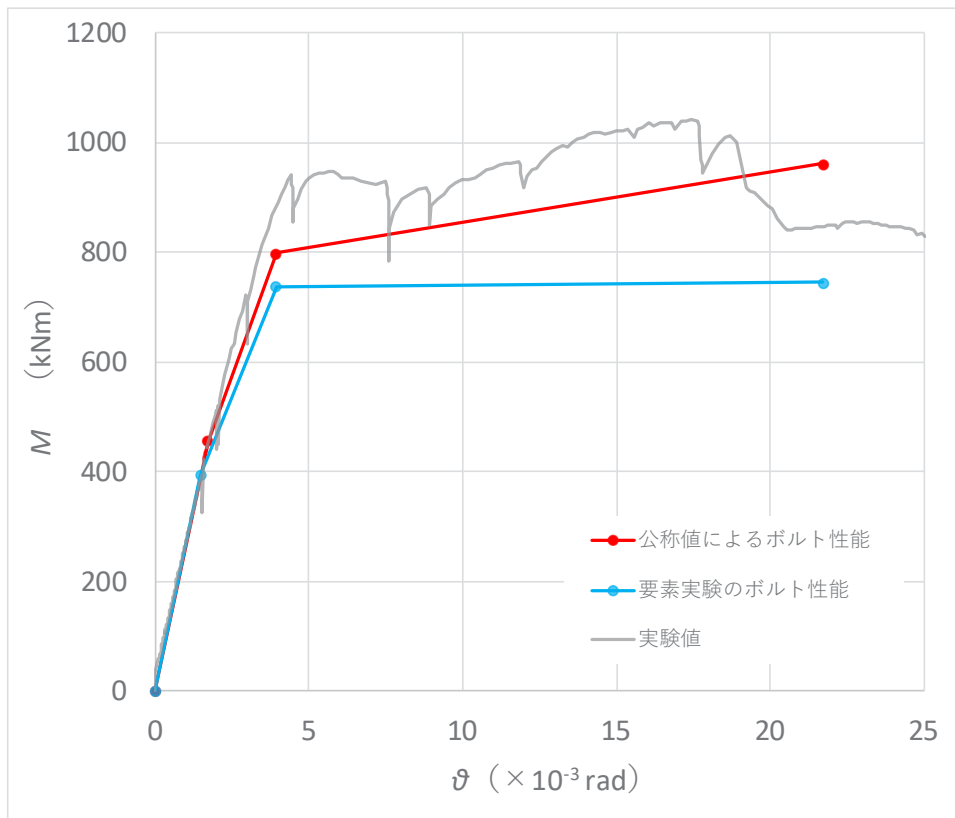


図 2.8 実験値（試験体③包絡線）と計算値の比較

表 2.1 実験値と計算値の比較

	K_{θ} kNm/10 ⁻³ rad	M_y kNm	θ_y 10 ⁻³ rad	M_u kNm	M_{max} kNm
実験値	251	623	2.48	933	1041
計算値（公称値）	265	457	1.72	961	961
計算値（実験値）	265	395	1.49	746	746

計算に用いた各パラメータは表 2.2 の通りであった。

表 2.2 計算に用いた特性値と計算結果

要素	特性値	単位	数値	備考
CLT	b, t	mm	210	
	g		2200	
	X_a		200	
	cK_0	kN/mm ³	2.06×10^{-3}	木標準の平井・小松式に基づく
	G	kN/mm ²	0.611	実験値
	A	mm ²	6250×10^3	
LSB	K	kN/mm	132.1	イナボルト式 LSB4 本分の全体剛性（実験値、公称値） K_{LSB} と K_{M18} の直列バネ
	K_{LSB}		188.4	LSB-CLT 間のせん断ずれ剛性（実験値）
	K_{M18}		441.9	イナボルトの伸び剛性（実験値、公称値）
ビス	K_{VIS}	kN/mm	459.6	ビス 54 本×2/3 分の引抜き剛性 (1 本あたりの実験値に基づく)
計算結果	K_{θ}	kNm/×10 ⁻³ rad	396.0	
	K_S		801.9	
	K_{ALL}		265.1	K_{θ} と K_S の直列バネ

2.4 まとめ

CLT トラス架構を構成する CLT 耐力壁の面内せん断試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) CLT 耐力壁の面内せん断性能に関する特性値を得た。
- 2) 耐力壁各部の破壊性状を確認した。
- 3) 力学モデルを提案し、計算値と実験値を比較してその妥当性を検証した。

3. インナーボルト式 LSB の引張り試験

3.1 はじめに

CLT 耐力壁の主な壁脚接合部である、インナーボルト式 LSB の引張性能を明らかにするため、引張試験を実施した。引張抵抗接合具の場合、試験方法として一方向繰返し加力が一般的ではあるが、LSB の場合は圧縮時の抵抗を期待するため、ここでは正負交番繰返し加力により引張・圧縮の両加力を順次行った。

3.2 試験体と試験方法

インナーボルト式 LSB の引張試験体の概要と写真を図 3.1 に示す。CLT (Mx60B 5-7、 $t=210\text{mm}$) のサイズは $300\times 1000\text{mm}$ とし、CLT の長手方向に平行になるように、CLT の木口面からインナーボルト式 LSB (LSB 部長さ 457mm 、M18 インナーボルト長さ 524mm) を厚さ方向に並べて 2 本打ち込んだ。打ち込み先のラミナは、CLT 耐力壁の面内せん断試験と同様に、最外層から 2 層目とした。また反力側には $L=450\text{mm}$ 、 $\phi 19\text{mm}$ の LSB を 4 本打ち込み、M14 ボルトで加力用架台に取り付けた。インナーボルト式 LSB と反力側 LSB を概要を図 3.2 に示す。

加力は正負交番繰返し加力とし、引張側（正側）の繰返しスケジュールは CLT マニュアルの方法に準拠し、予備試験にてあらかじめ求めた δy の $1/2$ 、 1 、 2 、 4 、 6 、 8 、 12 、 16 倍の順で 1 回ずつ繰り返した。圧縮側（負側）の繰返しスケジュールは CLT 耐力壁実験から得た結果を基に、引張側荷重の $1/3$ がかかるまでとした。試験体数は計 3 体であった。

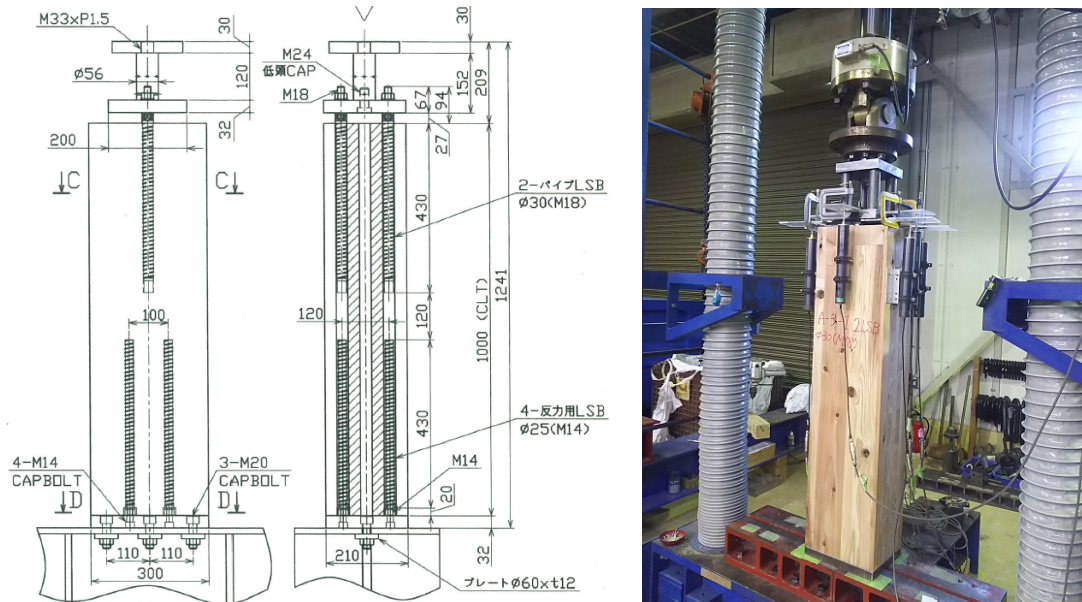


図 3.1 インナーボルト式 LSB の引張試験体

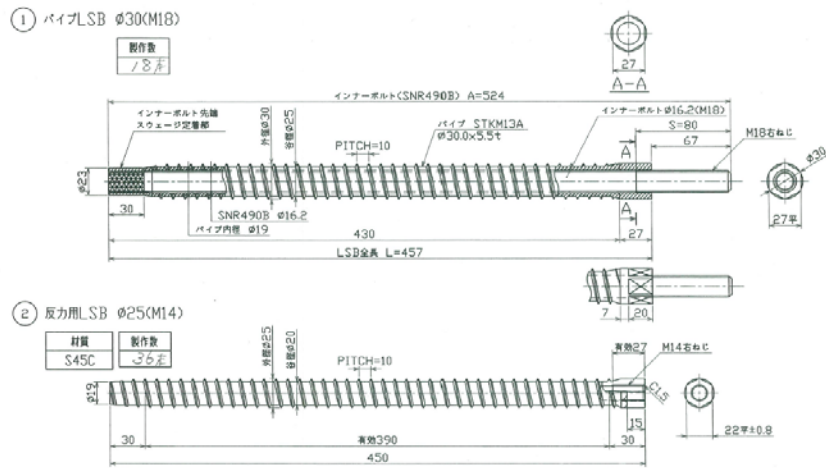


図 3.2 インナーボルト式 LSB (上) と反力側の一般的な LSB (下)

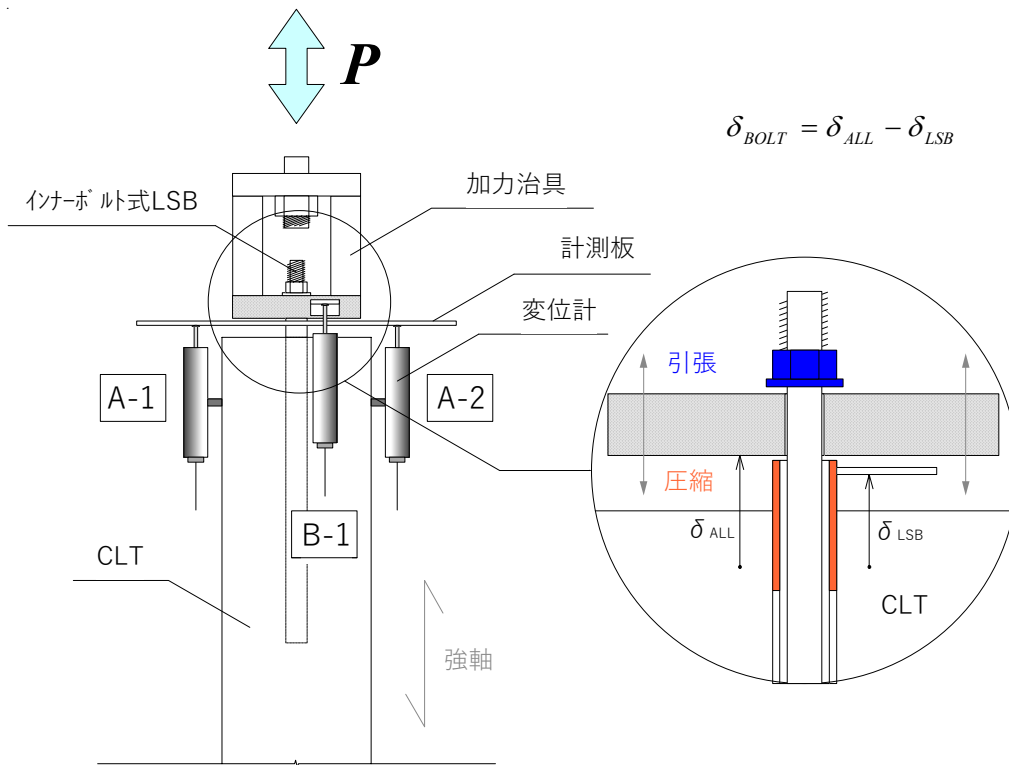


図 3.3 変位計の取付け位置

図 3.3 に変位計取付け位置を示した。CLT-LSB 間のズレを測定する変形計を LSB2 本あたり 4 本 (例: 図中の変位計 A-1、A-2) と、CLT-引張治具間の伸びを測定する変位計 (例: 図中の変位計 B-1) を東西南北で 4 本の変形計を設置した。拡大図に示したように、網掛けで示された加力治具により引張加力される場合、インナーボルトに取り付けられたナットを介してインナーボルトおよび中空の LSB に引張応力が生じる。反対に圧縮加力される場合、加力治具が中空 LSB の端部に接触して LSB のみに圧縮応力が生ずる。

変位計 A により CLT-LSB 間のせん断ズレ δ_{LSB} が測定される。変位計 B により CLT-治具間の変形 δ_{all} が測定される。引張加力される場合、CLT-治具間の伸び δ_{all} から、CLT-LSB 間のせん断ズレ δ_{LSB} を差し引くことで、インナーボルトの伸び δ_{BOLT} が算出できる。圧縮加力の場合は、 δ_{all} と δ_{LSB} の変形量はほぼ同値となる。

3.3 結果と考察

3.3.1 荷重変位関係

荷重と CLT-治具間の伸び δ_{all} の関係および荷重と CLT-LSB 間のズレ δ_{LSB} の関係を図 3.4 と図 3.5 にそれぞれ示す。インナーボルト式 LSB の全体の伸び変形 δ_{all} が 30mm のとき、木材-LSB 間のせん断ズレ δ_{LSB} は 1.0~2.0mm 程度であり、インナーボルト式 LSB の主要な変形はインナーボルトの伸びであることが確認された。また全体の荷重変位関係から、鋼材に特有の明瞭な降伏が認められることからインナーボルトの降伏が LSB 全体の降伏を決定していると考えられる。

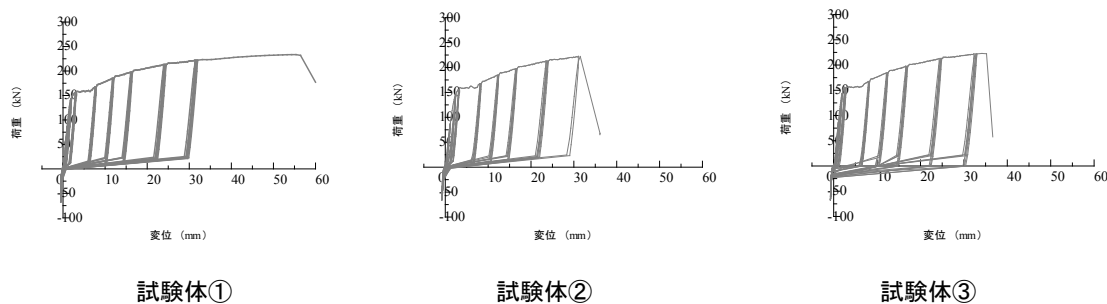


図 3.4 荷重と変位 δ_{all} の関係

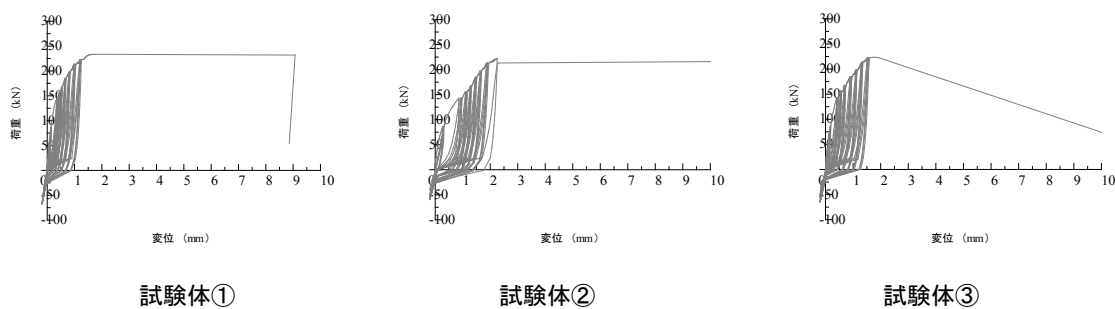


図 3.5 荷重と変位 δ_{LSB} の関係

3.3.2 破壊性状

主な破壊性状を図 3.6 に示す。いずれの試験体も CLT の木口に連絡する割裂破壊が生じ CLT 側で破壊することを確認した。直交層があることと、平行層であってもラミナ同士が幅はぎ接着されていないため、集成材と異なる破壊性状となると考えられる。ボルトの破断で破壊させるためには、LSB の打込み長さを増やすことが必要であろう。



試験体①、②



試験体③



予備試験体



引抜けた LSB (予備試験体)

図 3.6 破壊性状

3.3.3 特性値

引張側（正側）の包絡線から得られた特性値を表 3.1 に示す。剛性はばらついたが、その他の特性値はほぼ同等であった。

3.4 まとめ

インナーボルト式 LSB の引張性能を明らかにするために引張試験を実施したところ、以下の結果が得られた。

- 1) インナーボルト式 LSB の主要な変形成分は、インナーボルトの伸びであった。
- 2) 破壊性状としては CLT の割裂破壊であった。CLT を対象とした場合、集成材の場合に比べて LSB の打ち込み長さをより長く取る必要があると考えられる。
- 3) 引張側（正側）包絡線から、インナーボルト式 LSB の引張特性値を得た。

表 3.1 正側包絡線から得られた特性値

	K	Py	δy	Pu	Pmax
	kN/mm	kN	mm	kN	kN
①	70.2	147	2.10	194	220
②	57.4	150	2.61	195	221
③	70.5	152	2.15	192	219
平均	66.0	150	2.3	193	220
標準偏差	7.5	2	0.3	1	1

4. モックアップ施工実験

4.1 はじめに

CLT トラス架構は展開構造として組み上げることができる。3枚の CLT の長手方向の端部をピン接合としてつなぎ1フレームを構成する。このフレームを数フレーム分、桁行方向に並べて、中央の CLT を吊り上げるか、左右2枚の CLT を引寄せせるかして、左右の CLT を鉛直に立ち上げる施工方法であり、これにより高速に架構を形成することができる。

4.2 実験方法

本施工実験では実際の建物の1/2スケールで、6フレーム分のトラス架構を、前述の方法で立上げて施工した。吊上げは施工時の安全のために補助的に行い、基本的には左右の CLT を互いに引寄せせることでトラス架構を立ち上げた。建て方施工時の写真を図4.1に示す。

4.3 まとめ

CLT トラス架構のモックアップ施工実験により、以下の点が確認された。

- ・フレーム同士を頭頂部で繋ぐ金物が、施工時のずれを抑える重要な役割を果たす。
- ・フレーム間のクリアランスが必要である。



図 4.1 CLT トラス架構のモックアップ施工プロセス

5. コスト・音響性能の比較

5.1 坪単価

今回木造で計画している実験棟の見積り単価は、諸経費含んで概算で 265 万円/坪となっている。これを鉄骨造で置き換えた場合、およそ 100 万円/坪程度と試算された。鉄骨造で同じ架構が作れるわけではなく、作品性などを含め単純に比較することは難しいが、価格差は小さくない。

5.2 音響性能

Rr-50 を達成するための外壁仕様について各構造で比較する。比較対象とした仕様を表 5.1 に示した。また、1/1 オクターブバンド中心周波数に対する音響等価損失のグラフを図 5.1 に示した。このうち②の乾式壁とは鉄骨造における ALC 壁を想定している。

この結果から、t150mm の RC 壁と同等の音響性能を得るのに、鉄骨造であれば空気層含め合計厚さ 189mm が必要であり、CLT を用いた木造であれば合計厚さ 232mm が必要となることが確認できた。

表 3.1 正側包絡線から得られた特性値

	部材構成	総厚	出典
①RC壁	RCt150	150	日本建築学会設計計画パンフレット
②乾式壁	ALCt75+空気層101.5(内部RWt55充填)+石膏ボード t 12.5	189	ニチアス技術時報No.324 (2001.2)
③木造壁	CLTt150+空気層60(内部GWt50充填)+石膏ボード12.5+9.5	232	日本CLT協会技術報告会2016資料

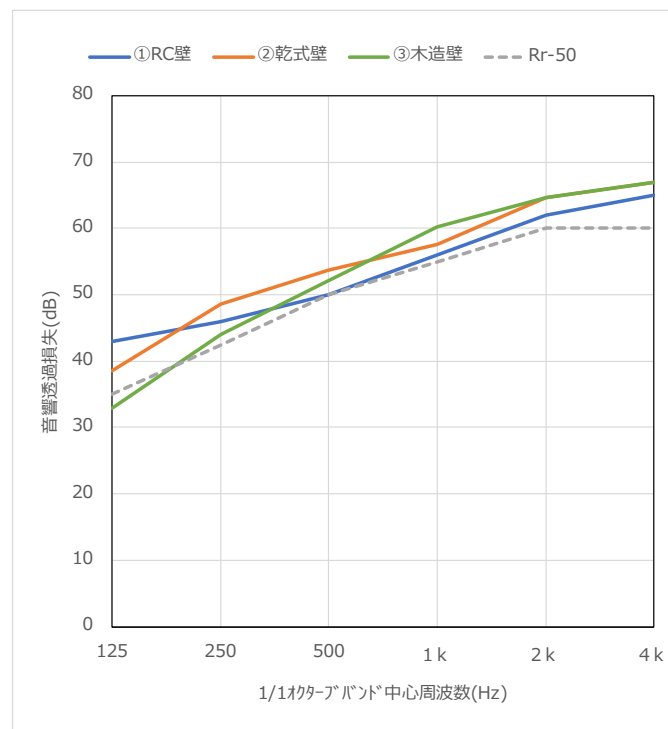


図 5.1 各構造仕様で比較した音響等価損失