

2.9 大成建設（株）技術センター

1. 建築物の仕様一覧

事業名		実験施設の新築工事		
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		研究所（事務室）	
	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）		9.05	
	軒高（m）		9.00	
	敷地面積（㎡）		34,821	
	建築面積（㎡）		418	
	延べ面積（㎡）		487	
階別面積	1階		418	
	2階		68	
	3階			
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、屋根	
	CLT使用量（m ³ ）		約200	
	壁パネル	寸法		約2.4×9.0
		ラミナ構成		B種構成
		強度区分		Mx60-5-7
		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		約2.4×9.0
		ラミナ構成		B種構成
強度区分		Mx60-5-7		
樹種		スギ		
仕上	主な外部仕上	屋根		
		外壁		
		開口部		
	主な内部仕上	界壁		
		間仕切り壁		
		床		
		天井		
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、GIR（LSB）等	
	最大スパン		約10m	
	問題点・課題とその解決策		門型のCLT面トラス架構により構造安全性を確保する。スパン方向のせん断力を基礎に伝えるため、CLTの面外方向のせん断性能が必要で変形性能の高いせん断接合具が望まれる。	
防火	防火上の地域区分		その他地域	
	耐火建築物等の要件		無し	
	本建築物の防耐火仕様		無し	
	問題点・課題とその解決策		4号建築物とし、法的制約を減らした。	
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		CLT同士の接合部にさね加工等を施す	
	建て方における課題と解決策		吊り上げ施工を実現するため、建て方実験を実施する	
	劣化対策		防水処理、防霉防蟻処理を実施する	
工程	設計期間		H28年4月～	
	施工期間			
	CLT躯体施工期間			
体制	竣工（予定）年月日		H31年春（予定）	
	発注者		大成建設株式会社 技術センター	
	設計者（複数の場合はそれぞれ役割を記載）		大成建設株式会社 設計本部建築設計第1部	
	構造設計者		大成建設株式会社 設計本部構造設計第2部	
	施工者			
	CLT供給者			
ラミナ供給者				

事業名： 実験施設新築工事の建築設計実証

実施者または担当者：大成建設株式会社 技術センター（担当者：相馬智明）

1. 実証した建築物の概要

用途	研究所（事務室）			
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）	9.05	軒高（m）	9.00	
敷地面積（㎡）	34,821	建築面積（㎡）	418	
階別面積	1階	418.8	延べ面積（㎡）	486.7
	2階	67.9		
	3階	—		
CLT採用部位	壁、屋根			
CLT使用量（m ³ ）	約200			
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	H28.4月～H29.3月			
施工期間	—			
CLT躯体施工期間	—			
竣工（予定）年月日	H31.春（予定）			

2. 本事業における実証内容

本事業で建築予定の木造施設は構造躯体にCLTパネルを使用するため、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。そこで本事業では、構造計画を進める中で、部材間接合部の仕様（基本性能）を検討し、それらの構造特性値を求めるためにCLTパネル同士の接合部の引張り試験、せん断試験等を行った。建築物の特徴は、展開構造を実現するCLTパネルによるトラス架構を構成することである。今回検証した具体的な内容は、以下のとおりである。

- 1) 省人施工を実現するCLTパネルによる面トラス架構の建築計画
- 2) CLTパネル接合部の基本性能の把握

3. 実施体制

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、御所園武、
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	株式会社ストローク、SFSintec、株式会社スクリムテックジャパン	
試験実施	大成有楽不動産株式会社	

4. 実証方法と実施工程

本実証事業では、木造施設の建築のうち、建築計画（設計）と性能検証実験が対象となっており、ここではそれらの実証方法について示す。

1) 省人化を実現する CLT 展開構造（CLT パネルによる面トラス架構）の建築計画

建築計画の対象は、実験設備を内包する建屋の構造に CLT を用いた木造空間である。計画スパンは 10m、高さは 9m のため、スパン方向の架構を CLT パネル 1 枚で構成することができる。また、面積を 500m²以下、高さも大規模木造とならない、軒高 9m 以下かつ、高さ 13m 以下に抑えた。構造計画上のコンセプトは次の 2 点とした。

- ・ CLT パネルの大型化と歩留まりの向上を目指し、製作可能かつトラックでの搬入可能とした、2.4×9.0m の長方形の CLT パネルを利用する。
- ・ 高所作業および仮設を少なくする省力施工の実現を目指した展開構造とする。具体的には、奥行き方向に連なる門型ユニット間でトラスを形成する CLT パネル面トラス架構を想定する。

CLT 面トラス架構のフレーム解析モデルを作成した。CLT パネルを軸部材に置換し、その軸剛性、せん断剛性、曲げ剛性は、国交省告示 1024 号に定められている値となるように設定した。接合部は汎用リンク要素、ブレース材は接合部の剛性を加味した等価剛性になるように設定値を調整した。解析モデルから応力と変形の知見を得るとともに、以下のことが確認できた。

- ・ 面トラス架構は門型フレームを構成するため、ブレース材には長期で圧縮が生じる。
- ・ 桁方向の両端部の CLT パネルには片側に接合部が存在しないため、たわみが生じ CLT パネルがねじれる。そのため、端部にはそれを抑制する補強を行う必要がある。
- ・ スパン方向には壁などの耐力要素（構面）がないため、直交壁になる CLT パネルに面外のせん断抵抗を期待する必要がある。

2) CLT パネル接合部の性能検証実験

本実証事業で行った接合部の性能検証実験では、CLT を 90 度に接合する接合部に限って実験対象とし、CLT 接合部に関する基礎的なデータを収集することとした。接合部は意匠性の確保と燃えしろ設計対応の目的から、接合具が外から見えない、あるいは見えにくい接合方式とした。

試験体は引張抵抗用とせん断抵抗用の 2 種類の接合部を用意した。また、せん断抵抗用

は面内せん断、面外せん断の 2 種類の加力方向を想定して試験体仕様を決定した。これまで CLT のパネル接合（告示仕様等）で一般的に利用されてきた鋼板添え板式ビス止め接合部（面内のみ）を従来式として対照試験とし、提案する接合部の力学性能に対する、施工性、経済性が、どの程度であるのかを比較した。提案した接合部の試験体例を図 1 に示す。

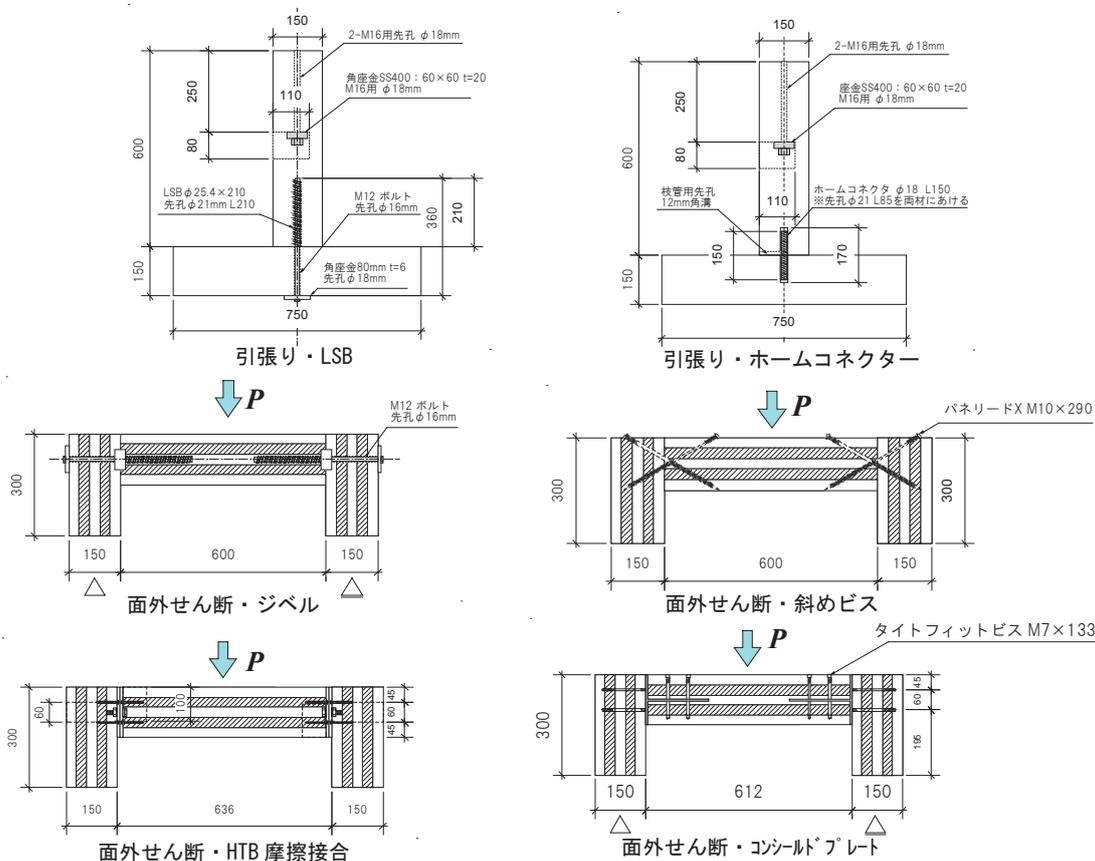


図 1 試験体例

5. 得られた実証データ等の詳細

各試験から得られた特性値のデータ一覧は報告書を参照いただきたい。試験体の組立て、施工、試験を通して、それぞれの接合部の特徴を得た。例えば、斜めビス式の面外方向のせん断試験の場合、面外方向に斜めビスが加力されるとき、ビスの軸方向にせん断力が作用することになるため、トラス効果が働き、ビスの曲げ変形が卓越する面内方向加力に比べて剛性が 6 倍程度高くなることが確認された。

各接合方式について経済性、施工性の目安値を算出した。その結果を図 2 に示す。左側に面外方向の初期剛性と降伏耐力の目安値、右側には面内方向の初期剛性と降伏耐力の目安値を示した。総じて高力ボルト摩擦接合が優れていることが確認できた。

さらに追加実験として、先孔のない鋼板を貫通して打ち抜くタイトフィットビスの 1 本あたりの 2 面せん断性能を確認した。また高力ボルト摩擦接合において、ビスを打つラミナ方向の影響を確認した。

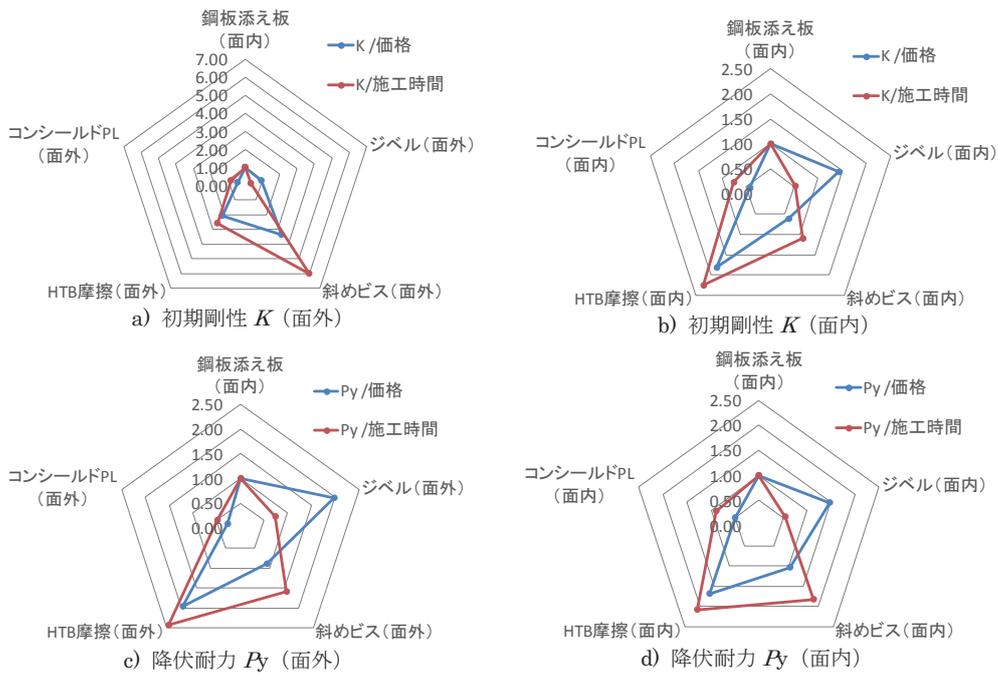


図2 経済性と施工性の評価

6. 本事業の成果

本実証事業のうち、設計（基本設計）と性能検証実験の成果概要について以下に示す。

- CLT パネルを用いた面トラス架構の基本設計ができた。
- 見えがかりに配慮した各種 CLT パネル接合部の基本性能を把握し、各特性値を得ることができた。また経済性、施工性の面からそれぞれを評価することができた。

面トラス架構の実現性の検討と CLT 接合部に関する基礎的な資料となったが、それぞれで多くの貴重な知見を得ることができた。

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3に示す。

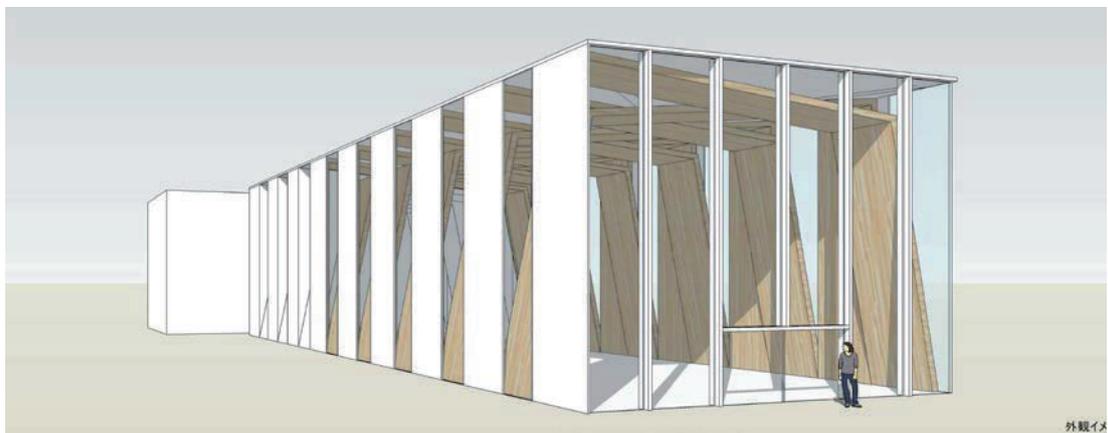


図3 仕上げ面を含む建物の外観

1. 建築計画

1.1 計画概要

本計画は、実験設備を内包する建屋の構造に CLT を用いた木造空間である。平面図を図 1-1 に、架構イメージを図 1-2 に示す。

1.2 建築計画

建物概要を以下に示す。

用途 : 研究所 (事務室)

建築面積 : 418m²

延床面積 : 487m²

構造種別 : 木造 (CLT 構造)

階数 : 地上 2 階

最高高さ : 9.05m

最高軒高 : 9.00m

耐火種別 : なし

延床面積を 500m² 以下で、軒高 9m 以下かつ、高さ 13m 以下に抑え 4 号建築物とすることで、法的制約が少なくなるように計画した。また、建屋を南側の既存建物から 10m 以上離すことで、長辺方向は延焼の恐れのある部分にかからない計画とし、外装の防耐火制約もなくした。屋根・外壁の仕上げ面形状はフラットな構成とすることで、外装のコストを抑え、かつ雨仕舞に配慮した計画とした。スパンは 10m、高さは 9m として、スパン方向の全ての架構を CLT パネル 1 枚 (幅 2.4m、長さ約 9m) で構成する。仕上げ面を含む、建物外観を図 1-3 に示す。

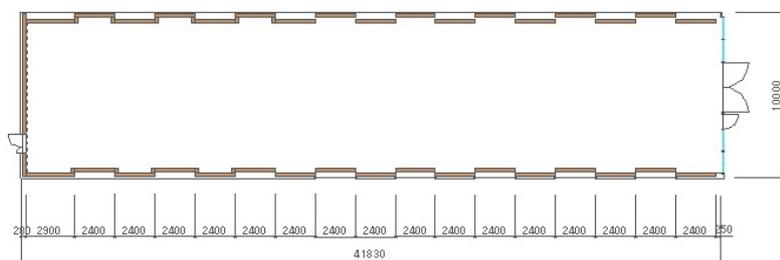


図 1-1 平面図

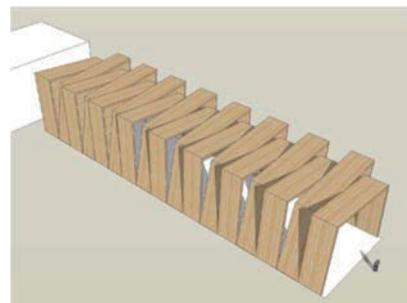


図 1-2 木質架構イメージ

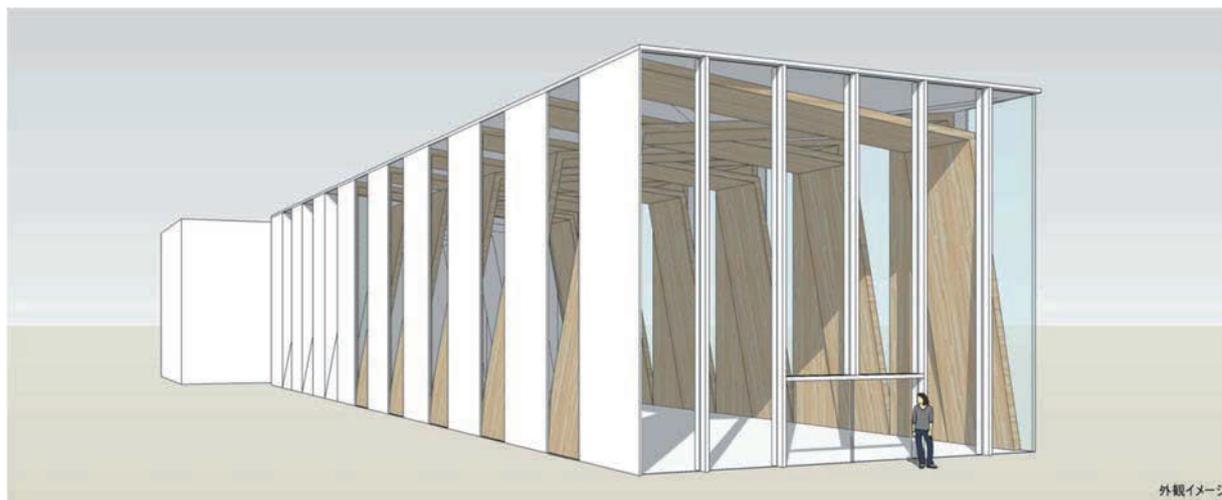


図 1-3 仕上げ面を含む建物の外観

1.3 構造計画

1.3.1 構造コンセプト

構造コンセプトは次の2点とした。1点目は、CLTパネルの大型化と歩留まりの向上である。本計画では、製作可能かつトラックでの搬入可能とした、2.4×9.0mまでの長方形CLTパネルを利用する計画とした。2点目は、高所作業および仮設を少なくする省力施工の実現を目指した、展開構造である。構造計画概要図を図1-4に示す。

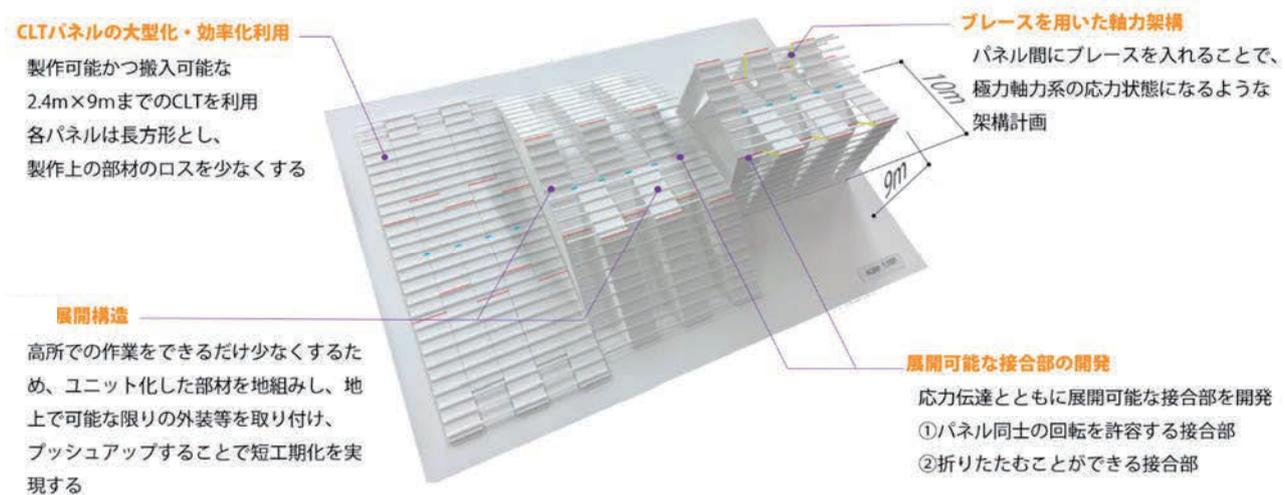


図 1-4 構造計画概要

1.3.2 施工計画

省力施工を考慮した施工計画は図1-5に示した方法による。展開可能な接合部を用いることで、本来高所で生じる作業を地面レベルで実施できる計画としている。

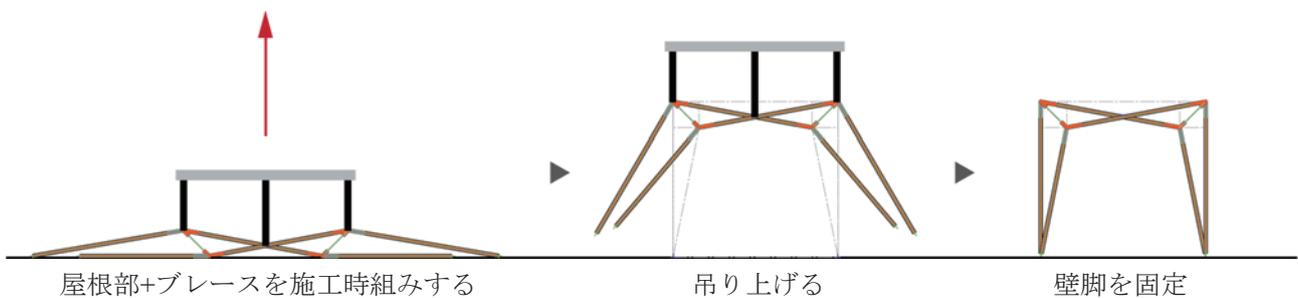


図 1-5 省力施工を実現する展開構造を利用した施工計画

1.3.3 架構計画

構造架構は、実験設備のスパンを掛け渡すことに加え、スパン中央部で必要となる高さ寸法を満たし、かつ、耐火性能を不要とするため、軒高9mの中で部材せいを小さく抑える必要があった。そのため、架構計画は奥行き方向に連なるユニット間でトラスを形成するCLTパネル面トラス架構とした。図1-6に面トラス架構の概要を示す。

主体構造を構成するユニットは幅2.4m、最高高さ9mの一部が傾斜した門型を構成する3枚のCLTパネルである(①)。各CLTパネルは展開可能とするため、回転できる接合部により接合している(②)。CLTパネルは

5層7プライ（Mx60-5-7、 $t=210\text{mm}$ ）を使用する。スパン中央で鏡面对称としたユニットを奥行き方向に交互に連続させ、各頂点同士を同一面内でスパン方向に結合させることで、奥行き方向のユニット同士が一体となってトラスを形成し、架構としての剛性を確保することを可能とした(③)。手前側と奥側のユニットが交差するスパン中央部分においても接合する(④)。これらの構造計画上の工夫により、実験施設の条件を満たす架構を実現した。

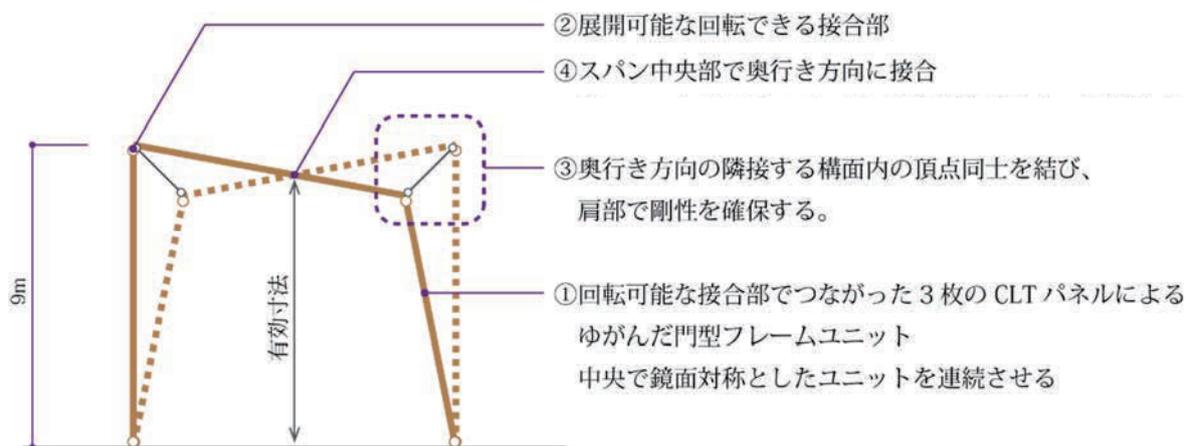


図 1-6 CLT パネルによる面トラス架構概要

1.3.4 接合部計画

本計画で用いる接合部は次の 4 種類に分けられる。各接合部に求められる性能を以下に、接合部の位置について図 1-7 に示す。

- ①ブレース接合部： ブレースと CLT パネルの接合部で、ブレースに生じる軸力を CLT パネルに伝える。
- ②肩部接合部： CLT パネル同士を接合する接合部で、ブレースを介してユニット間の応力も伝達する。また、展開構造としているため、回転可能とする必要があるとともに、CLT パネル同士のねじれも拘束する接合部である。
- ③壁脚接合部： 桁方向の CLT の面内せん断のみでなく、スパン方向の面外せん断も基礎に伝達する必要がある。施工計画上、建方の最後に取り付ける接合部となる。
- ④交差部接合部： CLT パネル同士の交差部分に配置され、せん断力を伝達する。

なお、実際に利用する接合部は、本事業内で実施した性能検証試験の結果を加味し、各性能において効率よく合理性の高いものを選択することとする。

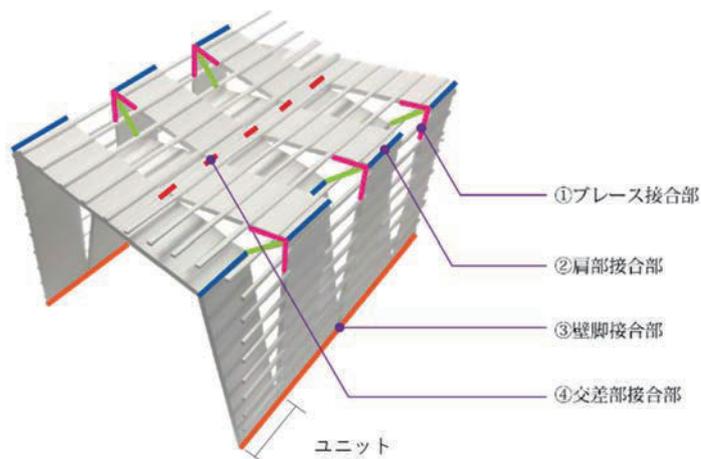


図 1-7 各種接合部

1.3.5 フレーム解析概要

フレーム解析モデルを図 1-8 に、解析モデルの特徴を以下に示す。CLT パネルは軸部材に置換し、その軸剛性、せん断剛性、曲げ剛性は、国交省告示 1024 号に定められている値となるように設定した。壁用 CLT パネル軸部材と屋根用 CLT パネル軸部材の交差部に、壁幅の剛部材を配置して、その両端にブレース材が取り付け付く節点を作成した。壁脚の支持は壁脚部剛部材の端部 2 点を基礎に対してピン接合とした。接合部は汎用リンク要素、ブレース材は接合部の剛性を加味した等価剛性になるように設定値を調整した。

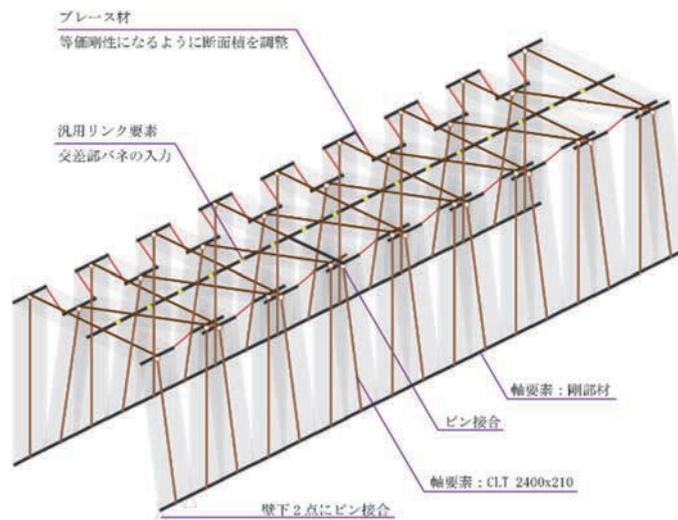


図 1-8 フレーム解析モデル概要

得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- ・面トラス架構は門型フレームを構成するため、ブレース材には長期で圧縮が生じる。
- ・桁方向の両端部の CLT パネルには片側に接合部が存在しないため、たわみが生じ CLT パネルがねじれる。そのため、端部にはそれを抑制する補強を行う必要がある。
- ・スパン方向には壁などの耐力要素（構面）がないため、直交壁になる CLT パネルに面外のせん断抵抗を期待する必要がある。

2. 接合部の性能検証試験

2.1. 目的

実際に使用する接合部の性能検証実験は、来年度以降の実施設計時に行うものとして、本実証事業で行う接合部の性能検証実験では、CLT を 90 度に接合する接合部に限って実験対象とし、CLT 接合部に関する基礎的なデータを広く収集することを実施方針とした。

ここでは、CLT 同士の 90 度接合における接合方式をいくつか提案し、その力学性能、施工性および経済性を検証することを目的とした。引張抵抗用とせん断抵抗用の接合部を考案し、せん断抵抗用には、CLT に対して面内と面外の 2 つの方向に対する抵抗機構を検討した。接合部の設計コンセプトは、意匠性の確保と燃えしろ設計に対応できる、接合具が外から見えない、あるいは見えにくい接合方式とすることである。

2.2. 実験

2.2.1. 試験体

抵抗機構が明確になるように各応力を負担する接合部をそれぞれ分けて考えることとして、試験体は引張抵抗用とせん断抵抗用の 2 種類の接合部を用意した。また、せん断抵抗用は面内せん断、面外せん断の 2 種類の加力方向を想定して試験体仕様を決定した。これまで CLT のパネル接合（告示仕様等）で一般的に利用されてきた鋼板添え板式ビス止め接合部（面内のみ）を従来式として対照試験とし、提案する接合部の力学性能、施工性、経済性が、これに対してどの程度の性能を有するのかを比較検討する。提案した接合部の試験体一覧を表 2-1 に示す。また用いた CLT パネルは MX60-5-5 (t=150mm) であり、含水率（ケット科学研究所社製木材水分計 HM-520 による）は、平均 11.0% (S.D. 1.63)、密度は平均 0.40g/cm³ (S.D. 0.02) であった。

表 2-1 試験体一覧

応力	加力方向	接合方式	試験体名	機構	加工	接合具	Py予想値	試験体数
引張	強軸方向	LSB	LSB	機械	先孔	LSB L=210mm(株式会社ローク社製)、SN400BM12ボルトセット、80mm角座金	30	3
		ホームコネクタ	HOM	接着	先孔、注入用溝	ホームコネクタ L=150mm(株式会社スクリムテックジャパン社製)、埋木	37	
せん断	面外	ジベル	SC-DWL	機械	ジベル用円形溝	鋼管φ60.5、L=30mm、LSB L=210mm(株式会社ローク社製)、SN400BM12ボルトセット、80mm角座金	実験による	
		斜めビス	SC-SCR		長ビス誘導用先穴	パネリードX(東日本ハワーファスニング社製) M10×290mm	20	
		HTB摩擦接合	SC-HTB		HTB導入用切欠き	M12高力ボルト(F10T)セット、ビス止め用座彫り付鋼板t=9、TBA-65(ナカ社製)	18	
		コンシールドPL	SC-CPL		プレート挿入用溝	試験用T型コンシールドプレート(アルミ製)、タイトフィットビスWS133mm(SFSintec社製)、パネリードP6×135mm(東日本ハワーファスニング社製)	20	
		鋼板添え板	SZ-SPL		—	ビス止め用先穴付鋼板t=6、鋼板止め付用ビスM8×90(東日本ハワーファスニング社製)	24	
	面内	ジベル	SZ-DWL	機械	ジベル用円形溝	鋼管φ60.5、L=30mm、LSB L=210mm(株式会社ローク社製)、SN400BM12ボルトセット、80mm角座金	実験による	
		斜めビス	SZ-SCR		長ビス誘導用先穴	パネリードX(東日本ハワーファスニング社製) M10×290mm	20	
		HTB摩擦接合	SZ-HTB		HTB導入用切欠き	M12高力ボルト(F10T)セット、ビス止め用座彫り付鋼板t=9、TBA-65(ナカ社製)	18	
		コンシールドPL	SZ-CPL		プレート挿入用溝	試験用T型コンシールドプレート(アルミ製)、タイトフィットビスWS133mm(SFSintec社製)、パネリードP6×135mm(東日本ハワーファスニング社製)	20	

1) 引張抵抗用接合部

引張抵抗用の接合部としては、直交するふたつの CLT 同士を機械式にとめつけるラグスクリューボルト (Lag Screw Bolt、以下 LSB) と、鋼管を先穴に差し込みエポキシ接着剤で固めてとめつけるグルードインロッド (Glued-in-Rod、以下 GIR) の 2 種類を用いた。両接合部とも、約 30kN の引張り耐力を想定して接合部を設計した。GIR については、ホームコネクタ (スクリムテックジャパン社製) を選んだ。LSB とホームコネクタの写真を図 2-1 に示す。LSB は大きなビス形状をしたボルトであり、木材の繊維方向もしくは繊維直交方向に先穴をあけ、そこに工具を使ってトルクをかけながら打込む接合金物である。打込んだ LSB の

端部には雌ねじが切っており、そこに接合用のボルトを連結する。LSB の打込みには、手動、電動にかかわらず六角ソケットビットが必要であり、LSB の端部を木材の面いちに納めるには、ソケットビットの外形分の座彫りが必要となる。

ホームコネクターは木-木、木-鋼、あるいは木-コンクリートをその金物を介して接着接合するもので、繋げたい材料に少し大きめの先穴を開け、そこにホームコネクターを差込んで接着面を接触させビスなどの機械式方法などで仮固定し、付属した枝管からエポキシ系接着材を圧入して材料とホームコネクターとの隙間に充填固化させ接合する金物である。これらを利用した引張抵抗用接合部試験体を図 2-2 に示す。



図 2-1 LSB (左) と GIR/ ホームコネクター (右)

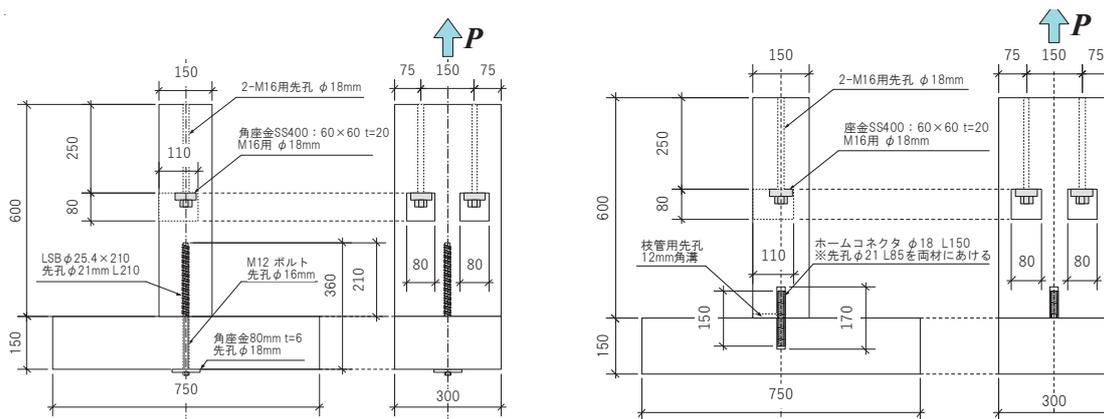


図 2-2 引張抵抗用接合部 (左 : LSB、右 : GIR/ ホームコネクター)

2) せん断抵抗用接合部

せん断抵抗用の接合部としては、鋼管ジベル式、長ビス斜め止め式、HTB 摩擦接合式、コンシールドプレート式の 4 種類を試験体として用意した。これらの面外方向、面内方向の 2 種類の加力方向と、面内方向について従来式である鋼板添え板ビス止め式を加え、全 9 種類の試験仕様を用意した。面外・面内方向加力のいずれもせん断面を 2 つ有するが、片側で約 20kN のせん断耐力を想定して接合部を設計した。各接合方式の特徴は以下の通りである。各せん断抵抗用接合部試験体を図 2-3～2-7 に、図 2-8～2-10 に組立ての詳細図を示した。図中、斜線等の網掛け部分はラミナの木口断面を表している。

◇接合方式の特徴

ジベル：

木材に円形の溝加工（外径 $\phi 60.0\text{mm}$ 、 $t=2.3$ ）を施して、鋼管（ $\phi 60.5\text{mm}$ 、 $t=2.3$ ）を打ち込む。鋼管円の中心に LSB と引きボルトを通して引き止めておく機構を持つ。面外、面内の両方向に有効であ

り、鋼管の断面サイズがせん断剛性や耐力に影響する。鋼管長さが短く安価であるが、溝加工の精度が必要であり、複数個並べて使うことを想定した場合、数が多いと、精度よく納めることは困難と思われる。

斜めビス：

CLT を直径 8~10mm の、全ネジ長ビスで止めつける方式で、斜めに打ちとめたビスに対する加力方向によってせん断剛性・耐力が異なる。ビスを打ちとめる時間が短く施工性が高いが高価である。

HTB 摩擦接合：

接合する CLT に 9mm の鋼板を複数本のビスで固定し、鋼板同士を高力ボルト（HTB）により摩擦接合する方式である。CLT への鋼板の固定は工場で行うことができるため、現場での施工は HTB を締結するのみであり作業が簡易だが、鋼板分の部材重量が増加する欠点がある。ビス本数と HTB の径のバランスを考慮することにより、せん断耐力を HTB の摩擦耐力と、ビスの降伏耐力のいずれかを選定することができるが、ここでは性能のばらつきが比較的少ない HTB の摩擦耐力を選んだ。

コンシールドプレート（コンシールド PL）：

CLT ハンドブック 9 に掲載されている接合部である。木材と鋼板を同時に打ち抜くセルフドリル式の特種な接合具（通称：タイトフィットビス）を用いる必要があり、ここでは、スイスに本社をおく SFS intec 社製の WS を選んだ。貫通性能と曲げ変形性能に優れたビスであるが、輸入品ということもあり、一般的なビスに比して 5~6 倍高価である。木材、鋼板ともに先穴が不要ということで、加工精度を考慮しなくてよく、現場施工に特化した接合方式である。今回はアルミ製のプレートを用いた。

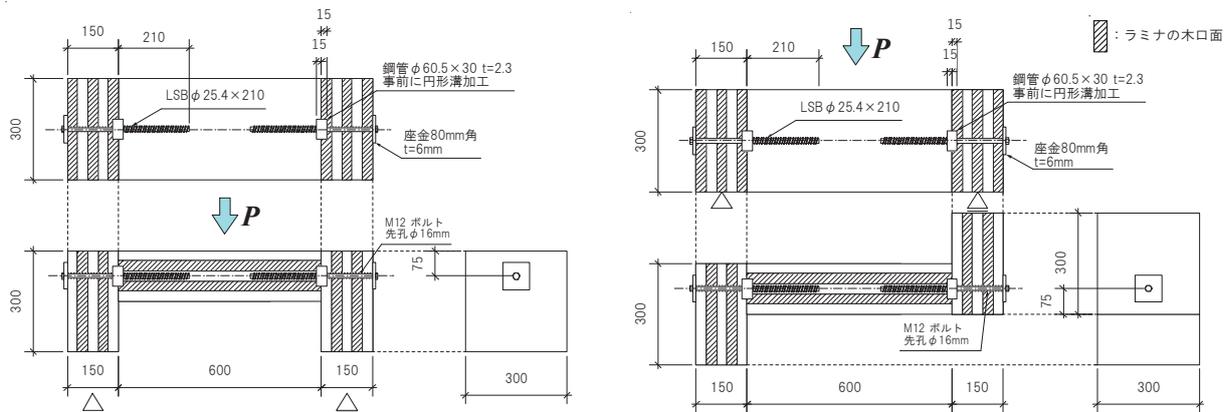


図 2-3 ジベル（左：面外、右：面内）

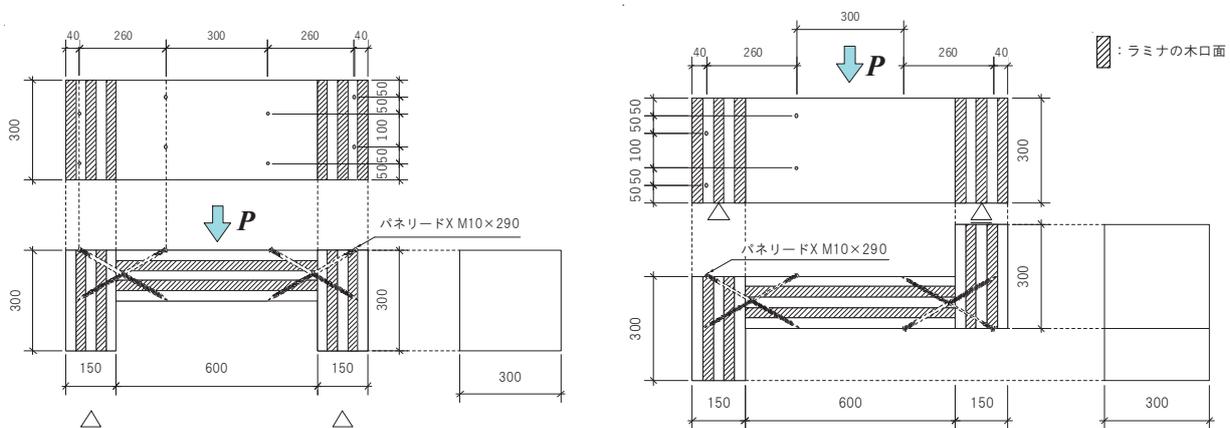


図 2-4 斜めビス（左：面外、右：面内）

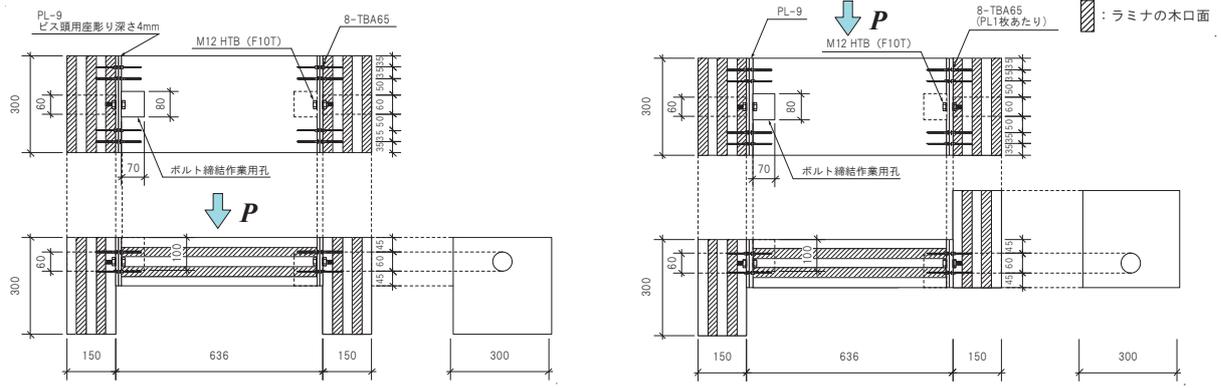


図 2-5 HTB 摩擦接合 (左：面外、右：面内)

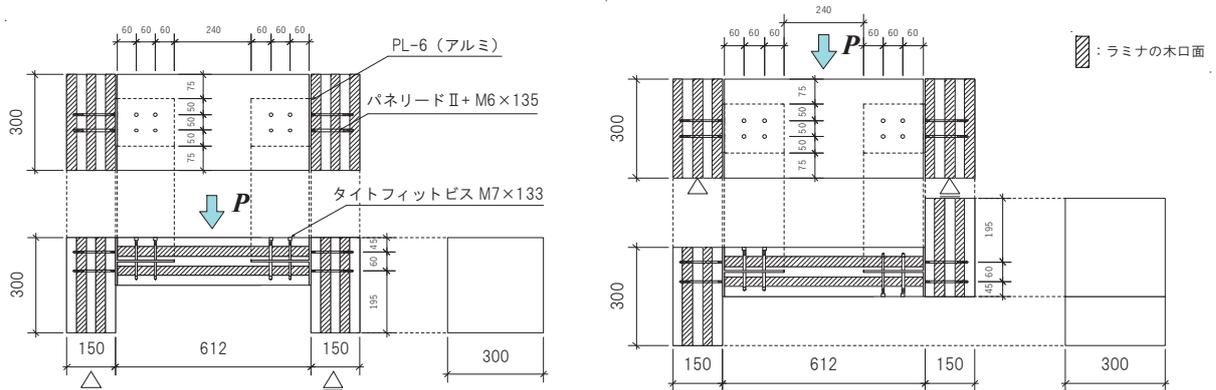


図 2-6 コンシールドプレート (左：面外、右：面内)

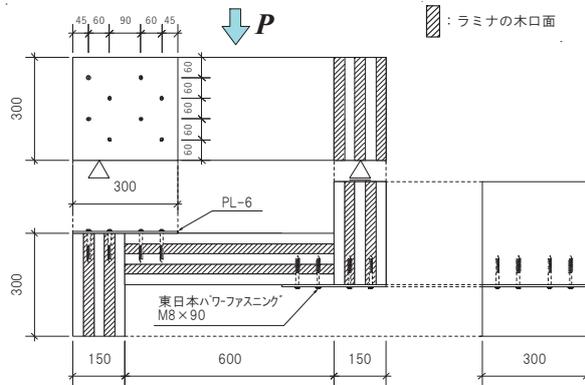


図 2-7 鋼板添え板ビス止め (従来式、面内のみ)

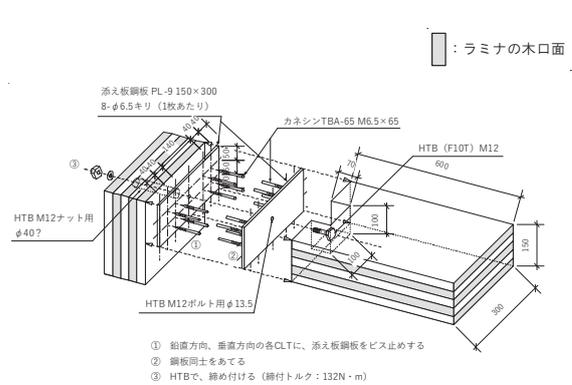


図 2-8 HTB 摩擦接合詳細図

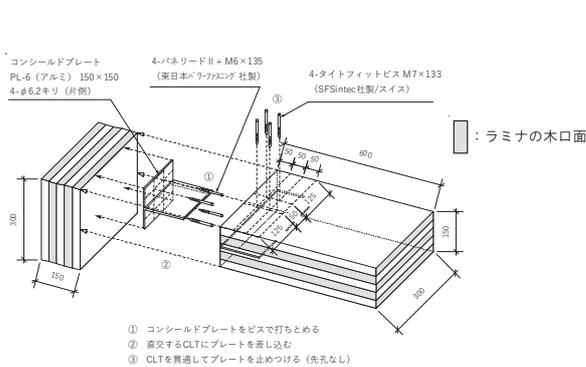


図 2-9 コンシールドプレート詳細図

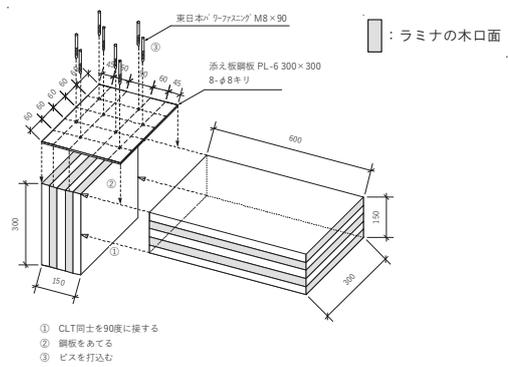


図 2-10 鋼板添え板ビス止め (従来式) 詳細図

2.2.2. 試験方法

試験体は、引張抵抗用とせん断抵抗用の2種類の接合部があるが、引張抵抗用は引張試験として、せん断抵抗用は圧縮試験として実施することとした。各試験方法を図2-11、2-12にそれぞれ示す。反力フレームを山留材で組み上げ、それに緊結された油圧ジャッキにて加力する方法である。各種接合部の力学性能を全体的に把握することが目的であるため、必要以上に測定系を複雑なものとしないう、加力方法は一方向単調加力とし、荷重はジャッキに取り付けたロードセルにて、変位は4本の変位計で測定された相対変位の平均値とした。また、試験体数は基本的に各3体とした。

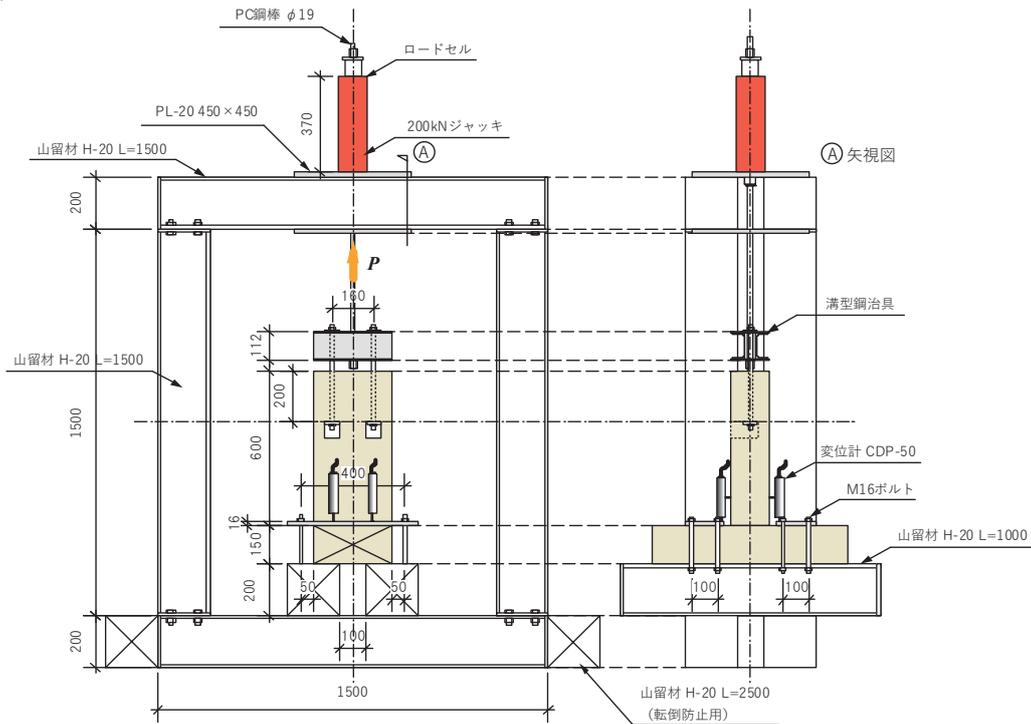


図 2-11 引張試験方法

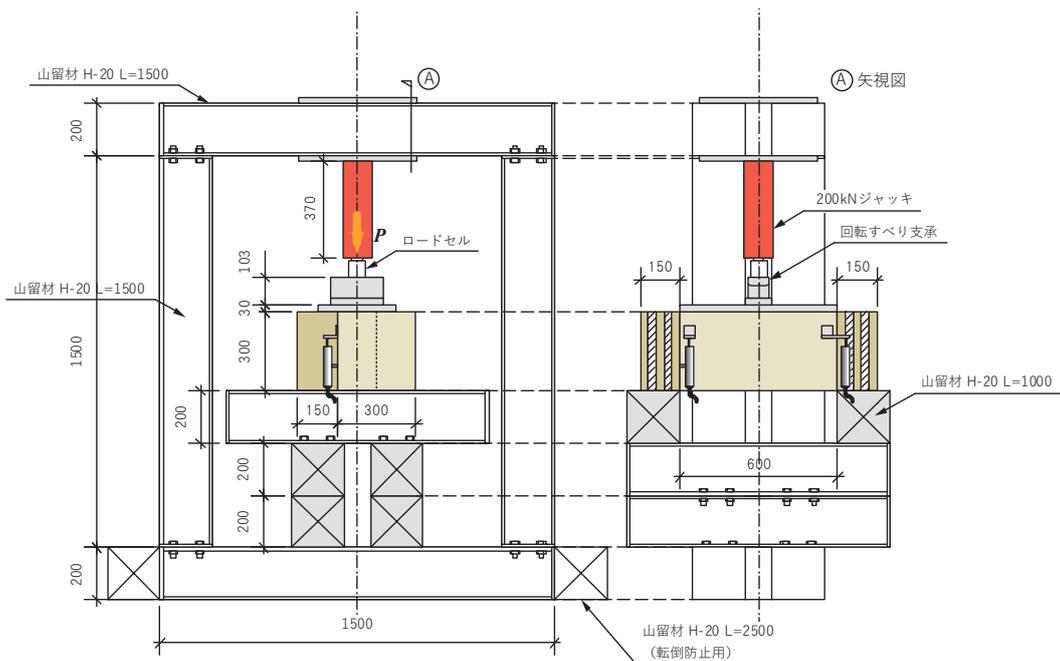


図 2-12 せん断試験方法

2.3. 試験結果

2.3.1. 結果と考察

引張試験 2 種類、せん断試験 9 種類（面内、面外方向加力の別を含む）の試験結果一覧を、表 2-2 に示す。得られた荷重変位関係から、最大荷重 P_{max} 、最大荷重時変位 δ_{max} 、初期剛性 K 、降伏耐力 P_y 、降伏変位 δ_y 等の特性値をマニュアル²⁾に準拠して抽出し示した。試験体ごとの破壊性状や荷重変位関係などの詳細については、別添資料（データシート）に記した。各接合部について考察をまとめると以下の通りである。

1) 引張抵抗用接合部

LSB :

$t=210\text{mm}$ の LSB に対して、SN400B 材の M12 ボルトを使用して M12 ボルトを伸ばす設計としたところ、想定どおり M12 ボルトが伸び、木材への座金のめり込みも含めて、全体で 40mm 程度の変形性能を確保できた。

ホームコネクター :

GIR であるため、引張剛性は LSB の 1.5 倍程度高かった。一方、1 本あたりの P_{max} と P_y は相対的に低く、LSB と同等の性能を発揮するには、接合具径を大きくする必要があることが分かった。引張力に対しては脆性的に壊れるため、せん断抵抗用途が向いているようである。

2) せん断抵抗用接合部（面外）

ジベル :

鋼管ジベルと木材との面圧で初期剛性が決まるが、鋼管が塑性変形して楕円状につぶれた後には、その内側を通っている M12 ボルトのロープ効果が働き、耐力が上昇する機構であった。40mm までせん断変形させたところ荷重は上がり続けたことから、高い変形性能が確認された。

斜めビス :

本試験の仕様では、面外方向に斜めビスが加力される時、ビスの軸方向にせん断力が作用することになるためビスのトラス効果が働き、ビスの曲げ変形が卓越する面内方向加力に比べて剛性が 6 倍程度高くなる結果が得られた。このことから、特に剛性が必要な場合は、せん断力が働く方向とビスの打込み方向が平行になるように配する使い方が合理的であるといえる。

HTB 摩擦接合 :

ボルト 1 本による止め付けとしたため摩擦接合する高力ボルトに偏心曲げによる引張力が作用したことから、想定した摩擦力は発揮されなかったが、結果的に他の仕様と比較して剛性が高かった。ビスの本数が十分であったため終局耐力は高く、最終的には接合部が曲げ破壊した。

コンシールド PL :

タイトフィットビスでアルミ板 ($t=6\text{mm}$) を打ち抜くのに 15 秒/本の時間がかかった。挿入された鋼板を止めつけるタイトフィットビス 4 本に対して、パネリード P6×133mm4 本でプレート止めつけたが、面外方向の加力に対しては、パネリード釘頭のせん断試験となり脆性的な破壊を示した。

3) せん断抵抗用接合部（面内）

ジベル :

抵抗機構については面外のそれと同様であるが、剛性の平均値が面外の 5.7kN/mm に比べ、8.8kN/mm と約 1.5 倍となった。これは面外の方が P_{max} が大きかったため、評価方法の仕組み上、剛性が大きく算出されたものと考えられる。一方、降伏耐力は、ジベルが繊維直交方向にめり込むのではなく、繊維を割り裂く方向に加力されるため 0.7 倍と小さくなった。加力方向とラミナの繊維方向との関係が特性値に大きく影響することがわかった。

表 2-2 試験結果一覧

抵抗機構	試験体名		Pmax (kN)	δ max (mm)	K (kN/mm)	Py (kN)	δ y (mm)	μ ($\delta u / \delta v$)	価格比	施工時間 (min)
引張り	LSB	1	40.0	18.2	27.54	29.5	1.07	24.4	0.36	7.00
		2	40.5	25.7	13.85	29.6	2.14	14.1		
		3	42.5	28.7	15.83	29.8	1.88	16.2		
	平均		41.0	24.2	19.10	29.7	1.70	18.2		
	/価格比		113.1	66.8	52.7	81.9	4.7	50.2		
	/施工時間		5.9	3.5	2.7	4.2	0.2	2.6		
	ホームコネクター	1	37.0	1.4	36.60	25.4	0.70	1.4		
		2	28.3	1.4	35.66	20.2	0.57	1.9		
		3	23.8	1.2	34.86	15.5	0.44	1.8		
	平均		29.7	1.3	35.71	20.4	0.57	1.7		
/価格比		82.4	3.6	99.1	56.6	1.6	4.7			
/施工時間		3.7	0.2	4.5	2.6	0.1	0.2			
面外	ジベル	1	91.7	39.2	5.51	43.9	7.97	2.8	0.77	11.0
		2	101.1	39.2	5.94	51.0	8.59	2.6		
		3	115.0	40.1	5.76	67.4	11.69	2.2		
	平均		102.6	39.5	5.73	54.1	9.42	2.5		
	/価格比		133.1	51.2	7.4	70.2	12.2	3.3		
	/施工時間		9.3	3.6	0.5	4.9	0.9	0.2		
	斜めビス	1	73.6	7.7	31.97	42.7	1.34	9.0		
		2	71.6	5.6	38.89	40.4	1.04	14.4		
		3	77.6	5.4	38.99	43.5	1.11	7.3		
	平均		74.3	6.3	36.62	42.2	1.16	10.2		
/価格比		55.7	4.7	27.5	31.7	0.9	7.7			
/施工時間		18.6	1.6	9.2	10.6	0.3	2.6			
HTB摩擦接合	1	90.1	13.7	15.35	45.3	2.95	3.6			
	2	115.1	23.9	14.61	63.6	4.35	3.5			
	3	106.3	20.9	12.97	66.6	5.14	2.9			
平均		103.8	19.5	14.31	58.5	4.15	3.3			
/価格比		123.0	23.1	17.0	69.3	4.9	4.0			
/施工時間		28.8	5.4	4.0	16.3	1.2	0.9			
コンシールドプレート	1	35.6	5.6	7.34	19.6	2.66	1.4			
	平均		35.6	5.6	7.34	19.6	2.66	1.4		
	/価格比		42.2	6.6	8.7	23.2	3.2	1.6		
/施工時間		5.9	0.9	1.2	3.3	0.4	0.2			
せん断	鋼板添え板	1	63.6	35.2	8.02	33.9	4.23	4.9	1.00	5.30
		2	62.1	37.4	5.35	37.9	7.09	3.8		
		3	70.7	12.6	10.85	34.4	3.17	6.7		
	平均		65.4	28.4	8.08	35.4	4.83	5.1		
	/価格比		65.4	28.4	8.1	35.4	4.8	5.1		
	/施工時間		12.3	5.4	1.5	6.7	0.9	1.0		
	ジベル	1	76.7	29.9	8.29	37.5	4.53	4.0		
		2	88.0	38.0	9.21	42.6	4.63	4.9		
		3	85.0	37.5	9.04	40.1	4.44	5.0		
	平均		83.2	35.1	8.84	40.1	4.53	4.6		
/価格比		107.9	45.5	11.5	52.0	5.9	6.0			
/施工時間		7.6	3.2	0.8	3.6	0.4	0.4			
面内	斜めビス	1	103.1	29.5	6.54	52.3	8.01	2.7	1.33	4.00
		2	100.7	36.9	6.64	46.7	7.03	2.9		
		3	98.9	36.7	6.62	47.3	7.14	3.0		
	平均		100.9	34.4	6.60	48.8	7.39	2.9		
	/価格比		363.2	123.7	23.76	175.7	26.60	10.3		
	/施工時間		133.7	45.5	8.75	64.7	9.79	3.8		
	HTB摩擦接合	1	98.9	15.3	11.97	52.0	4.35	2.7		
		2	104.6	15.4	12.61	58.3	4.62	2.6		
		3	92.4	17.8	12.51	40.6	3.24	3.1		
	平均		98.6	16.2	12.36	50.3	4.07	2.8		
/価格比		116.9	19.2	14.6	59.6	4.8	3.3			
/施工時間		27.4	4.5	3.4	14.0	1.1	0.8			
コンシールドプレート	1	40.0	6.8	9.77	20.6	2.11	2.0			
	平均		40.0	6.8	9.77	20.6	2.11	2.0		
	/価格比		47.4	8.0	11.6	24.4	2.5	2.3		
/施工時間		6.7	1.1	1.6	3.4	0.4	0.3			

※網掛けの「鋼板添え板」式接合部は対照実験であり、価格比の基準となっている。

斜めビス：

面外方向加力に比較して剛性は 1/6 程度であった。面内方向の加力ではビスの曲げ変形が卓越し、面外方向加力のようなトラス効果が働かないためと考えられる。しかし、剛性は比較的低い降伏耐力は高く靱性に富む。計測限度の 40mm で最大耐力はおよそ面外方向の 1.35 倍高くなった。

HTB 摩擦接合：

面外方向と比べてほぼいずれの特性値も若干小さいものの、ほぼ同等の性能が得られた。面外方向の斜めビスを除けば、4 つの方式の中で最も高いせん断剛性であった。また加力方向によらず安定した性能を確保できた。この理由として、ビスは打ちたい位置に自由に配置でき、また鋼板面積の範囲内で応力負担できることから、応力集中による性能のバラツキが少なくなるためと考えられる。

コンシールド PL：

前述のとおり、タイトフィットビスの打ち込みに時間がかかった。当初、主材に打たれるタイトフィットビスを 4 本、側材に打たれるパネリードを 4 本と同数にしていたが、パネリードの釘頭のせん断耐力が低いことから、タイトフィットビス 2 本、パネリード 8 本に変更して試験を行った。その結果、パネリードのせん断破壊は生じずに、タイトフィットビスのせん断変形をさせることができたが、コンシールドプレートの回転変形が生じたため、同プレートの縦横比やビスの打つ位置をうまく設計する必要があることが確認された。

2.3.2. 経済性と施工性

表 2-2 中の価格比とは、鋼板添え板式接合（表中、網掛）に用いた接合金物の 1 試験体あたりの価格を 1.00 としたときの、各接合方式ごとの接合金物の価格比のことであり、また施工時間とは、試験体の組立てにかかったおよその施工時間（分、材料の加工時間は除く）である。これらの値で各特性値を除すことにより、経済性、施工性の目安値を算出した。いずれも絶対値そのものに意味はなく、接合部の各仕様で性能を相対的に比較検証するための値であることに注意いただきたい。結果を図 2-13 に示す。左側に面外方向の初期剛性と降伏耐力の目安値、右側には面内方向の初期剛性と降伏耐力の目安値を示した。

図 2-13 a) ~d) より、以下のようにまとめられる。

- ・面外方向の剛性については（図中 a)）、斜めビスの経済性および施工性が高く、鋼板添え板に対して 6 倍程度だった。ついで、HTB 摩擦接合が続いた。
- ・面外方向の降伏耐力については（図中 c)）、HTB 摩擦接合とジベルの経済性が高く、施工性は HTB 摩擦接合が高かった。
- ・面内方向の剛性については（図中 b)）、HTB 摩擦接合とジベルの経済性が高く、施工性は HTB 摩擦接合が高かった。
- ・面内方向の降伏耐力については（図中 d)）、経済性は HTB 摩擦接合に次いで、ジベルとなっており、施工性は HTB 摩擦接合、斜めビスの順となった。
- ・今回の目安値においては、HTB 摩擦接合は総じて、経済性と施工性がよいという結果が得られた。
- ・ジベルも経済性と施工性が比較的高かったが、遊びを少なくする必要があるジベルは、複数個並べる場合には接合具を納めるのが難しく、納めるためにクリアランスをとるとその分のガタが大きくなるといった欠点がある。

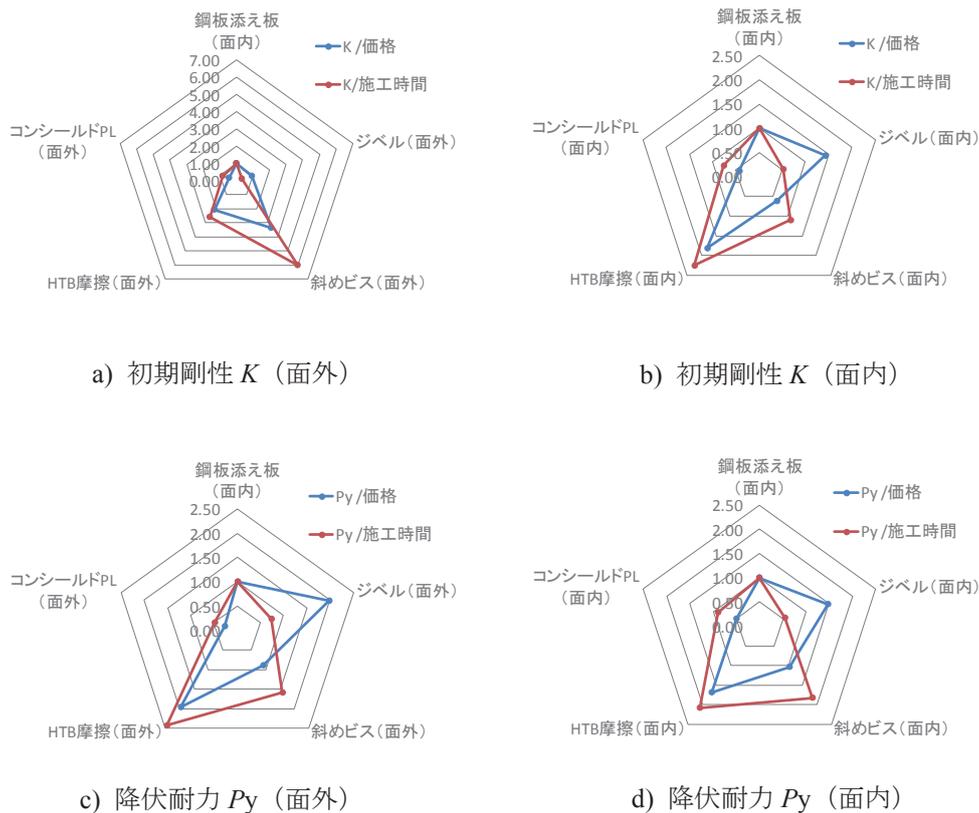


図 2-13 経済性と施工性

3. 接合部の性能検証追加試験

前項 2.接合部の性能検証試験において、各仕様の接合部の性能検証試験を実施した。これらのうち、特に別途、確認が必要と思われた事項について、追加試験を行ったので報告する。確認が必要と思われた事項とは、以下の3点である。

1) 引張抵抗用 LSB 接合部の複数回試験

LSB を用いた引張抵抗用接合部の引張試験を実施した。このとき、LSB 側では破壊させず、M12 ボルト (SN400B) 側で伸ばし、破断させるように設計した。試験結果は想定どおり M12 ボルトの破断により試験が終了した。ここで仮に LSB 側で破壊することがないとなれば、ボルトのみ交換すれば複数回利用可能なメンテナンス性の高い接合部であるといえるが、LSB 側の抜け出しなどの変形については確認していなかった。そこで、LSB の複数回利用の検証を目的に、複数回の引張試験を実施し、LSB 側の変形挙動を確認する。

2) タイトフィットビスの2面せん断試験

先孔のない木材と鋼材を、一度に打ち抜くタイトフィットビスを用いたコンシールドプレート接合部のせん断試験を実施した。この結果、タイトフィットビスにせん断加力をすることはできたが、金物の形状の理由からタイトフィットビスの性能を十分には明らかにできなかった。そこで、基本データとしてタイトフィットビス1本あたりのせん断性能を確認するために、引張型の2面せん断試験を実施する。なお、ここでは炭素鋼 (SS400) のプレートを用いた。

3) HTB 摩擦接合部のせん断試験 (面内加力)

M12 の高力ボルトを用いた摩擦接合部のせん断試験を実施した。その際、M12 ボルトの摩擦耐力で決まるように設計したところ、剛性は高いものの必要なビス本数が多くなってしまったことが分かつ

た。そこで追加実験ではビスのせん断性能で耐力が決まるように設計し、施工性とビスのせん断性能を担保するために、M24 の高力ボルト 2 本を利用した。

3.1. LSB 複数回引張試験

LSB 側の抜け出しなどの変形挙動を明らかにするため、LSB を複数回利用した引張試験を実施した。試験体には、前項 2. で用いた引張抵抗用 LSB 接合部の CLT 試験体を再利用し、加力は一方向単調加力とした。M12 ボルト (SN400B) が破断したら、その都度新品に交換し、全 3 本の引張試験を行って、LSB 側の変形挙動を確認した。

3.1.1. 試験体と試験方法

試験体図を図 3-1 に、試験体のセットアップを図 3-2 に示す。実際の試験体セットアップでは、試験体の止め付け易さの点から、図 3-1 の試験体の天地を逆にして設置した。CLT からの LSB の抜け出し変位を測定するため、図 3-3 に示すカンチレバー式の変位計を 2 つ取り付け、その平均値を LSB の抜け出し変位量とした。

3.1.2. 結果と考察

荷重変位関係および全体変位と LSB の抜け出し変位との関係を図 3-4 に示す。図中 a) の全体の荷重変位関係は、ボルト引張り降伏から破断までの特性をよく現しており、続けて実施した 3 回ともほぼ同じ曲線となった。図中 b) の荷重—抜け出し変位関係をよると、LSB の抜け出し変位は 3 回とも 0.35mm 程度であった。また、完全ではないが 1/3~2/3 程度変形が回復しているようにも見える。ボルト破断時の衝撃の影響により変位計がずれてしまった可能性もあるため不確かではあるが、変位計の値から読み取れば 1 回目で 0.2mm、2 回目、3 回目で 0.1mm 程度の抜け出しが生じていたため、合計で 0.35~0.40mm の抜け出し変位が生じていたことになる。実用上の観点からいえば、今回のように LSB と M12 ボルトとの耐力比が 1.7 倍程度あれば、2~3 回程度の利用に問題はないといえそうである。

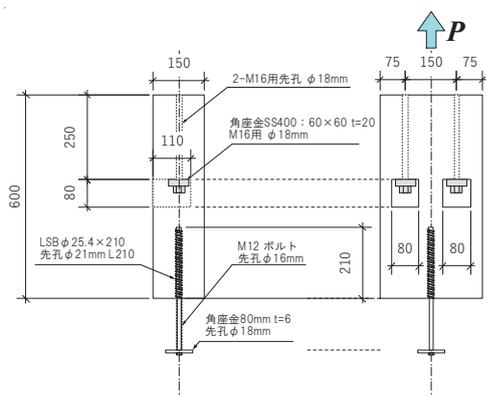


図 3-1 繰返し引張用試験体



図 3-3 LSB 抜け出し変位の測定

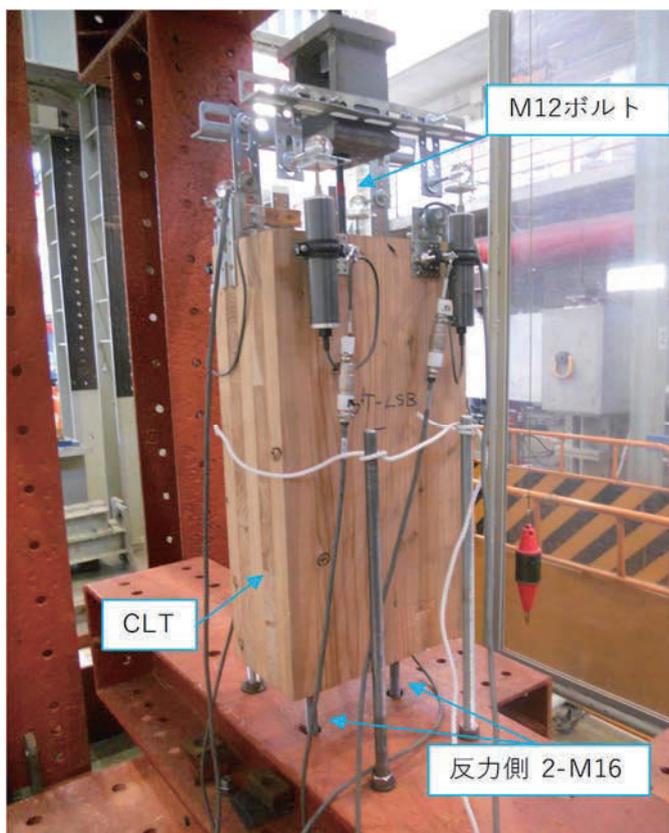


図 3-2 試験体セットアップ

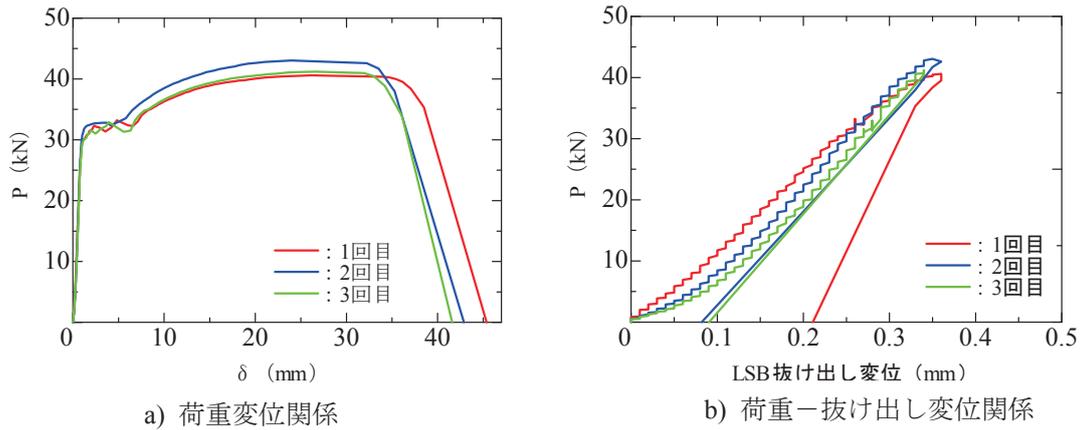


図 3-4 荷重変位関係と LSB 抜け出し変位

3.2. タイトフィットビスの 2 面せん断試験

3.2.1. 試験体と試験方法

タイトフィットビス (WS-T-7L=133、SFSintec 社製) の 1 本あたりのせん断性能を調べるため、鋼板挿入型 2 面せん断試験を実施した。試験体図を図 3-5 に示す。Mx60-5-5 で 300×600 の CLT の厚さ方向の中心に幅 6mm で深さ 150mm の溝加工を施し、同厚 6mm のプレート (SS400) を差し込んだ。その直交方向からタイトフィットビスを打込み、木-鉄-木の 2 面せん断による抵抗機構を構成した。試験体は、図 3-5 の引張加力方向に CLT の外層ラミナの繊維方向が平行になる強軸タイプを 5 体、これに対してラミナが直交する弱軸タイプを 6 体とした。強軸タイプについては、タイトフィットビスを 2 本直列に配した強軸 2 本タイプ (ビスピッチ $7d=49\text{mm}$) についても 2 体、試験した。

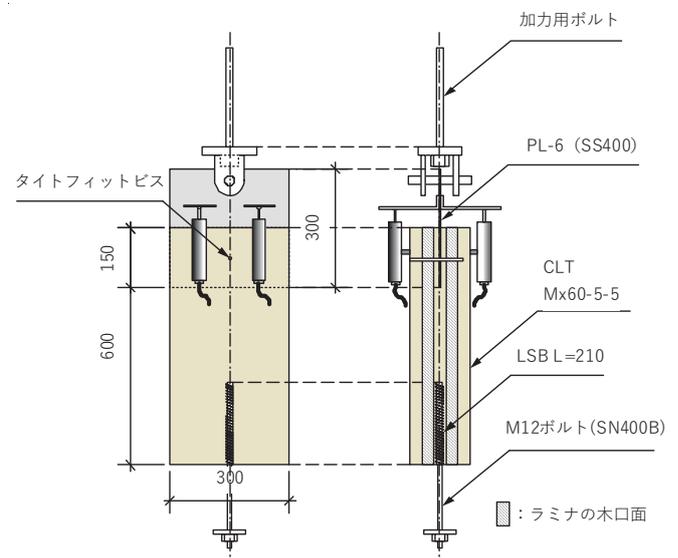


図 3-5 ビスの 2 面せん断用試験体 (強軸)

3.2.2. 結果と考察

タイトフィットビスを打ち込むのにかかる時間は、前回のアルミプレートで約 15 秒に対して、炭素鋼プレートで約 25 秒 (いずれも $t=6\text{mm}$) であった。ビスの終局状態の写真を図 3-6 に示す。鋼板が引き抜かれるとタイトフィットビスが曲げ変形する様子が分かる。ビス頭側が木材に引っかかること、 $t=150\text{mm}$ の CLT に $L=133\text{mm}$ のビスを面いちで打ち込んでおり偏心していることの原因から、ビス先の方が引抜かれる量が大きかった。また $L/d=133/7 > 8$ であるせいもあってヨーロッパ型降伏理論 (EYT 式) におけるモード IV となり、十分な変形性能を有する抵抗機構であった。

得られた荷重変位関係について強軸タイプを図 3-7 に、弱軸タイプを図 3-8 に示す。図 3-6 には強軸 2 本タイプの荷重値を 2 で除し、1 本あたりの性能値として 2 体分の結果を赤線で示した。この結果から接合具間距離を適切にとることで、本数倍の性能が得られることが分かった。各特性値を表 3-1 にまとめた。強軸タイプは弱軸タイプに比べて、剛性は 28% 高く、最大耐力が 18% 低いことが分かった。基準耐力 T_0 は強軸タイプについては $2/3P_{\text{max}}$ で決定し、弱軸タイプについては P_y で決定した。

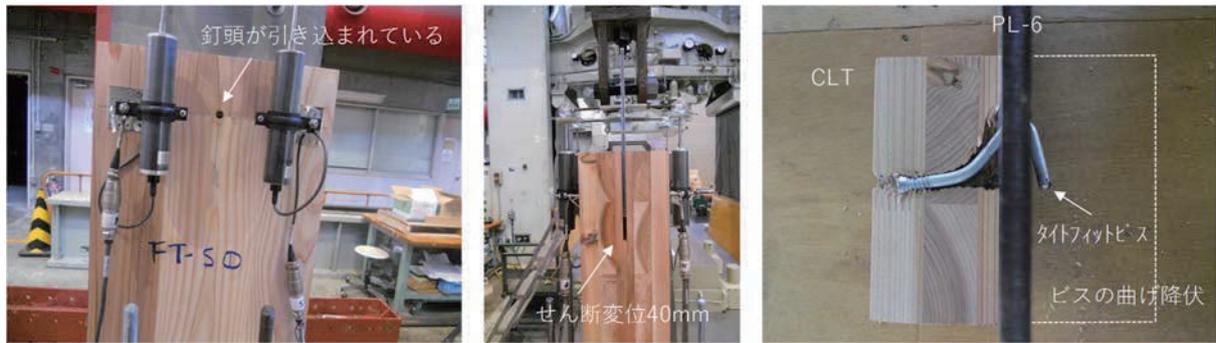


図 3-6 タイトフィットビスの曲げ変形（終局状態）

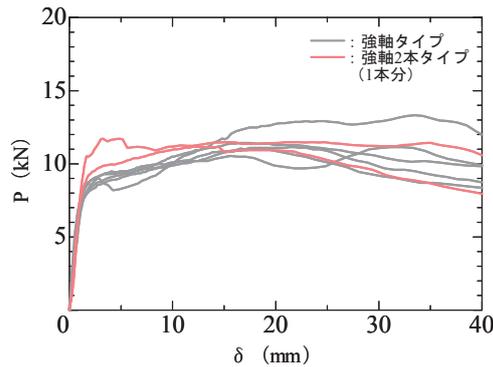


図 3-7 荷重変位関係（強軸タイプ）

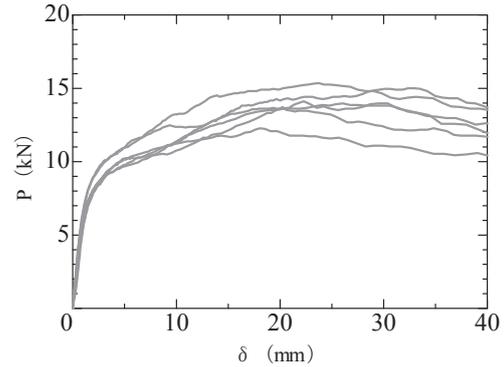


図 3-8 荷重変位関係（弱軸タイプ）

表 3-1 タイトフィットビスの特性値（左：強軸タイプ、右：弱軸タイプ）

強軸	Pmax	δ max	2/3Pmax	Py	δ y	K	弱軸	Pmax	δ max	2/3Pmax	Py	δ y	K
	kN	mm	kN	kN	mm	kN/mm		kN	mm	kN	kN	mm	kN/mm
1	11.1	21.4	7.43	8.14	1.41	5.79	1	13.7	19.3	9.11	8.33	1.59	5.24
2	11.4	16.5	7.62	7.70	1.40	5.51	2	12.3	18.1	8.19	7.57	1.61	4.71
3	13.3	33.5	8.88	8.36	1.87	4.46	3	15.0	32.4	10.01	8.40	2.22	3.78
4	11.1	17.5	7.39	7.64	1.41	5.43	4	14.0	26.1	9.31	8.12	2.21	3.67
5	11.1	31.2	7.43	8.16	1.34	6.11	5	15.4	23.7	10.24	8.88	1.91	4.64
							6	14.1	22.3	9.41	8.34	2.22	3.75
ave	11.6	24.0	7.7	8.0	1.5	5.5	ave	14.1	23.6	9.4	8.27	1.96	4.30
SD	0.96	7.85	0.64	0.31	0.22	0.62	SD	1.1	5.2	0.7	0.42	0.3	0.65
ばらつき係数			0.80	0.90			ばらつき係数			0.82	0.88		
T0			6.18	7.22			T0			7.68	7.29		

3.3. HTB 摩擦接合部のせん断試験（面内加力）

3.3.1. 試験体と試験方法

本試験では M24 の高力ボルト 2 本を使用して摩擦接合では変形させず、ビスのせん断性能に期待する設計とした。試験体のせん断面積（鋼板面積）は、以前の倍としている。鋼板の図面と写真を図 3-9 に、試験体図面を図 3-10 にそれぞれ示す。またセットアップの写真を図 3-11 に示す。高力ボルトの締付けトルクは 810kNm とした。加力方法は正負交番 1 回繰返しとし、繰返しスケジュールはマニュアル²⁾の方法に従って、前回の試験から得た δ y の倍数で設置した。せん断面 1 面あたりのビス数を試験パラメータとし、48 本、28 本、20 本の 3 種類で、試験体数は各 1 体とした。図 3-10 に示すように、試験体はひとつの主材とふたつの側材から構成されている。主材側と側材側それぞれに、図 3-9 で示した鋼板を所定のビス本数で打ちとめ、それぞれの鋼板に事前加工した高力ボルト用の孔を利用して、高力ボルトで接合する方式である。側材側の

ビスは CLT の厚さ方向からビスが打たれるため、すべてのビスが同様の性能を発揮すると考えられる。一方、主材側は、CLT の木口面から打たれることになるため、CLT の構成上ビスの位置によっては、ラミナの木口に打たれるもの（繊維平行ビス）と、ラミナの板目、柃目あるいはその中間に打たれるもの（繊維直交ビス）の 2 種類があり、それぞれでせん断性能が異なるものと考えられる。そのためビスを打つ数だけでなく、打つ位置も重要な影響因子である。ビスの数を 48 本、28 本、20 本とした場合の、試験体のそれぞれのビス位置を図 3-12 に示す。48 本と 28 本については繊維平行ビスと繊維直交ビスが混在しており、28 本では縁端距離を多めにとっている。20 本については縁端距離を多めにとった上で、繊維平行ビスがないように配置した。

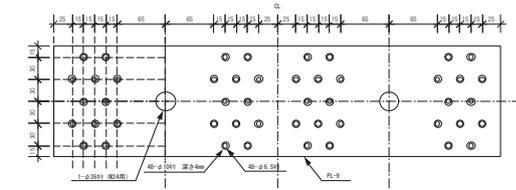


図 3-9 HTB 摩擦接合用鋼板

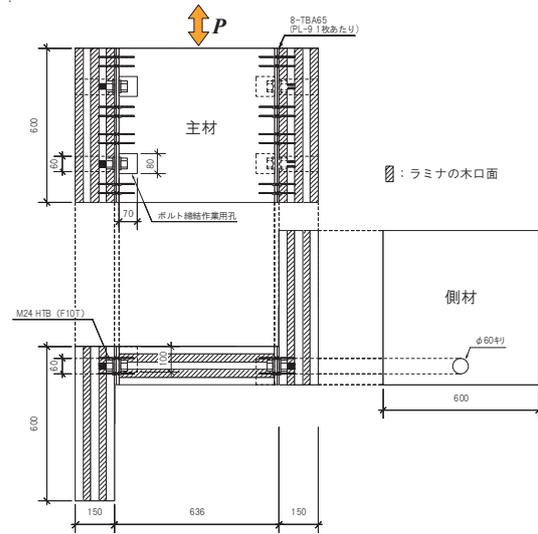


図 3-10 HTB 摩擦接合試験体



図 3-11 HTB 摩擦接合試験体セットアップ

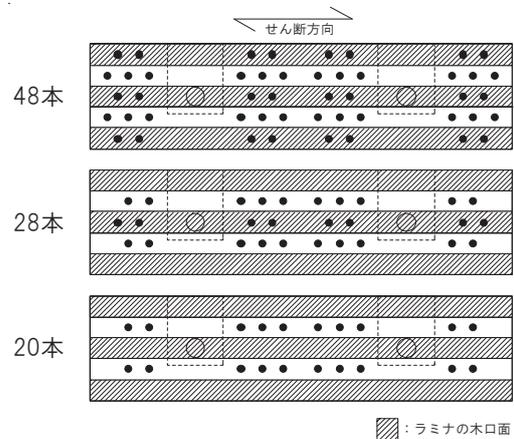


図 3-12 主材側 CLT におけるビスの本数と位置

3.3.2. 結果と考察

面内方向に加力した試験後の写真と、ビス 48 本の主材側、側材側のせん断面の破壊性状を図 3-13 に示す。側材側のビスはほとんど変形しておらず、主材側のせん断変形が卓越していることが分かる。主材側では部分的にラミナ同士のずれが確認できた。正負交番繰り返し加力によって得られた結果を包絡線（正側のみ）として図 3-14 に示す。また、特性値を表 3-2 に示す。これらの結果から、繊維平行ビスと繊維直交ビスの 1 本あたりの剛性や耐力が異なることが示唆された。

例えば、表 3-2 の P_y （赤線囲み部分）についてみると、20 本の試験体から繊維直交ビスの 1 本あたりの耐力 ΔP_{\perp} は 4.0kN、28 本の試験体から繊維直交ビス 20 本分の耐力を差し引き繊維平行ビス 8 本分で割る

と、繊維平行ビス 1 本あたりの耐力 ΔP_{yl} は 2.5kN となる。これらの値から 48 本の試験体の全体耐力を計算すると、 $4.0\text{kN} \times 24 \text{本} + 2.5\text{kN} \times 24 \text{本} = 156\text{kN}$ となるが、実際の試験結果では 182kN 程度と比較的高い。面積あたりに打たれるビスの数が増加すると多列本効果が働き耐力が下がると想像されたが、そのような結果は得られなかった。したがって、今回のように加力方向に多列本ビスを打つ場合であっても 2.5d ピッチ以上を確保していれば、少なくとも耐力については加算側が成り立つことが確認されたが、合計値の妥当性についてはさらなる検討が必要であると思われる。

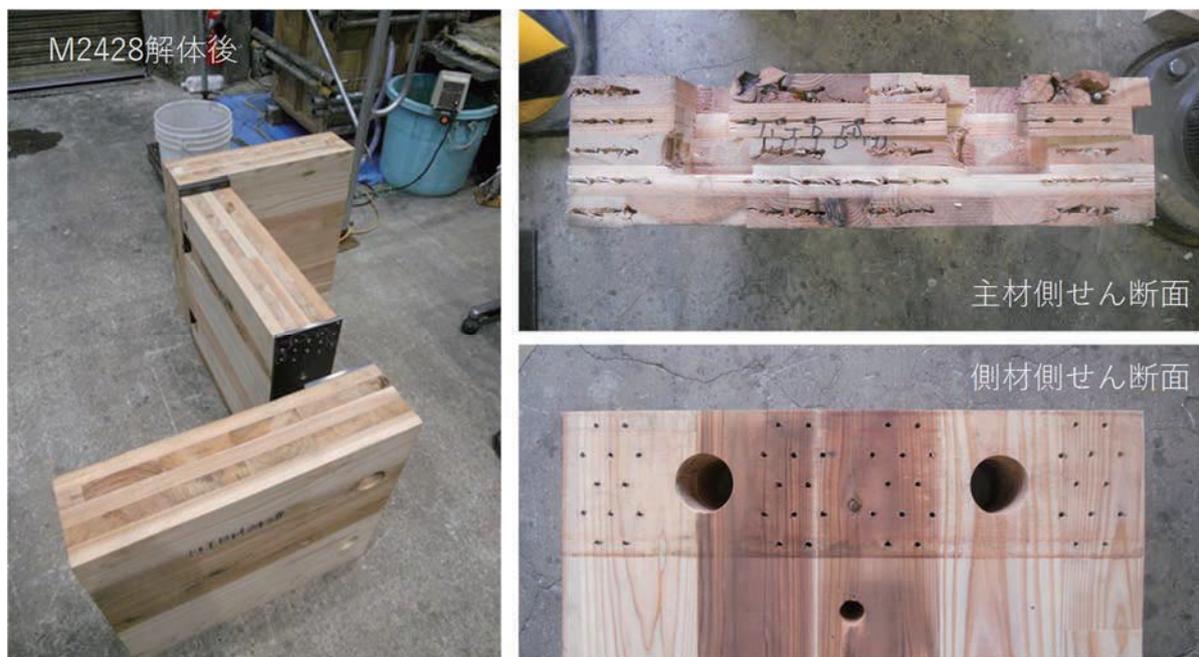


図 3-13 試験後の主材側、側材側のせん断面

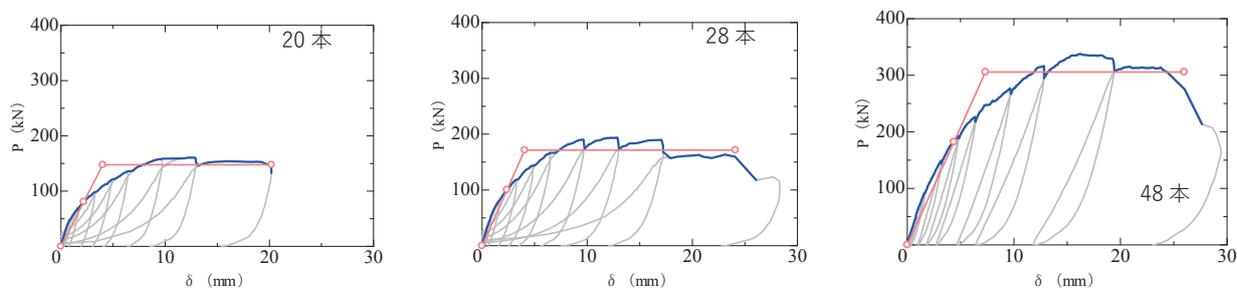


図 3-14 得られた包絡線（正側のみ）

表 3-2 特性値

試験体名	ビス本数 本	Pmax kN	δ max mm	K kN/mm	$K_{2\text{mm}}$ kN/mm	P_y kN	δ_y mm	P_u kN	δ_v mm	δ_u mm	$\mu = \delta_u / \delta_v$
HTBM2420	20	160.93	12.84	36.8	38.5	80.7	2.19	147.7	4.01	20.2	5.04
HTBM2428	28	193.72	12.88	42.3	45.7	100.4	2.37	171.6	4.06	24.1	5.93
HTBM2448	48	337.78	16.26	41.6	53.4	182.1	4.37	305.9	7.34	26	3.54

4. CLT の音響性能検証実験

実証建物内に発生音の大きな設備機器等を設置する場合には、CLT で構成される外壁に対して高性能な空気音遮音性能が求められる。しかし、CLT 単体、および CLT 複合壁に関する遮音性能を想定するための既往データは少ない。そこで、実証棟で適用予定の CLT 材に関して基本的な音響特性を知るための測定を行った。

4.1. 測定方法

4.1.1. 試験体の条件

試験体は Mx60-5-7 の CLT パネルで厚さは 210mm である。当社残響室の試験用開口（W3.98m×H2.95m）に対して W1.85m×H2.92m の部材 2 枚を並べて設置し、試験体と開口との間には集成材と合板を設置して、隙間を埋めた。CLT パネル相互および集成材と CLT との突合わせ部は斜めビス（ $t=90\text{mm}$ ）で接合し、当該部位に対して隙間処理を行わない（条件 1）、油土詰めとする（条件 2）の 2 条件について測定を行った。その他の部位は油土もしくはシールで隙間処理を行い遮音欠損が生じないようにした。試験体の設置状況を図 4-1 に、隙間処理の方法を図 4-2 に示す。

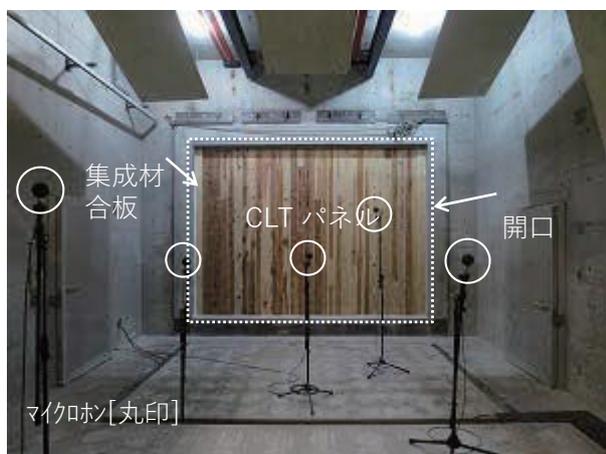


図 4-1 試験体の設置状況（音源室）

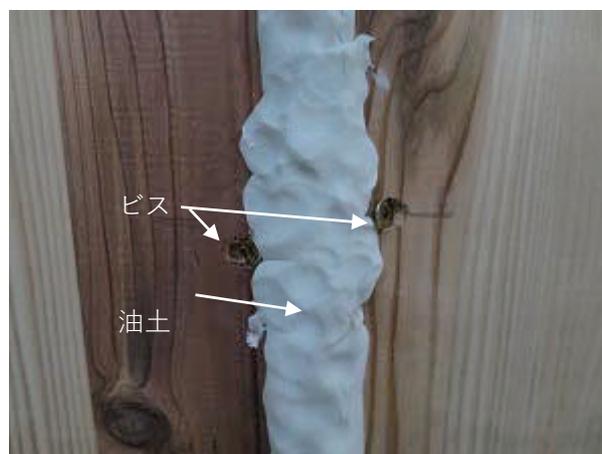


図 4-2 試験体の隙間処理（油土詰め）

4.1.2. 測定対象と評価方法

測定対象は音響透過損失とし、JIS A 1416 : 2000（実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法）に準拠して測定する。試験室における試験状況を図 4-3 に示す。

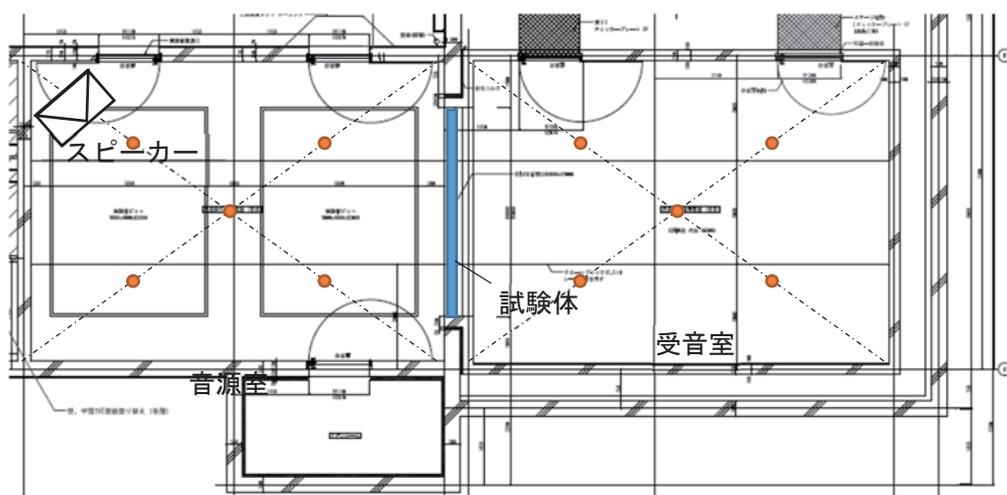


図 4-3 残響室における音響透過損失試験

● : 受音点

測定対象の周波数帯域は、100Hz～5000Hz で、対象周波数範囲の全体に渡って連続的なスペクトルを持つ定常音をスピーカーから発生させ、音源室および受音室に設置した5点のマイクで音圧レベルを測定する。また、受音室の残響時間を測定し、以下の式から音響透過損失 (R) を算出する。

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad \dots (1)$$

ここに、
 L_1 : 音源室における室内平均音圧レベル (dB)
 L_2 : 受音室における室内平均音圧レベル (dB)
 S : 開放した試験開口に等しい広さの試料の面積 (m²)
 A : 受音室の等価吸音面積 (m²)

$$A = \frac{0.16V}{T} \quad \dots (2)$$

ここに、
 A : 等価吸音面積 (m²)
 V : 受音室の容積 (m³)
 T : 受音室の残響時間 (s)

測定した音響透過損失は、JIS A 1419-1 : 2000 (建築物および建築部材の遮音性能の評価方法—第1部 : 空気音遮断性能) 附属書 1 に準拠して評価する。音響透過損失の測定値 (125Hz～2 kHz) を附属書 1 図 1 に示す評価曲線へ転記し、その値が全ての周波数帯域においてある曲線を上回るとき、その最大の曲線に付けられた数値によって遮音等級を表す。ただし各周波数帯域において測定結果が等級曲線の値より最大 2dB まで下回ることを許容する。1/3 オクターブバンド測定値は下式で 1/1 オクターブバンドへ変換し、評価に用いる。

$$X_{1/1} = -\log_{10} \frac{10^{-X_{1/3,1}/10} + 10^{-X_{1/3,2}/10} + 10^{-X_{1/3,3}/10}}{3} \quad \dots (3)$$

ここに、
 $X_{1/1}$: オクターブバンドの値
 $-X_{1/3,1}, -X_{1/3,2}, -X_{1/3,3}$: 当該オクターブバンドに含まれる
 三つの 1/3 オクターブバンドにおける値

4.2. 測定結果

音響透過損失の測定結果を図 4-4 に示す。CLT パネル相互や CLT と集成材との突合わせ部の隙間を未処理とした場合 (条件 1) は Rr-35 であり、突合わせ部を油土詰めした場合 (条件 2) も Rr-35 で、両者は評価ランクとしては同一であった。しかし、500Hz 帯域以上では隙間を油土でふさいだ (条件 2) の音響透過損失が高く、施工時の隙間処理の違いが遮音性能に影響することを示している。

図 4-4 にはスギ材による CLT の一般的な密度 (400kg/m³) を用いて、質量則 (音場入射条件) における音響透過損失を予測した値を併せて示す。隙間の影響を除いた (条件 2) は、160Hz～250Hz を中心として質量則から落ち込み、その後、約 7dB/oct. の割合で性能が向上して 1.6kHz で質量則と同等となる。それより上の周波数帯域では、3.15kHz を中心として第 2 の落ち込みが見られる。

150mm 厚 (Mx60-5-5) の CLT 単板の音響透過損失を測定した結果³⁾ においても、250Hz 付近と 3.15kHz 以上の帯域で音響透過損失の低下が見られており、2ヶ所で性能低下が生じる点で傾向が類似している。本測定により、210mm 厚の CLT 単板に関する基本的な音響特性が確認された。

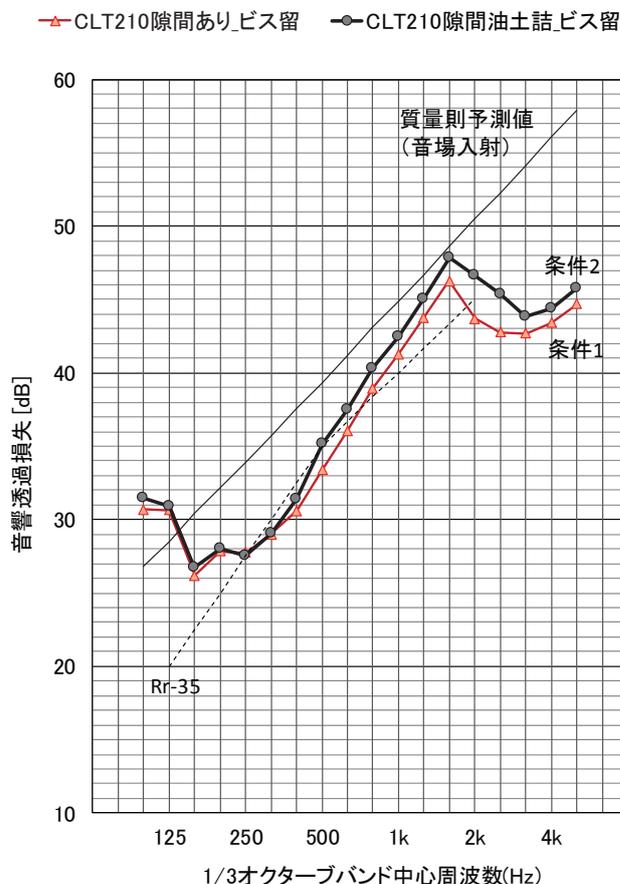


図 4-4 音響透過損失の実測結果

5. まとめ

本事業で実施した建築計画（設計）と性能検証実験の成果は以下のようにまとめられる。

【建築計画】

- 1) 材料歩留まりを向上するため、CLT パネルは矩形断面とする
- 2) 外装のコストダウンのため、外皮はシンプルな形状とする
- 3) 雨仕舞に十分な注意を払う仕様とする
- 4) CLT パネルで面トラス架構を形成し、構造空間の要請に応える
- 5) 展開構造により、施工合理化を図る

【性能試験実験】

- 1) CLT パネルの接合部の性能
 - ・引張り用 LSB 接合部はボルトを伸ばすことで変形性能を大きくすることができた。LSB とボルトの耐力比を十分確保できてさえいれば、ボルトが破断しても交換すれば 2、3 回の複数回利用が可能である。
 - ・せん断用接合部について、5 種類の接合方式を提案し面内と面外の各せん断性能について確認することができた。中でも HTB 摩擦接合による方式は、経済性と施工性が高かった。
 - ・面外方向に斜めビスが加力される時ビスの軸方向にせん断力が作用することになるため、トラス効果が働いてビスの曲げ変形が卓越する面内方向加力に比べて剛性が 6 倍程度高くなる結果が得られた。
 - ・木材と鋼板を先孔なく一度に打抜きとめつけるタイトフィットビスの施工時間を測定し、6mm 厚のアルミ板で約 15 秒、炭素鋼（SS400）で約 25 秒かかることが確認できた。また CLT パネルの強軸方向と弱軸方向の各方向に対して、タイトフィットビスのプレート挿入型の 2 面せん断試験を行ってせん断特性値を得た。
- 2) CLT パネルの音響性能
 - ・CLT パネル相互の突合せ部やパネル 4 周を未処理とした場合と、油土詰めとした場合とで試験を行ったところ、両者の評価ランクは同等で Rr-35 であった。ただし、500Hz 帯域以上では、油土詰めの音響透過損失が高いことが確認された。

引用文献

- 1) CLT handbook, US edition; FPIInnovations and Binational Softwood Lumber Council, 2013
- 2) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル；（公財）日本住宅・木材技術センター発行、PP.156-158、2016
- 3) CLT を用いた界壁の空気音遮断性能に関する基礎的研究；平光厚雄、他；日本建築学会大会学術講演梗概集、pp175-176、2015