

2. 1 2 (株)フォレストヴィラホーム/ライフデザイン・カバヤ(株)

2. 1 2. 1 建築物の仕様一覧

事業名		株式会社フォレストヴィラホーム社屋新築工事の設計実証		
実施者 (担当者)		(株)フォレストヴィラホーム/ライフデザイン・カバヤ(株) (竹内 幸生)		
建築物の概要	用途	事務所		
	建設地	福岡県福岡市		
	構造・工法	CLTパネル工法		
	階数	5		
	高さ (m)	19.520 m		
	軒高 (m)	18.678 m		
	敷地面積 (㎡)	954.48 m ²		
	建築面積 (㎡)	196.83 m ²		
	延べ面積 (㎡)	933.05 m ²		
	階別面積 (㎡)	1階	190.10 m ²	
2階		193.81 m ²		
3階		193.81 m ²		
4階		193.81 m ²		
5階		161.52 m ²		
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、床、屋根	
	CLT使用量 (m ³)		加工前製品量305.28m ³ 、建築物使用量275.95m ³	
	壁パネル	寸法	210mm厚、168mm厚	
		ラミナ構成	5層7プライ	
		強度区分	S90A相当	
	床パネル	寸法	90mm厚、120mm厚	
		ラミナ構成	3層3プライ、3層4プライ	
		強度区分	S60A相当	
	屋根パネル	寸法	90mm厚	
		ラミナ構成	3層3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)		柱・梁：オウシュウアカマツ集成材	
	木材使用量 (m ³) ※構造材、羽柄材、下地材、仕上材等とし、CLT以外とする		105.33m ³	
仕上	主な外部仕上	屋根	改質アスファルト防水	
		外壁	塗膜系サイディング	
	主な内部仕上	開口部	アルミサッシ	
		界壁	ビニールクロス	
		間仕切り壁	ビニールクロス	
床	カーペット			
天井	岩綿吸音板			
構造	構造計算ルート		ルート3	
	接合方法		金物接合	
	最大スパン		5.46m	
問題点・課題とその解決策		問題点・課題：CLTパネル工法による5階建てオフィスは事例が存在せず、標準的な仮定断面、接合性能などが公開されていない。また耐火被覆により木造躯体を現しとできず、“木造らしさ”の表現が難しい。 解決策：林野庁補助事業にて公開された「中規模オフィスの標準モデル」の設計手法（モジュール設計/接合金物/概算壁倍率など）を導入し、さらに耐火被覆が不要な”CLT現し壁（耐震要素）”の実大実験による設計検証を実施した。		
防火	防火上の地域区分		法22条区域	
	耐火建築物等の要件		有	
本建築物の防耐火仕様		1階:90分耐火構造、2~5階:60分耐火構造		
問題点・課題とその解決策		問題点・課題：内装制限の対象となる建築物で、CLT制振壁を現しとする。 解決策：1階は告示仕様で天井準不燃材にすることで壁の制限を緩和、2~5階は100㎡以内ごとに防火区画をすることで内装制限を緩和させた。		
温熱	建築物省エネ法の該当有無		有	
	温熱環境確保に関する課題と解決策		課題：外壁のCLT壁部分とその他壁部分とで温熱環境(断熱、防露、気密性能)が異なる。 解決策：CLT壁部分はCLTの断熱性能を考慮して断熱材なし、その他壁部分はCLT材の厚みと熱貫流率からCLT部分と同等以上の断熱性能となる材料とし、室内側に防湿フィルムを施工する事で温熱環境の均質化を図った。	
	主な断熱仕様 (断熱材の種類・厚さ)	屋根 (又は天井)	フェノールフォーム断熱材 50mm	
外壁		高性能グラスウール20K 140mm		
床		高性能グラスウール20K 230mm		
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		-	
	建て方における課題と解決策		-	
	給排水・電気配線設置上の工夫		-	
	劣化対策		-	
工程	設計期間		2025年5月~2026年3月 (11ヵ月)	
	施工期間		2026年6月~2027年3月 (10ヵ月)	
	CLT躯体施工期間		2026年9月上旬~中旬 (3週間)	
竣工 (予定) 年月日		2027年4月30日		
体制	発注者		株式会社フォレストヴィラホーム	
	設計者 (複数の場合はそれぞれ役割を記載)		意匠設備設計: 株式会社幸 建築&環境設計	
	構造設計者		株式会社構造計画研究所	
	施工者		株式会社フォレストヴィラホーム	
	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		

2. 1 2. 2 実証事業の概要

実証事業名：株式会社フォレストヴィラホーム社屋新築工事の設計実証

建築主等／協議会運営者：(株) フォレストヴィラホーム／ライフデザイン・カバヤ (株)

1. 実証した建築物の概要

用途		事務所		
建設地		福岡県福岡市		
構造・工法		CLT パネル工法		
階数		5		
高さ (m)		19.520	軒高 (m)	18.678
敷地面積 (m ²)		954.48	建築面積 (m ²)	196.83
階別面積 (m ²)	1階	190.10	延べ面積 (m ²)	933.05
	2階	193.81		
	3階	193.81		
	4階	193.81		
	5階	161.52		
CLT 採用部位		壁、床、屋根		
CLT 使用量 (m ³)		加工前製品量 305.28 m ³ 、加工後建築物使用量 275.95 m ³		
CLT を除く木材使用量 (m ³)		105.33 m ³		
CLT の仕様	(部位)	(寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種)		
	壁	210mm.168mm 厚/5層7プライ/S90A 相当/ヒノキ		
	床	90mm.120mm 厚/3層3プライ. 3層4プライ/S60A/相当/スギ		
	屋根	90mm 厚/3層3プライ/Mx60A 相当/スギ		
設計期間		2025年5月～2026年3月 (11ヵ月)		
施工期間		2026年6月～2027年3月 (10ヵ月) 予定		
CLT 躯体施工期間		2026年9月上旬～中旬 (3週間) 予定		
竣工 (予定) 年月日		2027年4月30日		

2. 実証事業の目的と設定した課題

本PJでは実例の少ないCLT中層建築の普及推進を目指して、純CLT造5階建ビルの設計実証を行った。以下に実証した内容を示す。

- ①令和6年度林野庁補助事業にて公開された「中規模オフィスの標準モデル」の設計手法を積極的に取り入れ、基本モジュールを意識したプランニング、検証された接合金物等を活用した構造設計検証を実施した。
- ②一般の方にもわかりやすい木造ビルの実現を目指し、ファサードデザインに寄与し、耐

震性能も向上させる CLT 現し壁（有孔 CLT 耐震壁）の実験検証として、鋼製ダンパー金物要素試験／実大壁試験を実施した。

3. 協議会構成員

- (建築主・設計) 株式会社フォレストヴィラホーム：中安章、吉田壮史、中村健志
(意匠設計) 株式会社幸 建築&環境設計：井上幸夫、池田和明
(構造設計) 株式会社構造計画研究所：篠原昌寿、野田卓見、瀬戸滉平、金弘宗
(施工) 株式会社フォレストヴィラホーム：中安章
(材料) ライフデザイン・カバヤ株式会社：守谷和弘、竹内幸生、平田拓也、友廣陽一
永田創一、難波和也
銘建工業株式会社：西本将晴
(実験) BX カネシン株式会社：榎田剛

4. 課題解決の方法と実施工程

①「中規模オフィスの CLT 標準モデル」の設計手法を積極的導入
→設計初期より本手法を参考に、意匠構造設備と意識を合わせてプランニングや防耐火考えて計画した。構造に関しては主に”モジュール計画”と”概算壁量検討”を用いた計画と言える。標準モデルでは 2mモジュールを採用されていたが、本計画では敷地の関係から尺モジュールを採用し 1.82m モジュールを主として計画した。また、1.82m 幅の壁を 3 枚連続した CLT 架構配置を用いることで概算壁倍率 20-25 倍の耐力が発揮される既往の成果を活かした壁量検討を行うことで、複雑な構造計算を初期で省略し、意匠とプランニングを進めることができた。またモジュールを意識した計画と検討された金物の利用により、CLT パネル工法の課題でもある直交部材との接合干渉も極力少なくする計画とすることができた。

②CLT 現し壁（有孔 CLT 耐震壁）の実験検証

「鋼製ダンパー金物の要素試験」：鋼製ダンパー金物単体の要素試験を実施し、想定した鋼材の履歴特性や靱性を確認し、既往文献による計算値とも照査し計算値の妥当性を確認した。

「実大壁試験」：試験体は採用した本命の LSB 仕様（有孔）を 3 体、比較検証用として孔の有無による比較用として LSB 仕様（無孔）、接合仕様を変更した鋼板挿入 DP 仕様（有孔）の合計 5 体を実施した。

→実験検証の結果、いずれの試験体も想定した性能を得られることが確認でき、施工性と費用面を比較することで「LSB 仕様」を採用することにした。またこれらの実験結果と検証した解析モデルとの照査により妥当性を確認した上で、建物全体モデルへの導入を行った。

<協議会の開催>

- 令和7年7月：第1回開催、問題点洗い出し
- 8月：第2回開催、基本設計内容確認
- 9月：第3回開催、実施設計前内容確認
- 10月：第4回開催、実施設計内容、実験内容確認
- 11月：第5回開催、壁試験
- 12月：基本設計及び壁試験の整理
- 令和8年1月：第6回開催、実証事業の取りまとめ検討

<設計>

- 令和7年6月：基本設計
- 10月：実施設計、コスト検証、実験
- 12月：実施設計まとめ、概算見積
- 令和8年1月：積算、設計まとめ、申請準備

<性能確認>

- 令和7年11月：実験

5. 得られた実証データ等の詳細

「鋼製ダンパー金物の要素試験 (BX カネシン社で試験)」：鋼製ダンパー金物単体の要素試験を実施し、想定した鋼材の履歴特性や靱性を確認し、既往文献による計算値とも照査し計算値の妥当性を確認した。

「実大壁試験 (BX カネシン社で試験)」：試験体は採用した本命の LSB 仕様 (有孔) を3体、比較検証用として孔の有無による比較用として LSB 仕様 (無孔)、接合仕様を変更した鋼板挿入 DP 仕様 (有孔) の合計5体を実施した。

6. 本実証により得られた成果

本プロジェクトは、実例の少ない純 CLT 造 5 階建てビルの普及を目指し、令和 6 年度林野庁補助事業の「中規模オフィスの標準モデル」で示されたモジュール設計と接合金物を用いた設計実証、およびファサードで活用できる新たな耐震要素の実験検証を行った。

・木造モジュールである 1.82m モジュールに設定し、「5 階建て CLT 標準設計モデル」で記載されている接合金物および概算壁倍率を用いることで、設計初期より意匠とプランニング調整を比較的スムーズに実施でき、接合部での干渉が少なく合理的に設計を進めることが確認できた。

・意匠性と耐震性能を両立させる有孔 CLT 耐震壁の設計開発では、鋼製ダンパー金物の要素試験、実大壁試験を実施し、CLT パネルに長期荷重を負担させずメンブレン被覆できる収まりを想定した接合 (現し設計) とした試験体も期待した性能を有することが確認でき、中層建築に必要な剛性と耐力を十分に備えていることを実証した。

2. 1 2. 3 成果物

1) 設定した課題

本PJでは実例の少ないCLT中層建築の普及推進を目指して、純CLT造5階建ビルの設計実証を実施した。以下に実証した内容を示す。

- ① 令和6年度林野庁補助事業にて公開された「中規模オフィスの標準モデル」の設計手法を積極的に取り入れ、基本モジュールを意識したプランニング、検証された接合金物等を活用した構造設計検証を実施した。
- ② 一般の方にもわかりやすい木造ビルの実現を目指し、ファサードデザインに寄与し、耐震性能も向上させるCLT現し壁（有孔CLT耐震壁）の実験検証として、鋼製ダンパー金物要素試験／実大壁試験を実施した。

2) 構造概要

図-1にプロジェクト概要を示す躯体パースと実験検証した一例を示す。構造種別は木造CLTパネル工法であり、X方向のファサードに有孔CLT耐震壁を配置した計画としている。構造計算はルート3としてCLTパネル工法告示の構造計算を満足することを確認する。以下、構造の特徴を説明する。

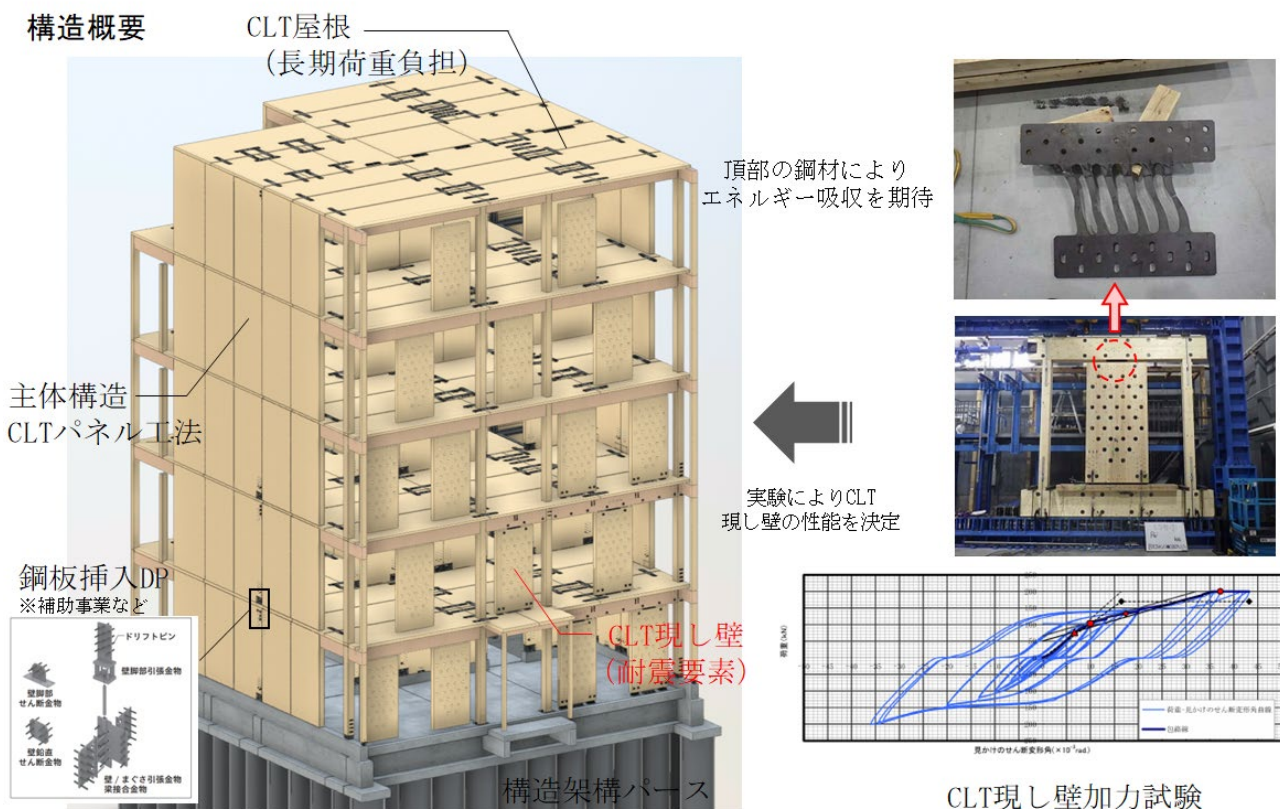


図-1 構造架構パースと実験検証

① 有孔 CLT 耐震壁について

- 有孔 CLT 耐震壁の採用に際しては、鋼製ダンパー金物の要素試験及び、有孔 CLT 耐震壁の実大壁試験を実施し構造性能を検証し、構造計算で用いる解析モデルの妥当性を確認し、建物の構造計算に導入する。
- 鋼製ダンパー金物は、鋼板を一部楕状にスリット孔の加工した PL であり、楕状部が水平方向に変形に対して、曲げせん断変形することにより鋼材のエネルギー吸収性能を発揮し、鋼材の降伏により CLT パネルに発生する応力を一定に抑える役割を有する。
- 有孔 CLT 耐震壁は、1 次設計においては鋼製ダンパー金物 (SN400B) が降伏耐力以内であることを確認し、2 次設計においては実験により確認された変形能力を有するバイリニア要素として扱うことで耐震設計に反映する。
- 有孔 CLT 耐震壁は集成材梁との接合面にメンブレン被覆を施す隙間を設けており、かつ鋼製ダンパー金物の上部は鉛直スリット孔とすることで長期荷重を負担させない収まりとしている。これにより耐火被覆不要な耐震要素として“CLT 現し壁”を利用する。なお、構造計算においても軸力が生じないように計算を行う。
- なお、有孔 CLT 耐震壁は、既往 PJ において鉄骨造への壁要素として設計開発検証¹⁾されており、本 PJ では 5 階建て CLT パネル工法建築物への導入を目指して実験検証を実施した。

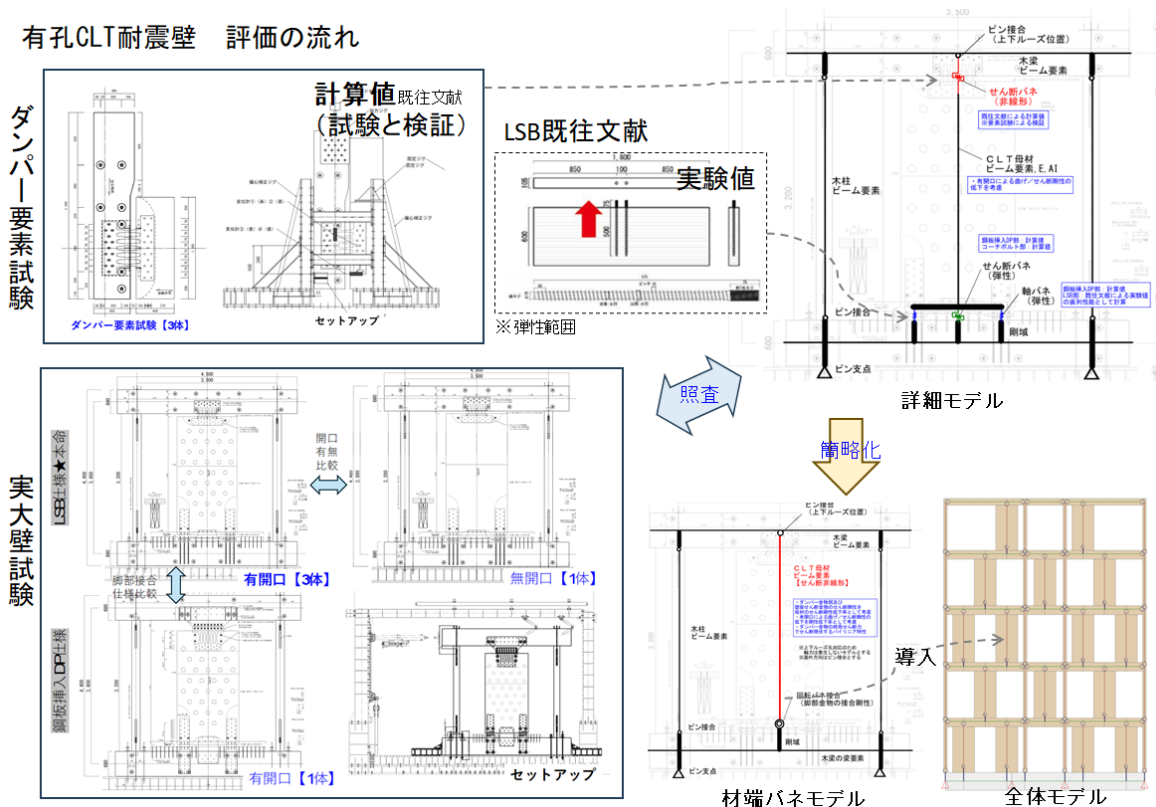


図-2 有孔 CLT 耐震壁の評価の流れ

1) 令和 6 年度林野庁補助事業 建築用木材供給・利用強化対策のうち CLT・LVL 等の建築物への利用環境整備事業のうち CLT・LVL 等を活用した建築物の低コスト化・検証等 「(仮称)鮎政様本店テナントビル新築工事の設計実証 事業報告書」, 2025 (令和 7) 年 3 月

② 林野庁補助事業の「CLT 標準設計モデル」の活用

- ・ 令和6年度林野庁補助事業「中規模オフィスの標準モデル」の設計手法を基に、基本モジュール設定や、検証された接合金物等を積極的に採用した構造計画とする。
- ・ 本計画では基本モジュールを1.82mとし、幅1820mm×厚210mmのS90-5-7(ヒノキ)を基本のCLT壁パネルとして選定する。主な柱と梁はオウシュウアカマツ集成材として、柱210×210、梁210×450(105×450の2丁合わせ)をモジュールに合わせて配置した。床はCLT(スギ)として2FLを120厚、3～RFLまでを90mmとした。
- ・ 最大スパンは5.46mとして、梁材は一般流通材の105×450×6000を極力活用する計画とした。
- ・ 基本モジュールに合わせて干渉防止した接合金物として計算により評価可能で、かつ林野庁補助事業により一部実験検証もされた「鋼板挿入ドリフトピン接合」²⁾を採用する。
- ・ 構造計算には「材端バネモデル」³⁾を採用し、市販の一貫構造計算プログラムを用いる。

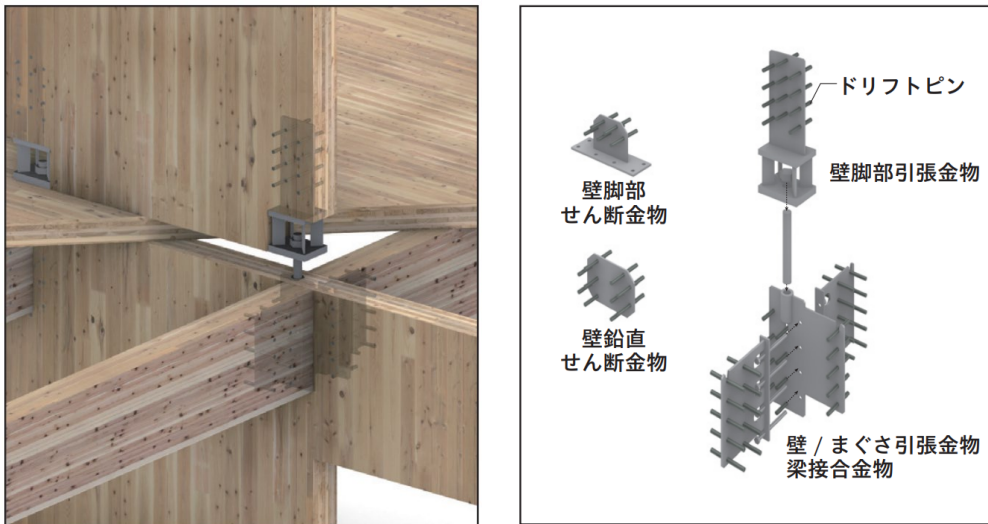


図-3 モジュール計画に合わせた直交小梁との干渉を防止した接合金物²⁾

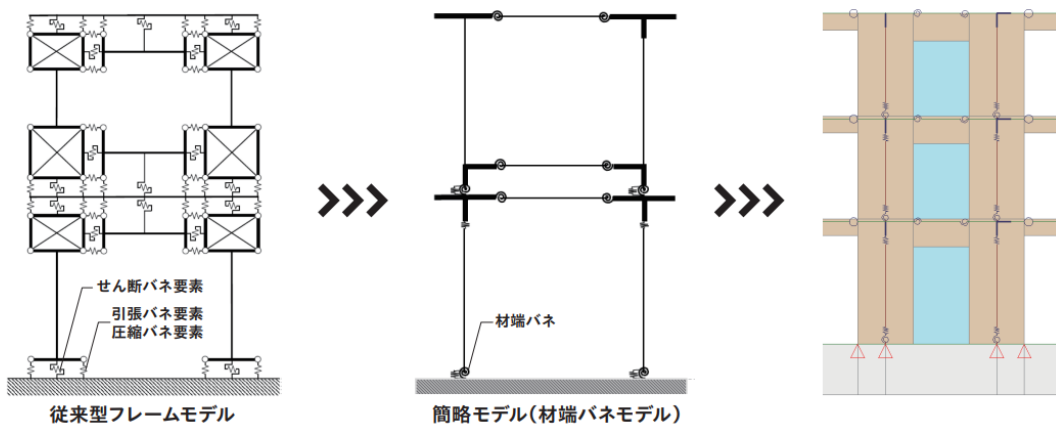


図-4 構造計算モデル(材端バネモデル)³⁾

2) 一般社団法人日本 CLT 協会, 公益財団法人日本住宅・木材技術センター. 令和5年度 建築用木材供給・利用強化対策のうち CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等 「CLT パネル工法建築物の標準設計、プログラムの開発検討 事業報告書」, 2024(令和6)年3月

3) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター. 「2024年版 CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル」, 2024(令和6)年.

③ 耐震設計と概算壁量

- ・ X方向は「小幅パネル架構+有孔CLT耐震壁」、Y方向は「小幅パネル架構」を採用しており、いずれの方向も偏心を抑えるためバランスよく壁量を配置している。
- ・ 林野庁補助事業の「5階建てCLT標準設計モデル」で記載されている以下の概算壁倍率⁴⁾を用いて、設計初期より意匠とプランニングの調整を行った。設計初期は以下Cタイプである「3枚連続架構（壁壁鉛直せん断金物による接合）」を主として計画を進めたが、意匠との調整により最終的には、X方向はB、C、Dタイプを組み合わせ、さらに有孔CLT耐震壁を配置した。Y方向はCタイプの3枚連続壁と、5枚連続壁架構を配置する計画として、応力解析による確認を行った。
- ・ 次項にX方向、Y方向それぞれの1次設計用地震力（1階）に対する配置した壁長さあたりの必要壁倍率を示す。本設計はZ=0.8であるが、Z=1.0とした場合の必要壁倍率は約20~22倍であり、以下の表に示す概算倍率程度で壁量を配置した計画となる。これらの概算より有孔CLT耐震壁の必要性も20倍程度と設定した。





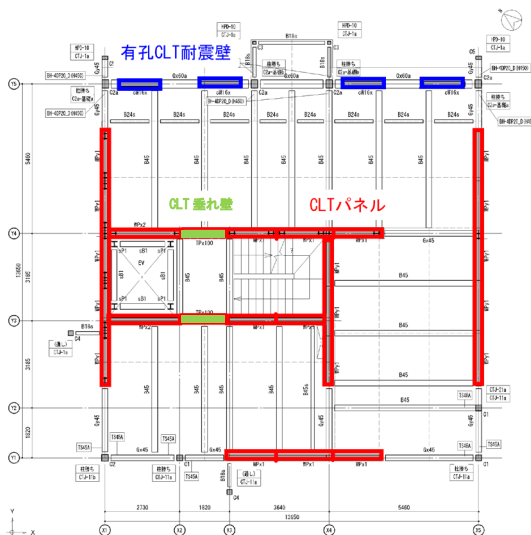
壁カテゴリ	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ	Dタイプ
形状	単体壁	2枚連続壁	3枚連続壁	門型ラーメン
壁記号	 WP1	 WP1 WP1	 WP1 WP1 WP1	 WP1 TP×100 WP1
パネル幅	w2.0m×1	w2.0m×2	w2.0m×3	w2.0m×3
壁倍率	7倍	20倍	25倍	20倍

図-5 「5階建てCLT標準設計モデル」で示された概算用壁倍率⁴⁾



1階の地震力に対する必要壁倍率
及び210厚で算出した平均 τ
 $Q_1=830\text{kN}$ 【Z=1.0の場合】

◆X方向
 $\Sigma L_{wx}=1.82 \times 8 + 2.73 \times 2 + 1.5 \times 4$
 $= 26.0\text{m}$
 $Q/\Sigma L_{wx}=830/26=32\text{kN/m}$
 $\rightarrow 16.2\text{倍}(\tau=0.15\text{N/mm}^2)$ 【20.2倍】

◆Y方向
 $\Sigma L_{wy}=13 \times 1.82=23.6\text{m}$
 $Q/\Sigma L_{wy}=830/23.6=35\text{kN/m}$
 $\rightarrow 17.8\text{倍}(\tau=0.17\text{N/mm}^2)$ 【22.2倍】

図-6 必要概算壁倍率

4) 一般社団法人日本CLT協会，公益財団法人日本住宅・木材技術センター，令和6年度 建築用木材供給・利用強化対策のうちCLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうちCLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等「CLTパネル工法建築物の標準設計、プログラム開発、普及促進 事業報告書」，2025（令和7）年3月

3) 有孔 CLT 耐震壁の設計用性能と実大実験による性能確認

① 有孔 CLT 耐震壁の概要

本建築物では、地震力に対する水平力抵抗要素として、鋼製ダンパーを組み込んだ「有孔 CLT 耐震壁」を採用する。本システムの構造的特徴は以下の通りである。

- ・ 壁頂部の接合部に水平方向のせん断を負担する鋼製ダンパー金物を配置し、地震時に同部位を先行して塑性化させることで、優れたエネルギー吸収性能と耐震性能を確保する。
- ・ CLT パネル (S90-5-7、厚 168mm、幅 1500mm) には規則的な開口 ($\phi 100$) を設ける。開口による剛性および耐力への影響については、設計上想定される最大配置に対して計算および実験により検証することで、実際設計で用いる場合は任意に開口を削減することができる。
- ・ 壁頂部の接合部に「鉛直ルーズ孔」を設けることで、CLT パネルへの長期鉛直荷重の伝達を遮断し、地震時の水平力のみを負担させる計画とする。これにより、CLT パネルは耐火被覆を不要とした現し設計を可能としている。
- ・ 壁脚部には鋼板挿入ドリフトピン接合および LSB ($\phi 25$) を採用し、地震時のせん断力および引張・圧縮力に対し、確実な応力伝達を図るとともに、CLT パネルと床材の間に耐火被覆材が設置できるように、木材間はタッチさせないように 50mm のクリアランスを設けている。

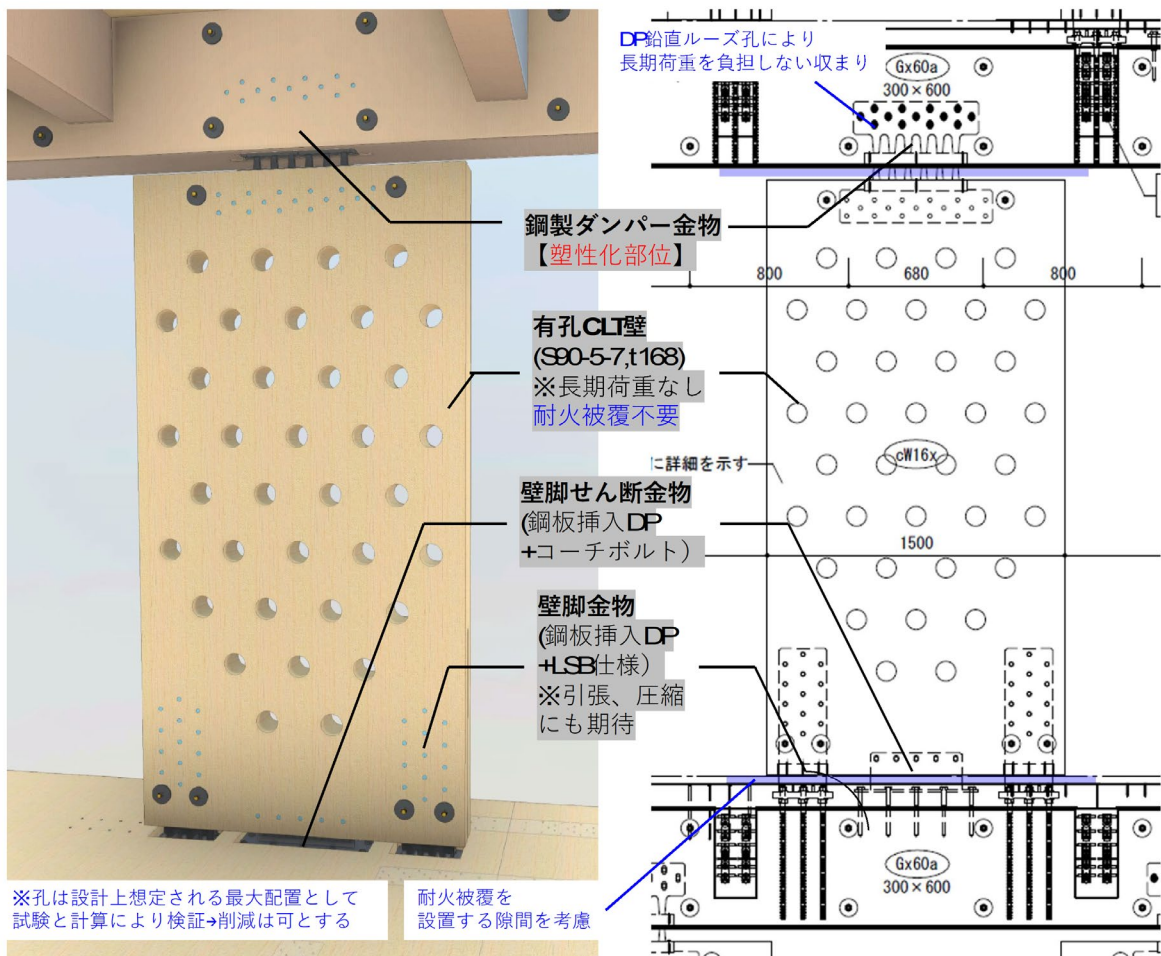


図-7 「有孔 CLT 耐震壁」概要図

<試験結果>

代表的な結果として、荷重変形関係を以下に示す。荷重 0 付近では主に DP 接合部のクリアランスが影響し、若干のスリップも確認されるが、全体として鋼材の紡錘型の安定した履歴ループが確認できる。変形性状としては、鋼製櫛部の曲げ変形が卓越することが確認され、1/30rad を想定した 90mm の変形の繰り返しの途中で櫛状部に亀裂が発生し荷重低下となり加力を終了した。

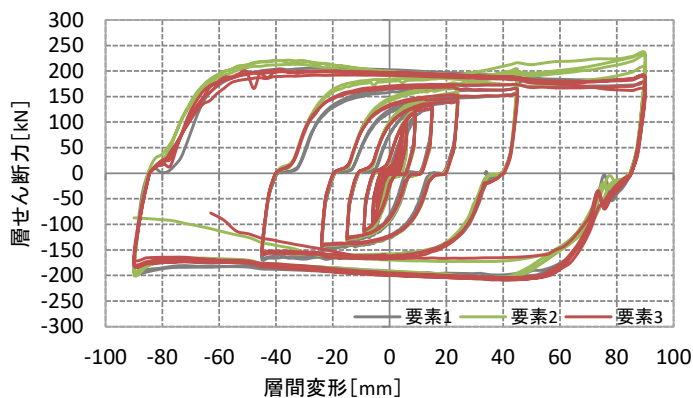


図-10 ダンパー要素試験 荷重変形関係/櫛状部の変形の様子

③ 実大壁試験

<試験概要>

鋼材の履歴特性を活かした接合金物（以下、ダンパー）を用いた有開口 CLT 耐力の壁せん断耐力性能を実験的に確認する。試験は開口の有無、接合仕様の違いをパラメータとして性能、挙動の違いを確認することを目的とする。

試験体数は全 5 体であり、壁脚接合を LSB 仕様で有開口とした PJ で採用を予定した本命を 3 体、比較用として、壁脚接合を鋼板挿入 DP 仕様で有開口とした試験体を 1 体（接合仕様の比較）、壁脚接合を LSB 仕様で無開口とした試験体を 1 体（開口有無を比較）、合計 5 体とした。

柱梁フレームはオウシュウアカマツ集成材の柱 210×210、梁 105×600（2 丁合わせ梁）、CLT は S90-5-7,t168、B=1500（ヒノキ）と実際に用いるものと同様とし、階高も実際の階高に合わせて梁芯間隔を 3800mm とした。なお柱芯間隔は試験場で設置可能は幅より 3500mm に設定し、柱頭柱脚はピン接合となるように HD 金物を柱芯位置に 2 本設置した。

加力方法は「木造軸組工法中大規模建築物の許容応力度設計（2024 年版）」第 3 章 試験方法と評価方法 3.3.3(1)「鉛直構面耐力壁の面内せん断試験」に準じた試験を実施した。正負交番繰り返し加力とし、繰り返し履歴は見かけのせん断変形角が 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30rad. の正負加力とし、繰り返し回数は、履歴の同一変形段階で 3 回（1/30rad. は繰り返し回数を 1 回）とした。但し、最大荷重が試験機の最大容量 200kN に到達した場合、その計測点を繰り返し位置とした。

計測器は下記に示すように荷重と変形を測定し、制御は見かけのせん断変形角とした。

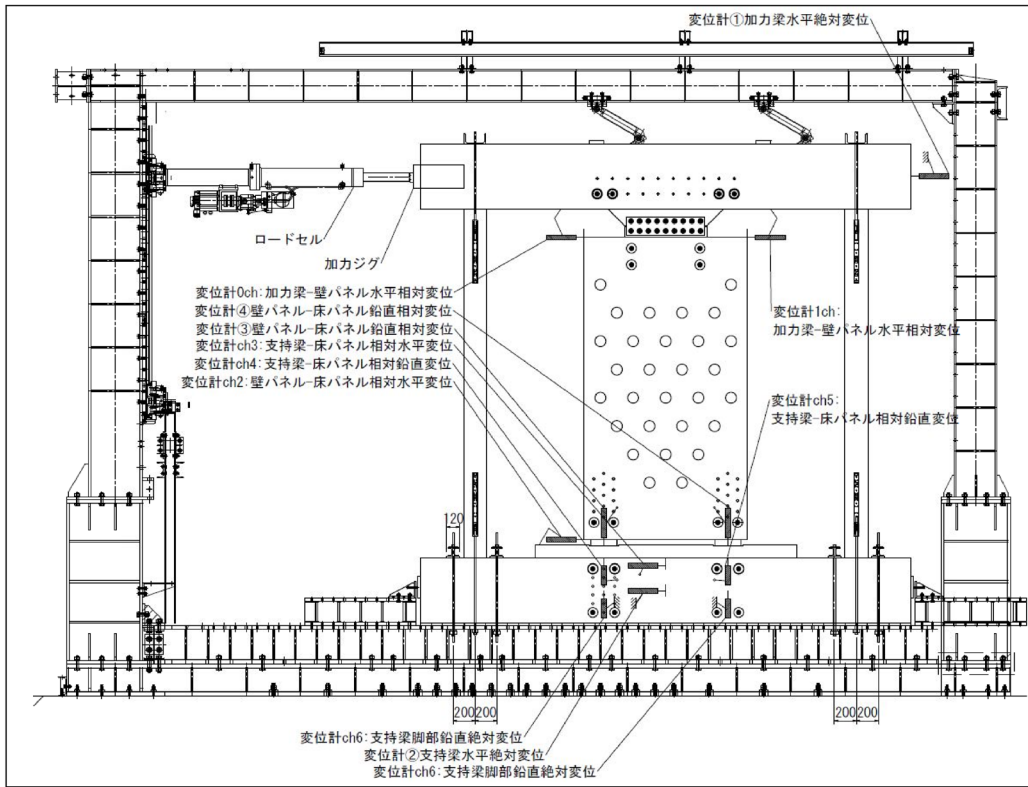
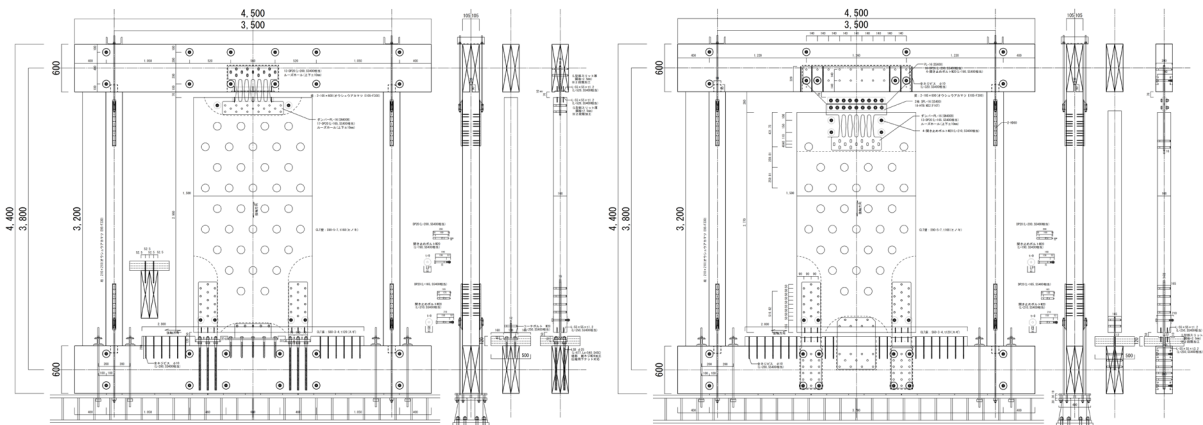
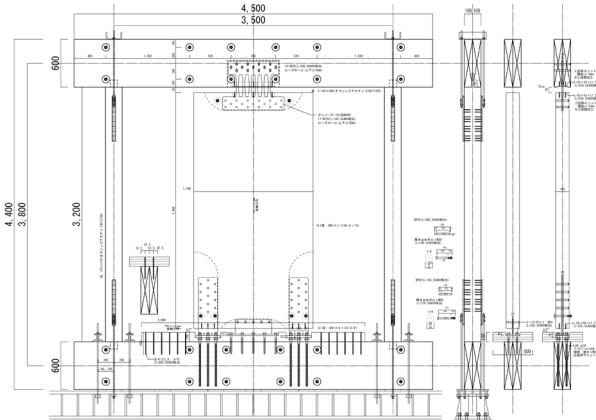


図-11 実大壁試験概要

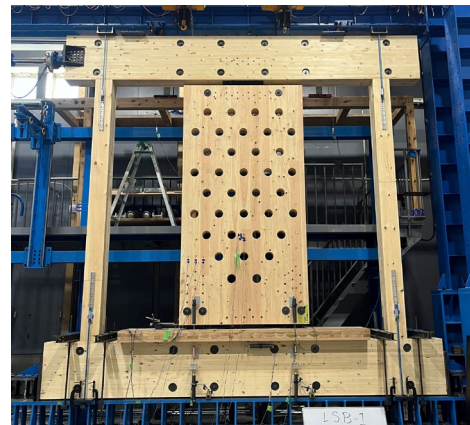


試験体名称「LSB1-1~3」3体

試験体名称「鋼板挿入DP」1体



試験体名称「LSB-開口無し」1体



「LSB-1」全景写真

図-12 実大壁試験 試験体一覧および全景写真

<試験結果>

代表的な結果として、荷重変形関係を以下に示す。荷重 0 付近では主に DP 接合部のクリアランスが影響し、若干のスリップも確認されるが、全体としてダンパー金物の塑性化による紡錘型の安定した履歴ループが確認でき、期待した性能を確認できた。また、開口の有無や接合仕様の違いによる性能の差が少ないことが確認できた。

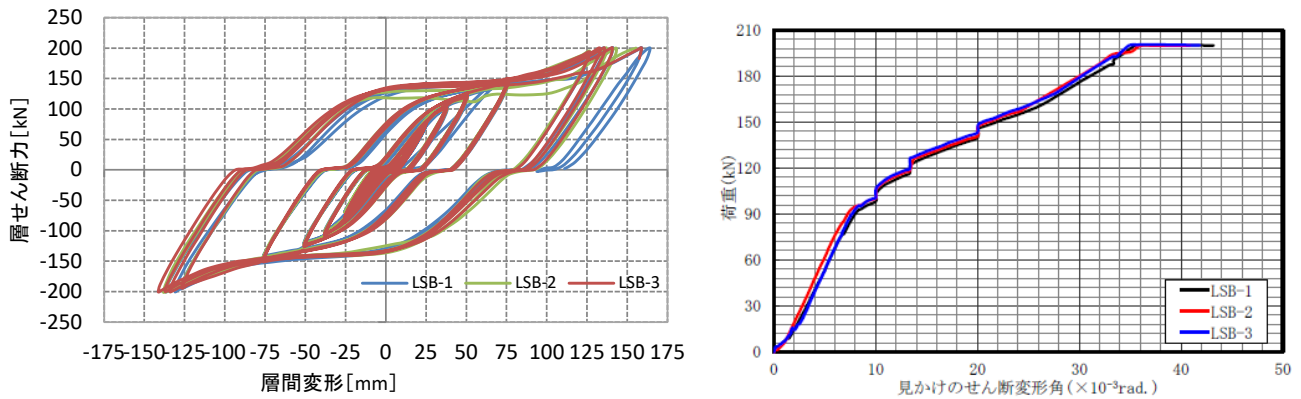


図-13 「LSB (有孔) 1～3」荷重変形関係

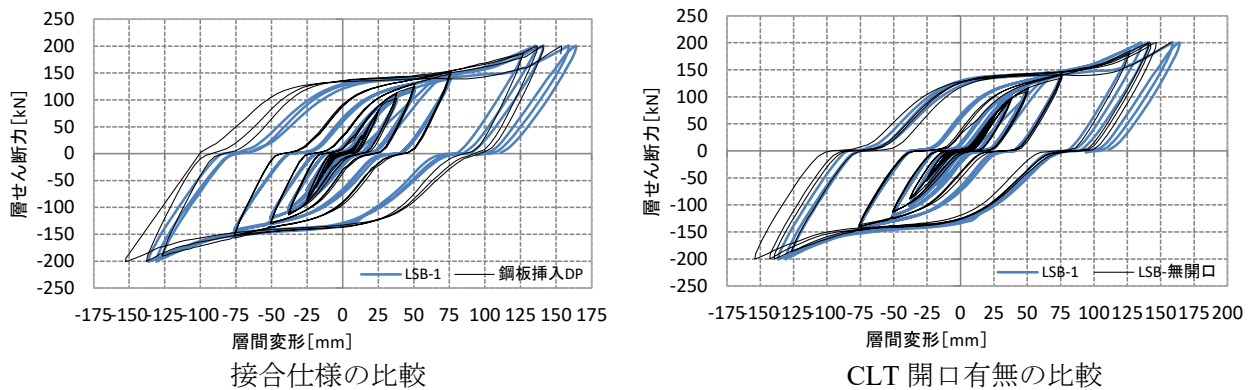


図-14 仕様の違いの比較

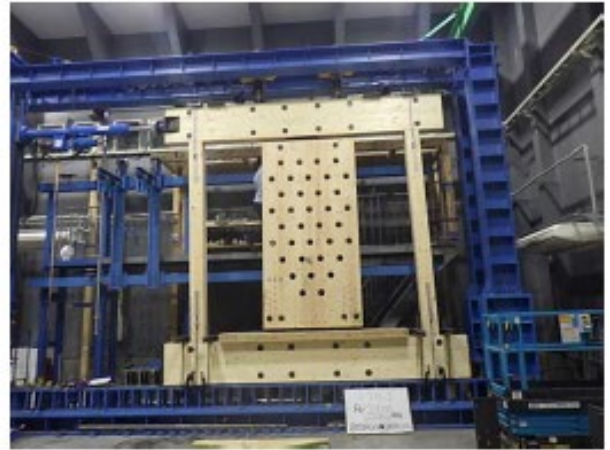
代表的な結果として、本 PJ で採用する有孔 LSB 仕様について、正側の骨格曲線と完全弾塑性置換により得られたばらつきを考慮した評価値を以下に示す。ここでは一般的な耐力壁の評価方法として壁倍率を算出するための4つの指標に3体試験によるばらつき係数を乗じて短期許容せん断耐力を算出した。

実験による有孔 CLT 耐震壁の評価値 (採用する収まりの LSB 仕様 3 体の結果)

- 初期剛性： $K1 = 2.72 \text{ kN/mm}$ (正側)
- 短期許容せん断耐力： $Qa = 68.29 \text{ kN}$ (正側、ばらつき係数 0.990 考慮) 【0.2Pu/Ds①決定】
 $\rightarrow 68.29 / 1.5 \text{ m} = 45.53 \text{ kN/m}$ 【壁倍率相当：23 倍】
- 降伏せん断耐力： $Qy = 102.06 \text{ kN}$ (正側の平均値)
- 終局せん断耐力： $Qu = 170.70 \text{ kN}$ (正側の平均値)
- 終局変形： $\delta u = 159.49 \text{ mm}$ (正側の平均値) ※1/23rad



・加力前



・加力後



・加力後



・加力後



・加力後



・加力後

図-15 LSB(有孔)-1 試験写真

4) 有孔 CLT 耐震壁の設計用解析モデル

① 鋼製ダンパー金物の既往文献による計算値

鋼材ダンパーの降伏耐力 Q_y 、終局耐力 Q_u を既往文献⁵⁾⁶⁾を参考に、橢状部の曲げ耐力と作用モーメントの釣り合いと既往の実験との比較から提案された下式により算定する。

$$H' = \frac{h + 2 \cdot r^2}{H}$$

$$\alpha = \frac{2(b_1 - b_0)}{H'}$$

$$Q_y = n \cdot 4 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_y \cdot t}{4}\right) \cdot b_0$$

$$Q_u = 1.6 \cdot Q_y$$

ここで、 b_1 : 橢状部脚部の幅、 b_0 : 橢状部中央部の幅、 h : 橢状部の脚部曲線部を含めない高さ、 H : 橢状部の脚部曲線部を含めた高さ、 H' : 橢状部を単純化した高さ、 r : 橢状部の脚部 R 半径、 σ_y : 鋼材の F 値、 n : 橢状部の本数、 t : 鋼材の厚さを表す (図 16 にパラメータを示す)。

次に既往文献¹⁾を参考に剛性及び剛性低下率を以下より算出する。初期剛性は橢状部の曲げせん断剛性 K_{BS} と脚部の回転剛性 K_R の直列剛性 K_1 として計算する。また、2 次剛性 K_2 及び 3 次剛性 K_3 、終局変形 δ_u は実験値を参考に設定された値である。

$$\gamma = \frac{b_1}{b_0}$$

$$K_{BS} = \frac{\alpha \cdot t}{2.4} \left[\frac{10}{\alpha^2 \cdot E} \left\{ \log|r| + \left(\frac{1}{r} - 1\right) \cdot \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2r}\right) \right\} + \frac{1}{G} \log|r| \right]^{-1}$$

$$K_R = \frac{E \cdot b_1^3 \cdot t}{6 \cdot H' \cdot 0.33b_1(H' + 0.33b_1)}$$

$$K_1 = n \cdot \frac{K_{BS} \cdot K_R}{K_{BS} + K_R}$$

$$K_2 = K_1/10$$

$$K_3 = K_1/200$$

$$\delta_u = \text{実験値}$$

ここで、 E : ヤング係数、 G : せん断弾性係数を表す。

以上より、目標耐力と変形性能を満足する仕様として SN400B ($\sigma_y=235\text{N/mm}^2$)、プレート厚 16mm、橢状部の高さを 280mm、6 本配置する形状に決定した。以上の計算より算定されたダンパー部の設計性能は $K_1=41.94\text{kN/mm}$ 、 $Q_y=81.75\text{kN}$ 、 $Q_u=130.79\text{kN}$ 、 $\delta_u=90\text{mm}$ となった。

5) 田中直樹、小堀鐸二、山田俊一、福元敏之：ハニカム開口を有する鋼板ダンパの低サイクル疲労特性に関する実験研究、日本建築学会構造工学論文集、Vol.37B、pp.173~182、1991.03

6) 勝山由佳子、焦瑜、河野守：鋼製スリットダンパーの形状の違いが疲労特性に及ぼす影響、日本建築学会構造工学論文集、Vol.60B、pp.513~519、2014.03

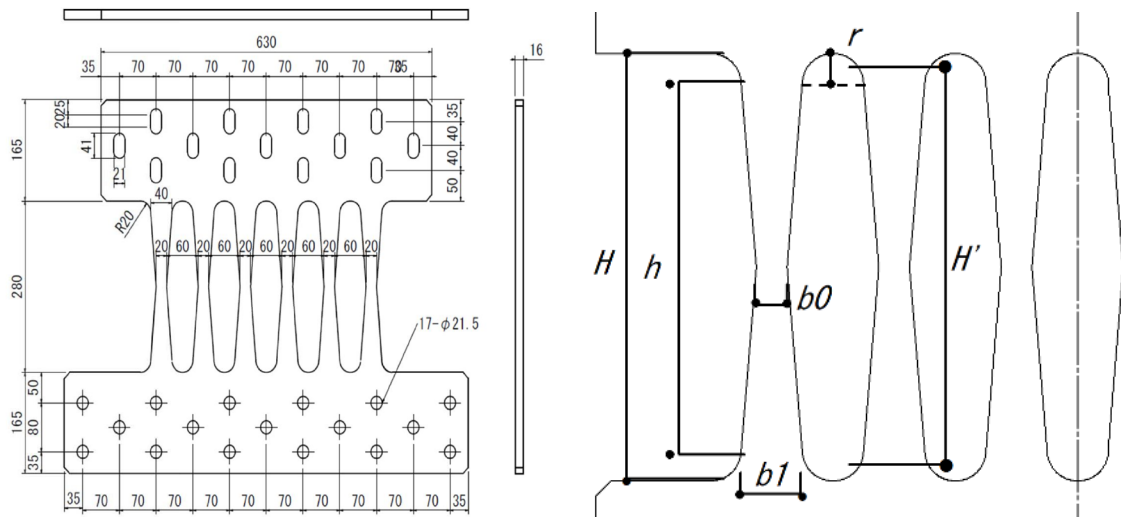


図-16 鋼製ダンパー金物と計算パラメータ

以下にダンパー要素試験の代表として要素試験3と、設計用F値により算出した設計性能の計算値および、ミルシートのF値 (=282N/mm²) を用いた実性能の計算値を重ねて示す。概ね実験結果と対応する性能であることが確認できる。

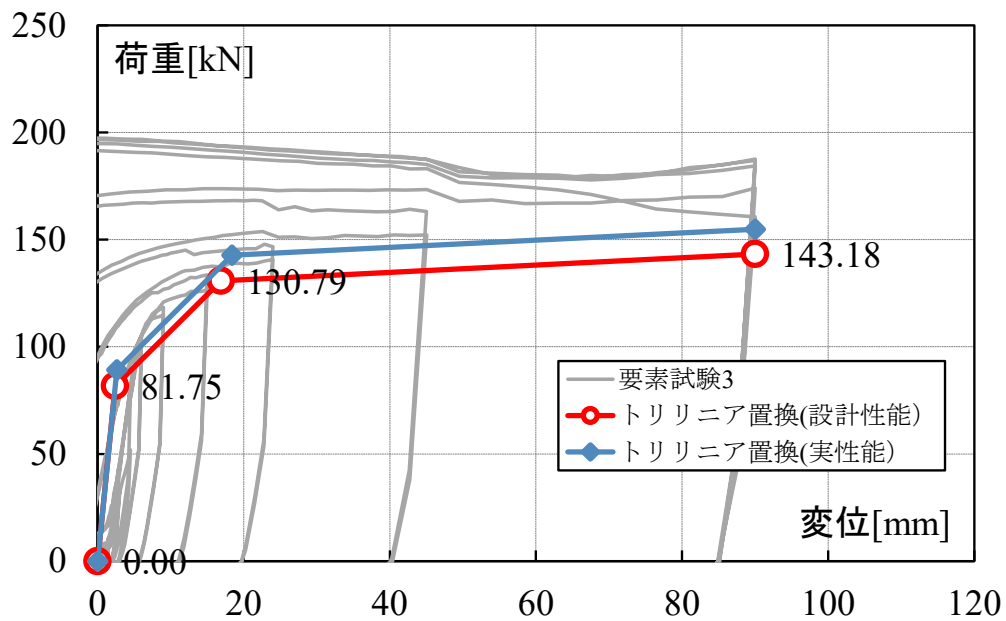


図-17 鋼製ダンパー金物の計算値と実験値の比較

② 有孔 CLT 耐震壁の設計用解析モデル

前述の鋼材ダンパーの計算値を用いて、有孔 CLT 耐震壁の設計用解析モデルを構築する。ここでは、バネ要素を用いた詳細モデルと、建物全体モデルに入力可能な材端バネモデルの 2 種類を以下のように作成した。ここでは、採用した LSB 仕様について示す。

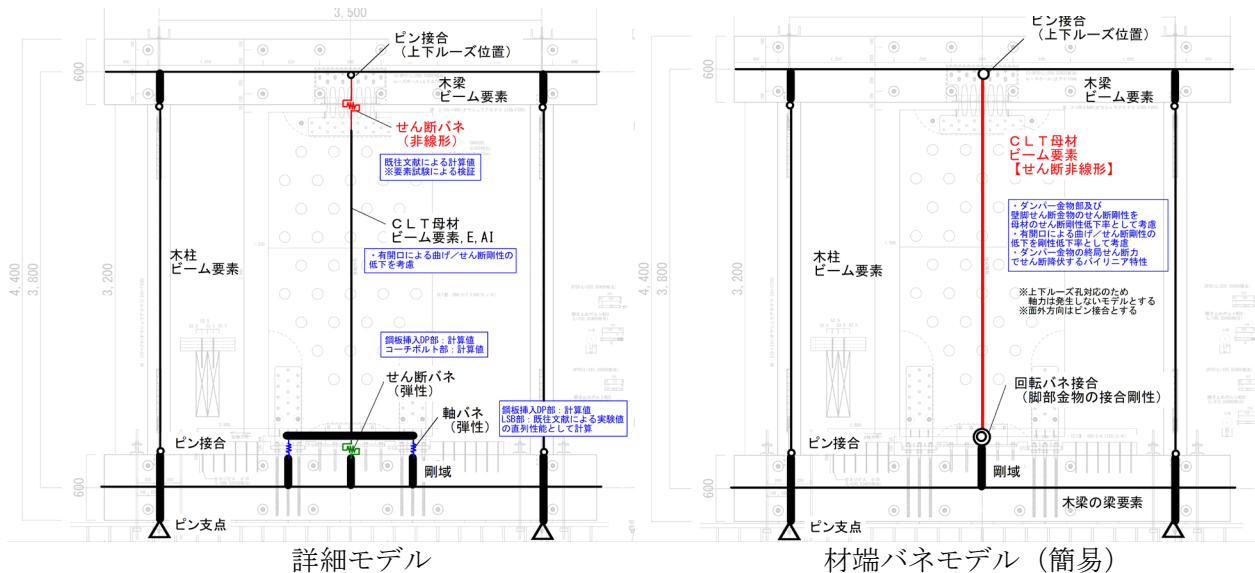


図-18 解析モデル

<CLT 壁の母材性能>

「CLT 設計施工マニュアル」に準拠した CLT 材料性能を設定した弾性ビーム要素であり、有開口の断面性能は、以下の図に示す最大欠損断面の性能として、元断面に対するせん断断面積の低減率、断面 2 次モーメントの低減率を算出し、断面性能の低減率として考慮した。

表-1 有開口による断面欠損

	厚み t[mm]	幅 B[mm]	ヤング係数 E[N/mm ²]	せん断弾性係数 G[N/mm ²]	せん断剛性 低下率	断面 2 次モーメント低 下率
有開口	168	1500	6428	500	0.667	0.678
無開口	168	1500	6428	500	1.00	1.00

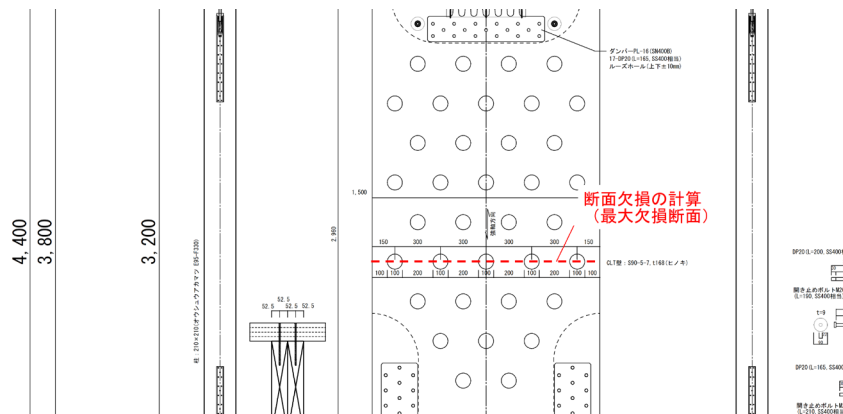


図-19 断面欠損の計算位置

<集成材への LSB 接合>

LSB の引張および圧縮性能は、「中層大規模木造研究会 設計支援情報データベース Ki (<https://www.ki-ki.info/>)」⁷⁾に掲載された試験データを参考にして、1本あたりの性能を算出した。掲載された試験は 105×600 (スギ E65) に対して φ25-LSB を L=500mm 埋込み、試験をされているのに対して、本PJは、105×600 (オウシュウアカマツ E105) に対して φ25-LSB を L=560mm 埋め込んだ仕様であり、樹種や埋込長さは安全側となり、離間距離も要素試験と同様に 100mm 確保した。よって掲載された試験結果を用いることは問題ない判断した。

3体の試験結果よりばらつきを考慮して算出した結果を以下の表に整理する。算出した結果、φ25-LSB 1本あたりの性能は、 $K_1=79.6\text{kN/mm}$ 、 $T_y=57.1\text{kN}$ 、 $T_u=112.6\text{kN}$ と算出できた。なお、圧縮側については下図に示すように BPL の下部にもナットを設ける (床座彫り) ことで、引張側と同じ性能を発揮するものとした。

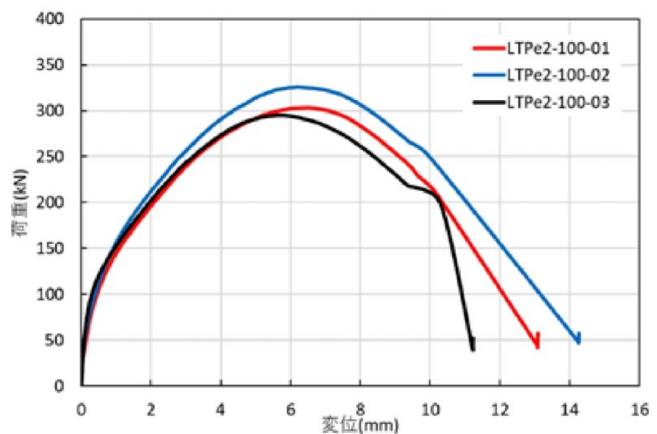


図-20 LSB 要素試験⁷⁾

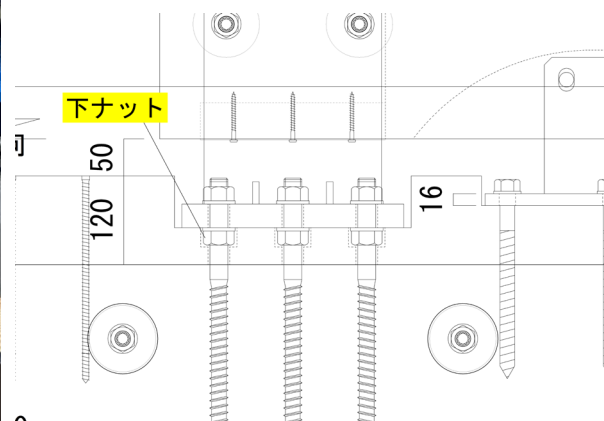
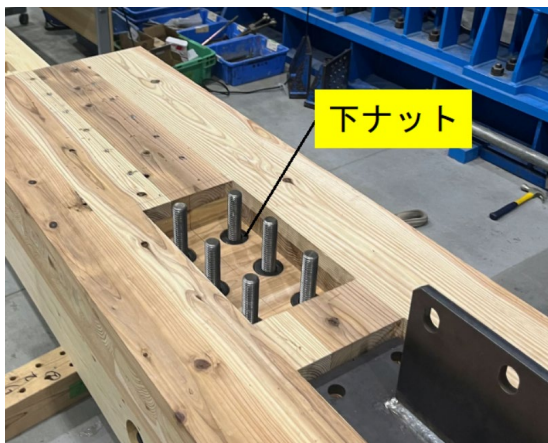


図-21 下ナット形式による LSB 圧縮負担収まり

<鋼板挿入 DP 接合>

前述した性能以外に各部の接合部は主に鋼板挿入 DP 接合部となるが、「CLT 設計施工マニュアル」及び「木規準」による計算値と剛性および耐力を算出し解析モデルに反映した。

7) 中層大規模木造研究会 設計支援情報データベース Ki「ラグスクリーボルト (LSB) 引張」(<https://toriaez-hp.jp/assets/1-B11000012/uploader/i8H2U4h0Xx.pdf>)

<材端バネモデル>

CLT 壁柱の全断面のビーム要素に、「有開口によるせん断剛性低下率」、「鋼製ダンパー金物のせん断剛性」と「壁脚中央部のせん断金物のせん断剛性」を直列で考え、母材のせん断剛性低下率として算出した。算出した結果、CLT 壁柱のせん断剛性低下率 0.38、曲げ剛性低下率 0.68 と算出され、鋼製ダンパー金物の Q_u を折れ点荷重とするバイリニア型のせん断非線形特性を与える。

壁脚は前述した LSB 等の接合剛性より回転バネを算出し材端回転バネとして考慮し、88258kNm/rad と算出した。

<実験値と解析値の比較>

2種類の解析モデルを変位増分解析により算出した荷重変形関係を実験値と比較する。以下に、鋼製ダンパー金物の性能を F 値から算出した設計性能と、ミルシートの F 値、 F_u 値から算出した実性能の2種類を、LSB-1 試験体の荷重変形に重ねた図を示す。

解析モデル（詳細および材端バネモデル（簡易））は、実験値の骨格曲線とおおむね良好に一致している。特に、初期剛性および弾性域から塑性域への移行過程において、実験値の挙動を概ね再現できていることが確認された。ただし、層間変形 90mm ($\approx 1/42\text{rad}$) を越える領域では実験値は荷重が多少上昇している傾向が確認されるが、解析モデルは再現していない。これはダンパー部が塑性化の大変形に伴い楕状部が曲げせん断変形で抵抗から楕状部の軸抵抗（トラス効果）に起因するものが一因と考えられるが、解析モデルでは安全側の評価となっている。

以上より、有開口 CLT 耐震壁の設計用解析モデルの妥当性を確認した。

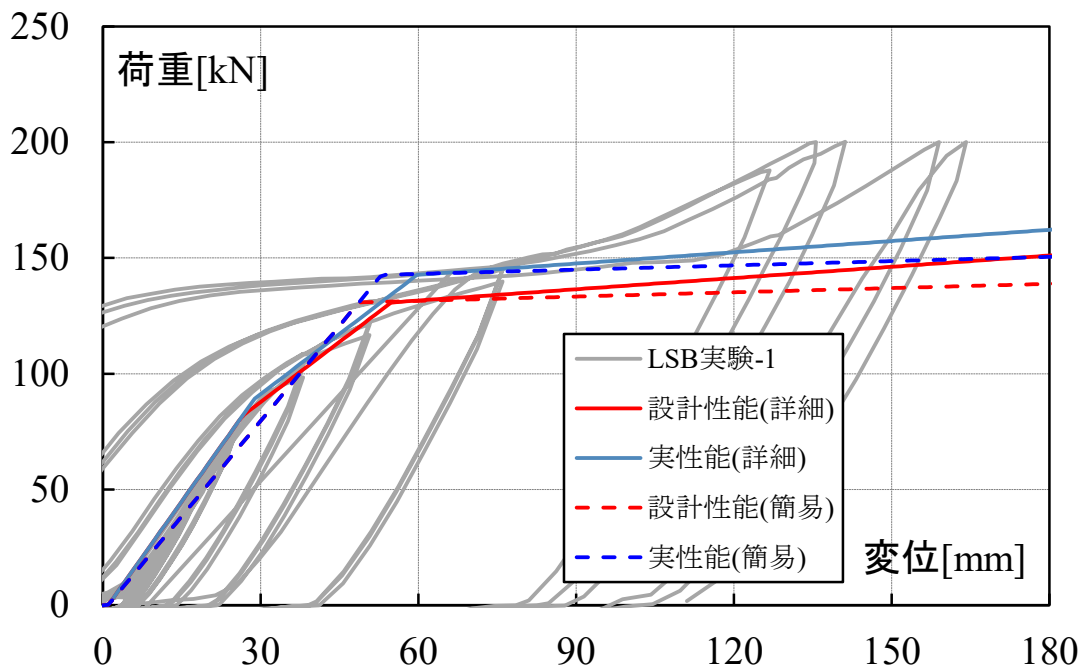
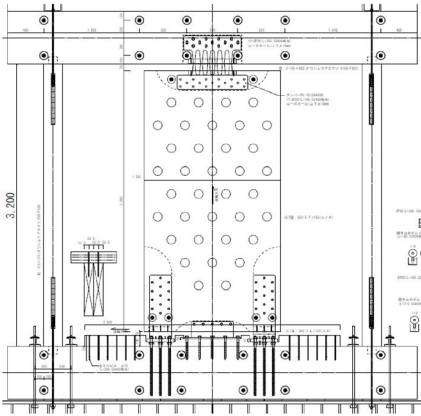
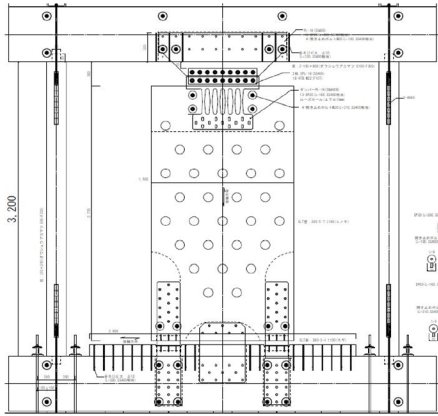


図-22 実大壁試験 実験値と解析値の比較

5) 有孔 CLT 耐震壁のコスト比較

本試験で検証した2種類の接合仕様について、以下に試験体の材料コスト比較を示す。鋼板挿入 DP 仕様は、集成材と CLT を PL で接続すればよく、金物の溶接が不要であるという利点を狙った一方で、脚部 PL を鉛直方向への圧縮力負担に配慮し、厚みを 22mm と若干厚めにしたことも起因し、僅かに LSB 仕様の方が材料費で有利な結果となった。また、鋼板挿入 DP 仕様は、CLT 床の面外方向からのスリット加工が必要となるが、加工機的能力上その加工は極力避けたいことも加工者から意見が挙がった。それらを総合的に判断し、本 P J では L S B 仕様を採用した。

表-2 仕様の違いによるコスト比較 (材料費のみ)

		LSB仕様(有開口)			鋼板挿入DP仕様(有開口)		
図							
集成材(柱)	E95-F315	210×210×3380	2	0.2982	210×210×3380	2	0.2982
集成材(梁)	E105-F300	105×600×4500	4	1.134	105×600×4500	4	1.134
CLT(壁)	S60A-3-4	120×500×2800	1	0.168	120×500×2800	1	0.168
CLT(床)	S90A-5-7	168×1500×2960	1	0.7459	168×1500×2770	1	0.698
木材使用量(m3)		2.3461			2.2982		
製造加工金額(円)		¥917,000			¥966,000		
接合金物費(円)		¥386,000			¥423,000		
材料費(円)		¥1,303,000			¥1,389,000		
材料費/使用m3 (円/m3)		¥555,390			¥604,386		

6) 有孔 CLT 耐震壁の全体建物モデルへの導入

前述で示した材端バネモデルを用いて、建物全体モデルに以下のように考慮して構造計算を実施する。構造計算では鋼製ダンパー金物が鉛直方向にルーズ孔の DP 接合となっており、軸力が生じない収まりとなっていることから、構造計算においても軸力を負担しないモデル化として適切反映する。以下に終局状態の曲げモーメント／軸力図を示すが、想定した応力状態であることが確認できる。

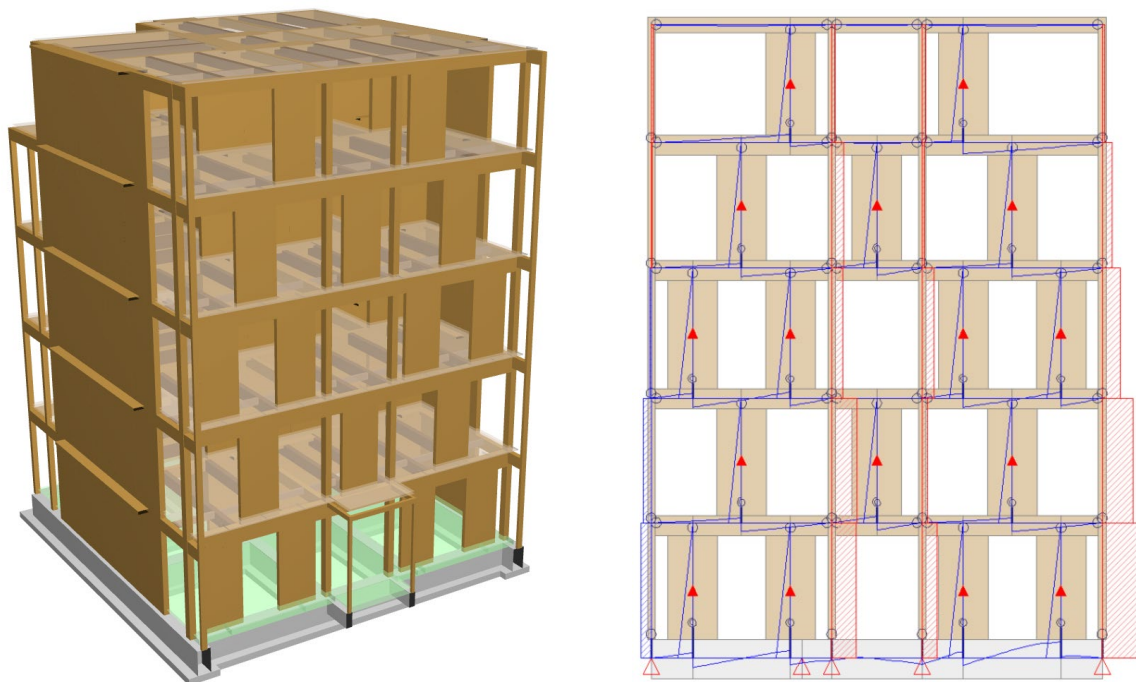


図-22 「有孔 CLT 耐震壁」を導入した建物全体モデル

7) まとめ

本プロジェクトは、実例の少ない純 CLT 造 5 階建てビルの普及を目指し、令和 6 年度林野庁補助事業の「中規模オフィスの標準モデル」で示されたモジュール設計と接合金物を用いた設計実証、およびファサードで活用できる新たな耐震要素の実験検証を行った。

・木造モジュールである 1.82m モジュールに設定し、「5 階建て CLT 標準設計モデル」で記載されている接合金物および概算壁倍率を用いることで、設計初期より意匠とプランニング調整を比較的スムーズに実施でき、接合部での干渉が少なく合理的に設計を進めることが確認できた。

・意匠性と耐震性能を両立させる有孔 CLT 耐震壁の設計開発では、鋼製ダンパー金物の要素試験、実大壁試験を実施し、CLT パネルに長期荷重を負担させずメンブレン被覆できる収まりを想定した接合（現し設計）とした試験体も期待した性能を有することが確認でき、中層建築に必要な剛性と耐力を十分に備えていることを実証した。