

2. 2 株式会社 SAKURA/ライフデザイン・カバヤ株式会社

2. 2. 1 建築物の仕様一覧

事業名	(仮称)館政様本店テナントビル新築工事の設計実証		
実施者(担当者)	株式会社SAKURA/ライフデザイン・カバヤ株式会社(難波和也)		
建築物の概要	用途	店舗	
	建設地	埼玉県さいたま市	
	構造・工法	鉄骨造(付加制振 → 有孔CLT制振壁)	
	階数	地上9階	
	高さ(m)	29.900	
	軒高(m)	29.500	
	敷地面積(m ²)	137.80	
	建築面積(m ²)	115.52	
	延べ面積(m ²)	955.72	
	階別面積(m ²)	1階	104.92
2階		110.01	
3～8階		109.57(各階)	
9階		83.37	
CLTの仕様	CLT採用部位	壁	
	CLT使用量(m ³)	加工前製品量37.705m ³ 、加工後建築物使用量31.440m ³	
	壁パネル	寸法	210mm厚(表面加工あり)
		ラミナ構成	5層7プライ
		強度区分	S90A
		樹種	ヒノキ
	床パネル	寸法	-
		ラミナ構成	-
		強度区分	-
		樹種	-
	屋根パネル	寸法	-
		ラミナ構成	-
強度区分		-	
樹種		-	
木材	主な使用部位 (CLT以外の構造材)	-	
	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	-	
仕上	主な外部仕上	屋根	コンクリート金ゴテ押え アスファルト防水
		外壁	アルミキャストフレーム、押出成型セメント板、御影石
		開口部	アルミサッシ+複層ガラス
	主な内部仕上	界壁	-
		間仕切り壁	LGS下地石膏ボードの上アクリル系左官材、ビニルクロス
		床	モルタル下地の600角タイルt=10、長尺シート
構造	天井	石膏ボードの上アクリル系左官材	
	構造計算ルート	ルート3	
	接合方法	HTB + 鋼板挿入ドリフトピン接合	
	最大スパン	6.890m	
防火	問題点・課題とその解決策	CLTの有開口部において、応力集中することを避けるために角孔の角部をRがかかった形状とした。	
	防火上の地域区分	準防火地域	
	耐火建築物等の要件	有	
温熱	本建築物の防耐火仕様	1階～5階：2時間耐火、6階～9階：1時間耐火	
	問題点・課題とその解決策	CLT壁パネルを水平力のみ(構造耐力上主要な部分)を負担する付加耐震要素として利用し、耐火被覆をせず現しとさせた。(主要構造部に該当しないため耐火被覆不要。)	
	建築物省エネ法の該当有無	該当あり：規制対象	
遮音	温熱環境確保に関する課題と解決策	特になし	
	主な断熱仕様 (断熱材の種類・厚さ)	屋根(又は天井)	押出法ポリスチレンフォーム保温板t=25
		外壁	硬質ウレタンフォーム吹付t=20
床		押出法ポリスチレンフォーム保温板t=25	
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	-	
工程	劣化対策	-	
	設計期間	2024年4月～2025年2月(10.5ヵ月)	
	施工期間	2025年5月～2026年5月(13ヵ月)	
	CLT躯体施工期間	未定	
体制	竣工(予定)年月日	2026年5月31日	
	発注者	株式会社SAKURA	
	設計者(複数の場合はそれぞれ役割を記載)	株式会社LAD	
	構造設計者	株式会社構造計画研究所	
	施工者	近藤建設株式会社	
	CLT供給者	銘建工業株式会社	
ラミナ供給者	未定		

2. 2. 2 実証事業概要

実証事業名：(仮称)鮎政様本店テナントビル新築工事の設計実証

建築主等/協議会運営者：株式会社 SAKURA/ライフデザイン・カバヤ株式会社

1. 実証した建築物の概要

用途	店舗			
建設地	埼玉県さいたま市			
構造・工法	鉄骨造(付加制振 → 有孔 CLT 制振壁)			
階数	地上 9 階			
高さ (m)	29.900	軒高 (m)	29.500	
敷地面積 (m ²)	137.80	建築面積 (m ²)	115.52	
階別面積 (m ²)	1 階	104.92	延べ面積 (m ²)	955.72
	2 階	110.01		
	3～8 階	109.57(各階)		
	9 階	83.37		
CLT 採用部位	壁			
CLT 使用量 (m ³)	加工前製品量 37.705 m ³ 、加工後建築物使用量 31.440 m ³			
CLT を除く木材使用量 (m ³)	-			
CLT の仕様	(部位)	(寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種)		
	壁	210mm 厚(表面加工あり) / 5 層 7 プライ / S90A / ヒノキ		
	床	-		
	屋根	-		
設計期間	2024 年 4 月～2025 年 2 月(10.5 ヶ月)			
施工期間	2025 年 5 月～2026 年 5 月(13 ヶ月)			
CLT 躯体施工期間	未定			
竣工(予定)年月日	2026 年 5 月 31 日			

2. 実証事業の目的と設定した課題

CLT パネルへ自由な開口を有しつつ耐震性能に期待した CLT 壁を採用するため、CLT 接合部の一部に鋼板の中央部に拡がりのあるスリット状の孔を開けた鋼材ダンパーを採用することで塑性化部位を明確に定め、CLT パネルに発生する応力を一定に抑えることができる範囲内で自由に開口を設けられるよう配慮した。さらに、鋼材ダンパーによるエネルギー吸収性能の向上にも期待した。建物の構造計算では鉄骨造ルート 3 を想定し、鉄骨造の純ラーメン構造で基準法を満足した性能を保有させつつ、CLT 壁を付加制振として採用することで耐震性能の向上を見込んだ。

3. 協議会構成員

【協議会運営・事業統括】 ライフデザイン・カバヤ(株) - 難波 和也、守谷 和弘
平田 拓也

【意匠設計】 (株)LAD - 高山 禎章、今山 貴之

【構造方針統括監理】 京都大学 - 五十田 博、広島大学 - 森 拓郎
(株)ディックス - 辻 拓也

【構造設計・実験検討】 (株)構造計画研究所 - 篠原 昌寿、野田 卓見、荒幡 俊勝
金 弘宗

【施工】 近藤建設(株) - 吉田 卓生、安川 愛真

【原木供給・材料】 銘建工業(株) - 車田 慎介、西本 将晴

【金物】 BX カネシン(株) - 榎田 剛、中村 益久

4. 課題解決の方法と実施工程

開口を設けた CLT パネル材の構造特性を実験及び解析によって確認し、剛性、耐力、及び構造安全性に悪影響を与えない開口サイズ及び配置等について検証する。

開口率によって CLT パネル材 1 枚当たりの耐力減が生じる条件、計算結果となる場合は設計法の検討、検証を行い妥当性を図る。

<協議会の開催>

- ・第 1 回開催 - 問題点洗い出し
令和 6 年 7 月 9 日(構造会議)、令和 6 年 7 月 31 日(総合会議)
- ・第 2 回開催 - 実施設計前確認
令和 6 年 8 月 5 日(構造会議)、令和 6 年 8 月 28 日(総合会議)
- ・第 3 回開催 - 実験スケジュール・試験方法調整、全体工事費コスト調整
令和 6 年 10 月 23 日(構造会議)、令和 6 年 10 月 30 日(総合会議)
- ・第 4 回開催 - 実大試験最終確認、実験場現地にて加力試験方針確認
実施設計進捗確認及び施工確認
令和 6 年 11 月 28 日(構造会議)、令和 6 年 12 月 17 日(実験会議)
令和 6 年 12 月 25 日(総合会議)
- ・第 5 回開催 - 実証事業取りまとめ検討
令和 7 年 1 月 29 日(総合会議)、令和 7 年 1 月 30 日(構造会議)

<設計>

令和 6 年 9 月：建築設計業務委託契約締結
令和 6 年 10 月：コスト調整
令和 6 年 11 月：実施設計
令和 7 年 3 月：建築確認申請提出

<性能確認>

令和6年8月：せん断ダンパー金物要素試験

令和6年12月：CLT壁パネル実大試験

5. 得られた実証データ等の詳細

設定した課題において次の結果が得られた。

(1) CLT付加制振壁による建物の応答低減効果

・本PJで開発した開口を有するCLT制振壁を、本建物に付加することにより、大地震を想定した地震応答に対して、20%程度の応答低減効果を確認した。

(2) ダンパー要素試験

・CLT接合部の一部に採用した、鋼板の中央部に拵がりがあるスリット状の孔を開けた鋼材ダンパー単体のせん断試験を行った。その結果、既往の文献から算出されるダンパー性能の予測値と概ね同等の荷重変形関係を示すことが確認された。

(3) 開口を有するCLT制振壁の構造特性値の取得

・複数の開口パターンを有するCLT制振壁でダンパー付きとダンパー固定とした場合の壁試験を実施した。ダンパー付き試験では、既往文献から算出される予測値および要素試験結果の荷重変形関係と概ね対応する結果が得られ、ダンパー性能が支配的な履歴特性を示すことが確認された。ダンパー固定試験では、開口を有するCLT制振壁の剛性と耐力を明らかにした。いずれの開口パターンにおいても、脚部の引張接合部の集合型破壊が最終的な破壊形式となり、その際、開口周辺に大きな亀裂や損傷は確認されなかった。

(4) コスト比較

・既往PJは73万/m²、本PJは89万/m²と、主に金物費用とパネル加工費の差で22%程、本PJの方がコストは増えるが高い意匠性と構造性能、メンテナンス性を兼ね備えたCLT制振壁を実現できることを把握した。また、純鉄骨造とのコスト比較として、CLTに係る費用は全体費用の23%であるが、応答低減効果が約20%見込めた。

6. 本実証により得られた成果

CLT制振壁に有開口と表面加工を施しており、金物費用とパネル加工費の影響で既往PJよりもコストは高くなるが、鋼材ダンパーを採用することでCLTが負担する応力を一定に抑え、耐力の範囲内であるが自由な開口を設けることが出来るなど意匠的な自由度が高く、構造性能を兼ね備えたCLT制振壁を実現できることを確認した。

7. 建築物の平面図・立面図・写真等

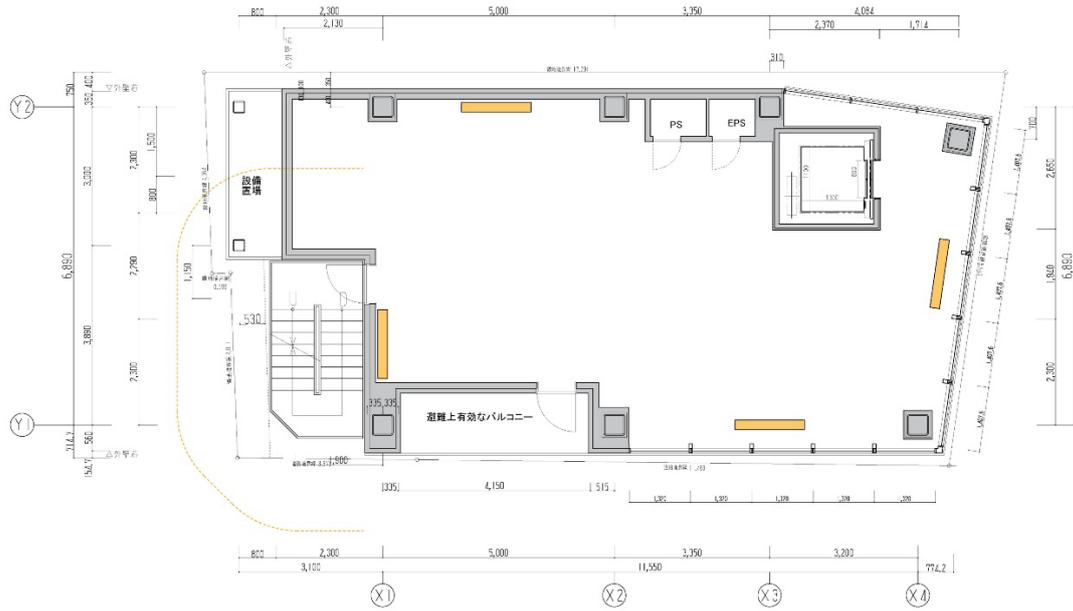


図 7-1 基準階平面図(黄線は CLT を示す)



図 7-2 外観イメージパース



図 7-3 内観イメージパース

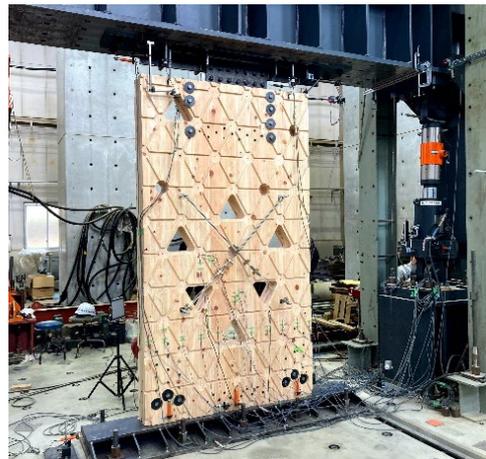


図 7-4 試験状況

2. 2. 3 成果物：(仮称)鮎政様本店テナントビル新築工事の設計実証

1) プロジェクト概要

1. 1) 実証概要

本件は狭小地に計画する 9 階建て中層テナントビルである。一般的な中規模ビルでは意匠計画上、耐震要素を配置できる部分が限定され、ファサード計画にも影響する場合もありデザインや建築計画上の制限が多くなる。そこでデザインと住環境に寄与する開口を備えた有孔 CLT 耐力壁を採用し、その性能実験及び設計検証を行う。なお、有孔 CLT 耐力壁の実現にあたり、鋼材の履歴特性を活かした鋼材ダンパーを採用し、CLT 壁に発生する最大荷重を明確に定めることで、自由な開口形状の選定を可能にした。また、これにより建物にエネルギー吸収性能を付与する計画とした。

1. 2) 建物概要

建物概要を表 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 建物概要

工事名称	(仮称)鮎政様本店テナントビル新築工事	
計画地	埼玉県さいたま市大宮区	
用途	店舗	
工事種別	新築工事	
規模	敷地面積	137.80 m ²
	階数	地上 9 階
	最高高さ	29.900m
	最高軒高さ	29.500m
	建築面積	115.52 m ²
	延べ面積	955.72 m ²
構造概要	構造種別	鉄骨造(付加制振 → 有孔 CLT 制振壁)
	基礎形式	杭基礎(鋼管杭)
	構造計算ルート	ルート 3
CLT の仕様	利用箇所	壁(付加制振 → 有孔 CLT 制振壁を配置)
	厚さ	210mm 厚(表面加工あり)
	強度等級 / ラミナ構成	S90A / 5 層 7 プライ
	樹種	ヒノキ
設計期間	2024 年 4 月～2025 年 2 月(10.5 ヶ月)	

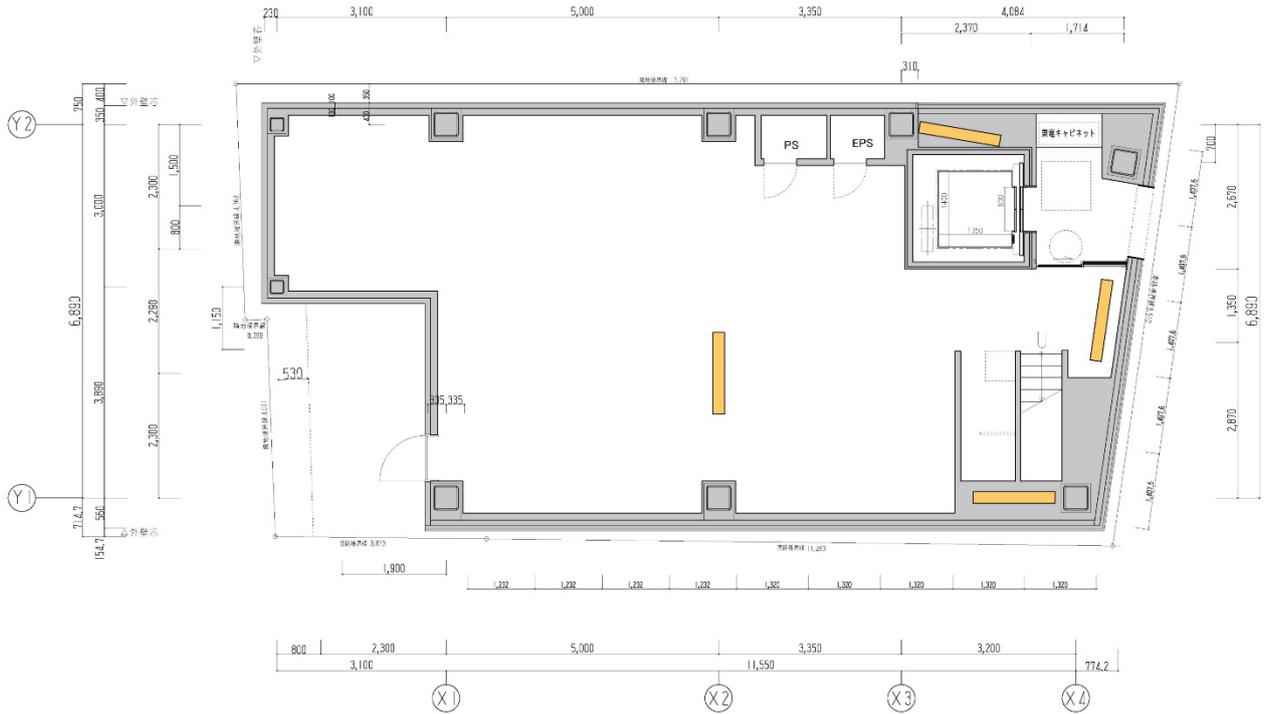


図 1.2-1 1階平面図(黄線は CLT を示す)

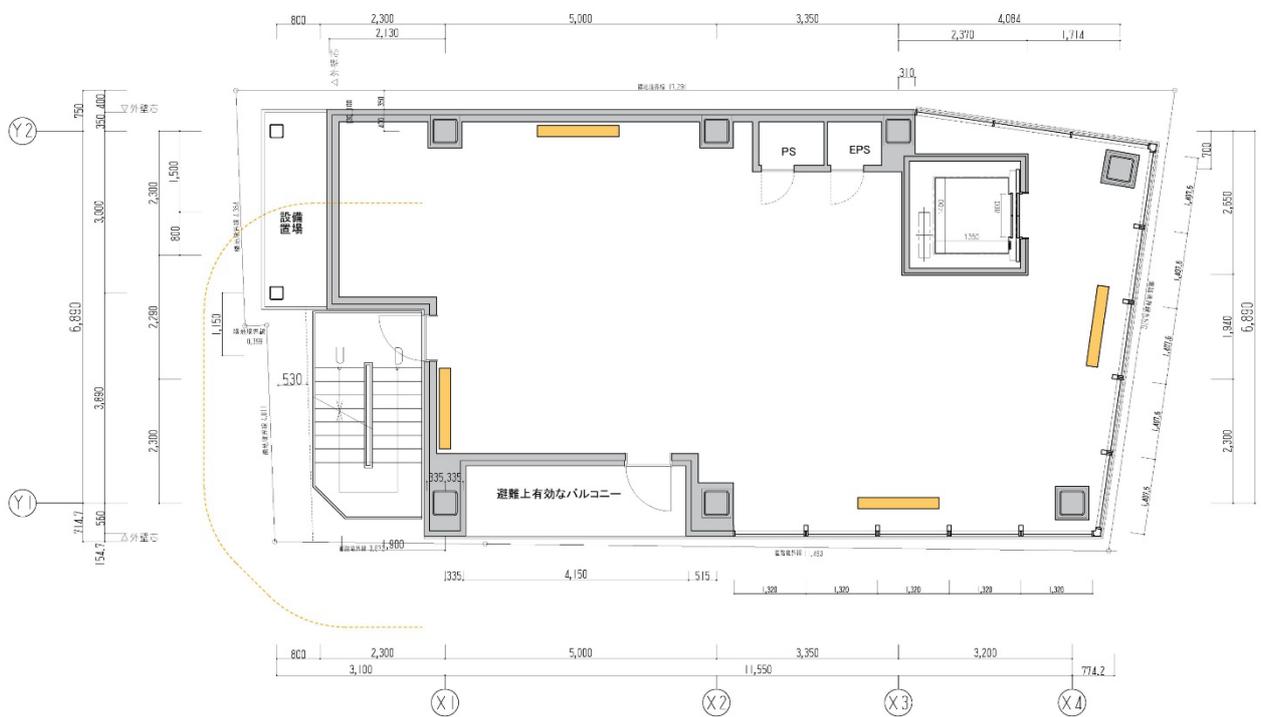


図 1.2-2 基準階平面図(黄線は CLT を示す)

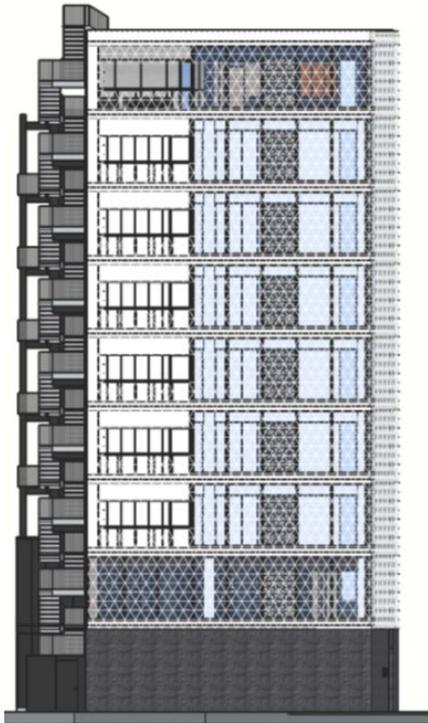


図 1.2-3 立面図(北面)



図 1.2-4 外観イメージパース



図 1.2-5 内観イメージパース(1階)



図 1.2-6 内観イメージパース(基準階)

1. 3) 構造計画

- 構造種別は鉄骨ラーメン構造であり、装飾的な開口部を有する CLT 制振壁を建物外周部に配置した付加制振とする。
- ダンパーは、CLT 壁上部と鉄骨フレームとの接合部に中央部に拡がりのあるスリット状の孔を開けた鋼材ダンパーであり、鋼材ダンパーが水平方向に変形することによりエネルギー吸収に期待しつつ、CLT パネルに発生する応力を一定に抑える役割を有する。
- CLT パネルの開口形状の選定は、CLT パネルに発生する最大水平力に対して力学的な略算及び FEM 解析による詳細計算によって、意匠上の要求デザインを満足するように決定した。最終的には 1 階が丸と三角開口、2 階から 9 階が丸開口となっている。更に深さ 15mm のライン加工も設けており、1 階は両面、2 階から 9 階は片面加工した CLT パネルを選定した。
- ダンパー降伏荷重の目標は、既往の設計事例などから建物重量に対して約 5~15%を目安にして、建物に配置できる枚数から逆算し、おおよそ 200kN とした。
- 鋼材ダンパーの要素試験及び、有孔 CLT 制振壁の実大壁試験を実施し構造性能を検証した。
- 制振効果を検証するため、質点系モデルによる有孔 CLT 制振壁の有無をパラメータとした大地震時の予備応答解析の結果、おおよそ 20%程度の応答変形の低減効果を確認した。
- なお、鋼材ダンパーは将来的な交換が可能なディテールとして、メンテナンス性に配慮している。

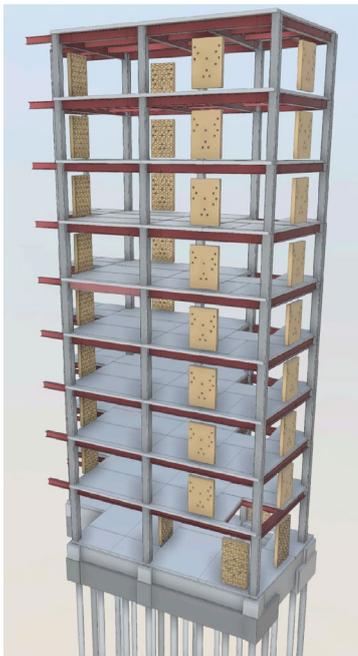


図 1.3-1 構造パース(全体)



図 1.3-2 構造パース (CLT 付加制振壁)

2) 有孔 CLT 制振壁の性能検証試験

2. 1) ダンパー要素試験

2. 1. 1) 試験体の仕様

有孔 CLT 制振壁の上部と鉄骨フレームとの接合部に設けた鋼材ダンパー単体の要素試験を実施し、性能を確認する。鋼材ダンパーの形状を図 2.1.1-1 に示す。鋼材ダンパーは鋼板に中央部に拡がりのあるスリット状の孔を開けて比較的簡易な加工で製造可能な鋼材ダンパーであり、スリット状の孔により形成された楕状の鋼材部が地震時にせん断変形を受けると、上下端部が曲げモーメントによる塑性化することで、鋼材の履歴ループを描きエネルギー吸収する装置となっている。なお、CLT 壁とは 13-DP20 による鋼板挿入 DP 接合であり、鉛直荷重による影響に配慮し、上下方向をルーズ孔としている。

鋼材ダンパーの降伏耐力 Q_y 、終局耐力 Q_u を既往文献¹⁾²⁾を参考に、楕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 :楕状部脚部の幅、 b_0 :楕状部中央部の幅、 h :楕状部の脚部曲線部を含めない高さ、 H :楕状部の脚部曲線部を含めた高さ、 H' :楕状部を単純化した高さ、 r :楕状部の脚部 R 半径、 σ_y :鋼材の F 値、 n :楕状部の本数、 t :鋼材の厚さを表す (図 2.1.1-2 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。初期剛性は楕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。

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

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

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

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

$$K_2 = K_1/10$$

$$K_3 = K_1/200$$

$$\delta_u = H/3.5$$

ここで、 E :ヤング係数、 G :せん断弾性係数を表す。

以上より、目標とした耐力と変形性能を満足する仕様として鋼種 SN490B ($\sigma_y=325\text{N/mm}^2$)、プレート厚 22mm、楕状部の高さを 280mm、6 本配置する形状に決定した。

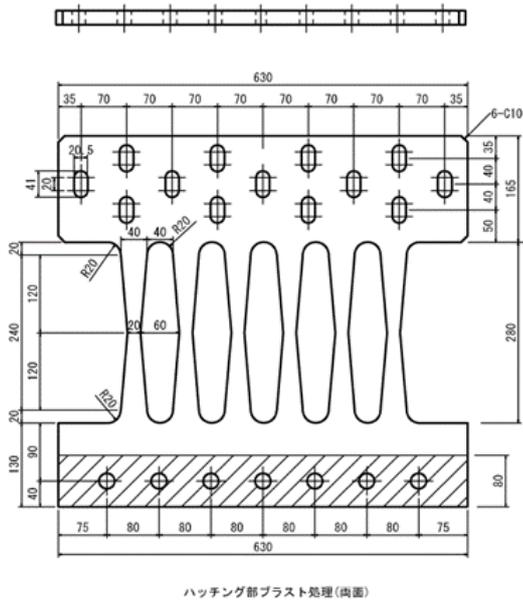


図 2.1.1-1 試験体仕様

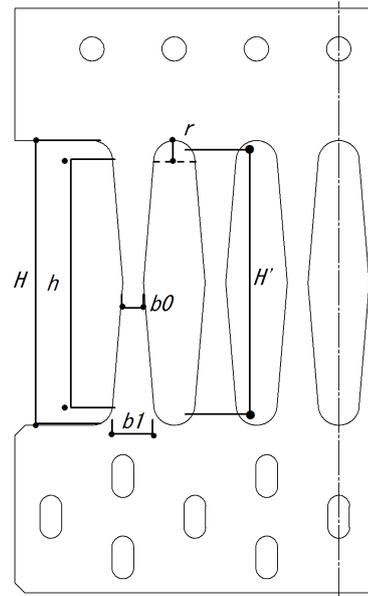


図 2.1.1-2 鋼材ダンパーのパラメータ

2. 1. 2) 加力・計測計画

加力装置を図 2.1.2-1 に示す。実際の CLT 壁との接合を考え、ダンパー要素試験においても CLT パネル(S60-5-5 の 150mm 厚)に鋼板挿入ドリフトピン接合を介した試験体とする。治具の収まりから鋼材側とは 4-HTB. M22 で接合したセットアップとなる。加力は CLT およびダンパー鋼板を試験機に固定して、CLT パネル材を油圧ジャッキで鉛直加力する方法を用いた。繰り返し加力方法は、漸増正負交番 3 回繰返しとし、壁試験での目標変形角 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30rad に相当するダンパー部に生じる水平変形を与え、最後は引き切りとした。なお、計測は、変位計をダンパー下部接合部および CLT とのドリフトピン接合部に設置し、ダンパーの変形量を計測した。

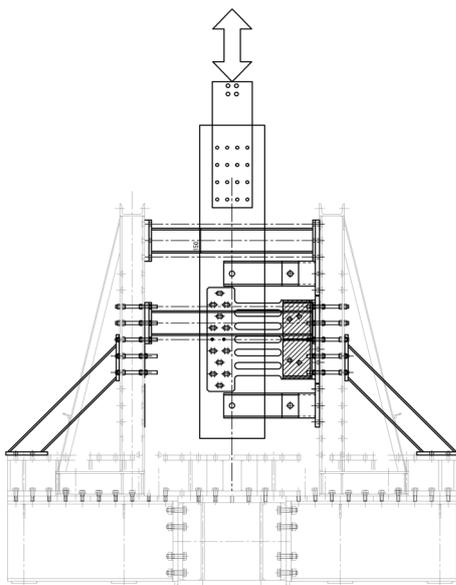


図 2.1.2-1 加力装置



図 2.1.2-2 加力装置写真

2. 1. 3) 実験結果

荷重変形関係を図 2. 1. 3-1、加力後の鋼材ダンパーの損傷状況を図 2. 1. 3-2 に示す。楕円部の鋼材がせん断変形に伴い曲げ塑性変形し、鋼材特有の紡錘型の綺麗な履歴ループが確認できる。また図 2. 1. 3-1 には前述した手法により算出した設計性能を赤線で示す。なお、CLT 鋼板挿入ドリフトピン接合は加力終盤では若干曲げ変形も確認されたが概ね弾性的な挙動であることから、計算により算出した鋼板挿入 DP 接合の剛性も直列剛性に含めた設計性能を示している。実験結果と概ね対応することが確認でき、目標の降伏荷重 200kN に対応する性能を有していることが確認できる。本試験の結果より、後述する有孔 CLT 壁の検討では最大水平荷重 300kN に対して検討を行う。

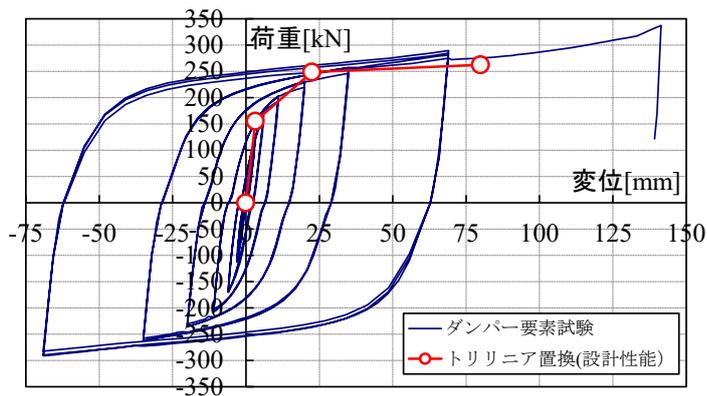


図 2. 1. 3-1 荷重変形関係



図 2. 1. 3-2 損傷状況

2. 2) 有孔 CLT 壁試験

2. 2. 1) 試験体の仕様

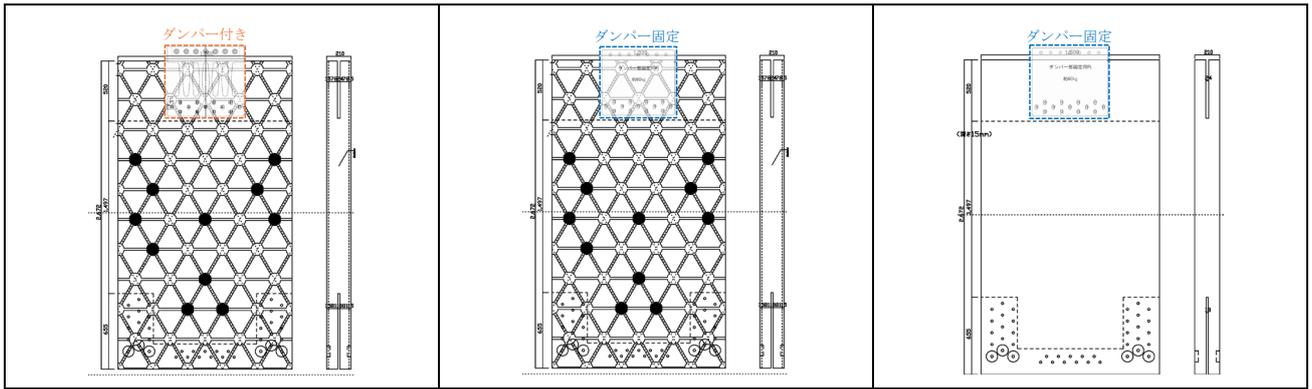
試験体一覧を表 2. 2. 1-1 に示す。試験体 No. 1, 3 (開口 A) は本 PJ の 1 階で、試験体 No. 2, 4 (開口 B) は 2 階から 9 階で採用する有開口壁仕様となっており、試験体 No. 5 (開口 C) は今後開口デザインの自由度を高める目的で丸開口を最大限空けた仕様で、試験体 No. 6 は比較用に無開口の試験体とした。更に深さ 15mm の表面ライン加工も行っており、試験体 No. 1, 3 は両面にライン加工しているため構造体としての壁厚は 180mm、試験体 No. 2, 4 は片面にライン加工しているため構造体としての壁厚は 195mm、試験体 No. 5, 6 はライン加工なしのため構造体としての壁厚は 210mm となっている。代表として図 2. 2. 1-1 に No. 1 試験体の全景写真を示す。また、試験体 No. 1, 2, 5 は鋼材ダンパー付き試験として、試験体 No. 3, 4, 6 はダンパー部固定試験で CLT パネルに最大限応力負担させたときの破壊性状を確認する。



図 2. 2. 1-1 No. 1 試験体全景

表 2. 2. 1-1 試験体一覧

No. 1		No. 3		No. 5	
ダンパー付き	開口 A	ダンパー固定	開口 A	ダンパー付き	開口 C
S90-5-7	有効厚 180mm	S90-5-7	有効厚 180mm	S90-5-7	有効厚 210mm
両面ライン加工 (-15mm×2)		両面ライン加工 (-15mm×2)		ライン加工なし	
No. 2		No. 4		No. 6	
ダンパー付き	開口 B	ダンパー固定	開口 B	ダンパー固定	無開口
S90-5-7	有効厚 195mm	S90-5-7	有効厚 195mm	S90-5-7	有効厚 210mm
片面ライン加工 (-15mm×1)		片面ライン加工 (-15mm×1)		ライン加工なし	



開口形状を図 2.2.1-2 から図 2.2.1-4 に示す。No. 1~4 は本 PJ で採用する形状として加工ルーターの形状から角部に R を残した六角孔と三角孔を採用し、No. 5 は比較的簡易に加工できる $\phi 100$ の丸孔を採用した。



図 2.2.1-2 開口形状：六角孔
(試験体 No. 1、2、3、4)



図 2.2.1-3 開口形状：三角孔
(試験体 No. 1、3)



図 2.2.1-4 開口形状：丸孔
(試験体 No. 5)

2. 2. 2) 事前設計・解析

有孔 CLT 壁は、前述した鋼材ダンパーの最大水平力 300kN に対して、孔加工と溝加工による無効断面を考慮した断面性能に対して、ダンパー部に想定水平力を加えた際の CLT パネルに生じる曲げモーメントとせん断力に対する略算確認を行い、更に FEM 解析による詳細計算により開口付近や開口間の局所応力等の確認により、最終的な開口形状を意匠設計者とすり合わせし決定した。

代表的な略算として各開口パターンの試験体に対して、断面欠損の一番厳しい部位の CLT 母材のせん断検定結果を図 2.2.2-1 に示す。せん断強度 F_s はラミナ枚数によって値が異なるが、略算として解くため試験体幅全体から考え、CLT 設計施工マニュアルに記載された $m=7$ の際の性能を用いた結果を示す。最も厳しいのが開口 A で検定比が 0.80 となり、計算上での余裕度を確認した。なお、同様の応力状態に対して、母材の曲げモーメントに対する検定、脚部の引張／せん断接合部や治具の検定確認を行っており、CLT 脚部の引張接合部の集合型破壊の検討値は 0.78 と母材せん断検定の最大値と概ね同程度であることを確認している。

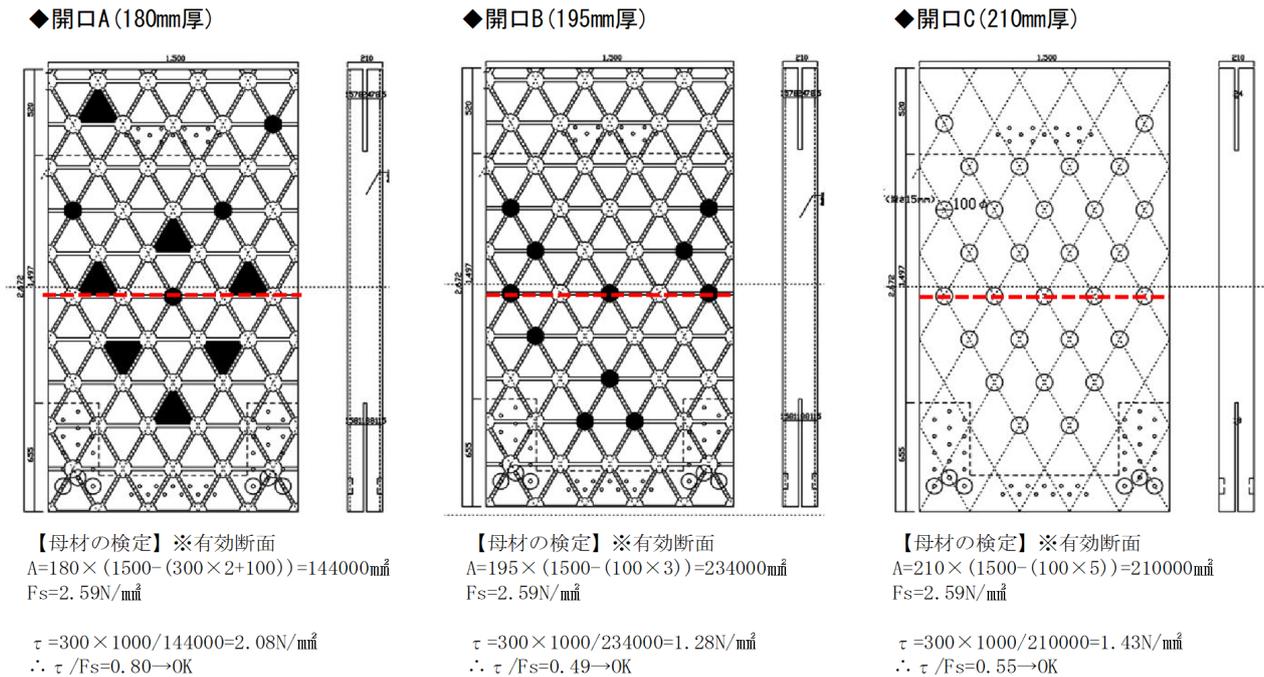


図 2.2.2-1 有孔 CLT 母材のせん断応力検定(開口及び溝加工の断面欠損を考慮)

次に FEM を用いて CLT パネルの開口付近の詳細応力を確認する。図 2.2.2-2 にモデル概要を示す。試験体の開口部を設けた板要素による 2 次元 FEM モデルであり、CLT パネル特有の強軸方向と弱軸方向の性能の違いを考慮した板要素を配置している。脚部は DP 接合部に CLT と DP の支圧を考慮した節点支持バネを配置し、試験体上部の鋼材ダンパーの DP 接合部に目標性能である水平荷重 300kN を与える弾性モデルである。

代表として無開口と開口 A のモデルによる FEM 解析結果の一例を示す。図 2.2.2-4 から図 2.2.2-6 に無開口と開口 A の変形図を見た時、無開口の最大変形が 9.57mm に対して、開口 A は 10.98mm で開口を設けたことで剛性が 87% になっていることが確認できる。図 2.3.2-4 は軸力図(強軸)では、引張接合部上部の高さの縁部で応力度が大きく、無開口が 9.1N/mm^2 で開口 A が 10.8N/mm^2 と 18% ほど上昇していた。せん断力図では、無開口では最大で 1.5N/mm^2 に対して、開口 A では開口間で 2.8N/mm^2 となり、開口を設けることでせん断応力が集中する部位が発生することが確認できる。なお、局所的に発生する応力なども存在するが既往の文献などを参考に設計強度に対する実強度の割合等も鑑み、本開口で形状を決定した。

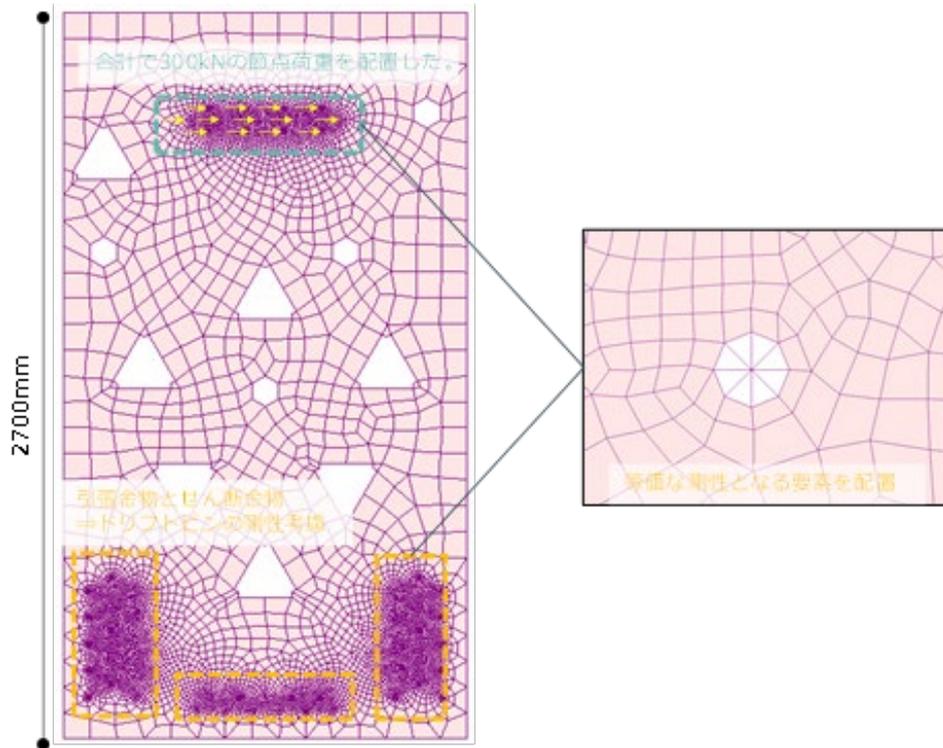


図 2. 2. 2-2 有孔 CLT パネルの FEM モデル概要

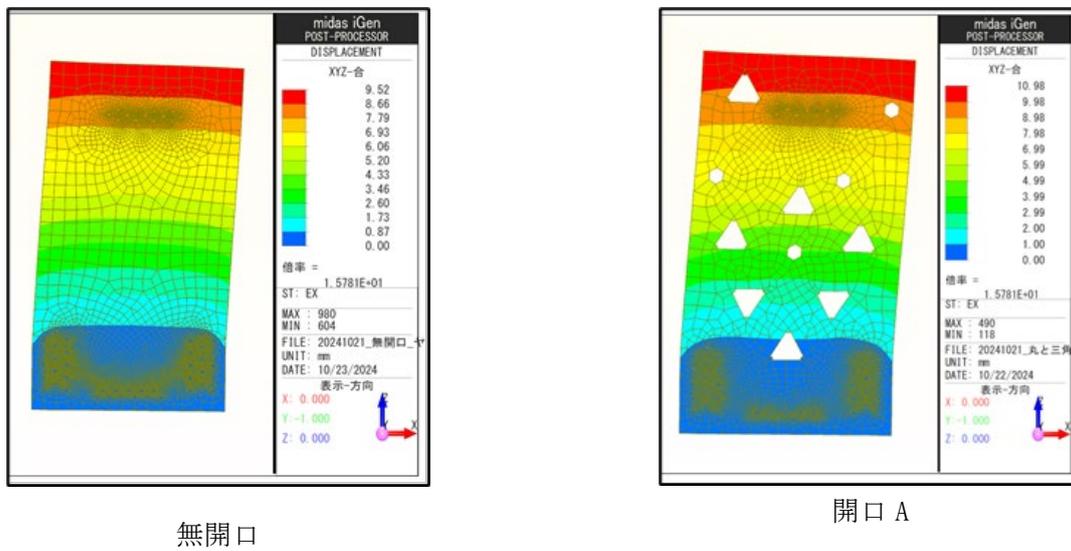
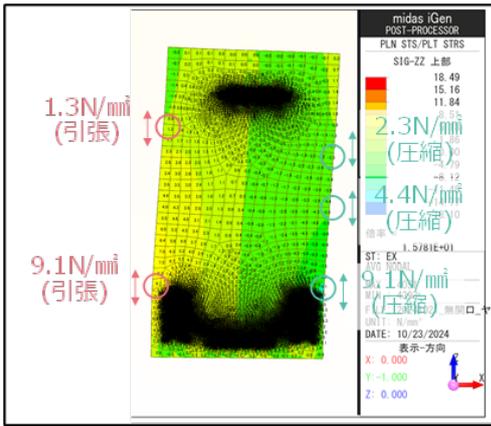
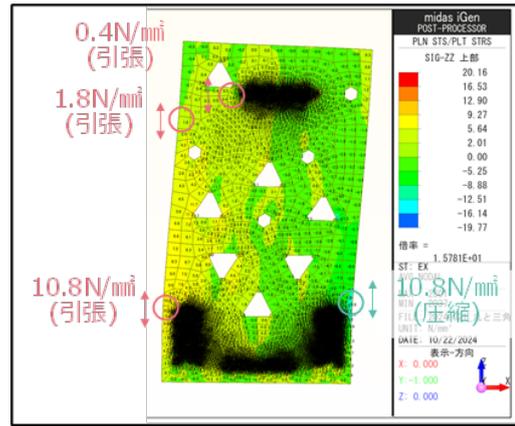


図 2. 2. 2-3 変形図

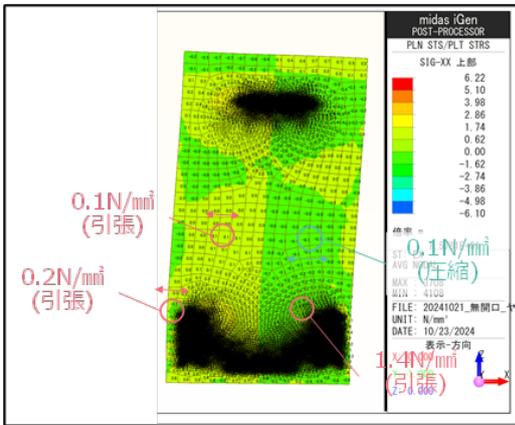


無開口

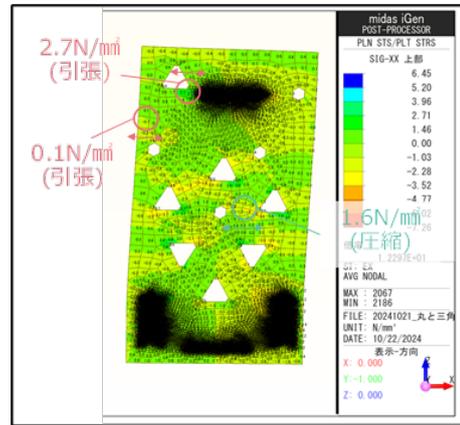


開口 A

図 2.2.2-4 軸力図(強軸)

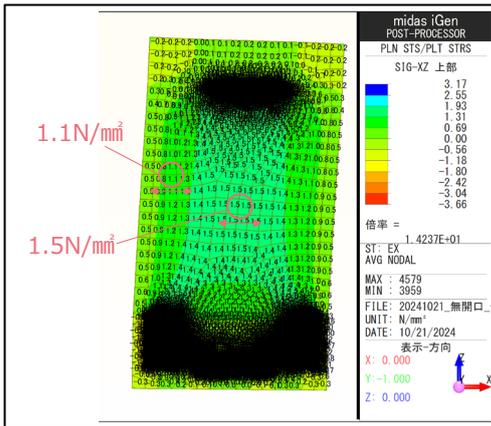


無開口

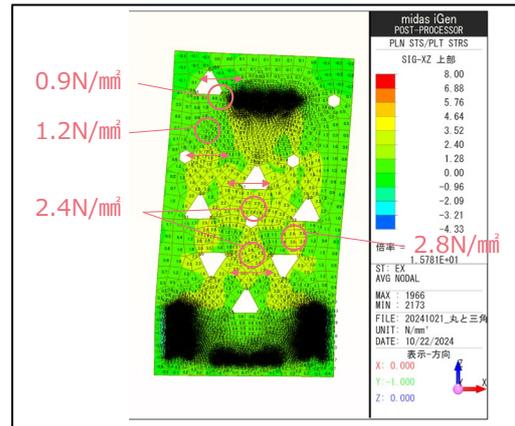


開口 A

図 2.2.2-5 軸力図(弱軸)



無開口



開口 A

図 2.2.2-6 せん断力図

2. 2. 3) 加力計画・計測計画

試験体下部の鉄骨治具はケビンデスターブ D32 を用いて反力床に固定し、試験体上部の鋼板ダンパーはスプライスプレートを通じて鉄骨治具と HTB 接合し、その鉄骨治具を試験機と HTB 接合して固定させた。

水平加力は、図 2. 2. 3-1 のジャッキ①を用いて正負繰返しを行う装置を用いた。鉛直方向のジャッキ②③は基本的には可動させずピン部材としての役割に期待している。

加力方法は、漸増正負交番3回繰返しで行い、ジャッキの引側を正、押側を負として、目標変形角1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50radの順番で加力し、最後は1/30radの確認を行った。また、試験体の面外変形を拘束する為に、3か所にパンタグラフを設置した。

図 2. 2. 3-1 に試験体のセットアップ図及び変位計の計測計画、図 2. 2. 3-2 にひずみゲージおよびDIC(デジタル画像相関法)の計測計画を示す。変位計測は主に層間変形角の他、各接合部の滑り変形やCLTパネル自体のせん断変形の計測を試みた。また歪ゲージは試験体脚部のCLTパネル強軸方向に一定間隔で貼り付け全体的な歪分布の違いに着目した計測と、FEM解析によって比較的応力が大きな開口付近を計測した。DICは緑色で囲った範囲に白色スプレーを施した後、黒色のドットを施し、一定間隔でカメラによる画像を計測した。

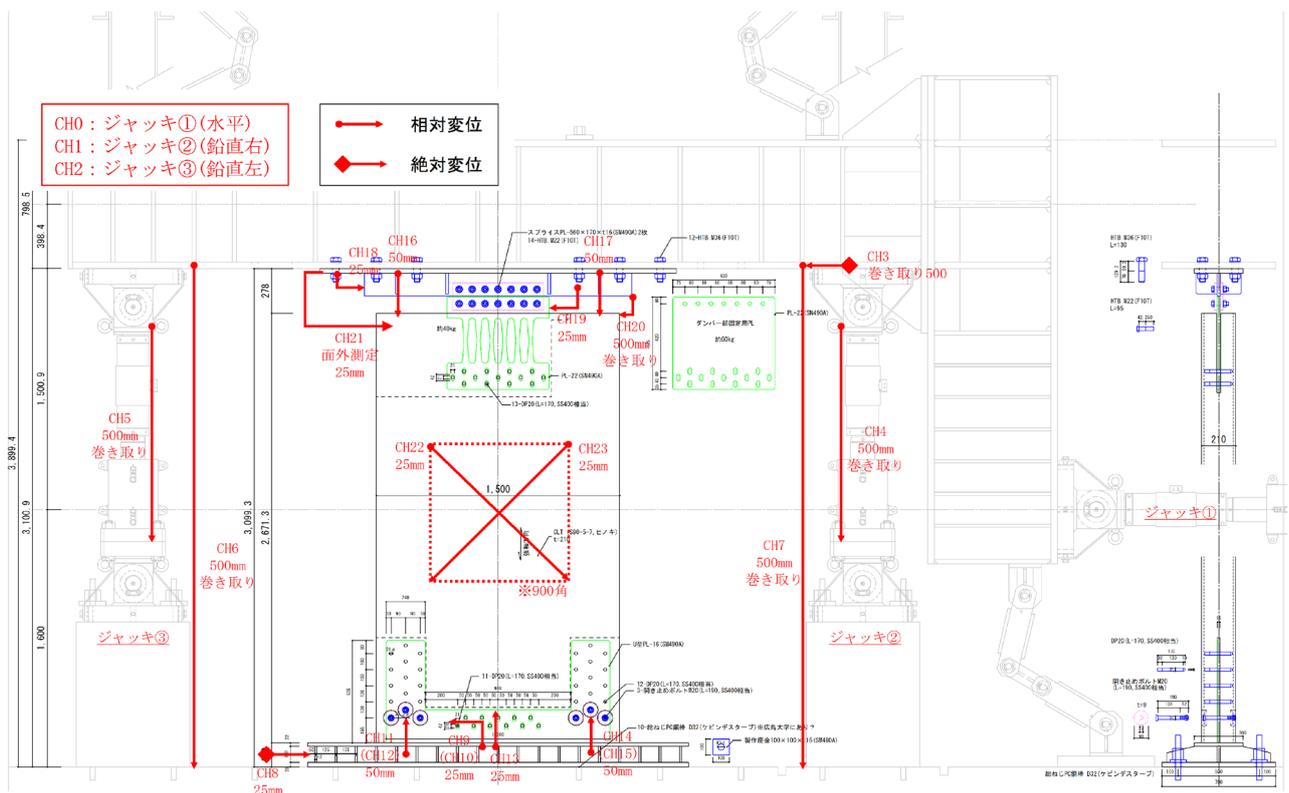


図 2. 2. 3-1 試験体セットアップ 及び 計測計画(変位計)

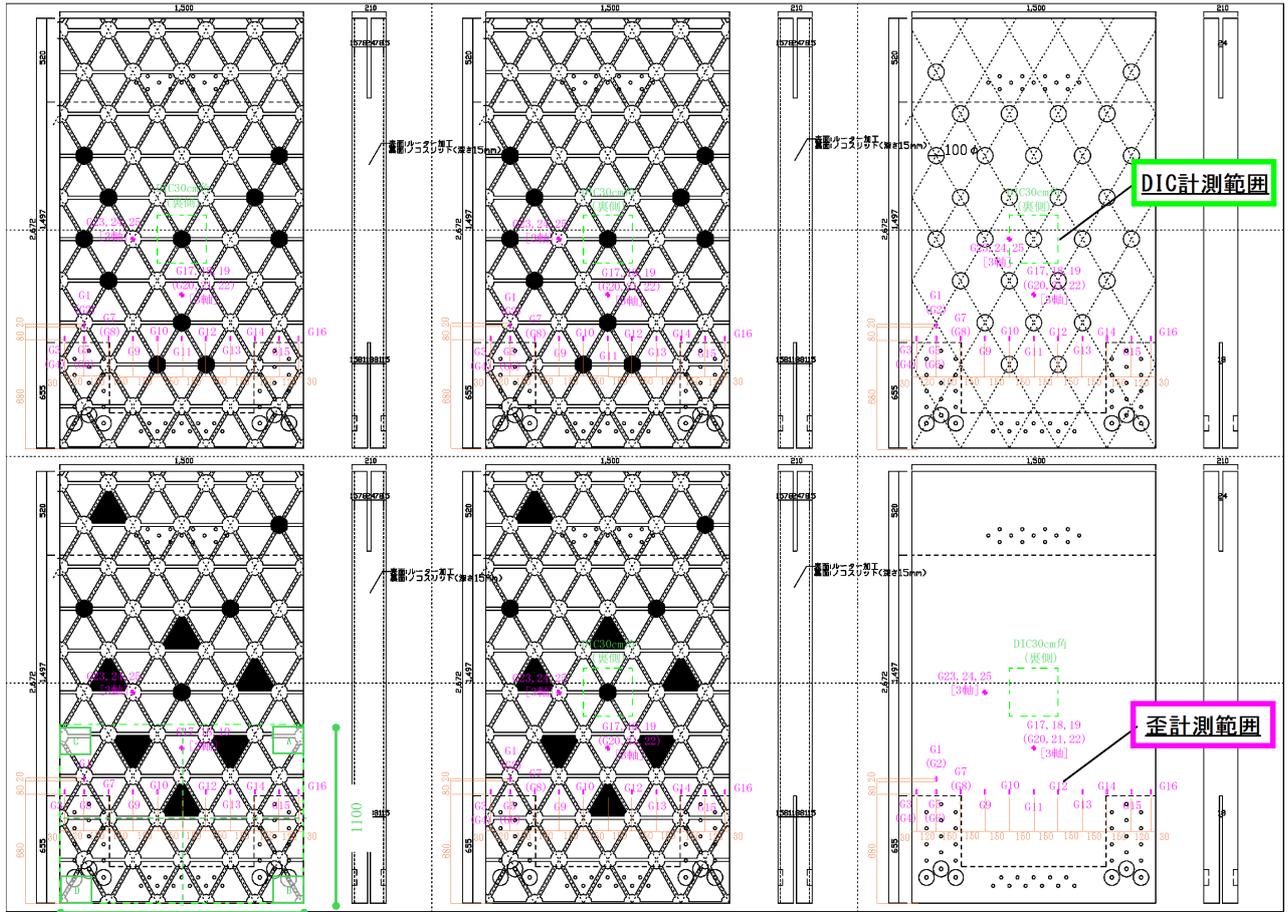


図 2.3.3-2 計測計画(ひずみゲージ、DIC)

2. 2. 4) 実験結果

2. 2. 4. 1) 荷重変形関係・破壊性状

(1) ダンパー付き試験

ダンパー付き試験体 No. 1、2、5 の荷重変形関係を表 2. 2. 4. 1-1 に示す。試験体 No. 5 は、試験機の都合上、1/75rad 以降は正加力のみ行ったので、1/30rad 以降も破壊が確認されず、引き切りを実施したが、層間変形 200mm(約 1/15rad) 手前でストロークの限界で加力を中断した。

1/50rad 時の水平荷重は、いずれの試験体も 275kN 程度と目標降伏荷重 200kN を超えることを確認し、かつ、CLT 開口部や鋼材ダンパーに亀裂も見られず、期待した鋼材の紡錘型の履歴ループが確認できた。No. 1 及び No. 2 は 1/50rad を 3 回繰り返した後、1/30rad の加力の途中で鋼材ダンパー部の櫛状部に亀裂発生し、荷重低下して加力を終了した。

図 2. 2. 4. 1-1 は、図 2. 1. 3-1 で示した鋼材ダンパーの設計用性能に、CLT パネルの片持ち柱と脚部の回転剛性を考慮した支持材剛性を直列剛性として計算した壁の設計性能を、試験体 No. 1、No. 2 の荷重変形関係を重ねて示す。No. 1 と No. 2 は開口形状が異なるが荷重変形が概ね同様であることが確認でき、いずれも赤線で示した設計性能と概ね一致することが確認できた。

試験体 No. 1、2 が試験体 No. 5 と異なり、1/30rad の加力中に鋼材ダンパーが損傷した原因として、降伏後に変形を繰り返して行ったことにより耐力低下したが、別途鋼材ダンパー部の実験結果より塑性率 23 程度の累積塑性変形倍率を確認したところ 250 程度であり、既往の制振装置と概ね同程度の性能を有していることを確認した。

表 2. 2. 4. 1-1 荷重変形関係・損傷状況(ダンパー付き試験体)

	No. 1(開口 A)	No. 2(開口 B)	No. 5(開口 C)*
荷重変形関係			
損傷状況			

*No.5 試験体：加力装置の都合、1/75rad 以降は正加力のみ行った。

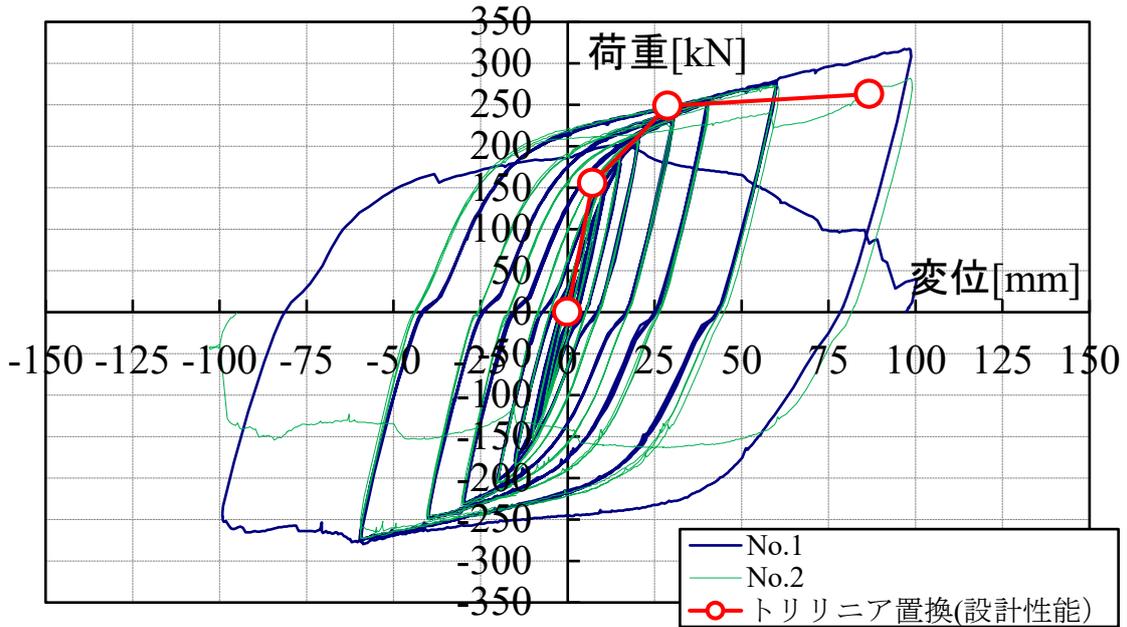


図 2.2.4.1-1 壁設計用性能と試験結果の比較

(2) ダンパー固定試験

ダンパー固定試験では、最大荷重が No. 3 で 402kN、No. 4 で 579kN、No. 6 で 519kN であり、目標とした 300kN に対して余裕度が確保されていることを確認できた。いずれの試験体も引張接合部の集合型破壊により終了していることが確認され、最大荷重時においても、開口周りの大きな亀裂・損傷等は確認されなかった。

表 2.2.4.1-2 荷重変形関係・損傷状況(ダンパー固定試験体)

	No. 3(開口 A)	No. 4 (開口 B)	No. 6(無開口)
荷重変形関係			
損傷状況			

2. 2. 4. 2) DIC による各部のひずみ

亀裂・損傷の要因になり得る開口周囲の局所ひずみを DIC(デジタル画像相関法)で実測した。DICの計測は、試験体に描いたランダム模様をカメラで撮影し、変形前後の画像の輝度相関から変位を測定する。ランダム模様は白塗料による下地塗装後、黒スプレーを吹き付けて作成した。本試験では計測面が平面であり、面内方向のみに载荷する為、一台のデジタルカメラで2次元変位を計測する2D-DICで計測を行った。ここでは、試験体 No. 5(ダンパーあり)試験後の CLT 壁パネルを再利用し、ダンパー部を固定した試験体 No. 5b(ダンパー固定)の測定結果を取り上げ、図 2.2.4.2-1 に測定状況、図 2.2.4.2-2 にランダム模様塗装を示す。なお、本試験は引き切り単調载荷とした。

画像計測処理結果として、図 2.2.4.2-3 に DIC による各変形角の最大主ひずみ図を示す。1/150rad 時(300kN)の段階で開口形状に沿ったひずみが確認された。更に変形が増大した 1/40rad 時(550kN)では、開口縁部の局所的なひずみとラミナ間のせん断ずれが生じ、1/30rad(335kN)時では開口縁部から亀裂が確認された。今後は FEM 解析結果との比較分析も検討したい。

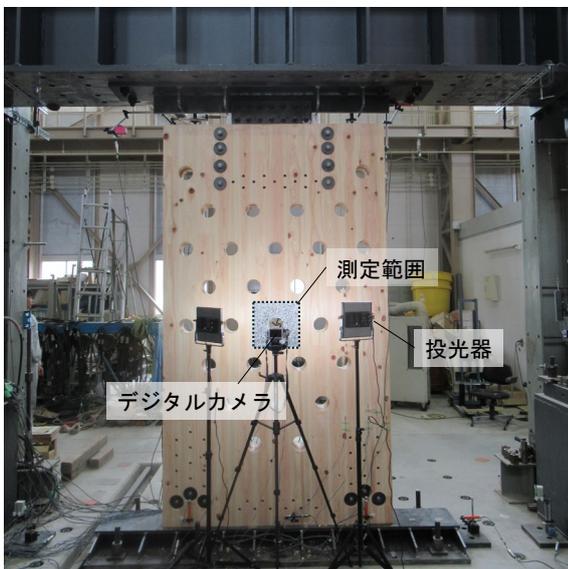


図 2.2.4.2-1 測定状況

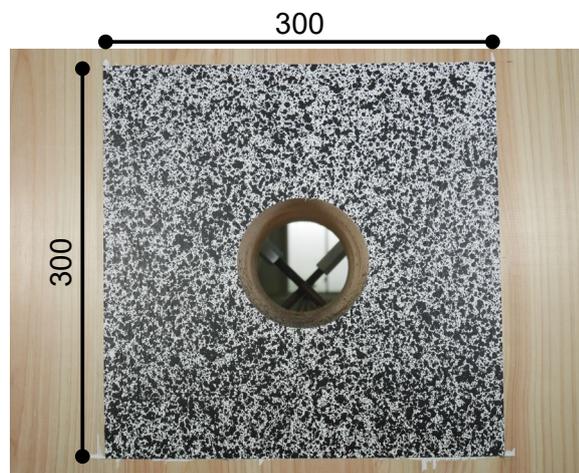


図 2.2.4.2-2 ランダム模様塗装

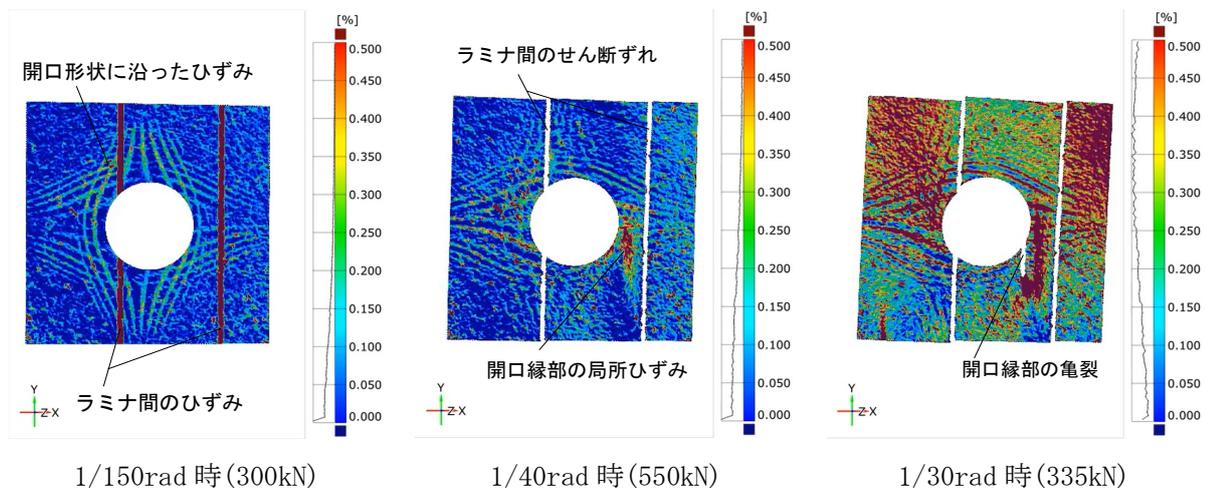


図 2.2.4.2-3 最大主ひずみ図

2. 2. 5) 実験結果の設計用モデルへの反映

本PJでは有孔CLT制振壁は付加制振であり、鉄骨造純ラーメン構造で基準法を満足させる性能を確認した上で有孔CLT制振壁を設けた場合に周辺部材に悪さをしない確認を行う。有孔CLT制振壁は鋼材ダンパーと剛性を有する制振壁となるため、一貫構造計算モデルにおいては、図2.2.5-1に示すような鋼材ダンパーと有開口による剛性低下を反映させてCLT壁パネル要素に、脚部の回転剛性を有するモデルとして全体計算モデルに反映させ、周辺部材の確認を行う。

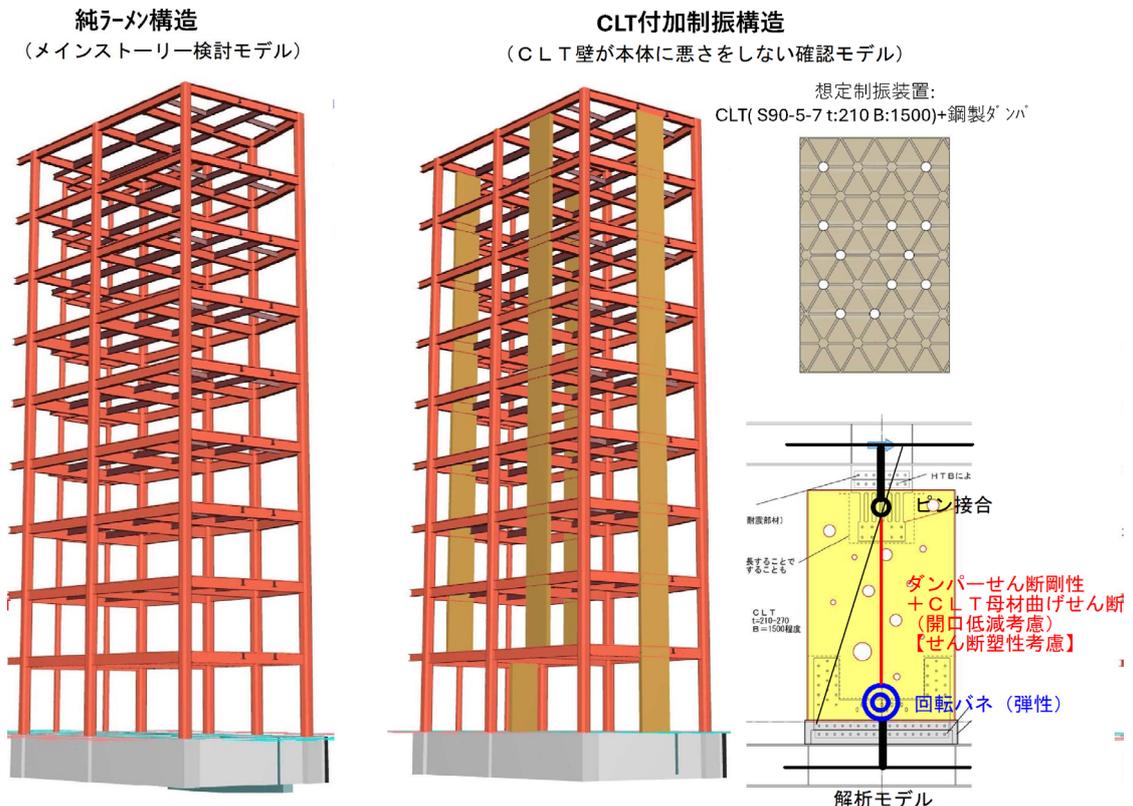


図 2.2.5-1 付加制振構造による設計イメージ

3) コスト比較

本実証事業のコスト比較方針として、①：本PJと既往PJのCLT壁のコスト比較、②：本PJにおけるCLT制振壁のコスト割合と応答低減効果、の2通りの検証を行った。

①：本PJと既往PJのCLT壁のコスト比較

ディテールのコスト比較を実施するにあたり、本事業と同様に鉄骨造にCLTを適応した既往PJ(図3-1)を比較対象とした。条件は、両PJともCLTパネル材の立米単価を25万/m³と条件を揃えた。既往PJに関しては、両端にタイロッドの費用を、本PJは有開口・表面加工費用も含めてコストを算出した。

ディテールの比較表を表3-1に示す。既往PJではCLTパネルの圧縮ストラットに期待し、CLT接合金物はせん断金物のみ(別途、タイロッド等の引張金物が必要)であり、かつ比較的的水平性能は高く期待できるが、スリップ型の履歴となり、開口に対する検討がなされていない。一方で本PJは鋼材ダンパーを採用しCLTが負担する応力を一定に抑え、有開口と表面加工を施しており、金物費用とパネル加工費の影響で既往PJよりもコストは高くなるが、その分、耐力の範囲内で自由な開口を設けることが出来るな

ど意匠的な自由度が高い。その特徴を踏まえコストを比較すると、既往PJは73万/m³、本PJは89万/m³と22%程、本PJの方がコストは増える結果となった。その22%のコスト増のうち、7%が鋼材ダンパーと引張接合部を使用したことによる金物費用のコスト増加、15%がCLTの有開口・表面加工費によるコスト増加であることが確認された。PJに応じて求められるCLT壁の性能は異なるため参考にされたい。

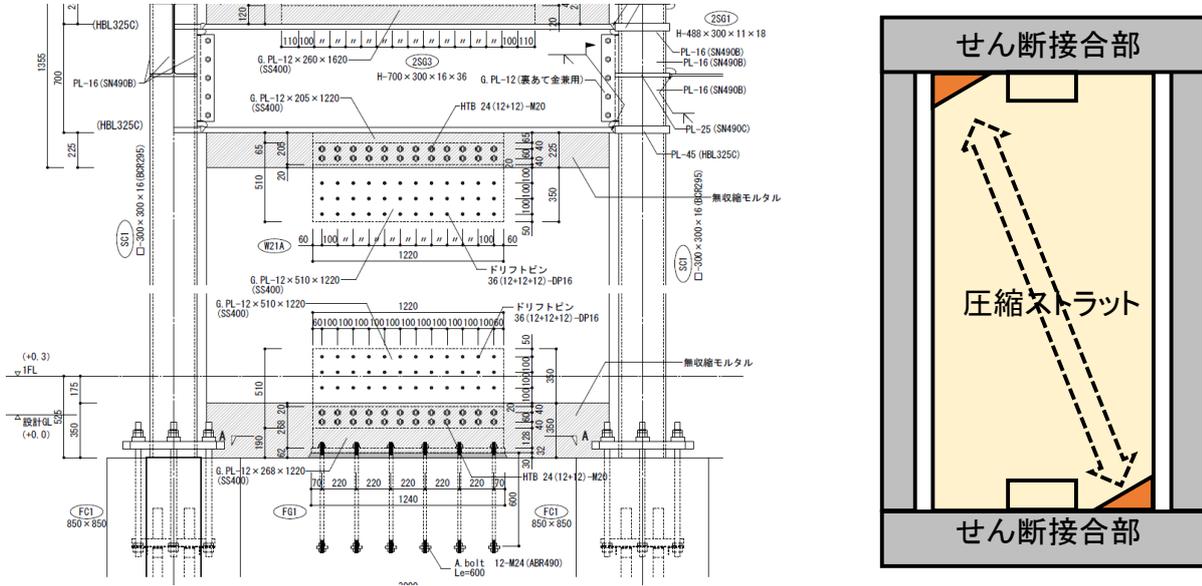


図 3-1 既往PJのディテール

表 3-1 ディテール比較

		既往PJ	創設PJ
コンセプト		CLT耐震壁の性能を最大限活用	自由な開口と耐震性能を兼ね備えたCLT壁
金物仕様		せん断金物	鋼材ダンパー、引張接合部、せん断接合部
構造性能	耐力	◎ ^{※1}	○ ^{※1}
	エネルギー吸収	◎	○
開口		△	◎
コスト		73万/㎡(100%)	89万/㎡(122%)
特徴		<ul style="list-style-type: none"> ・構造性能は高く、金物の量を最低限に抑えている。 ・CLTパネルの性能を最大限使う為、開口を自由に設けることが出来ない。 ・CLTの両側面にタイロッドを設ける必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・CLTが負担する応力を一定に抑えることで、自由な開口が設けられる。 ・金物費と有開口、表面加工費の影響で、既往PJよりコストが高い。

※1. 耐力性能は既往PJが205kN/m、本PJが104kN/mである。

②：本PJにおけるCLT制振壁のコスト割合と応答低減効果

本PJの基本設計段階の概算の結果、鉄骨総数量は約166tで夜間工事を含まない鉄骨工事費は約1.46億(84万/ton)であった。一方で、CLTの総材積は32m³であり、建て方も含めた工事費は約3400万程度となった。鉄骨工事費に対するCLTに係る費用は23%となった。一方で有孔CLT制振壁の付加により約20%の応答低減効果があることを別途応答解析により確認しているが、S造ラーメンフレームの断面アップのみで同等の効果を得るためにも数量と費用のアップが想定されるが、これら耐震性の向上も含めた費用対効果の検証は今後も必要であると考えられる。

4) まとめ

本実証を通して次の結果が得られた。

(1) 有孔 CLT 制振壁の付加による建物の応答低減効果

- ・本プロジェクトで開発した開口を有する CLT 制振壁を、本建物に付加することにより、大地震を想定した地震応答に対して、20%程度の応答低減効果を確認した。

(2) ダンパー要素試験

- ・CLT 接合部の一部に採用した、鋼板の中央部に拡がりがあるスリット状の孔を開けた鋼材ダンパー単体のせん断試験を行った。その結果、既往の文献から算出されるダンパー性能の予測値と概ね同等の荷重変形関係を示すことが確認された。

(3) 開口を有する CLT 制振壁の構造特性値の取得

- ・複数の開口パターンを有する CLT 制振壁でダンパー付きとダンパー固定とした場合の壁試験を実施した。ダンパー付き試験では、既往文献から算出される予測値および要素試験結果の荷重変形関係と概ね対応する結果が得られ、ダンパー性能が支配的な履歴特性を示すことが確認された。ダンパー固定試験では、開口を有する CLT 制振壁の剛性と耐力を明らかにした。いずれの開口パターンにおいても、脚部の引張接合部の集合型破壊が最終的な破壊形式となり、その際、開口周辺に大きな亀裂や損傷は確認されなかった。

(4) コスト比較

- ・既往PJは73万/m³、本PJは89万/m³と、主に金物費用とパネル加工費の差で22%程、本PJの方がコストは増えるが、高い意匠性と構造性能、メンテナンス性を兼ね備えた CLT 制振壁を実現できることを把握した。また、純鉄骨造とのコスト比較として、CLTに係る費用は全体費用の23%であるが、応答低減効果が約20%見込めた。

-
- ¹⁾ 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、1991. 03
 - ²⁾ 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、2014. 03