

2.1 (株) 三菱地所設計／(株) 竹中工務店 東北支店

1. 建築物の仕様一覧

事業名		(仮称) 仙台市泉区高森2丁目プロジェクト（高層集合住宅）の設計・性能実証	
実施者（担当者）		株式会社三菱地所設計／株式会社竹中工務店東北支店	
建築物の概要	用途		共同住宅
	建設地		宮城県仙台市
	構造・工法		鉄骨造+CLT床+CLT耐震壁+燃え止まり型耐火集成材柱（燃エンウッド）
	階数		10
	高さ（m）		33.695
	軒高（m）		32.575
	敷地面積（㎡）		3550.79
	建築面積（㎡）		519.6
	延べ面積（㎡）		3604.79
	階別面積		1階
2階～10階			348.66
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、床
	CLT使用量（㎡）		加工前製品量255㎡（予定）、建築物使用量215㎡（予定）
	壁パネル	寸法	150mm厚
		ラミナ構成	5層5プライ
		強度区分	S60A
		樹種	スギ
	床パネル	寸法	210mm厚
		ラミナ構成	5層7プライ
		強度区分	Mx60A
樹種		スギ	
木材	主な使用部位（CLT以外の構造材）		燃え止まり型耐火集成材柱 化粧材：スギ集成材 被覆材：カラマツ集成材 荷重支持部材：カラマツ集成材
	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		17㎡（予定）
仕上	主な外部仕上	屋根	アスファルト防水絶縁断熱工法 保護塗装
		外壁	ALC t=100 防水形複層塗材E
		開口部	アルミサッシ+二層複層ガラス
	主な内部仕上	界壁	（PB21+9.5×2+LGS（GW24K50mm）+PB21+9.5）両面
		間仕切り壁	PB12.5+LGS+PB12.5
		床	シートフローリング12+二重床+S L プラスター60+トップコン80+CLT
構造	天井		CLT+PB15×3+ケイカル板15+LGS天井下地+PB9.5
	構造計算ルート		保有水平耐力計算（ルート3）+任意の構造性能評価
	接合方法		CLT床：CLT切欠き部への配筋とコンクリート充填、ラグスクリュー CLT壁：せん断金物+ドリフトピン、隅角部金物+LSB、CLTコッターのコンクリートの埋め込み
	最大スパン		7.2m
	問題点・課題とその解決策		【問題点・課題】高い施工効率・高耐力・高剛性のCLT接合方法の確立 【解決策】施工性の検証の実施及び構造実験による検証の実施
防耐火	防火上の地域区分		指定なし
	耐火建築物等の要件		耐火建築物
	本建築物の防耐火仕様		2時間耐火
温熱	問題点・課題とその解決策		【問題点・課題】共同住宅の床として必要な性能（遮音・遮臭・界床・振動等）を満足する2時間耐火仕様の設定 【解決策】振動、遮音性能を満足できる2時間耐火仕様の設定と耐火試験による検証と大臣認定の取得
	建築物省エネ法の該当有無		届け出対象
	温熱環境確保に関する課題と解決策		【課題】断熱材とCLT耐火層及び外装材との取り扱い 【解決策】最上階及び外装材から1mの範囲はRCスラブとする。
	主な断熱仕様（断熱材の種類・厚さ）	屋根（又は天井）	A種硬質ウレタンフォーム2種2号 t 35
		外壁	A種1H吹付硬質ウレタンフォームt=25
床		A種硬質ウレタンフォーム3種 t 35	
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		H29.1月～H30.2月（14カ月）
	施工期間		－
		CLT躯体施工期間	－
	竣工（予定）年月日		（予定）H31.2月末
体制	発注者		株式会社 三菱地所設計
	設計者（複数の場合はそれぞれ役割を記載）		株式会社 竹中工務店 1級建築士事務所
	構造設計者		株式会社 竹中工務店 1級建築士事務所
	施工者		株式会社 竹中工務店 東北支店（予定）
	CLT供給者		未定
	ラミナ供給者		未定

実証事業名：(仮称)仙台市泉区高森2丁目プロジェクト（高層集合住宅）の設計・性能実証
 実施者／協議会運営者または担当者：(株)三菱地所設計／(株)竹中工務店

1. 実証した建築物の概要

用途		共同住宅		
建設地		宮城県仙台市		
構造・工法		鉄骨造+CLT 床+CLT 耐震壁+燃え止まり型耐火集成材柱 (燃エンウッド)		
階数		10 階		
高さ (m)		33.695	軒高 (m)	32.575
敷地面積 (㎡)		3,550.79	建築面積 (㎡)	519.6
階別面積 (㎡)	1 階	464.39	延べ面積 (㎡)	3,604.79
	2 階～10 階	348.66		
	—	—		
CLT 採用部位		壁、床		
CLT 使用量 (m³)		加工前製品量 255 m³, 建築物使用量 215 m³		
CLT を除く木材使用量 (m³)		17 m³		
CLT の仕様	(部位)	(寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種)		
	壁	150mm 厚, 5 層 5 プライ, S60A, スギ		
	床	210mm 厚, 5 層 7 プライ, Mx60A, スギ		
	屋根	—		
設計期間		H29.1 月～H30.2 月 (14 カ月)		
施工期間		—		
CLT 躯体施工期間		—		
竣工 (予定) 年月日		(予定) H31.2 月末		

2. 実証事業の目的と設定した課題

(1) 実証事業の目的

高層集合住宅において CLT を構造床として採用する際の構造や耐火、居住性能上の各種問題を解決し、今後、CLT が床部材（建材）としての普及・展開に資する性能データの取得と実証、設計手法の構築を目的に本事業を実施する。

(2) 設定した課題

①床材としての耐火性能上の課題

生産性の高い 2 時間耐火構造の CLT 床仕様・周辺技術の考案・検証と国土交通大臣認定の取得

②床材としての居住性能上の課題

従来の RC 造床と同等の居住性能（重量床衝撃音性能等）を確保するための仕様の考案・検証

③床材としての構造・施工上の課題

CLT パネルと鉄骨梁等との合成効果を期待できる合理的な接合方法の確立と架構への影響評価方法

3. 実証事業の実施体制（または協議会構成員）

（竹中工務店）

東北支店 野村篤、木造・木質建築推進本部 松崎裕之、小林道和

東京本店設計部 宮地克彰、梅野圭介、麻生直木、花井厚周、飯田智裕

（三菱地所）

住宅業務企画部・新事業創造部 伊藤康敬、柳瀬拓也、三村翔

（三菱地所設計）

建築設計二部 名倉良起、構造設計部 石橋洋二、海老澤渉

（山佐木材）

技術本部 塩崎征男

4. 課題解決の方法と実施工程

（1）課題解決の方法

①耐火性能上の課題と解決方法

計画：性能を満足し高い生産性を確保する仕様を協議会等で考案した。

実施：耐火仕様にもとづき検証のための実験計画を行い建材試験センター等で性能確認試験を行った。

検証：実験結果の評価と目標性能の検証を行う。実用化に向けて国土交通大臣認定を取得した。

②居住性能上の課題と解決方法

計画：居住性能（重量床衝撃音・天井騒音等）を低減・満足する床仕様を協議会等で考案した。

実施：竹中技術研究所でそのデータ取得のための実験を行った。

検証：防振仕様・対策ごとの振動特性と FEM 解析、性能予測・評価手法を構築した。

③構造・施工上の課題と解決方法

計画：CLT 部材間や RC 造・鉄骨造部材との接合方法とその構造設計手法案を立案した。

実施：接合部要素試験等を通じて接合部変形追従能力等の力学データを取得した。

検証：設計手法の検証とそれらを反映した設計法を構築し、耐力・剛性や部材設計法を明確にした。

(2) 実施工程

○ 協議会の開催

平成 29 年

- 第 1 回 (2 月) 基本条件の整理
- 第 2 回 (2 月) 各種性能試験計画の内容確認
- 第 3 回 (3 月) 基本計画決定、各種性能試験実施計画確認
- 第 4 回 (4 月) 各種性能試験内容確認・決定
- 第 5 回 (5 月) 基本設計方針確認・決定
- 第 6 回 (6 月) 各種性能試験実施状況確認
- 第 7 回 (8 月) 実施設計進捗確認 ※ 3 回実施
- 第 8 回 (9 月) 実施設計進捗確認・実証事業の報告書作成方針の確認 ※ 2 回実施
- 第 9 回 (11 月) 性能試験結果確認・検証 ※ 2 回実施
- 第 10 回 (1 月) 実施設計内容の確認・実証事業の報告内容確認

平成 30 年

- 第 11 回 (2 月) 実施設計内容の確認・実証事業の報告内容確認

○ 設計 平成 29 年

- 1 月～ 3 月： 基本計画
- 4 月～ 5 月： 基本設計
- 6 月～12 月： 実施設計
- 12 月～ 2 月： 構造評定
- 2 月： 建築確認申請、構造適合性判定

○ 性能確認 平成 29 年

(耐火性能検証)

- ① 3 月： 耐火予備試験
- ② 7 月： 耐火性能試験

(床重量衝撃音対策等性能検証)

- ① 4 月： 防振仕様ごとの複合スラブの指導特性把握・固有振動数、
駆動点インピーダンス計測

- ② 9 月： FEM 解析と各性能項目の性能予測・評価

- ③ 6 月,11 月： 天井部材の騒音低減効果確認実験

(構造性能・施工性能検証)

- ① 4 月： CLT 床と RC 部材の接合部試験（曲げせん断試験）
- ② 7 月： CLT 版間接合部試験（面内せん断試験・面外曲げ試験・合成効果確認試験）
- ③ 10 月： CLT 耐震壁性能確認実験

④ 1月： 柱接合部変形追従能力の検証試験

5. 得られた実証データ等の詳細

3つの課題の検証・解決により、その過程と設計・施工方法等を成果物としてまとめた

成果物① CLT 床（2時間耐火構造）の耐火被覆仕様とその性能検証結果等

成果物② 重量床衝撃音性能値に応じた防振仕様とその性能検証結果等

成果物③ 構造設計で採用した CLT 接合ディテールの力学特性値データと設計手順等

6. 本実証により得られた成果

本事業による次の実用化技術①～③を用いた CLT 構造床を他の事業者でも設計および施工が汎用的に可能となり、CLT の普及・利用促進に寄与・貢献できるようになった。

汎用技術① 高い生産性を発揮する国土交通大臣認定取得（予定）の CLT 床（2 時間耐火構造）

汎用技術② 各重量床衝撃音性能レベルに対しておおむね性能を満足する CLT 床の防振設計仕様

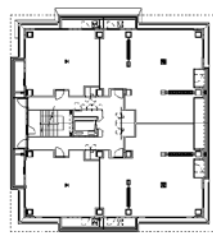
汎用技術③ 鉄骨造梁等と CLT 床を一体化する接合部の設計に必要な特性値や設計データ

7. 建築物の平面図・立面図・写真等

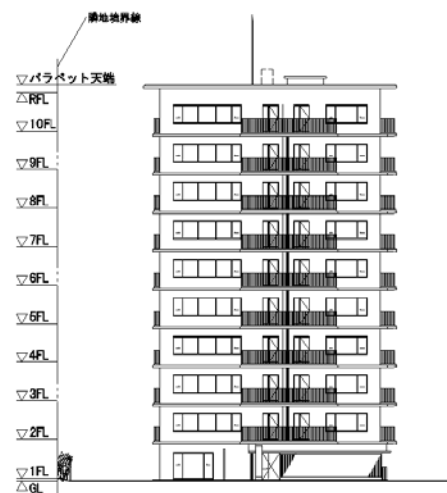
以下に外観パース及び基準階（2 階～5 階）の平面図、東面の立面図を示す。



外観パース



基準階（2～5 階）平面図



東面立面図

3. 成果物

3.1 セっこう系セルフレベリング材を用いた CLT スラブの耐火性能

3.1.1 試験の内容

本建物の設計において採用した CLT スラブには構造性能・耐火性能だけでなく、遮音性能、遮水や遮臭などの界床に求められる性能、良好な施工性など多くの機能を期待しており、図 3.1.1 に示すような湿式材料であるセっこう系セルフレベリング材およびトップコンクリートを用いた断面構成としている。

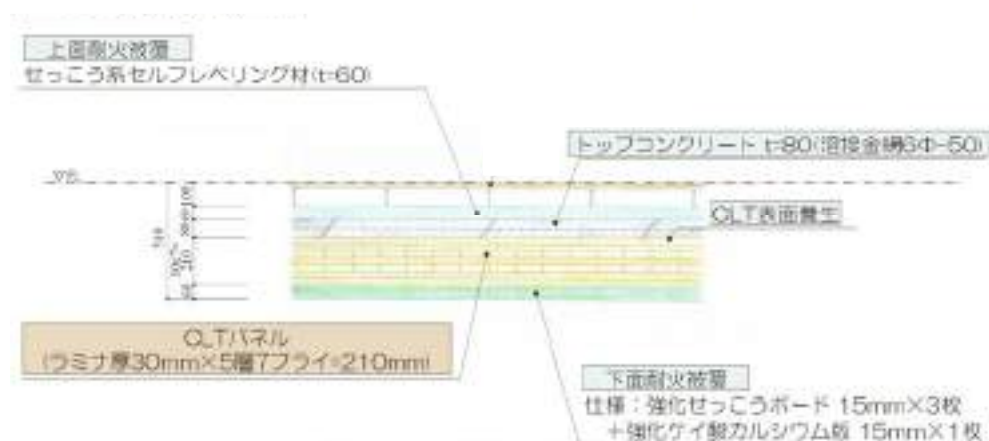


図 3.1.1 CLT スラブ断面図

本建物は 10 階建であり、6 階以下に配置される CLT スラブには 2 時間耐火性能が求められるが、今回の断面構成における耐火性能は確認されていないため、2 時間耐火加熱試験を行った。

3.1.2 試験体

試験体断面図を図 3.1.2 に示す。加熱試験は、CLT スラブの上面耐火被覆としてセっこう系セルフレベリング材を 60mm の厚さで打設したものについて実施した。CLT スラブ下面の耐火被覆仕様は、セっこうボードとけい酸カルシウム版を用いた過年度の実証事業における既認定と同じとしている。

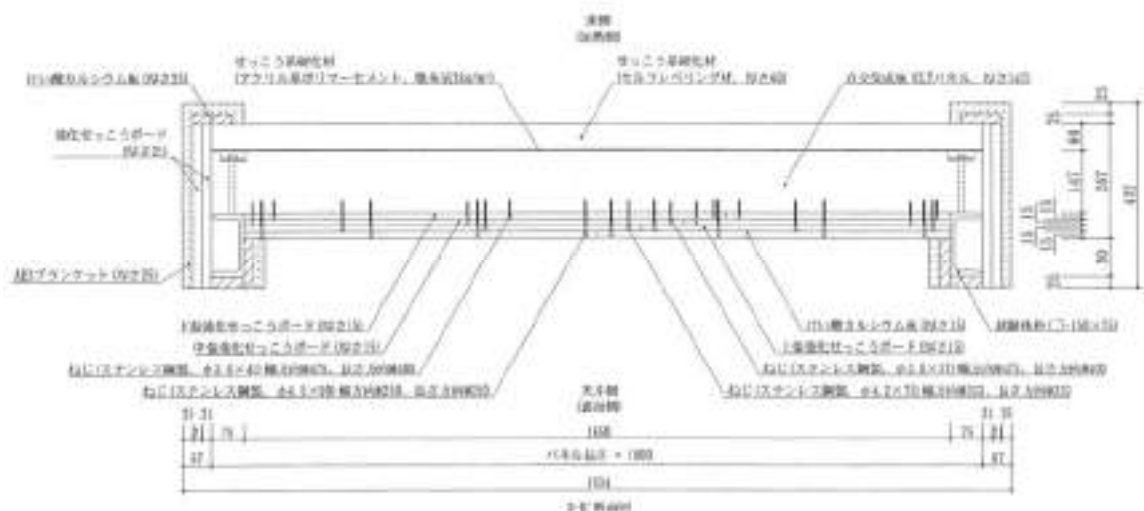


図 3.1.2 試験体断面図

3.1.3 試験方法

試験は、(一財)建材試験センターの業務方法書の耐火性能実験・評価方法に従い、図 3.1.3 に示すように 120 分の加熱を行い、加熱終了後 360 分の自然放冷を行った。その後、脱炉・試験体の解体を行い、特に加熱側の CLT 表面の変化を確認した。

なお、下面試験体については、図 3.1.4 に示すように平成 13 年国土交通省告示第 1024 号第一による座屈の許容応力から算出した長期許容応力度の相当する応力度が生じる荷重を載荷した状態で加熱を行った。このとき、材料の基準強度(曲げ) $F_b=12.14\text{N/mm}^2$ (外層ラミナの曲げ強度 $\sigma_{b_oml}=27.0\text{N/mm}^2$)、床板の載荷方法は 3 等分 2 線荷重、支持スパンは 4,200mm とした。

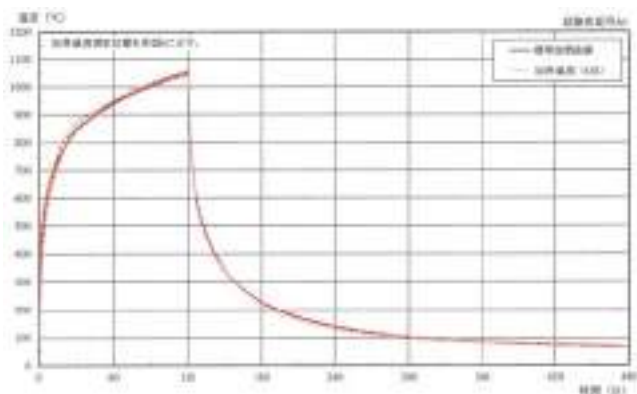


図 3.1.3 加熱曲線、炉内温度（上面加熱）

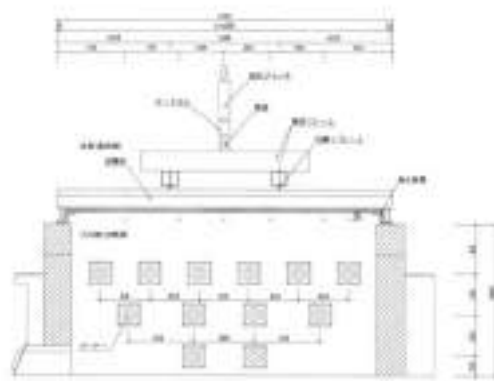


図 3.1.4 試験装置（下面加熱）

加熱開始から脱炉までの各点での温度は、図 3.1.5 に示すように、各構成要素の境界部に配置した熱電対を用いて計測した。

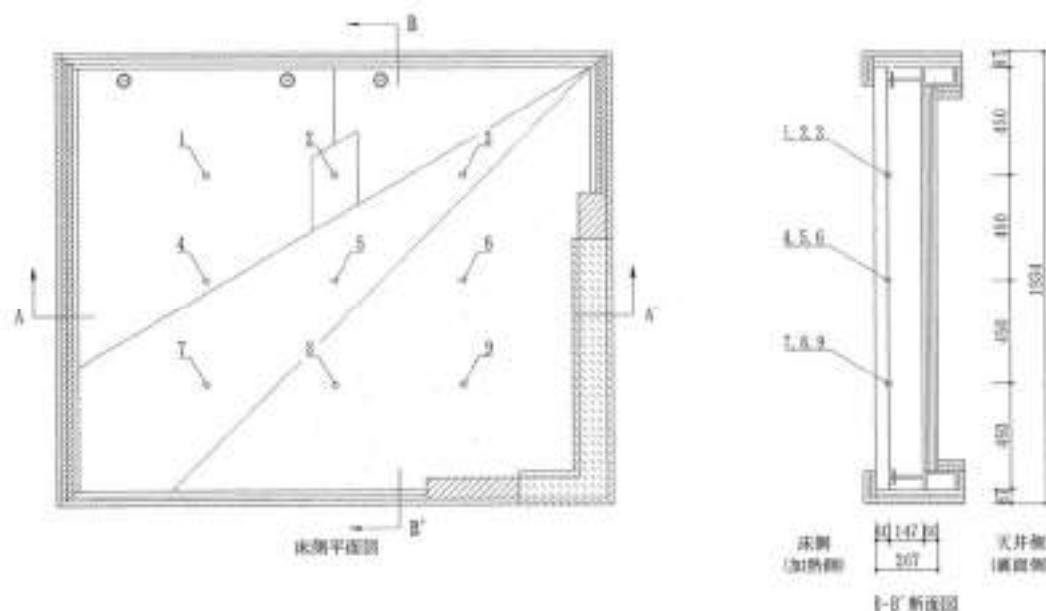


図 3.1.5 温度測定位置（上面加熱）

3.1.4 試験結果・考察

図 3.1.6、図 3.1.7 に、上面加熱および下面加熱の CLT 版の加熱側表面における内部温度の時間変化を示す。いずれの場合もピーク時点で材料の発火点である 260℃を下回っており、CLT 表面の炭化も確認されなかった。この実験結果より、本試験体の CLT スラブとしての構成は 2 時間耐火性能を有していることを確認した。

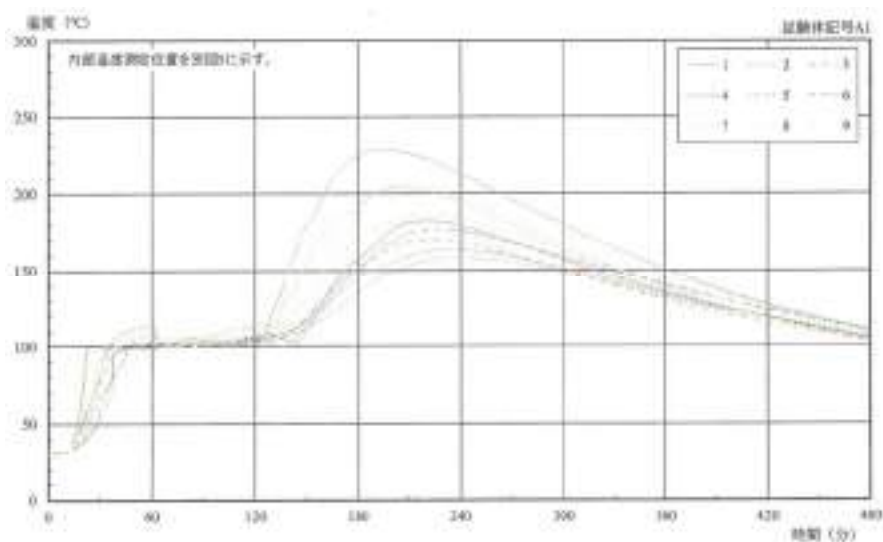


図 3.1.6 (上面加熱) せっこう系セルフレベリング材-CLT 版境界部 内部温度

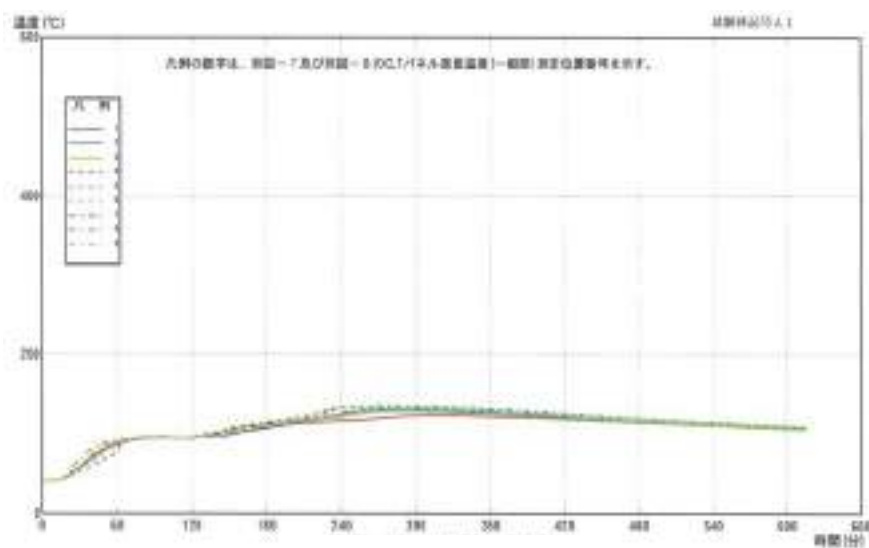


図 3.1.7 (下面加熱) せっこうボード-CLT 版境界部 内部温度

3.1.5 上面耐火被覆のバリエーションについて

前述した耐火試験では上面耐火被覆の仕様をせっこう系セルフレベリング材のみとしたが、せっこう系セルフレベリング材と CLT 版の間にトップコンクリートを打設したもの、さらにトップコンクリートと CLT 版の間に、制振材料（発砲ポリエチレンまたは普通合板 8 枚）を配置した断面構成に関して性能検証試験を別途行い、同様に 2 時間耐火性能を有することを確認した。

3.2. CLT 床の振動性状

3.2.1 振動性状実験

CLT を用いた複合材による床版については、振動性状が明確になっていない。そこで、重量床衝撃音や歩行振動の解析モデルに反映することを目的として、平面寸法の長辺が 3,600 mm、短辺が 1,000mm で断面構成の異なる試験体 5 体について振動性状の確認を行った。断面構成を図 3.2.1 に、実験状況を写真 3.2.1 に示す。せん断キーの有るものを試験体①、無いものを試験体②とした。試験体③の防振材にはシロマーブロックを用いた。試験体④には後述の積層制振パネルを 4 層、試験体⑤には 8 層用いた。

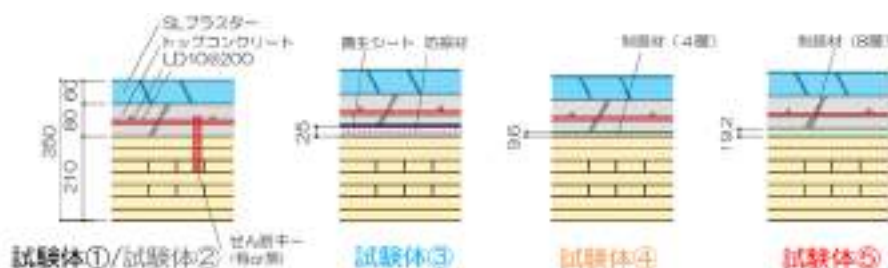


図 3.2.1 各試験体の断面構成



写真 3.2.1 実験状況

長辺の両端から 300mm ずつ中心寄りの 2 箇所試験体を支持し、インパルスハンマーにより試験体中央に衝撃を与え、インパルスハンマーから得られる加振力と、試験体中央の床上および床下に設置した加速度センサーから得られる加速度を同時に測定した。次に、加速度応答を加振力で除算し、振動数ごとに試験体のアクセラランスを算出した。また、加速度の自由減衰波形から、減衰定数を求めた。

図 3.2.2 に、アクセラランスの測定結果を示す。試験体①と②のアクセラランスに大きな違いはなく、せん断キーの有無による顕著な影響はみられなかった。試験体③では、100Hz 以上の帯域において、アクセラランスが大きく低減される結果となり、全試験体の中で最も大きな振動低減効果が確認された。試験体④および⑤では、400Hz 以上の帯域においてアクセラランスが低減され、制振材の積層数が多いほど効果が増えることも確認できたが、重量床衝撃音で問題となりやすい 63Hz 帯域や 125Hz 帯域での効果は確認できなかった。

図 3.2.3 に、試験体中央を加振した時の自由減衰波形例（試験体②）を示す。試験体②の一次固有振動数は 40Hz であった。減衰定数は 0.7% であり、過去にコンクリート単板の試験体で測定した減衰定数と同程度の値であったことから、解析では RC スラブと同等程度の減衰定数を見込むこととした。

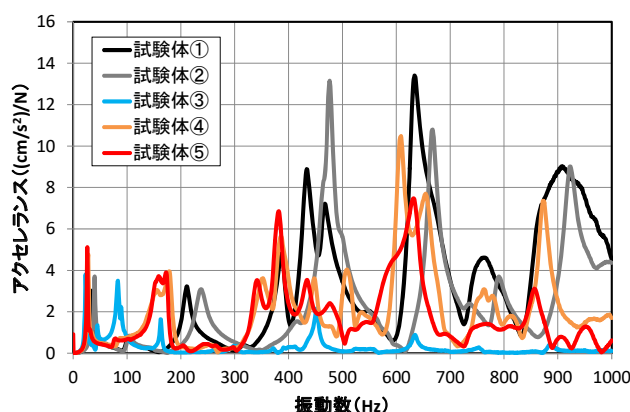


図 3.2.2 アクセラランスの測定結果

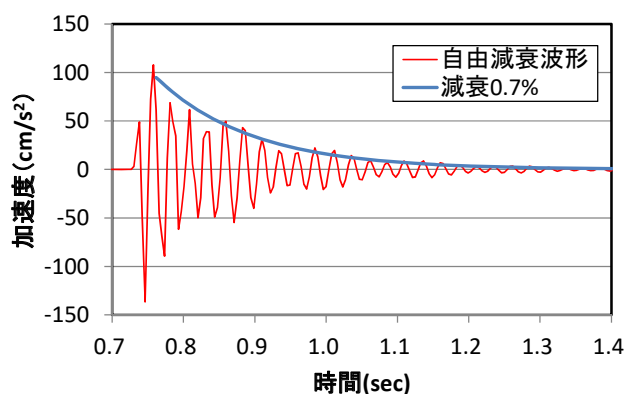


図 3.2.3 自由減衰波形例(試験体②の場合)

3.2.2 重量床衝撃音予測

過去に事例のない床構造に対して、重量床衝撃音の予測値(目安)を把握するために有限要素解析を行った。図 3.2.4 に、解析モデル図を示す。同一の断面形状で固有振動数と質量が等価となる剛性、密度を解析モデルの諸元として設定した。減衰については、RC スラブと同等程度の減衰定数を見込んだ。

図 3.2.5 に、重量床衝撃音の予測結果を示す。L 数は 48～57 の範囲であった。完全に同じ断面構成での事例はないものの、既往の CLT 床版の重量床衝撃音のデータの傾向から大きく逸脱しない結果が得られた。本結果は、目安として示すものであり性能を保証するものではない。躯体完成の段階で、床衝撃音を測定により確認する必要があると考えられる。

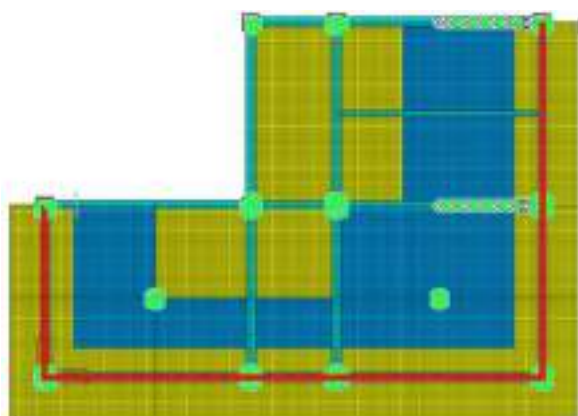


図 3.2.4 解析モデル図 (MIDAS)



図 3.2.5 重量床衝撃音の予測結果

3.2.3 歩行振動予測

重量床衝撃音の予測結果で最も大きな L 数が示された図 3.2.4 および図 3.2.5 の左下の住戸について、有限要素解析による歩行振動予測を行った。図 3.2.6 に、1 次固有振動数 (40Hz) のモード図を示す。モード振幅が最大値を示した点に歩行加振力を入力した際に生じる加速度を、居住性能評価指針 (日本建築学会) の評価指標に照合した。図 3.2.7 に、結果を示す。人間の知覚閾を意味する V-10 を大きく下回っていることから、床躯体において歩行振動が問題となる可能性は低いと考えられる。

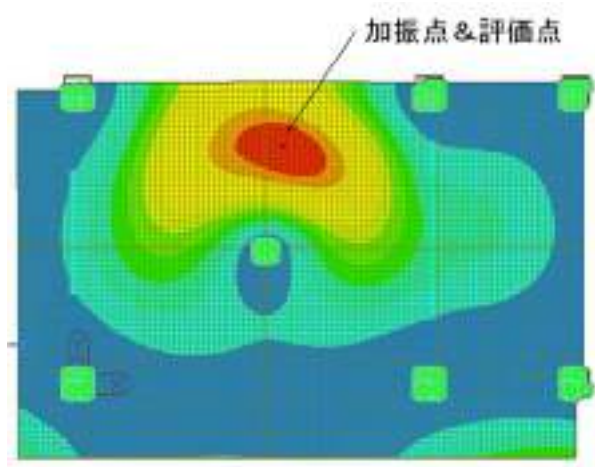


図 3.2.6 モード形状 (1 次固有振動数 : 40Hz)

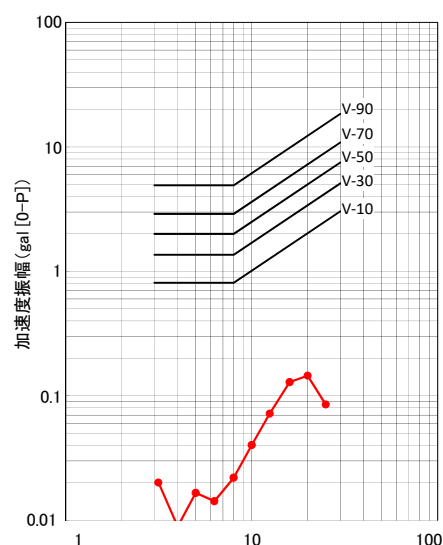


図 3.2.7 歩行振動の予測結果

3.2.4 制振天井効果確認実験

(1) 制振天井の概要

重量床衝撃音については、3.2.2にて予測結果を示した。しかしこれは、過去に事例のない床構造に対する予測であり、建物完成時の性能に対する確証を得ることが難しかったため、天井仕上げによって床衝撃音を低減できる可能性の模索として、開発中の技術である積層制振天井の効果確認実験を行うこととした。

積層制振天井とは、従来の天井の構成における石膏ボードを、揺れにくい積層制振パネルに置き換える工法である。図 3.2.8 に、積層制振パネルの断面構成を示す。パネルは、 $t=4\text{ mm}$ のベニヤ板と養生シートで構成される。ベニヤ板に養生シート 3 枚を挟んだものを 1 層とカウントし、1 層、2 層、4 層、8 層と層数の異なる条件で、竹中工務店技術研究所における試験施工、効果確認を行った。その結果、一般社団法人建材試験センターで実施する本試験の断面として、下地、合板($t=8\text{ mm}$)、積層制振(4 層)、石膏ボード($t=9.5\text{ mm}$)を採用することとした。

図 3.2.9 に、制振鋼板の制振原理を示す。制振鋼板は、拘束材と、拘束材に挟まれた制振材で構成され、振動により生じる制振材のずり変形によるエネルギー吸収を原理に制振ものであるとしている。本技術は、3 層構造を有する養生シート 3 枚を用いることで、1 層あたり 10 箇所の境界面を持つ多重積層構造を有しており、4 層 40 箇所の各箇所で生じるずり変形によって振動を吸収させようとするものである。

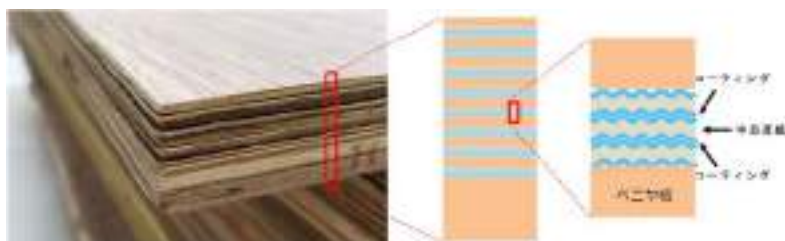


図 3.2.8 積層制振パネルの断面構成

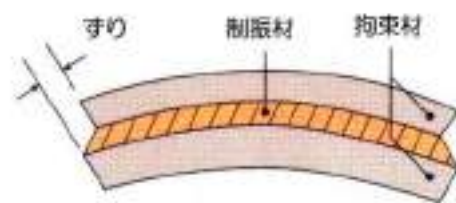


図 3.2.9 制振の原理

(2) 効果確認実験

建材試験センターの残響室(コンクリート床版 $t=150\text{ mm}$)において、重量床衝撃音の低減効果確認実験を行った。写真 3.2.2～写真 3.2.5 に試験体の施工状況を示す。衝撃源はバングマシンとゴムボールの 2 種類とし、JIS に則って重量床衝撃音を測定した。試験体は、天井仕上げ施工前“天井素面”、石膏ボード($t=9.5\text{ mm}$)1 枚のみを下地に貼りつける“従来天井”、(1)にて述べた“制振天井”、の 3 仕様とした。

図 3.2.10 に、重量床衝撃音の測定結果を示す。図には、主に重量床衝撃音で性能決定帯域となる 63 Hz と 125 Hz の 2 つの帯域の A 特性重み付けオクターブバンド床衝撃音レベルを抜粋し、衝撃源ごとに分類して結果を示した。

63 Hz 帯域では、どちらの衝撃源においても、天井素面に従来天井が施工されることで約 5 dB 、床衝撃音が大きくなった。また、従来天井に比べて制振天井の方が約 $3\sim 4\text{ dB}$ 小さい値となった。

125 Hz 帯域では、天井素面に従来天井が施工されることで微増または約 3 dB の低減がみられた。また、従来天井に比べ制振天井の方が約 $5\sim 6\text{ dB}$ 小さい値となった。

以上より、制振天井を用いることで、従来天井を施工する場合に比べて、 63 Hz 帯域で $3\sim 4\text{ dB}$ 、 125 Hz 帯域で $5\sim 6\text{ dB}$ の低減効果が得られる可能性があることを示すことができたと考える。



写真 3.2.2 天井下地施工状況



写真 3.2.3 積層制振パネル施工状況



写真 3.2.4 石膏ボード施工状況



写真 3.2.5 試験体完成状況

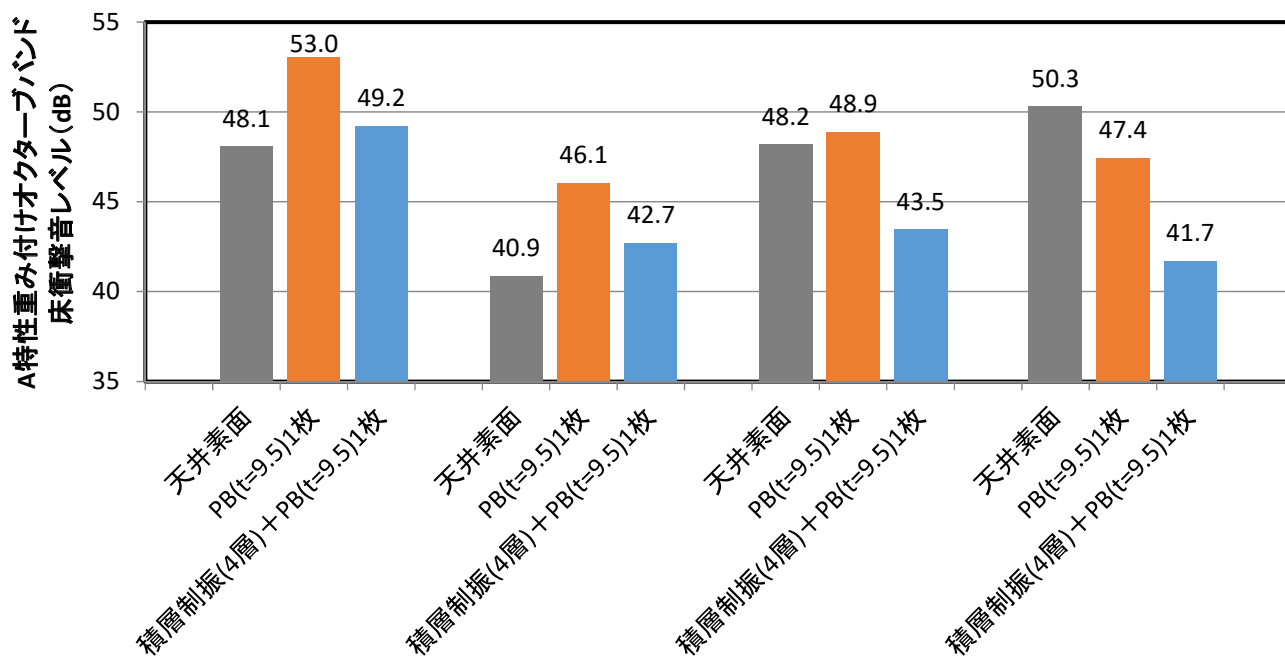


図 3.2.10 重量床衝撃音の測定結果

3.3 構造実験

当該建築物で新たに使用される CLT を利用した新しい構造技術について実験を行い、その構造性能を明らかにした。

ここでは、CLT 床板接合部実験、CLT 合成床曲げ実験、CLT 合成床を用いた合成梁実験、CLT 合成床を用いた合成梁の構造実験、CLT 耐震壁構造実験、集成材柱-CLT 合成スラブの構造実験についてまとめる。

3.3.1 CLT 床板接合部実験 概要

3.3.1.1 実験の目的

CLT 床板接合部の仕様を決定し、その性能を明らかにするため CLT 床板接合部実験を行った。まず接合部の仕様を決定するため要素実験を行い、この結果をもとに決定された実際の CLT 床板接合部について、せん断実験を実施しその性能を明らかにした。

3.3.1.2 接合部要素実験

要素実験では引張要素実験とせん断要素実験を行った。それぞれの代表的な試験体の形状を図 3.3.1 に、代表的な実験結果を図 3.3.2 に示す。これらの実験結果をもとに、実際の接合部形状を決定した。

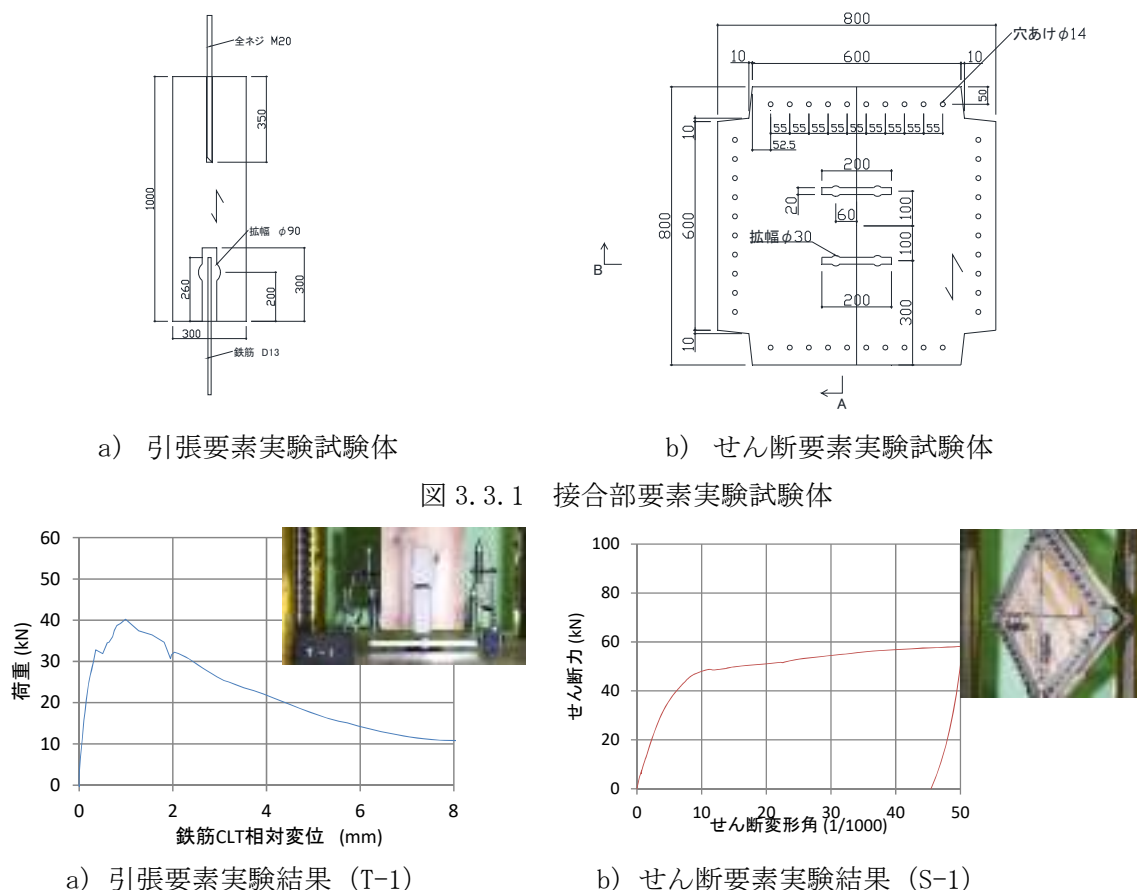


図 3.3.1 接合部要素実験試験体

図 3.3.2 接合部要素実験結果

3.3.1.3 接合部せん断実験

要素実験の結果をもとに決定された接合部の形状の代表例を図 3.3.3 に示す。それぞれ H 形鋼の大梁上部で接合するタイプと CT 小梁上で接合するタイプである。この形状を模した試験体(図 3.3.4)を用いて、せん断実験を行った。

接合部せん断実験の結果を図 3.3.5 に示す。H 形鋼梁上タイプは、中央部コンクリートのひび割れによ



a) H形鋼梁上タイプ (S-H-00-1)



b) CT 小梁上タイプ (S-CT-00-1)

図 3.3.6 接合部せん断実験 最終破壊状況

3.3.2 CLT 合成床の曲げ実験（要素試験） 概要

3.3.2.1 実験の目的と概要

CLT 合成床（図 3.3.7）のせん断キーの種類をパラメーターとして曲げ試験を行うことでそれぞれの合成効果を確認し、泉計画に採用するせん断キーを決定した。せん断キーは、ドリフトピン・ラグスクリュー・CLT 切欠きによるシアコッターとした。

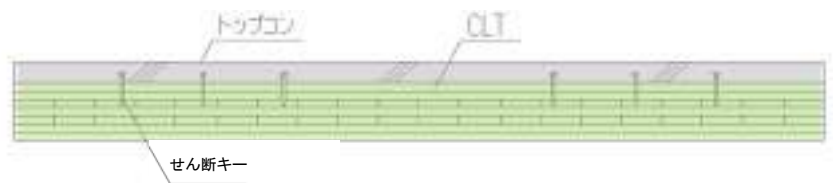


図 3.3.7 CLT 合成床の構成

3.3.2.2 実験結果

ラグスクリューを用いた場合、高い合成効果が得られるとともに安定した挙動を示した。したがって、泉計画においてはせん断キーとしてラグスクリューを採用することとした。



写真 3.3.1 試験体 3 全景（最終破壊時）

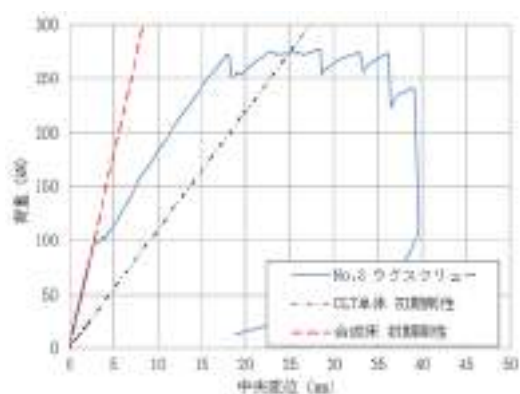


図 3.3.8 試験体 3 荷重-中央変位関係図

3.3.3 CLT 合成床の曲げ実験 概要

3.3.3.1 実験の目的と概要

本実験では、CLT 合成床のせん断キー（ラグスクリュー）のピッチや埋め込み長さをパラメーターとしてそれぞれの合成効果を確認した。CLT スラブの設計の余裕度を把握する。（泉計画においては、CLT 合成床部分は CLT のみで設計を行い、コンクリートが取りつくことによる合成効果は余力として考えることとしている）

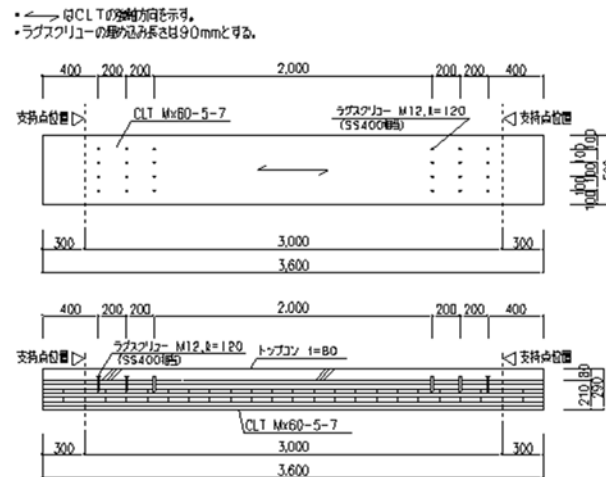


図 3.3.9 試験体 詳細図 (B-01)

3.3.3.2 実験結果

試験体破壊時には合成床の合成効果が失われていると考えられるため、最大耐力はせん断キーの仕様にかかわらず、CLT 単体の耐力によって決まると考えられる。

せん断キーの列数、埋め込み長さとし剛性低下開始時の荷重点には相関関係がみられるが、剛性増大率には相関がみられない。



写真 3.3.2 B-01 試験体 せん断破壊状況

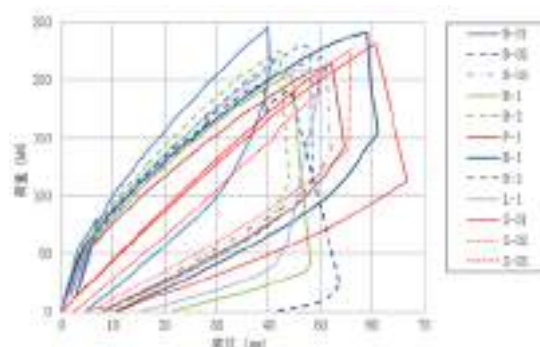


図 3.3.10 CLT 合成床 荷重-変形関係

3.3.4 CLT 合成床を用いた合成梁の構造実験

3.3.4.1 実験の概要

CLT 合成床と鉄骨梁を組み合わせた合成梁の実大試験体に対して曲げ試験を行い、合成梁に正曲げが働く場合の剛性・耐力を把握した。梁部材は H 形鋼梁および CT 形鋼梁の 2 種類とし、それぞれに対して、CLT 架設方向（強軸方向）と梁材軸方向の関係をパラメーターとした。

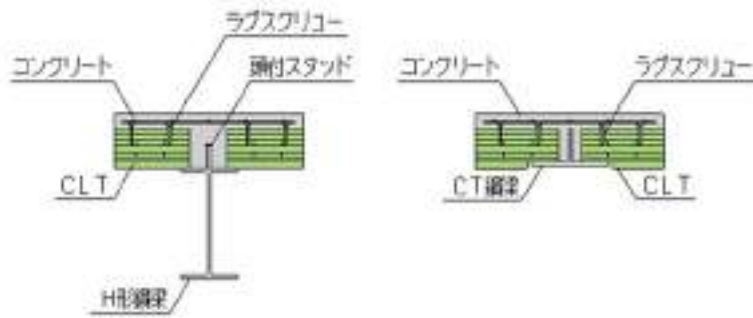


図 3.3.11 合成梁の構成 (左: H 形鋼梁 右: CT 形鋼梁)

3.3.4.2 実験結果

CLT は H 形鋼梁との合成梁の構造性能にはほとんど寄与せず、CLT を無視した合成梁と同等の性能であることが確認された。CT 鋼梁との合成梁は、CLT の架設方向によって剛性、耐力が異なることが確認された。特に、梁材軸と CLT 強軸を平行とし、スパン内で CLT パネルが分割されない場合は剛性、耐力が大きく向上した。

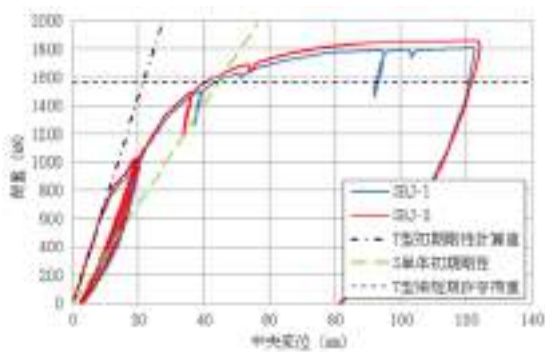


図 3.3.12 SBJ-1, 2 荷重-変形関係

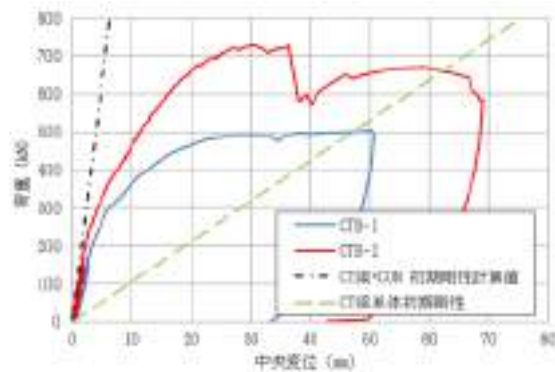


図 3.3.13 CTB-1, 2 荷重-変形関係

3.3.5 CLT 耐震壁の構造実験

3.3.5.1 実験の目的と概要

鉄骨造建物に CLT 耐震壁が使用された例はこれまでにない。そこで CLT と鉄骨フレームとの接合方法を検討し、CLT 耐震壁の構造性能を検証するため 1/2 スケールの CLT 耐震壁試験体を用いての構造実験を行った。また実験結果をもとに復元力モデルを設定した。

図 3.3.14 に試験体形状を示す。試験体は 2 体で、いずれも CLT 壁と鉄骨梁の接合部は LSB とドリフトピンを用いた金物を併用し、RC との接合部は CLT を凹凸加工し直接コンクリートに打ち込む形状とした。2 体の試験体は鉄骨梁との LSB 接合の形状が異なる。

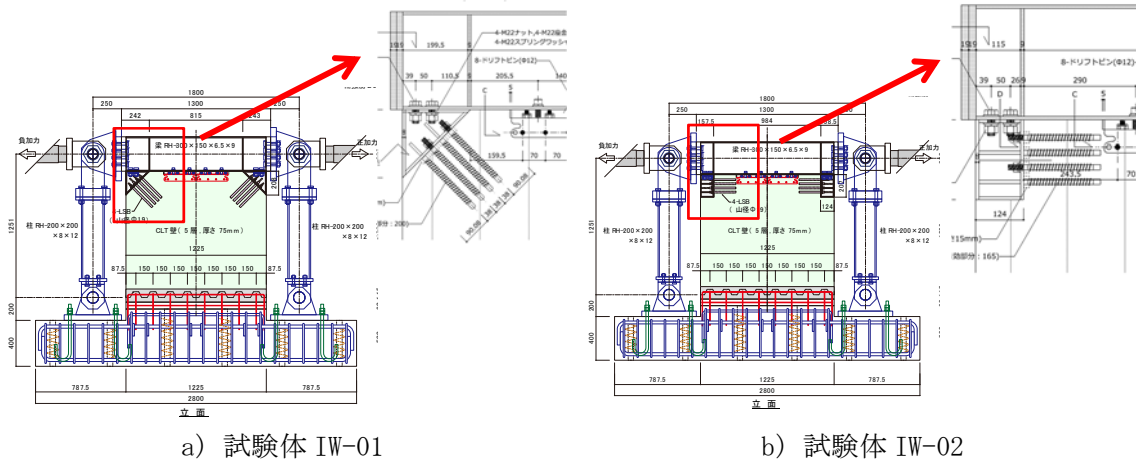


図 3.3.14 試験体形状

3.3.5.2 実験結果と復元力特性の設定

実験結果より抜粋して図 3.3.15 に試験体 IW-01 の荷重変形関係を、写真 3.3.3 に試験体最終状況を示す。いずれの試験体も CLT 下部の RC との接合部が損傷したことにより耐力が低下し、最終的な破壊に至った。鉄骨梁との接合部には目立った損傷は生じなかった。

この実験結果をもとに設定した復元力特性を図 3.3.16 に示す。復元力特性はスリップ型バイリニア曲線とし、折れ点を変形角 $6.0/1000\text{rad}$ に設定した。



3.3.6 集成材柱-CLT 合成スラブ接合部の構造実験

3.3.6.1 実験の概要

CLT 合成床と CT 鋼梁および集成材柱からなる架構の縮小試験体に対して水平載荷試験を行い、水平力作用時の架構の力学性状を把握することで、集成材柱材端をピン接合として設計するという設計上の仮定の妥当性を確認した。

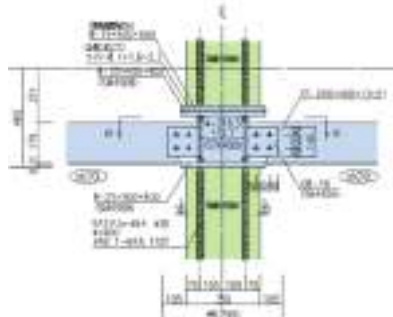


図 3.3.17 集成材柱-スラブ接合部詳細図

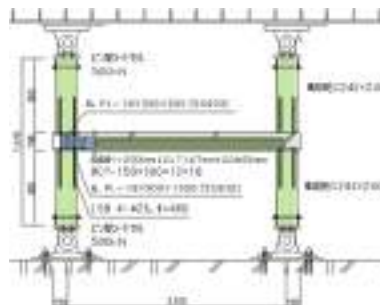


図 3.3.18 試験体図

3.3.6.2 実験結果

泉計画において集成材柱-CLT 合成床架構の周辺に配置される鉄骨架構のせん断剛性に比べて非常に小さいことが確認された。従って、集成材柱の材端をピン接合として設計しても問題ないと考えられる。また、載荷終了時点で集成材・CLT および CT 形鋼梁は弾性範囲内にあると考えられる。



写真 3.3.4 試験体最終状況

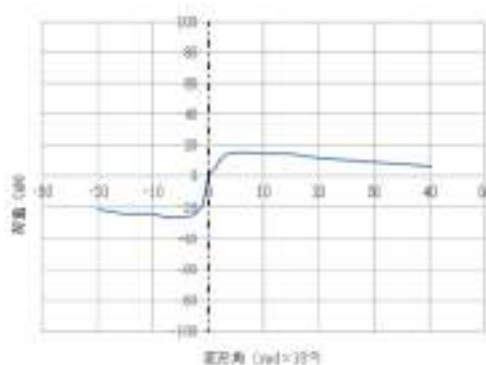


図 3.3.19 試験体スケルトンカーブ

3.4 構造設計

3.4.1 構造設計方針

3.4.1.1 建物全体の構造設計方針

本建物の基準階平面図を図 3.4.1 に、代表的な軸組図を図 3.4.2 に示す。

また、それぞれ図中に木質系部材の配置を示す。CLT スラブを 4 階～10 階に、CLT 耐震壁を 1 階～5 階に、燃エンウッドを 2 階～10 階に配置している。

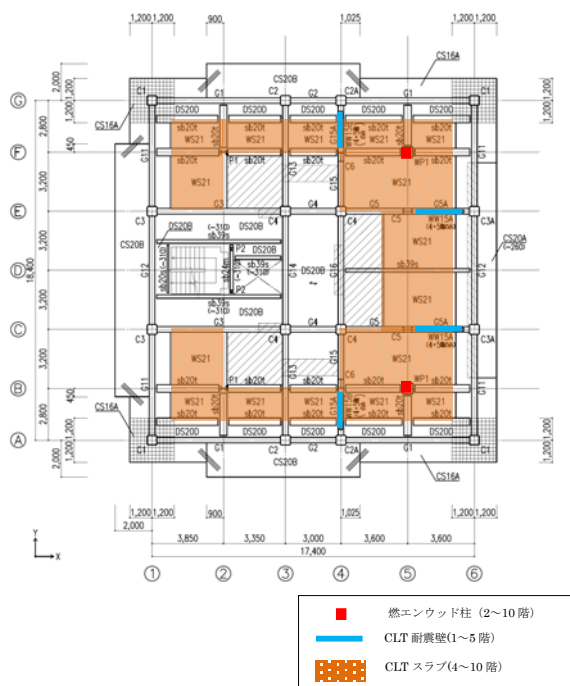


図 3.4.1 基準階平面図

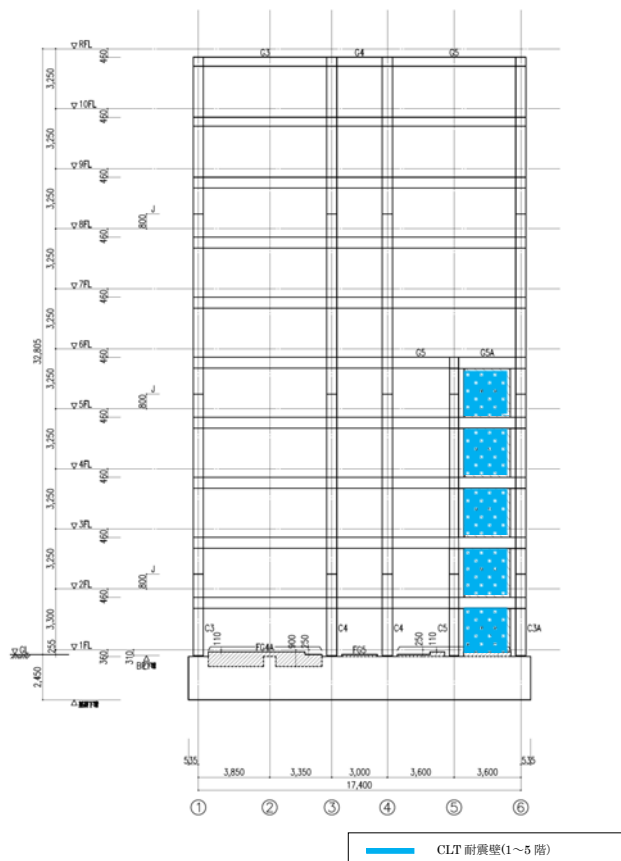


図 3.4.2 C 通軸組図

構造設計ルートはルート 3 とし、地震力の 100% を鉄骨フレームに負担させる設計としている。また、1～5 階には水平耐力を付加的に与える CLT 壁を X、Y 方向それぞれ 2 構面ずつ配置しており、これらを考慮した 1 次設計および 2 次設計を併せて行い、両ケースにおいて建物全体が構造上安全であることを確認した。

3.4.1.2 CLT 耐震壁のモデル化と D_s 値の評価について

CLT 耐震壁の周辺部材（壁の上下大梁および左右の柱）を安全側の設計とするため、CLT 耐震壁のモデル化は地震時せん断力分担率が大きくなる、すなわち周辺部材の設計用応力が大きくなる方法で行うこととした。柱として主に曲げ剛性を与えてモデル化した場合と、壁として主にせん断剛性を与えてモデル化した場合の両者の復元力特性の比較を図 3.4.3 に示す。これより、CLT 耐震壁は剛性・耐力ともに高い間柱モデルとしてモデル化を行った。

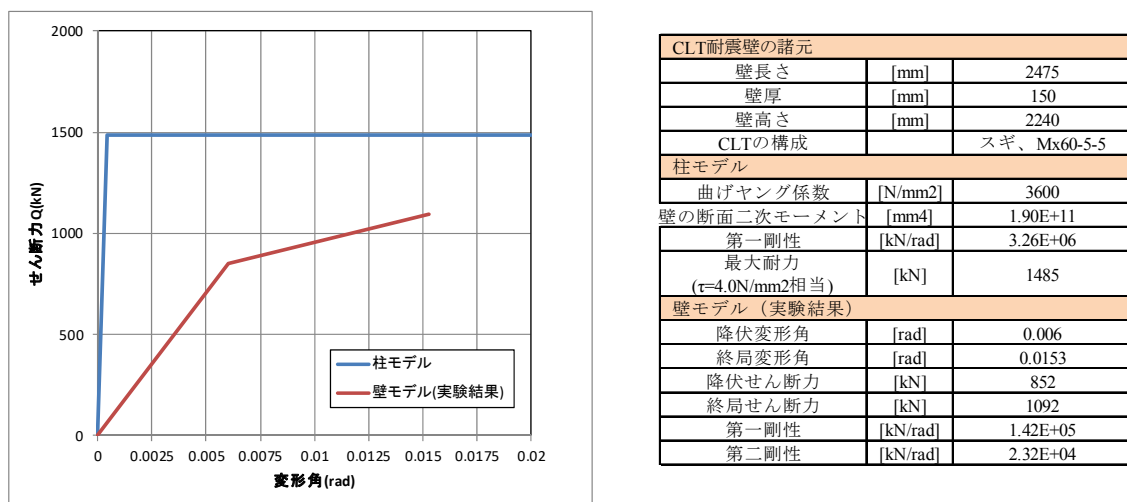


図 3.4.3 CLT 耐震壁のモデル方法による復元力特性の比較

CLT 耐震壁は、構造実験結果より $15 \times 10^{-3}\text{rad}$ までは設定した復元力特性に対して安定した履歴ループを描いており、最終的な破壊性状は壁版の凹凸加工が曲げ変形することによる靱性的な性状であった。したがって、CLT 耐震壁を配置した架構の保有耐力計算時の D_s は鉄骨造の値を用いた。図 3.4.4 に、CLT 耐震壁を有効・無効とした場合の Q_u/Q_{un} のグラフを示す。両ケースにおいて、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回っていることを確認した。

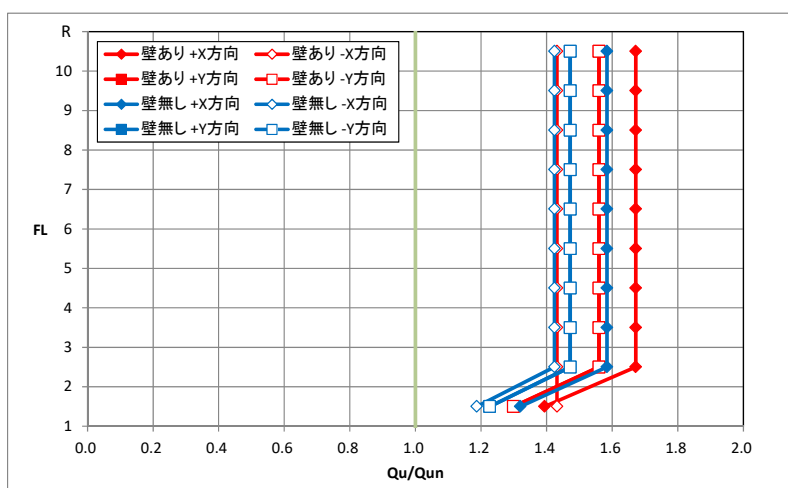


図 3.4.4 各階の保有水平耐力

3.4.1.3 CLT スラブの設計

本建物に使用する CLT スラブの概要を以下に示す。図 3.4.5 に基準階の CLT スラブの版割と接合部配置を、図 3.4.6 に CLT スラブの断面図を、表 3.4.1 に CLT スラブ周辺接合部の姿図と耐力を示す。

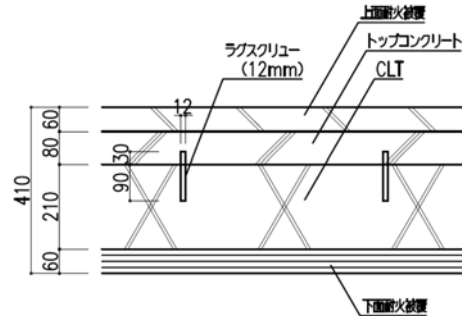
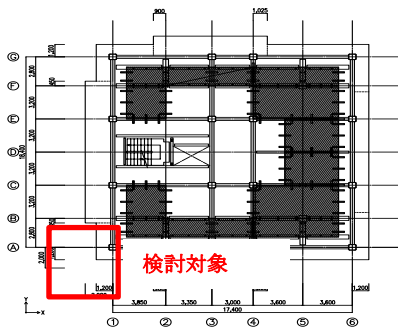


図 3.4.5 CLT スラブ版割図

図 3.4.6 CLT スラブ断面図

表 3.4.1 CLT スラブ周辺接合部の形状と耐力

名 称	溝タイプ(□、■)	丸孔タイプ(○)
姿 図		
最大 耐力	30kN/箇所	64.9kN/箇所
短期許容 応力度	20kN/箇所	43.3kN/箇所

(a) CLT スラブの面外力に対する設計

CLT スラブの面外の曲げ・せん断に対しては、実験により CLT とトップコンクリートとの一体化により、長期荷重レベルにおいて一定の合成効果が見られたが、本設計では安全側のため、CLT のみで長期許容応力度以内であることを確認する方針とした。その際、図 3.4.7 に示すように周辺接合部の切削加工が施されている部分の幅を除いた有効幅を用いて断面性能を算出した。

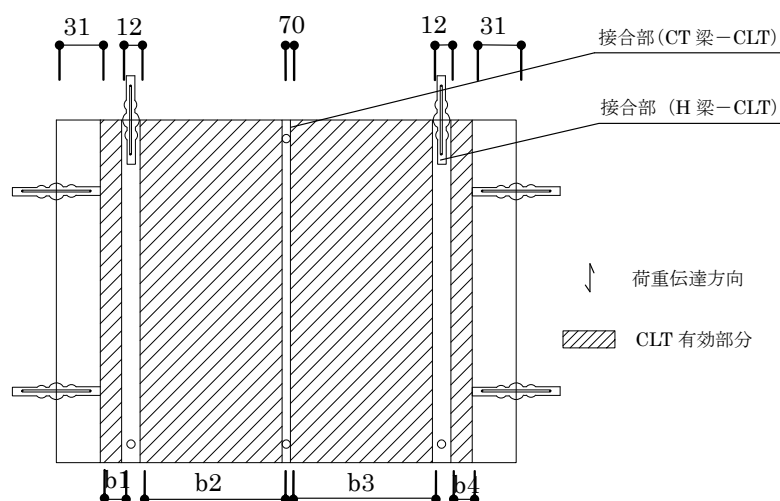


図 3.4.7 CLT スラブの有効幅の取り方

図 3.4.7 に示す CLT スラブの検討結果を代表として表 3.4.2 に示す。全ての CLT スラブについて、長期許容応力度以内であることを、たわみが制限値以下であることを確認した。

表 3.4.2 CLT スラブ断面算定表

検討箇所		①		
一般	CLT構成	Mx60-5-7-210-強軸	単位面積当たりの床荷重	[N/mm ²] 7.49
	CLT総厚	[mm] 210	想定スパン	[m] 3.20
	CLT板幅	[mm] 2850	中央曲げモーメント (両端単純支持)	[kNm] 27.3
基準強度	CLT有効幅	[mm] 1870	断面係数(有効幅)	[mm ³] 13,744,500
	圧縮強度	[N/mm ²] 10.4	曲げ応力度 σ_b (単位幅当り)	[N/mm ²] 1.1
	引張強度	[N/mm ²] 7.7	長期許容曲げ応力度 (単位幅当り)	[N/mm ²] 4.5
	積層方向の曲げ強度	[N/mm ²] 12.1	検定比	0.24
	幅方向の曲げ強度	[N/mm ²] 10.4	判定	OK
	積層方向のせん断強度	[N/mm ²] 0.9	パネルに作用するせん断力	[kN] 12.0
	幅方向のせん断強度	[N/mm ²] 2.7	CLTせん断応力 (単位幅当り)	[N/mm ²] 0.03
弾性係数 (平均)	圧縮	[N/mm ²] 3.857	長期許容せん断応力度 (単位幅当り)	[N/mm ²] 0.33
	引張	[N/mm ²] 3.857	検定比	0.09
	積層方向の曲げ	[N/mm ²] 5.536	判定	OK
	幅方向の曲げ	[N/mm ²] 3.857	弾性たわみ(曲げ成分)	[mm] 3.65
	積層方向のせん断	[N/mm ²] 41	弾性たわみ(せん断成分)	[mm] 2.01
	幅方向のせん断	[N/mm ²] 500	弾性たわみ(合計)	[mm] 5.66
			変形増大係数	2.0
たわみ			変形角(長期たわみ)	[rad] 1/283
			判定	OK

(b) CLT スラブの面内力に対する設計

CLT スラブに発生する面内力は、全てトップコンクリートにより鉄骨架構に伝達させる計画とした。付加的に、「(CLT の自重+CLT から支持する仕上・設備) ×1.0G」の水平力が CLT 版および、先に示した表 3.4.2 に示す周辺接合部により隣接する部材に伝達可能であることを確認した。検討対象とした CLT 版の配置を図 3.4.8 に、検討結果を表 3.4.3 に示す。

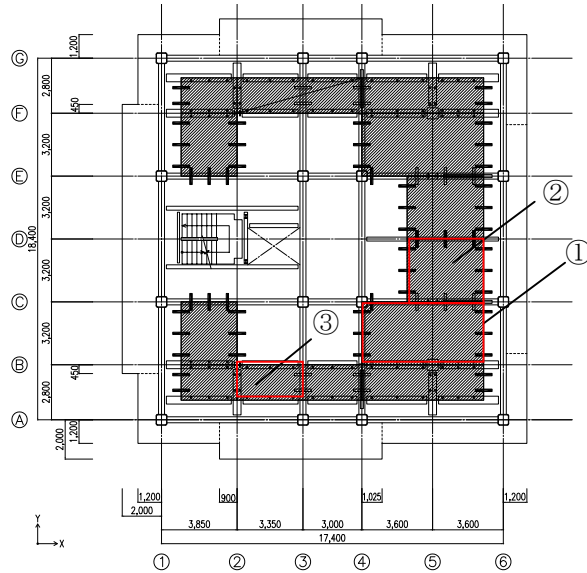


図 3.4.8 検討対象 CLT 版

表 3.4.3 検討結果

		パネル①		パネル②		パネル③	
CLT重量		115.9 kN		74.3 kN		34.1 kN	
設計用水平力		115.9 kN		74.3 kN		34.1 kN	
CLTに生じる 面内せん断応力度	X方向	0.09 N/mm ²		0.09 N/mm ²		0.05 N/mm ²	
	Y方向	0.09 N/mm ²		0.06 N/mm ²		0.05 N/mm ²	
CLTパネルの 許容せん断応力度		1.8 N/mm ²		1.8 N/mm ²		1.8 N/mm ²	
検定比	X方向	0.05		0.05		0.03	
	Y方向	0.05		0.03		0.03	
判定	X方向	OK		OK		OK	
	Y方向	OK		OK		OK	
CLTに生じる 面内せん断応力		115.9 kN		74.3 kN		34.1 kN	
CLT周辺接合部の 許容面内せん断力	X方向	339.2 kN		120 kN		259.2 kN	
	Y方向	120 kN		120 kN		126.4 kN	
検定比	X方向	0.34		0.62		0.13	
	Y方向	0.97		0.62		0.27	
判定	X方向	OK		OK		OK	
	Y方向	OK		OK		OK	

3.4.1.4 燃え止まり型耐火集成材（燃エンウッド）の設計

燃エンウッド柱は柱頭・柱脚をピン接合としており、長期軸力のみを負担する軸力支持柱として、軸方向の応力および座屈の検討を行った。以上