

2. 15 三菱地所（株）／（株）日建設計

1. 建築物の仕様一覧

事業名		下地島空港旅客ターミナルビル新築工事の実証事業		
実施者（担当者）		三菱地所／日建設計		
建築物の概要	用途	空港旅客取扱施設		
	建設地	沖縄県宮古島市		
	構造・工法	RC造 + CLTフラットスラブ屋根+ CLT壁		
	階数	一部地下1階（BHSトレンチ）地上2階		
	高さ（m）	10.8		
	軒高（m）	6.55		
	敷地面積（㎡）	31,581.02		
	建築面積（㎡）	12,348.55		
	延べ面積（㎡）	11,974.13		
	階別面積	地下1階	455.52	
1階		10477.21		
2階		1041.4		
CLTの仕様	CLT採用部位		CLTフラットスラブ屋根+ CLT壁	
	CLT使用量（m ³ ）		1,561.14m ³ （出発ラウンジ棟：1,157.52m ³ 、チェックイン棟：403.62m ³ ）	
	壁パネル	寸法	210mm厚	
		ラミナ構成	5層7プライ	
		強度区分	S60A	
		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	出発ラウンジ棟：420mm厚、チェックイン棟：210mm厚	
		ラミナ構成	5層7プライ二方向フラットスラブ	
		強度区分	S60A	
樹種		スギ		
木材	主な使用部位（CLT以外の構造材）		梁：スギ集成材	
	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		89.86m ³	
仕上	主な外部仕上	屋根	断熱塩ビシート防水、一部塗膜防水、一部瓦ぶき	
		外壁	コンクリート化粧打放し、フッ素保護塗装	
		開口部	大型引き戸アルミサッシ、一部FIXアルミサッシュ、防風スクリーン	
	主な内部仕上	界壁	コンクリート化粧打放し、一部LGS下地石膏ボードEP	
		間仕切り壁	コンクリート化粧打放し、一部LGS下地石膏ボードEP	
		床	コンクリート表面硬化剤	
	天井	CLT表し、一部コンクリート打放し、一部岩綿吸音板		
構造	構造計算ルート		ルート3	
	接合方法		ビス接合+U字金物	
	最大スパン		8m	
	問題点・課題とその解決策		CLTにおけるGIR接合部のせん断、引張り試験を要素試験で各6体（合計66体）、部分実大載荷試験で各1体（合計4体）、部分縮小クリープ検証試験で各1体（合計2体）、実大2方向CLTスラブ載荷検証試験を1体行う。要素試験結果に留意しながら最適な工法を決定し、実施設計に反映した。	
耐火	防火上の地域区分		その他地域	
	耐火建築物等の要件		無	
	本建築物の耐火仕様		準耐火建築物（ロ-1）	
	問題点・課題とその解決策		防火壁を免除するため準耐火建築物としている	
温熱	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		ウレタンフォーム外断熱とCLTパネルの断熱性能を合わせて外部負荷の削減	
	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 1種 ・ 25mm	
		外壁	なし	
	床	押出法ポリスチレンフォーム 保温板 1種 ・ 25mm		
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		CLT部分は家具のファブリックによる吸音、建具を開け放した運用	
	建て方における課題と解決策		防腐防蟻処理工場塗装、建方時に防水シートを確実に施工する。	
	給排水・電気配線設置上の工夫		配線モールを設置	
	劣化対策		防腐防蟻処理工場塗装	
工程	設計期間		平成29年1月～平成29年6月	
	施工期間		—	
	CLT躯体施工期間		—	
体制	竣工（予定）年月日		平成31年3月	
	発注者		三菱地所株式会社	
	設計者（複数の場合はそれぞれ役割を記載）		株式会社 日建設計	
	構造設計者		株式会社 日建設計	
	施工者		（株）國場組、（株）大米建設特定共同企業体	
	CLT供給者		（株）山佐木材	
	ラミナ供給者		（株）山佐木材	

実証事業名：下地島空港旅客ターミナルビル新築工事の実証事業

実施者／協議会運営者または担当者：三菱地所株式会社／株式会社日建設計

1. 実証した建築物の概要

用途	航空旅客取扱施設		
建設地	沖縄県宮古島市		
構造・工法	RC造 + CLT フラットスラブ屋根+ CLT 壁		
階数	一部地下1階（BHS トレンチ）地上2階		
高さ（m）	10.8	軒高（m）	6.55
敷地面積（㎡）	31,581.02	建築面積（㎡）	（全体）12,348.55
階別面積 （㎡）	地下1階	455.52	延べ面積（㎡） 11,974.13
	1階	10477.21	
	2階	1041.40	
CLT 採用部位	CLT フラットスラブ屋根+ CLT 壁		
CLT 使用量（m ³ ）	1,561.14 m ³		
CLT を除く木材使用量（m ³ ）	89.86 m ³		
CLT の仕様	（部位）	（寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種）	
	壁	210mm 厚/5 層7 プライ/S60A/スギ	
	床	-	
	屋根	420mm 厚/5 層7 プライ二方向フラットスラブ /S60A/スギ、一部 210mm 厚/5 層7 プライ/S60A/スギ	
設計期間	H29.1月～6月		
施工期間	-		
CLT 躯体施工期間	-		
竣工（予定）年月日	H31.3月		

2. 実証事業の目的と設定した課題

＜実証事業の目的＞

空港旅客ターミナルビルは、従来鉄骨造、無機質な空間となりがちである。下地島空港旅客ターミナルでは下地島の快適な気候を屋内に取り込む半外部空間、分棟形式で計画している。ただし、沖縄離島、海岸に近いターミナルであるため、鉄骨の製作、運搬による防錆、コストアップ、長工期のリスクがある。今回計画で屋根構造を防腐・防蟻処理した CLT、S 造の併用構造とし、実証実験により構造特性値を確認。また、実施設計で汎用性、低コスト性を検討することで、空港旅客ターミナルビルという公共施設に CLT を用いた木質化空間とすることで、より一層の CLT 利用の加速的普及を目指した。

＜実証事業の課題＞

- ・沖縄離島の厳しい環境における CLT の防腐・防蟻対策、断熱性能、防水性能
- ・下地島の厳しい環境と CLT との調和
- ・鉄筋を用いた接着の性能を持つ接合部（GIR 接合）仕様およびその構造特性値の取得
- ・CLT の接合部における安全性

3. 実証事業の実施体制（または協議会構成員）

（建築主）三菱地所株式会社
（設計）株式会社日建設計
（実証実験、施工）山佐木材株式会社

4. 課題解決の方法と実施工程

＜協議会の開催（予定）＞

平成 29 年 1 月：第 1 回開催、問題点洗い出し
平成 29 年 3 月 10 日：建材センター西日本において材料試験実施
平成 29 年 4 月 12 日：第 2 回開催（問題点洗い出し、試験経過報告）
平成 29 年 7 月：第 3 回開催、進捗確認、施工性確認試験説明
平成 29 年 7 月：第 4 回開催、載荷試験

＜設計＞

平成 29 年 1 月～平成 29 年 6 月：実施設計
平成 29 年 1 月～平成 29 年 6 月：構造設計

＜性能確認＞

平成 29 年 1 月～平成 29 年 5 月：接合部要素試験（せん断試験、引張り試験）66 体、部分実大載荷試験 4 体、試験クリープ試験 2 体、実大 2 方向 CLT 載荷検証試験 1 体を行う
＜性能評価＞
平成 29 年 6 月：日本建築センター評定

5. 得られた実証データ等の詳細

- ・ 建築、構造実施設計図面
- ・ 設計に用いた部材の特性値、および CLT 接合部の最適納まりの検討過程
- ・ スギ CLT 二方向フラットスラブと鉛直支持柱の接合部分の設計
- ・ モックアップ試験により、現場で CLT を二方向に接合しながら二段に重ねて繋ぎ合わせてくみ上げる構造形式は、施工的にも可能であることの確認

6. 本実証により得られた成果

木の香り、ぬくもりを感じる印象に残る、まさに「五感に働きかける」木質空間は他の建材では実現できない心を癒す効果がある。その空間を感じることで木材、CLT の魅力が広がり、今後の利用促進が図られる。また、CLT を屋根に利用する場合の断熱、防水の仕様など従来構造壁で使われていた CLT を屋根に利用する場合の先進事例となる。また、沖縄は厳しい自然環境、台風被害により木造建物がほとんどなくなっている。沖縄離島における防腐・防蟻対策は沖縄県における木材利、木造、CLT の需要拡大につながる。構造的には、CLT 接合部の仕様を、汎用性を念頭に試験・検討し、その過程を取りまとめることにより、他の事業者が同様の検討を行う上で参考となる。また、同様の条件の建築物では強度データを構造設計に使用可能である。類似の建築物はないが、今後本建物と同様な構造を設計する上で本事業の接合性能およびクリープ性状データを適用でき、成果を広く普及できる。



全体外観



出発ラウンジ棟内観



チェックイン棟内観

7. 実証実験に向けて

直交集成板（以後 CLT と略す）は、厚さ 12mm から 36mm 程度の挽き板を幅方向に並べ、これを互いに直交して積層・接着した大型の木質パネルである。2016 年に日本でも CLT の許容応力度および基準強度が国土交通省告示（以後、告示）に追加されると共に、CLT パネル工法による構造方法・構造計算に関する技術基準が新設されて、構造設計に CLT を建築構造材料として容易に使用して設計できるようになった。しかし CLT パネル工法で想定している使われ方は、鉄筋コンクリート壁式構造のように CLT 床板の一方向に荷重を CLT 壁板に伝達させて、その CLT 壁板で鉛直荷重を支えながら水平力に抵抗するシステムを前提としたものであって、CLT 板の持つ面としての構成を最大限に生かせる建築空間表現ができるフラットスラブ構造に使用することは前提としていない。また CLT 同士の接合方法については、参考文献 1) で既製金物と引きボルトによる接合方法のみが示されているが、接合部金物等が表し状態で CLT 構造そのものの美しさを十分に活かし切れなくなるのが現状である。

CLT を用いた二方向フラットスラブ構造を用いた建物を設計して建設する事を目的として、CLT 二方向フラットスラブ構造形式とその構造の鉛直抵抗システムを開発し、その安全性と接合方法の設計法を検証するために各種の実験を行った。事項以降にその内容を報告する。

8. 実証実験

構造計画では、最下部の屋根以外は屋根に構造用 CLT を用いており、陸屋根部では強軸方向を二方向に重ねるように CLT を二段に重ねて配置したフラットスラブ形状の構造形式としている。製造および運搬の制約から、CLT の最大寸法は 2 m × 4 m であるため、CLT フラットスラブ部分での CLT の面内方向接合部には、外観上接合金物が見えないように、鉄筋を用いた接着接合（以後 GIR 接合と略す）を用いて長辺と短辺の二方向に接合する。また上下間の CLT の面外方向接合部も鉄筋を用いた GIR 接合によりシアキーを形成して一体化させる。鉛直荷重は、鉄骨支持柱（一部は鉄筋コンクリート柱上部に鉄骨支持金物を取り付ける）に取り付けた鉄板によるキャピタルを介して支持する。図 1 に CLT フラットスラブ構造の構成概念図を示す。

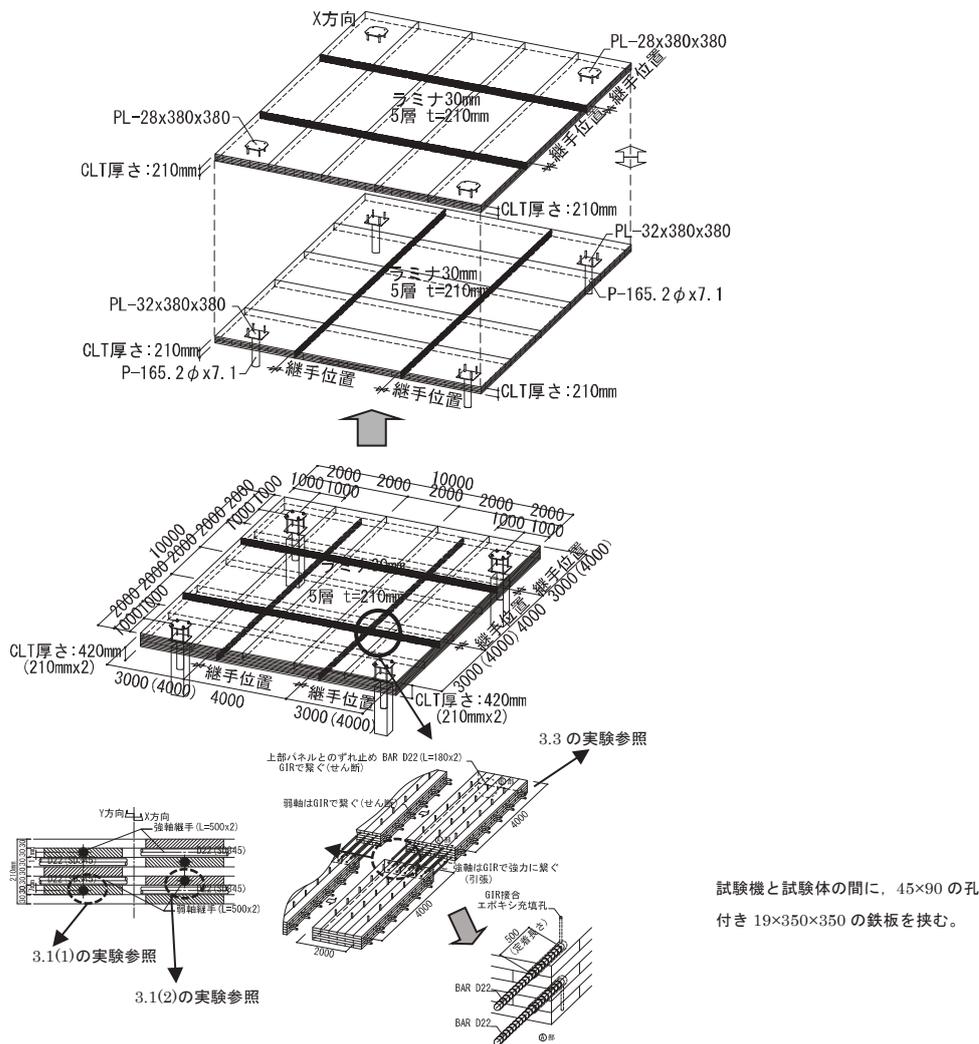


図 1 CLT フラットスラブ構造の構成概念図

本建物では、8 m × 8 m グリッドとなる空間を、厚さ 210 mm の 5 層 7 プライのスギ S60A 種構成 CLT を二枚重ね合わせて二方向 CLT フラットスラブにして構成させている。

GIR 接合に着目し、CLT フラットスラブを構成する CLT 同士の接合に GIR 接合を用いて設計できるように、各種要素試験や実大試験体による載荷試験を行う事とした。

9. 要素試験による CLT 接合部の設計

9.1 GIR 接合による曲げ抵抗部の設計

一般的に製材や集成材の接合部設計に用いられている鉄筋等を用いた GIR 接合では、参考文献2)～6)に示すように鉄筋コンクリート梁の設計に用いる略算式 $M = a_t \times f_t \times j$ を準用し、フラットスラブを構成する接合部位置により異なるラミナ位置と繊維方向を考慮して行われた各種引張実験から求まる耐力 ($a_t \times f_t$) を用いて曲げ耐力を算定できる。すなわち、

$$M_{cal} = P_i \times j \quad (1)$$

M_{cal} : CLT の面外接合設計用曲げ耐力 (長期・短期・終局時)

P_i : ラミナの繊維方向と鉄筋位置を考慮した要素引張試験から求まる設計用短期基準耐力 P_y に対し、

$$\text{長期 } P_i = 1.1 \times P_y / 2 \quad (2a)$$

$$\text{短期 } P_i = P_y \quad (2b)$$

$$\text{設計用終局耐力 } P_i = \min(P_u, \text{鉄筋の降伏強度}) \quad (2c)$$

P_u : 木材で決まる設計用終局耐力 = (実験により求まる引張最大耐力 P_{max} の平均値) \times ばらつき係数 $(1 - CV \times k)$ (2d)

j : 応力中心間距離 (= $7/8 \times d$) なお、 d は部材せい

本建物のCLT同士の面内接合部では、CLTの強軸同士の部分およびCLTの弱軸同士の接合鉄筋の配置は、図2に示す断面位置に行う。そこで、以下に示す各方向の接合部の要素引張試験を行った。なお使用するCLTは、全て厚さ30mmのラミナを積層した厚さ210mmの5層7プライのスギS60A 種構成CLT、使用する鉄筋はD22 (SD345) とし、各試験体は6体試験する。

(1) KE引張試験体の概要

5層7プライのCLTを引張面から見て積層の構成が強、強、弱、強、弱、強、強の配列となるように木取りしたCLT ブロックの材縁に近い2層目強軸層に、D22の鉄筋 (以後D22鉄筋) を深さ500mm 挿入し、エポキシ樹脂接着剤を注入して定着させた接合試験体とした。この形式の試験体をKE引張試験体とした。Kは強軸使いを意味する。図4にKE引張試験体の概観と試験状況を示す。

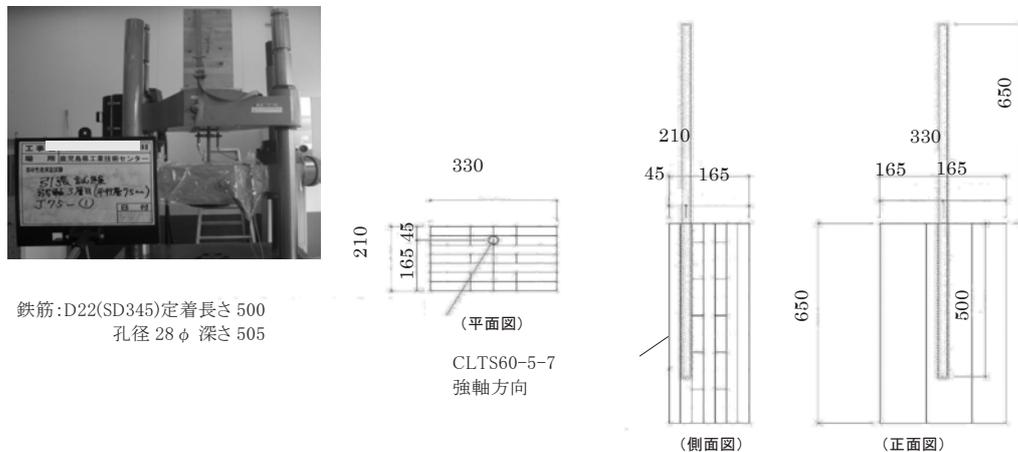


図2 KE引張試験体の概観と試験状況

(2) J75引張試験体の概要

5層7プライのCLTを引張面から見て積層の構成が弱、弱、強、弱、強、弱、弱の配列となるように木取りしたCLTブロックの材縁から3層目の強軸層（材縁から75mm）に、D22鉄筋を深さ500mm挿入し、エポキシ樹脂接着剤を注入して定着させた接合試験体である。この形式の試験体をJ75試験体とした。Jは弱軸使いを、75は縁距離が75mmであることを意味する。図3にJ75試験体の概観を示す。

(3) シアキー引張試験体の概要

後述するシアキー部分の引張能力を確認するために、5層7プライのCLTに面外からD22鉄筋を深さ180mm挿入し、エポキシ樹脂接着剤を注入して定着させた接合試験体である。この形式の試験体をシアキー引張試験体とした。図4にシアキー引張試験体の概要と試験状況を示す。

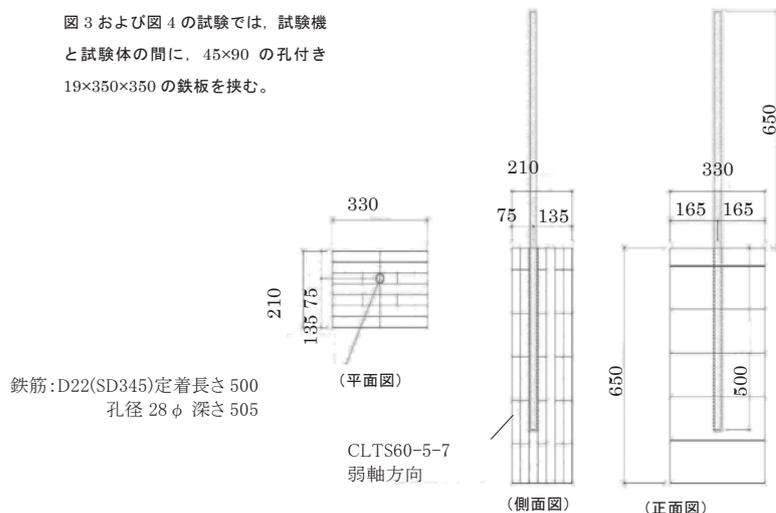


図3 J75引張試験体の概観

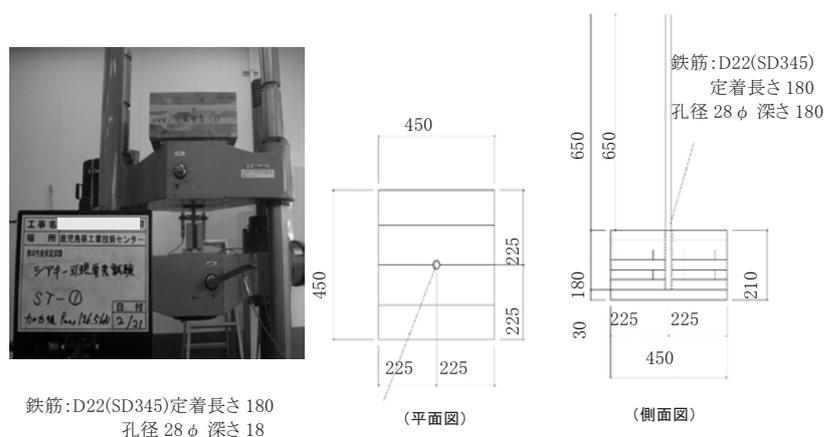


図4 シアキー引張試験体の概観と試験状況

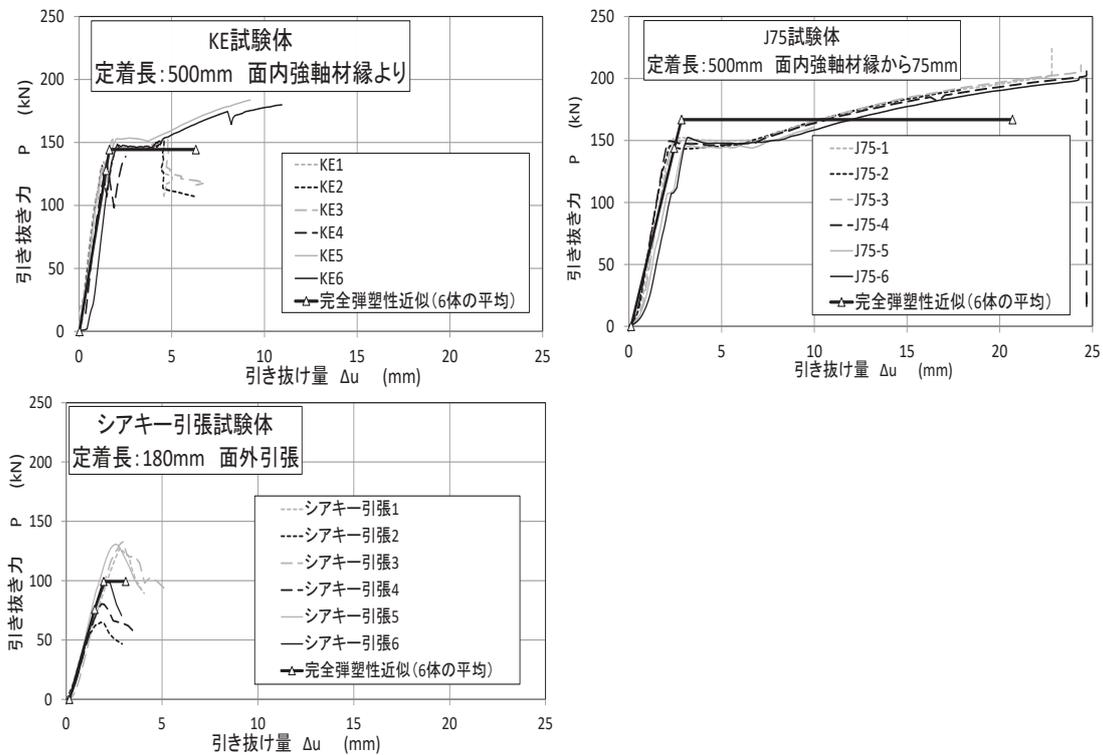


図5 各種引張試験体の荷重変形関係と完全弾塑性近似の結果

(4) 各種引張試験結果

各種引張試験の6体の荷重 (P) - 引き抜け量 (Δu) の関係と、6体の試験体で得られた完全弾塑性近似の結果の平均値のプロットを、図7に示す。なお、以降で述べる各要素試験体の剛性、降伏耐力、終局耐力等を評価は、参考文献7)で示されている完全弾塑性近似によった。なおKE試験体において、降伏時以降に挙動の異なるものであるが、長期荷重によってその応力状態にならないので、破壊モードの異なる影響は配慮していない。

各種引張試験結果から、6体の平均と標準偏差より算出されるばらつき係数を考慮して、強軸方向の接合に対する設計値は、D22鉄筋定着長さ500mmのKE引張要素試験から、設計用短期基準耐力 P_y は78 kN/本、 P_u は118kN/本を採用した。弱軸方向の接合に対する設計値は、D22鉄筋定着長さ500mmのJ75引張要素試験から、短期基準耐力 P_y は96kN/本、 P_u は145kN/本を採用した。ちなみに鉄筋の短期許容耐力は133.5kN/本、鉄筋の降伏強度 ($F \times 1.1$) は146.9kN/本である。またシアキー接合部の引張耐力に対する設計値は、D22の鉄筋定着長さ180mmのシアキー引張要素試験から、短期基準耐力 P_y は22kN/本、 P_u は38kN/本を採用した。

9.2 GIR接合によるCLT実大面外曲げ試験による検証

CLT同士のGIR接合を検証するために、1 m幅で厚さ210mmの5層7プライのスギS60A 構成CLT で、8-D22の鉄筋でGIR接合した強軸方向の実大面外曲げ試験を行った。図8に試験体図を、写真1に試験状況と試験体の破壊状況を示す。なお(1)式による試験体の接合部の設計用曲げ耐力は、以下ようになる。

設計用長期許容曲げ耐力：

$$M_a = P_i \times j = 8 \times (1.1 \times 78.0 / 2) \times (210 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 49.55 \text{ kNm/m}$$

設計用短期許容曲げ耐力：

$$M'_a = P_i \times j = 8 \times 78.0 \times (210 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 90.09 \text{ kNm/m}$$

設計用終局曲げ耐力：

$$M_u = P_i \times j = 8 \times 118.0 \times (210 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 136.29 \text{ kNm/m}$$

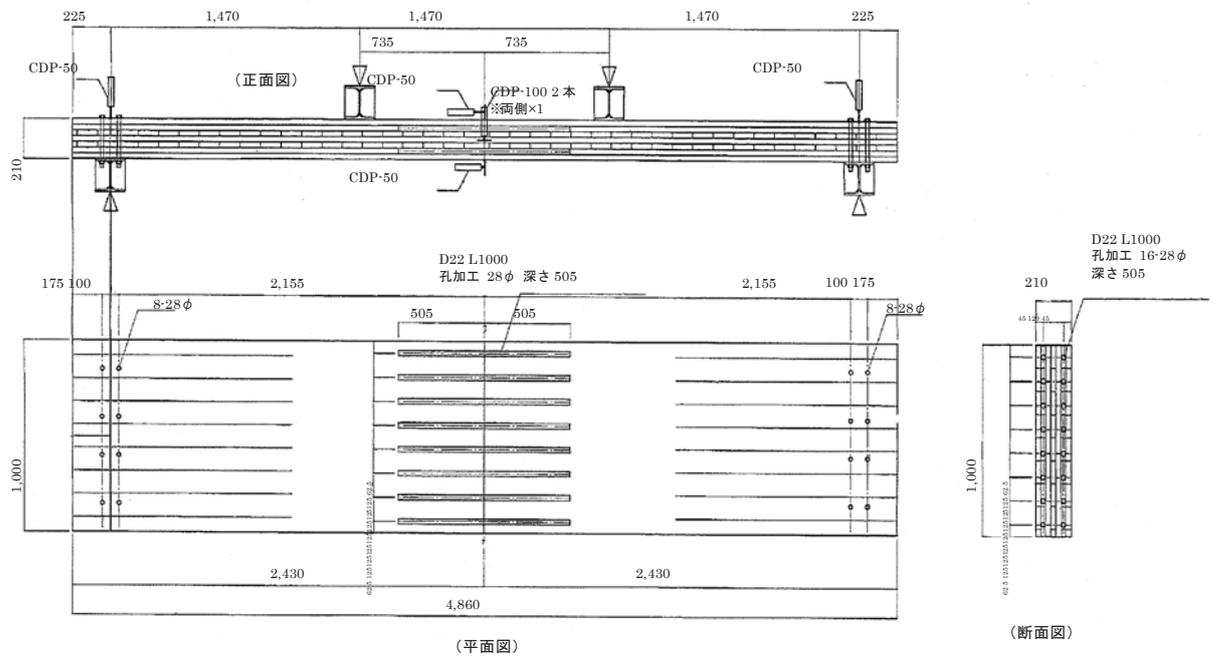


図6 CLT板の強軸実大面外曲げ実験試験体図

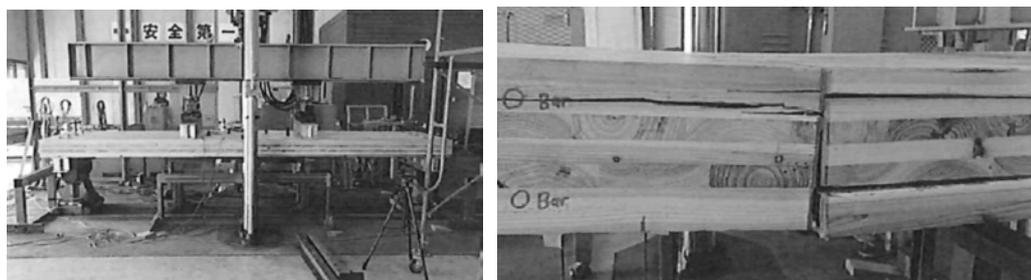
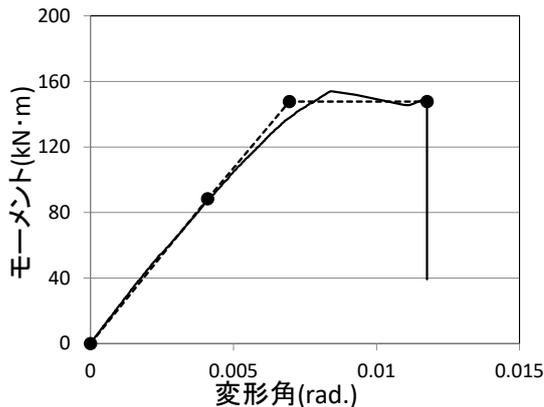


写真1 CLT板強軸実大面外曲げ実験状況および破壊状況



最大モーメント	M_{max}	kN·m	154.1
最大モーメント時変形角	θ_{Mmax}	$\times 10^3$ rad	8.41
降伏モーメント	M_y	kN·m	88.4
降伏変形角	θ_y	$\times 10^3$ rad	4.09
終局モーメント	M_u	kN·m	147.7
終局変形角	θ_u	$\times 10^3$ rad	11.8
剛性	K	kN·m/rad	21244
降伏点変形角	θ_v	$\times 10^3$ rad	6.95
塑性率	μ		1.69
構造特性係数	D_s		0.65

図7 CLT板強軸実大面外曲げのM- θ 曲線，完全弾塑性モデル

更に図7には、CLT強軸方向の接合部位置での面外曲げモーメントと変形角の関係（以後M- θ 曲線）を示す。図中には上記で計算した各種曲げ耐力も、実験したM- θ 曲線上にプロットしている。これより設計で用いた各種基準値はおおむね実大実験値以下であり、CLTの強軸方向の接合に既往のGIR接合に用いられている設計式の準用は、安全側であって可能な範囲と考える。

9.3 GIR接合によるCLT重ね部のせん断抵抗部の設計

本建物のCLTフラットスラブは、CLT同士を重ね合わせて重ね梁のように用いている。CLT同士の面外接合部では、参考文献7)に示されている重ね梁の設計法を参考にして、GIR接合部内に挿入したD22鉄筋のダボ効果により、上面CLTと下面CLTのずれ止めを形成させて、重ねたスラブの剛性が、それらを一体化と仮定したスラブの面外曲げ剛性の7割以上が確保できるように、CLTの面内に約400mmピッチごとに配置している。その際にGIR接合部のせん断抵抗能力を確認するために、以下に示す接合部の要素せん断試験を行った。なお使用するCLTは、全て厚さ210mmの5層7プライのスギS60A種構成CLT、使用する鉄筋は、D22(SD345)である。

(1) JKKJ せん断試験体

厚さ210mmの5層7プライのCLTの2枚を、内側を強軸方向（Kと記す）に、外側を弱軸方向（Jと記す）に配して、長さ380mm（定着長さは180mmと210mm）のD22鉄筋を貫通させてエポキシ樹脂接着剤を注入して、木材と鉄筋の間を固着させた接合試験体である。試験では二組のJK-CLTを背中合わせにして、M16ボルトの開き止め治具を用いて一体化してせん断試験体とした。この形式の試験体をJKKJ試験体と称す。図8にJKKJ試験体の寸法と鉄筋の配置を示す。試験では、摩擦を除去してD22鉄筋のダボ抵抗のみを評価するため、テフロンシートを接合面に挟んだ。

(2) シアキーせん断試験結果

シアキーせん断試験の6体の荷重(P/2)-相対せん断変位(u)の関係と、6体の試験体で得られた完全弾塑性近似の結果の平均値のプロットを図9に示す。D22鉄筋定着長さ180mmの6体のせん断試験結果から平均と標準偏差より算出されるばらつき係数を考慮して、CLT同士を重ね合わせた場合に用いるシアキー接合部の面内せん断耐力は、接合鉄筋一か所あたり設計用短期基準耐力 Q_y は29kN/本、 Q_u は63kN/本を採用した。

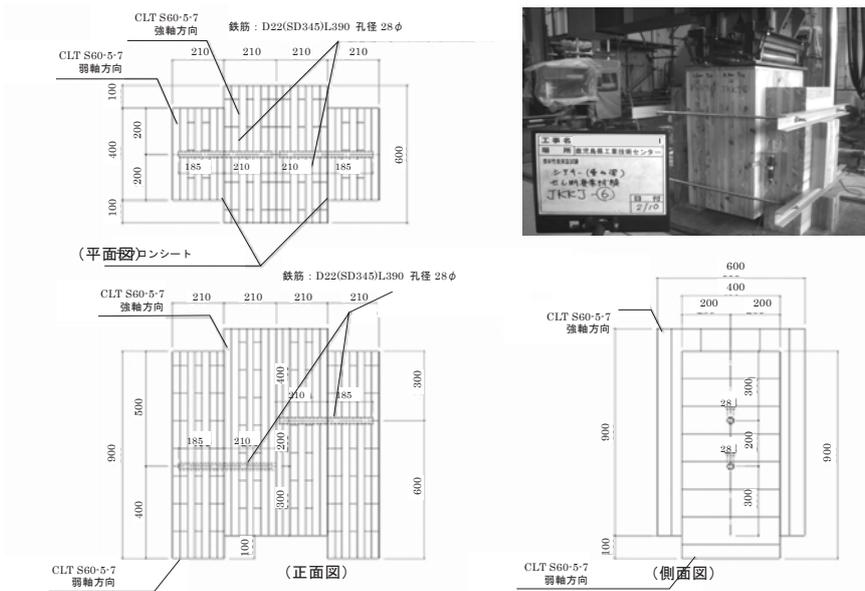


図8 JKKJせん断試験体の概観とせん断試験状況

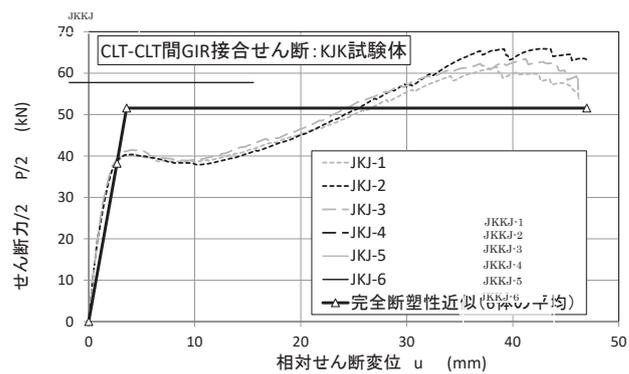


図9 せん断試験体の荷重変形関係と完全弾塑性近似の結果

10. CLT フラットスラブの設計手法とその検証

二方向フラットスラブは、合理的に設計するにはFEM解析による手法が一般的である。しかしFEM解析を設計で扱うには煩雑であるため、日本建築学会編鉄筋コンクリート造構造計算規準・同解説に示すフラットスラブの設計の従い柱列帯と柱間帯とに便宜上に分けてスラブとして検討する方法や、柱-柱間をフラットビームの骨組構造として設計する方法がある。ここでは、図10に示すフラットスラブの検討方法として、柱-柱間をフラットビームとしてCLT重ね梁に置換した骨組構造として検討する。

10.1 CLT 重ね梁をトラス置換による設計方法

柱-柱間をCLT重ね梁として置換し、一方向に支持する上面のCLTスラブを、直交するCLT重ね梁が受けてそれを柱まで伝達させると考える設計方法⁹⁾である。平成28年国土交通省告示第561号～564号では、全てのCLTの種類と方向に対して面外曲げ基準強度を与えていないので、CLT重ね梁の断面検討方法としては、各節点をピン接合とし、上面CLTおよび下面CLTを弦材とし、シアキー接合部特性を斜材でモデル化したトラスに置き換えて検討することで、各CLTは面外方向の曲げ基準強度を考慮しないで検討できる。しかし設計としては、変形の適合性がなく合理性に欠けている。

10.2 等価曲げ剛性と等価曲げ耐力に置換して設計する方法

平成28年国土交通省告示第561号～564号によるCLTの告示では、繊維直交方向のラミナを無視して等価剛性を求めてその値をもとにCLTフラットビームの等価曲げ耐力を算出する方法⁸⁾が採用されている。CLT重ね梁においても図11に示すように同様の考えとして、等価曲げ耐力を(4)式の曲げ基準強度で算出して比較する方法である。

$$F_b = \sigma_{b_om1} \times (I_A/I_0) \times 0.4875 \quad (4)$$

ここでは、実験に用いた厚さ(h/2)を210mmとした5層7プライのスギS60A種構成CLTの平均曲げ剛性として、強軸面外曲げ剛性を6.89 kN/mm²、弱軸面外曲げ剛性を0.75 kN/mm²とすると、中立軸は、弱軸側よりxが251.2mmとなる。また本試験体に用いたスギラミナの曲げ基準強度 σ_{b_om1} に27N/mm²と採用すると、Fbは9.58N/mm²となる。

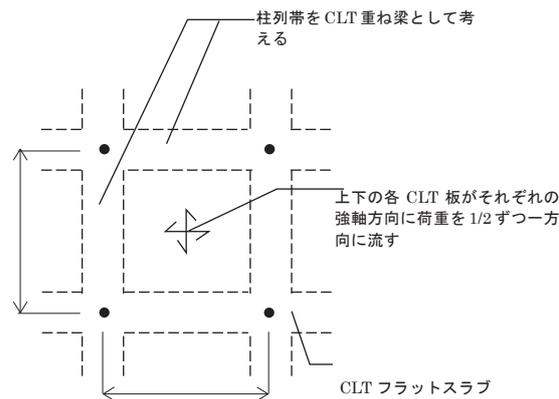


図10 CLTスラブの荷重伝達の考え方

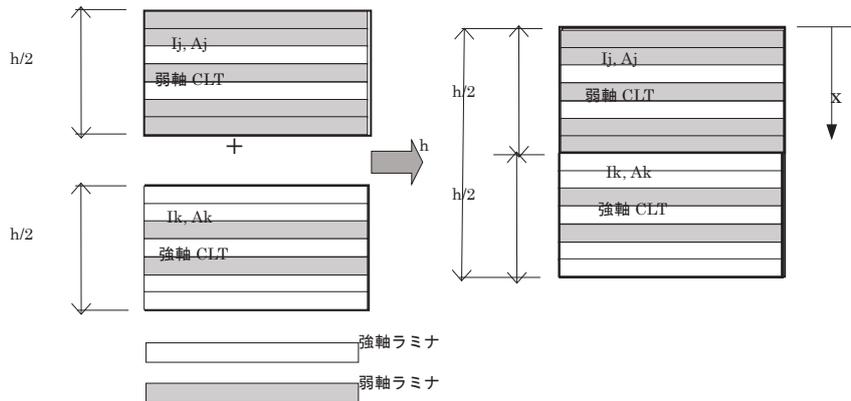


図11 CLT重ね梁の考え方の概念図

この考えから厚さ(h/2)を210mmとした5層7プライのスギS60A種構成CLTを2枚重ね合わせた梁せい420mmのCLT重ね梁を検討すると、1m当りの部材の設計用終局曲げ耐力は、 M_u が281.6kNm/mとなる。

10.3 重ね梁の GIR 接合部の既往の計算式による断面検討

CLTフラットスラブにおいては、柱一柱間をCLT重ね梁によるフラットビームとすると、下面がCLTの強軸側で上面がCLTの弱軸側となる重ね梁(重ね梁①とする)と、下面がCLTの弱軸側で上面がCLTの強軸側となる重ね梁(重ね梁②とする)が存在する。その時の部材の接合部分は図12に示すようなGIR接合とする。この場合の接合部耐力を(1)式による検討によって評価する。なお、耐力の計算において(1)式を採用することについては、別途行った50%縮小の試験体を用いた長期載荷試験において、同じ仕様のシアキーを用いた重ねたスラブの剛性が、一体となった試験体の剛性の70~71%であったこと、および後述する実大重ね梁試験体による曲げ試験で0.4Mmax時に一体と仮定して計算される剛性の76~92%の剛性が確保でき、最終破壊においてシアキーの破壊が確認されなかったことから、妥当な判断と考えている。

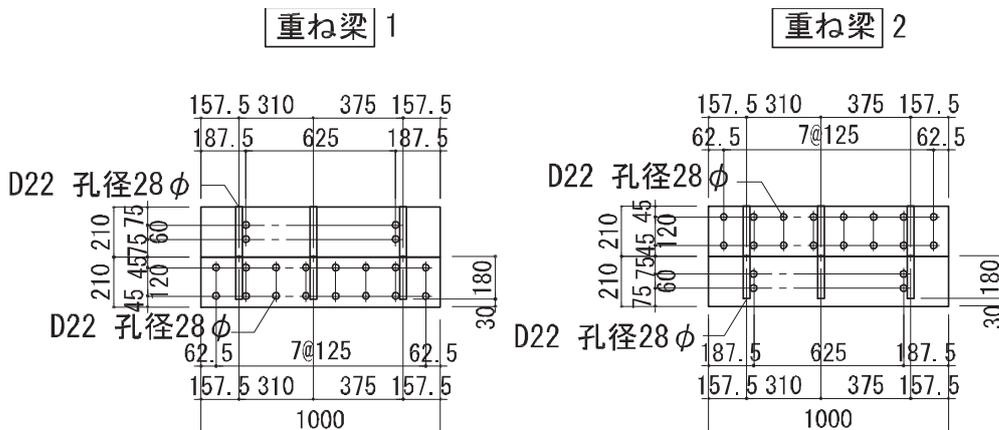


図12 CLT重ね梁における1m幅あたりの断面図

- (1) S60 5層7プライ CLT の2段重ね梁① (下段が強軸方向, 下段強軸方向 CLT に対して各 8-D22 鉄筋を表層から2層目と6層目のラミナに配置。)

設計用長期許容曲げ耐力:

$$M_a = P_i \times j = 8 \times (1.1 \times 78.0 / 2) \times (420 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 112.61 \text{ kNm/m} \quad [(5a) \text{ 図 14 中 } \triangle \text{印で示す}]$$

設計用短期許容曲げ耐力:

$$M'_a = P_i \times j = 8 \times 78.0 \times (420 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 204.75 \text{ kNm/m} \quad [(5b) \text{ 図 14 中 } \diamond \text{印で示す}]$$

設計用終局曲げ耐力:

$$M_u = P_i \times j = 8 \times 118.0 \times (420 - 45) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 309.75 \text{ kNm/m} \quad [(5c) \text{ 図 14 中 } \square \text{印で示す}]$$

なお(1)式による重ね梁①の接合部の計算式では, 4.2 で示す CLT 重ね梁の母材基準強度を超えているので, 設計としては母材強度で性能が決まることになる。

- (2) S60 5層7プライ CLT の2段重ね梁② (下段が弱軸方向, 下段弱軸方向 CLT に対して各 2-D22 鉄筋を表層から3層目と5層目のラミナに配置, なお設計では, これらの引張鉄筋に対して平均鉄筋重心として計算する。)

設計用長期許容曲げ耐力:

$$M_a = P_i \times j = 4 \times (1.1 \times 96.0 / 2) \times (420 - 105) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 58.21 \text{ kNm/m} \quad [(6a) \text{ 図 15 中 } \triangle \text{印で示す}]$$

設計用短期許容曲げ耐力:

$$M'_a = P_i \times j = 4 \times 96.0 \times (420 - 105) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 105.84 \text{ kNm/m} \quad [(6b) \text{ 図 15 中 } \diamond \text{印で示す}]$$

設計用終局曲げ耐力:

$$M_u = P_i \times j = 4 \times 145.0 \times (420 - 105) \times 7 / 8 \times 10^{-3} \\ = 159.86 \text{ kNm/m} \quad [(6c) \text{ 図 15 中 } \square \text{印で示す}]$$

10.4 CLT重ね梁試験による検証

CLT重ね梁は、計算式だけでは十分に安全性を検証することができない。そこで幅1mの実大CLT重ね梁の単調4点載荷試験により、曲げ耐力を算出して検証する。

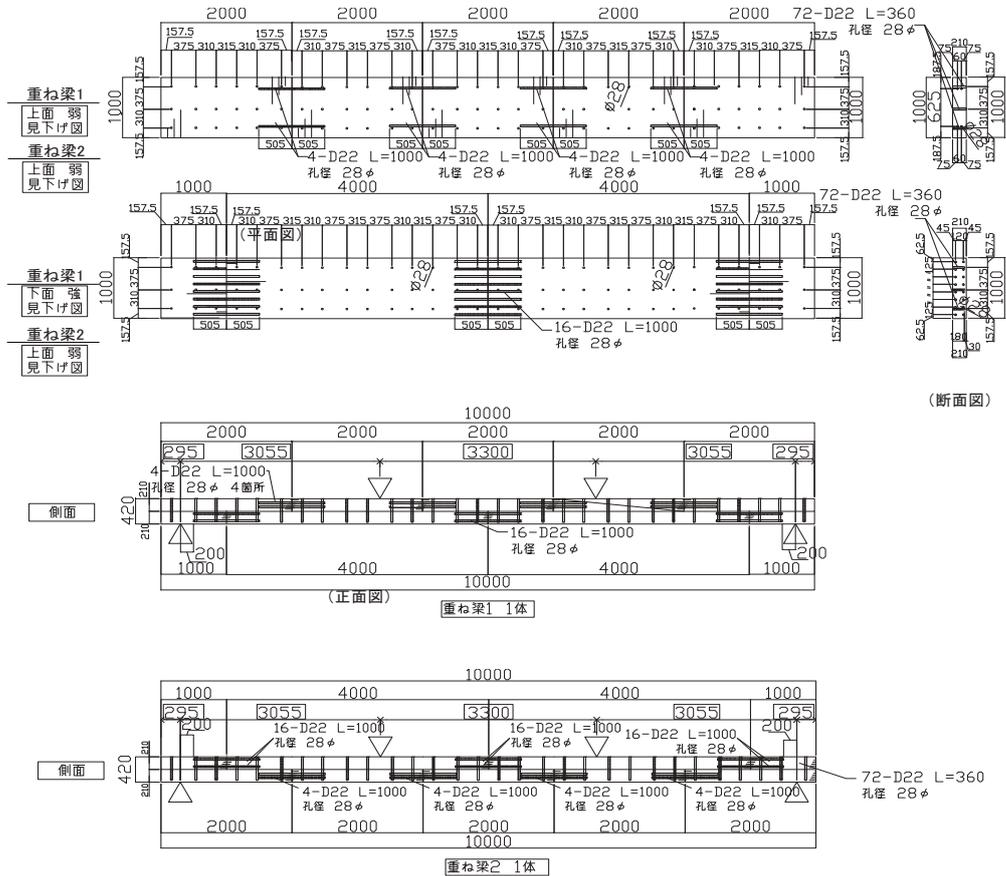


図13 CLT重ね梁試験の試験体図

重ね梁試験体を図13に、実験状況および破壊状況を写真2に示す。なお試験体部材の中央部の変形角 θ は、部材中央部より左右に750mmずつ離れた1500mmの区間の上面と下面の水平方向の変形をもとに算出している。さらに図14～15には、CLT重ね梁①および②のM- θ 曲線結果を示す。図中には前項で計算した各種曲げ耐力も、実験したM- θ 曲線上にプロットしている。

これによると、設計で用いた各種基準値はいずれも実大試験の値以下であり、CLT重ね梁（下段強軸方向）の接合設計レベルでは、既往のGIR接合に用いられている設計式の準用は安全側であって可能な範囲と考える。さらに詳細に破壊モードを検討すると、重ね梁①においては、下端の引張方向接合部で、接合部付近の曲げ変形に対して接合鉄筋の曲げ剛性が高く、CLTに二次応力が生じたことが原因による割裂破壊が生じている。しかし長期荷重に対する設計で考慮すべき耐力は十分確保できている。また重ね梁②では、試験結果の値が、はるかに本設計法による値を上回っているおり、設計式は安全側過ぎてい

表 1 CLT重ね梁試験の結果一覧

試験体記号	最大荷重時			最大モーメント		曲げ強さ Fu (N/mm ²)	曲げヤング係数 Eb (kN/mm ²)
	荷重 (kN)	変位 δ (mm)	試験体の状況	M (kN・m)	θ (×10 ⁻³ rad.)		
重ね梁①	248.6	215.3	スパン中央 I のCLT材の割裂	379.7	11.5	12.9	3.5
重ね梁②	210.0	※	CLT材の割裂を伴う鉄筋の引き抜け	320.8	5.44	10.9	2.8

(注) 1. 表中の変位 δ, モーメント (M), 変形角 (θ) は以下により算出した。
 δ : 部材中央部の鉛直変形 (mm)
 $M = P/2 \times 3.055$ (kN・m)
 θ : 部材中央部の変形角 (rad.)
 2. 表中の※は, 変位計が試験中にゲージアウトし, 変位 δ の算出が行えなかった試験体を示す。

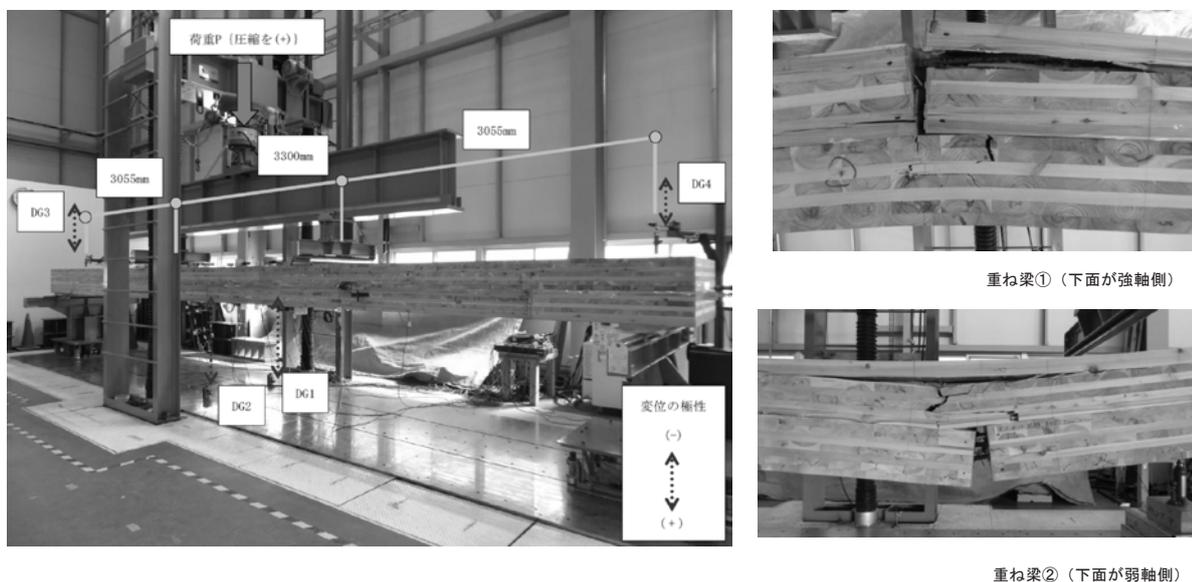


写真 2 CLT 重ね梁試験状況および破壊状況

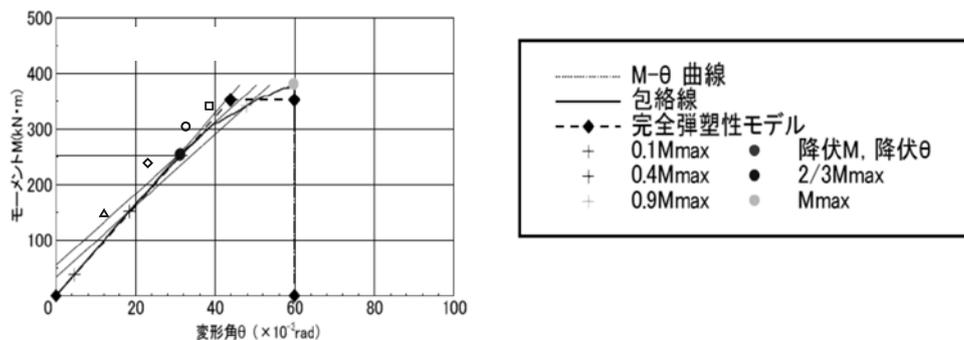


図14 CLT重ね梁①のM-θ曲線, 包絡線および完全弾塑性モデル

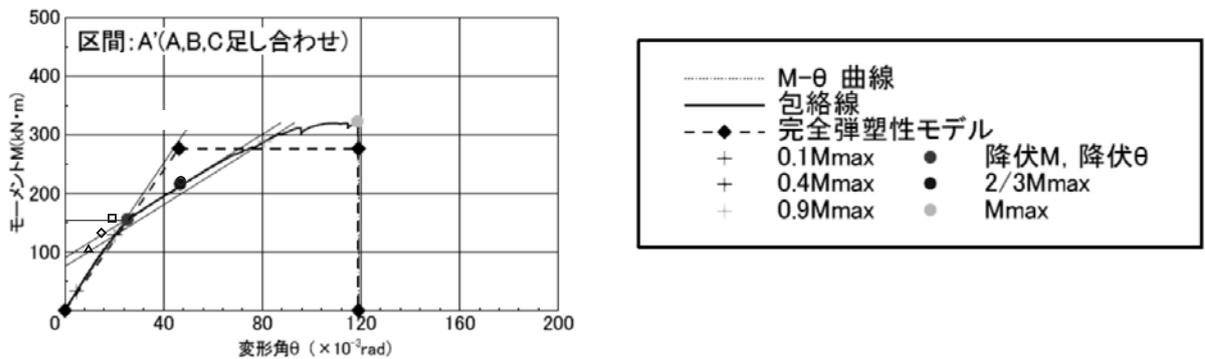


図15 CLT重ね梁②のM-θ曲線，包絡線および完全弾塑性モデル

11. 要素試験による CLT フラットスラブと鉛直支持柱接合部の設計

二方向 CLT フラットスラブを鉄骨柱で鉛直支持する機構を考えた場合，鉄骨柱の柱頭に鉄板を付けて CLT フラットスラブを支持する形式とする。しかしその支持機構については，単純な CLT へのめり込み機構なのか鉄筋コンクリート造の独立基礎等で考えるパンチングシアー現象の考慮が必要かどうかを検討する必要がある。そこで 1/2 縮小試験体を作成して，柱頭にフラットプレートを取り付けた鉛直支持柱の CLT フラットスラブへの接合を想定したパンチングシアー試験を行った。試験体の概観と試験状況を図 16 に示す。なおフラットプレートの大きさは，告示で規定する CLT のめり込み強度から算出されるフラットプレートの必要面積の約 1.33 倍とし，2 枚の CLT を重ねた時のずれ止め用のシアキーは，前述の配置に対して 1/2 縮小に相当するように配置した。図 17 に最終破壊状況を示す。

図 17 に，パンチングシアー試験の荷重変形曲線と最終破壊状況の一例を示す。1/2 縮小試験体によるパンチングシアー試験より，試験の最終段階では試験体下部で割裂破壊が一部生じているものの，主な破壊性状は明らかに CLT の面外方向のめり込み強度に依存していて，鉄筋コンクリート造のようなパンチングシアーによる広がった破壊状況は発生していない。したがって設計では，(7)式を採用することが妥当と判断できる。すなわち，

$$P_u = \min(P_{u1}, P_{u2}) \quad (7)$$

ここに， P_u ：柱支持部耐力， P_1 ：CLT の面外方向めり込み耐力

P_2 ：支持鉄板面外曲げ耐力

なお，スギ CLT の柱支持部のめり込み耐力は，告示で示される基準強度 F_{cv} (6.0 N/mm^2) を元に算出できる。

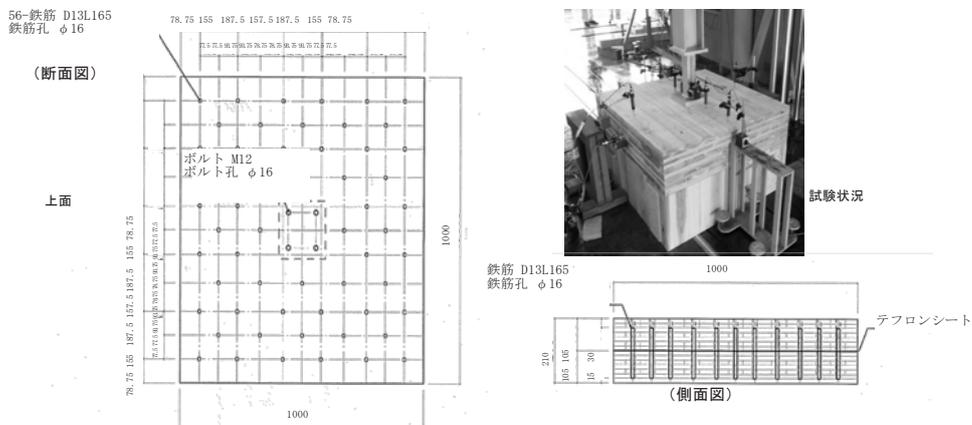


図16 パンチングシアー試験体の概観

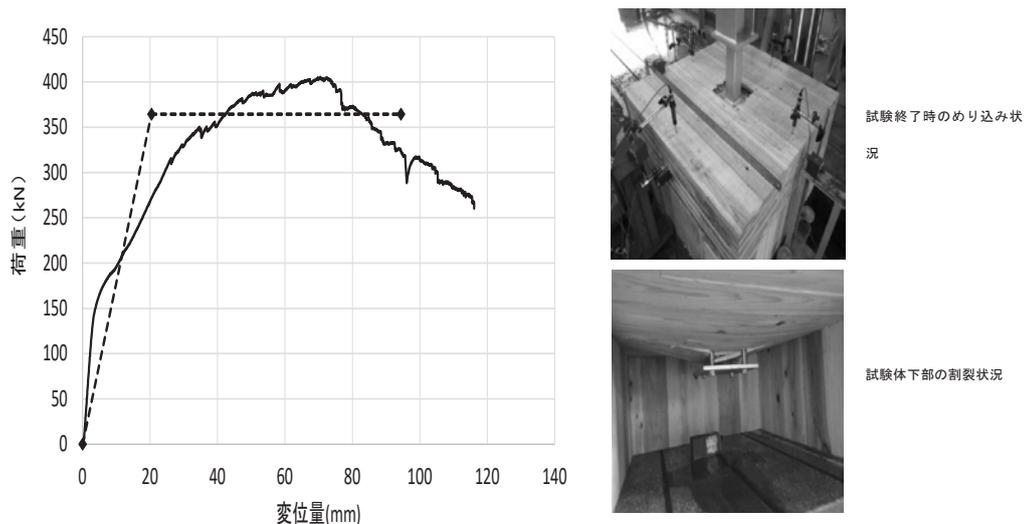


図17 パンチングシアー試験による荷重変形曲線と最終破壊状況

12. まとめ

- CLT を用いた二方向フラットスラブ構造を用いた建物を設計して建設する事を目的として、CLT 二方向フラットスラブ構造システムを開発した。
- CLT 二方向フラットスラブの柱-柱間をフラットビームとして CLT 重ね梁に置換した
- 骨組構造とした設計の場合、引張側の最外層のラミナが繊維方向となる強軸方向の CLT および CLT 重ね梁に対して、面外曲げに対して既往の GIR 接合時に用いられる設計式で接合部設計をすることは、安全側であって可能な範囲と考える。
- 引張側の最外層のラミナが繊維直交方向となる CLT 重ね梁に対しては、単位幅の CLT 重ね梁の面外曲げ試験の実験値は、はるかに本設計法による値を上回っているおり、設計式は安全側過ぎている。したがって、今後より精度の高い設計式を確立する際には更なる検討事項と考えられる。
- スギ CLT 二方向フラットスラブと鉛直支持柱の接合部分の CLT 側の設計では、めり込み強度のみを考慮すればよいことが実験で確認された。

参考文献

- 1) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 2016 年版 CLT1 を用いた建築物の設計施工マニュアル, 2016
- 2) 田中, 井上, 後藤: GIR(Glued-in Rod)接合法を用いた木質構造接合部の曲げ耐力算定法, 日本建築学会九州支部研究報告 第 41 号, 2002.3
- 3) 竹内, 藤川, 田中, 後藤, 井上: GIR(Glued-in Rod)接合法を用いた木質構造接合部の回転剛性に関する研究(その1) 推定方法の検討及び継手接合部実験による検証, 日本建築学会九州支部研究報告 第 44 号, 2005.3
- 4) 石谷, 竹内, 田中, 後藤, 井上: 接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究(その1) 引抜試験の概要及び実験結果, 日本建築学会九州支部研究報告 第 45 号, 2006.3
- 5) 竹内, 石谷, 田中, 後藤, 井上: 接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究(その2) 引抜試験結果の考察及び検討, 日本建築学会九州支部研究報告 第 45 号, 2006.3
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 7) (財) 日本住宅・木材技術センター, 木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008 年度版), pp.586, 2008
- 8) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説 2006 年版, 2006
- 9) 日本建築学会: 木質構造基礎理論, pp.107~111, 2010

13. 実証実験の実現にむけて

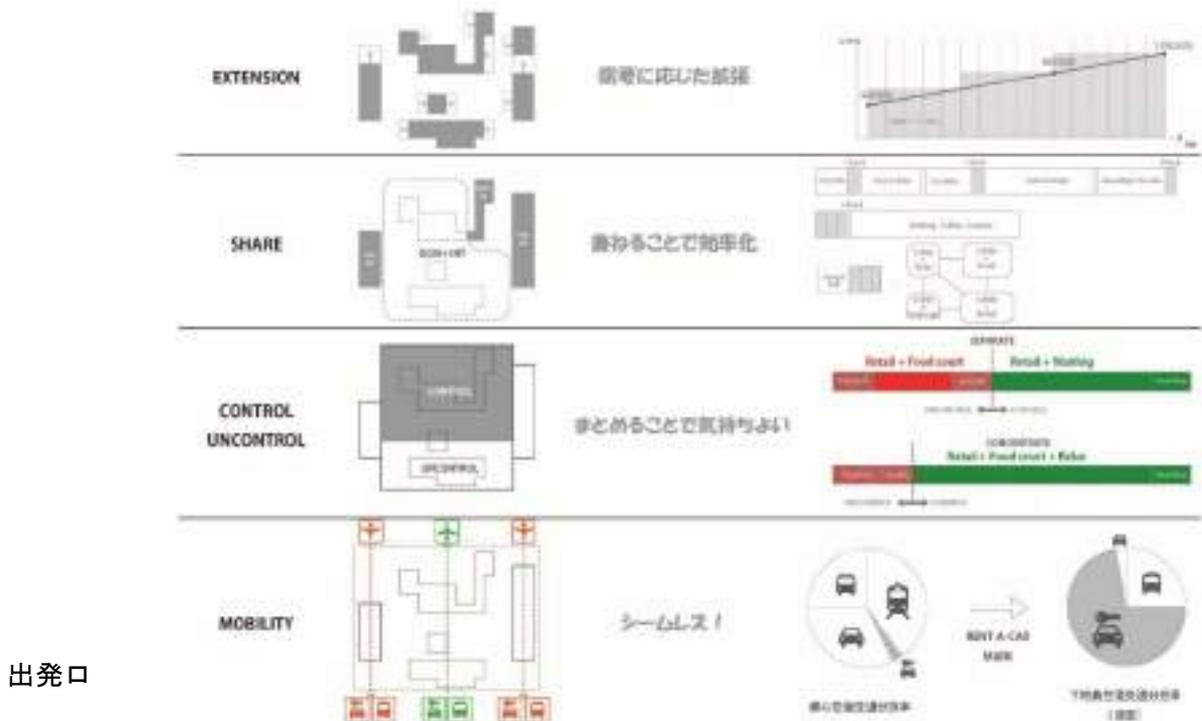
実証実験に基づき下地島空港旅客ターミナルの設計を行った。
設計図は別途成果品に示すが、今までにない宮古島の自然を生かしたヴィラタイプの新しい空港となる。

空港から、リゾート、はじまる

下地島は、観光客が多くビジネス客が少ない地域になります。
新しい空港からリゾートを感じられるような空港を目指します。
そのためには、さまざまな「時間」の使い方が必要です。



木の板をばらまいたような形態が生み出す空港だからできること



出発口

CLT コスト縮減、工期短縮について

設計開始時点では国内、国際到着棟の屋根も CLT で設計しておりました。

工期的な問題、コスト的な問題から、旅客が集まる、チェックイン棟、出発ラウンジ棟は CLT フラットスラブ構造とすることで、実証実験を建設に活かす結果となりました。

出発ラウンジではレベルを 3 段階に変えた CLT の隙間から CLT 屋根の反射光が室内にやさしく入り込む。8m x 8m の大スパン CLT 板は反射光が映り込み明るく、豊かなラウンジ空間となります。

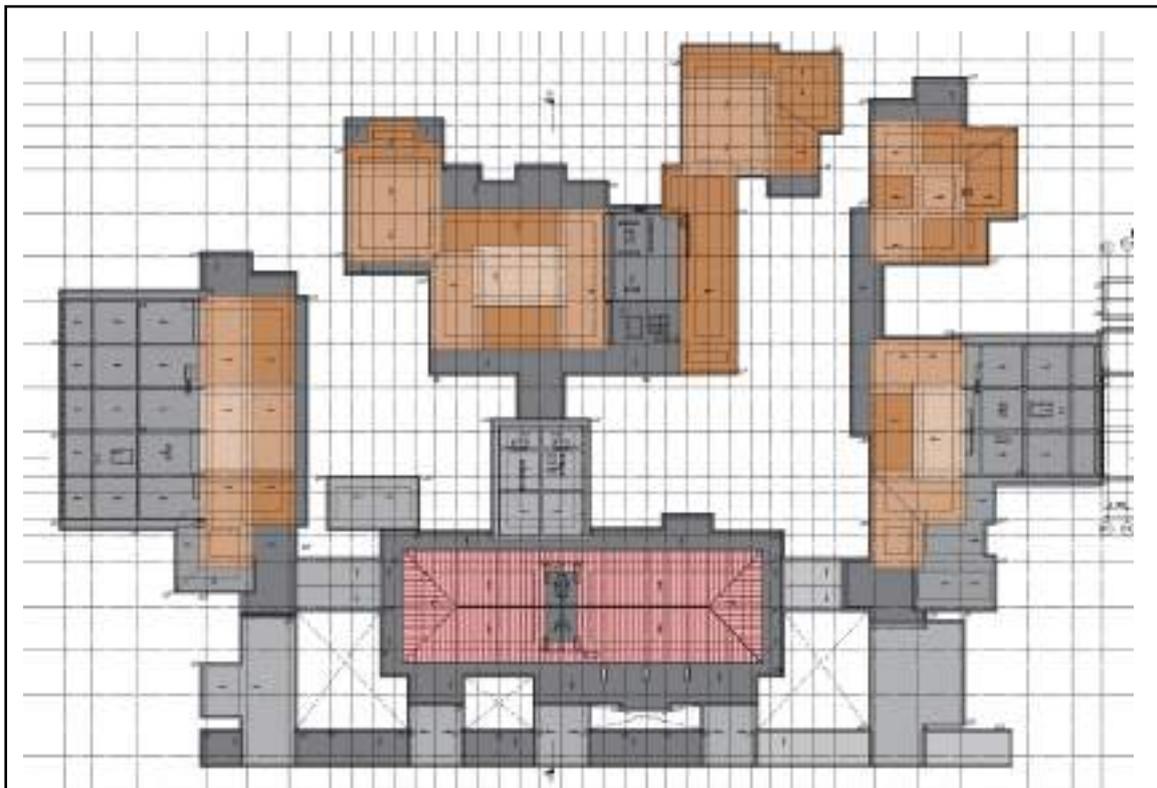
チェックインロビーはスギ集成材張、調弦梁に支持された屋根は仕上げ材として赤瓦を張り、空港のアイコンとなる建物です。内部空間も CLT 板切妻屋根で構成された空間は、他の空港では見たことのない空間となります。

また、CLT と RC で構成された旅客ターミナルは庭や水盤を引き立て、印象に残る、五感に訴える空港になります。

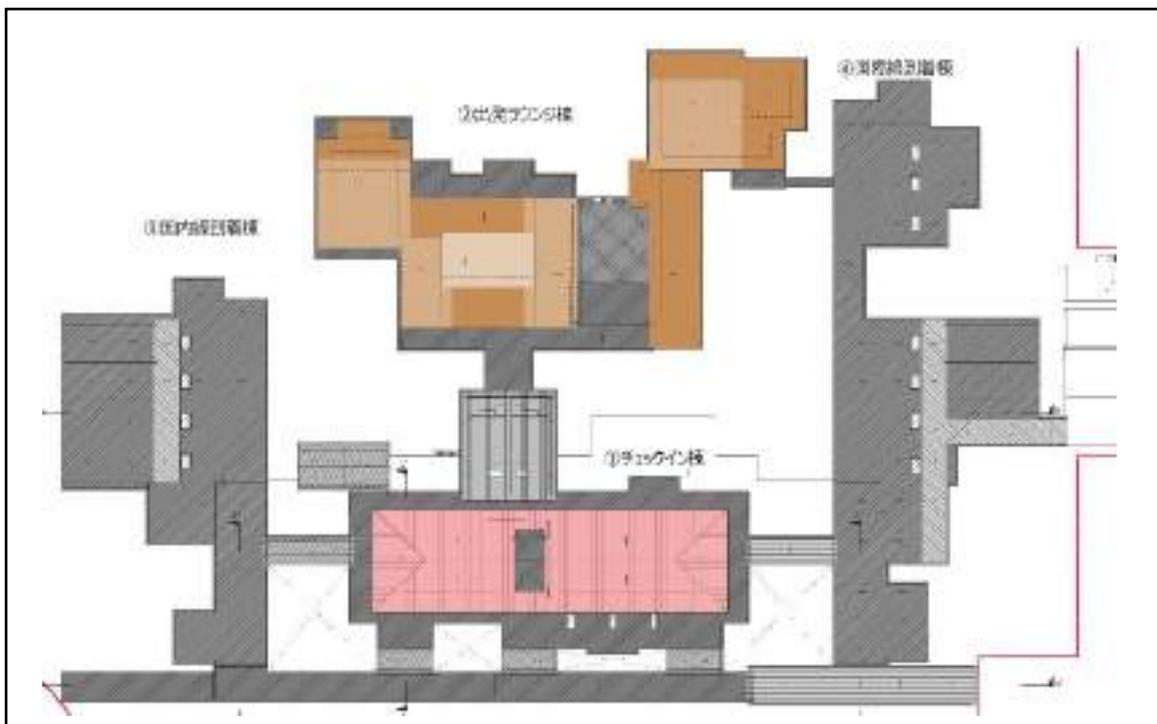
今回は新たなチャレンジであったため、今後今回の実証実験の結果をさらに活かし、CLT のコスト縮減、工期短縮に取り組み、CLT の普及につなげたいと思います。



全体外観夜景



設計変更前屋根伏図



設計変更後屋根伏図