

中高層木造建築の設計と施工

－CLT 耐震壁の構造実験と実大モックアップを用いた施工性の検証－

Design and Construction of Large Timber Structure

- Experiments of CLT seismic walls and Verification of Constructability -

富田直樹* 佐藤太輝** 小妻靖知** 山際 創** 秋竹壮哉* 伊藤 淳*

要 旨

地上 8 階建ての中高層木造建築の設計と施工に取り組み、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる建物を計画した。木造の構造体には CLT 耐震壁を採用し、躯体への接合は一般的に用いられる鋼板挿入型ドリフトピン接合と、新たに考案したせん断コッター接合を併用して、高い初期剛性を実現した。採用にあたっては、各種構造実験を行い、CLT 耐震壁の設計方法を確立した。施工面では、工期短縮のために鉄筋コンクリート造躯体と木造躯体を各階同時に構築する計画とした。実大のモックアップを用いて、木造躯体構築時の施工性を検証し、実施工に取り組んだ。建物に木材を使用したことによる CO₂ の固定量および環境配慮型 BF コンクリートを使用したことによる CO₂ 排出量の削減を確認した。

キーワード：中高層木造建築、混合構造、CLT 耐震壁、実大モックアップ、
環境配慮型 BF コンクリート

1. まえがき

近年、脱炭素社会の実現に向け、CO₂ を固定化する木材の利用が着目され、建築においては低層建物だけでなく、中高層建物の木造建築事例も報告¹⁾されている。当社においても、ESG・SDGs の取り組みの一環として、建築物の木造化・木質化を推進するため、自社寮を対象として、木造と鉄筋コンクリート造との混合構造からなる中高層木造建築の実現に取り組んだ。

木造の耐震壁に CLT を採用するために CLT の接合方法に関する要素実験と壁構面実験を行い、その構造性能を確認した。実施工にあたり、実大のモックアップを用いて木造部分の雨養生方法や躯体工事の施工手順を確認

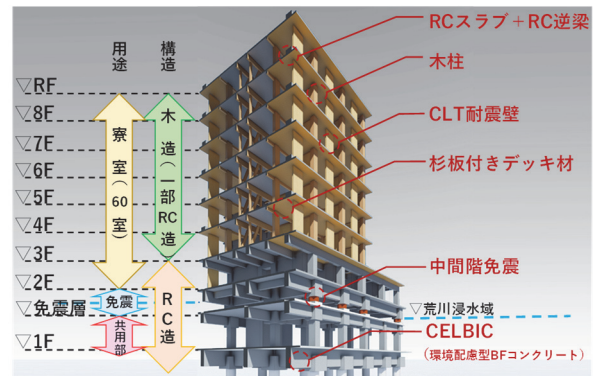
した。また、実施工では、CO₂ 排出量削減の観点から、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換えた環境配慮型 BF コンクリート²⁾を基礎躯体に適用し、CO₂ 排出量の削減を確認した。本報では、これらの取り組みについて報告する。

2. 建物概要

建物は、埼玉県川口市に計画された地上 8 階建ての自社寮である。写真－1 に外観および内観写真、図－1 に構造構成ダイヤグラムを示す。計画地が荒川の浸水域に位置していることから、地震や水害時に高い安全性を確保するために中間階免震構造を採用した。架構形式は、



写真－1 外観および内観写真



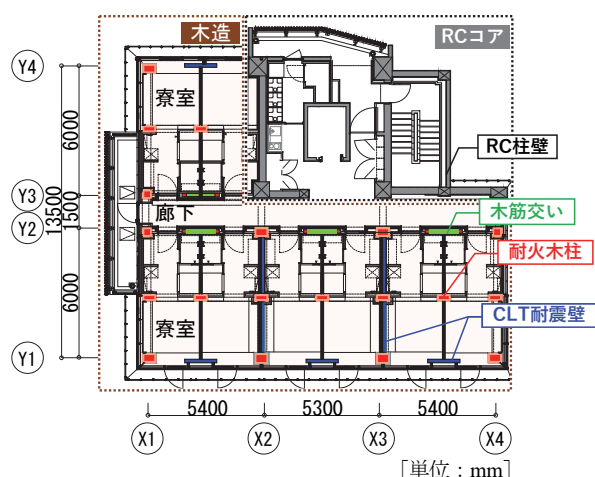
図－1 構造構成ダイヤグラム

* 技術本部技術研究所建築研究グループ ** 東日本支社建築設計部

両方向とも耐震壁付きラーメン架構である。耐震要素として CLT 耐震壁を用いると共に、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造を計画した。

構造種別は、図－１に示すように免震層上下階となる１～２階を RC 造とし、免震効果を十分に発揮させるために高い剛性と耐力を確保した。基準階は、図－２に示すように、寮としての居住性および耐震性能を確保するため、木造と RC 造（コア部）の混合構造とした。そのため、床は面内剛性を確保して水平力をコア部の RC 架構まで伝達する必要がある。また木質系床構造では、遮音性能を確保するためスラブが厚くなり、階高が高くなる。そこで、RC スラブを採用することで、必要な面内剛性と遮音性を確保しつつ階高を抑えている。

3～8階の混合構造階には、耐震要素としてRC造の耐震壁と木造のCLT耐震壁および筋交いを設けた。木造架構は軸組工法とし、柱および梁、筋交いは、集成材E105-F300を用い、接合部は鋼板挿入型ドリフトピン接合とした。CLT耐震壁の仕様については、3章に記す。



圖一 2 基準階伏圖

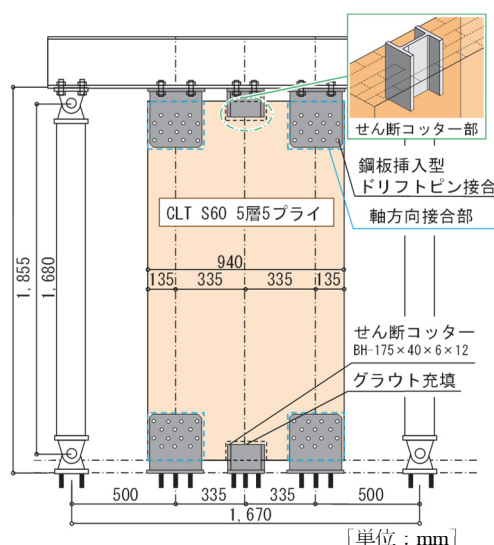


図-3 CLT 壁構面試験体 (2/3 縮小モデル)

3. CLT 耐震壁の構造実験

3.1 実験概要

CLT 耐震壁全体の構造性能を確認するための壁構面実験と、各接合部の構造性能を確認するための要素実験を行った。図-3 に CLT 壁構面の試験体を、図-4 にせん断コッター接合部の試験体を示す。表-1 に試験体一覧を示す。壁構面試験体は、加力装置の性能の関係上、2/3 縮小試験体とした。接合部の要素試験は、壁構面試験が縮小試験体となるため、実大と 2/3 縮小試験体の 2 パターンで実施した。CLT 耐震壁は、上部を木梁、下部を RC スラブと接合する。その接合には、鋼板挿入型ドリフトピンと新たに考案したせん断コッターを用いる。CLT は、国産スギ S60 同一等級構成、5 層 5 プライの厚み 150mm を用いた。四隅の軸方向接合部は、鋼板挿入型ドリフトピン接合とし、中央のせん断接合部には H 形鋼を挿入し、コッターの支圧によりせん断力を負担する仕様とした。ドリフトピンには、鋼板の施工クリアランスがあるのに対し、せん断コッターではグラウトを充填することにより隙間をなくしている。これは、軸方向力とせん断力を明確に分けて CLT 耐震壁に負担させ、荷重変形関係においてスリップ挙動の生じない高い初期剛性を得ることを意図している。なお、図-4 に示す試験体は、鉛直一方方向の単調載荷実験としたため、せん断コッターには CT 形鋼を用いた。

表-1 試験体一覧

対象部位	接合形式	スケール	載荷方法	試験体数
要素	鋼板挿入ドリフトピン	実大	単調	1
			漸増	6
	せん断コッター	2/3縮小	単調	1
			漸増	6
	鋼板挿入ドリフトピン	2/3縮小	単調	1
			漸増	6
せん断コッター	2/3縮小	単調	1	
		漸増	6	
構面	壁全体	2/3縮小	単調	1
			漸増	3

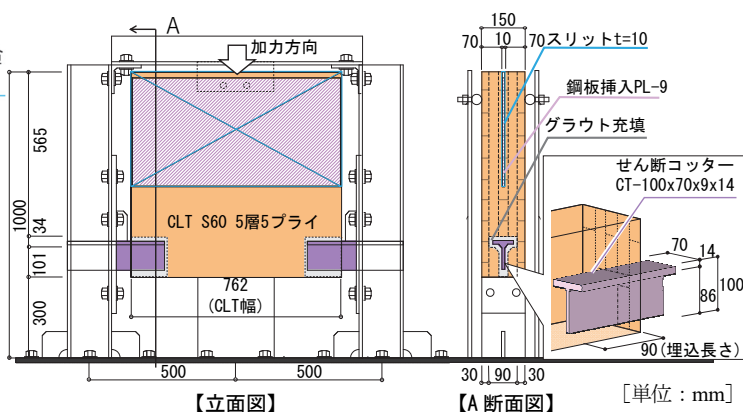


図-4 せん断コッタ一接合部試験体(実大モデル)

3.2 加力計画

せん断コッター接合部の要素実験では、圧縮方向の繰り返し加力を 6 体実施した。加力は、最大荷重に達した後、最大荷重の 80% に荷重が低下するか、接合部の機能が失われるまで行った。壁構面試験は、既往文献³⁾に基づき正負交番繰り返し載荷を 3 体実施した。加力は、最大荷重の 80% に荷重が低下するか、見かけのせん断変形角³⁾が $1/15\text{rad}$ を超えるまで行った。

3.3 実験結果

図-5 にせん断コッター試験体の荷重変形関係の一例と破壊状況（解体後）を示す。せん断コッターにグラウトを充填した効果により、最大耐力以前の荷重変形関係において初期のスリップ性状は見られず、高い剛性の発現を確認した。終局状態では、グラウト部の圧壊は生じず、木部で接合部境界部分の圧縮変形が進み、CLT パネルが中央付近から縦に割れるように破壊した。なお、割裂破壊は、接着面でなく中央の直交層の界面（図-5 の紫矢印部ラミナの両側面）において発生した。

図-6 に、壁構面試験体の荷重変形関係と破壊状況（終局状態の試験体の全景および接合部近傍）の一例を示す。終局状態において、せん断コッター接合部に損傷はなく、ドリフトピン接合部の引張側に割裂が集中し、破壊に至った。

3.4 CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力評価

実験結果より得られた短期基準耐力の評価値を表-2 に示す。せん断コッター試験体を含む要素試験では、全ての降伏耐力 P_y により短期基準接合耐力が決定した。壁構面試験では、せん断変形角が $1/120\text{rad}$ 時点での耐力により短期基準せん断耐力が決定した。

実大スケールの CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力は、実験で得られた短期基準耐力を基に設定した。2/3 スケール壁構面の短期せん断耐力の実験値は 42.1kN で、終局状態はドリフトピン接合部の破壊となった。この結果から、ドリフトピン接合部の実大スケールの耐力と 2/3 スケールの耐力比 2.54 倍を乗じた 106.9kN を実大スケールの短期せん断耐力と推定した。しかし、せん断コッター接合部における実大スケール要素試験の短期基準耐力 92.2kN の方が推定値 106.9kN よりも小さく、また実大スケールの壁構面実験を実施していないことなどを踏まえ、実施設計では、せん断コッター接合部の短期基準耐力を CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力とした。

3.5 CLT 耐震壁の剛性評価

接合部を含む CLT 耐震壁全体のせん断剛性を把握するため、弾塑性解析ソフト SNAP（構造システム）を用いて静的増分解析を行った。実大スケールの CLT 耐震壁の水平剛性は、解析により求めた。モデル化にあたり、せん断コッター接合部の剛性は、前述した要素実験の結果を用いた。CLT 側接合部は要素実験結果を、梁側接合

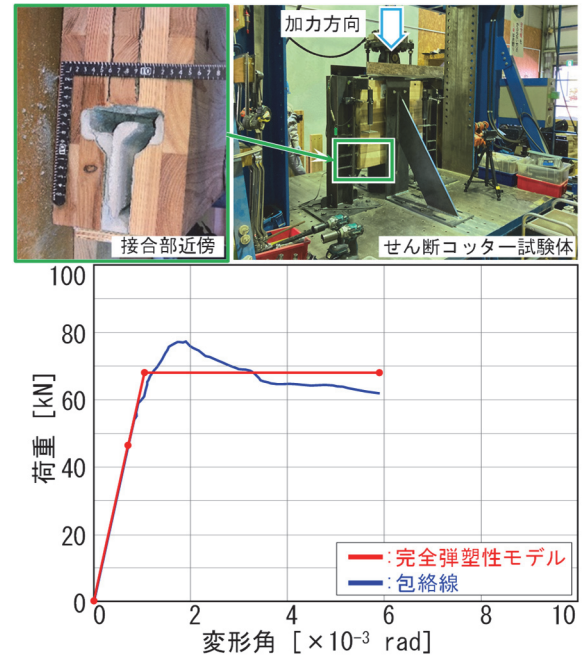


図-5 せん断コッター試験体の荷重変形関係と破壊状況

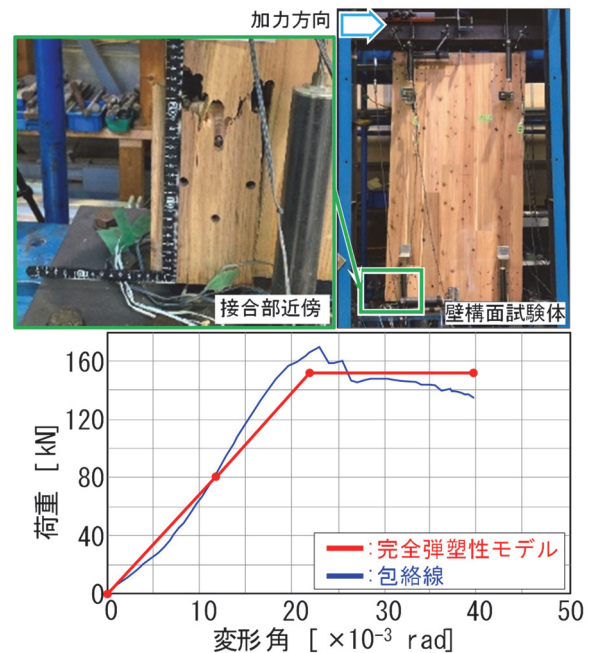


図-6 壁構面試験体の荷重変形関係と破壊状況

表-2 各試験体の短期許容せん断耐力一覧

接合形式	スケール	P_y [kN]	$2/3P_{max}$ [kN]	P_u [kN]	$P_u(0.2D_p)$ [kN]	$1/120\text{rad}$ P [kN]	P_a [kN]
鋼板挿入 ドリフトピン	実大	156.3	167.3	207.5			156.3
せん断コッター		92.2	97.3	138.1			92.2
鋼板挿入 ドリフトピン	2/3縮小	61.4	77.6	81.5			61.4
せん断コッター		36.0	43.7	56.6			36.0
壁全体		79.4	103.0		45.0	42.1	42.1

P_y : 降伏耐力 P_{max} : 最大耐力

P_u : 終局耐力 P_a : 短期許容せん断耐力

部は鋼材の物性データや既往のデータを用いた。接合部剛性は、CLT 側接合部と梁側接合部の直列ばねとした。

図－7 に、CLT 耐震壁の解析モデルを示す。解析モデルにおいて、梁は線材剛体要素とし、CLT 耐震壁要素は線材弾性要素とした。また、CLT 頂部はローラー支持、脚部はピン支持とした。CLT 耐震壁の接合部は、CLT 側接合部と梁側接合部の剛性を鉛直バネおよびせん断バネに置き換えて考慮した。なお、壁構面実験では、CLT 側接合部までの評価であったが、解析では CLT と梁部材を接続する梁側接合部（アンカーボルトや構造金物留め用ビス）についても考慮した。CLT 耐震壁の壁長は、壁構面実験において対象とした壁長 1400mm の他に、2445mm および 2625mm が存在する。壁長 2445mm と 2625mm の解析によるせん断剛性の算定にあたり、接合部は壁長 1400mm と同一とし、CLT 耐震壁の壁長とドリフトピン接合部の位置を変えた解析モデルを用いた。

図－8 に、壁長を変えた実大スケールの解析モデルの荷重変形関係を示す。せん断コッター接合部は弾性としているため、最大耐力が壁長により異なる結果となっているが、せん断コッター部のディテールを同一とし、短期許容せん断耐力は壁長によらず、壁構面実験において対象とした壁長 1400mm の耐力により評価した。

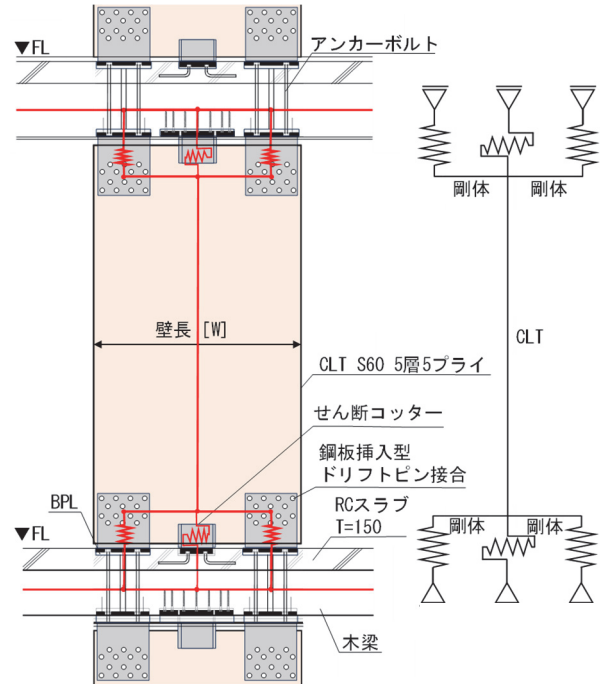
短期許容せん断耐力となる時点において、ドリフトピン接合部に生じる力が実大スケール要素試験の耐力値 156.3kN 以下であることを各モデルにて確認している。建物全体の架構検討において、CLT 耐震壁は上記より得られたせん断剛性と等価となるように鉄骨ブレースとして評価した。

4. 木造工事の事前検証と実施工

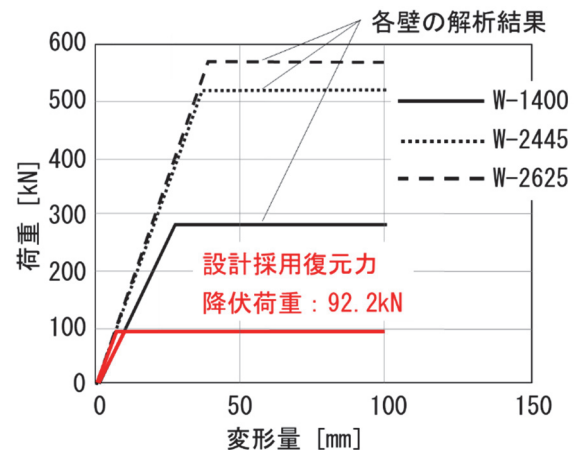
4.1 木質材料の養生

中高層木造建築の施工では、屋根や外壁が完成するまでに数カ月程度の期間を要することが多い。そのため、木材への雨水の影響が懸念される。特に、木材表面を仕上げ材とする場合、雨水等による汚れの付着が美観性に大きく影響する。そこで、木質材料の養生方法の検討を目的に、茨城県つくば市にて屋外の曝露試験を実施した。写真－2 に実大スケールの CLT 壁の曝露試験体を、表－3 に曝露試験の仕様一覧を示す。内装材となる木質部材の輸送・組立時における汚れを防止する塗布剤の仕様を検討するにあたり、木材の質感を維持することを重視し、試験体 A・C には含浸系の塗料をそれぞれ選定した。なお比較のため試験体 B については無塗装としている。屋外での曝露期間は、建物の雨仕舞が完了するまでを想定し、約 6 カ月とした。

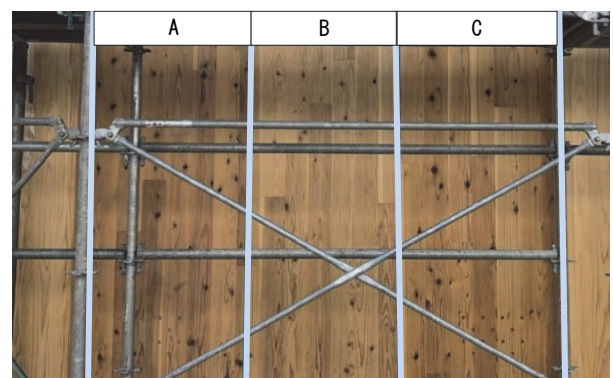
曝露試験の結果、木材に大きな変色がないことから、撥水性の高い汚れ防止専用の仕様（No. C）を採用することとした。実施工では、加工工場にて木質材料に保護



図－7 CLT 耐震壁の解析モデル



図－8 解析モデルの荷重変形関係



写真－2 CLT 壁の曝露試験体（撮影時期：塗布直後）

表－3 曝露試験の仕様一覧

試験体No.	A	B	C
塗布材の仕様	外装用/水性/含浸	無塗装	内装用/油性/含浸

塗料を塗布し、それを現場に運搬して、木造建て方をを行った。その結果、建物の雨仕舞が完了するまでに木質材料が大きく変色することはなく、美観性を確保できた。

4.2 木造躯体の建て方

図-9に平面混合構造（木造+鉄筋コンクリート造）の施工手順を示す。一般的な施工手順は、図-9の上段に示すように、RC 柱のコンクリートを打設し、次に木造躯体の建て方、床スラブの打設となる。この場合、同一階のコンクリート躯体を2回に分けて打設する必要があるため、施工手順の増加と十分な工期の確保が課題となる。

実施工では、躯体工事の工期短縮を目的に RC 躯体と木造躯体を各階同時に施工する計画とした。図-10に実大モックアップの検討部位を示す。モックアップ施工により、躯体工事全体の施工手順や木造躯体の建て方時の精度管理方法を確認すると共に、コンクリート打設時のノロ漏れ対策が必要な部位を把握した。

図-11にパネルゾーンでの木質梁接合部（鋼板とアンカーボルトを事前に一体化させた状態）の施工精度を確保するために考案した施工手順の模式図と試験施工状況を示す。木質梁接合部の施工では、その誤差が木質梁の建て方精度に大きく影響を及ぼすため、高い精度が要求される。そこで、RC 柱の型枠建込みまでに木質梁接合部の設置が完了する以下の施工手順を考案した。

手順1：ベースプレート部に栈木を固定する。

手順2：ベースプレートの設置位置に開孔を設けた柱型枠を建込む。

手順3：柱型枠にベースプレートを設置する。

実施工では、手順3でのベースプレートの設置精度を確保することで、木質梁の落とし込みがスムーズに行えることを確認した。この施工手順とすることで、柱・床スラブのコンクリートを同時に打設できることを確認した。また、当初想定していた一般的な施工手順と比較して、今回採用した施工方法（図-9の下段）を用いることで、4日/階、木造躯体6階分の合計24日の工期短縮を確認した。

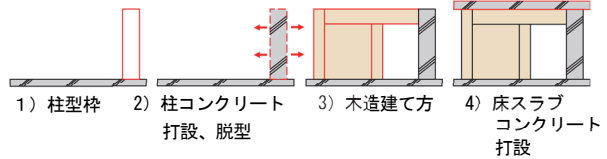
写真-3に実施工での鋼板挿入部のノロ漏れ対策状況を示す。木質梁接合部の鋼板挿入部に生じる隙間には、止水処理等を施すことでノロ漏れに対応した。その結果、現場での柱・床スラブのコンクリート躯体打設時には、大きなノロ漏れが生じていないことを確認した。

5. CO₂の固定化と排出量削減効果

5.1 木材使用によるCO₂の固定化

本計画では、建物に約208m³の木材を使用した。林野庁の「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」にて換算した結果、炭素貯蔵量（CO₂固定量）は、約148tになることを確認した。

■一般的な施工手順



■今回採用した施工手順

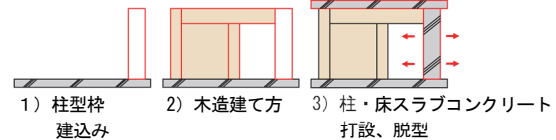


図-9 平面混合構造（木造+鉄筋コンクリート造）の施工手順

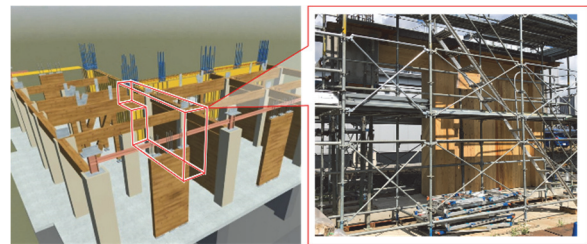


図-10 実大モックアップの検討部位

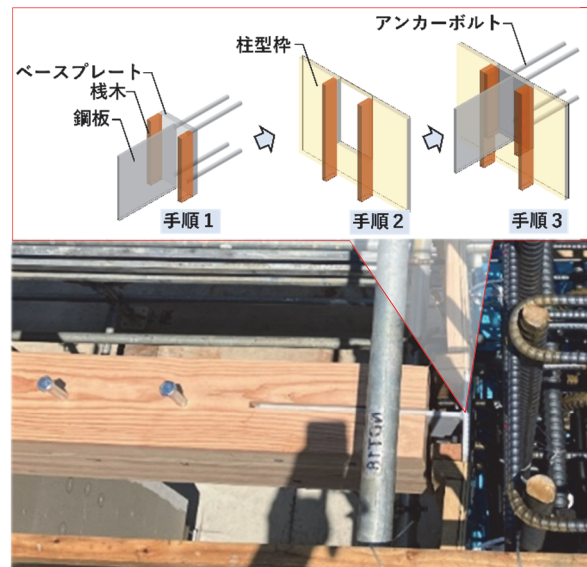


図-11 パネルゾーン施工手順の模式図と試験施工状況



写真-3 鋼板挿入部でのノロ漏れ対策状況

5.2 環境配慮型 BF コンクリートによる CO₂ 排出量の削減効果

本計画において基礎地中梁に使用した環境配慮型 BF コンクリートは、コンクリート材料の普通ポルトランドセメントの一部を「高炉スラグ微粉末」で代替することで、セメントの製造過程における CO₂ の排出を削減する低炭素型コンクリートである。本コンクリートの概要を表-4 に示す。建物の部位によって高炉スラグ微粉末の使用率を 10～70% の範囲で使い分けができる。高炉スラグ微粉末の使用率を最大の 70% とした場合、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて、約 63% の CO₂ 排出量の削減効果が得られる。

表-5 に今回適用したコンクリートの仕様を示す。基礎地中梁へのコンクリート打設は、約 100m³ ずつ 2 回に分けた。打設方法は、ポンプ圧送により行った。呼び強度 42 の一般的なコンクリートの水セメント比は 40% 程度であるが、今回採用したコンクリートは 35.5% と 36.0% であり一般的な水結合材比よりも小さい。そのため、ポンプの圧送負荷がやや大きかったものの、スランプ 21cm とすることで、打設は十分可能なことを確認した。受け入れ試験は打設ごとに 3 回、圧縮強度試験についても 3 回実施した。受け入れ試験におけるスランプと材齢 28 日の圧縮強度試験結果を図-12 に示す。受け入れ試験は、練り上がりから 40～60 分程度で行い、スランプはいずれも管理値を満足した。また、圧縮強度についても、調和管理強度 42N/mm² を全て満足した。

今回の基礎地中梁における環境配慮型 BF コンクリート打込み総数量は 214m³ であり、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して、CO₂ 排出量を約 45t 削減することができた。

6. まとめ

今回、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる地上 8 階建て建物の設計および施工を実現するため、CLT 耐震壁の構造実験、実大モックアップによる施工性の検証実験を実施した。これらの実験から得られた知見を以下に示す。

- i. セン断コッター接合部の構造性能を確認するための要素実験と、CLT 耐震壁全体の構造性能を確認するための壁構面実験を行った結果、セン断接合部にグラウトを充填した新たなコッター形式を有する CLT 耐震壁は、構造要素として高い初期剛性を有することを確認した
- ii. 実験結果を踏まえて、セン断コッターを用いた CLT 耐震壁の許容耐力および剛性の評価方法を提案し、免震建物における耐震要素として必要な性能を満足する CLT 耐震壁の設計方法を確立した

表-4 環境配慮型 BF コンクリートの概要

高炉スラグ微粉末の使用率とクラス分け	A 種クラス：10%以上、30%以下 B 種クラス：30%超、60%以下 C 種クラス：60%超、70%以下
適用部位・部材	A・B 種クラス：地下および地上構造物 C 種クラス：地下構造物または直接外気と接しない部位・部材、かつ、厚さが 200mm 以上
使用する高炉スラグ微粉末の種類	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206 適合品、せっこう添加あり)
設計基準強度	18～36 N/mm ²
計画共用期間の級*	短期、標準、長期
CO ₂ の排出削減量	普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ 9～63%
* JASS5 の計画共用期間の級に対する期間 ： 短期はおおよそ 30 年、標準はおおよそ 65 年、長期はおおよそ 100 年	

表-5 適用したコンクリートの仕様

適用部位	設計基準強度 [調和管理強度]	高炉スラグ微粉末の使用率	水結合材比 A・B プラント	スランプ	空気量
基礎地中梁	36N/mm ² [42N/mm ²]	70%	A: 36.0% B: 35.5%	21cm	4.5%

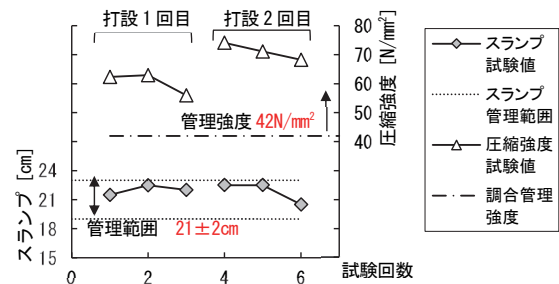


図-12 スランプと圧縮強度試験結果

- iii. 実大モックアップの曝露試験に基づき木質部材の保護塗料を選定し実施工で用いた結果、現場施工中における木質部材の美観性を確保した
- iv. RC 柱の型枠に木質梁を設置する施工法を実大モックアップで検証し、混合構造の躯体工事の工期短縮が可能であることを確認した
- v. 建物に木材を約 208m³ 使用することで、約 148t の CO₂ 固定量になることを確認した。基礎地中梁に環境配慮型 BF コンクリートを 214m³ 採用したことで、CO₂ 排出量を約 45t 削減した

7. あとがき

今回の取り組みを反映し、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる自社寮を構築することが出来た。今後、得られた知見を活かし、木造ハイブリッド構造をはじめとする木造建築を積極的に推進していきたい。

【参考文献】

- 1) 林野庁林政部木材利用課建築物木材利用促進グループ発行、「進めよう！都市（まち）の木造化中大規模木造公共建築物事例集」
- 2) 河野政典、赤星博仁、伊藤 淳、「高炉微粉末を用いた環境配慮型コンクリートの開発」、奥村組技術研究年報、No.47、pp.85-90、2021.9
- 3) 公益財団法人日本住宅木材技術センター発行、「2017 年度版木造軸組住宅の許容応力度設計」