

CLTパネルと鉄骨架構によるハイブリッド型木造構造システムの実設計に向けた設計マニュアルの開発

● 実施団体 ●

株式会社 堀江建築工学研究
〒151-0071 東京都渋谷区本町1丁目52-2 Kビル4F

国立大学法人 東北大学工学研究科
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6

事業目的

令和3年度～5年度に本事業で提案し、基本性能の検討や解析モデルの作成、試設計を行った「CLTパネルと鉄骨架構によるハイブリッド型木造構造システム」の実現・社会実装に向けて以下の技術開発を行う。過去3年度に蓄積した成果に基づいて、提案した構造システムを用いた建築物を実現（社会実装）するための検討を行う。ハイブリッド架構を実建物に適用するための建物各部の詳細を検討し設計法を確立し、普及に向けたマニュアルの拡充を行う。

- ① 接合部設計における課題を解決し、より合理的な接合部の開発とそれに基づく接合部および壁の設計法の整理
- ② 建物を設計する際の構造計画のためのフローを策定し、CLT壁、接合部、鉄骨架構の仮定断面を簡略に設定する方法を明示する。
- ③ 架構全体を構造解析し、限界耐力計算法により必要な構造性能を確保する構造設計法に関する設計マニュアル（基本設計と設計法の解説）を作成し公開する。

実施した項目

非木造建築が主流である中層集合住宅やオフィスなどの木質系建築構造を実現するための以下の研究を行う。

- ① CLT-鉄骨接合部及び構造システムの構造性能検討法開発：接合部ディテールの改良・実験検証、構造計画の検討法の改良・提案
- ② 構造設計マニュアルの拡充とより広い範囲での試設計例の検討
- ③ 普及・広報活動

実施体制

全体委員会	主査： 前田匡樹（東北大学）
	幹事： 迫田丈志（株式会社堀江建築工学研究）
	委員： 太田勤，清原俊彦，高橋愛，尾畑徹，土田敏行（株式会社堀江建築工学研究），松本直之（山口大学），後藤豊（東北大学），千葉賢史（宮城県水産林政部），日野円（宮城県森林組合連合会），勝田幸仁朗（物林株式会社），安達揚一（株式会社SPAZIO建築設計事務所）
CLT-鉄骨接合部・構造システムWG	
主査： 前田匡樹（東北大学）	
幹事： 松本直之（山口大学）	
委員： 迫田丈志，太田勤，清原俊彦，尾畑徹，高橋愛，土田敏行（株式会社堀江建築工学研究），後藤豊，渡邊悠，三崎拓己（東北大学）	
構造設計WG	主査： 迫田丈志（株式会社堀江建築工学研究）
	幹事： 尾畑 徹（株式会社堀江建築工学研究）

実施した内容

1. CLT鉄骨接合部および構造システムの構造性能評価

1-1. 改良型接合部の設計法の提案と検証

昨年度までに検討を行ったCLT-Sハイブリッド構造システムの接合部設計法において課題となった初期スリップの解消を目的として、ボルトとビスの併用による改良型接合部の開発を行った。

(1) 要素実験の概要

実大接合部の40%縮小試験体で圧縮・引張の一軸の正負交番載荷実験を行い、ボルトとビスの接合部性能の足し合わせが可能であるかの検証を行った。ボルトのみ（BCシリーズ）による接合、ビスのみ（SCシリーズ）による接合、ボルト・ビス併用型（BSCシリーズ）接合各3～4体について、一軸交番載荷試験を実施した。CLTパネルは厚さ36mmのCLT36（スギ，3層3プライMx60），ボルトは強度等級10.9の高強度ボルトM12，ビスはコンフィット（径4.2mm，全長51）を使用した。図1，2に実験の概要を示す。

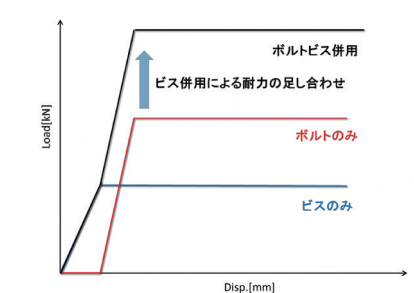


図1：接合部のビス・ボルトの足し合わせによる補剛効果模式図

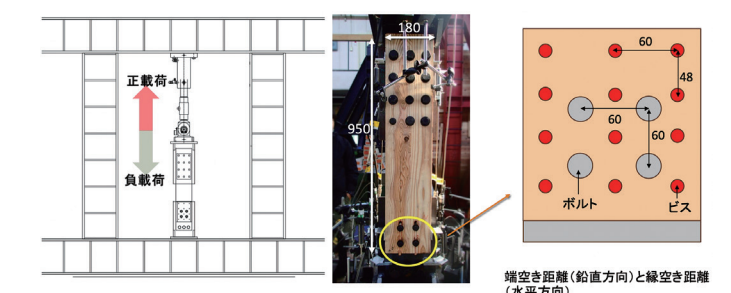


図2：改良型接合部ディテールおよび実験セッティング

(2) 実験結果の概要

実験結果の概要を図3～6に示す。①ボルトのみ，②ビスのみ，③ボルト・ビス併用の各接合部はそれぞれ，①完全弾塑性に近い挙動（めり込み先行），②ビスの降伏・二次剛性発現・ビスの破壊による荷重低下，③①，②の重ね合わせ，という挙動を示した。剛性，耐力では，独立した実験①，②の重ね合わせは，併用した実験③よりやや剛性・耐力ともに高いものの，おおむね重ね合わせが成立していることが確認された。ビス接合では初期の立ち上がりが確認され，改良接合部における

初期剛性の改良に有効であることが示された。理論式は文献 1) (ボルト) および 2) (ビス) により算定した。

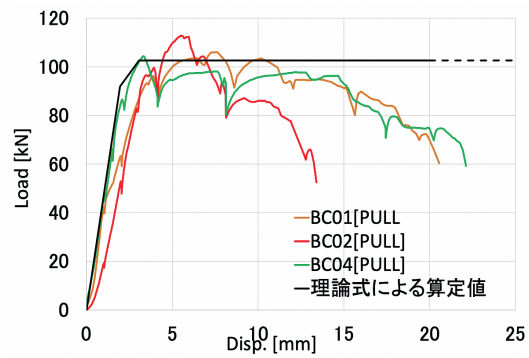


図 3：荷重変形関係 ①ボルトのみの接合部

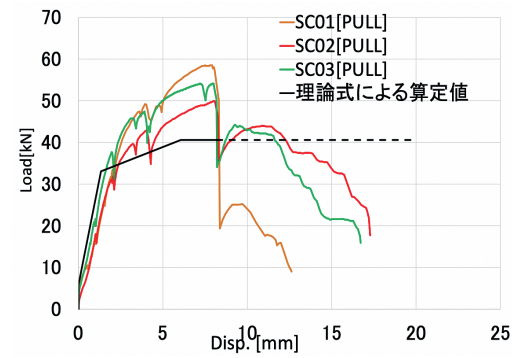


図 4：荷重変形関係 ②ビスのみの接合部

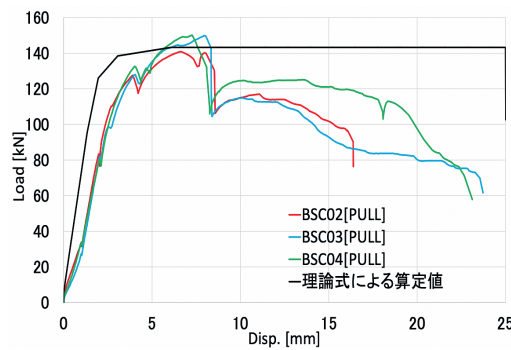


図 5：荷重変形関係 ③ボルト・ビスの併用接合部

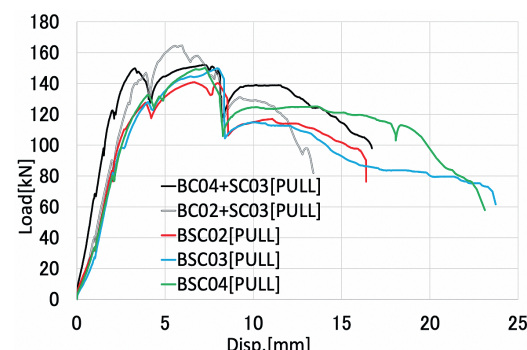


図 6：荷重変形関係 ①+② と ③の比較

1-2. 接合部設計法の提案

過年度に実施した接合部実験及び理論的検証にもとづいて以下の点を整理した。

- ・接合部（ボルト or ボルト+ビス）の骨格曲線算定法（剛性，降伏耐力，終局耐力）
- ・破壊モードの決定法（めり込み先行，集合破壊防止）
- ・設計用耐力の定義（短期時および降伏・終局耐力）

図 7, 8 に，提案する CLT 壁のロッキング変形時の引張側および圧縮側接合部の骨格曲線を示す。文献 1), 3) に示す方法により，破壊モードを検討の上（図 9），剛性・耐力の算定，短期荷重（CLT の繊維直交方向降伏時）を提案した。なお終局変位は，端抜け破壊変位 δs と，実験上ボルトによる周囲の木材の破壊に伴う荷重低下が確認された変位 $\delta \phi$ （ボルト同径程度）の小さい値とした。

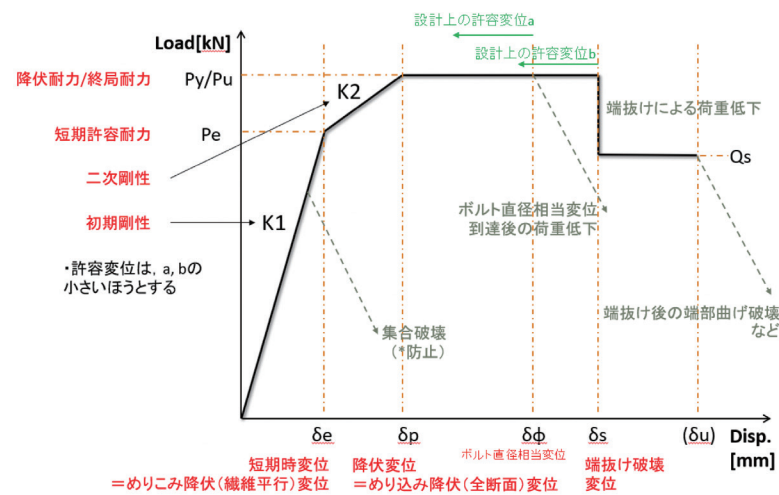


図 7：CLT－S：ボルト接合部骨格曲線（引張側）

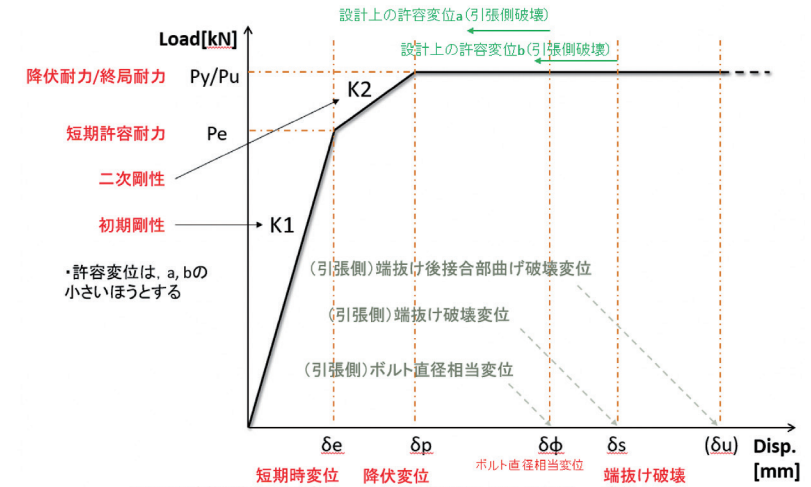


図 8：CLT－S：ボルト接合部骨格曲線（圧縮側）

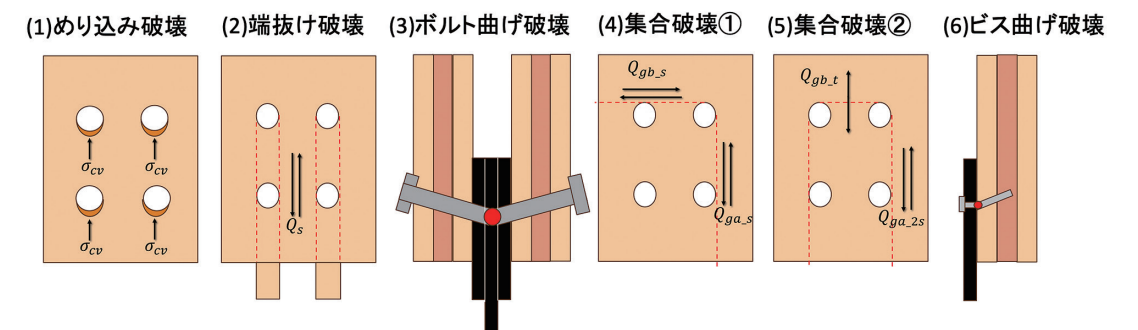


図 9：想定する破壊モード

1-3. CLT 壁の性能評価方法および設計パラメータの影響の検証

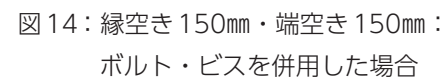
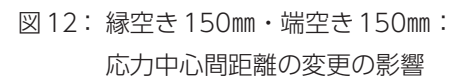
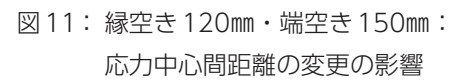
前項に定めた接合設計法により得られた接合部の鉛直方向の荷重変形関係に基づいて，CLT 壁の発揮するせん断性能に与える設計パラメータの影響を検証した。壁の水平せん断力は，ロッキング変形の影響が卓越する（CLT パネル自体の曲げ，せん断剛性が十分大きく剛性への影響小）とし，接合部に作用する鉛直荷重 P_{uj} をもとに，下式（1）にて算出した。

$$Q = \frac{j \times P_{uj}}{h} \quad \text{式 (1)}$$

（ Q ：壁に作用するせん断力， j ：応力中心間距離（接合部各重心間距離）， h ：反曲点高さ， P_{uj} ：接合部鉛直作用荷重）

設計パラメータは実大寸法を想定し，CLT パネルはスギ Mx60 3-3，高強度ボルト径 30mm，構造階高 $H=3000\text{mm}$ ，反曲点高さ $h=2000\text{mm}$ （初層相当）を一定として，ボルト本数（ n ），壁長さ（接合部間水平距離＝応力中心間距離 j ），縁空き（ e ），端空き（ Ln ）を変更した際の結果を示す。各材料強度は過年度実施した材料試験結果の平均値を適用した。図 10 にパラメータの模式図を示す。

結果を抜粋して示す。図 11, 12 は，縁空き・端空きを 150mm（ $=5\phi$ ）確保することで集合破壊先行を防ぎ，めり込み先行型の破壊モードでの設計が可能であることを示す。図 13 はボルト本数と壁長さの影響，図 14 は 1-1 で検討した併用型接合部による剛性・耐力の向上を示す（図 12 にビスの性能を合算）。以上の検討結果を用いることで，剛性，耐力，破壊モード，変形性能等の壁の必要性能を満たす接合部パラメータを検討することが可能であることを示した。



前項で定まるCLT壁性能に基づき、建物の建築計画条件に対して、CLT耐力壁および鉄骨架構の部材断面ならびに接合部性能の概算に基づき構造計画をするためのフローを、昨年度に提案した構造計画フローを元に改良発展させ提案する。

①**基本条件**：建築計画の段階で設定される建物の階数および平面計画（CLT壁配置、鉄骨柱・梁配置）といった条件から、CLT壁の量（床面積あたりの壁長さ）、鉄骨架構の形状（柱の本数、梁のスパン長）などの構造計画のための基本条件を決める。

③短期荷重・終局に対する検討：②で定まる鉄骨架構の性能曲線（降伏点を層間変形角1%、塑性率を6と仮定する）と、CLT壁の壁厚及び接合部を仮定して設定できる性能曲線を足し合わせることで建物全体の性能曲線を作成する。この建物全体の性能曲線に基づき、短期時および終局時の構造性能を評価する。短期時については、CLT耐力壁が短期許容耐力以下であること、ならびに層間変形角0.5%時において層せん断力係数 $C_0 \geq 0.2$ を満足することを条件とする。また、終局時については、

本構造計画フローは、意匠計画段階で決定される壁配置を考慮するとともに、建物全体に要求される構造性能を満足させるため、鉄骨部材断面の調整に加えて、CLT壁性能（壁厚および接合部詳細）を設計上の調整パラメータとして柔軟に取り扱う点に特徴がある。これにより、必要性能を満たすための自由度の高い概算的な構造計画フローとなっている。



2. 構造設計法・マニュアルの開発

昨年度に開発した構造設計者が設計する際に利用できるマニュアル「CLTパネルと鉄骨架構によるハイブリッド型木造構造システム工法」（以下「構造設計マニュアル」）を、前章の知見及び本年度検討した内容をもとに再編集及び拡充を行った。

構造設計マニュアルの章立てとして、前章の知見をもとにCLTパネルを有効に活用するための構造計画を「§5.ハイブリッド工法の構造計画」に纏めて示すこととした。各部の設計「§4.CLTパネル」及び「§7.その他の設計」と建物全体の設計「§6.構造設計」を別々の章立てとして示すことで実際に設計する際に分かり易い構成に再編集した。各章の内容を拡充するとともに、設計例については5階建て事務所ビルに加え、4階建ての老人ホームを追加した。図16に構造設計マニュアルの抜粋を示す。

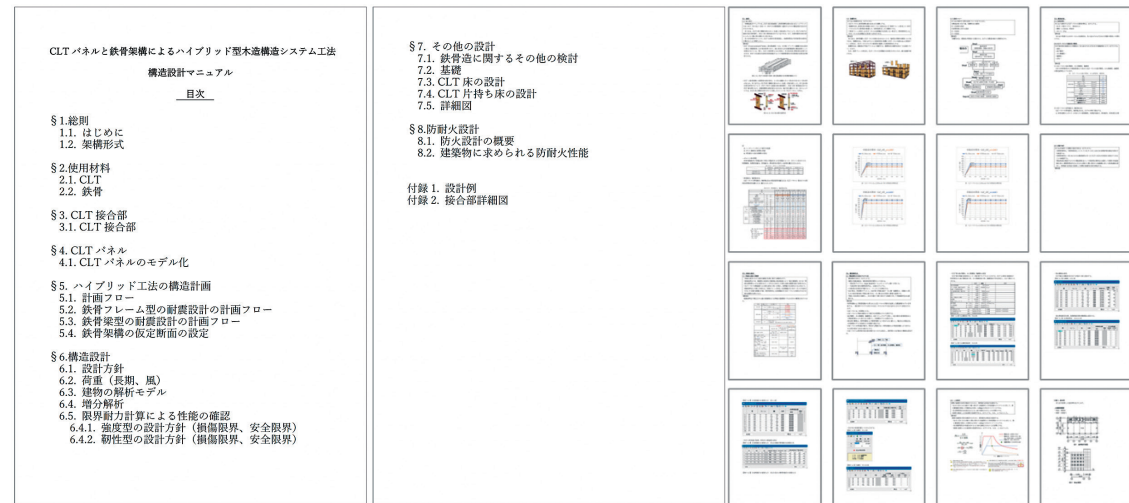


図16 構造設計マニュアル抜粋

3. 実建物への適用（試設計例）

実建物への適用に向け、構造設計マニュアルに追加掲載した4階建ての老人ホームの意匠及び構造計画、構造設計及び構造解析を行った。図17に平面図、伏図及び軸組図を示す。

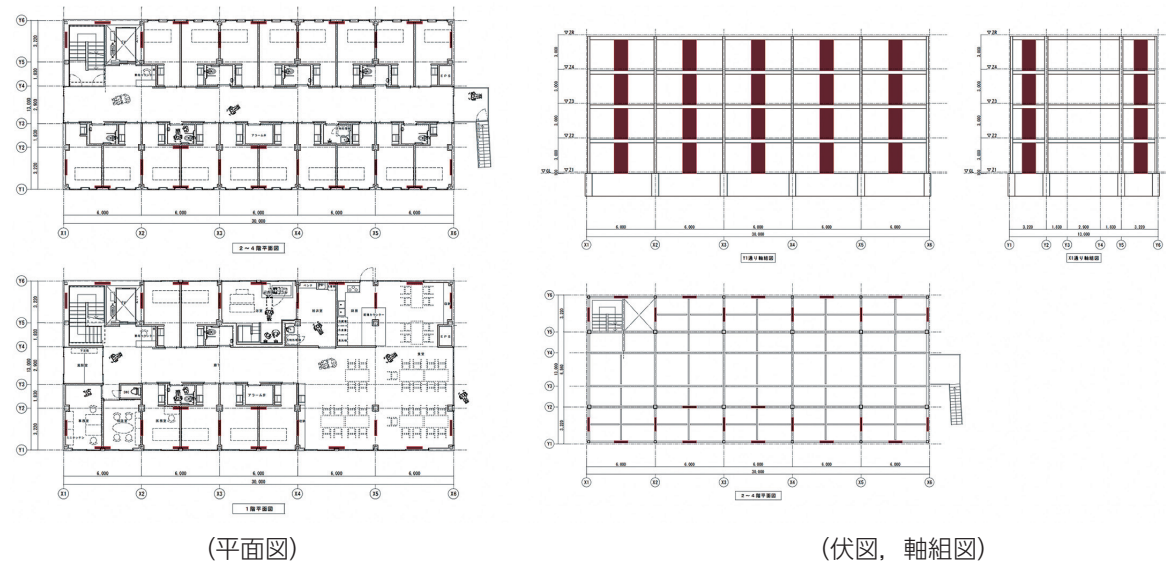


図17 平面図、伏図及び軸組図

意匠計画として、中廊下型の老人ホームとすることで全個室の採光及び眺望を確保するとともに介護職員の利便性に配慮した計画とした。構造計画として、構造設計マニュアルに記載した計画フローをもとにCLTパネルの配置及び鉄骨フレームを計画した。構造計画にもとづき配置されたCLTパネルと鉄骨フレームで構成された建築物に限界耐力計算を適用し、大地震時の応答点がクライテリアを満足することを確認した。結果を図18、19に示す。

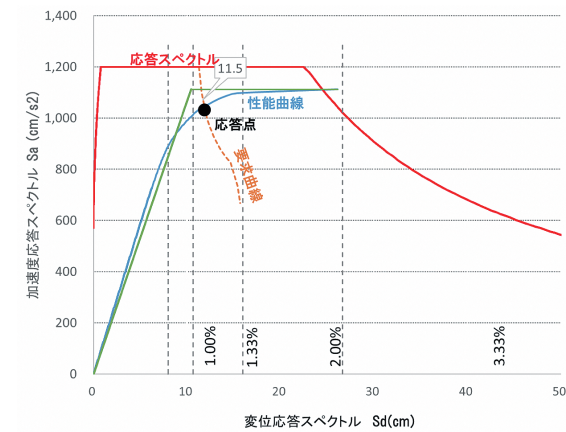


図18：限界耐力計算の結果

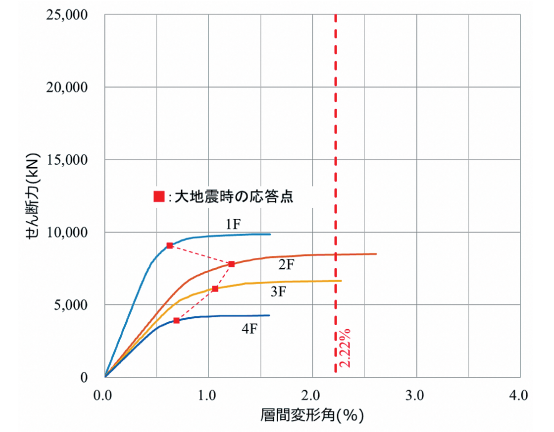


図19：大地震時の応答点

4. 普及・広報

本事業の成果を周知するためのパンフレットを作成した。また、成果報告会を企画し、令和8年2月16日に仙台にて開催した。案内先は宮城県CLT等普及推進協議会の会員（約170団体）に加えて、宮城県内外の自治体の建築関係部署、建築事業者とし、宮城県を中心とした地方建設関係者への成果の発信、情報共有を目的として実施した。

実施した結果

本プロジェクトは、中層建築の木質化普及に向けたハイブリッド構造の実施に向けた接合部の性能向上、構造システム検討フローの改良、設計マニュアルおよび試設計の整備と拡充を目的として実施した。過年度の構造システムの基礎的な検討のうえに、構造システム全体の計画法のより現実的な改良、接合部性能と壁性能の評価方法および性能向上方法の確認を行い、設計マニュアルと試設計案の拡充・増補を行った。具体的な各WGの成果は以下の通りである。

1. CLT鉄骨接合部および構造システムの構造性能評価

1-1. 改良型接合部の設計法の提案と検証

CLT-ボルト接合部の改良構法として、木ビスを併用することによるスリップの防止、耐力、剛性の向上を目指した接合部を提案、実験検証を行った。ビスとの併用による初期の性能の改善、各要素の独立した性能の重ね合わせによる性能評価可能性を示した。

1-2. 接合部設計法の提案

過年度の実験、理論検証を再整理し、接合部の骨格曲線と主要性能の決定法を提案し、接合部設計に必要なパラメータを提示した。

1-3. CLT壁の性能評価方法および設計パラメータの影響の検証

接合部性能に基づいて、各パラメータを変更した場合の壁のせん断性能に与える影響を検証し、剛性、耐力、変形性能等の要求性能に対するパラメータ変更の検討の方向性を示唆した。

1-4. 構造システム全体の構造計画

建物の建築計画条件に対して、CLT耐力壁、鉄骨架構、接合部性能を概算し構造計画をするためのフローを改良発展させた。意匠計画段階での壁配置を考慮したうえで、鉄骨部材断面、CLT壁性能を

構造設計上の調整パラメータとして柔軟に取り扱うことが可能となるより自由度の高い構造計画フローを示した。

2. 構造設計法・マニュアルの開発

昨年度に開発した構造設計マニュアルを、前章の知見及び本年度検討した内容をもとに再編集及び拡充を行った。実際の設計フロー上参照しやすい構成へと変更し、次章で検討した事例を組み込み、適用範囲の拡充を行った。

3. 実建物への適用（試設計例）

実建物への適用に向け、構造設計マニュアルに追加掲載した4階建ての老人ホームの意匠及び構造計画、構造設計及び構造解析を行い、本年度再整備した設計フロー、設計法の適用性を確認した。

4. 普及・広報：

本事業成果であるマニュアル、設計法周知のための成果報告会を企画、実施した。本提案内容を整理したパンフレット等の広報資料の作成を行った。

今後の課題・展開等

本年度までに、設計法および普及に向けたマニュアルの準備状況が整った、ハイブリッド構造システムを様々な建築に適用し、普及させてゆくためには、以下の研究課題について引き続き研究開発を続けていく必要がある。

今後の課題・展開：

① 接合部性能の検証、構造計画方法に関する課題・展開

- （1）実大試験による理論・要素実験結果の検証
- （2）材料・接合部性能のばらつきを考慮した接合部設計法の改良
- （3）接合部ディテールの施工性・施工法の検証
- （4）床の構造システム：構造システムを活用する床の構造システムの検討

② 構造設計マニュアル等に関する今後の課題・展開

- （1）構造設計マニュアルの拡充、多様な建物に対応するための設計例の充実と実作での検証
- （2）意匠及び設備計画における、CLTを現しとするためのファサード及び内装デザイン、防耐火及び内装制限等の法適合との調整、設備用貫通孔とCLT配置の調整。

以上のより発展的な検証により、本ハイブリッド構造システムの普及性を高め、実施を進めることで、都市木造建築による低炭素社会の実現に貢献することが期待できる。

参考文献

- 1) Ahmad Ghazi Aljuhmani, Naoyuki Matsumoto, Yutaka Goto, Masaki Maeda, Structural performance evaluation methods and experimental validation of high-capacity single-bolt CLT connections under cyclic loading, Engineering Structures, Volume 337, 15 August 2025
- 2) 木質構造接合部設計マニュアル, 第1版第3刷, pp80~88, 日本建築学会, 2012, 4
- 3) 松本直之, 他: CLTパネルと鉄骨を用いたハイブリッド構造システムによる中層木造建築の開発その16CLT-鉄骨梁接合部の集合破壊モードの要素実験による検証 結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2025,