

木造建築物の中高層化技術に関する 研究開発

国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ長 つちもと たかひろ
榎本 敬大

1. はじめに

「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」（公共建築物木材利用促進法）等のように、木材利用の拡大・推進は国家施策の一つとなっており、木造建築物の中高層化への関心が国内外で高まっている。木造建築物の中高層化に際して、高耐力要素や部材等の技術開発が盛んに行われ、適切な性能評価法や技術的基準等を整備する必要がある。これに必要な構造、材料等の分野における技術的資料、知見を得ることを目的とし、「木造建築物の中高層化等技術に関する研究開発」（2019～2021）を実施した。

一方、内閣府の官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）に中高層木造の課題（2018～2022）が採択され、高層木造建築物の構造設計法を検討した。本稿では、これらの成果の概要について紹介する。

2. 研究開発の項目と背景

国土の約69%が森林である我が国は世界でも有数の森林国であり、国土の森林率が世界第3位である。森林の最も重要な機能の一つ、温室効果

ガス発生抑制が注目されて久しい。一方、我が国の森林面積の多くを占める人工林のほとんどに針葉樹が植林されており、その炭素固定能力は樹齢20年程度をピークに下降することも事実である。そこで我が国の林齢分布¹⁾（図-1）において多くを占める10齢級、つまり50年生以上の造林木を積極的に有効活用し、伐採後に適切に植林して森林面積を維持するとともに炭素固定能力を将来にわたって維持・向上させる必要がある。

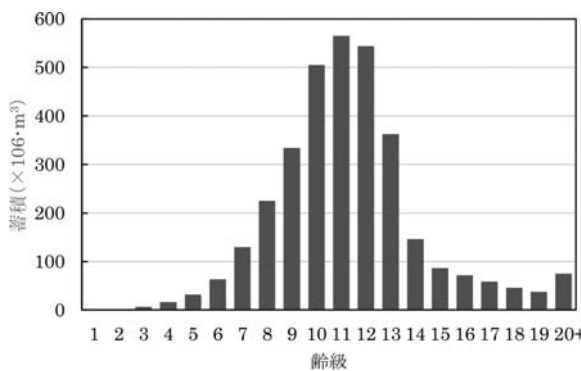


図-1 人工林の年齢別蓄積量¹⁾

また、多岐にわたる木材の利用のうち、建築・住宅の構造部材として使用する量が圧倒的に多いことは公知の事実であり、木造率のうち低層住宅については高いものの、中層以上と非住宅建築物については低い（図-2²⁾）。そこで、中高層木造建築物の木造率の向上に資する、またはその阻害要因を克服するための技術開発が必要となり、本

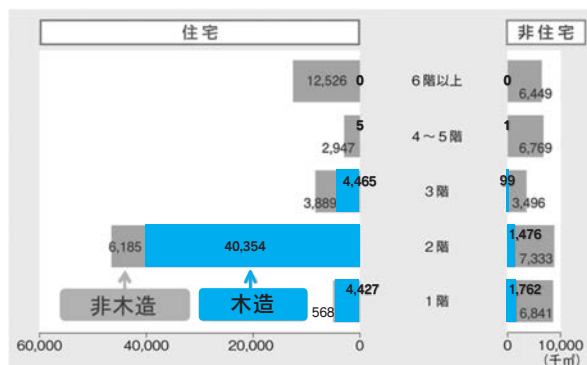


図-2 階層別・構造別の着工建築物の床面積²⁾

研究を実施した。

一方、建築物のライフサイクル全体の温室効果ガス発生を考えた場合に、建築物の建設時や部材の生産時の炭素固定量は建築物の供用時のエネルギー消費と比べてはるかに小さいものと考えられてきた。しかし、昨今の住宅における省エネルギー性能の高度化、または高度な省エネルギー性能の付与の義務化が施行される状況から、建設時・生産時の温室効果ガス発生抑制の重要性が再認識されている。

以上のような背景に対して、木造建築物の高層化にはさまざまな課題があるものの、建築研究所の予算規模および課題の実施期間3年間で可能な項目として、次に示す(1)~(5)を抽出し、検討した。

(1) 木質系異種複合部材の性能評価法

木造建築物の中高層化を実現するために、木質系異種複合部材等を対象に、構成要素の品質や性能から、部材の性能を推定する手法を実験等と解析の両面から検討し、当該部材の設計規準強度を与える、もしくは誘導する技術資料を作成する。

(2) 「集成材等建築物の構造設計マニュアル」の汎用性拡大に関する研究開発

集成材等建築物とは、木造軸組構法のうち建築基準法施行令第46条第2項を適用し、耐力壁の規定を適用除外して、柱-横架材間接合部のモーメント抵抗などを設計して耐震性を確保するものである。「集成材等建築物の構造設計マニュアル」素案（平成30年までに建築研究所が作成）につ

いては、適用範囲が限定されている仕様について技術的な知見の収集等を行い、同マニュアル改訂原案等の技術資料として取りまとめる。

(3) 集成材ブレース構造の終局耐力設計法

集成材ブレース構造の終局耐力評価法に関する技術的な知見の収集等を行い、集成材等建築物の構造設計マニュアルを追補する技術資料として取りまとめる。

(4) 中高層枠組壁工法の各種性能評価と普及

枠組壁工法とは、木材の枠組に構造用合板その他の面材を釘打ち等で留め付けて壁および床版を設ける工法のことである。同工法による6階建て実験棟が建築研究所の敷地内にあり、これを活用して各種性能評価を行い、性能設計型中高層枠組壁工法の普及に資する技術資料として取りまとめる。

(5) 低層 CLT パネル工法の各種性能評価と普及

「CLT (Cross Laminated Timber)」とは、ひき板または小角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして幅方向に並べ、または接着したものを、主としてその繊維方向を互いにほぼ直角にして積層接着し、3層以上の構造を持たせた材料のこと、「直交集成板」とも称する。2階建て CLT パネル工法実験棟が当研究所の敷地内に建築されているが、これを活用して各種性能評価を行うとともに、低層建築物に適用する仕様書の規定の一部の信頼性向上を図る検討もを行い、「低層 CLT パネル工法住宅」の普及に資する技術資料として取りまとめる。

なお、CLT は中高層木造建築用の最適な部材の一つとして国内外で扱われているが、そのコストを低減するために低層用にも普及させることを目的として技術開発を行う。

3. 研究成果の概要

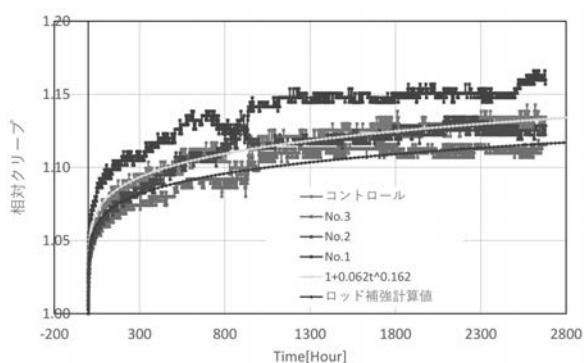
次に研究項目ごとに研究成果の概要を示す。

(1) 木質系異種複合部材の性能評価法

公募型共同研究として採択された小松マテリアル株式会社が試作する炭素繊維束挿入集成材を木質系異種複合部材の一例としてクリープ試験（写真－1）を実施し、クリープ特性を把握（図－3）した。炭素繊維素線と炭素繊維束の引張クリープ試験からその特性を把握し、複合部材のクリープ特性の推定手法を検討した。



写真－1 炭素繊維束挿入集成材のクリープ試験



図－3 炭素繊維束挿入集成材のクリープ特性

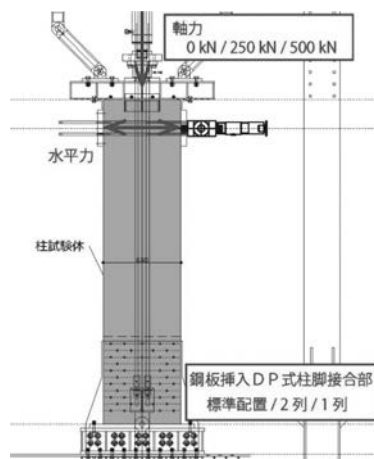
(2) 集成材等建築物の構造設計マニュアルの汎用性拡大に関する研究開発

建築基準関係法令では、供用期間中に数度経験するような稀に発生する地震に対して損傷限界を超えないこと、供用期間中に一度経験するかしないかの極めて稀に発生する地震に対して安全限界を超えないことが要求されている。前者に対する集成材等建築物の設計法は既に体系的に整備されており、以前から使用されているのに対し、後者については十分に整備されていない。比較的規模の大きな建築物については、ごく稀に発生する地

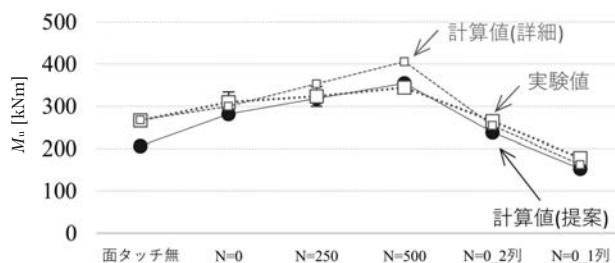
震に対する安全を精緻に確保する必要があり、本検討が喫緊の課題である。

一方、集成材等建築物においては、その構造性能のほとんどが接合部の性能に依存しているが、接合方法は多種多様である。本検討では最も汎用される鋼板挿入ドリフトピン接合と引きボルト接合を対象に終局挙動の設計法を検討した。

鋼板挿入ドリフトピン接合による柱脚接合部について、①柱脚金物に接することによる木口面の支圧抵抗を積極的に考慮した耐力評価方法、②中高層化に伴い増大する軸力の影響を考慮した耐力評価方法、を整備するため、定軸力下の実大曲げ実験（図－4）を行って実態挙動を把握し、終局耐力の推定方法を検討³⁾の上、評価方法を提案（図－5）した。



図－4 鋼板挿入ドリフトピン接合部の定軸力下回転試験



図－5 終局モーメントの実験値と計算値の比較

引きボルト式接合部についても、軸力が作用する場合の柱梁接合部のモーメント試験（図－6）を行い、その推定方法を検討⁴⁾し、実験結果と

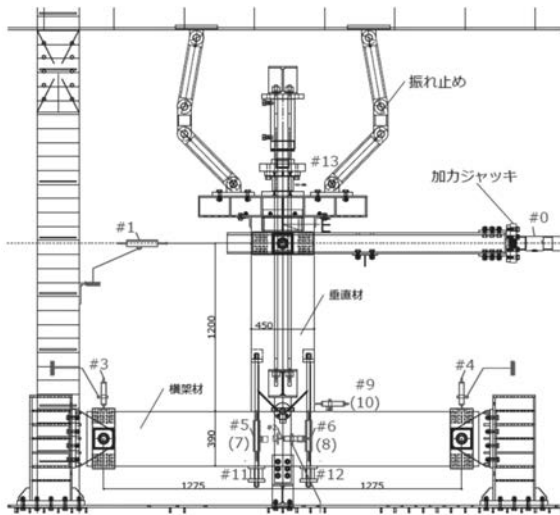


図-6 軸力が作用する引きボルト式接合部の回転試験

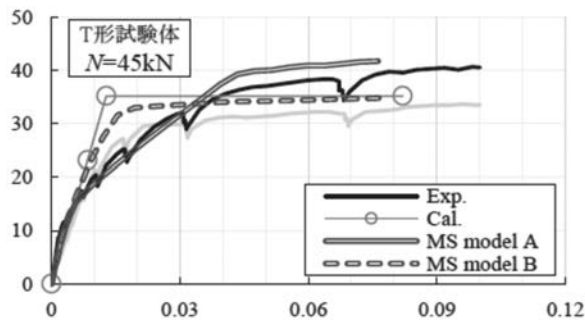


図-7 引きボルト式接合部の P-δ 関係の実験値と解析値

比較して良い結果 (図-7) を得た。

以上を取りまとめて、2024年3月29日に一般財団法人日本建築センターから、『集成材等建築物構造設計マニュアル』⁵⁾ (写真-2) を出版した。

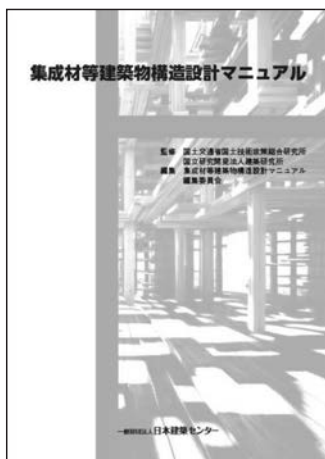


写真-2 「集成材等建築物構造設計マニュアル」⁵⁾ 表紙

(3) 集成材ブレース構造の終局耐力設計法

中高層木造建築物における要求性能を満たすように改良試設計された接合部 (図-8) を用いた集成材ブレース構造による構面の終局挙動を実験により把握した。また、接合部の荷重変形関係を用いて、解析により実挙動の追跡可能性を検証⁶⁾し、良い結果を得た。

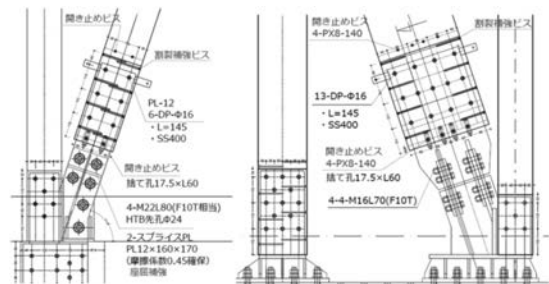


図-8 改良試設計された接合部 (左:1層, 右:2層)

(4) 中高層枠組壁工法の各種性能評価と普及

① 枠組壁工法の耐久性評価

建築後18年経過した4階建て枠組壁工法実験棟 (写真-3左) を活用して、外壁通気構造とした同工法の耐久性を評価した。ファイバースコープを使用して通気層内部を視認したところ、その視認性は高くないものの、透湿防水紙の汚れやよじれなどが確認された。しかし、これらは構造躯体の劣化に関するものではないと推定された。

これに対して、外壁通気構造ではない建築後



写真-3 4階建て枠組壁工法実験棟 (左:築18年で外壁通気構造, 右:築27年で外壁通気層なし)

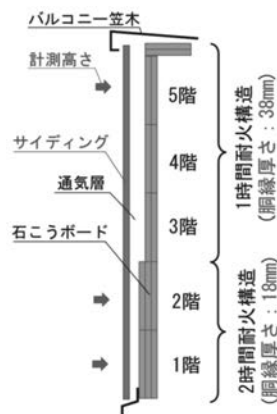
27年を経過した4階建て枠組壁工法実験棟（写真－3右）の耐久性を評価した。外装材を全て撤去して内外壁，陸屋根，構造躯体等の劣化状況や水分浸入の有無等を調査した。その結果，雨染み・カビ・苔の生え方が著しかった北東の出隅部において構造用合板，たて枠の腐朽・蟻害が確認された。外壁通気構法としない場合の耐久性には限界があることが明らかとなった。

② 6階建て枠組壁工法実験棟の通気層の仕様検討⁷⁾

当研究所の敷地内に建つ6階建て枠組壁工法実験棟（写真－4）は，2016年に完成した耐火構造であり，窯業系サイディングによる外壁通気構法を採用している。これを活用して通気層内部に流量計等センサを設置し，通気量，風速等を測定して中高層木造建築物に必要な通気層の仕様や寸法の妥当性を検証した。必要な耐火被覆の厚さが階数によって異なるため，通気層の幅は高さ方向に不連続である（図－9）。



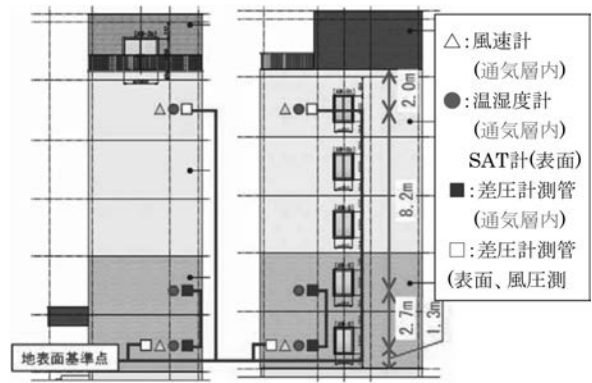
写真－4 6階建て枠組壁工法実験棟外観



図－9 各層の通気層の幅工法実験棟外観

実験棟の東面および北面を測定対象とし，図－10に示す位置に各種センサを設置した。測定項目は通気層内部の風速，温度，相対湿度とし，東面6階にはバルコニーがあるため，計測は5階分の高さで行った。

その結果，晴天時の通気層内部の温湿度および風速のうち，東面は日の出とともに日射の影響で通気層内部の温度が急激に上昇し，それに伴って



図－10 センサの配置（左：東面，右：北面）

通気層内部の風速も上昇した。北面の通気層内部の温度は外気温に近い変化を示すが，温度と風速を比較すると，北面1階の風速は東面の風速に近い挙動を示す。

これは，通気層が東面と北面でつながっているため，東面の通気層内部の空気の移動に引っ張られている可能性が考えられる。相対湿度は温度上昇とともに低下し，温度が低下すると高くなる挙動を示し，6階建て木造建築物の通気層の仕様として問題がないことを確認した。

③ 通気層への火炎侵入防止仕様の検討⁸⁾

中高層木造建築物の耐久性確保に不可欠な通気層に対して火炎の侵入を防止する必要がある，加熱膨張材（30倍発泡，1.5mm）を用いて，1時間耐火構造外壁の通気層下端の通気口における火炎侵入防止構造について実験的に検討した。その結果，加熱膨張材の発泡倍率・厚さ等を増して通気層の通気口をふさぐなどの対策により必要な性能が確保できることが判明した。

④ 床衝撃音遮断性能の向上に資する検討

6階建て枠組壁工法実験棟を活用し，さらなる遮音性能向上のための断面仕様等を検討して改良工事を行った。重量床衝撃音遮断性能，軽量床衝撃音遮断性能の測定を実施した結果，素面状態でLH-60，LL-70であるため，床仕上げ構造を施工することで，日本建築学会遮音性能基準適用等級3級を満足することが十分可能であることなどを得た。

(5) 低層 CLT パネル工法の各種性能評価と普及

CLT パネル工法実験棟を活用し、さらなる遮音性能向上のための断面仕様を検討して改良工事を行った。重量床衝撃音遮断性能、軽量床衝撃音遮断性能を実測した結果、日本建築学会遮音性能基準適用等級 3 級を満足した。

仕様規定改定案において、許容耐力を与える水平抵抗要素の分類 (図-11) を行い、国土交通省建築基準整備促進事業 S35・S42 (2020～2023 年度) と連携して各要素の性能を担保する仕様制限、許容耐力値の解析的な検討を行った。

要素	分類	なし		あり		距離
		なし	あり	なし	あり	
平面	立断面					
	許容耐力 or 有効要素					
1階建て	立断面					
	許容耐力 or 有効要素	1階: あり	1階: あり	1階: あり	1階: あり	1階: あり

図-11 仕様規定改定案の水平抵抗要素の分類

4. 高層木造建築の構造試設計

前節までの研究成果等を活用し、高層木造建築物の構造試設計を行った。一言で木造といっても、さまざまな構工法がある。例えば、柱や横架材のフレームで組んでいく軸組構法、前述の枠組壁工法、CLT などのマスティンバーパネルや木質接着パネルで空間を構成していくパネル工法などがある。

軸組構法の中でも軸組に面材を打ち付けて水平力に抵抗する構造や軸組に筋かいを設けて水平力に抵抗する構造もあれば、前述したように柱梁の接合部のモーメント抵抗によって水平力に抵抗する構造もある。高層木造建築物の構造試設計は、次の(1)～(5)について行った。

(1) マスティンバー工法：横架材を鉄骨とした

CLT パネル工法

- (2) 木質接着パネル・集成材複合構造：接着パネルと構造用集成材を複合した部材で構成する構造
 - (3) 集成材半剛節フレーム構造：軸組構法のうち、柱梁接合部の回転抵抗で水平力に抵抗するもの
 - (4) 座屈拘束ブレースによる集成材構造：筋かいによる軸組構法
 - (5) 集成材面材構造：構造用面材による軸組構法と枠組壁工法をアレンジしたもの
- ここでは、誌面の関係から前 2 者を紹介する。

(1) 横架材を鉄骨とした CLT パネル工法 (マスティンバー工法)

より効率的な構造となるよう予備解析等を行い、横架材に鉄骨、接合部にモルタル充填スリーブ管ジョイントを用いた構造 (図-12) の試設計を行った。集合住宅を目途とした平面プランとした。

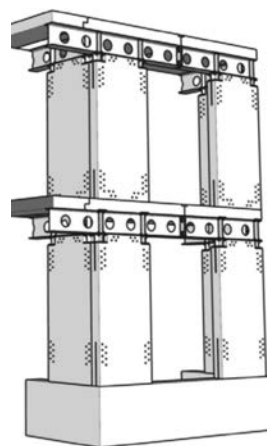


図-12 梁桁を鋼材とした架構

構造試設計の手順は構造解析モデル作成、増分解析による構造特性係数 D_s の誘導、終局耐力時の保有水平耐力の検定と全体崩壊形の確認である。試設計の結果得られた軸組図と基準階平面図をそれぞれ図-13、14 に示す。

(2) 木質接着パネル・集成材複合構造

剛性が高い木質接着パネル (木材の枠組に構造用面材を接着複合したパネル) と構造用集成材を接着複合した部材 (図-15) を鋼材の接合金物

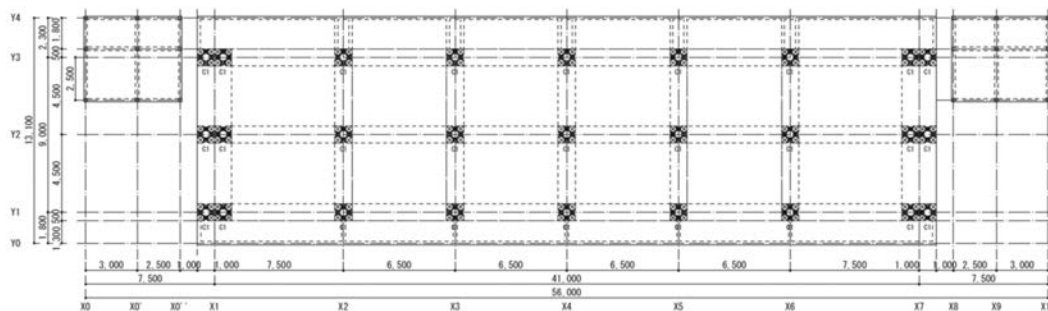


図-17 木質接着パネル・集成材複合構造の10階建て集合住宅の基準階の平面図

5. おわりに

本稿では、現代においてなぜ中高層木造建築物が必要か冒頭で説明し、当研究所で実施した「木造建築物の中高層化等技術に関する研究開発」(2019～2021)の成果の概要、および内閣府PRISMの一環として実施した高層木造建築物の構造試設計の内容を抜粋して紹介した。

中高層木造建築物の社会実装や一般化は温室効果ガス発生抑制に関する2030年の目標達成や2050年のゼロエミッション化に必要な不可欠であるといっても過言ではないだろう。これらの成果がより多くの建築プロジェクト企画者や設計者に活用され、中高層木造建築物の社会実装に少しでも寄与できるとありがたいと考えている。

【謝辞】

本稿の記述のうち「集成材等建築物構造設計マニュアル」の汎用性拡大に関する検討は国土技術政策総合研究所 建築研究部 秋山信彦主任研究官(当時)を中心に検討したものである。さらに、出版に当たっては一般財団法人日本建築センターに設置した集成材等建築物構造設計マニュアル編集委員会(委員長:坂本功 東京大学名誉教授)、及びその下の専門WG(主査:五十田博 京都大学教授)から多大なる協力を得た。枠組壁工法とCLTパネル工法に関する一連の検討は、それぞれ一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会と一般社団法人日本CLT協会との共同研究によるものである。木質接着パネル・集成材複合構造の構

造試設計は、株式会社ミサワホーム総合研究所にご尽力いただいた。この場を借りて関係者に謝意を表します。

【文献】

- 1) 林野庁:「森林資源の現況(平成29年3月31日現在)」, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/index.html>, 2017.
- 2) 林野庁:「建築分野全体の木材利用の概況」, 令和元年度 森林・林業白書 第1部第3章第2節木材利用の動向(2), https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyosyo/r1hakusyosyo_h/all/chap3_2_2.html, 2020.
- 3) 秋山信彦, 槌本敬大, 山崎義弘:「鋼板挿入ドリフトピン式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その1:柱脚接合部に関する軸力を考慮した耐力評価法の提案」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 399-400, 2021.
- 4) 秋山信彦, 岡本滋史, 槌本敬大, 山崎義弘:「引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その6:柱脚接合部に関する一定軸力を考慮した降伏耐力・終局耐力の推定法の提案」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 155-156, 2020.
- 5) 一般財団法人日本建築センター:「集成材等建築物構造設計マニュアル」, <https://www.bcj.or.jp/publication/detail/162/>, 2024.
- 6) 秋山信彦, 岡本滋史, 小林研治, 槌本敬大:「塑性変形能に期待した全ねじビス割裂補強による鋼板挿入ドリフトピン式集成材プレース接合部の力学的挙動に関する実験的研究」, 日本建築学会技術報告集, No.69, 643-648, 2022.
- 7) 三島直生, 宮村雅史, 槌本敬大, 齋藤宏昭, 松岡大介, 上坂晃一:「木造6階建て建築物の外壁通気層内部の環境計測に関する基礎的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 1229-1230, 2022.
- 8) 株式会社アルセッド建築研究所:「4. 通気層への炎侵入防止性能検証実験」, 令和3年度建築基準整備促進事業M6「中高層木造建築物の外被性能の検証」調査報告書, pp.77-122, 2022.