

都市木造の実現に向けた構造技術の開発

榎本 浩之
(設計本部)

藤原 章弘
(設計本部)

伊藤 翔
(設計本部)

藤生 直人
(木造・木質化建築プロジェクトチーム)

藤澤 康仁

丹羽 博則

Development of Structural Engineering for Realization of Metropolitan Timber Architecture

Hiroyuki Enomoto

Akihiro Fujiwara

Syo Ito

Naoto Fujiu

Yasuhito Fujisawa

Hironori Niwa

Abstract

Urban wooden construction is in the spotlight because it contributes to establishing a recycling-based society and revitalizing the local economy. Since the enactment of the Act for Promotion of Use of Wood in Public Buildings in 2010, wooden construction among low-rise public buildings has been increasing. Private sectors are also promoting urban wooden construction from the perspective of SDGs. Obayashi Corp. is working on the construction of Japan's first 11-story high-rise fully wooden and fire-resistant building "OY Project", as part of the development of wooden technology. We introduce the technology adopted for the "OY Project" and report our existing efforts to develop structural technology that contributes to the advancement in the technology of wooden structures.

概要

木造建築は、循環型社会の形成や国産林の活用、地域経済の活性化に貢献するものとして注目されている。都市部においても、耐火構造とすべき木造建築物の規模が緩和されるなど、今後は「都市木造」（都市部における中高層木造建築）の実現が期待されている。2010年の公共建築物等木材利用促進法の制定以降、低層の公共建築物における木造化が進んでおり、今後は更に民間建築物による都市木造の普及を促す法改正が行われようとしている。民間側でも、脱炭素社会の実現に向けたカーボンニュートラルの観点から都市木造を推進しつつあり、大林組では日本初となる11階建て高層純木造耐火建築物（OYプロジェクト）に取り組んでいる。本稿では、OYプロジェクトに採用した技術を紹介すると共に、併せて大林組における木造技術開発への取り組みを報告する。

1. はじめに

1.1 木造建築推進の背景

森林資源は「使う→植える→育てる→使う」という循環利用が可能な材料である。森林は光合成により大気中の二酸化炭素を吸収し、森林から伐採した木材を建築物等に利用することで、二酸化炭素は炭素として固定され続ける。さらに木材は、再利用や燃料としてのエネルギー活用が可能であることから、持続可能な低炭素社会の構築に貢献する材料である。国内では利用可能な森林資源の蓄積量が徐々に増えており、環境配慮の観点から、構造材としての積極的な活用に向けて2010年に公共建築物木材利用促進法が施行され、公共建築物を主体に中低層建物の木造化が進められている。また民間企業でも、SDGsへの対応やESG投資の拡大などを背景に、環境や社会への貢献度が企業価値向上につながるなど、今まで以上に持続可能な社会に対する意識が重要となっている。更に、利用者側のウェルネスへの関心も高まっており、木質空間の快適性・居住性向上の観点から木造の採用事例が益々増えていくものと考えられている。

1.2 都市木造の普及に向けた取り組み

大林組では、木造建築推進の機運の高まりを受け、2019年に「木造・木質化建築プロジェクトチーム」を立ち上げている。2050年のあるべき姿として「サーキュラーコンストラクション」の実現をビジョンに掲げ、研究開発・設計・施工・ビジネス展開・営業・プロモーションといった多岐に渡る課題に対応しながら、木造・木質化建築の推進を強化している。また、木造建築の推進は、地球・社会・人のサステナビリティの実現に向けて大林組が策定した長期ビジョン「Obayashi Sustainability Vision 2050」で掲げている「脱炭素」、「価値ある空間・サービスの提供」、「サステナブル・サプライチェーンの共創」の実現に向けた取り組みの一環でもある（Fig. 1参照）。大林組は、日本古来の「伝統木造」をはじめ、仕上げ材などに木質材料を利用した「木質化建築」に取り組んできたが、構造体を木造部材で構成した「純木造」、さらに鉄骨造やRC造と組み合わせた「ハイブリッド木造」の実用化に向けて、Fig. 2に示すCLT（直交集成板）やLVL（単板積層材）等のエンジニアリングウッドを活用した技術開発を行っている（Fig. 3参照）。

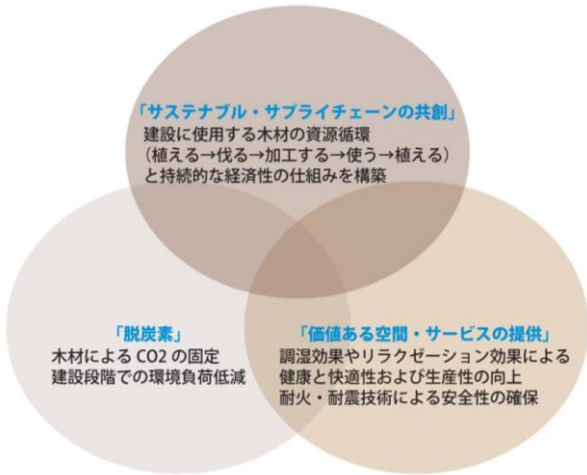


Fig. 1 木造推進の効果
Effect of Wooden Promotion



Photo 1 奈良県コンベンションセンター
NARA Prefectural Convention Center

2. 木造技術開発の沿革

大林組では都市木造の実現に向けて、2000年代に1時間耐火の木造技術「シグマウッド®」を開発したが、2010年代前半までは、耐火被覆を要する都市木造に関する需要面での動向が明瞭ではなかった。そのため、木造建築のローコスト化を推進する方針のもと、LVLや集成材をボルトやビスで綴って一体化することで大断面部材を合理的なコストで実現する「オメガウッド®」（Fig. 4参照）を開発し、耐火被覆が不要で燃えしろ設計が可能な準耐火木造として、生産施設等の大規模準耐火木造の推進に注力してきた。

2010年代後半になると、4階建て以上の耐火建築物にも木造適用が推進されはじめたことを受け、準耐火構造であった「オメガウッド」を耐火構造として用いることが可能とした「オメガウッド（耐火）」を開発した。本工法は3時間耐火までの大臣認定を有しているため、法的には階数が無制限で高層木造の実現が可能となった。

2020年以降は、適材適所に木の構造体を使用した「奈良県コンベンションセンター」（Photo 1）など、多岐に渡

	平行	直交
ひき材	集成材 厚板を平行に重ねた線材	CLT 厚板を直交に重ねた面材
単板	LVL 薄板を平行に重ねた線材	合板 薄板を直交に重ねた面材

Fig. 2 エンジニアリングウッドの分類
Classification of Engineering Wood



Fig. 3 木造・木質化建築の概念
Concept of Wooden Building

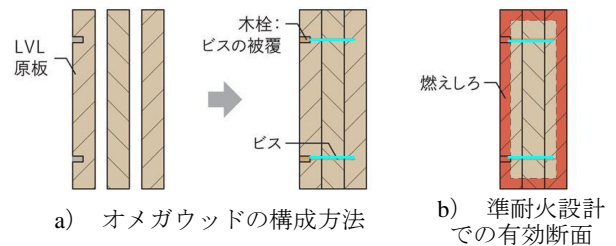


Fig. 4 オメガウッドの構成概要
Summary of “O・Mega Wood”

る木造・木質化建築を実現している。併せて、極めて高度な技術が要求される中高層純木造を実現するため、日本初の11階建て高層純木造耐火建築物である「OYプロジェクト」に取り組んでいる。さらに、SDGsの推進および国産木材の活用が推奨されている状況を踏まえて、都市部では鉄骨造あるいはRC造と適材適所に木造を組み合わせたハイブリッド構造耐火建築物が急速に発展している。大林組においても、コストや施工性に配慮したハイブリッド構造を含めた耐火木造の普及を目指し、耐火性や耐震性などの木造建築が有する課題の解決に向け、技術開発を進めている。

また、木造建築は、地震時に許容される層間変形が他構造と比べて大きいため、変位依存型の履歴系ダンパーを適用すると高効率で地震エネルギーを吸収することが可能となる。この着眼に基づき、伝統木造建物へ適用可能な制震技術も既に開発している。

以上に述べた各技術のうち代表的な技術の事例を次節以降で紹介する。

2.1 オメガウッド®

生産施設系の低層大規模木造では、大スパン架構が要求される場合が多く、断面幅（厚さ）および断面せい（高さ）の大きな木材が必要となる。大断面材を製作するためには、ローコストで調達可能な薄厚（一次接着）のLVL原板や集成材を、更に複数接着（二次接着）して木材を一体化させる必要があり、専用の機械と技術を有する限られた工場で作製するため割高となる課題があった。

「オメガウッド」は、上記の課題を解決するため、Fig. 4に示すように、LVLや集成材をボルトやビスで綴ることによって一体化し、大断面を合理的なコストで実現する技術である。LVLを一次接着製品のまま用いることにより、従来の二次接着材に比べて材料コストを安く、且つ、材料納期を短縮することができる。複雑な仕口も一次接着製品の表面のみでの加工とすることで、効率良く高い精度での製作が可能となり、接合鋼板も合せ面に挟み込むことで室内側に見せずに木架構の美しさを表現できる。

大スパン架構への「オメガウッド」適用例をFig. 5に示す。倉庫建築への適用事例であり、31m×48mの無柱空間を実現するため、ロングスパン化が必須条件であった。本事例では、鉄骨造に近い施工コストが求められる一方で、31mスパンの無柱空間を実現するため、高剛性・高耐力のLVLを構造材に採用すると共に、Fig. 5に示すように方杖やタイバーを配置して大梁の鉛直たわみ抑制を図っている。耐震要素としては、外周壁面に構造用厚物合板による高耐力壁を配置し、窓開口を確保しつつ耐震性を担保している。

また、建築基準法では防火地域内で100m²以上の建物を建てる場合に耐火性能が要求される。そのため、都市部で中大規模の木造建物を建設するためには、耐火構造技術が必要となるが、中大規模建築に求められる大断面架構等では部材製作の複雑さからコストが割高となる課題があった。その対策として(株)シェルターとの連携により、準耐火構造用に開発した前述の「オメガウッド」に、燃え止まり層（耐火層）として石膏ボード、燃えしる層として表面に木材を設けることで、3時間耐火までローコストに実現可能な「オメガウッド（耐火）」(Fig. 6)を開発している。

2.2 ハイブリッド構造技術

中高層建物を純木造で計画する場合には、鉄骨造やRC造と比べて柱梁接合部の剛接合が難しいことに留意する必要がある。また、鉄骨に比べて木材の耐熱温度が低く、表面温度を200℃程度に抑える被覆仕様が必要となるため、特に建設コスト面の影響が大きくなる傾向にある。さらに、床スラブや間仕切壁に木材を使用する場合は、遮音性能や居住性への配慮が必要となる。そのため、木造建築の更なる普及のためには、木材のメリットである軽量化を活かしつつ、鉄骨やRCと組み合わせ、適材適所に建材を活用したハイブリッド構造とすることが、構造性能とコストを合理的に両立させるための有効な方策と

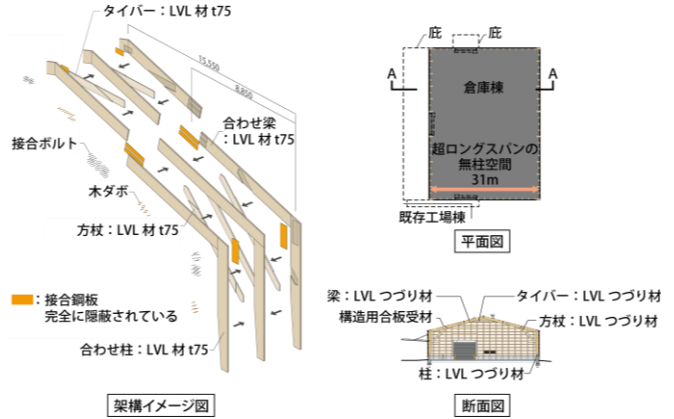


Fig. 5 構造概要
Structural Overview

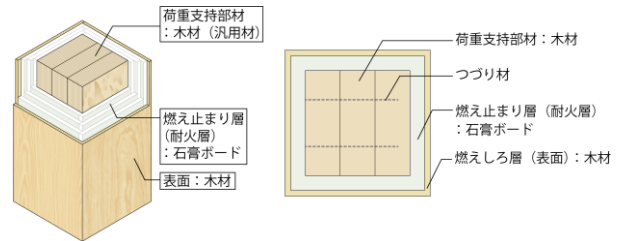


Fig. 6 オメガウッド（耐火）概念図
Concept of "O·mega Wood (Fire Resistant)"

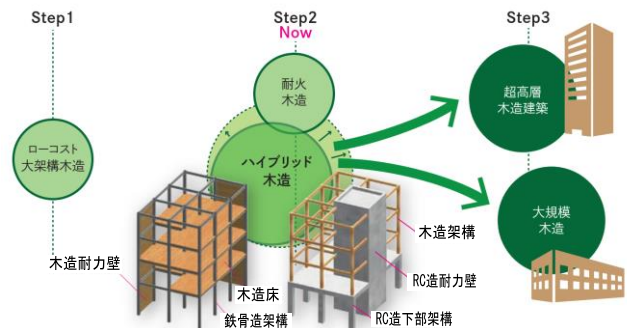


Fig. 7 木造推進のステップ
Promotion Roadmap of Wooden Structure



Fig. 8 試設計のパース
Perspective of Design Trial

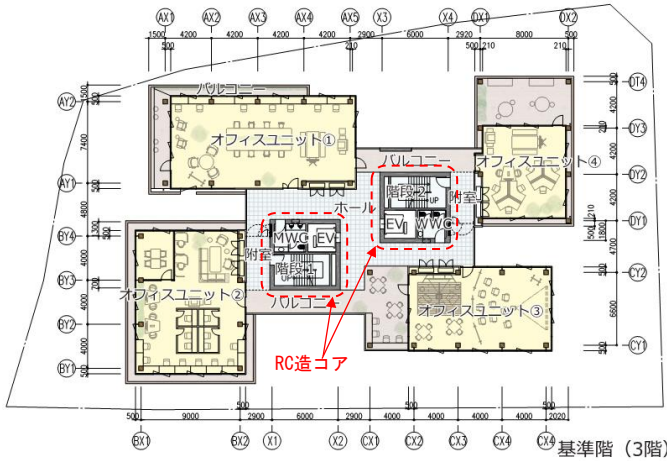


Fig. 9 試設計の基準階平面図
Typical Floor Plan of Design Trial

なる (Fig. 7参照)。

ハイブリッド構造の適用例として、中規模オフィスの試設計事例を紹介する。計画地は、建築基準法22条区域(防火地域・準防火地域以外の市街地)とし、Fig. 8およびFig. 9に示す4階建ての建築物を想定し、75分準耐火構造として検討を行っている。中央の階段やEVが配置されるコアをRC造とし、木造(75分準耐火構造)のオフィスユニットが付随する構成の木造+RC造の混構造を採用している。RCコアに地震力を負担させることで、オフィスユニットの木造柱(「オメガウッド」を採用)は鉛直荷重のみを負担し、柱サイズの軽減(小型化)を図り、圧迫感の少ない外観とすることが可能となっている。床はコンクリートとCLTの複合構造として、火災時はコンクリートのみで荷重を支持する構造としている。

次に、ハイブリッド要素技術の開発事例を紹介する。木材の比重は、鋼材の約1/15、コンクリートの約1/5と軽いため、重量に対する比強度は高い一方、剛性は低いため、大スパン架構を実現するには木造梁を大断面とする必要がある。この課題を解決して梁断面を小型化するため、Fig. 10に示すハイブリッド梁を開発した。曲げ剛性は、剛性の高いH形鋼で確保すると共に、横補剛効果を有する仕上げ材として、H形鋼ウェブ両側に長方形断面の木材を配置している。鋼材は木材で覆われていることから、木造としての意匠性が担保されており、また「オメガウッド」で培った技術を活かし、ウェブ両側の木材同士をビスで緊結することで、横補剛効果を発揮可能な納まりとしている。このハイブリッド梁は、H形鋼単体の場合と比較して、曲げ剛性は同程度であるが、木材による横補剛効果によって耐力は1.5倍となることを実大試験で確認している。

2.3 木造制震技術(伝統木造)

木造制震技術に関しては、先ず伝統木造建物への適用に向けて開発を進めている。伝統木造建築は、新築よりも改修事例が多く、室内の使い勝手を変化させないこと

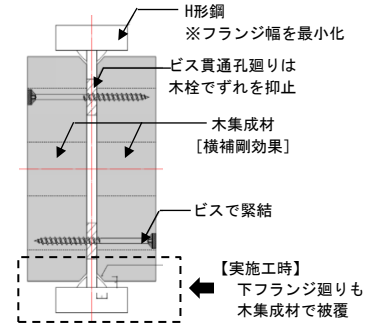


Fig. 10 ハイブリッド梁の断面図
Section of Hybrid Beam

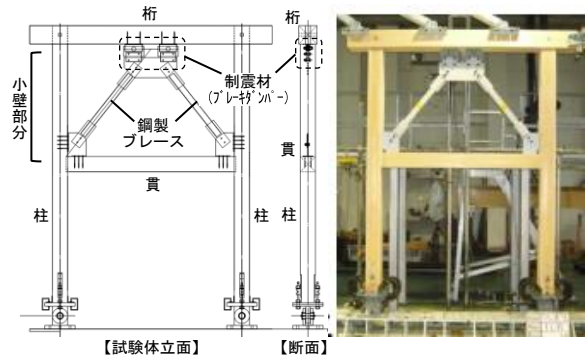
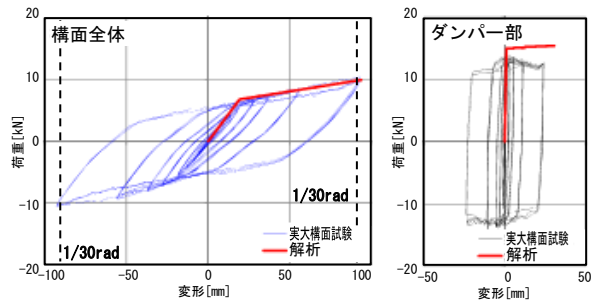


Fig. 11 ブレーキダンパーを用いた制震小壁の概要
Overview of Hanging Wall with "Brake Damper"



左：架構全体 右：ダンパー部【1/30変形時】

Fig. 12 荷重-変形曲線
Load-Displacement Relationship

が重要であることから、耐震補強箇所が限定される。全面壁のように外観に与える影響の大きい補強は難しいことから、建築計画として動線に支障が生じない鴨居上部の小壁の耐震要素化が有効である。これまで小壁部分には合板や板壁等を用いて補強を行ってきたが、中地震では層間変形抑制に有効である一方、小壁のみで剛性・耐力向上を図った場合、柱頭固定度が上がることで大地震時に柱の損傷が生じる可能性が高くなる。そこで効率的に地震エネルギーを吸収する機構を小壁部分に導入して、本体架構を損傷させることなく耐震性向上を図るため、大林組開発の制振部材「ブレーキダンパー®」¹⁾を用いた制震技術を開発している(Fig. 11)。

「ブレーキダンパー」は、耐震要素と主架構の接合部

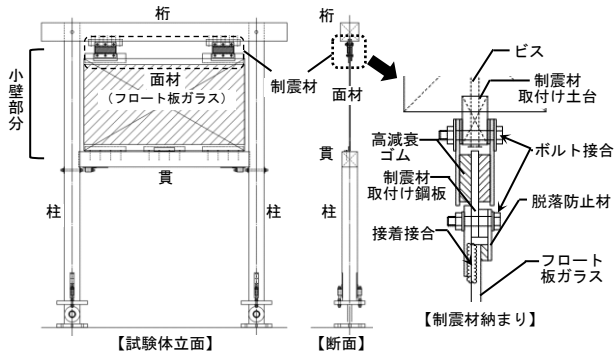
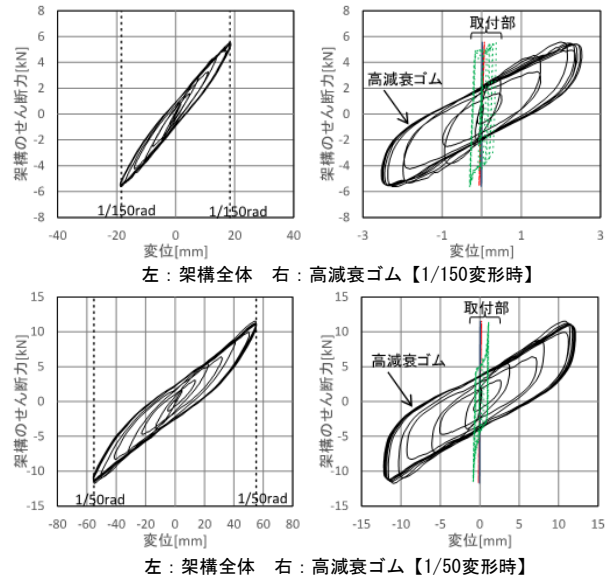


Fig. 13 高減衰ゴムを用いた制震小壁の概要
Overview of Hanging Wall with High Damping Rubber

に挟み込んだステンレス板と摩擦板の間に生じる滑り摩擦により建物の振動エネルギーを吸収する制振システムである。「ブレーキダンパー」の滑り荷重を適切に設定することで、Fig. 12に示すように荷重—変形関係のループも平行四辺形状に大きくなり、1/30radの大変形に至るまで本体架構には損傷が生じず、制震効果を発揮する。

また、小壁部分に採用する制震技術として、意匠性に配慮した「ガラス耐力壁」も開発している(Fig. 13)。透過性に優れ、面内剛性の高い板ガラスに、高減衰ゴムを制震材として組み合わせることで、小変形時には層間変形を抑制し、大変形時は高減衰ゴムが制震効果を発揮する。

実大動的載荷試験ではFig. 14に示すように、層間変形角 1/150 rad (小地震時相当) では架構全体として弾性的な挙動を示し、高減衰ゴムも高い剛性を保持している。大地震時を想定した層間変形角 1/50 radでは高減衰ゴムの剛性が低下し、小壁部分では60%以上の変形量が高減衰ゴムに集中する。なお、上記の制震システムは大地震でも損傷しないため、取替えの必要がなく、メンテナンスも要しないという特長も有している。



左：架構全体 右：高減衰ゴム【1/150変形時】

Fig. 14 荷重—変形曲線
Load-Displacement Relationship



Fig. 15 外観パース
Perspective Image

Table 1 建築概要
Outline of Project

計画地	神奈川県横浜市中区弁天通り二丁目
敷地面積	約560㎡
延べ面積	約3,600㎡
最高高さ	44.1m
階数	地下1階/地上11階建て
構造種別	地下：RC造、地上：木造
構造計画	免震構造（地下1階柱頭免震）
用途	研修室/宿泊室
工期	着工2020年3月 竣工2022年3月 工期24か月

3. OYプロジェクト（高層純木造耐火建築物）

本章では、2022年3月の竣工を目指して現在施工中であり、国内最高高さとなる高層純木造耐火建築物である「OYプロジェクト」の概要について紹介する。

3.1 建物概要

OYプロジェクトは、大林組の社内研修施設として2019年3月に着工した11階建ての純木造建築である。Fig. 15に外観パース、Table 1に建物概要を示す。この研修施設では、これからの社会の変化に対応できる人材教育を目指しており、IoTやAIも活用し、LEEDやWELL認証などの環境・健康評価やZEB（エネルギー評価）でも高い指標の取得を目指している。

3.2 構造概要と適用技術

高層純木造建物を実現するために必要となる技術として、①柱梁接合部の高剛性・高耐力化技術、②ローコストで耐熱性の高いモルタル接合法、③耐火技術、④床

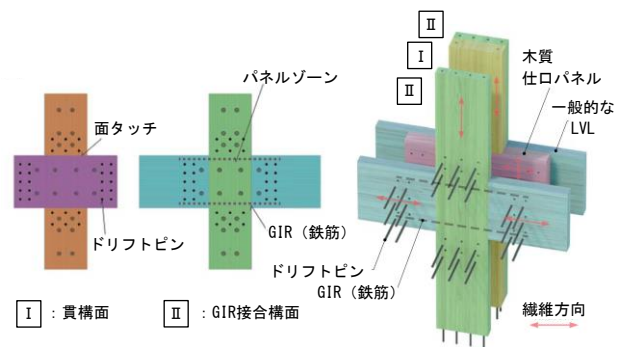


Fig. 16 剛接合仕口ユニットの概要
Outline of Beam-Column Joint Unit

の遮音性能向上技術、⑤熱橋を回避する内外装材取付ディテールを開発し、適用している。本節では上記の各技術について概説するが、①～④の詳細については4章にて後述する。

① 金物を用いない「剛接合仕口ユニット」

Fig. 16に剛接合仕口ユニットの概要図を示す。既存の



Photo 2 実大施工試験状況
Situation of Full-Scale Construction Test

接合技術の中で、仕口部の高剛性化・高耐力化および高靱性化を可能にする単独の接合技術は存在しないため、オメガウッドの技術（綴り合せて大断面を構成する）を応用して、GIR(Glued in Rod)接合構面と貫構面を積層して構成する剛接合仕口ユニットを開発した。GIR接合の詳細については4.2節にて後述する。

GIR接合は、初期剛性の低下が少なく、仕口部耐力の計算が容易である一方、接合金物（鉄筋）の降伏後、木部材の割裂を伴う抜け出しによる脆性的な破壊性状であるため、接合部に靱性能を求められる建物への適用は制限されていた。そこで、塑性化後も一定の荷重保持能力を有する貫構造と組み合わせ、大変形時の荷重保持能力を確保することに成功した。また最適な貫部材として、挽板の繊維方向を50%直交させた「木質仕口パネル」を新規開発して適用した。ただし、復元力特性としては、木造特有のスリップ型となるため、本計画では免震構造を採用し、極稀地震まで架構が弾性を保持する設計としている。

また、剛接合仕口ユニットは工場製作とすることで、安定した構造性能の確保、かつプレファブリケーションによる現場施工性の向上を図っている。現場施工に先立ち、Photo 2に示すように実大施工試験を行い、本工法のプレファブリケーションの有効性を確認している。

② ローコストで耐熱性の高いモルタル接合法

OYプロジェクトでは、耐火性能が求められるGIR接合部には、耐熱仕様のエポキシ樹脂を採用し、火災時の安全性を高めているが、コスト面や作業性に課題があった。そこで、接着剤よりローコストで、かつ耐熱性が期待できるモルタルに着目し、モルタル充填接合を開発した。9階から上階の柱継手部でモルタル充填接合を適用している。

③ 耐火技術「オメガウッド（耐火）」

3時間耐火までラインナップされた「オメガウッド（耐火）」を実建物に初適用した。法的には2時間耐火が要求される階数であるが、立地条件や柱の露出度を考慮の上、

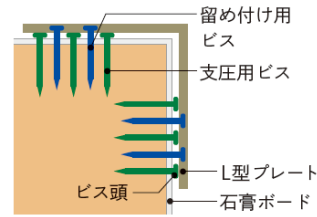


Fig. 17 仕上げ材の取付ディテール概要図
Outline of Connecting Detail of Finishing Material

1階柱の一部には3時間耐火仕様を国内で初めて適用した。

また、耐火構造の大臣認定が部材単位であることを考慮し、各部材間の取合い部、すなわち柱と梁、梁と床、梁と壁、などの取合い部についても耐火実験を実施し、安全性を検証した上で施工仕様を確定している。特に、柱梁接合部については、地震時における架構の変形にも追従可能なディテールとし、耐火実験で検証している。

④ 床の遮音性能向上技術「板ばね遮音システム」

木質系の床は軽量化が可能である反面、特に重量衝撃源に対する遮音性能の確保が困難である。そこで、押さえコンクリートなどで重量を増やすことなく遮音性能を向上させるために「板ばね遮音システム」を開発した。

⑤ 熱橋を回避する仕上げ材の取付ディテール

耐火被覆で覆われた木造部材へ不用意に仕上げ材を留め付けると、耐火被覆材を貫通する留付け材の熱伝導によって、内部の木造部材に熱影響が及ぶ懸念があり、（一社）日本木造耐火建築協会では、耐火時間毎に貫通部材（木ビス）のサイズを規定している²⁾。そこで、内外装材を留め付けるために必要な強度を鉛直・水平方向に分解し、それぞれに対して圧縮専用ビスと引張専用ビスを必要量打設するディテールを開発した。ビス埋め込み長さの微調整による強度変化についても、施工時の長さを考慮した強度試験を行って確認している。Fig. 17に仕上げ材の取付ディテールの概要図を示す。

4. OYプロジェクトに適用した技術

4.1 金物を使わない剛接合仕口ユニット

4.1.1 開発の概要 木質構造接合部に特有の初期すべりやガタの影響を抑えた接合構造として、新規開発した「木質仕口パネル」を用いた貫とGIRを併用した柱梁剛接合構造を開発し、実大の十字架構による二軸載荷試験により高剛性・高耐力・高靱性能を併せ持つことを確認した。実大試験は、標準仕様の十字架構および梁せいの小さい十字架構、さらに最上階を想定したT字架構について実施し、それぞれの構造性能を確認した。また、標準仕様の十字架構は同仕様で3体実施することで、性能のばらつきを評価している。

4.1.2 木質仕口パネル 木質仕口パネルはE100～E120のカラマツの単板を合板のように交互に積層した新材料であり、厚さ200×幅900×長さ2000mmの部材を

LVL製造ラインで加熱接着して一体成型したものである。製法は合板とほぼ同様であるが、必要強度の方向や試験方法が既往の規格（合板やLVL）に合致しないため、時刻歴応答解析評価に先立って、（一財）日本建築センターにて材料評定を取得した。材料性能の一例として、ドリフトピンのめり込み強度・剛性に関する性能確認実験の結果をFig. 18に示す。めり込み強度は、同強度の挽板で製作したLVLの繊維直交方向強度より大きく繊維方向強度とほぼ同等で、めり込み剛性は繊維方向と繊維直交方向の中間であった。繊維方向加力時は、繊維に沿った割れが発生するが、木質仕口パネルは割れに対する抵抗力が高いことを確認している。

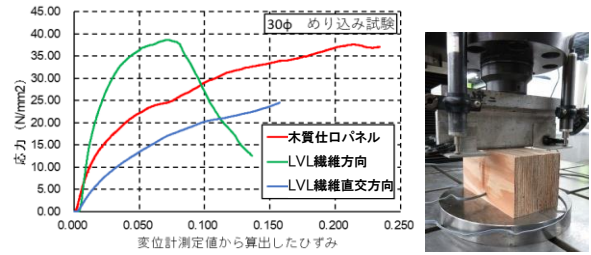


Fig. 18 木質仕口パネル材料試験結果
Results of Material Test for Mass Plywood Panel

4.1.3 実験の概要と解析 所定の鉛直荷重を載荷後、変位制御による水平交番載荷（1/450 rad から 1/30 rad まで各 3 サイクル）を行い、最終的に 1/10 rad まで加力して終局状態を確認した。十字型タイプはいずれも GIR 鉄筋が降伏した後、木部の割れやめり込みを伴って変形が進行した。T 字型タイプは GIR 鉄筋の降伏より先に柱小口や梁の木部で破壊が見られた。機械的性質が定められている鉄筋の降伏を先行させることで、曲げ降伏耐力のばらつきを抑制することが可能である。いずれの試験体も鉄筋降伏後、木部の破壊にともない耐力が一旦 10～20%程度低下するが架構の変形に伴い回復し、1/15 rad 程度の大変形まで耐力が維持可能であることが確認された。

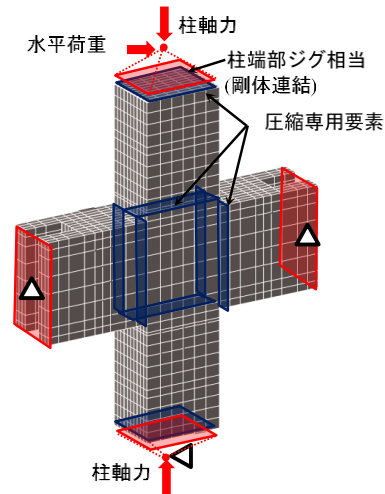


Fig. 19 FEM解析モデル
Overview of FEM Model

架構の水平剛性および回転剛性について、実験と解析を比較した結果を Table 2 に示す。Fig. 19 に FEM の概要を、Fig. 20 に線材モデルの概要を示す。実験値は標準仕様 3 体の平均である。線材モデルの回転ばね剛性は実験値を採用した。解析値は、実験値に対して 0.98～1.06 程度と、いずれも良好な対応を示している。

Table 2 実験結果と解析結果の比較
Comparison between Test Results and Analysis

評価方法	柱せん断力		水平剛性: Q_d/γ		評価方法	回転剛性 K_R	
	Q_d [kN]		K [kN/rad]	(/実験)		[kNm/rad]	
実験	155		35500	(1.00)	実験	107000	
線材モデル			34700	(0.98)	FEM	113000	
FEM			35600	(1.00)	(FEM/実験)	(1.06)	

4.1.4 架構設計法 柱・梁に関しては、線材置換フレームモデルの応力解析で評価した断面応力を、有効断面の断面積や断面係数で除すことで、部材応力度を評価した。各部の応力度が、LVL の材料規格に定められる許容応力度以下となることを確認し、柱梁接合部については梁端回転ばねの曲げモーメント M_D が、外力レベルに応じて設定した耐力 M_A 以下となることを確認した。なお、 M_A は実験や FEM 解析に基づき、耐力のばらつきを考慮して設定している³⁾。FEM 解析により GIR 鉄筋の応力を精度よく評価できることを確認したことから、鉄筋降伏先行の条件下においては、梁せいやスパンが異なる複数の仕口パターンに対しても、限られた数の実験結果を FEM 解析で補間することが可能となった。

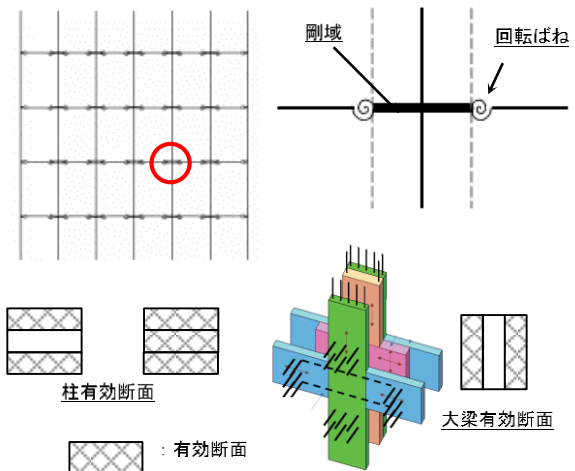


Fig. 20 線材モデルの概要
Overview of Analytical Model

4.2 モルタル充填接合

4.2.1 モルタル充填接合の概要 モルタル充填接合の概要図を Fig. 21 に示す。モルタル充填接合とは、木部材同士を接合するために木部材に設けた先穴に異形鉄筋を挿入し、そこにモルタルを充填させた接合方法である。また、充填モルタル部分を貫通する丸鋼を鉄筋方向の直交方向に設け、木部材とモルタルとの接着部分に嵌合さ

せることで、鉄筋の引張耐力の向上を図っている。木部材同士を接合する既往の技術として、GIR 接合がある。GIR 接合は、接合金物と木材とを接着剤の接着力で接合し、鉄筋応力を木部材に伝達させる機構に対して、モルタル充填接合は、木材とモルタルとの接着力に期待できないため、鉄筋応力を付着によりモルタルに伝達させ、次にモルタルから支圧により丸鋼へ伝達、そして丸鋼から木部材に伝達させる機構である。この機構から、モルタル充填接合における鉄筋の引張耐力を、EYT 式により算出される丸鋼のすべり耐力を用いて評価することを目指している。なお、EYT 式（ヨーロッパ型降伏理論式）とは、各接合形式の各降伏モードにおける接合具 1 本あたりの降伏耐力算定式である。

4.2.2 試験概要・考察 モルタル充填接合の性能を検証するために実施した引張試験の試験結果を紹介する。試験は、（公財）日本住宅・木材技術センターおよび大林組技術研究所で実施した。モルタル充填接合は、鉄筋に作用した引張軸力に対して、丸鋼の木部材へのめり込みにより抵抗する機構であることを確認した。最終的な破壊性状は、木部材の鉄筋方向に沿った脆性的な割裂破壊であった（Photo 3）。引張耐力については、丸鋼の対（ついで）数を増やしても対（ついで）数に比例せず、Fig. 22 に示すような関係性を確認した。Fig. 22 は、横軸に丸鋼対（ついで）数、縦軸に EYT 式により算出した 1 対（ついで）あたりのすべり耐力に対する平均引張耐力（引張試験耐力を丸鋼対（ついで）数で除した 1 対（ついで）あたりの負担引張耐力）の比率を示したグラフであり、鉄筋径 D25、丸鋼径 $\phi 13$ とした場合の試験結果をプロットしている。赤プロットが丸鋼ピッチ 7 ϕ 以上、青プロットが 3.8 ϕ とした場合である。

丸鋼 1 対（ついで）の場合、引張耐力はすべり耐力の 2 倍程度を確認した。丸鋼がすべり耐力に達した後、曲げ変形し木部材へ引掛かることで生じたロープ効果⁴⁾により耐力上昇したものと考えられる。2 対（ついで）以上の丸鋼を設けた場合、丸鋼全体が平均的に引張軸力を負担するのではなく、1 対（ついで）目の丸鋼が抵抗し、2 対（ついで）目以降の丸鋼が段階的に引張耐力へ抵抗しているものと考えられ、その耐力は EYT 式耐力を低減して評価する必要がある。

4.2.3 設計への活用 OY プロジェクトへの適用については、実際の設計ディテールで試験を行い、構造性能を確認することで採用に至った。今後、一般建物への適用に向けた耐力評価については、ロープ効果の評価および対（ついで）数による耐力低減係数の評価に、更なる検証が必要であると考えられる。

4.3 オメガウッド（耐火）柱梁接合部の耐火仕様

4.3.1 柱梁接合部の開発概要 オメガウッド(耐火)では、柱・梁部材の外表面を石膏ボードおよび燃えしる層を兼ねた表面木材で、隙間なく連続的に覆う必要がある。他方、石膏ボードは、柱梁接合部に生じる架構変形

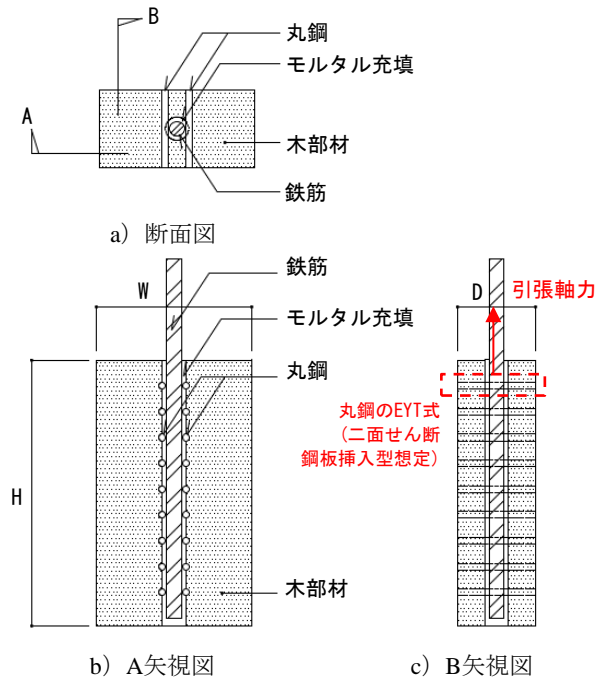


Fig. 21 モルタル充填接合概要図
Outline of Mortar Filling Joint

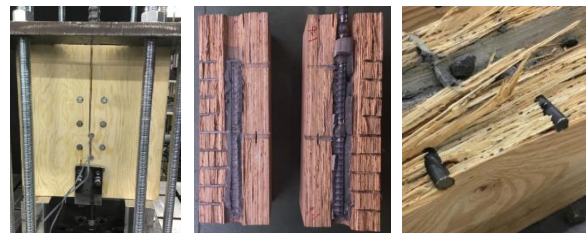


Photo 3 破壊状況
Destruction Situation

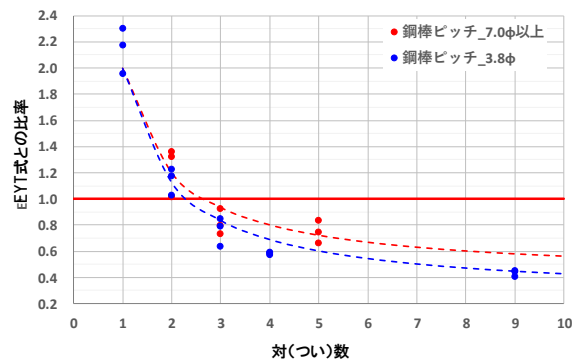


Fig. 22 1対（ついで）あたりのEYT式耐力との比率
Ratio against EYT's Strength per Pair

への追従性が無いため、地震時に損傷や隙間が生じるおそれがあり、また木造架構の強度特性・構造耐力にも影響を及ぼす懸念がある。

これらの課題を解決するため、柱梁接合部の石膏ボード突き付け部に一定間隔の目地（スリット）を設けるとともに、目地位置を石膏ボードの各層ごとに階段状にず

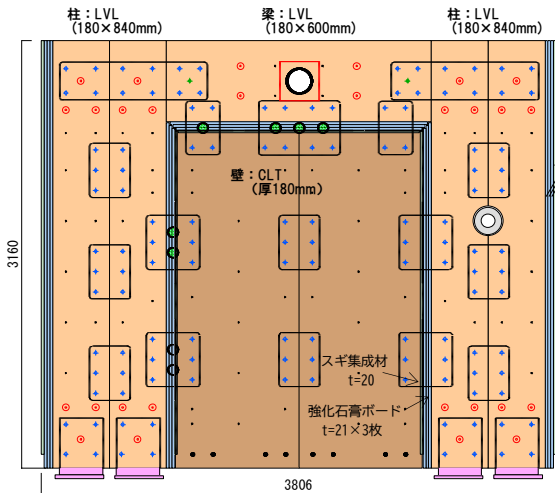


Fig. 23 耐火試験体の立・断面図
Fire Test Specimen

らすことで、構造性能と耐火性能の両立を可能とする工法を開発した。

4.3.2 耐火検証実験の概要 上述の柱梁接合部の耐火性能を検証することを目的として、Fig. 23に示す門型フレーム試験体（LVL柱・梁+CLT耐力壁）を用いて2時間加熱実験を実施した。柱梁接合部の納まりはFig. 24に示す仕様としており、加熱実験に先立ち地震時を想定した水平加力実験（最大変形角1/75 rad）を実施し、耐火材が構造性能に悪影響を及ぼすことなく、かつ木造部材を覆う耐火材にも損傷が生じないことを確認している。

加熱実験後の試験体状況をPhoto 4に示すが、耐火層の石膏ボードを全て撤去して柱梁接合部の状況を確認した結果、石膏ボードの目地部においては、構造体である木材に炭化等は全く生じておらず、所定の耐火性能を保持可能であることが確認された。

4.4 板ばね遮音システム

4.4.1 概要 CLT床はコンクリートスラブに比べ軽量なため、特に重量床衝撃音遮断性能の確保が課題となる。重量床衝撃音遮断性能を高めるには、コンクリートを併用する等、重量を大きくする対策が通常用いられるが、工期や建物重量への影響が大きくなる。また、下室側の天井での対策も有効ではあるが、木造建物では床衝撃時に壁からの放射音の影響が大きくなる傾向があることや、階高や意匠の自由度の制約も生じる。このため、軽量且つ床上のみで重量床衝撃音を低減することを目的として、CLT床上に木製の板ばねと乾式二重床を併用した床仕上げ構造を新たに開発した。

板ばねは根太床を2段重ねた構造で、下側根太間の中央部に上側根太を配置することで、床上を加振した際に下側根太床合板が変形し、板ばねとして作用してCLT床へ伝わる振動を低減する工法である(Fig. 25)。板ばねの固有振動数は重量床衝撃音の主要な周波数である63Hz帯域に対して振動低減効果があり、且つ歩行振動性能を確保

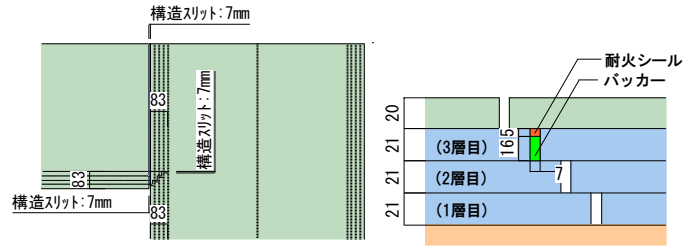


Fig. 24 柱梁接合部の納まり概要
Detail of Beam-Column Joint



Photo 4 加熱実験後の状況
Surface of Beam-Column Joint after Fire Test

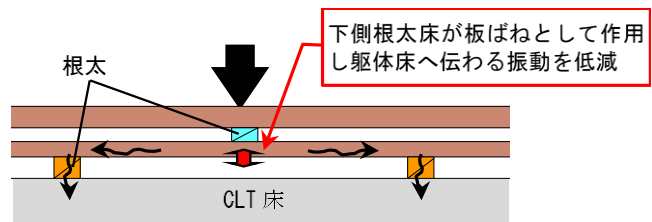


Fig. 25 板ばね遮音システムの概要
Wooden-Plate Spring Isolation System Floor

Table 10 試験体仕様
Details of Specimens

試験体	下側根太床(根太ピッチ606mm)	上側根太床(根太ピッチ606mm)
板ばね仕様1	根太高さ24mm+構造用合板t15+ アスファルトマットt4+構造用合板t15	根太高さ24mm+ 構造用合板t36+普通合板t12
板ばね仕様2	根太高さ36mm(グラスウール32k25mm)+ 構造用合板t15+アスファルトマットt8+ 構造用合板t15	根太高さ24mm+ 構造用合板t36+普通合板t12*2
板ばね仕様3	根太高さ36mm(グラスウール32k25mm)+ 構造用合板t18+普通合板t9	根太高さ24mm+ 構造用合板t36+普通合板t12
躯体CLT床 (各試験体共通)	厚さ150・スギS60A-5-5、1時間耐火仕様（上面強化石膏ボードt21*2、下面強化石膏ボードt25+21）、長辺方向2辺の上下を集成材梁で支持	
乾式二重床 (各試験体共通)	パーティクルボードt20+ガラス繊維不織布入石膏ボードt9.5+ アスファルト系制振マットt8+合板t12 ※床仕上げ高さ269.5mm	

するため20～25Hzに設定し、根太ピッチと合板の厚さで調整した。

4.4.2 実験室における性能検証 板ばねと乾式二重床を用いたCLT床の重量床衝撃音遮断性能の検証を、(一財)日本建築総合試験所における上下残響室において実施した。試験体寸法は2,500mm×4,000mmで、1時間耐火仕様のCLT t150の上に、Table 10に示す3種類の仕様の板ばねと乾式二重床を施工した。床衝撃音レベルの測定はJIS

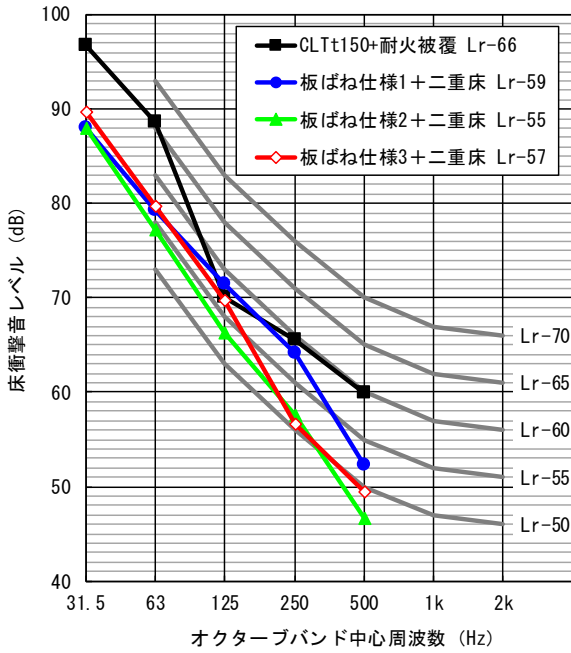


Fig. 26 試験体の床衝撃音レベル測定結果
Measured Heavy Weight Floor Impact Sound

A 1418-2⁵⁾ に準拠して標準重量衝撃源 (タイヤ) を用いて行った。また参考として, JIS A 1419-2⁶⁾ によるLr等級に準じ, 床衝撃音レベル測定値から遮音等級を1dBピッチで求めてLr数として評価を行った。

各試験体の床衝撃音レベル測定結果を比較してFig. 26に示す。1時間耐火仕様のCLTt150がLr-66に対して, 板ばね仕様1でLr-59, 板ばね仕様2でLr-55, 板ばね仕様3でLr-57の性能であり, 板ばねと乾式二重床を施工することで, 天井がなく軽量の床構造でもLr数を7~11改善できることを確認した。

4.4.3 OYプロジェクトにおける床仕様 OYプロジェクトの宿泊室部分で採用した床仕上げ構造をFig. 27に示す。板ばね部の仕様は, Table 10の板ばね仕様3をベースとして, 下側根太床に硬質石膏ボードt9.5を追加して固有振動数をより低くし, 板ばね部の重量を増すことで性能を向上した。また, 床材としての機能・耐久性を検証するため, 120kgf (1.2kN)の繰返し荷重試験や局部集中荷重・衝撃荷重試験を行い, 各部材の劣化や変位量に問題がないことを確認した(Photo 5)。今後は実建物における性能検証を行っていく予定である。

5. まとめ

本稿では, 木造技術開発に関する状況および都市木造実現に向けた構造技術開発への取り組みについて報告を行った。

本稿に示した開発技術を適用することで, 国内初となる純木造11階耐火建築の躯体工事は2022年の竣工に向け

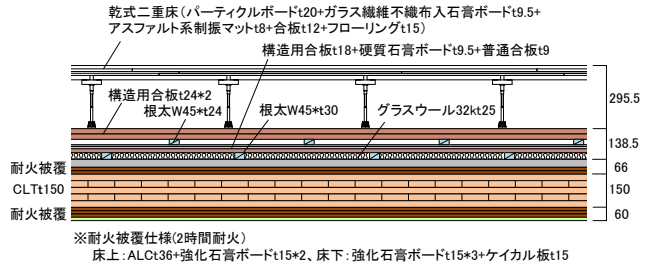


Fig. 27 OYプロジェクトにおける床仕様
Floor System Specification in OY-Project

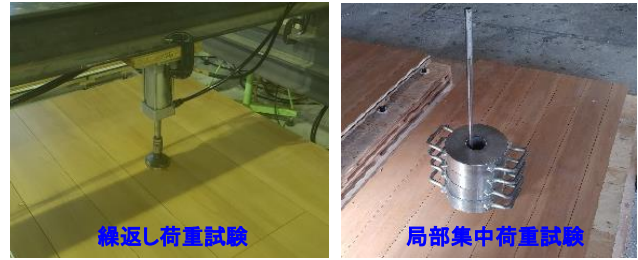


Photo 5 床材の耐久性試験状況
Durability Test of Floor System

て順調に進捗している。本案件の実施工で得られた知見を適切にフィードバックすることで, 適材適所に木材を構造体として活用するハイブリッド構造を含めて, 中高層木造の技術開発に活かしていく所存である。

社内体制としても, 都市部における木造中高層ビルの建設増進に対応するため, 2019年11月に「木造・木質化建築プロジェクトチーム」が発足した。都市木造実現に関する全社的な推進体制のもと, 実施設計に必要な技術および施工省力化のニーズを的確に把握し, 中高層木造建築の普及に資する先導的な技術開発を目指して, 今後とも積極的な取り組みを進めていきたい。

参考文献

- 1) 鈴井康正, 他: 多様な要求性能を実現する「ブレーキダンパー®」, 大林組技術研究所報, No.76, 2012
- 2) (一社) 日本木造耐火建築協会: 木質耐火部材を用いた木造耐火建築物設計マニュアル, 2018
- 3) (公財) 日本住宅・木材技術センター: 木造ラミネーションの評価方法・構造設計の手引き, 2016
- 4) 蒲池 健, 他: 「鋼板挿入式ボルト・ドリフトピン接合部における荷重-すべり特性の評価法」, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第627号, 795-802, 2008.5
- 5) JIS A 1418-2: 2000 「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法-第2部: 標準重量衝撃源による方法」
- 6) JIS A 1419-2: 2000 「建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法-第2部: 床衝撃音遮断性能」