

## 木造ラーメン構造の地平を拓く



企業レポート

今井克彦\*<sup>1</sup>, 宮原浩維\*<sup>2</sup>

Pioneering Development of Wooden Frame Structure

Key Words : Wooden Building, Lag Screw, Rigid Frame Structure

## はじめに

我国の建築の歴史は、木造建築の歴史とかつては同義であった。豊かな自然に囲まれ、多様な風土、災害に適応した木造建築が長い年月をかけて発展してきた。しかし、明治以降近代化が進む中、西洋建築技術が導入され、建築物の多くは鉄骨建築やコンクリート構造にとって代った。人工物が当然のように世界を囲み、人と自然、過去と現在の繋がり希薄にならざるを得なかった。

だが、私たち日本人と木との関係は、いかに科学技術の進歩が急速であろうと切り離されるものではない。我々は、多くの恵みを自然が作り出したものから享受し、価値観さえも自然風土の中で育まれていることを思い出す時期が来たのである。今一度、人と自然、過去と現在とを考える上で、まず木造建築について考えてみたい。それはきっと、“日本人としてどうありたいか”という問いにもつながるだ

ろう。本稿では、筆者らが取り組んできたこれまでの木造建築研究の歩み、革新的技術を取り入れた木造ラーメン構造\*の研究開発について述べる。

\*ラーメン[Rahmen]はドイツ語の『額縁』に由来する。柱と梁で構成される格子状の骨組構造を意味する。

## 1) 木造構法研究の始まり

それは、筆者\*<sup>1</sup>が大学へ移籍する直前、当時話題になった大型ドームの見学がキッカケとなった。大学院を卒業した後、長年取り組んでいた鉄骨構造の研究開発に一応の区切りを付け、木構造でもやろうかと考えていた頃のことである。それまでスペースフレーム開発を行っていたこともあり、やるなら大スパンも可能な集成材を使った構法開発をしようとして決めていた。現場見学で見た時の圧倒的な迫力に感動を覚え、国産スギ集成材の可能性を実感した。しかし、ラミナ（集成材を構成する挽き板）を加工する製材所を見学した際、社長に「良いものができましたね」と声をかけると意外な答えが返ってきた。「こちら一帯から良い木が消えてしまった。

・・・そろいことになった。」

このプロジェクトでは80年生以上の高品質な杉を多く使用しているが、集成材に使うラミナは節が無い板材に限定されているため、丸太から使用できる木材の歩留まりは無垢材のそれと比べて極めて悪い。建築としては悪くないのだが、社長の話を聞いて一瞬にして目が覚めた。

今考えると、ケーブルを張り巡らせた構造形式であったため、木部材にはほとんど圧縮しかかかっておらず、高品質な集成材が必要だったのかと疑問に思う。日本の木材は海外と比較して大きい断面のものが取りづらく、また無計画な拡大造林によ



図1 ドーム接合部

\*<sup>1</sup> Katsuhiko IMAI

1944年3月生まれ  
大阪大学大学院工学研究科修士課程構  
築工学専攻修了（1970年）工学博士  
大阪大学大学院工学研究科教授を経て、  
現在、(株)森林経済工学研究所\*代表  
TEL：072-750-2286  
FAX：072-750-2265  
E-mail：karl@shinrin-ken.co.jp

\*<sup>2</sup> Hiroyuki MIYAHARA

1993年3月生まれ  
大阪大学大学院工学研究科修士課程  
地球総合工学専攻修了（2018年）  
元大阪大学超域イノベーション  
博士課程プログラム4期生  
現在、(株)森林経済工学研究所\*  
E-mail：miyahara@shinrin-ken.co.jp

\*阪大フロンティア研究機構研究成果利用ベンチャー企業



図2 左：未間伐の森林右：手入れの良い森林

りこれまで放置されてきた森林の場合は手入れ不足で節が多い(図2)。そのため、節を避けたラミナを用いる集成材では、国産材を用いるのは生産性からも圧倒的に不利であり、大手集成材メーカーのほとんどが輸入材を用いた集成材を取り扱っている。このような状況では、いくら木造建築が増えようとも、日本の、特に地方の森林環境が改善することはない。最近では、CO<sub>2</sub>の固定化といった文脈で木造建築が取り上げられることも多いが、これではむしろお金を払って海外からCO<sub>2</sub>を輸入しているようなものである。

国産材の自給率向上を阻む要因として、節の不当な評価が挙げられる。板材として用いられる場合、節は欠点となるが、無垢材として扱う場合にもあたかも節が欠陥であるかのように評価されている。こうした評価に科学的根拠がないことは筆者らの研究により実証済みである<sup>1)</sup>。

これらの課題はビルダーや研究者に限った話ではない。消費者が人工材料に慣らされてしまっているのも原因の一つである。自然とともにある生活から遠ざかってしまった人々は、自然材料の木材にまで人工材料と同じような基準で評価し、乾燥の過程で割れ、強度が増す『木割れ』に対しても、あたかも欠陥のように捉えてしまっている。そういった誤解からハウスメーカーもクレームを恐れ、集成材に頼らざるを得ない。最近では、表面を厚さ1mm程度に削いだシート状の木目で覆い、一見無垢材に見えるように装飾を施した集成材まで多く見受けられる(図3)。ここまでくると、竣工時は美しいが時間とともに劣化するという人工材料と同じ宿命となっている。時間とともに味わい深くなる自然材料とは対照的である。



図3 突板貼り集成材

これらを背景に、世界的にみても異常な、木が多すぎることによる社会問題を抱えるに至っても、国内の木材自給率は未だに3割程度、集成材に至っては、80%以上が輸入材で占められているという異様な状況が続いている<sup>2)</sup>。木造建築をめぐるのは、高度経済成長期の住宅建築ブームの中で定められた『仕様規定』の問題もある。現在多くの木造建築“誰でも設計できる”という仕様規定によって建てられている。今となっては右に倣えで思考停止に陥り、木造建築発展の足かせとなっている。鉄骨や集成材と勝負するためにはまず、仕様規定や慣例を見直し、新たな木構造を生み出すしかないと感じ、木構造研究への歩みを始めた。研究開発の中で、基準で定められた木材の引張り強度をはるかに上回る結果を節だらけの丸太の実大引張実験から発見し(節では壊れなかった)、従来の木造では考えられない、接合金物が破断するほどの引張接合を生み出した<sup>3)</sup>。この技術を元に、誰でも、どこの木であろうと施工が可能で、地域材や中低品質材が利用可能な木造スペースフレームを開発した<sup>3)</sup>(図4)。現在は、これらの技術を応用した木造ラーメン構造、耐震補強法の開発などを進めている。



図4 室戸屋内球技場

本稿は、木造ラーメン構造に関する研究開発について解説する。

## 2) 木造ラーメン構法開発を阻む4つの要因

近代建築の幕開けは、三大巨匠の一人、ル・コルビジェがそれまでは組積造が一般的であった西洋で、ラーメン構造により建築を壁から解放したところから始まった。今では、このラーメン構造が最も一般的な建築構法の1つとなっている。しかしそれは、“木造建築を除けば”である。日本には、柱梁からなる貫構造により、完全剛とは言えないまでも、壁の少ない“骨組構造”の歴史があった(図5)。しかし、“科学的に評価できない”といった理由で、接合部は金物に置き換わり、



図5 慈光院(奈良)

耐力壁の規定により木造建築は壁からの制約を受けるようになった。一方筆者らは、木造ラーメン構法の実現により、壁からの解放、それによる建築計画の自由度の画期的な向上と国産材の自給率向上を目指している。

しかし、従来の木構造では、RC造や鉄骨造並みのラーメンができない。なぜならば、国産材を用いた木造ラーメン構法に要求される以下の条件を満たしていないためである。

まず、はじめが木造ラーメン等の中大規模木造建築に対応する大きな断面の木材供給である。ここには、節の不当な評価も一因しているが、特に国産無垢材を用いようとした場合、採算が取れにくい。

次に、ガタの無い十分な接合部剛性と耐力、そして柱脚の完全固定の実現である。木はヤング係数が鉄の1/20～1/25程度と小さいため、建築基準法で要求される層間変位（階高に対する水平力による水平変位の割合）1/120以下を確保するためには、柱脚の固定（鉄骨と同等の固定度）が必須である。

最後に、リーズナブルな価格で提供できる有効な引張り接合である。これは特に仕口部分（柱梁接合部）に言えることだが、引張り接合なくしてモーメント抵抗機構を生むのは不可能である。

これらは、従来の木構造では困難なものばかりであるが、この条件が満たされない限り、鉄骨や集成材と勝負できない。そのためには、先に述べた仕様規定の制約や節が弱いといった思い込みからの脱却が必要である。

そして、建築全般に対して言えることだが、工法を確立する上で極めて重要なのは、施工法であり、いかに簡単に精度を確保できるかである。たとえ解析モデルや計算の上で優れたものであろうと、施工のことが念頭になれば絵に描いた餅である。そのためには、現場の実状を理解し、材料の加工法を知っているかが重要である。こればかりは本を読んでいるだけでは身につかず、現場に足を運び、目で見



図6 筆者開発の精密切断カッターと超長尺ノギス

て実体験として学ぶしかない。木構造は、一般に精度が悪いという思い込みがあるが、木材ほど加工しやすいものではなく、加工し易いことは精度を出し易いことを意味している。これは、長年鉄骨の世界で研究開発をしてきた筆者\*1の実体験である。そして、精度を出すことによりローコスト化が可能となる。これは自動車産業に学んだ。高精度を前提とした接合システム、施工システムの構築が必要である。

以上のことを念頭に、大断面/長尺木材の開発、木造の完全固定柱脚の開発、木造剛接合の開発を行い、新たな木造ラーメン構造システムを確立した。以下に、それぞれの開発について述べる。

### 3) 長尺木材/大断面木材の開発

住宅などに用いられる一般的に流通している柱用木材は4寸角(120×120mm)、長さ3&4mの定尺材である。しかし、このような木材のサイズでは、到底ラーメン構造としての要求を満たさない。そのため、木造ラーメン構造等の中大規模の木造建築には集成材を用いるのが一般的である。しかし、先に述べたように、外材による集成材に頼っている限り国産材の自給率向上は果たせない。筆者らがおこなった、芯持ち無垢材を用いた長尺木材及び大断面木材の開発について述べる。

まず、はじめに長尺木材の開発である。木材同士を繊維方向に繋ぐ方法として、フィンガージョイントと呼ばれる接合方法がある。木材の木口端部をカッターで手の指状（フィンガー）に加工し、その加工部に接着剤を塗ってはめ合わせ、高圧力で圧縮接着して長い木材を作る方法である。この手法は一般的に集成材を構成する板材を繊維方向に接合する手法であり、節がある場合は接着が行えず、また接合には圧縮が必要であるため生産効率が悪いといったデメリットがある。

筆者らは、木材を無垢材の状態からフィンガー加工し、超低圧状態で接着できる手法を確立した(図7,8)。このことより、一般流通材の定尺長さに制限されることなく中大規模木造に無垢材を使用することが可能となった。



図7 筆者開発のカッター





図8 長尺材作業風景と加工面 (5寸角)

次に、大断面木材の開発である。流通材の規格では限界があり、大断面集成材に変わる木材の開発が必要であった。軸組系の構造要素は基本的に梁と柱に分類されており、それぞれ無垢材を用いた重ね梁、組柱による大断面木材の生産手法を確立した。

重ね梁は木材を段重ねし、接着及びラグスクリューにより梁せいを確保する手法を用いた。フィンガージョイントによる長尺材を併用した。西はりま特別支援学校のプロジェクトでは、温水プールの屋根梁として、ヒノキ 150×150 mm 角材三段重ねにより、梁せい 450 mm、長さ 12 m の梁を供給した。これに 5 m の梁を現場接合し、全長 17 m とした (図 9)。



図9 現場梁積状況と施工後の重ね梁

組柱も同様に、木材同士を接着、ラグスクリューで締結させることで、接着材の硬化を待たずしてハンドリングが行える手法を開発した。また、この組立て方法には集成材のような特別な圧縮装置は必要ない。これにより、流通材を 4 本組にするだけで木造ラーメン構造に要求される断面を構成することが可能となった (図 10)。



図10 組柱の組立 (左:接着材塗布、右:ラグ締付)

木材を複数本組合せ、一本の大断面にする方法は、実は集成材技術が輸入される遥か 250 年前から日本にあった。それは、世界最大の木造建築である奈良

東大寺大仏殿の巨大木柱 (直径 1200 mm) で見られる (図 11)。二度目の再建が行われた江戸時代には、大仏殿に用いられるような太さと長さを有した大きな材の調達が困難であった。そこで、柱を一本で構成するのではなく、圧縮部となる断面内側で柱を繋ぎあわせ、曲げ抵抗する外側の一本物の扇型木材を組むことで大断面組柱としている。極めて合理的な断面構成である。楔と結束金物とで構成された組柱は、再建から 300 年以上経過した今もなお、緩むことなく当時の姿をそのままにしている。興味のある方は実際に東大寺を訪れて確かめてみることをおすすめする。

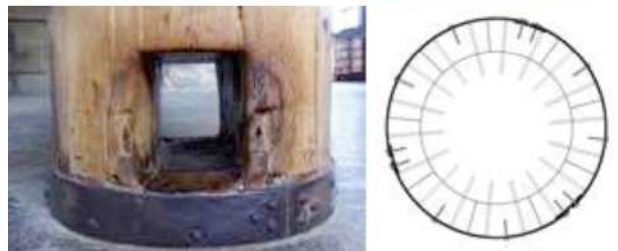


図11 東大寺大仏殿の巨大組柱

有名な『大仏様の鼻の穴』で柱の内側を確認できる。筆者もパンフレットの紙が組柱の継目に入るか試みたが、全く入らなかった。当時の技術の高さにただ驚かされるばかりである。

図 12 に示すのは、現在耐久性試験のために屋外暴露中 (2015/10 ~) の組柱である (250×250 mm×6 m)。過酷な条件にさらされながら、これまで目立った変形はない。東大寺の組柱と比べたら可愛いものだが、これだけ立派な木材は日本の山ではなかなか見つからないだろう。



図12 独立組柱

#### 4) 木造完全固定柱脚の開発

人が何か物事を為すためにはまず足元を固めなければならないのと同様に、建物においても柱脚がふらついていたらその上にどれほど架構を加えようとも限界がある。

筆者らが開発した柱脚は、ベースプレートに溶接した短い銅管（以後、靴金物）内に柱を挿入し、銅管との隙間を樹脂で充填することでガタを完全になくした高い剛性と変形能力を有する埋込型の完全固定柱脚である。靴金物は通常、床下に収まるように設計する。埋め込んで固定する柱脚形式は遙か昔から存在し、出雲大社や伊勢神宮など奈良時代以前は一般的であった。筆者らの手法はこの現代版と言える。

今から5000年前、高い技術と規模を有していたとされる三内丸山遺跡（青森県）には、大型掘立柱建築物の痕跡が多く見つ



図13 山内丸山遺跡

かっている（図13）。当時の技術では、木材は精巧に加工することはできなかつたため、架構を構成するためには部材同士を縄で縛りつけるしかない。それらの不安定な構造体が自然外力（台風・地震）に抵抗するために、柱の根元を土中に埋め込み、土圧によって建物に発生する力に耐えた。

建物が水平力に耐え、変形を抑えるためには足元を固める必要があり、木造ラーメンとして完全な軸組形式を現行の建築基準法の中で実現するためには柱脚の完全固定が必須である。しかし、現在世にある木造柱脚の大半はそもそも柱脚部を固定することを念頭においていない。木造ラーメンと銘打っているモーメント抵抗型柱脚においても、完全固定には程遠いのが現状である。その理由を考察したい。

話がまた過去のことに遡るが、奈良時代以降、掘立柱の次に世に広まった柱脚形式は礎石の上に柱を立て、その上に架構を形成する構法である（図14）。これは掘立柱とは真逆の発想である。地震力に対して柱脚が抵抗するのではなく、石の上に乗っているだけなので、滑り支承により地震入力が小さく、免震機構に似ている。また貫や組手といった木同士の

接合要素が組み合わさって、粘り強く構造体全体で耐える構法である。この形式により掘立柱の問題とされていた木の腐食や蟻害にあいにくく、建物の長寿命化が期待できた。仕口の加工技術の向上によって社寺仏閣を中心に普及していった。その後、民家にも礎石が使われるようになり、現在見られる多くの木造建築はこの形式を踏襲している。今もなお残り続ける古建築を見るにつけ優れた構造形式であることは疑う余地はない。



図14 礎石

しかし、戦後しばらくして1950年に制定された建築基準施工法において、木造建築物の柱脚部は基礎への緊結が求められるようになった。背景として、明治以降の西洋技術信仰による伝統構法の軽視、1923年の関東大震災、1948年の福井地震による木造建築の大きな被害なども関係しているだろう。これらの施策の中で、従来の伝統構法は工学にのらず、構造計算ができないという理由で、代わって木造住宅における耐震規定の中で壁量規定が定められた。こうして木造建築は筋交いなどの壁に水平抵抗要素を持たせ、耐震基準を満たす流れに変化していった。コルビジェがラーメン構造により建物から壁を取りはらい、近代建築の幕開けに大きな影響を与えた四半世紀後、日本の木造建築は逆に壁を規定し自由を放棄したのである。それ以降、木造建築の柱脚に対して曲げ抵抗を求めないまま、各種接合金物の開発がなされてきた。

近年では、木造ラーメンと銘打っている工法も増えてきたが、それらの多くも未だ耐震壁に頼る剛性や耐力不十分なものばかりで、未だ木材の材料としての強度をフルに引き出せる構法になっていない。

筆者らが開発した完全固定柱脚（図15）は、靴金物と呼ぶ短い溶接

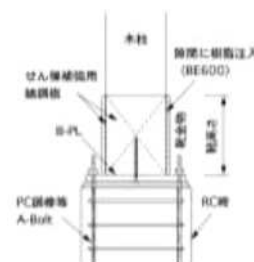


図15 柱脚概要



図16 樹脂注入の様子



鋼管に木柱を挿入した後、隙間にエポキシ樹脂を充填することで（図16）、ガタなく柱の応力を鋼管へと伝達することができる。靴金物に挿入される部分は、補強プレートが取り付けられ、樹脂によって木柱と一体化される。これにより、靴金物内木柱の断面性能が2倍近くになり、靴鋼管内に発生するせん断力と木材のめり込みを分担した結果、木材の強度をフルに引き出せる構法となった。

鋼管の下面には、鉄骨造と同様のベースプレートが溶接されており、アンカーボルトにより基礎に定着される。アンカーボルトには、水平荷重が作用しても引張り側が離間しないように締め付け力を導入することで、鉄骨構造のような完全な固定柱脚が成り立っている。図17に設計用力学モデルを示すが、精度よく耐力と変形を予測できる。

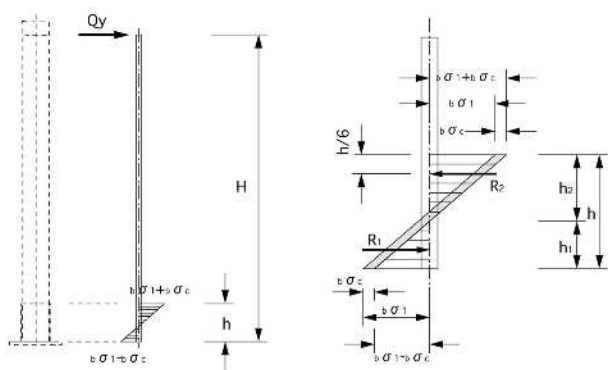


図17 柱脚力学モデル

柱脚実験について述べる（図18, 19）。柱脚靴金物内に補強プレートを入れた場合とそうでない場合との比較実験の結果を図20に示す。補強プレートを入れることで最大耐力が2倍以上となり、柱脚部剛性は靴頂部の支圧変形を考慮に入れた場合の計算値とほぼ等しいという結果が得られた。これは、鉄骨造の柱と



図18 柱脚実験 (250mm角)



図19 実験後の柱脚

同等の固定度であるといえる。また試験体は大地震時の水平荷重では完全に弾性の挙動を示しており、曲げ材料強度に等しい値の最大荷重を示した。これらの実験結果により、本柱脚形式の有効性が示され、木材の材料強度そのもので設計が可能となった。

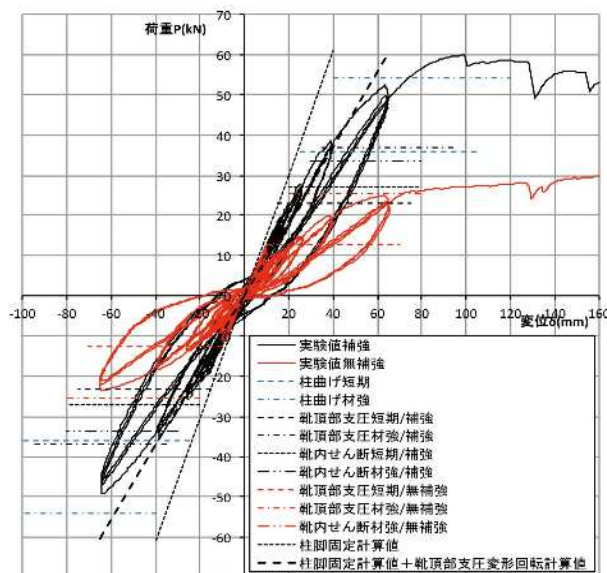


図20 柱脚実験荷重変形関係 (250×250mm角)

### 5) 締め付け力を導入した木造剛接合の開発

木造建築の接合部としては、古くから柱梁の貫構造が用いられてきた（図21）。この構法は柱断面内に梁材を通し、隙間を楔で打ち込むことで接合部内に支圧力を働かせ、接合部剛性を高めている。地震が起こった時は、高い靱性を発揮し、仮に柱が傾こうともその後立ち直しをして楔を再び打ち



図21 貫構造

込めば元に戻る。木痩せに対しても同様に対応可能である。長い歴史と自然現象との関わり合いの中で木の特性を理解した、極めて理にかなった接合形式である。

一方で、現行の金物による接合方法はどうか。多くは、金物を取り付け、ただ引っかかっているだけの接合部や、木の中にガセットプレートを挿

入し、横からボルトを打ち込む木にとって耐力が発現しにくい非効率な接合法を用いている(図22)。木構造研究を始めた頃、よく訪れた宮大工から「鉄板を挟むのは鉄骨のマネや、あれだけはやめときなはれ」と何度も言われた。

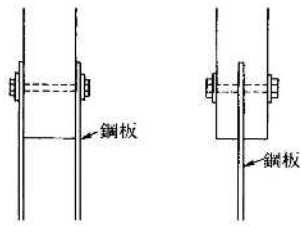


図22 一般的な接合法

また、これらは、建て方時の接合部誤差や木痩せなどの経年変化、地震力で生じるボルトのめり込みなどにより生じるガタを考慮しておらず、極めて初期剛性の低いものが多い。最近見られるようになった、木口に金物を挿入して接着材で固定するいわゆるモーメント抵抗型接合部も同様の課題を抱えている。初期剛性の安定が十分でないガタのある接合部ではまともな応力解析ができない。それに加え、現場での接着が必要な接合形式だと施工性が極めて悪い。これらの課題を解決するためには、有効な引張り接合法および締付け機構が必要である。

まず、有効な引張り接合法である。これは筆者が大学に赴任してから取り組んだ、木造スペースフレームの開発の中で生み出された。ラグスクリューと樹脂を併用した従来の常識を覆すような接合法である。金属のように木口に削孔した下穴に雌ネジ加工した後、エポキシ樹脂を穴入り口に必要量充填し、その後にラグスクリューをねじ込むという方法である(生産と技術第69巻1号で紹介)。図23に示すのが充填状況である。ラグスクリューが樹脂を穴奥へと押し出すと同時に、ラグスクリューの螺旋に沿って回転しながら樹脂を取り込み、ラグスクリューの全長に渡って完全な雌ネジを形成する。この方法で、組織の最も弱いとされる髓心部(スギ)に打ち込んだラグスクリューを引張試験すると全てラグスクリューが破断した(図24)。最大耐力は6 tonを超える。特別な技術や設備なしにできる施



図23 樹脂充填状況



図24 ラグ破断状況

工性と耐力を有している接合形式は世界中探してもないだろうと自負している。この接合方法を木造ラーメン接合部に応用した。

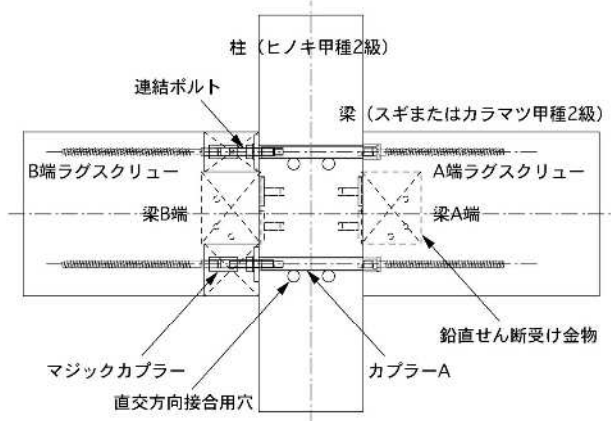


図25 柱梁接合部概要

接合部を図25に示す。接合部構成は、A及びB端ラグスクリュー、カプラーA、連結ボルト及びマジックカプラー(以下、MCとする)からなっている。MCの両端ネジを、右ネジで進行方向前方のネジピッチが後方のネジピッチより0.5 mm大きくすることで、MCを右回転させながら、梁を柱方向へ引き寄せることができ、またナットの回転角法により、所定の圧縮力を梁木口と柱の間に発生させることが可能である(図26)。回転角管理でナットを締めることで、容易かつ確実に支圧プレートを介して所定の軸力をラグスクリューに導入することができる。



図26 締付けの様子

先に締付け力を導入できることが接合部初期剛性を確保する上で重要であることは述べたが、利点はそれに限った話ではない。一つは、貫構造と同様に地震や経年変化に伴う接合部の緩みに対応した“締め直し”が行えるということ、もう一つは、ラグスクリューに初期軸力導入をすることで、コンクリート造や鉄骨造では考えられない、木と鉄の材料特性の違いによる新たな構造形式が生まれたことである。

図27に示しているのは、ラグスクリューに導入した張力と外力により発生するラグスクリューの付加張力との関係である。このようなグラフは高力ボルトによる引張り接合で用いられる。高力ボルトの



場合は、被締付け材の鋼材とボルトのバネ定数の関係から初期締付け力に近い荷重が作用すると締付け力が消失する。一方、被締付け材が木の場合、その性状は大きく異なる。締付け力導入による木材の弾性変形量が大きいため、ラグスクリューに引張力が作用しても容易に締付け力が消失しない。この特性は、木と鉄のバネ定数の大きな差によってもたらされる。図27はこれを定式化、図示したものである。

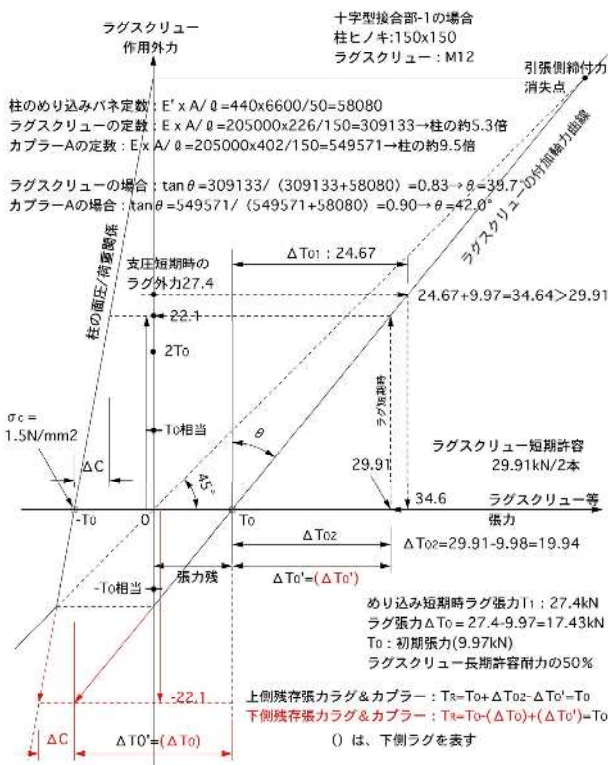


図27 ラグスクリュー張力と付加張力の関係

ラグスクリューに導入した軸力をコントロールした接合部実験(図28)では、接合部剛性に寄与する効果が如実に現れた。荷重変形の計算値も実験値を精度よくシミュレートしている(図29)。



図28 実験の様子(左:十字型、右:T字型)

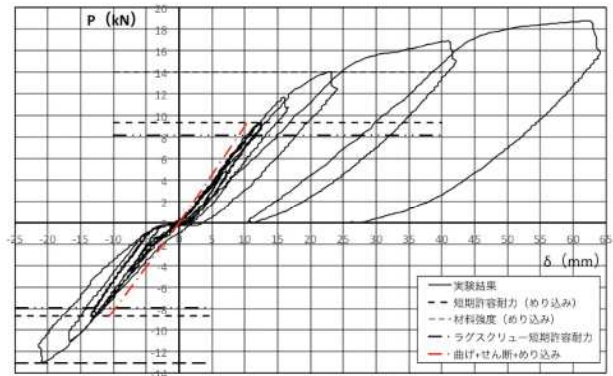


図29 T字型荷重変形関係

## 6) 木造ラーメンのフレーム実験

最後に、研究開発の最終段階として2018年8月に実施した、実物の1/2スケールの2スパンラーメンフレーム実験について述べる(図30)。柱がヒノキ150mm角、梁がスギ240×120mmの構成である。



図30 木造ラーメンフレーム実験の様子

図32では荷重変形関係を示す。水平変位が最大110mmになるまで載荷して終了したが荷重低下は、ほとんど見られなかった。この時の層間変形角は、約1/14に達している。この状態から徐荷した時の残留変位は、約1/30であり、非常に大きな復元能力を有していることがわかる。このような特性は、降伏後に梁端部が柱にめり込むことによってもたらされたと考えられる。これは、伝統的な貫構造と同じものである。貫構造の場合は、貫梁の繊維直交方向に梁端がめり込む。梁を柱に差し込むことで接合部の一体性が保証されていたが、本木造ラーメン構法では、反対にラグスクリューが十分な耐力を有しており、柱の繊維直交方向にめり込むことによる十分な変形が担保されている(図31)。さらに、柱梁接合部がめり込みにより骨組みの変形が進むと靴金物により固定されている柱脚の曲げモーメントが大



きくなり、さらに荷重が増大するとともにめり込みによる変形も大きくなる。靴金物は設計により、柱に対して十分な耐力を有しており、靴金物に挿入された柱は、靴金物頂部での繊維直交方向反力（めり込み耐力）によって固定されている。この試験体の水平耐力は6.5 ton と驚異的な結果となった。



図31 めり込みの様子

これまでの研究開発、実験結果を通して、筆者らが開発した木造ラーメン構造により、柱梁接合部に適度な接合部剛性と大きな変形能力という伝統建築の特性に近いものが実現できたと考えている。さらに、伝統建築にはない柱脚でのめり込み性能が付加されているため、さらなる安全性が確保できた。

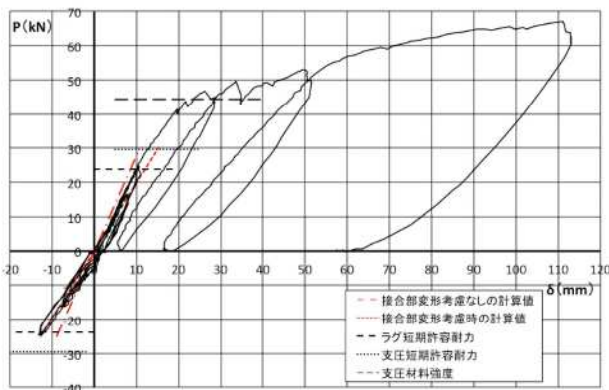


図32 フレーム実験荷重変形関係

## 7) 今後の展望

本稿のはじめに述べたが、ラーメン構造は現代において最も一般的な構法である。このことは、本木造ラーメン構造の大きな可能性も示唆している。現状の木造住宅の有り様を変えるだけでなく、オフィス、学校建築、集合住宅、商業施設など多方面に及ぶ、新たな木造建築の歴史を切り拓く可能性を秘めていると筆者らは確信している。

本システムは現在審査機関で技術評価中であり、2018年度中に技術証明書を取得する予定である。当面は、柱梁ともに無垢材の一本ものを使用する。柱にはヒノキ 150～250 mm 角、梁にはスギで最大 400×180 mm 角程度を考えているが、本木造ラーメン構造の接合部耐力、剛性をもってすれば2階建てオフィスは十分設計可能である。このサイズの断

面は伐期を迎えた日本の森林から十分供給可能である。特にヒノキのこのサイズは市場価値が低く、スギ以上に深刻な状況となっている。国産材を用いた木造建築の普及により、森林環境改善を目指していきたい。



図33 木造ラーメンによるオフィススタディ

## むすび

本稿では木造ラーメン構造システムの開発について日本の現状を踏まえながら述べた。木造建築を通じて過去と今、人と自然との向き合い方などが見えて来たと思う。筆者らは純粋に木構造を力学の視点で捉えてきたが、研究開発の過程でたどり着いたのは伝統木造と同じ構造形式であった。たかが戦後数十年の建築技術がこれまで千年以上にわたる木構造の歴史を簡単に覆せるはずがない、そう強く感じた。“古き良き日本の伝統、技術を新しい形で今ここに”これからも筆者らはその想いを胸に研究開発を続けていきたいと考えている。

## 【参考文献】

- 1) 滝野敦夫, 今井克彦他: 国産心持ち木材の引張強度特性に関する実験的研究 (2007)
- 2) 社団法人日本木造住宅産業協会: 木造軸組住宅における国産材利用の実態調査報告書 (2010)
- 3) 佐尾敦宏, 今井克彦他: 木造スペースフレーム接合部のラグスクリー引抜き性能に関する研究 (2015)
- 4) Miyahara H., Imai K. Production System of Wooden Space Frame Architecture. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016, Tokyo