

木造ラーメン構造の魅力

小松 幸平*

1. はじめに

ラーメンという言葉は、ドイツ語の Rahmen から来ており、本来の意味は「額縁」という意味です。従って、図1に示す額縁のような長方形の枠で構成された骨組みがラーメン構造の基本形（このようなラーメンを門型ラーメンと呼びます）ということですが、他に、図2に示すような山型ラーメンと呼ばれる「傾斜屋根の付いた骨組み」の場合も、木造ではよく見かけます。

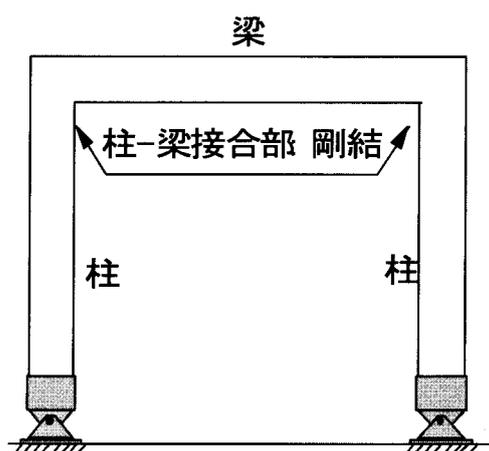


図1：門型ラーメン構造

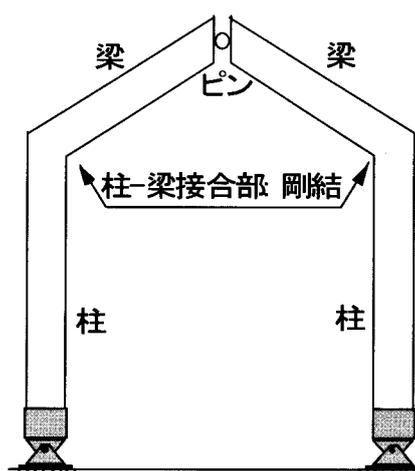


図2：山型ラーメン構造

ラーメン構造の厳密な定義は、図3に示すように柱部材と梁部材が強固に結合されていて、たとえそこに大きな力が作用しても、最初に結合された角度が保持された状態で、少なくとも接合部分は角度変化や伸縮変形、そしてずれ変形等を起こさず、逆に部材の方が曲がって、骨組み全体として一定量の水平変形や垂直変位を生じるような骨組み構造を言います。非常に分かりにくい話ですが、早い話が、鉄骨で出来た多くのビルディングは、このラーメン構造の定義にほぼ近いものと考えて良いでしょう。

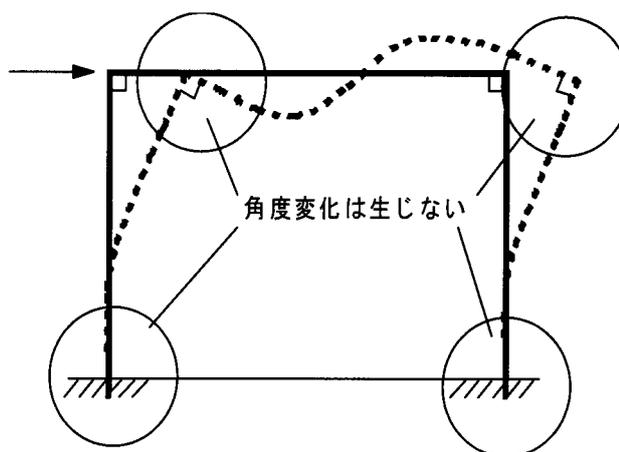


図3：ラーメン構造の定義

しかし、これから話をします「木造ラーメン構造」の場合は、この定義から外れてしまう物が大部分です。一部の例外を除いて、柱と梁をどんなに強固に結合したつもりでも、接合部で若干の角度変化や伸縮変形や、ずれ変形が生じて、鉄骨のような完璧なラーメンという訳にはいかないのです。この辺の状況については、後ほど詳しく述べます。

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏構造機能分野. E-mail: kkomatsu@rish.kyoto-u.ac.jp

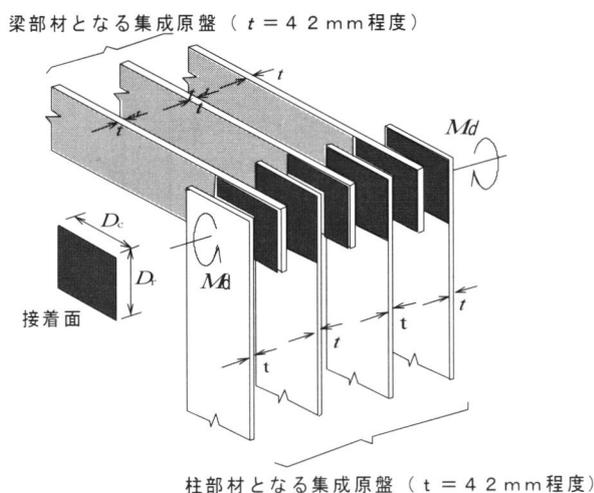
2. 禁断の木造ラーメンの世界へ飛び込む

不完全なものに遭遇した場合、それを避けるように行動するのが一般的です。ラーメン構造の場合、柱と梁が結合されている接合部分には、接合部を分離させようとする大きな力が作用しますので、この大きな力に抵抗できる接合を造ることが困難であった時代には、「木造でラーメンを造ることは避けた方がよい」という考え方が建築界では常識的な見方でした。しかし、「やらない方がいい」と言われると、「やって見たくなる」のが人間の性です。私の場合も大学院を修了し、無事博士号を頂いて北海道立林産試験場という林産物を扱う試験場に就職して数年も経たない内に、このラーメン構造を木材で造るという禁断の世界に飛び込む機会がやって来ました。

たまたま研究所の掲示板にポツンと貼ってあった NZ 政府招聘研究員募集の張り紙を見て、「NZ って羊の沢山いる南の国、写真で見ると綺麗な国で、行ってみたいなー」という漠然としたあこがれの気持ちで応募してみたたら、何と「貴方の応募が採択されました」というすぐには理解出来なかった英文電報が舞い込み、そうこうしている間に NZ の北島のロトルアという町にある NZ 森林研究所に 2 年間留学できることになりました。そこで初めて出会ったのが今日まで私の研究テーマとして最も相性のいいラーメン構造です。



(a) 実際の例 (マッキントッシュ社工場)



(b) 接合の仕組み

図 4 : NZ 独特の交差重ね合わせ接着接合によるラーメン構造接合部の仕組み

NZ で初めて出会ったラーメン構造は、最初に紹介した鉄骨のラーメン構造に近い柱—梁接合部が木造ラーメンとしては例外的に固く結合されている「交差重ね合わせ接着接合法」という特殊な構造のラーメン構造でした。図 4 にその構造の仕組みと写真を示します。

厚さが 3~4 cm 程度の板 (集成材を薄くスライスしてこの板自体を造る場合が多い) を何枚も交差し重ね合わせ、積層界面に接着剤を塗布して最終的に接合部を強固に接着接合するというものです。こうすることによって、ちょっとやそとでは柱と梁の接合部が変形を起こさない、鉄骨のように強固なラーメン構造を木材を使って造ることが可能となります。ただし、問題は幾つかあります。一つは、接着接合という方法は非常に固い接合を構成するので、接合部の変形は無視できるほど小さいですが、接合部の破壊が突然、大音響と共に発生するという、木構造における破壊形態としては最も好ましくない形態で起こるということです。また、交差重ね合わせ接合の場合、一般的には工場で予め柱と梁を接着して「への字」型の骨組みを造り、それを大型のトレーナーに載せて「のろのろと」建設現場まで運びますが、後で出てくる事例のように極めて大きな構造になると、よほど道路事情に余裕がない限り輸送にも限界があります。よって、この交差重ね合わせ接着接合法による木造ラーメン

構造の場合は、NZ という人間より羊の方が圧倒的に多い文字通り牧歌的な樂園においても、大型の構造は最近ではめっきり少なくなってきたようです。以下にいささか古い写真で恐縮ですが、幾つか実例を示します。



(a) 遠景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 1：交差重ね合わせ接着構法で建てられた巨大な貨車引込用倉庫。(オークランド市、NZ)

写真 1 はこの構法で建てられた構造物としては NZ 最大のもので、非木質建材メーカー大手のアレックス・ハーヴェイ・インダストリー、通称 AHI（現在はカーターホルツ社になった）の貨物列車専用の倉庫です。構造は 3 連山形ラーメンで面積は 7,000 m² を超える超大型の集成材構造建築物です。

写真 2 は比較的新しい NZ 羊毛市場組合の羊毛倉庫で、山型ラーメンが 2 つ並列に並んだ構造です。この程度の規模であれば輸送に拘わる問題は少なく、現場での組立が非常に容易ため、交差重ね合わせ接着接合構法は今でも重宝がられています。この構法の特徴として、軒肩部分が幾何学的ですっきりしていることが分かります。



(a) 遠景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 2：交差重ね合わせ接着構法による羊毛倉庫、建物は山型ラーメンが 2 棟並んだ型になっている。(N.Z. 羊毛組合倉庫、オークランド市、NZ)

写真 3 はコミュニティーカレッジの木工教室に使用された交差重ね合わせ接着構法による山型ラーメン構造で、屋外環境に曝されて使用されるため、骨組み全体がペイントで保護されたうえ、万々にも接着接合が剥離を起こさないように、安全のため 4 本のボルトで締めてあります。

以上、昔 NZ に留学した当時の懐かしい研究を紹介しました。交差重ね合わせ接着によるラーメン構造は、小さいものから、極めて大きいものまで様々な種類が存在しますが、最近の傾向として、輸送の面で不利な大形の構造は少なくなってきたようですが、運搬が楽な小型のものは建て上げが早いので今でも重宝がられています。

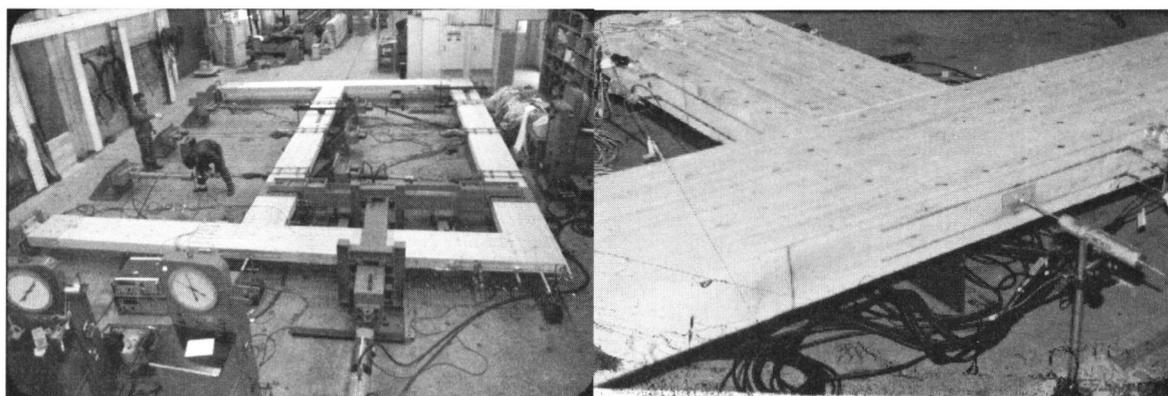


(a) 木工棟全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 3：屋外環境に曝されて使用されている交差重ね合わせ接着構法による山型ラーメンの例
(コミュニティーカレッジの木工棟、オークランド市、NZ)

3. 我が国における大型木造ラーメン構造の開発



(a) 実験状況の全景

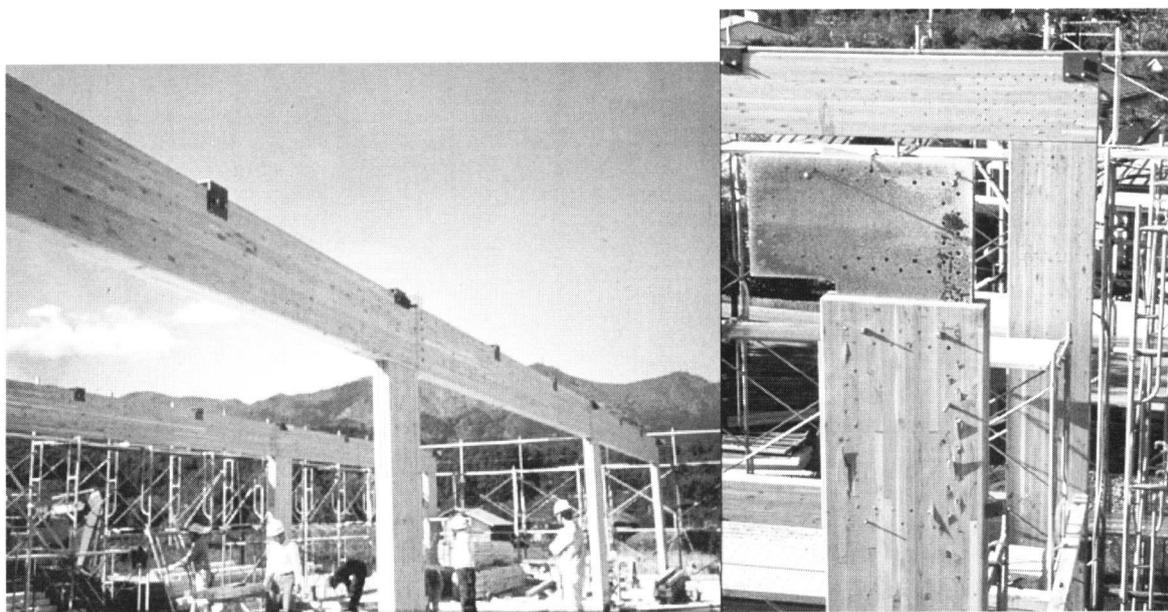
(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 4：小学校の 2 階建て校舎を目標とした 2 層門型ラーメン架構の実大実験（林業試験場、筑波）

留学から戻り、北海道で幾つか特殊なラーメン構造の開発を経験した後、筑波にある農林水産省の林業試験場（現在の森林総合研究所）の構造性能研究室という木構造を専門に研究する研究室に転出しました。その当時、集成材を構造材料とした大型の木造建築が新しい研究トピックスとして注目されるようになっていました。早速、海外で仕入れてきた知見を日本風にアレンジする作業に取りかかりました。写真 4 は柱と梁に開けた幅 11 mm のスリットに 2 枚の大きな鋼板ガセット板を挿入し、現場でドリフトピン（当時は打ち込み鋼棒とか丸鋼ジベルとか呼んでいました）を多数打ち込む方式（接合部の概念については図 5 を参照して下さい）で集成材による 2 階建て門型ラーメンの実大破壊実験を行っている様子です。(a) の写真に見える T 字型の治具で地震力を模した力を与えています。

また建物に作用する上からの荷重（固定荷重と言います）はプーリーとワイヤーを利用して与えるように工夫しています。この実験は小学校の校舎（スパンが 8m 程度）をイメージしたもので、この実験結果を使って、その後写真 5 に示すような小学校が実際に建設されました。

しかし、この方法は現場で大きく重たい鋼板を扱うこと、十分な設備のない現場ではすべてのドリフトピンを正確に打ち込むことが困難な場合が多いこと等の理由で、施工法の改良が期待されました。



(a) 建設途中の全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 5：実大実験の結果を利用して実際に建設された小学校の 2 階建て校舎

そこで、この難点を改良するため、精確な作業の要求される鋼板挿入作業とドリフトピン打ち込み作業は設備の整った集成材工場で行い、施工現場では鋼板同士を数本の高張力ボルト（図 6 中の HTB と書いた物）で結合するだけで柱-梁接合部が完成する図 6 のような接合法を開発しました。

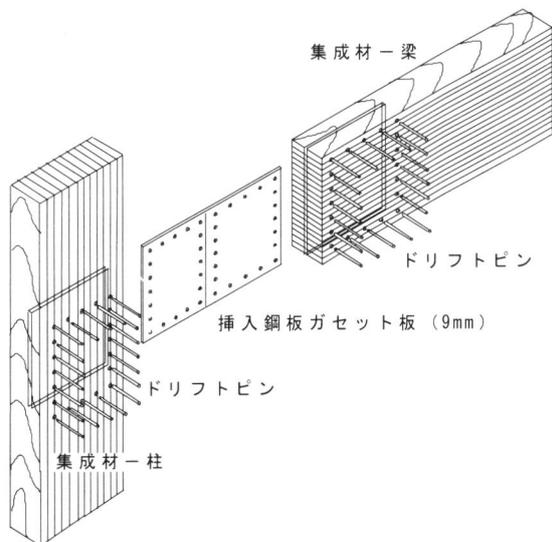


図 5：初期の鋼板挿入ドリフトピン接合

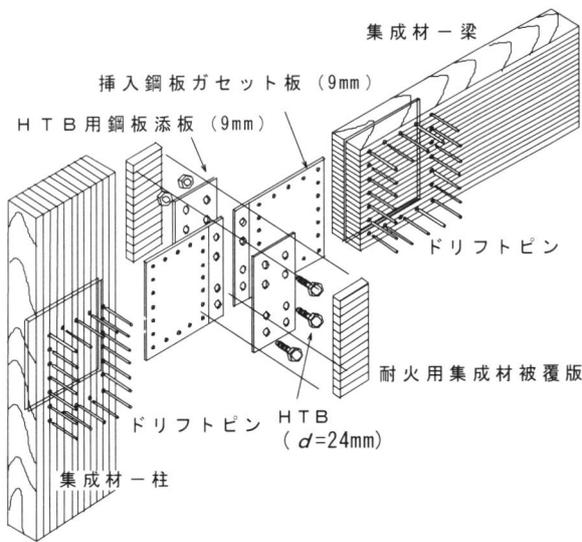
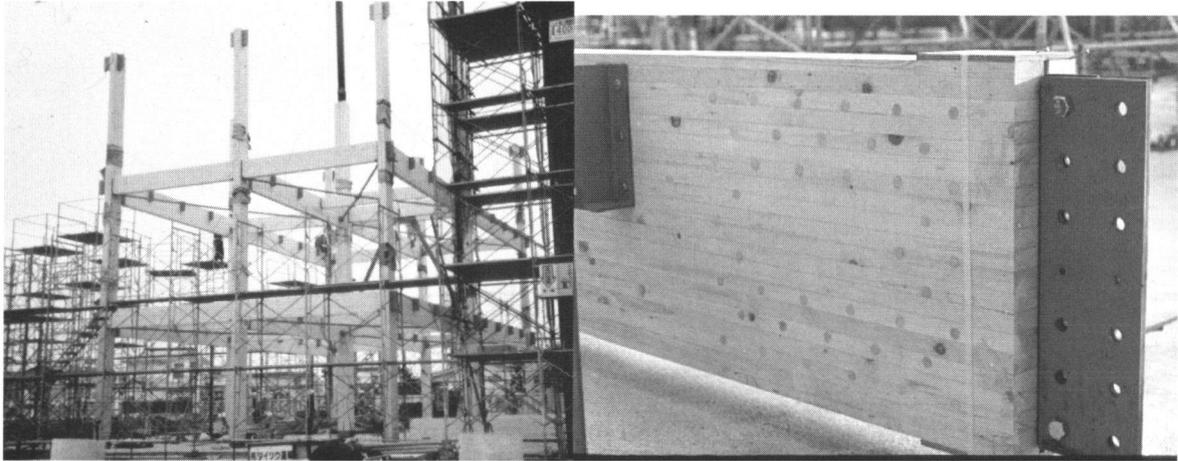


図 6：改良型鋼板挿入ドリフトピン接合

改良型の接合法によって、現場施工性が大幅に改善された他に、集成材部材間に介在する鉄同士を接合する高張力ボルト（HTB）接合部が安全弁的な役割を演じ、ドリフトピン接合で破壊が起こる荷重レベルの前段階で、高張力ボルトが先にすべりを起こすよう設計することによって、見かけ上鉄骨同士の摩擦接合部と同じ延性に富んだ荷重-変形挙動を起こす接合部の開発に成功しました。これによって、施工が楽で、且つ鉄骨ラーメン並の安全性を備えた集成材ラーメン構造を造ることが出来るようになりました。それ以降、この方法は我が国における集成材ラーメン構造の標準的な接合法として広く使われています。写真6はこの改良型接合法を用いて建設された我が国最大規模の集成材3階建てラーメン構造の建設時の様子を示します。



(a) 建設途中の全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真6：集成材3階建て構造物としては我が国最大級の帯広営林支局庁舎棟（帯広市）

4. スケルトン-インフィル（SI）住宅へのラーメン構造の適用

スケルトンとは骨格のことを意味します。またインフィルとは内部の間仕切りのことです。従ってSI住宅というのは家の外側が頑丈な骨格で、内部の間仕切りは住手の要望や家族構成の変化に応じて比較的容易に変更できる住宅のことを意味します。木造ラーメン構造は、このSI住宅のS、つまり骨格を形成することのできる魅力的な構造と言えます。集成材の柱と梁は構造材であると同時にその美しく、かつ力強い質感を生かして、むしろ積極的に住宅内部に「現し」で使うことが出来ます。コンクリートや鉄骨では真似のできない芸当です。

上で紹介した鉄板を集成材の中に挿入してドリフトピンという鉄のピンを集成材の側面から打ち込む方法も捨てたものではありませんが、住宅ですの

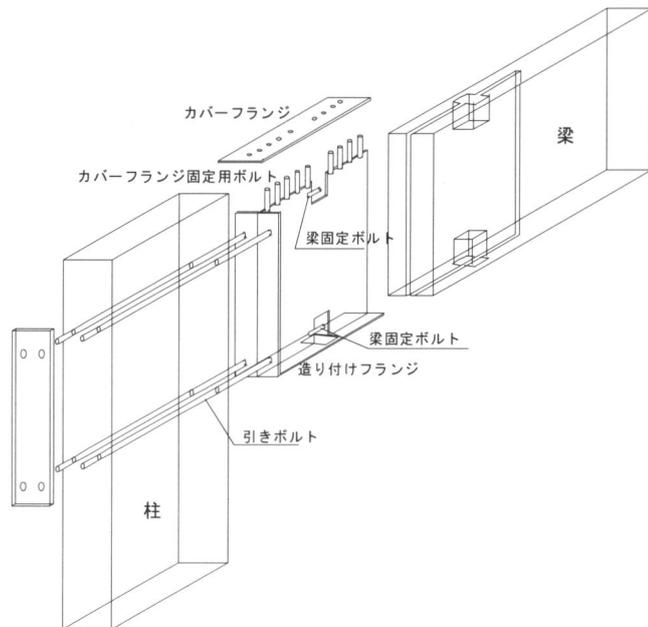


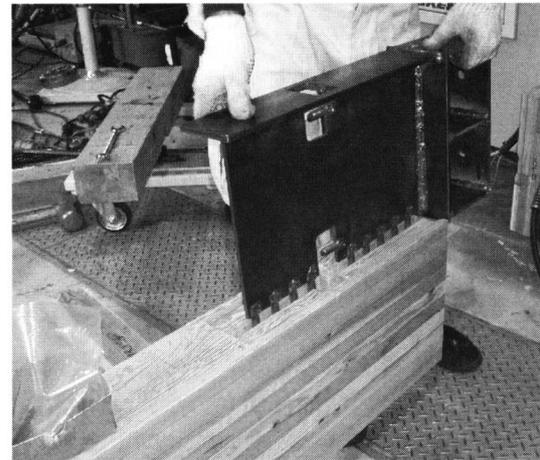
図7：締め付け型フランジ引きボルト接合法

で、もっと徹底的に集成材の美しさを生かした接合法として、室内に見える部分には全く鉄のピンが現れてこない非常に綺麗な接合法が最近開発されました。締め付け型フランジ引きボルト接合法という長い名前と呼ばれています。図7はその接合部の仕組みを模式的に描いたものです。最終的な形としては、集成材の端部に軽量鉄骨で造ったH型のガセット板が挿入されていて、集成材の狭い面の外側で力を伝達するように工夫されています。

写真7(a)は柱-梁接合部のガセット板を取り付けている状況を、また同(b)は柱脚接合部のガセット板を取り付けている状況を示します。



(a) 柱-梁接合部の取り付け状況



(b) 柱脚接合部の取り付け状況

写真7：締め付け型フランジ引きボルト接合法による集成材ラーメン構造の開発

図8はこのラーメン構造の柱が横からの力を受けた際に、ガセット板の各部に生じる力の状況を模式的に現したものです。全ての力が集成材の外側の層に限定的に発生する仕組みとなっています。この事より、なるべく外側の層に強度性能の高いラミナを積層した特別な集成材を部材に使用した方が有利となるのが容易に予想されます。そこで我々はこの条件にピッタリの集成材である異樹種集成材と呼ばれる新しく開発された集成材をこのラーメン構造に使うことにしました。我々が注目した異樹種集成材は、外側に力の強いベイマツのラミナを、内部に日本の針葉樹として蓄積の最も多いスギを使用しています。

写真8は京大生存圏研究所の木質材料実験棟の設備を使って、最近この型式のラーメン構造の実大加力実験を行った時の様子を示します。形はいわゆる門型ラーメンと呼ばれるもので、スパンは6m、高さは2.73mで、集成材の寸法は、柱が幅120mm x せい360mm、梁は幅120mm x せい420mmです。実験で与えた荷重は、このラーメン構造に地震の力が繰り返し作用した時の抵抗能力が分かるように、小さい変形から初めて段階的に大きな変形を与え、最終的にはせん断変形角が1/6ラジアンになるまで押してみました。この1/6ラジアンという角度は門型ラーメンが平行四辺形に変形した場合、上部の変形量を高さ2,730mmで除した比のことを言います。こ

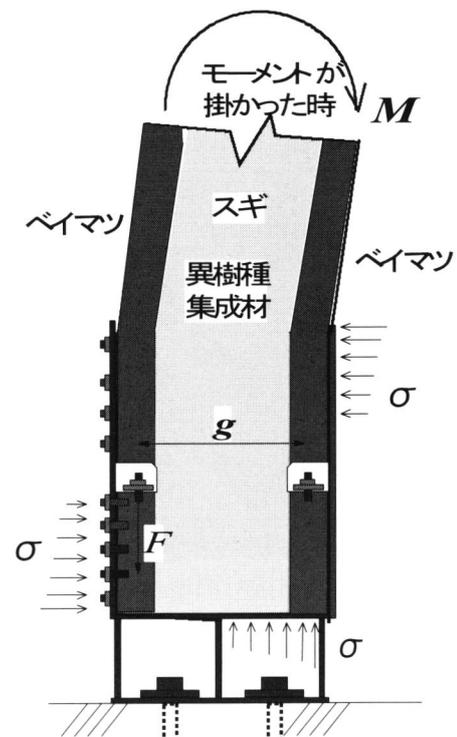


図8：締め付け型フランジ引きボルト接合

の 1/6 という変形量は極めて大きな変形で、通常はここまで変形すると門型ラーメンは部材のどこかが破壊してしまうものですが、今回開発したラーメン構造の場合、鉄板の板厚を含め、各部材の寸法のバランスがうまくとれていたため、変形能力の極めて大きな鉄の柱脚が先に降伏し（鉄はある値以上の応力になると変形だけが進み外部からのエネルギーを吸収する能力が大きい、その変形が進み出す最初の荷重を降伏と呼ぶ）変形能力の少ない木材に過剰な力が伝わらない状態が生み出されたので、集成材で破壊が先行することはありませんでした。

このような変形能力の極めて大きなラーメン構造を実現することが、現在木造ラーメン構造の開発を進めている多くの人達の目的です。そういう意味から言えば、我々の研究は一応目標に到達出来たと言えましょう。この研究の成果を受けて実際に建設された SI 住宅の内部の写真を写真 9 に示します。内部間仕切りのない自由な空間が生み出されていることが分かります。

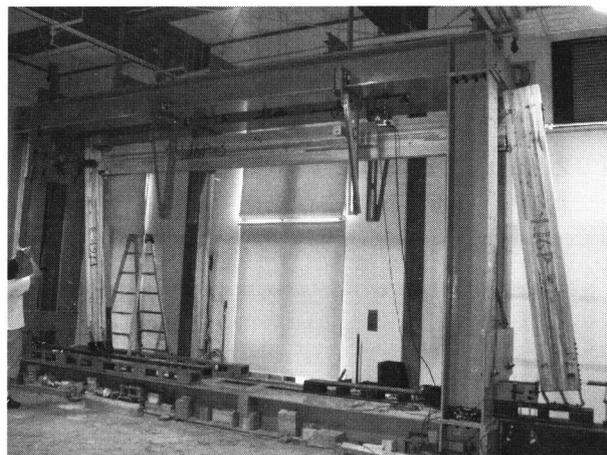


写真 8：スパン 6 m の異樹種集成材門型ラーメン構造の実大加力実験における終局状態

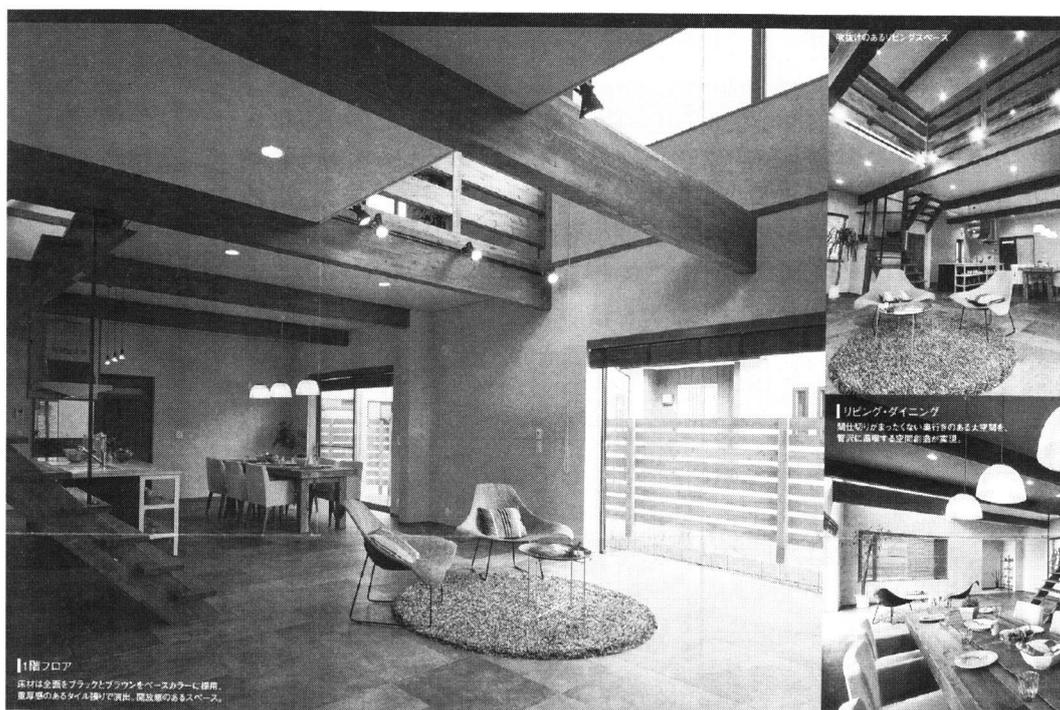


写真 9：異樹種集成材門型ラーメン構造を利用して建設された SI 住宅の内観（住宅メーカーの宣伝用写真を複写したもの）

5. おわりに

大規模な集成材建築への適用から始まった木造ラーメン構造は、最近では戸建て住宅への応用が盛んになっています。しかし、この構造は見よう見まねで造ると大変危険です。しっかりとした構造計算に基づいた余裕のある設計を心がけることが大切です。