

講演名：高層木造の潮流とその免震化

講演目次：(1)これまで木造はどう展開してきたか

(2)地球温暖化対策としての建築分野での木材利用の促進

(3)日本でなぜ海外の木造ができないか

(4)日本の技術者は木材を正しく理解できているか？

(5)6 階建て以上の建築物 これから

(6)WOODRISE 2022

(7)これからの中大規模木造

(1)これまで木造はどう展開してきたか

2000 年に基準法の改正があり、木造建築はそれまで 3 階建て以下であったのが、耐火的な性能を持っているものに関しては、4 階建て以上に木材を適用してもよいことになった。その当時、さまざまなプロジェクトが実施されるなか、木質複合建築構造技術開発が行われ 4 階建て以上の木造建築が実現した。

これまで、中層大規模木造の構造特性、工法開発、あるいは木材を用いた建築構造技術の開発を行ってきた。それらには、純木造ばかりではなく、鉄筋コンクリート造と木造の組合せや鉄骨造と木造などの組み合わせなど、新しい木造建築の開発も含まれている。本講演では、木造建築構造にかかるような最新情報を提供する。

アメリカでは、木造建築に関して基準法を最近変えた。IBC(国際ビルディングコード)が基準となるコード、モデルコードがあり、それを採用するかどうかは各州が決める。オレゴン州からの提案が、国際ビルディングコードに採用されて、それが今全米に広がったと聞いている。これまでは、6 階建てであったが、9 階建てまで良くなり、12 階建て、さらに 20 階建て建築物が建てられるようになった。ただし、6 階建ての時は木材を見えるように使ってよいが、12 階建てになると部分的にカバーをする。さらに、20 階建てになると全体を被覆するような、石膏ボード等で被覆するようなことが必要となる。それでかなりの数の木造建築が、アメリカで完成あるいは検討され、このコードを超えて 27 階というような建物が実現しつつあるという状況である。

そんな中で、耐震性能評価として、米国サンディエゴで 10 階建ての木造建築の振動台実験が行われ、そのプロジェクトに参加した。ここで見ていただく実験は、地震波がノースリッジの 475 年に 1 回再現期間のものである。その後、日本の告示波も実験で実施した。ノースリッジの 475 年に 1 回再現期間の地震波では、高次モードが出て、層間変形は大きくなるが、頂部の変形はそれほど大きくならなかった。一方、告示波では 1 次モードで揺れるので非常に頂部の変形が大きいということが分かった。

日本では、林野庁をはじめとして木材を建築物に使っていこうという働きかけがあり、さまざまな補助事業であったり、委託事業だったりを実証している。木造建築の建てやすい環境を作ろうというので、国が予算をつけて実施をしている。事例を以下に紹介する。

#### ① CLT

CLT に関して、設計モデルの簡易化、建築物の設計施工マニュアルなどが検討されている。これまで、設計モデルなどかなり難しいモデル化がなされている。これは、挙動がまだ不明確なところがあったため、

簡易化が難しかった。しかし、検討が進められ、簡易モデルが来年の 1 月に出版予定の設計施工マニュアル改定版に記述されることになった。

## ② CLT+鉄骨梁のシステム

CLT プラス鉄骨梁のシステム、CLT はそれなりに強い、それは板厚があるためであって、圧縮と引張はもとの木材の強度には劣るが、せん断強度はそのまま維持していて 2.7MPa くらいとなる。しかし、靱性がなかなかとれないので鉄骨の梁と組み合わせて使う。CLT+鉄骨梁を使ったシステムをマニュアル改定に入れるべく、準備をしている。

## ③ 基準法関係

基準法関係に関して、下の階は鉄筋コンクリートや鉄骨造で上の木造を使った場合、ルート 3 となる。そのため、木造の設計が結構大変になる。ルート 1 の範囲内で建てるというのを増やしていくため、Fs の緩和やルートの整理が基準整備促進事業の中で行われて、去年終了した。これから法令改正あるいは、技術的背景として黄色本などに取り入れられるであろう。RC と木の階の剛性比が 15:1 ぐらいあれば、保有水平耐力の割増は必要ない。また、ルート 1 でできる範囲というのを増やしていくことももろろんでいる。

## ④ 鉄筋コンクリート造フレームに CLT の壁、あるいは S 造フレームと CLT の壁の構造に対して、Ds でどう決めていってかという話

保有水平耐力計算の際に、今の RC 基準の中で CLT 壁をどう読むか、S 基準の中でどう読むかというのを検討している。後ほど、紹介する。

## ⑤ 木とコンクリートの複合床の評価

木とコンクリートの複合床の評価に関して、これは音、火、構造などそれぞれ課題がある。海外では普通に行われている事例として木床の上にトップコンと称して、5 ~6cm ぐらいのコンクリートを打ち遮音性を高め、それで水平構面も取るなどしている。それについて、日本においても実験等を実施しているので協力している。

## ⑥ CLT 壁のロッキング挙動

前述したように CLT 壁はそれなりに強いので、CLT 周辺接合部が先行破壊し、ロッキング挙動が起こる。このロッキング壁の水平抵抗性能の評価手法について検討している。

## ⑦ CTL のラミナの最適配置

日本は CTL のラミナについては同一の厚さでラミナ厚も制限があるが、海外では厚いものと薄いものをうまく組み合わせた不等厚の最適配置が検討されている。日本はまだ認められていない。そんな実験的な検証を実施中である。

## ⑧ SHM：ストラクチャルヘルスマニタリングシステム

東大の楠の先生と一緒にストラクチャルヘルスマニタリングシステムの開発、そして検証検討を実施している。地震後の健全性を評価するため、加速度計を建物に設置する。先ほどの 10 階建ての振動台実験で、ヘルスマニタリングシステム適用し、確認した。実験直後にどのくらい変形するのかが、すぐ分かり有効性を確認した。

## ⑨ 混構造の合理性（資料 P2 左上）

混構造についての原稿を、ストラクチャーと鉄鋼技術と建築技術で掲載した。

特に 10 階建てぐらいになると混構造にした方が合理性があるのではないかと考えている。合理性とは、コスト、材料、木材という材料を使っていく上での合理性という意味をさす。6 階建てぐらいだと、木造でも十分コストフィジブルものができる可能性があると思う。

## (2)地球温暖化対策としての建築分野での木材利用の促進（資料 P2 右上）

地球温暖化対策と建築分野での木材利用の促進に関して日本学術会議で提言している。現在の森林の状況を把握したうえで、今後の木材利用について提言に盛り込んでいる。いわゆる川上（山）から川下（建築）まで一気通貫な検討が必要であり、分断されている学術分野をつなぐようなことも求められている。

海外は、先ほどの階数制限が緩和されたアメリカの例だけでなく、ヨーロッパでも木造を建てていくという方向に向かっていて、世界的に木造の建てやすい環境の整理が行われている。これは CO<sub>2</sub> の排出削減と資源循環材料である木材を有効利用しようという動きである。海外においても、純木造は 10 階建てぐらいという印象がある。例えば、ミラノ、メルボルン、ロンドンと、10 階建てぐらいの建築物が純木造で建てられている。それを超える階数では、混合構造になっている。RC や S との平面混構造が多い印象がある。

日本はその海外の CO<sub>2</sub> を排出抑制しようというのと違うアプローチをしなければいけない事情がある。つまり我が国で育った森林資源の活用である。（資料 P3 右下）横軸が齢級で、5 年が 1 である。6 だと、これは 30 年に相当する。縦軸が万 ha を示す。この図は森林資源がどれくらいあるか分かることを示すものである。戦後に木材は枯渇してしまった。その枯渇をした理由というのは燃料等に使われたことや鉄などに代わって建築物を建てるのに使われたから。さらに高度経済成長においてコンクリートの型枠材などとしても使われたといわれている。そして森林の保護政策のもと植林をおこなった。その植林したものが利用期にある。これを使わなければならない。日本には海外とは異なる特殊な事情がある。

日本の木材資源（資料 P4 左上）をみると、森林面積が 68%位である。横軸に森林率を、縦軸に 1 人当たりの森林面積を取っていくと、一般的には 0.4 ヘクタール/人ぐらいが国内で消費するのに釣り合うところであるが、日本については 0.2 しかない。よって、日本は木材を輸入しなければいけないということである。現在の自給率が 30%ぐらいであるから、20%ずつ使われずに余っていくということでもある。その 50%にするというのが林野庁の目標である。50%というのは 0.40ha/人を 2 で割った値で、日本の 0.2 であるからちょうどよい値である。

## (3)日本でなぜ海外の木造ができないか（資料 P4 右上）

理由として以下があげられる。

### ① 木材の適材適所を許してくれない

日本で海外のような木造ができない理由は、「木材の適材適所を許してくれない」ということがあげられる。「木で何でもできると思っている人」は、とにかく木で作るのだから木ですべてを作る。これには無理も生じる。すべてを木で作ると、その結果、コスト的にも技術的にも無理が出てくるということである。一方、「木ではできないと思っている人」は、木は設計上の配慮が必要で面倒くさいと思うし、柱や壁、床など気なくても簡単に、そして安くできたりもする。そうなれば環境のことは考えず、構造合理性だけを考えて、全て木以外になってしまう。

### ② 慎重さ、合理性を重んじる

これは日本人の特性だと思っているが、まずは合議的にルールを作って、そこから建築物が建てられていく。最初は大臣認定などで数棟は建つが、が普及のためにはルール作りが必要ということになる。CLT の場合、前述した不等厚だとか、ラミナの枚数の重ね方だとか、必ず基本的に上下対称になるとかの製造基準がある。しかし、実は左右対称、上下対称にしないほうが CLT の設計上、合理性が出るような時もある。ただ、そのような新しい材料は大臣認定となるので、なかなか簡単にはいかない。新しい技術の受け皿はあるものの普及に向けたルール作りはかなり時間のかかる作業である。

### ③ 外力が異なる。

海外で木造建築が 10 階建て 20 階建てが立つようになったのは地震に対する技術の進歩ではなく、火災に対する知識、知見の蓄積による。ということで、耐力に関して、鉛直荷重に対しての設計が主になるところに海外と日本の違いがある。海外の高層建物はツーバイフォーで 6 階建てくらいが建てられていて、中が詰まった CLT になり鉛直荷重支持能力が増えたので低層の延長で高層が構造的に可能となった。そして厚い板は燃えるのが容易ではなく、さらにゆっくりと燃えるので避難時間も稼げて高層建築が実現した。これが 10 階建てくらいまでの印象。それ以上高くなると混構造となる。カナダの 18 階建ての例をみると、各階の柱と柱の間には床が挟まるが、柱と柱の間は金物で繋いで変形の大きくなるめり込みを起こさせないような配慮がされている。水平力に関しても他の海外事例でも、RCのコアがあったり、鉄骨のフレームがあったり、あるいはオーストリアウィーンの 24 階建てでも鉄骨のフレームがある。前述したように高層になると、混合建築物にならざるを得ないのではないか。

### (4)日本の技術者は木材を正しく理解できているか？（資料 P6 左上）

日本では、木材をずっと使ってきているが、正しく理解をできているか疑問がある。正しく理解していればそのまま外壁に使おうといった発想にはならないと思う。将来、負の遺産にならないように木材のことを知る必要がある。

#### ① 木材の特徴（資料 P6 右上～左下）

まずこのビデオを見ていただきたい。25℃で 61%の環境に木材を置いている。ここで、湿度を上げると上側に曲がる。湿気を下げると逆側に向かって変形が起こる。使用した木材は、極端に曲がるように作っているため、実際の木材、ここまで曲がることはないが、このように湿気がある時に、変形、湿度によってかなり形を変えることができる。こんなことも可能な材料なのである。一方で、なにかこれをうまく利用できないか検討を行っている。

#### ② 木材の腐朽（資料 P6 右下）

木材の腐朽は、栄養素と酸素と水と温度が供給されて、この 4 つの条件が揃うと木材の腐朽が生じる。バンクーバーでは 18 階建てが建っているが、バンクーバーの冬は雨が多く、夏は乾燥する。冬場は温度の条件が揃わないし、夏場は乾燥のため条件が揃わない。一方、非常に蒸し暑い環境の日本では、高温多湿に耐えられるように考えていかなければいけない。地震などは技術で克服ができるが、高温多湿も同じように特性を知り、技術によって対応が求められる。

#### ③ 構造 機能性（常時）/地震/風/ほか（非常時）（資料 P7 左上）

木材のみの木造建築も、これまで地震被害をたくさん受けてきた。最近、雨が多く土砂災害が起こるが、木造は軽いので、土砂災害に対してもあまり大きな抵抗力を持っていない。都市火災が起きた時を

考えると、木造に対しての不安がある。津波発生時に、多くの建物が流されている。こういった不安点に対して、海外では技術が進んで木造建築の高層化ができた。日本もそんなふうに技術を持って接していかなければいけない。木造は塑性化する部材や接合を明確・確実に評価できないこともあり現段階では保有水平耐力計算には実験が伴う。制振構造も同様に実験が不可欠である。そうすると現段階では上部構造を塑性化させない免震化が最もわかりやすい。私は木造は免震化する、そういう建築物が増えてもよいのではないかと思う。「木が好きの人」は、木造は粘りがあるというような話をするところがあるが、ここで粘りというのは大きな変形にまで至らしめることができることを指しているような気がする。

#### (5)6 階建て以上の建築物 これから (資料 P7 右上)

6 階建て以上で木材を使って建築物を作っていくとなると、構造材料の全てが木ではないことが多くなるのではないかと思っている。全ての部材が木造ではないがバランスよく構造を作り、仕上げとして木材を貼るというのもある。木を構造、鉛直荷重支持部材として使うと耐火の問題もあり、「あらかし」にはできない。先ほどの鉄筋コンクリートや鉄骨造のフレームに木材の壁を挿入するという話は、鉛直荷重を支持しないので、基本的には耐火被覆がいらぬ。耐火被覆がいらぬということは、そのままの材料を見せて使える。ただ、そのまま構造が仕上げになるというのは施工がかなり難しい。構造の施工の現場に仕上げとして使われる材料がいきなり入ってくるため、養生が必要となる。これはこれで面倒なようである。

#### ・他構造とのハイブリットから CLT 構造へ (資料 P7 左上)

新たな思想、設計供給体制、これまでの木造とは違う概念で木を使った建築というのを作っていく必要があるというので、1999 年から総合技術開発プロジェクトをはじめとして検討を実施してきた。

鉄筋コンクリート造や鉄骨造フレームと CLT 耐震壁では、木を壊してフレームを壊さない方がよいのではないかという話があった。フレーム壊さないで木だけ壊した時は木材を入れ替えてしまえば、まだ使えることになる。結局、これを実現しようとする非常に大変なことになる。木材のばらつきが非常に大きいので、木材を壊すためには保証設計を 2 倍ぐらいにすることになる。そのため、フレーム部分は大きくなってしまふ。

・設計耐力と保証設計 (資料 P7 右下) 木材は変動係数 15%ぐらいあるため保証設計のために周辺部材の強度を 1.7~2.0 倍とかそれぐらいになる。木の設計強度は 1.0 なのであるが、それを保証するために部材断面が大きくなり、結果として木の壁がなくても成立するような構造になる。そうすると、木で壊すより、もっと性能が確実な材料で壊すことを考えて設計した方がよいということになる。終局設計をするからこういう面倒なことが起こるので、免震化をするというの、合理化の 1 つの方向である。

#### ・木質系混構造建築物の保有性能計算の技術基準に関する検討 (資料 P7 右上)

以上のスタディは、基準整備促進事業でやっている木質系混合構造建築物の保有水平耐力の計算の技術基準に関する検討で実施している。似たような混構造の例としては、木の梁と床スラブはこれまでもあるが、CLT とコンクリートの床というのもある。また、CLT パネル工法は設計施工マニュアルで設計家のうだが、今、設計施工マニュアルで使っている CLT の性能値がどれくらいになっているかという、せん断応力度はせん断強度に対して 15%ぐらい、曲げ応力度は曲げ強度に対する比で 65%である。ただ、この 65%というのは片持ち柱的に使った値である。上下の梁で拘束をされ、モーメントの反極点が真ん中にあると仮定すると、32.5%となる。このようにせん断応力度、曲げ応力度も非常に低い値で設計している。つまり、強度を十分に活かさない。そのため、木材の材積が増えてコストが上がってしまう。最大で

3 倍に耐力をあげることができるわけだが、そうすれば CLT 壁のコストは 1/3 になるわけである。これを実現するために鋼の梁を入れる工法の検討も実施している。木の梁は曲げ実験すると少し降伏した後に脆性的に壊れる。梁の高さを増やせば、木の梁の方で壊れなくなるが、木の材積が今度どんどん増えていく。それだったらもう木のはりを鋼に変えようということである。木の 660mm の梁高さに対して、鉄骨の梁、厚み、幅厚比等で変わってくると思うが、半分ぐらいの梁高さにすることもできる。さらに梁側で降伏をさせれば塑性率も大きくとれ合理的である。

#### (6) WOODRISE 2022 (資料 P12 右下～P 13 左下)

昨年、スロベニアで開催された。ここでのテーマはレトロフィッティング ウィズ ティンバーである。木材を使って、改修を行うというような話で、これが世界中で行われている。これは一つの例であるが、鉄筋コンクリート造の省エネ改修、さらには耐震改修で、木のパネルを外側から貼って耐震補強をし、断熱改修省エネ改修をしている。耐震改修により性能が向上したので、上部階の床面積を増やしてもいる。日本も省エネで木材を使っていく議論が盛んだが、新築がメインで既存の改修は未検討である。もう一つの例として、4 階建てのホテルの事例を示したい。下層を耐震補修して、上に 2 層分 CLT で足して 6 階建てにしている。外周、さらには内部に木のパネルを入れて断熱改修も行っている。日本で、今後実施されるかは、難しいところがあるが、既存の建築物を何とかしなければいけない、というのは世界共通の問題だと思う。

#### (7) これからの中大規模木造 (資料 P13 右下以下)

1990 年頃に杉山英男先生が、集成材メーカーがクローズド作業しているようでは、北米の集成材と価格競争ができるわけがないし、国産の金具・金物プレートの発明、それらを用いた接合システムの開発が強く望まれているという話があった。30 年経ったが、何も変わっていない。集成材建築物を建てよ、CLT で建築物を建てよ、LVL で建てよ、あるいは何々で建てよって言ったとしても、接合方法を 1 から考える必要があり、そして、その性能を実験で確かめるのは 30 年前とさほど変わっていない。これは、接合部の降伏点はわかるようになって許容応力度計算はできるが、靱性がよく分からない。どれぐらいの塑性化が図れるかっていうのが依然分からないというのが木材の接合部である。結局のところ許容応力度計算しかできない。仮に変形性能が分かったとしても、実はそんな簡単に  $D_s$  は決められない。そうすると、免震化を図らざるを得なくなってくるという状況が生まれてもいる。昔  $D_s$  の提案がされた時は、様々な議論のうえで、理論というよりは現場の設計を考えながら  $D_s$  は決められている。新耐震設計法の開発というので、81 年の改正の前に実施したプロジェクトであるが、塑性率は誤解を恐れずいえば鉛筆をなめて決めている。もちろんいくつか根拠的なことは書いてあるが、一例であって、全ての構造部材、構造形式に対して確認がされているわけではない。よって、現状できあがっている建物と新しく作られる建物の安全性を比較したうえで  $D_s$  は決める必要がある。木造は参照すべきものがないので、 $D_s$  の定義はとても難しい。木造だけで考え方を考えることはできようが、ほかの構造ともある程度レベルをそろえる必要があり、今後集中的な議論が必要と考えている。

木を使ったら木材を見せたいというのは海外もそうだし、日本も同じである。海外では適材適当に木材を利用して、工期短縮もはれると言っている。一方で日本はまだやったことのない構造や新たな接合など、検討する必要があるので、思い切ったことはできず、工期のメリットもさほど活かしていないというのが今

の状況ではないかと思っている。これらが解消されて、最初から工期が組めるように技術的な知見と言うか、施工的な知見が作られていかなければいけないようにも思われる。いろいろ検討すべき問題があることは間違いがない。

世界で純木造の9階建てが最初に立って、10年後、混合構造であったが20階建てぐらいができた。日本は最近11階建てとか10階建てができるようになった。海外に追いついているかどうかはわからないが、もうちょっと検討を深めていかないと木材を使った建築物というのが普及していかないと思う。相談等があれば、お受けするので、何かあればお知らせいただきたい。

1時間ほど話をさせていただきました。ご清聴をどうもありがとうございました。