

木構造を考える

～意匠設計者のための木構造 WEB 講座～

第 4 回 木構法の迷路の先に見えるもの

阪神・淡路大震災 耐力壁の配置 揺れ 接合部の仕様 限界耐力計算 伝統的軸組構法 必要壁量
床倍率 接合部倍率 許容応力度設計 剛性 前提条件 適用範囲 不確実性 自然現象 修復 循環型

はじめに

本講座も最終回になりました。今回は、木構造の構造設計の現状について概説し、今後の課題について私見を述べます。最後に、読者から寄せられた感想文を寄稿者の了解を得て紹介します。

阪神・淡路大震災と法改定

1981 年から施行された改正基準法は、それまでの耐震基準を大幅に変えるものでしたが、木構造の分野は 2 段階設計など主要な内容が見送られ、RC 造や S 造にくらべて著しく不十分な内容に終わりました。その後も木構造は依然として壁量規定を中心にして耐震設計が行われてきましたが、1995 年 1 月、「**阪神・淡路大震災**」が発生し、木造建物の大破、倒壊が原因で全体の約 8 割、4000 人を超える人たちが亡くなりました。この震災は木造建物の耐震安全性に疑問を投げ掛け、法改定、新法律制定の動きを社会的に後押ししました。震災から 5 年後の 2000 年、急ピッチで推し進められた研究成果がまとまり、木構造の情勢が大きく変わりました。基準法が再び大幅に改訂され、また、新しく「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（俗称、品確法）という、住宅に対象を限った法律が登場しました。

基準法で初めて耐力壁の配置に定量的な規定が導入された

2000 年から施行された改正基準法では木構造の耐震規定にいろいろと手が入れましたが、最も注目したいのは、**耐力壁の配置**について初めて定量的な規定が導入されたことです（建告 1352 号）。それまでは、「耐力壁を釣り合いよく配置しなければならない」と壁量計算が成り立つための前提として定めているだけで、釣り合いよい配置とはどのようなものかについては設計者の判断に委ねられていました。このため、壁量に較べて壁の配置については設計者の関心が薄く、首を傾げるような壁配置の建物が出現しました。阪神・淡路大震災後の調査でまず木造建物の被害原因として最初に指摘されたのが壁の偏在でした。道路に面し間口が狭い建物に被害が多かったのですが、これらの建物は、道路側は出入口や店舗部分のため極端に耐力壁が不足し、全体としてみると耐力壁が奥の方に偏って配置されていました。このような建物は、たとえ壁の量は十分であっても地震時に大破や倒壊につながる有害な**揺れ**振動が生じやすくなるのです。このような揺れを防ぐためには、壁を平面的にバランス良く配置するとともに、建物の外壁面に一定以上の壁を設けることが有効です。このような設計を促すために、告示に「四分割法」と俗称される壁配置についての簡略的な検証法が導入され、現行の基準法では、「壁量」と「壁配置」の 2 つの規定を耐震設計の柱としています。

継手・仕口に明確な仕様規定が設けられた

もうひとつ注目して欲しいのは、軸組の接合部である仕口・継手の仕様が一部分ですが明確にされ、強化されたことです（建告 1460 号）。以前は「接合部は存在応力を伝えるように」という内容で、これも上に述べた壁の配置と同じように曖昧さが残る規定でした。震災では、柱が土台から抜けていたり、筋かいがはずれていたりして、揺れの早い段階から壁が耐力を失ったとみられるものが多かったことが指摘されました。そこで、この改定では筋かい端部、耐力壁の柱頭、柱脚の接合部について仕様が具体化されました。壁の仕様ごとに接合部の仕様が定められていますが、これは耐力壁が最終段階まで耐力を発揮できるように接合部が先に破壊しないようにという考え方で内容が決められたからです。ところが、耐力壁の被害を観察すると、上に述べたように接合部の破壊で耐力を失っている場合が多く、壁の耐力は現実的にみれば接合部の破壊を考慮して決めるべきではないかという考えが出てきます。また、建物に靱性を持たせるためには接合部の設計が重要になることを考え併せると接合部の仕様を壁の仕様に応じて規定するやり方には検討の余地があると思います。ともあれ、木構造は接合部で構造性能が決まると言われ続けながら、耐力、剛性、破壊形式の評価が難しく、いままでそこに検討のメスが入られる事が少なかったので、金物の開発、実験などによりようやく一部分のディテールが規定できるようになってきたことは一歩前進と考えたいと思います。

限界耐力計算法が新しく導入された

改正基準法では耐震性能の検証法として、「**限界耐力計算**」と呼ぶ計算法が新たに導入され、新たな計算ルートが設けられました（法令第 82 条；建告 1457 号）。この方法は、地震力を加速度応答スペクトルという形で想定し、建物の $P-\delta$ 関係（復元力特性と呼ぶ）をもとに地震時の応答値を直接推定し、事前に定めた安全性能目標値と比較して性能を検証します。地震力の定め方といい、直接、動的応答値を推定するやり方といい、いかにも動的計算法という感じで敷居が高そうに思われますが、仕様に制約されることが少ない手法であるので構造種別（木造、RC 造、S 造）や構法種別（壁構造、ラーメン構造など）に関わらず広く適用できるという特徴を持っています。

木構造の分野では、柱の曲げ変形能力を主たる耐震要素とする**伝統的軸組構法**と呼ばれる造りを工夫して建物を建てたいという要望が根強くあります。それを実現しようとする基準法の耐震規定は大きな障碍となります。基準法では、耐力壁を唯一の耐震要素として認め、耐震規定はいわゆる在来軸組工法建物を対象にして整備してきているからです。前回の図 3 に久田俊彦氏が行った各種耐力壁の水平加力実験結果を示しましたが、この図の中で伝統的構法建物の中心的な耐力要素である「柱梁のみ」、「垂壁（小舞土壁）」は、耐力に注目すると筋かい壁のそれと較べてかなり小さいことがわかります。当時は耐震設計といえば耐力中心の考え方だったので、1950 年の最初の基準法で伝統的構法のこれらの耐力要素は、耐力は無きに等しいと考えられて無視されたのだと想像します。1981 年以降、耐震性能の評価に「塑性変形能力（粘り）」を考慮するようになったことはすでに述べましたが、それに加えて 2000 年、建物の粘りの他に減衰性能を考慮する限界耐力計算法が導入されて建物の終局時の動的性能を直接評価する新ルートが設けられたことは、靱性型建物である伝統的軸組構法建物の耐震性能がようやく評価できる環境が整ったと言えると思います。しかしながら実際は、この構法の建物は 2007 年の法改正で「構造計算適合性判定」が必要とされ、現時点でも基準法では特別扱いされていてなかなか実現しにくい状況にあります。行政が柔軟に制度を運用するなど、早急に改善が望まれるところです。

品確法と新壁量計算

従来から基準法壁量規定のうち、いわゆる**必要壁量**（第3回講座の（D）式右辺）の考え方にはいろいろ問題があると指摘されていました。主なものを挙げますと、地震力の1/3は非耐力部分が負担していると仮定している、総2階建を想定している、固定荷重が現状から見て低めに見積もられている、積雪荷重が考慮されていない、ことなどです。いずれも、根拠が不明確であり、最近の建物の実情に合っていないという理由からです。2000年に施行された品確法は、これら必要壁量の問題点を考慮して作成されており、明らかに基準法壁量規定よりも工学的に練られた内容になっています。この法律は性能表示制度を中核に据えて木造住宅の品質を向上させることを目的に作られたものですが、その中の「構造の安定」についての性能の検証法は壁量、壁配置の計算が中心に据えられ、基準法との整合性を重視した内容になっていますが、必要壁量の取り扱いに大きな差異があることを指摘しておきたいと思います。

必要壁量についてもう一つ指摘しておきたいことは、品確法の基準が基準法のそれの上乗せ基準になっていることです。地震に対する性能の考え方をみると、性能の高さを3つの等級で表し、このうち一番低い等級1が「建築基準法を満たしたもの」、等級2、3が等級1の必要壁量のそれぞれ25%、50%増しとして、耐震性能のレベルを決めています。この法律にもとづいて木造建物の性能を評価、表示するのは任意なので、壁量規定は基準法壁量規定と品確法壁量規定との2本立てになるので混乱する人もあるのではないかと思います。

私は必要壁量という形で想定地震力の大きさを表すことが今の時点で果たして妥当なのかという疑問を持っています。地震力をどのように想定しているのかが明瞭でなく許容応力度設計、保有水平耐力設計などの上位にある設計法との関連が掴みにくいためです。壁量計算を行った経験のある人は、この計算で地震力を一度も計算する場面がないのに不思議さを感じたことがあると思います。

水平構面の保有耐力と床倍率という考え方

上で見たように品確法における必要壁量の改良は基準法壁量規定の問題点から考えれば当然の改良と言ってもいいと思いますが、もうひとつ注目すべき大きな改良点があります。「**床倍率**」という概念を新たに導入したことです。床組や小屋ばり組などの水平面の保有耐力をその仕様に依じて床倍率という形で表し、設計床面の耐震性能を検討することにしたのです。床面は鉛直方向の固定、積載荷重を支えるだけではなく、地震時には地震力を周囲の耐力壁に伝える重要な役割を担っています。向かい合う耐力壁面が離れている大きい空間や、床面に大きい吹抜けがある場合などは、そうでない場合に較べて周りの耐力壁に地震力を伝えるために一層床の作りは強くしなければならないわけですが、果たしてどの程度強くしたらよいのか、といったときの判断基準を提供するものです。ただし、ここでも耐力壁よりも先に床が壊れないよう床の必要耐力が決められていることに留意して下さい。なお、品確法では接合部の保有耐力についても、接合部の仕様に依じて「**接合部倍率**」という形で表しています。

品確法の壁量計算は、このように壁量、壁配置の検証を中心にして床面や接合部の保有耐力についても検討することとしており、建物の耐震性能検証法としては、地震力の流れを相当に意識した方法になっていると評価できます。しかし、取り扱いを基準法並に簡便にしようとして各部位の保有耐力を倍率というものでまとめあげている点は、根拠の明瞭さの点で評価が分かれるところだと思います。

木構造における許容応力度設計

木構造でスタンダードになっている壁量規定は、構造設計の点からは許容応力度設計よりは保有水平耐力設計の考え方に親和性があったために、木構造の分野では許容応力度設計が設計法として整備されるのが遅れたのではないかと考えています。曲がりなりにも系統的な内容に整備されたと言えるのは、2001年、(財)日本住宅・木材技術センターの「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」の刊行、更に言えば2008年の改訂版刊行からだと言っていると思います。この改訂版が現在、実務ではスタンダードな存在になっていますが、現時点でも十分整った内容になっているとは言い難く、使用上幾つかの制約があり、また注意しなければならない点も見受けられます。幾つか挙げてみますと、まずタイトルが示す通り、対象は住宅に限定しています。しかも、軸組工法を謳っていますが、扱っている建物は壁を耐力要素とするいわゆる在来軸組工法建物で、伝統工法建物、集成材などを使用したラーメン構造建物など、柱の曲げ能力を活用する軸組工法の建物は対象外とされていることです。適用範囲が限定されていることにまず注意して下さい。

2つ目は、鉛直荷重に対しては梁や柱などの部材単位で許容応力度の検定を行いますが、地震力などの水平荷重に対しては、耐力壁や床構面などの耐力要素の単位で許容せん断耐力の検定を行うという方法を標準にしていることです。先に見たように、現行の耐震基準では地震の規模に応じて2段階設計を行う方針になっていますが、木構法では許容応力度設計の中に保有耐力を検証する内容を組み込んで一本化しています。このような木構法特有のやり方は許容応力度設計の明快さを損なう点で私には納得できるものではありません。

第3回の「木構造に許容応力度設計を持ち込むことは難しかった」で述べたように、許容応力度設計の主役は、耐力ではなくて「剛性」です。弾性変形範囲内では剛性によって力の分担が把握でき変形が容易に算定できます。いっぽう剛性分布をコントロールすることによって力の流れをコントロールすることができるので、RC造やS造では構造計画に有効な方法として広く利用されています。木造住宅の設計を主に行っている事務所でも許容応力度設計を標準にしているところが次第に出てきていますが、施主に耐震性能を合理的に説明する必要から使い始めているようです。力の流れを具体的に検証する方法として設計に積極的に使って欲しいと思います。

設計法と適用範囲

木構造の構造設計、特に地震に対する計算法はいままで述べたようにいろいろな種類がありますが、これらの関連について少し触れたいと思います。地震に対する計算法であれば原則、地震力、材種、耐力要素、床、接合部、保有耐力、塑性変形などを考慮に入れて内容を作ることになりますが、そのままでは内容が複雑、膨大になり実務的には使いにくいので、いろいろな仮定を入れて内容を簡略にします。このような仮定を計算法の前提条件と呼びますが、この前提条件が多いほど方法は簡略化されますが方法の適用範囲は逆に狭くなっていくのが普通です。この逆も成り立ちます。このように考えて木構法で用いられる計算法を相互比較したのが図1です。

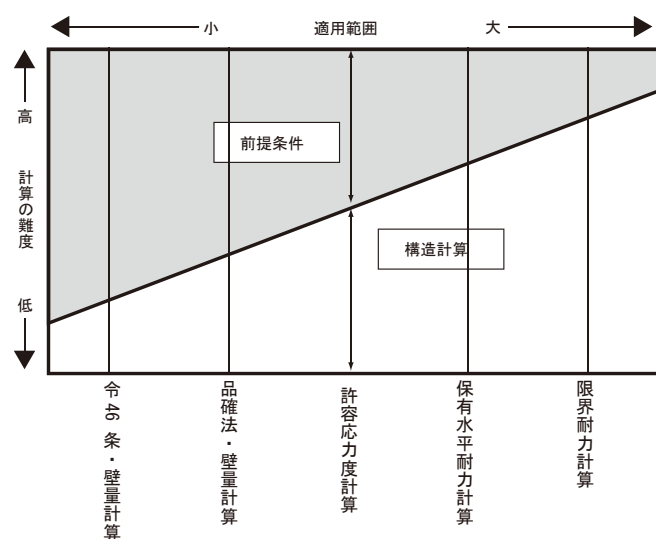


図1 各種計算法とその位置づけ

もっとも簡便な基準法壁量計算はもっとも適用範囲が狭く（在来軸組工法建物だけ）、もっとも詳細な計算を行う限界耐力計算がもっとも適用範囲が広い方法であることを模式的に示しています。品確法壁量計算は基準法のそれよりも許容応力度計算に近い手法と捉えることが出来ます。適用範囲を超えて適用することは出来ないという認識に従えば、より創造的に自由に建物を設計しようとする場合にはより制約が少ない高度な設計法を使用する必要が出てくるのです。

不確実性と工学的判断の間

木構造の耐震設計についていままで述べてきましたが、その設計には常に「**不確実性**」が付き纏うということを指摘しておきたいと思います。その代表が地震力です。

地震力は一般的に言えば、地震動が建物に及ぼす作用です。地震動は時々刻々、複雑に変化しますが、その変化の様子は地盤の性質、周囲の地形に左右されることはもちろん、地震の発生メカニズム、地盤と震源地間の距離などに大きく影響を受ける事が知られています。また、建物の作りによって地震動の作用は大きく違ってきます。このようなことを考えると、建物に働く地震力はひとつとして同じものはないということになります。このような性格をもつ地震力を耐震設計では今までどのように扱ってきたのでしょうか。

1950年当時は、地震力は建物重量の2割に相当する力が水平に作用すると考えました。1981年以降は、中地震では建物重量の2割の力、大地震ではその5倍の10割の力を大きさの基準値とし、地盤の影響、建物の固有周期などを考慮して地震力を表すことにしました。そして2000年には、それまで観測された過去の地震を統計的にまとめて、地盤、建物の固有周期、減衰に応じて建物に生じる最大加速度を推定する加速度応答スペクトルというもので地震力を表す方法を編み出しました。このように地震力は静的な取り扱いからより動的な扱いへ、簡略的なものからより精緻なものへと進化してきたと言えますが、地震動そのものはいまだに完全には予測できない自然現象です。実際、3.11 東日本大震災を引き起こした今回の巨大地震は、マグニチュードの大きさ（M9.0）、揺れの継続時間（3分間近い）、その後の余震回数、のどれをとってみてもいままでの想定を超えるものと考えられています。このように、**自然現象**を相手にしている限りその影響を確定量として表すことは基本的に限界があるということを今回の地震は教えていると思います。いま私たちが耐震設計で扱っている地震力は、どんなに精緻に見えても不確実性を有する自然現象を取り扱う一つの「工学的判断」であるという理解をもって常に地震力を考えて欲しいと思います。

木構造の分野では、自然材料である木材を主たる構造材として利用します。木材も上の地震力と同じように、厳密には同じものはひとつとしてないと言えると思います。このような自然材料の強度や剛性を、どのような工学的判断でもって扱っているのか、この点についても同様に注意を払って欲しいと思います。

3.11 東日本大震災が問いかけるもの

東日本大震災を目の当たりにして、建築構造の一研究者として感じたことがあります。傾いたり、外壁材が剥落したりしていながら、あの激しい揺れに耐え残った建物が建て直されることなく取り壊され、新たな瓦礫の山を生み出している様子を目にしたとき、**修復**しやすい建物を設計するということを、いままで余り真剣に考えてこなかったのではないかと考えさせられました。木造建物は組み立てやすく、解体しやすい、そして取りはずした部材を再び利用して建物を修復する、このような**循環型**の構法を長い時間をかけて編み出してきたことを改めて思い返しました。第2回の講座で耐震設計が目指す安全目標について触れました。現行の耐震基準は、極めて大きい地震に対しては「**損傷や変形は生じても倒壊には至らないようにする**」という目標を立てていますが、これでは十分でないと思います。「**損傷や変形は生じても倒壊には至らないようにし、地震後は修復して再利用できるようにする**」という目標を立てて循環型の建物を設計していくことがいま求められていると思います。このような社会的要請に対して、木造建物は最も可能性を有している存在であると考えています。

さいごに

木構造の迷路を少しでも見通しやすくしようと耐震設計に重点を置いて記述してきましたが、第1回から第4回まで読み返して見ると言い足りない部分、触れなかった部分が随分多いことに気がつきました。特に木構造の構造設計をどのように進めるべきかという設計論については十分記述できませんでした。

木構造は、木材という自然素材を使い、それらを組み立てて架構を作ります。この組み立て方（構法）によっては、現在耐力要素として軽視されている柱の曲げ能力を活用できる可能性がありますし、合成柱や合成梁などの組み立て部材の活用を考えるとこの可能性はさらに広げる事ができるのではないかと思います。また、大地震に対する性能を検討する場合には、基本的には柱の曲げ変形能力の活用、靱性型接合部の開発、などがポイントになると思いますが、制震という考え方を導入してエネルギー吸収装置の取り付けを検討することも現在では十分可能になってきたと思います。また、構造部材と非構造部材の分離、部材の取り外しを容易にする接合部の工夫などは循環型の建物を作る上で重要な検討事項になると思います。現時点ではこれらの検討に資する材料も揃ってきましたし、技術的な裏付けを可能にする検証法も次第に整えられてきています。木構造の設計の世界は無限の可能性を今みせていると思います。このことを最後に述べて WEB 講座を閉じることにします。

<寄稿>

4号特例について

4号特例とは、建築基準法第6条1項4号に規定される、階数2階以下で延床面積500㎡以下、高さ13m以下、軒高9m以下の木造建築物及び、平屋で延床面積200㎡以下の木造以外の建築物について、建築士が設計すれば建築確認申請において数多くの条項が審査対象外になる特例です。小規模建築物について、建築に関する多くの知識を持つ建築士の職能を評価し、建築確認においては必要最小限の審査にとどめ、建築物の安全性について建築士を信頼することにより、短期間（7日以内）で建築確認を行います。

4号特例の構造規定に関して見てみると、建築基準法第20条の構造耐力に関する部分が全て特例扱いになっていることから、法的には前述の大規模以外の木造建築物及び小規模な木造以外の建築物に関し、建築確認において審査対象外になっています。

実際の建築確認において4号特例の物件を見ていると、1階の柱と2階の柱の位置がずれていたり、1階の壁の位置と2階の壁の位置が全く合っていないなど、間取りを優先させるために、力の流れ・伝わり方をあまり考えていないように思える、構造的には？が付くような建築物があります。その場合、壁量等の仕様規定についても確認することになりますが、多くの場合は必要壁量や、壁のバランス配置が規定を満足しているため建築基準法上問題なしと判断するしかないのが現状です。

第2回WEB講座において4号特例に対する疑問が呈されていますが、建築士が最低限設計者として責任を持つべき部分を特例にすることで、建築確認の時間短縮になり合理的だと思います。ただし、構造安全性を確認する規定については、建築主に対する説明責任を果たすためにも特例扱いにすべきでないと考えます。

宮城県建築主事（宮城県気仙沼土木事務所） 佐藤廣喜