
 総 説

[木材学会誌 Vol. 53, No. 3, p. 117-126 (2007)]

木質構造の研究課題*1

平井卓郎*2

Current Issues of Timber Construction*1

Takuro HIRAI*2

Current research issues of timber construction are discussed. Initial resistance design, durability design and post life design are considered, in a broad sense, as the components of structural design of timber construction. The following main issues are discussed here for each component.

1. Initial resistance design

1) Appropriate structural modeling ; 2) Relative resistance of structural members and joints ; 3) Practical simplification of stiffness calculation for semi-rigid structures ; 4) Reasonable synthesis of horizontal resistance of structural components ; 5) Site-work performance factor ; 6) Target resistance based on use and risk ; 7) Dynamic behavior of structural components and whole structures ; 8) Clear distinction between allowable resistance design and ultimate resistance design.

2. Durability design

1) Control of wood decay ; 2) Structural plan considering risk of decay ; 3) Initial design considering maintenance ; 4) Estimation of residual resistance.

3. Post life design

1) Reinforcement design considering degradation of members ; 2) Initial design considering reuse/recycling.

Keywords : timber construction, structural design, initial resistance design, durability design, post life design.

木質構造の広義の構造設計として初期耐力設計, 耐久設計, 耐用後設計を想定し, 今後取り組むべき課題について考察した。主要な課題は下記の通りである。

1. 初期耐力設計

1) 適切な構造モデル化, 2) 部材と接合部の耐力バランス, 3) 半剛節構造計算の実用化, 4) 水平耐力の合理的加算, 5) 施工係数の評価, 6) 用途, 危険度評価に基づく目標耐力設定, 7) 構造各部と構造全体の動的挙動の解明, 8) 許容耐力設計と終局耐力設計の明確化。

2. 耐久設計

1) 腐朽の進行抑制, 2) 腐朽危険度に配慮した構造計画, 3) 維持管理を考慮した初期設計, 4) 残存耐力の推定。

3. 耐用後設計

1) 部材劣化を考慮した補強設計, 2) 再利用を想定した初期設計。

1. はじめに

住居を中心とする建築物は, 意識的な研究が行われる以前から基本生活要素として存在し, 研究はそこで生じた問題に後追的に取り組むという歴史をたどって来ている。中でも木質構造は, その長い歴

*1 Received November 10, 2006 ; accepted December 4, 2006.

*2 北海道大学大学院農学研究院 Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589

史を通じて、経験的技術が学術研究に先行して来た典型的な例である。このような研究分野の難しい点の一つは、実用技術が既に標準的なものとして存在しており、そこに研究成果を反映させるには、いくつかの段階的な取り組みが必要なことである。

木質構造の技術ステージをおおまかに区分すると次のようになる。①実務現場での経験的技術、②法令の想定する技術、③学会や各種協会・団体などが提案する技術、④実用研究段階での技術、⑤基礎的な研究段階での技術。このような技術的複層性から、木質構造の研究は上記の②から⑤まで、質の違う広い範囲に渡っている。これは、各研究者の役割分担の違いだけではなく、同じ1人の研究者でも、状況や要求に応じ、異なる視点・目標設定で研究に取り組んでいることも意味している。

このような実状から、個々の研究と実用技術の間に、隔たりが存在することは避けられないとしても、木質構造分野全体としては、上記の①から⑤まで連続性のある視点や目標、技術展開が求められる。現在残されている研究課題には、この異なるステージ間の橋渡しに関係するものが多いように思われる。

2. 木質構造に求められる性能と研究対象

建築構造物としての木質構造に求められる性能を整理すると、次のようになる¹⁾。

①空間機能性、②構造安全性、③意匠性、④火災安全性、⑤耐久性、⑥維持管理の容易さ、⑦温熱環境、⑧空気環境、⑨光視環境、⑩音環境、⑪高齢者に対する配慮、⑫経済性、⑬環境調和性

このうち、木質構造研究の主要な対象となるのは構造安全性であるが、構造安全性は空間機能性や意匠性と表裏一体の関係にあるので、その視点の欠如した研究は、学術的な価値はあっても実用性には乏しい。また、長期的な構造安全性を考えると、耐久性や維持管理に関する研究は、初期耐力に関する研究と同等またはそれ以上の重要性を持っている。同様に、いかに構造安全性や耐久性に優れていても、環境調和性や経済性を無視した技術提案には無理がある。

建築構造物の設計は、上記の各要素それぞれに対し個別に行われるのが普通であるが、実際には相互に関連することが多い。例えば、木質構造の主要な劣化因子は木材の生物劣化（腐朽）であるが、これに対する配慮が不十分なままに、初期耐力や温熱環境のみを優先すると、経年後の構造安全性低下を招くことになる。これを防ぐには、構造部材の使用環境や施工信頼性に配慮した構造計画が重要になる

が、構造計画は空間設計、意匠設計の自由度や経済性と切り離せない。一方、設計自由度を損なわない方法で、初期耐力、温熱環境と耐久性を両立させようとすると、防腐薬剤の多用やエネルギー依存型換気システムの導入など、環境調和性に問題を生じることが少なくない。

他の要素間の関係や、それと関連した材料性能、構造設計技術に関する要求も同様である。

3. 木質構造における構造設計の検討項目

木質構造の構造耐力性能は、経年後の劣化も含んだ性能として捉える必要がある。この視点に立って、構造設計の検討項目を整理すると Fig. 1 のようになる²⁾。

これらの項目のうち、通常構造設計として検討されるのは初期耐力設計である。一般的な構法、規模の木質構造では、剛性と許容耐力の検討が主であるが、近年は終局耐力の検討例も増えて来ている。

木質構造の耐久設計は、これまで構造設計とは別の範疇で捉えられることが多かった。しかし、経年劣化が構造耐力を著しく低下させることを考えれば、耐久設計も広義の構造設計の一部として、同じ枠組みの中で考えるのが合理的であろう。検討項目は大きく部材耐久設計、使用環境設計、維持管理設計に分けられるが、今後は残存耐力設計³⁾による劣化後の危険度推定も望まれる。これらの耐久設計を当初から構造設計の視野に置くことにより、構造計画や初期耐力設計に反映させることが可能となる。

初期耐力設計と耐久設計が適切に行われても、建物はいずれ耐用限度を迎える。そのときの選択肢は、補改修による寿命延長と解体の2つである。建物の耐用限度は、生活形態の変化や居住性など様々な要素によって決まるが、補改修（最も単位の大きいリユースと考えることも出来る⁴⁾）のうち、構造補強の基本は残存耐力の評価^{2,3,5)}である。解体を行う場合には、部材のリユースやリサイクルが期待されるが、リユース・リサイクルの難易は、初期設計段階での構造計画と接合部を中心とする各部設計に大きく依存する^{4,6)}。

以上のように、耐久設計と耐用後設計は、結局、初期耐力設計における構造計画や各部の設計に反映されることになる。以下では、上記の整理に従って、木質構造の主要な研究課題のいくつかに触れることにしたい。

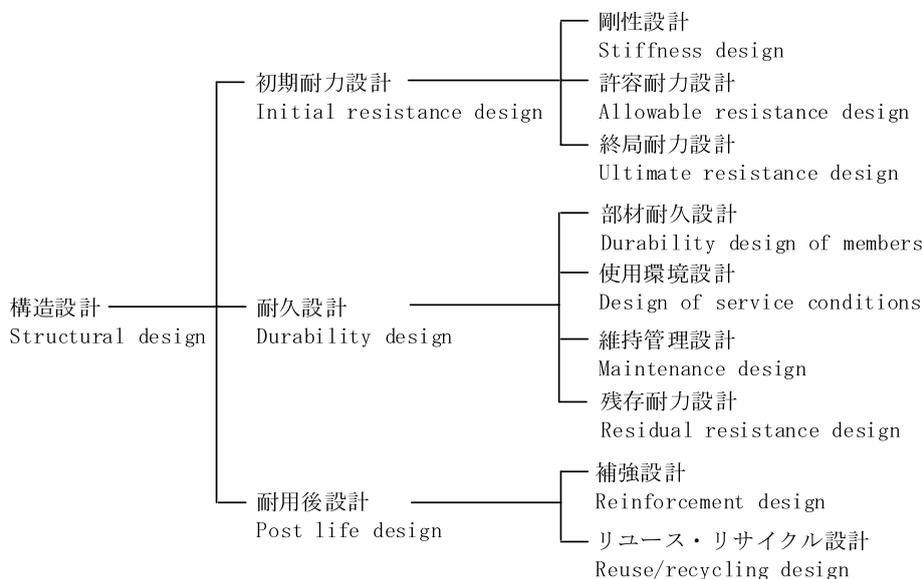


Fig. 1. Components of structural design of timber construction.

4. 木質構造の初期耐力設計

4.1 部材設計と構造設計

初期耐力設計の重要点の一つに、構造設計における部材・接合部設計の位置付けがある。構造原理が完全に解明されている構造物の場合、これらの相互関係はほぼ明確である。しかし、木質構造では構造各部への応力分配やその伝達経路、部分的な降伏や損傷による応力再分配など、構造各部の耐力と構造全体の耐力を結び付ける基本情報が不足している。このため、部材や接合部だけを取り出して詳細な研究を行っても、その成果が必ずしも構造設計に効果的に反映されないことが多い。

この点を考えると、木質構造の初期耐力設計に関する重要点の一つは、構造全体の力学的挙動と構造各部の力学的挙動の関係をいかに的確に捉え、いかに簡便にモデル化するかであるといえる。現在、木質構造の構造解析（数値解析）手法やプログラミング技法は、既に一定のレベルに達しており、これまでも多くの研究成果が見られる^{7,8)}。また、各種の汎用構造解析ソフトも市販されており、その効果的利用により、様々な数値解析が可能な状況にある⁹⁾。

しかし、一部の大規模木構造¹⁰⁾などを除き、軽構造の多い木質構造に対し、個々に詳細な解析を行うのは現実的ではない。また、力の流れを正確に捉えにくい構造に対し、形だけ詳細な数値解析を行っ

ても、その実用的信頼度は低い。数値解析ではいかに高度な手法を適用しても、入力仮定や定数に従った計算結果が出力されるだけで、それ自体の適否は保障されないからである。したがって、数値解析を行う場合にも、構造全体、鉛直・水平構面などの構造単位、耐力壁や小屋組などの構造耐力要素、それを構成する部材・接合部、それぞれの階層における適切なモデル化が重要になる。

この構造モデル化に関しては、残念ながらここ半世紀、大きな進展は見られないように思われる。モデル化の要点は、どの要素を重視し、どの要素を切り捨てるかであるが、この点に関する限り、木質構造の研究はここ半世紀むしろ後退している感がある。その要因の一つは、高性能コンピュータを背景とした数値解析手法の発達により、手計算では不可能な詳細な構造解析が、比較的容易に行えるようになったことであろう。このため、我々研究者の多くが、「いかに合理的に切り捨てるか」ではなく、「いかに既往の研究よりも多くの要素を考慮し、詳細な解析を行うか」という方向に流されて来ている。このことが、「構造全体のイメージを的確に捉え、設計要求レベルに応じた、合理的で簡便な評価法を提案する」という構造工学の基本部分において、先人達よりむしろ後退する結果を招いている。

もちろん、これは安易な単純化を求めるものではない。合理的な単純化を行うには、現象の正確な理解が必要で、現在の構造解析手法はその強力な武器

である。これを駆使して、静的・動的挙動をより詳細に把握し、それに基づいて合理的な単純化を行うことで、初めて先人達を越えることが可能となる。構造物の力学的挙動に対する正しい理解無しに、形式的な単純さや簡便さを求めても、結果的に不合理な設計法の提案を行うことにしかならないであろう。

4.2 構造耐力設計

4.2.1 構造各部の耐力バランス

構造各部の耐力バランスに関する考え方には2通りある。1つは各部の破壊確率（安全率）を均等に近づけるように、部材断面設計や接合部設計を行おうとする等強度設計の考え方である。この考え方は、弾性設計（許容耐力設計）において特に有効で、無駄の無い設計という意味で優れている。この場合は、いかに接合耐力を部材耐力に近づけるかが課題となり、接合法開発に関するこれまでの研究も、多くはこの視点に立っている^{10, 11)} (Fig. 2(a))。今後期待される点は、工程管理の容易な現場接合法^{11, 12)}の、一般住宅レベルでの実用化であろう。

もう1つは、構造各部の安全余裕に差を付け、破壊の生じる箇所や破壊特性を意識的に制御しようとする考え方である。この方法は、破壊を想定しない部材には耐力的に無駄を与えることになるが、構造物の耐力特性を制御出来るため、終局耐力評価の信頼度が高まる。木質構造では通常、接合耐力が部材耐力より低いので、結局、どの接合部でどのような破壊を生じさせるかを制御することになる¹³⁾。ただし、この場合も構造物の剛性にはすべての部材・接合部の剛性が寄与する。

上記の2通りの設計法には、それぞれ長短所があるが、弾塑性設計、終局耐力設計を考える場合には、

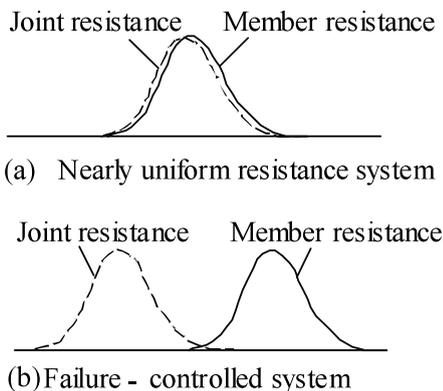


Fig. 2. Relative distributions of joint resistance and member resistance.

後者の合理性が高い。

後者の設計法では、破壊部位の特定が重要である。この想定が狂うと、終局耐力だけではなく、構造物の降伏・損傷後の静的・動的力学特性にも大きな差が生じるからである。しかし、破壊想定部位以外の安全余裕を極端に大きく取ることは好ましくないもので、破壊部位の特定精度を維持し、かつ構造各部の安全余裕の差を小さく抑えるための、破壊確率の評価が重要になる (Fig. 2(b))。現在、木質構造分野でも信頼性設計法の一形態である限界状態設計法の研究^{14, 15)}が進んでいるが、これまでの研究は個々の部材や構造耐力要素の破壊確率に注目したものが多し。今後は、構造各部の相対的耐力比較という視点が加わることが望まれる。

4.2.2 剛性設計

剛性設計に関しては、釘接合による耐力壁やボルト接合によるラーメン構造などの、半剛節構造の変形計算を、いかに実務設計に落とし込むかが中心的な課題であろう。木質半剛節構造に関しては、これまでも多数の研究¹⁶⁻²⁵⁾が行われて来た。実務設計レベルでも、大規模構造を中心に半剛節を考慮した構造計算例が見られるが、住宅を含めた木質構造全体としては、まだごく一部に限られている。また、これまでの研究・設計例も、部分接合部実験などによるものが多く、一般的な構造計算法としては未成熟な状態にある。しかし、実用レベルでの剛性計算が定着しない限り、変形合わせによる耐力加算も限界耐力計算²⁶⁾などの剛性（振動特性）を考慮した終局耐力設計も不可能である。

一方、接着接合による剛節構造では現在でも剛性計算が可能である。ただし、剛節構造でも切り欠きや断面の不連続部があると、断面の一部が応力伝達機能を果たさず、一見半剛節構造に類似の剛性低下を生じることがある²⁷⁾。この種の剛性低下については、一般に理解が浸透しているとは言えないが、力学的には明確なため、研究の展開はそれほど難しくないと考えられる。

4.2.3 水平耐力の加算

木質構造の主要な水平耐力要素には、各種の耐力壁（筋かい軸組を含む）や半剛節・剛節骨組^{11, 16-25, 28)}などがある。これらの水平耐力は、一定の技術基準に従って評価されている。また、設計上考慮されていない各種の2次部材も、実際には水平耐力に寄与している。異なる水平耐力要素を併用する場合には、Fig. 3のように、同じ変形に対して各耐力要素が負担できる水平力を合計して、構造全体の水平耐力を求めるのが一般的な考え方である。

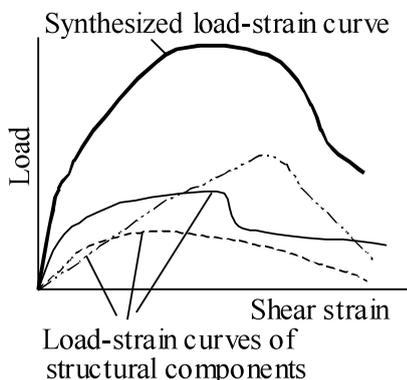


Fig. 3. Synthesis of lateral load-strain curves of structural components.

しかし、木造耐力壁に対する現行の許容せん断耐力（壁倍率）評価法^{29,30)}では、見なし降伏耐力、安全率、許容変形角（真の変形角）、靱性指標の4つの因子を考慮して許容せん断耐力を誘導している。このため、許容変形角に対する各耐力壁の負担水平力は、必ずしも許容耐力に比例してはいない。また、耐力壁自体の仕様が同じでも、柱頭・柱脚部の接合仕様や耐力壁構面の一体性の程度によって、脚部の浮き上がりを含む見かけの変形角に差が生じるが¹⁹⁾、現在のところ、この点に対する配慮も不十分である。これを改善するため、脚部の浮き上がりも含めた変形角を考慮し、かつ実用性を損なわない許容耐力評価法の提案が期待される。

4.2.4 施工係数の評価

今後検討の望まれる課題の一つに、施工係数の評価がある。木質構造の主要な構造耐力要素は、標準的な実験によって耐力が確認されているが、実際の現場施工でも同等の耐力が保証されている訳ではない。建築施工が人間の作業に依存する以上、ヒューマンエラーを避けることは出来ず、また予期しない部材の損傷や劣化など、設計時には想定しにくい、様々な耐力低下要因が存在するからである。

これらが構造耐力に及ぼす影響を低減するには、次のような方法が有効である。①複雑な施工工程はヒューマンエラーを生じ易い。このような危険性の低い、容易で安定性の高い施工方法に関する研究・技術開発を行う。②不測の耐力低下を考慮した施工係数（耐力低減係数）を検討する。

①については、近年実務分野でも考慮が不足している。この要因の1つは、歴史的に設計・施工が一体となって発展して来た木質構造でも、近年はその遊離が生じ、設計担当者に現場施工の知識が不足す

るようになって来たことであろう。

②の施工係数の評価には、現場施工の実態調査が必要であるが、各企業の施工実態を示す調査データの集積は必ずしも容易ではない。このため、既往の研究も数値シミュレーションの段階に留まっている³¹⁾。施工係数評価の精度を向上させるには、産業界の高所に立った理解が望まれる。ヒューマンエラーの危険度評価³²⁾は、施工工程管理や工場での部品工程管理³³⁾と連動させて捉える必要がある。

4.2.5 用途、危険度評価に基づく構造設計

用途や危険度、経済性を考慮した木質構造の目標耐力設定については、これまで研究例が乏しい。しかし、居住を想定しない農業構築物などに対しては、人的被害確率の低さを考慮し、構造耐力の要求度を下げてもよいという考え方がある。これについては、信頼性設計の基本的手法^{15,34)}が確立しているので、専門的知識を持つ研究者が集中的に取り組めば、何らかの技術資料の提案が可能になるように思われる。

建物の用途と危険確率評価に関しては、歴史的な木造建築の維持管理や補改修についても同様である。歴史的資産としての古建築を考える場合、原型の保全と現行法規の求める構造安全性との関係がしばしば問題となる。この議論を実質的なものに発展させて行くためには、使用状況と許容危険確率に対する定量的な検討が必要になる。

4.2.6 構造各部の静的・動的挙動と構造全体の動的挙動

阪神淡路大震災以降、大手住宅メーカーを中心に木造住宅の振動台実験³⁵⁻³⁷⁾が多数行われて来た。振動台実験に関わった研究者・技術者は、「地震力を受ける木質構造は、静的耐力評価から推定されるよりも倒壊しにくい。」という印象を持つことが多い。構造物の動的応答は、入力波によって異なるので一律には捉えられないが、この現象は構造各部のゆるみや損傷による入力減少や剛性（固有周期）の変化が、結果的に応答を鈍化させるためではないかと言われている。この挙動に関しては、以前から繰り返し議論されているが、まとまった研究成果は、まだほとんど見られない。この挙動の定量的評価は容易ではないと考えられるが、ある程度研究が進展すれば、それに基づく工学的判断は可能となるであろう。

また、各種耐力壁や接合部、構造全体の振動特性（固有周期、履歴減衰特性など）の把握といった、より基本的な問題についても、現在のところ個々の仕様に対する個別検討に留まっており、共通評価法

の整理やその実務耐震設計への反映は、今後の課題として残されている。

4.2.7 許容耐力設計と終局耐力設計

別項で触れたいいくつかの研究課題は、木質構造における許容耐力設計（耐震1次設計）と終局耐力設計（耐震2次設計）の位置付けと関連している。

許容耐力設計は本来弾性設計であるが、木質構造ではこの範囲内でも部分的な降伏や軽微な損傷は生じるので、構造上問題となる損傷を生じさせないための「見なし弾性設計」と理解するのが妥当である。耐震1次設計は、直接には中規模地震に対する損傷防止を想定しているが、標準的な構造仕様に対しては、大地震時の安全性についても、間接的に確認できるように配慮されている。木質構造の構造設計はほとんどがこの範囲内、特に小規模住宅では、壁量計算と呼ばれる特例的な簡易計算しか行われないことが多い。

終局耐力設計は建物の倒壊を防ぐための設計で、大地震を想定した耐震2次設計がこれに該当する。木質構造における終局耐力の確認は、許容耐力設計の延長線上で行われ、付加的に終局耐力に対する安全余裕や靱性が考慮される場合がほとんどである。したがって、終局耐力の確認が直接的であるか、間接的であるかという点を除くと、許容耐力設計も終局耐力設計も、本質的な考え方には大きな違いが無いと言える。

木質構造の水平力に対する抵抗機構を考えると、許容耐力レベルの要求性能と終局耐力レベルの要求性能とを明確に区別し、それぞれに応じた設計方針をたてるのが合理的であるように思われるが、このような検討例はこれまでのところ極めて少ない。

許容耐力レベルの設計では、層間変形角を一定範囲内に抑えることが目標となる。これは、構造本体の損傷、防耐火性能を低下させる外装・内装材の剥落、人身被害を生じる家具類の転倒などを防止するためである。一方、終局耐力レベルの設計は、変形抑制よりも建物の倒壊防止に主眼が置かれている。

実際の木造住宅の地震被害を見ると、家具の転倒や照明器具の落下などによる人身被害が多いが、この種の被害は必ずしも建物の損傷には比例しない。この現象は、建物自体の振動特性と家具などのロッキング振動特性との違いなどによると考えられているが、実務設計でそれを考慮するのは現実的ではないと思われるので、結局、適切な許容層間変形角の検討という課題に結びつくことになる。

木質構造の水平剛性や固有周期、履歴減衰特性は、外力レベルによって異なるが、これは材料特性によ

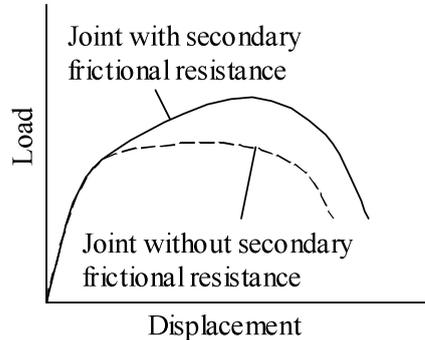


Fig. 4. Effect of frictional resistance on load-displacement relationships of mechanical timber joints.

るだけではなく、外力レベルに応じて抵抗メカニズムが変化することにも起因している。例えば、①部材間の初期摩擦抵抗、②静摩擦限界に達したときの初期すべりの発生と応力再分配、③初期すべり発生後の再接触による応力再分配、④各部の降伏・損傷による応力再分配、⑤水平力と鉛直荷重との相対比の変化、などがその要素となっている。

この点を考えると、許容耐力レベルで層間変形角を検討する場合は、鉛直荷重による層間変形角の抑制や摩擦抵抗の効果を考慮することが可能ではないかと考えられる。鉛直荷重による層間変形角の抑制は、水平力が大きくなると相対的に効果が減少する¹⁹⁾。また、鉛直荷重による摩擦抵抗は、地震力の鉛直成分により変動すると考えられる³⁸⁾。したがって、終局耐力レベルでこれらを見込む場合は、十分慎重な評価が必要であるが、許容耐力レベルでは大きな危険は生じないと考えられる。

一方、許容耐力レベルでは無視しても、終局耐力レベルでは考慮の可能な要素もある。木材の機械的接合では、接合仕様によってFig. 4のような荷重-変形特性の違いが生じるので³⁹⁾、同じ許容耐力であっても、終局耐力評価にはこの違いを反映するのが合理的であると考えられる。

4.3 部材・接合部耐力設計

4.3.1 摩擦抵抗

木質構造では、部材間の摩擦抵抗が大きな役割を果たしている。この役割は経験的に、多くの技術者・研究者が認識しているものの、構造計算では無視されている。これは、木材の応力緩和による初期締め付け力の低下、摩擦抵抗と他の抵抗要素との耐力特性の違い、地震力の鉛直成分による瞬間的な有効自重の低下などを考慮したものである。

しかし、例えば枠組壁工法の壁と床の標準的接合

仕様⁴⁰⁾は、摩擦力の寄与がないと耐力不足となる。同様に、丸太組耐力壁の水平剛性は、事実上摩擦性に依存している^{38,41)}。また、木材の釘接合やボルト接合では、2次摩擦力が最大せん断耐力を大きく上昇させる^{42,43)}(Fig. 4)。木質構造には、このように実態として摩擦抵抗に依存して成り立っているものが少なくない。

木材の応力緩和を考えると、摩擦抵抗の積極的評価には難しさがあるが、含水率変化を含む非定常状態における摩擦抵抗の経時変化については、まだ定量的データが不足している。また、鉛直荷重や2次応力による摩擦抵抗については、一定の範囲で定量的評価が可能であると考えられる。

4.3.2 異種接合法の併用と耐力加算

現行の木質構造設計規準⁴⁴⁾では、異種接合法を併用する場合、原則として許容耐力の加算を禁じている。これは、Fig. 5に見られるような接合法による変形特性、特に初期剛性の違いを考慮したものである。しかし、倒壊防止を目的とする終局耐力設計では、組み合わせる接合法の変形特性によっては、変形を考慮した耐力加算が可能な場合がある。また、これとは別に、接合部に要求される初期剛性、終局耐力、靱性⁴⁵⁾を、異なる接合法に分担させる方法もある。例えば、Fig. 5中のAの接合法とBまたはCの接合法を組み合わせる場合などである。

異種接合法の併用に関しては、機械的接合法を圧縮に用いた接着接合¹²⁾などを中心に、これまでも研究例が見られる。しかし、今後は併用接合の長短所を明確に位置付け、その特性を積極的に利用しようとする視点が期待される。

4.3.3 部材・接合部の破壊モードと相似則

木質構造を構成する部材や接合部は、力の加わり方や材料特性に応じ、様々な破壊モードをとる。これらに対しては、各種の破壊クライテリア⁴⁶⁻⁴⁸⁾が提案されているが、構造設計として重要な点は、破

壊モードによる相似則の違いである⁴⁹⁾。例えば、木材の最大ボルト面圧応力は、繊維方向ではボルト径の影響をほとんど受けないが、繊維直交方向では寸法効果を生じ、ボルト径が増すにつれて小さくなる^{50,51)}。切り欠きを持つ梁の場合なども同様である。

現行の設計規準はこのような相似則の違いを考慮していないため、実際には構造各部に対し、異なる安全率を与えてしまうことになる。木材強度理論の研究者の多くは、これまで主として、限られた試験体形状や試験体寸法に対する理論式の適用に関心を持って来たように思われるが、構造設計者が知りたいのは相似則である。相似則が保障されれば、強度基準値については相対的な係数補正が可能だからである。今後は、この相似則の検討に主眼を置いた、実用的部材設計クライテリアの提案を期待したい。

5. 木質構造の耐久設計

木質構造の経年劣化の推定や劣化後の耐力評価に関する研究は、初期耐力評価の研究に比べて立ち遅れている。現在、木質構造の耐久設計や劣化を考慮した耐震診断に関しては、いくつかの技術資料^{5,52)}が用意されているが、それらは主として工学的判断によるもので、必ずしも明確な定量的根拠に基づくものではない。今後、耐久設計の信頼度を高めて行くためには、より詳細な研究レベルでの取り組みが望まれる。

木質構造の構造耐久設計に関する研究レベルでの取り組み^{53,54)}は、これまで主として建築構造学の視点から行われて来ている。その理由の一つは、建築構造学者がその出発点において、鋼構造や鉄筋コンクリート構造と同様の視点で、木質構造の耐久性を捉えようとするのに対し、木材科学者は木材腐朽の複雑さや定量的評価・予測の難しさについて、相対的に多くの知識を持っているために、そのような割り切りをしにくいという点にあるように思われる。

しかし、木質構造の耐久性に関する研究は、本来、木材科学の一分野としての木質構造学が取り組むべき重要課題であると思われる。

5.1 部材耐久設計

部材耐久設計の主要項目の一つは、材料の耐久性評価と、用途に応じた適切な材料選択である。木質構造の劣化要素には、いくつかの要素があるが、最も危険度が高いのは木材・木質系材料の生物劣化である。木材の生物劣化については、木材腐朽菌、シロアリなどを対象とした研究成果が蓄積され、主要な樹種や部位の耐朽性に関する基礎資料が整理されている⁵⁵⁾。また、防腐・防蟻処理方法についても、

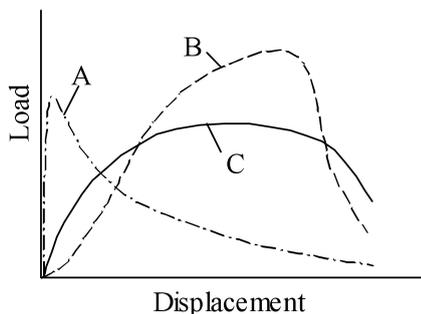


Fig. 5. Load-displacement characteristics of timber joints.

多くの研究と実務資料があり⁵⁵⁾、現在も人体・環境への負荷を抑えながら、耐朽性能を高めるための研究が続けられている。

今後期待されるのは、一旦生じた腐朽の進行を抑制する技術に関する研究であろう。既存建物の補改修にあたって、腐朽部材の交換が必須か、腐朽の進行状況や補改修後の期待寿命、期待性能によっては、既存部材を残したままの補強が可能かによって、補改修の基本方針が大きく変わるからである。

5.2 使用環境設計

使用環境設計で最も重要な点は、構造部材を腐朽の生じ易い水分環境下に長期間置かないことである^{54,55)}。強い薬剤処理を前提とせずに構造耐久性を確保するには、この水分環境の制御が極めて重要になる。水分環境を適切に制御するには、各部の納まりや効果的な通気経路の確保などに対する様々な検討が必要になるが、その最も基本となるものは劣化危険度に配慮した適切な構造計画である。建物の外形や基礎を含む主要構造耐力要素の配置などの基本計画が不適切だと、劣化危険度の高い部位が多くなってしまふ。構造計画と劣化危険度に関する知見は、まだ定性的な範囲に留まっており、今後の研究に対する期待が大きい。

5.3 維持管理設計

木材の腐朽劣化診断については、これまでもいくつもの試みが行われている⁵⁶⁾。その中心は、超音波、弾性波その他による物理的診断法によるものであるが、針葉樹材に多く見られる褐色腐朽では、物理的手法で劣化が検出された時点では、既に腐朽が進行し、部材耐力が大きく低下していると言われて⁵⁵⁾いる。生物的、化学的手法による早期腐朽診断に関する研究も試みられているが、まだ実用レベルには達していないようである。また、直接的に腐朽を検出する代わりに、腐朽を生じ易い使用環境を監視することにより、腐朽危険度評価と劣化推定を行おうとする考え方もある。

これらの腐朽診断を効果的に行うための検討課題は、適切な維持管理作業を可能にする初期設計である。今後、効果的な点検・診断手法が用意されたとしても、構造部材が完全に内部に閉じ込められていては、改修作業を伴わない点検・診断が現実的に困難だからである。

5.4 残存耐力設計

木質構造の使用期間中の下限耐力性能を把握するには、劣化後の残存耐力推定も重要になる。残存耐力の推定方法は初期耐力評価とほぼ共通であるが、劣化を損傷と考えると、終局耐力評価が中心とな

る^{2,3)}。残存耐力設計に関する主要な研究課題は、腐朽を主とする劣化の程度と耐力低下との関係であるが、特に構造耐力上主要な接合部周辺の劣化に関する検討が重要である。

劣化の進行には不確定要素が多いので、実務設計に反映させるには、適切な信頼性解析³⁴⁾が必要になるろう。

6. 木質構造の耐用後設計

6.1 補強設計

既存木質構造の補強、特に耐震補強については、多くの研究・技術提案が行われているが、改築に近い大改修を除き、そのほとんどは健全な既存部材に新たな補強部材を取り付ける補強案となっている。しかし、耐震補強を必要とする建物では、腐朽や蟻害による構造部材の劣化により、健全部材を想定した補強が難しいことが多い。このような状況に対しては、劣化部材の交換と耐震補強を同時に考える必要があるが、現在はまだ検討例が少なく、今後の取り組みが期待されている。

6.2 リユース・リサイクル設計

リユース・リサイクルに関する重要な課題の一つは、解体・再利用を想定した初期耐力設計（構造計画と各部設計）であろう⁶⁾。木質構造の初期耐力性能を向上させるには、接合部を強化して効率的に応力を伝達させることが効果的で、その方法には機械的接合と接着接合の併用などがある。また、機械的接合のみによる場合も、少数のボルトより多数の釘を使用した方が初期剛性の向上が見込める。しかし、これらの選択は一方で、建物の解体や補改修、部材の再利用を行いにくくする。

今後の社会的趨勢を考えると、初期耐力性能のみを優先した設計ではなく、初期耐力と解体の容易さのバランスを考えた設計が求められることになるろう。このような視点に立った研究は、現時点ではまだほとんど見られず、今後の取り組みに対する期待が大きい。

7. まとめ

今後の木質構造研究の要点をまとめると、ここ数十年の間に構築されてきた構造耐力評価の考え方を踏襲するだけでは、研究の将来に限界が見えつつあり、構造耐力評価の基本に戻った研究展開が必要だということになるろう。

重要な点は、現行の設計体系や評価基準に従った実務的性能評価に関する研究と、新たな将来展開を指向する研究とは、性質が異なるということである

う。木質構造に関する現在の研究には、実務的視点の不足したものが多く見られる反面、標準的な評価手法の枠内に留まった実務作業的な研究も多いように思われる。初めに述べたように、木質構造研究の実状から、このような研究状況は必ずしも否定出来ないが、木質構造研究が次のステップに進むためには、構造力学や構造設計の基本に立ち返った、こだわりのない考え方や研究展開が求められるように思われる。

文 献

- 1) 平井卓郎：材料 **52**(12), 1502-1507 (2003).
- 2) 平井卓郎, 宮澤健二, 小松幸平：“木質構造 第2版”, 東洋書店, 東京, 2006, p. 136.
- 3) 平井卓郎, 宮澤健二, 小松幸平：“木質構造 第2版”, 東洋書店, 東京, 2006, pp. 187-189.
- 4) 鈴木滋彦：材料 **53**(4), 465-470 (2004).
- 5) “木造住宅の耐震診断と補強方法”, 国土交通省住宅局建築指導課監修, 日本建築防災協会, 東京, 2005, pp. 26-44, pp. 51-107.
- 6) 坂本 功：木材工業 **54**(11), 526-529 (1999).
- 7) 例えば, 辻野哲司：木材学会誌 **29**(1), 24-29 (1983).
- 8) 例えば, Tarabia, A. M., Kamiya, F. : *Mokuzai Gakkaishi* **42**(11), 1064-1071 (1996).
- 9) 平井卓郎, 宮澤健二, 小松幸平：“木質構造 第2版”, 東洋書店, 東京, 2006, pp. 194-215.
- 10) 小松幸平：材料 **53**(2), 230-235, (2004).
- 11) 小泉章夫, 佐々木貴信, ヨルゲンイエセン, 飯島泰男, 小松幸平：木材学会誌 **47**(1), 14-21 (2001).
- 12) 吉田弥明, 吉川双介：木材学会誌 **34**(2), 126-132 (1988).
- 13) 平井卓郎, 宮澤健二, 小松幸平：“木質構造 第2版”, 東洋書店, 東京, 2006, pp. 125-128.
- 14) “木質構造限界状態設計指針(案)・同解説”, 日本建築学会編, 日本建築学会, 東京, 2003.
- 15) 中村 昇：材料 **53**(1), 120-125 (2004).
- 16) 神谷文夫：日本建築学会論文報告集 309, 86-94 (1981).
- 17) Itani, R. J., Obregon, S. A. : *Wood Sci.* **16**(3), 454-465 (1984).
- 18) 秦 正徳, 佐々木光：木材学会誌 **33**(1), 12-18 (1987).
- 19) 矢永国良, 佐々木義久, 平井卓郎：木材学会誌 **48**(3), 152-159 (2002).
- 20) 秦 正徳：木材学会誌 **31**(10), 807-813 (1985).
- 21) 平井卓郎：木材学会誌 **33**(9), 689-693 (1987).
- 22) 小松幸平：木材学会誌 **34**(7), 581-589 (1988).
- 23) Takemura, T., Miyabe, Y. : *Mokuzai Gakkaishi* **37**(11), 1091-1093 (1991).
- 24) 中島史郎, 有馬孝禮：木材学会誌 **37**(12), 1150-1156 (1991).
- 25) 小松幸平：木材学会誌 **47**(2), 103-110 (2001).
- 26) “2001年版建築物の構造関係技術基準解説書”, 国土交通省住宅局建築指導課・日本建築主事会議, (財)日本建築センター編, 工学図書, 東京, 2001, pp. 309-325.
- 27) Dansoh, A. M., Ueda, K., Hirai, T. : *Forest Prod. J.* **52**(9), 82-87 (2002).
- 28) 辻野哲司：木材学会誌 **30**(10), 814-818 (1984).
- 29) 平井卓郎, 宮澤健二, 小松幸平：“木質構造 第2版”, 東洋書店, 東京, 2006, pp. 67-70.
- 30) “2002年枠組壁工法建築物構造計算指針”, 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編, (社)日本ツーバイフォー建築協会, 2002, pp. 211-216.
- 31) 矢永国良, 持田立男, 佐々木義久, 平井卓郎：木材学会誌 **49**(3), 204-211 (2003).
- 32) 星谷 勝, 石井 清：“構造物の信頼性設計法”, 鹿島出版会, 東京, 1986, pp. 188-191.
- 33) 平井卓郎：“木質構造”, 有馬孝禮, 高橋 徹, 増田 稔編, 海青社, 天津, 2001, pp. 79-89.
- 34) 星谷 勝, 石井 清：“構造物の信頼性設計法”, 鹿島出版会, 東京, 1986.
- 35) 田中裕樹, 坂本 功, 大橋好光, 宮澤健二：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 滋賀, 1996, pp. 131-132.
- 36) 田中裕樹, 坂本 功, 大橋好光, 宮澤健二：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 滋賀, 1996, pp. 137-138.
- 37) 平野 茂, 安藤直人：木材学会誌 **49**(2), 104-116 (2003).
- 38) 平嶋義彦：“木質構造”, 有馬孝禮, 高橋 徹, 増田 稔編, 海青社, 天津, 2001, pp. 90-100.
- 39) 平井卓郎：木材学会誌 **37**(4), 303-308 (1991).
- 40) “基本建築関係法令集 (告示編) 平成14年版”, 国土交通省住宅局建築指導課・(財)日本建築技術者指導センター編, 霞ヶ関出版社, 東京, 2002, pp. 545-562.
- 41) Hirai, T., Kimura, T., Yanaga, K., Sasaki, Y., Koizumi, A. : Proc. 8th World Conference on

- Timber Engineering Vol. I, Lahti, Finland, 2004, pp. 153-158.
- 42) Hirai, T., Wakashima, Y. : *Mokuzai Gakkaishi* **42** (12), 1195-1201 (1996).
- 43) 西山誕生, 安藤直人 : 木材学会誌 **49**(5), 255-364 (2003).
- 44) “木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法”, 日本建築学会編, 日本建築学会, 東京, 2002, p. 216.
- 45) 平井卓郎 : 木材接合部の耐力特性と許容耐力の考え方, 木材工業 **49**(6), 248-252 (1994).
- 46) 吉原 浩 : 木材学会誌 **52**(4), 185-195 (2006).
- 47) 増田 稔 : 京大農演研報 **58**, 241-250 (1986).
- 48) 神戸 渡, 中込忠男, 構造工学論文集 **52B**, 429-438 (2006).
- 49) 岡村弘之 : “線形破壊力学入門”, 培風館, 東京, 1976, pp. 8-9.
- 50) 平井卓郎 : 北大農演研報 **46**(4), 967-988 (1989).
- 51) Hwang, K., Komatsu, K. : *J. Wood Sci.* **48**(4), 295-301 (2002).
- 52) “木造建築物の耐久性向上技術”, (財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編, 技報堂出版, 東京, 1986, pp. 12-40.
- 53) 例 え ば, Wang, C., Leicester, R. H., Nguyen, M., Foliente, G. C., Sicad, N. : Proc. 9th World Conference on Timber Engineering Portland, USA, 2004, CD-ROM.
- 54) “建築に役立つ木材・木質材料学”, 今村祐嗣, 川井秀一, 則元 京, 平井卓郎編, 東洋書店, 東京, 1997, pp. 232-267.
- 55) “建築に役立つ木材・木質材料学”, 今村祐嗣, 川井秀一, 則元 京, 平井卓郎編, 東洋書店, 東京, 1997, pp. 173-214.
- 56) “木造建築物の耐久性向上技術”, (財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編, 技報堂出版, 東京, 1986, pp. 24-25.