

木造建築千年の技術*

北守 顕久（京大大学生存圏研究所）**

1. はじめに

私たちは身近で豊富な木材資源を利用して木造建築物を作ってきた長い歴史を持ちます。いま残る様々なかたちの伝統建築物は、多様な風土や災害に適応し変遷・発展してきたもので、木組みや架構には強く長持ちさせるための仕組みを見出すことができます。持続的生存圏のため、建築物のさらなる木造化が提唱されるなか、本講演では先人の知恵を学び、「木を活かす」技術について考えてみたいと思います。すなわち、伝統的な木造建築に見られる技術的な発展の歴史や力学的な意味を概説し、さらに近代における工学が木造建築に与えた影響を振り返り、伝統を含むこれからの木造建築のあり方について考える機会としたいと思います。

2. 「伝統構法」の発達と変遷

建築物の必要な機能はシェルターとして屋根や床を支持し、また外力（風圧、地震力）に耐える安全な空間を供することです。また快適な室内空間も求められます。我が国では身近で豊富な森林資源を利用した木造建築構法が発達しました。木材はその形態を活かし、柱・梁といった軸部材として用いるのがもっとも効率的です。我が国の構造は基本的には軸組構造に分類されます。

古代の建築はまずは掘立造から出発しました。木材を精緻に加工する技術が無かったので、架構を構成するためには部材同士を引っかけ、縄で縛り留めつけます。それだけだと構造が安定しないため、柱の根元を土中に埋め込み、土圧によって安定させる構造です。現代でも伊勢神宮の構造などで目にすることができます。掘立構造の部材には耐久性の高いクリ、またはヒノキの心材などが用いられました。しかし長期間の使用には耐えることができません。伊勢神宮でも20年定期の式年遷宮によって更新されています。

そこで地盤上に設置した礎石上に柱を立てる構法に変わりました（礎石造）。しかし礎石上では柱の安定が困難です。そこで大きな断面の柱を鉛直力で押さえ込む形式（傾斜復元力）による構造が現れました。後述しますが、単に柱単体では無く、頭貫や組み物といった要素と組み合わせることでさらに安定した性能を得ることができます。また、日本の夏の日差しや多雨、台風日晒される風土に対応するべく深い軒を出し、かつ重い瓦や土葺きの屋根材で押さえ込む重厚な屋根構造は、巨大な鉛直力を生みますが、大径の柱と用いると傾斜復元力を有効に働かせる組み合わせと言えます。

柱間には土塗り壁によって壁面を構成する方法が発達しました。日本における土壁はいわゆるWattle and daub方式で、木舞を組み、その上に塗り土を数度に分けて施工するものです。土壁には他に日干し煉瓦式、版築式などがありますが、木舞の靱性で剥がれにくい、何らかの変形を受けた際に粘り強異性質をもち、かつ補修が容易な特徴をもつ塗り土壁形式が我が国では定着しました。当時はまだ板材を加工するのが技術的に困難でした。板は木繊維に沿って打ち割り、表面を槍鉋でならして仕上げます。通直大径の材が取れる、ヒノキやスギ材が豊富にあったことが加工を比較的容易なものとなりました。

* 2015年9月30日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所生活圏構造機能分野。

E-mail: kitamori@rishi.kyoto-u.ac.jp

傾斜復元力、土塗り壁、板壁といった要素で足りない水平耐力は長押部材の発達で補われます。長押は現在では化粧材ですが、当時は有効な構造材でした。すなわち、柱に側面から溝を設け、通しの横架材を嵌め込むものです。後述する貫仕口に比べ表面から加工できるため精度良い加工が容易なことから、頭貫等と組み合わせて用いられました。

ところが長押による構造では立体的な架構形式や絶対的な耐力性能に限界があります。そこで平安時代末期に中国から貫構法が伝来し、様々な形で普及しました。貫構造は当初大仏様として、東大寺再建のために僧重源上人が留学・輸入したことに始まります。貫とは、柱に穴を穿ち、そこに横架材を突き刺して構成する骨組みです。鑿、鉋といった大工道具の発展により、正確な穴を空ける技術がこの時代になって可能となっていた事が構法の普及に繋がりました。大仏様は本来、大きな軒先の荷重を支え（差肘木）、開放的な室内空間を構成するフレーム構造を実現するための技術です。後述するように地震力に対して非常に有効な機能を持つことから、我が国では様々な形で、例えば壁中や小屋組を構成する要素として取り入れられることになりました。貫構造の登場によって我が国の架構技術は地震に対して安定となり、以降より精緻な木組みの技術の発展につながります。

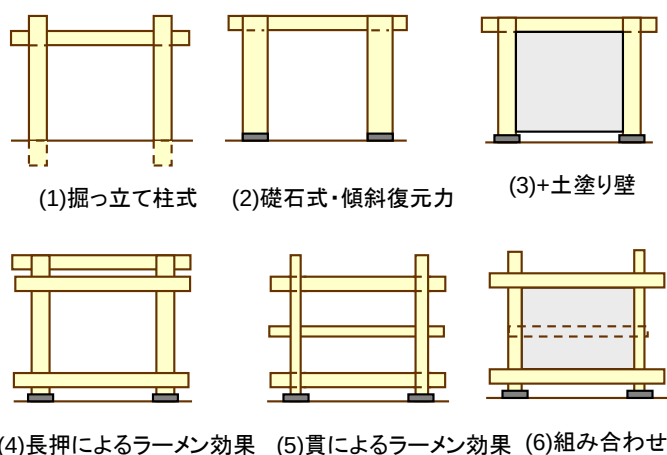


図 1：鉛直構面架構の分類



図 2：掘っ立て造の例（山内丸山遺跡）1)

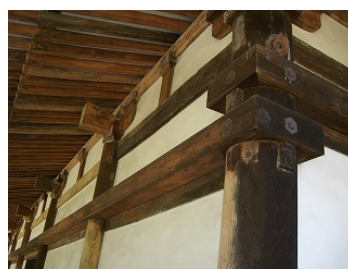


図 3：深い軒（唐招提寺）、長押構造（秋篠寺）、上部土塗りと下部版築の例（Bhutan）



図4：大仏様の起源（左：中国潮州开元寺天王殿檐）と重源による東大寺南大門

3. 嵌合接合部の技術

伝統構法では「木組み」による技術が発展しました。すなわち、木材を精緻に欠き込み加工を施して互いに嵌め合わせる嵌合接合部の技術です。先に述べたように、嵌合接合の代表例が貫接合部になります。貫とは柱に穴を穿ち、柱より幅の小さい横架材を差し込みます。地震力などを受けると柱木口が貫材に接触することで回転抵抗します。我が国ではヒノキやスギといった針葉樹材を多用しますが、針葉樹材は特に仮導管構造を持ち、細胞壁がパイプを束ねたような構造をしています。柱木口が接触すると、パイプが押しつぶれ、極めて粘り強く変形します（めり込み）²⁾。変形と同時にえねるぎーの吸収が生じます。貫接合部が多数並列して用いられる構造物は地震に対して倒壊しにくい建物となるのです。

一方でめり込みは比較的柔らかく、また木材が乾燥収縮したり初期の施工誤差があると接合部に隙間が生じてしまい、構造を固めることができません。そこで貫接合部では楔を打ち込み締め固めます。楔は中国などではあまり見られず、我が国で特に発展的に用いられる要素で、やはり地震に対する配慮が背景にあると考えられます。楔の使用は、接合部内で部材を落とし込み、噛み合わせることを可能とします。重源上人が考案した東大寺の接合技術は、複雑な形状をもつ4方向仕口ですが、形状を規格化し、並列的な大工加工を可能とすることで非常に短期間で建物を完成することができたといわれています。

さらに堅く接合部を締め固めるための技術に「木殺し」と呼ばれるものがあります。これは接合部を組み立てる際に、構成する材料の表面を玄翁でたたいて、表面付近の細胞を潰してから組み立てる技法です。横方向の変形に対して木材の細胞はたとえ一端潰れたとしても、弾性を失ったわけではなく、長期的に膨らみ、寸法を回復しようとします。この作用で接合部の嵌合度や接触応力を持続させることができるのです³⁾。

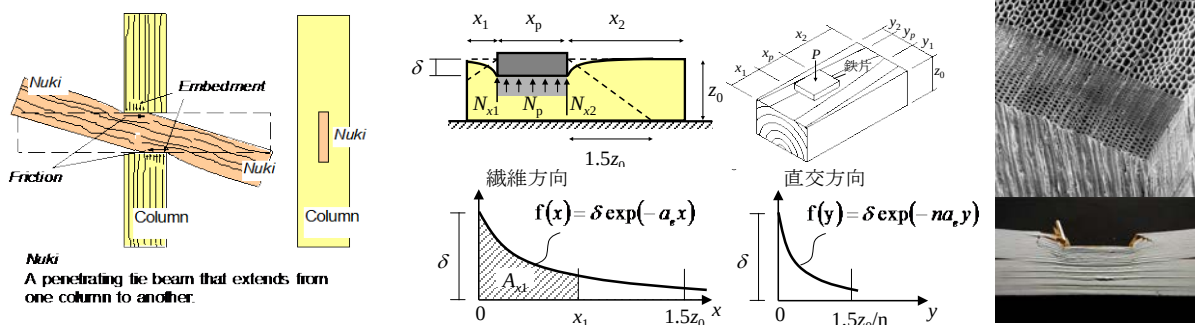


図5：貫接合部とめり込みの力学モデル²⁾

柱の曲げによって外力に抵抗する、モーメント抵抗フレーム構造を構成するために差鴨居接合部が用いられます。図6に示す竿車知接合部は、差鴨居用の技術のひとつで、車知と呼ばれる傾斜した線を打ち込んで部材同士を留めつけます。これにより車知は柱と梁の部材同士を引き寄せ、密着させる機能を持ちますが、我が国固有の接合具です。我が国の大工は特に締める、固める、といった機能を大切にしてきたことがわかります。車知を有する差鴨居接合部がモーメントを受けると、車知接合部には大きな引張力が作用します。このとき、車知は仕口内で回転するように動き、車知道を横に押し広げます。これを止めているのが梁先端に加工された目違いです。目違いは車知を打ち込む際に柱の中に差し込まれています。この車知、車知道、竿、目違いの寸法と強度のバランスが取れたときに、接合部は粘り強い変形挙動を示す事ができます。また、雇い竿が梁の全断面で無く上部だけで、竿車知道は下部でつながっていることもまた車知の回転による横割裂を抑止するために重要な形状です。実際に様々な寸法パラメータを設けて実験を行うと、伝統的に用いられてきた寸法バランスは粘り強さを発揮するために非常に理に合ったものであることが証明されました⁴⁾。

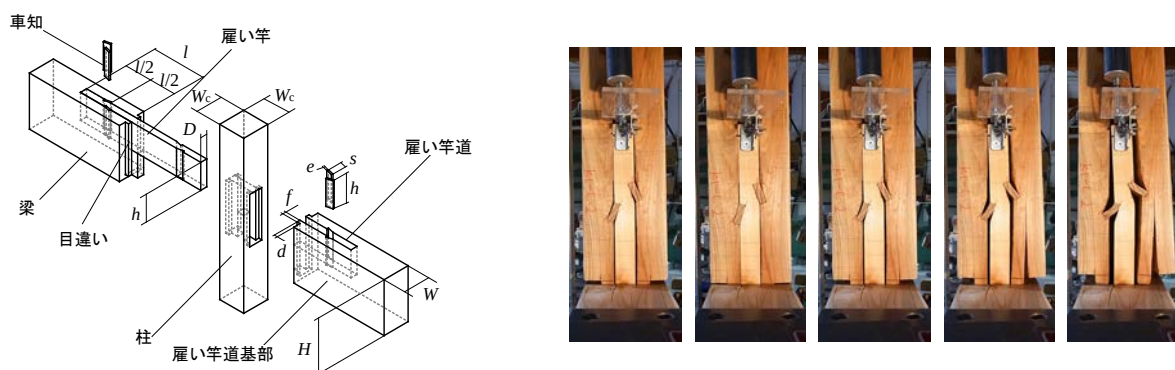


図6：雇い竿車知接合部と変形の様子

4. バランスを取る、受け流す

伝統建築は先述した礎石建て構法の流れを受け、柱を直接礎石上に設置するいわゆる石場建て構法によって立てられる事例が多くみられます。石場建ての利点は床下の通気を良くすることで、部材の耐久性を高めることにあって考えられます。それ以外に、地震時に地震動を受け流す、いわゆる免震的な効果があるのでは無いかと指摘がなされています。実際に地震被害調査に行くと、図7左に見られるように、礎石からずれ落ちてはいるが、健全な状態の建物を目にすることができます。反対に、同様の建物でも倒壊してしまうものや(中)、束立ての石場建てのため、礎石上で滑ることができずに反対に束の接合が完全に破壊してしまう事例(右)も見られます。実際に実大建物の振動実験を行うと、後者の様な挙動になってしまうことが多いのです。全体が一律に滑ることができれば効果的な免震機構となりますが、実際には滑る部分と滑りにくい部分が混在し、結果として滑らない場所に力が集中して破壊してしまう事につながります⁵⁾。伝統構法免震機構はさらなる技術的な検証が必要と言えるでしょう。



図7：地震被害の例

社寺建築の軒下に取り付く組み物は外観を決定づける重要な要素です。大斗や肘木を組み合わせ、2段3段に徐々に広げながら重ねて構成される組み物は、屋根の鉛直荷重を柱に伝達する際、隅木や軒垂木の支持点を柱よりも外に持ち送ることで深い軒を支えるために必要な要素です。多段の組み物が一段一段回転変形と摩擦滑り変形することで、地震時エネルギーを吸収するのでは無いかと言われています⁹⁾。その他にも組み物と同時に使用される丸桁や頭貫と言った横架材が、柱傾斜復元力と共に水平抵抗力に重要な働きを持つことがわかってきました。図8には傾斜復元力の試験結果を示します。頭貫が存在すると、大きな水平抵抗力を持つことがわかります。組み物や頭貫は、常に自重による鉛直力を受け続けるので緩むことが無く高い嵌合剛性を常に発揮することができます。重い屋根荷重を耐力性能に活かすため、組み物機構は効果的であると言えます。

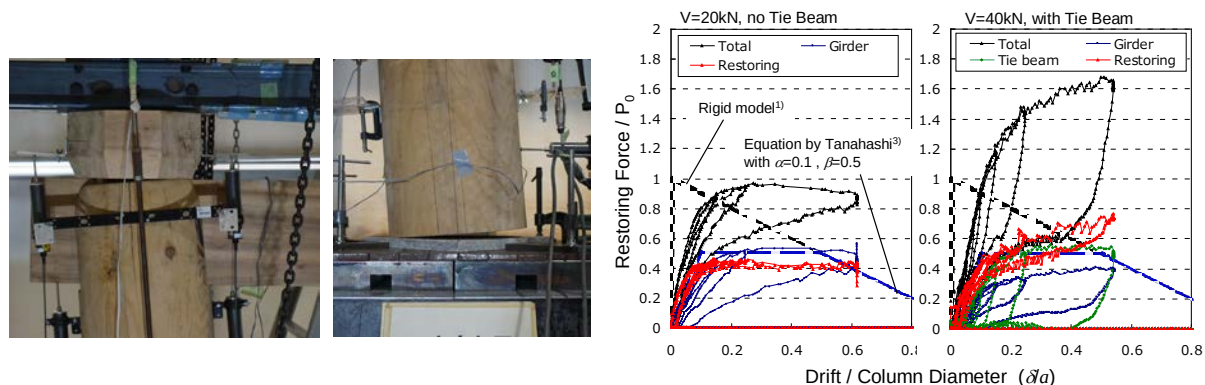


図8：柱復元力の実験例⁹⁾

軒に作用する大きな鉛直力を支える要素として桔木と呼ばれる部材があります。桔木は我が国固有の部材で、軒垂木の上に並べて配置する丸太部材です。天秤構造をしており、中央側で支えることで軒先の跳ね上げる機能を持ちます。重い軒先を支持するのに尾垂木に負担を強いていた従来手法に比べ、格段に強度を増すことになります。興味深いことに仮に軒先が垂れた際に桔木を調整できるよう桔木の根元はしっかりと固定せず、動かせるようになっています。

三重塔五重塔といった塔建築は通し柱では無く管柱で構成されています。このため各層がそれぞれ比較的柔らかく動くことができ地震時に高次の変形モードを示し、地震力を受け流す機構となります。中央には相輪の荷重を支える心柱が配置されていますが、中にはこの心柱が中にぶら下がっている構造をしているものがあります。間に横架材を挟みつつ多層に積み上げる五重塔は、長期的に自重によって沈下します。このとき心柱が地面に接すると、突っ張りとなり相輪と屋根との間に隙間が生じてしまいます。これを防止するために、沈下と同時に下に下がるように心柱を施工するのです。やじろべーのようなバランス架構となりますが、このような柔軟性を持たせる工夫は伝統構法の随所に見ることができます。



図9：桔木（左）と三重塔の心柱（右）心柱は地盤に接せず浮いている。それぞれ簡易に固定される。

5. 伝統構法→在来工法への変化

ここまで特に社寺等大型の伝統建築に用いられる技術を中心に見てきました。では住宅はどうでしょうか。昔も現在もほとんどが木造で建てられています。住宅は社寺等の大型建築と比べ予算規模が小さく、満足な部材断面や耐力要素を必ずしも確保できるとは限らないため、度重なる地震によって少なからず被害を受けてきました。そこで、技術的に明治期以降の西洋の考え方が導入され、在来工法として大きく変化しました。在来工法は伝統的な町家住宅（書院造形式）を基本形としますが、西欧技術から見た視点と、濃尾地震(1891)、関東大地震(1923)の被災建築物調査による問題点が整理され、以下の様に定義されました。

- ① 土台・足固めの設置：柱脚の礎石からの踏み外しを防止
- ② 筋交い耐力壁：壁の耐力性能の向上
- ③ 屋根の軽量化：瓦→鋼板等
- ④ 伝統仕口の否定・金物補強：柱の断面欠損を最小に
- ⑤ 火打ち部材の導入：水平構面を固める
- ⑥ 通し柱：最も大きな引き抜き軸力のかかる隅柱の引張性能向上
- ⑦ 基礎とアンカーの設置：不同沈下、底面一体性、曲げ戻しによる応力分散（基礎）、壁体の浮き上がりの防止

すぐに一般に広まることはありませんでしたが、学会主導で研究成果が蓄積され、木構造設計標準の刊行(1949)、建築基準法の制定(1950)、住宅金融公庫共通仕様書(1950)の策定に及んで、標準仕様として一気に普及することになりました。初期の在来工法では、仕様規定が一人歩きし、筋交い端部が簡易に留めつけられ地震時には引き抜きに対して無力で踏み外す、通し柱が層の変形の差に追従できずに折れるなど必ずしも耐震性能が高くない場合もありました。また床下や壁内の密閉度が上がったため、耐久性が低下したという指摘もあります。近年は面材大壁耐力壁、プレカット仕口、JAS 規格材、根太レス合板、集成材梁、外壁、断熱材+透湿防水シートといったさらなる品質管理の徹底と合理化により伝統構法的な要素はますます姿を消しています。

大きな傾向の変化を以下に列記すると、

- ・ 伝統的デザインと大きく異なる屋根と外壁の仕様変化、不燃外壁、軽量鉄板屋根、
- ・ 内装は見える構造から隠す構造へ（大壁・クロス貼）、気密性の向上の要求
- ・ 複雑な木組み架構から単純・合理化な構成へ。個々の接合部には大きな力が作用する。

耐震性能についても基本的に耐力壁と呼ばれる壁に負担させることとし、またその性能は壁倍率という指標で評価されます。板壁の様な伝統構法で用いられる耐力壁は初期の剛性はあまり高く無いが、最終的に木材同士の接触で大きな荷重を負担できる特徴がありました。これは建物の倒壊を防ぐカント年からは非常に優れた壁と言えます。ところが現行の耐力壁の指標では後者の利点は活かされず、初期剛性の小ささによって指標が定まるため、低い強度の壁として見なされています。伝統構法の利点を活かすには評価基準の変化が必要です。

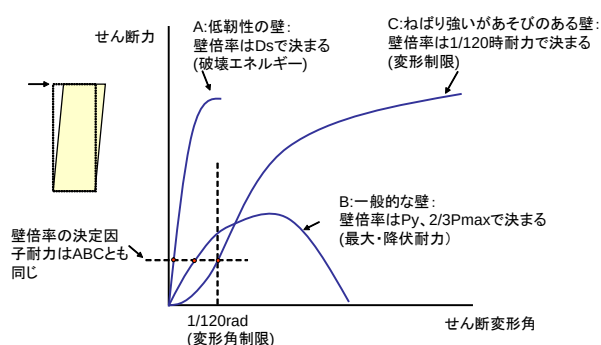


図 10：伝統木造住宅の地震被害と壁倍率の概念

6. 伝統構法の設計とこれから

現在純粋に近い伝統構法住宅の新築シェアは 1%を切っています。構造面での法規制が新築を極めて困難にしている為とされています。そこで伝統構法を再定義し、耐震安全性は確保しつつより容易に伝統構法住宅を設計する道筋を作る検討が行われています。

具体的には、設計法に関しては限界耐力計算と呼ばれる耐力要素の終局変形を考慮した設計法の適用が検討されています。土塗り壁や板壁と言った壁要素に限らず、差鴨居や貫フレームなどの接合部も積極的に耐震要素として考慮に入れることで、より正確な評価を行います。ところがこれらの伝統耐力要素の性能は未だ不明点が多く、実験や力学モデルに基づく評価式の制定が試みられています。また、設計者が自由に参照できるようなデータベースの整備も検討されています。また、材料面では例えば限界耐力計算を行う際に用いられる構造部材は、その品質性能が明確である必要があります。そのため伝統構法で用いられてきた天然乾燥の製材は使用できませんでした。一方でその色味や香り、加工のしやすさなど利点やエネルギー面の利点を活かすべく、品質に関する規制の緩和を図る試みがされており、基礎的な研究が続けられています。

伝統構法は木造建築の中でも特に複雑な挙動を示す、難しい構法です。しかし我が国で育まれてきた重要な文化であることも間違いありません。将来に向けて伝統構法建築物を継承していくためには、伝統構法の機能や利点不利点を正當に評価する必要がありますし、研究者や技術者のますますの協働が求められています。



図 8：E ディフェンスにおける実大震動台試験

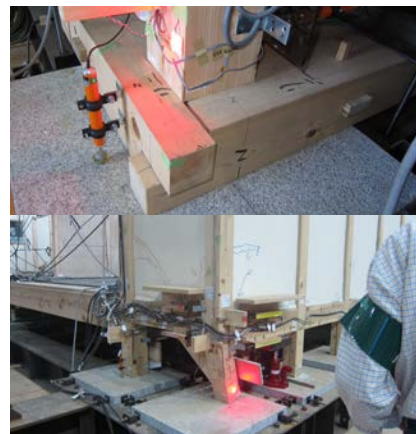


図 9：柱脚の足固めと柱の折損

参考文献

- 1) 稲山正弘“木材のめり込み理論とその応用”，東京大学学位論文，1991.12
- 2) 池 浩三，鈴木 樹，片岡 靖夫，東大寺南大門の構成部材―軸部の肘木と貫，日本建築学会計画系論文報告集，No. 453，p127-136，1993.11
- 3) 鄭 基浩，北守顕久，小松幸平，スギ圧縮込み栓の回復特性による金輪継ぎ手接合部の抗クリープ性能向上，木材学会誌Vol. 53 No. 6 pp. 306-312，2007
- 4) 北守顕久，野村昌史，稲山正弘，後藤正美，雇い竿車知栓留め柱―梁接合部の引張性能評価式の提案，日本建築学会構造系論文集，79(695)，pp. 93-102，2014
- 5) 伝統的構法の設計法作製および性能検証実験 平成24年度事業報告書
http://green-arch.or.jp/dentoh/report_2011.html
- 6) 藤田香織ほか，静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価，日本建築学会構造系論文集，No543，p121.，2001.5

- 7) Kawai N. : Column Rocking Resistance in Japanese Traditional Timber Buildings. In: Proceedings of the International Engineering Conference, Vol.1:186-190, 1996.
- 8) Tanahashi H, Suzuki Y. : Analytical Simulations of Full-Scale Static and Dynamic Tests of Traditional Wooden Frames. : Proc. of urban cultural heritage disaster mitigation, 4:181-188, 2010.
- 9) Akihisa Kitamori, et. al, EXPERIMENTAL STUDY ON RESTORING FORCE OF JAPANESE TRADITIONAL COLUMN COMBINED WITH TIE BEAM AND BEARING BLOCK, proc. of WCTE2016