

伝統木造建築の構造設計の考え方

理事 鈴木祥之

1. はじめに

木造建物は、木材の特性を活かした多様な建築空間が創造できるという特長を持ち、規模や用途に応じた多種の構工法が発展継承されてきている。我が国の木造建築は、気候・風土等に適応した地域の特色ある伝統的な軸組構法が生み出され、現在に至っている。このような地域特有の構法に加えて木材のばらつきや木組み接合部の複雑さなどから、伝統木造建物の構造解析は現代の先端技術をもってしても極めて難しいものとなっている。そのため、永年にわたる大工棟梁の知恵が積み重なって築かれた伝統木造建築の構造力学的な解明も十分になされていない。

一方では、大地震が起こるたびに木造建物は大きな被害を受けてきた。とくに、1995年1月の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災では、大きな被害を受け、多くの死傷者を出す原因となった。近い将来、東海、東南海、南海地震など、大地震の発生が予想されているが、十分な安全性を確保できていない木造建物も多いことが指摘される。このようなことから、木造建物の耐震性能の確保・向上は、重要かつ緊急課題となった。

阪神・淡路大震災以後、建築物の規制に関連する多くの法律等が制定、改正された。とくに、建築基準法が1998年6月に改正され、仕様規定から性能規定への移行がなされ、木造建物の構造性能とりわけ耐震性能の評価・検証は重要な課題となっている。さらに予想される大地震に備えて、木造建物のなかでも伝統構法を含む軸組構法木造建物の耐震安全性が重視され、軸組構法に適した耐震性能評価に基づいた耐震設計法・耐震補強法の開発が急務となっている。

このような視点から、木造建物の地震被害調査などとともに各地域における伝統木造建物の構法的特徴と構造特性の把握、各種の耐震要素から実大伝統木造建物に至る静的・動の実験に基づいて地域特有の軸組構法に適用し得る耐震性能評価法や耐震設計・耐震補強設計法の開発、に関する研究に取り組んできた^{1,2)}。以下に、このような取り組みから、伝統構法木造建物の振動台実験による耐震性能評価法や耐震設計法の考え方について述べるとともに伝統構法木造建物の設計事例を示す。

2. 伝統構法木造建物の耐震性能評価

建物の耐震設計においては、耐震性能を設定し、それに基づいて設計された建物の耐震

性能を評価・検証し、耐震性能を確保することが基本となる。耐震性能の評価・検証する方法として、2000年に改正された建築基準法における木構造建物の構造計算規定の枠組では、図1に示されるように構造計算ルートによって、「壁量計算」、「許容応力度等計算」、「限界耐力計算」などの計算法がある。改正前の基準法の枠組みでは、構造設計の方法は、木構造に限らず全般的に仕様規定を満たすことと許容応力度設計を組み合わせたものであった。許容応力度計算による構造設計では、基準の一部を仕様規定が占めており、建築物が満たすべき性能を必ずしも明確にはしていなかった。

これに対し、改正基準法で導入された性能規定では、建築物が満たすべき性能を明確に記述するものとなっている。また、仕様規定によらなくても良い検証法として新たに限界耐力計算法が導入された。耐震設計に関しては想定される地震動の作用に対して建築物に要求される構造性能が明確に定められ、同時にその構造性能評価基準の原則が示されている。限界耐力計算法によって構造計算を行えば、施行令第3章第3節の木造仕様規定の適用が除外されるため、継ぎ手・仕口部に金物を使わない伝統構法の木構造建物も建築基準法の枠組みの中で設計が可能である。

以上が、建築基準法に基づく木造建物の構造性能評価であるが、住宅の品質確保の促進等に関する法律による構造性能評価があり、概ね基準法の壁量計算に対応しているが、より詳細な検討が必要となっている。

重要文化財建造物及び重要伝統建造物群保存地区内の伝統的建造物（以下「文化財建造物等」という。）に対しては、「文化財建造物等の地震時における安全性確保に関する指針（平成8年1月）」で、文化財建造物等の地震被害の想定ならびに対処方針に係わる基本的な考え方が示され、重要文化財（建造物）のうち木造建築物に対して、所有者等が行う耐震診断の標準的

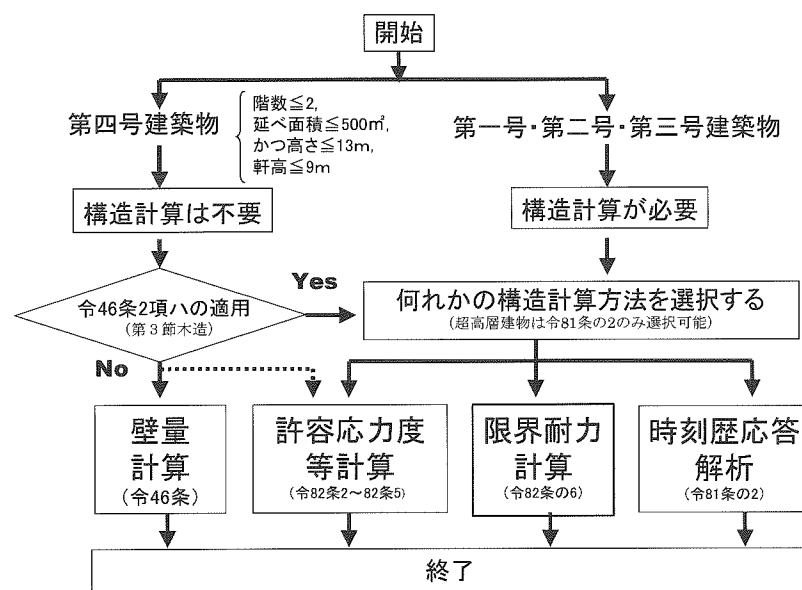


図1 建築基準法における構造計算規定の枠組

な手順と方法および留意すべき事項が「重要文化財（建造物）耐震診断指針（平成11年4月）」に示されている。この指針に基づいて必要とされる所有者診断および基礎診断の具体的な方法を「重要文化財（建造物）所有者診断実施要領（平成11年4月）」および「重要文化財（建造物）基礎診断実施要領（平成13年4月）」にまとめられている³⁾。所有者診断は簡易診断であるが、基礎診断では、保有耐震性能を確認する具体的な方法として、「エネルギー一定則による場合」と「等価線形化法による場合」の2つが示されている。「等価線形化法による場合」の方法は、限界耐力計算に近いものとなっている。

木造住宅については、現在普及している構造設計法や耐震性能評価法は、構造耐力を壁要素に依存し、壁倍率に基づいた壁量により耐震性を確保しようとするものである。このため、木造軸組構法、特に筋かい等の斜材や合板等の面材に加えて金具等による補強などがほとんどなされていない伝統的な軸組構法の木造住宅などは、木材と木組みの粘り強い特性を生かして建物がしなやかに変形することによって耐震性能を発揮するものであり、従来の壁量計算は耐力重視型の設計法であるため、伝統構法には適していないことが指摘される。

現代的な軸組構法による木造住宅は、一般に、高い剛性と耐力を持っている。一方、伝統軸組構法の木造建物はそれほど大きな耐力はないが、実験でも証明されているように大きな変形性能がある。耐震性能を適切に評価するには、耐力と変形性能の両者を考慮することが大切であり、基準法の枠組においては、「限界耐力計算」がこの両者を考慮して耐震性能を評価することが可能である。このような背景から、伝統的な軸組構法にも適用できる限界耐力計算に基づく耐震性能評価・耐震設計法の実用化を計るために、軸組構法に用いられる各種の耐震要素や実大軸組の静的・動的実験が実施され、これらの実験に基づいて軸組構法木造建物の耐震性能評価法や構造解析法の開発が進められた。

3. 伝統木造軸組の耐震性能評価実験

伝統構法を含む軸組構法の木造建物の耐震性能を把握するために、木造建物の構法的特徴と構造特性を調べ、このような特徴や特性が盛り込まれた木造建物の試験体を製作して静的ならびに動的性能評価実験を行っている。ここでは、各種の耐震要素が組み込まれた単位軸組と社寺建築にみられる伝統軸組の耐震性能評価実験について紹介する。

1) 単位木造軸組の耐震性能

軸組構法の基本である単位軸組の耐震性能を調べる。ここでは、柱と土台、桁から構成される単位軸組を対象にして、柱-土台、柱-桁の仕口部の性状、貫、差鴨居などの横架材、筋かいなどの斜材、土壁や垂れ壁などの面材などの効果を実験的に調べる。現在、こ

のような単位軸組の静的載荷実験に加えて、京都大学防災研究所の振動台を用いた動的性能評価実験を実施中である⁹⁾。実験では、土壁、貫などの耐震要素を軸組に組み込み、ほぞの種類、柱断面寸法をパラメータとし、静的水平繰返し加力実験および振動台加振実験を行っている。試験体は、静的実験では平面軸組で、動的実験では立体軸組とした。振動台実験では、加振方向のみに耐震要素を配置した単位軸組試験体のみならず、2方向に耐震要素を配置した単位軸組試験体についても行っている。

耐震補強法の有効な技術である制震補強の効果を調べるために、制震ダンパーなどを単位軸組に組み込んで同様な振動台実験も行っている。また、耐震要素が異なる軸組が連続した場合の各耐震要素の足し合わせを検証する実験も行っている。これら単位軸組や連続軸組の耐震性能評価実験によって、軸組の破壊に至るまでの復元力特性（耐力－変形関係）を明らかにするとともに実験結果を蓄積しデータベース化して、木造建物全体の耐震性能評価法を構築する。

2) 伝統構法木造軸組の耐震性能

町家など多くの地域に現存する民家や社寺建築のような伝統木造建物は、典型的な伝統軸組構法である。一般に、伝統木造建物は、大断面の柱が礎石の上に載り、桁梁や貫等の横

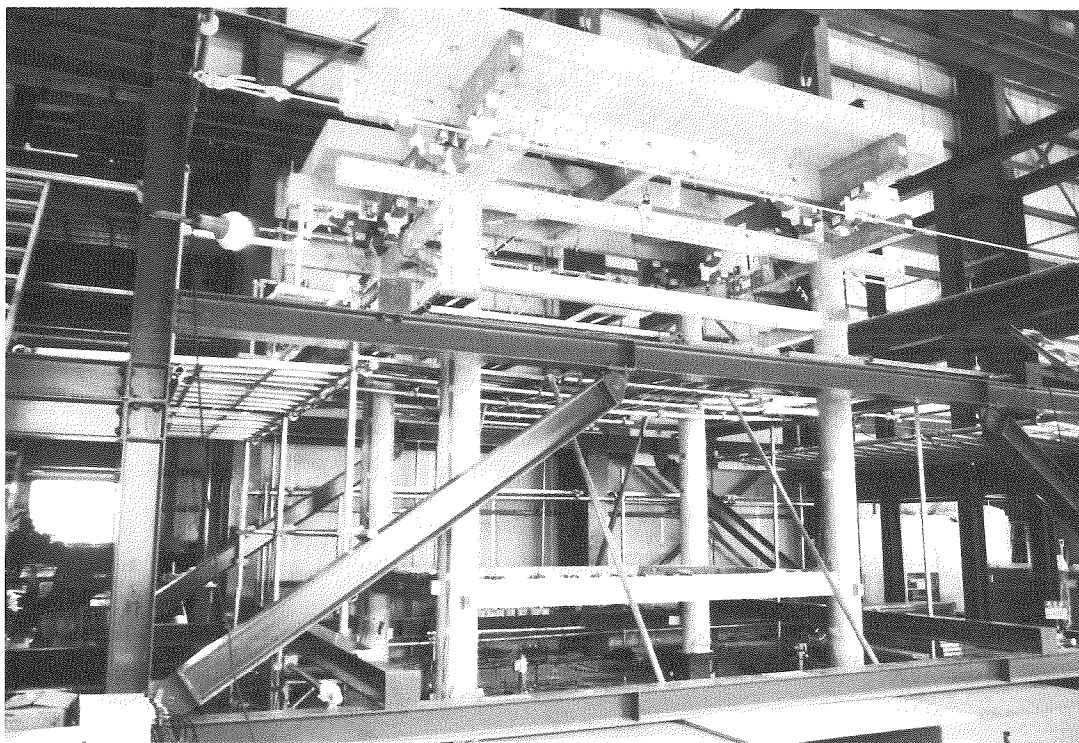


写真1 伝統木造軸組（1スパン×1スパン）の振動台実験

架材などで構成される軸組構造で、瓦屋根の重い荷重を支えており、地震時には大径柱の傾斜復元力特性⁵⁾、柱-貫仕口部のめり込みなどによって抵抗する特有の機構を有している。近年、このような構造メカニズムに関する研究が進められているが、伝統木造建物の地震時における動的挙動などは解明されていない。伝統構法木造建物の構造力学的メカニズムを明らかにするとともに耐震性能評価法の実験的検証を行うために、伝統木造軸組の実大振動実験を継続的に行ってきた⁶⁻⁸⁾。

伝統軸組の構造的な特徴を盛り込んだ伝統木造軸組の実大試験体を製作し、振動台を用いた動的実験を実施した。写真1に見られるように試験体は、高さ5メートルの4本柱の立体軸組(1スパン×1スパン)で、柱頭上の組物を介して、屋根重量に相当するようにPC版製の重りを桁梁上に設置している。柱頭部および柱脚部の水平変位、柱脚部のすべり・浮き上がり量、頭貫と桁の相対水平変位、柱と貫の回転角など試験体各部にセンサーを取り付けて計測を行っている。また、実験中の振動状況を把握するために、ビデオカメラ、CCDカメラを用いて撮影している。

振動台実験では、大きな地震を受けると軸組試験体から接合部等におけるめり込みや摩擦による大きな音が発生し、音とともに大きく揺れていることが観察できる。柱が10分の1ほど傾くような大きな変形をするけれども、地震が終わると自然に元の形に戻る性能を軸組は持っている。伝統軸組構法では、柱と貫等の接合部の曲げモーメント抵抗とともに柱の傾斜復元力特性は地震に抵抗する重要なメカニズムであり、柱の幅と高さの関係からどこまで変形を許すかを考えれば、傾斜復元力を期待できる。

柱の傾斜復元力特性をより詳細に調べるために、振動台実験と併せて実施した静的実験で得られた軸組の復元力特性を図2に示す。ここで、軸組は振動実験で用いた試験体から

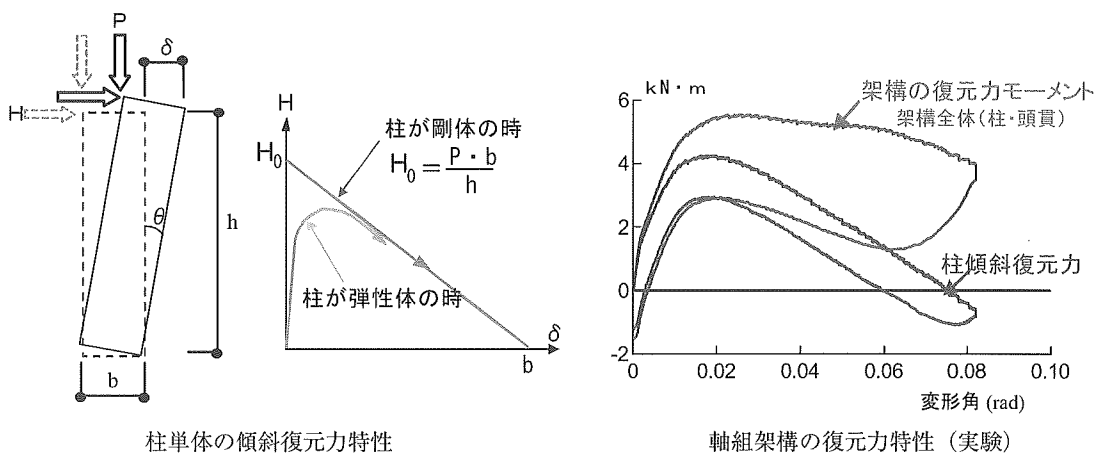


図2 柱の傾斜復元力特性

内法貫と足固めを取り除いており、柱-組物-頭貫からなる。図2には、頭貫のモーメント抵抗を除いた柱傾斜復元力も示す。軸組全体の復元力は、頭貫のモーメント抵抗などが働き、柱が大きく傾いても軸組の復元力は低下していないことが分かる。

組物は、屋根荷重など上部の荷重を柱に伝達するだけでなく、柱の傾斜復元力を助ける役割を持っていることも分かってきた。ただし、組物は斗と肘木が互いに積層して構成されており、振動を受けると各要素間のめり込みや摩擦等による減衰効果が期待されているが、一連の実験では、減衰性能はそれほど大きいものではなかった。

柱脚は、礎石上で固定されていないため滑りが生じると考えられるが、一連の振動実験では滑りはほとんど見られず、柱のロッキングと軸組全体の捩れにより、柱脚は礎石上で少しずつ移動する。大きな地震入力に対して、柱脚の滑りによる免震効果は期待できない。

また、柱間をつなぐ横架材の効果を調べるために、柱-横架材の接合部仕口が異なる立体軸組や写真2に示されるような8本柱の立体軸組（3スパン×1スパン）も行っている。柱-横架材接合部の仕口形状によって復元力特性は大きく変わるが、いずれも大きな変形性能を有しており、ここで行った伝統軸組構造は十分な靱性を持っていることが分かった。

以上のように、伝統構法には、永年にわたって蓄積されてきた大工棟梁の知恵と技が盛

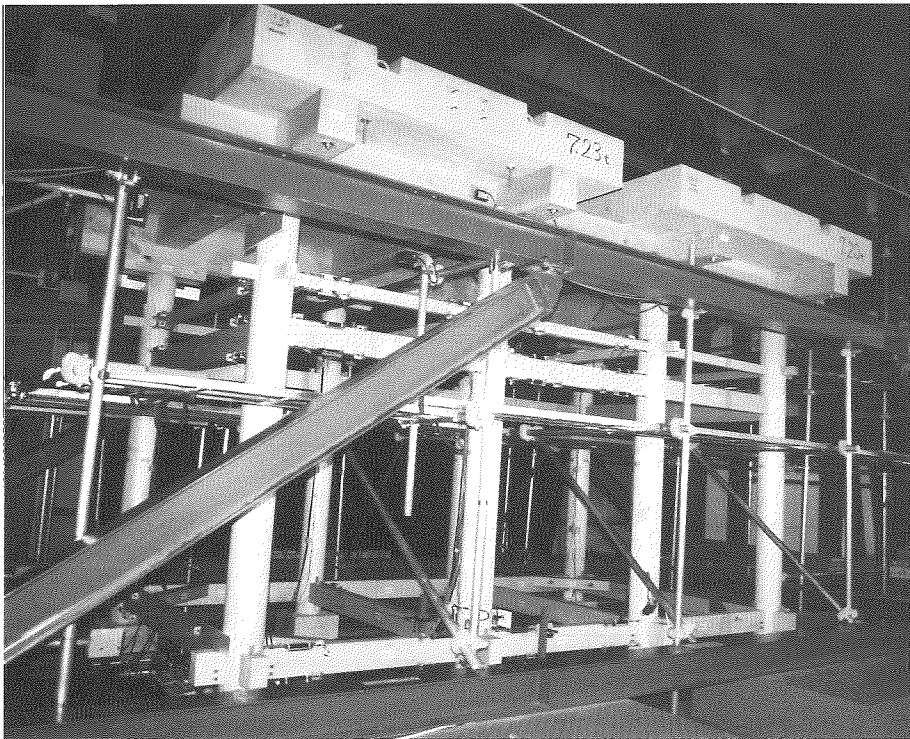


写真2 伝統木造軸組（3スパン×1スパン）の振動台実験

り込まれている。伝統構法のよさを実験等で科学的に解明していけば、そのような技術、技法は、社寺等文化財の保存や修復技術として使えるだけでなく、現代木造建築にも生かすことができると考えている。

4. 限界耐力計算による木造軸組構法の耐震設計法

国土交通省告示による「限界耐力計算」に準ずる計算プロセスで、木造軸組の復元力特性や減衰特性を評価して最大応答変形を簡便に把握でき、また制震ダンパーを含む補強法の補強効果についても容易に定量的に把握でき、木造軸組の耐震設計ならびに耐震補強設計に適用し得る耐震性能評価法として限界耐力計算法の開発を進めてきた^{1,2,9,10)}。

従来の計算法では、地震時の外力が与えられていたが、限界耐力計算法では、地震動の建物への入力を規定している。性能規定における構造体に対する要求性能と設計用入力地震動のレベルを表1に整理する。

限界耐力計算の流れは、図3に示すように、最初に建物の復元力特性を算出し、1自由度系に集約する。等価線形化手法を使い、応答スペクトルをもとに最大応答を計算する。最後に最大変形が損傷限界、安全限界を満足するかを検証する流れである。応答計算の概念は難しいが、計算そのものはそれほど難しいもの

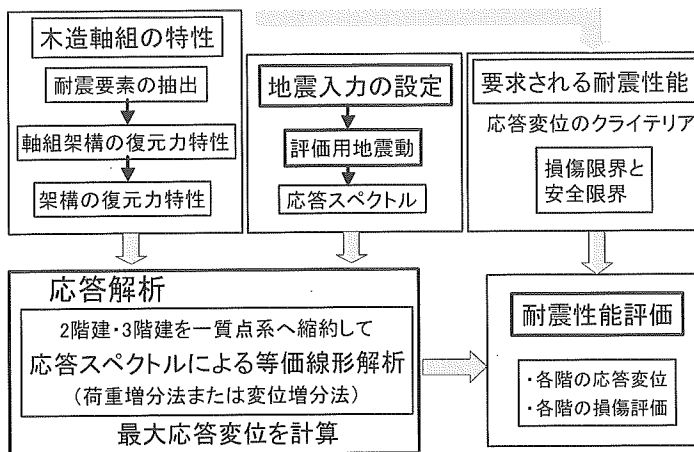


図3 限界耐力計算による耐震性能評価

表1 構造体に対する要求性能と設計用入力地震動のレベル

要求性能		地震動の入力レベル	構造骨組の要求性能
①損傷限界	損傷防止	建設地において、建物供用年限中に1度以上遭遇する事を想定する地震（再現期間概ね数十年から50年程度）	地震時に構造安全性の維持に支障のある損傷を生じない。
②安全限界	人命保護	建設地における、建築物の構造安全性への影響度が最大級のレベル。	人命の保護。地震時に各階の倒壊・崩壊が生じないこと、即ち、人間が生存可能な空間を維持すること。

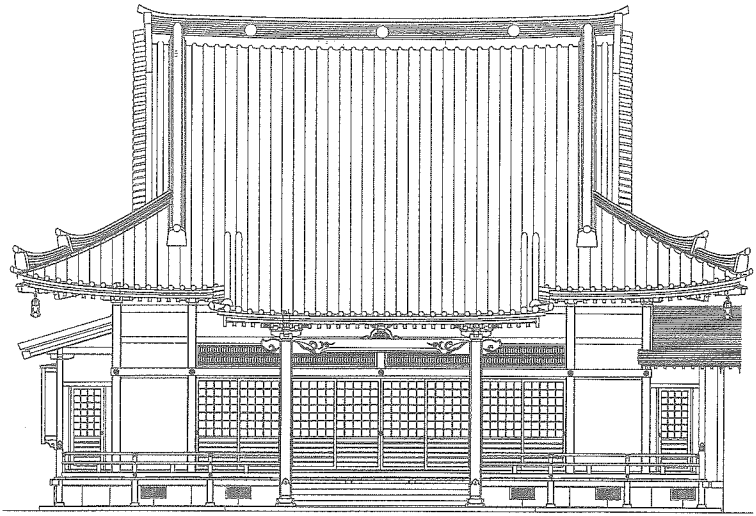


図4 立面図

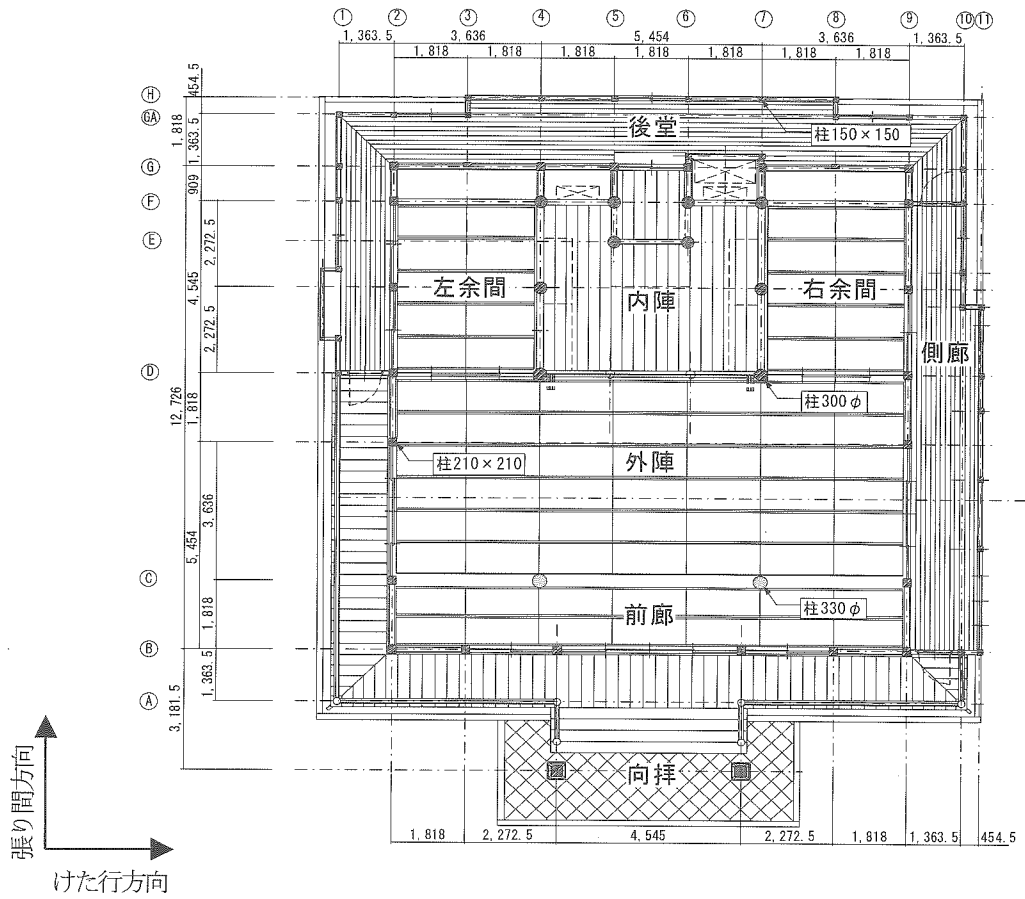


図5 平面図

ではなく、手計算もしくはパーソナルコンピュータのプログラムなどを使って計算可能である。

この方法の特徴は、木造軸組の復元力特性や減衰特性を評価して、最大応答変形を簡便に把握できるとともに制震ダンパーを含む補強法の補強効果についても容易に定量的に把握でき、伝統構法を含む軸組構法の木造建物の耐震設計ならびに耐震補強設計に適用し得ることである。

以下に、寺院建物の設計にこの限界耐力計算法を用いた事例を紹介する。

1) 建物の概要

寺院建築の新築における限界耐力計算に基づいた設計事例¹⁹⁾を示す。平面計画は張り間、けた行方向とも15.9mの正方形であり、平屋建て、延べ面積230.53㎡の建物である。図4、5に立面図および平面図を示す。柱は外陣、内陣部が直径30cmの丸柱、外周が21cm角、下屋部分が15cm角の柱である。柱に2～3段の貫材を掛け渡した伝統的な貫構造としている。外周部には漆喰仕上げの土壁を配置した。

2) 設計荷重

表2に建築基準法施行令84条に基づいて設定した各構面の単位重量を示す。地震用建物重量は、1,037kNである。解放工学的基盤での加速度応答スペクトルは、告示に示されるスペクトルを用いた。加速度増幅率Gsは、告示平12建告第1457号第7に基づき、近隣のボーリングデータを参考にして算出した。

3) 復元力特性の算定

主な耐震要素は、①土塗り壁：壁厚60mm、②土塗り壁：壁厚120mm、③土塗り小壁、④貫関係（頭貫、飛貫、力貫、虹梁）、⑤柱頭柱脚の長ほぞ、⑥柱の傾斜復元力である。単位軸組フレームの耐震性能評価実験から得られた復元力特性モデルを設計基準値とし、本建物の架構に合わせて換算した上で、張り間、けた行方向別に加算することで復元力特性をそれぞれ求めた。各耐震要素について換算の仕方を示す。

(a) 土壁：耐力は、柱間寸法および壁厚に比例する。スパンが0.909mであれば、単位フレームの復元力を $0.909/1.8 = 0.505$ 倍し、壁厚が120mmであれば、単位フレ

表2 固定荷重

部位	項目	重量 (N/㎡)
屋根	棧瓦・野地板	600
	小屋組・母屋・垂木	400
	天井	250
屋根2	銅板（下地、垂木を含む）	200
	母屋	50
1階床	板張り（根太を含む）	200
	大引き等	100
	畳	150
外壁・内壁	土塗り壁（両面塗り）	850
	建具	100

ームの復元力を $120/60=2.0$ 倍する。また柱端部の仕口において、本建物は長ほぞであり、単位フレーム実験では短ほぞとなっているが、これによるほぞの耐力差は見込まない。

(b) 土壁小壁：耐力は、小壁のせいが階高に対して占める割合（ $=h/H$ ）に比例し、柱間寸法および壁厚には比例しない。また、ほぞの耐力差は見込まない。

(c) 貫：耐力は、貫のめり込み面積と貫段数に比例し、階高に反比例として換算する。貫の高さ位置には関係しない。仕口の形状は通貫、大入れ、略鎌であるが仕口形状に応じて相当する耐力に換算している。なお仕口内の継手については略鎌と見なして耐力を算定する。

(d) ほぞ：壁、小壁の取り付けかない柱の柱頭、柱脚は長ほぞとする。300φの丸柱の柱脚部は土台がないが、大引き又は足固めとの仕口があり、また基礎との接合はダボによることから、少なくとも長ほぞ1個分の耐力は見込めるものとした。耐力はほぞ幅に比例するものとし、単位フレーム実験のほぞ幅30mmに対し、210角の側柱のほぞ幅を40mm、300φの丸柱のほぞ幅を60mmとして計算している。耐力は階高に反比例し、階高が4.69mであれば、単位フレームの復元力の $2.7/4.69=0.58$ 倍となる。下屋部分は、フレームの高さを2.675mとして耐力換算を行っている。

(e) 柱の傾斜復元力：土壁・小壁の取り付けかない内陣および外陣の柱は、断面が大きく、かつ柱頭・柱脚部が剛体回転となる軸組構造のため、柱の傾斜復元力特性を考慮する。但し、柱の傾斜復元力は履歴減衰を有していないので、計算では、柱の傾斜復元力を考慮しない復元力特性から、履歴減衰を求める。

各耐震要素の復元力を建物の方向ごとに加算して求めた建物全体の復元力特性を柱の傾斜復元力の有無ごとに図6に示す。

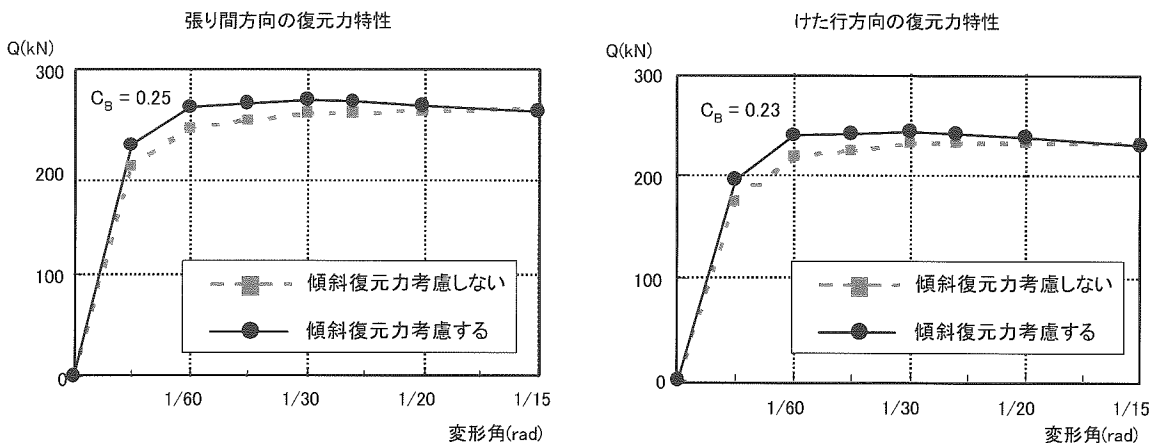


図6 建物全体の復元力特性

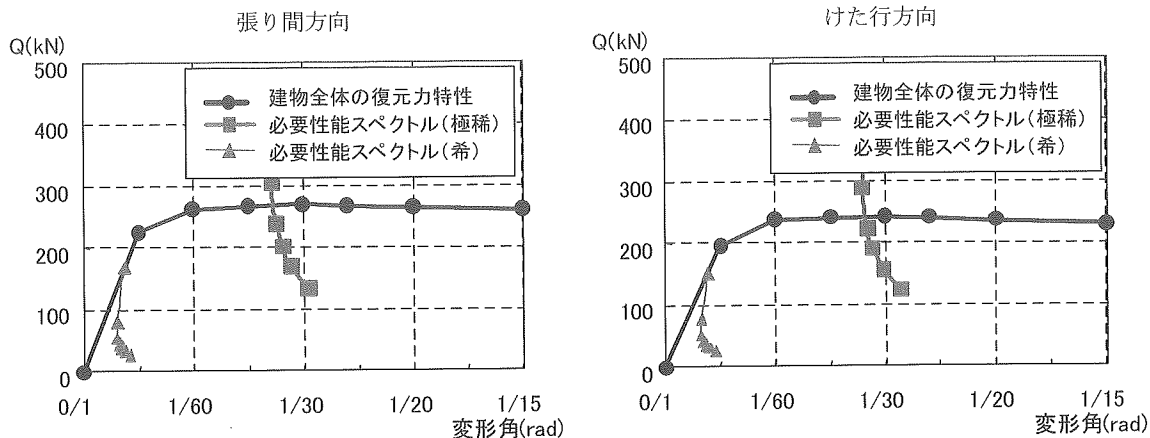


図7 耐震性能評価

4) 限界変形角の設定

損傷限界変形角は、建物の軸組に損傷を与えない程度として、1/120radとする。安全限界変形角は、各耐震要素の最大限界変形角から決めれば1/15radであるが、層間変形角が1/16rad（柱幅）を超えると、柱の傾斜復元力が負の力となって変形を増大する方向に作用し始めることや、建物用途が寺院であり不特定多数の人の出入りが考えられるため、安全性の確保が重要であることを勘案して1/30radとする。従って、設計のクライテリアは、以下とする。

稀に起こる地震に対して：損傷限界変形角 < 1/120rad

極稀に起こる地震に対して：安全限界変形角 < 1/30rad

5) 耐震性能評価

前述の復元力特性を用いて耐震性能評価を行い、各方向ともに設計クライテリアを満足することを検証する。計算の結果、最大応答値は、張り間方向において損傷限界変形角1/161、安全限界変形角1/34、けた行方向において損傷限界変形角1/154、安全限界変形角1/33となり、設定した設計クライテリアを満足した。図7に張り間方向、けた行方向の耐震性能評価の結果を示す。

5. おわりに

伝統構法を含む軸組構法木造建物に適用し得る新しい耐震設計法と耐震補強法の構築に向けた取り組みについて述べた。大きな変形性能を有する伝統構法木造建物の耐震設計や耐震補強を検討するには、限界耐力計算に基づく耐震性能評価・検証法は有効な手段と考えられ、(社)日本建築学会近畿支部木造部会および(社)日本建築構造技術者協会関西支部

木造部会のもとで、限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法の具体的な計算法の開発とともに設計事例による検証が進められて実用化に至っている^{2,10,11)}。本方法が木造軸組構法建物の耐震設計法および耐震補強設計法として設計実務者等に広く活用され、伝統木造軸組構法の技法・技術の継承・発展に貢献し得ることを願っている。

(京都大学防災研究所)

参考文献

- 1) 鈴木祥之(編):「木構造と木造文化の再構築を目指して」、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会、2002年3月。
- 2) 鈴木祥之編:「木造軸組構法の耐震設計法-改正基準法の法体系から最新の限界耐力設計法まで-」、日本建築学会近畿支部(木造部会)・日本建築総合試験所、2002年11月7日。
- 3) 重要文化財(建造物)耐震診断指針、文化庁文化財部、2001年3月。
- 4) 鈴木祥之、後藤正美、山田真澄:単位木造フレームを用いた振動台実験による木造軸組の耐震性能評価、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1517-1522、2002年11月。
- 5) 坂静雄:寺社骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復元力)、日本建築学会大会論文集、pp.252-258、1941年4月。
- 6) 鈴木祥之他:伝統木造軸組の実大振動実験(その1~その12)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp.103-126、2000年9月。伝統木造軸組の実大振動実験(その13~その19)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp.177-190、2001年9月。
- 7) 鈴木祥之、前野将輝、大下達哉、清水秀丸、北原昭男:伝統木造軸組の実大振動実験による柱-貫接合部のモーメント抵抗メカニズム、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1355-1360、2002年11月。
- 8) 鈴木祥之、後藤正美、大下達哉、前野将輝:伝統木造軸組の柱傾斜復元力特性に関する実大静的・動的実験、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1361-1366、2002年11月。
- 9) 鈴木祥之、斉藤幸雄、榎原健一、五十子幸樹、野島千里:木造軸組の耐震性能評価法-小変形から大変形・倒壊の領域まで評価する限界耐力計算-、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1523-1528、2002年11月。
- 10) 斉藤幸雄、鈴木祥之、榎原健一、野島千里:「伝統構法木造建物の耐震補強事例」、構造工学論文集 Vol.49B、pp.627~633、2003年3月。
- 11) 鈴木祥之他:「木造軸組構法建物の限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計マニュアル、第2版」、(財)日本建築総合試験所 木造軸組構法建物の限界耐力計算による耐震設計法編集委員会、2003年10月30日。