

伝統建築物を地震災害から守る

Preventing Earthquake Disasters of Traditional Buildings

鈴木 祥之

Yoshiyuki Suzuki

京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011京都市宇治市五ヶ庄)

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

There are many existing traditional buildings such as urban wooden houses and farm wooden houses in addition to temples and shrines. In this paper, the seismic performance of traditional wooden houses was examined by static experiments and shaking table tests based on investigations on regional and structural characteristics of traditional wooden houses. The seismic reinforcement design method and seismic design method were proposed and verified by full-scale shaking table tests of old and new Kyo-machina houses. Also, the structural mechanisms of traditional wooden houses were made clear by shaking table tests.

Key Words : *traditional buildings, seismic performance, seismic reinforcement, wooden houses, temples*

1. はじめに

伝統構法木造建築物は、社寺建築物のみならず、民家として現在も多く都市、まち、村に数多く残っており、町家は都市型住宅として、田の字型間取りの住宅は農家型住宅として、それぞれ古くから気候・風土等に適応した地域の特色ある伝統的な構法が生み出され、我が国の木造建築物の主要な構法として発展・継承されてきた。このような伝統構法木造住宅は、地域性豊かなまちなみを形成した歴史を有するが、老朽化が進み、建て替えられつつある。また現代的な住まい方に適していないなどから建てられなくなった。しかし、一方では、伝統構法の良さが再認識され、復活する機運があり、現在、多くの地域で、まちなみ景観の保存とともに地域の歴史と文化の継承の観点から伝統構法木造住宅の保存・修復・再生への取り組みがなされている。また、歴史的、文化的に価値の高い建造物については有形文化財として、また全国各地に残る歴史的な集落・町並みのうち、価値の高いものを重要伝統的建造物群として、文化財保護法のもとに保存・再生が行われている。

木造建築物は、大地震によって、たびたび大きな被害を被ってきた。特に1995年兵庫県南部地震では、木造建築物は甚大な被害を受け、木造住宅の倒壊が多くの死傷者を出す原因となった。その後も、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城県北部の地震、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震などの大地震で大きな被害を受けてきた。また、東海、東南海、南海地震など海洋型や内陸型の大地震の発生が予想されており、伝統建築物、なかんずく伝統構法木造建築物の耐震性能の確保・向上は重要かつ緊急課題となっている。

しかし、伝統建築物の保存・再生において歴史的、意匠的な観点からの調査研究が多くなされてきているが、構造的な観点から調査研究は少なく、特に耐震性は以外にも分かっていないのが現状であり、都心部に高密度に分布する町家などの保存・再生の在り方は、都市再生、都市防災の重要な課題でもある。

このような観点から、伝統建築物、特に伝統構法木造住宅の耐震性能の確保・向上を計るために、伝統構法木造住宅の構造詳細調査による耐震性能評価や実大静的実験、振動台実験による耐震性能評価法や耐震補強法の検証について述べる。

2. 木造建築物の耐震性能

(1) 建築基準法における枠組

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年の建築基準法の改正による木構造建物の構造計算規定の枠組では、図1に示すように構造計算ルートによって、壁量計算、許容応力度設計法、限界耐力計算などの計算法がある。改正前の建築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、建築基準法の改正で導入された性能規定型設計法では、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。

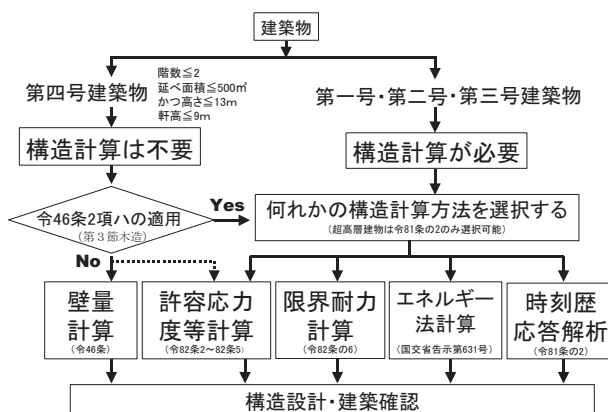


図1 建築基準法における構造計算ルート

限界耐力計算などの構造計算を行わない場合は、仕様規定とともに必要壁量を満たすように壁量計算を必ず行わなければならないとされている。いわゆる第四号建築物として扱われている2階以下の（主として在来構法）木造建築物は、ほとんどこの壁量計算によっているのが現状である。限界耐力計算は、建築基準法改正による構造関連規定の性能規定化によって新たに導入され、仕様規定によらなくても良い検証法として位置づけられている。限界耐力計算法によって構造計算を行えば、継ぎ手・仕口部に金物を使わない伝統構法の木造建築物も建築基準法の枠組みの中で設計が可能である。

限界耐力計算の実用化を計るために、伝統構法に用いられる各種の耐震要素や実大軸組の静的・動の実験が実施され、これらの実験に基づいて耐震性能評価法や構造解析法の開発が進められ、(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のもとで、限界耐力計算による耐震設計・耐震補強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なされ、「伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法ー」¹⁾にまとめられている。

(2) 木造建築物の地震被害と耐震性能

過去の木造住宅の地震被害状況を建設年代別にみると、1995年兵庫県南部地震での芦屋市の状況を図2(a)に、2000年鳥取県西部地震での日野町の状況を図2(b)に示す^{2, 3)}。1995年兵庫県南部地震では、建設年代の古い木造住宅が甚大な被害を受けたと言えるが、一方、2000年鳥取県西部地震では、建設年代と被害の関

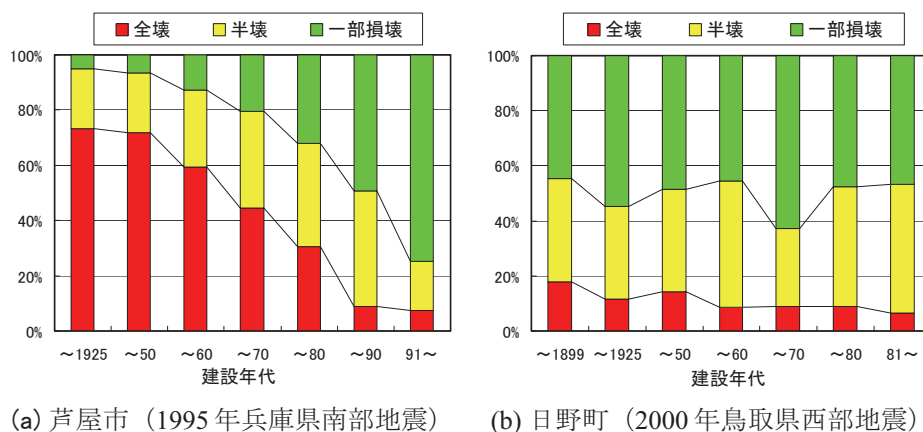


図2 木造建物の建設年代別被害

係は顕著ではなく、建設年代が古くてもそれほど大きな被害を受けていない。2つの地震では地震動強さや地盤震動特性が異なるが、両地域における木造建物の構法など構造特性や腐朽・蟻害の防止と補修を含めた維持管理が大きく関与しているものと考えられる。芦屋市では、在来構法を主として伝統構法から新しい構法まで混在しているが、日野町では、瓦屋根、土壁の伝統構法のものが殆どである。しかも、建設年代の古い建物では、筋かいはなく、壁量も少ない。従って、日野町の建物は、壁量計算に基づく耐震診断法によれば低い評価となり、壁量のみでは耐震性能を正確な評価ができないことが分かる。

3. 伝統構法木造住宅（農家型）の静的載荷実験による耐震性能

伝統構法木造建物の耐震性能を的確に評価するために、地域特有の特性を有する木造建物の構造力学的な特徴を調べるとともに、伝統構法木造建物を対象とした静的・動的実験を実施して耐震性能を調べた。ここでは、実在する建物の解体の機会をとらえて、耐震調査実験を行った事例について述べる。

対象建物は、愛知県田原市において明治 31 年（1898 年）に建てられた伝統構法木造住宅（図 3 参照）である。典型的な田の字型間取りの伝統構法木造住宅であり、耐力壁が少なく、屋根重量が大きい特徴を有し、壁量計算に基づく耐震性能評価が適用できない建物であり、伝統木造建物の耐震性能評価法の妥当性を裏付けるために、平成 16 年 8 月から 9 月にかけて構造詳細調査を行い、構造的特徴や腐朽・蟻害などを把握するとともに、常時微動計測および静的加力実験を実施して振動特性と耐震性能を調べた^{4, 5)}。

(1) 実験の概要

二重入母屋本瓦葺屋根を持つ厨子 2 階建ての住宅で、図 4 の平面図のように土間と 2 行×3 列の居室配置という典型的な農家型住宅の平面構成をしている。大きな大黒柱はないが、図中で○で示した通し柱には、175mm×175mm という大断面のヒノキが用いられている。柱は土台を設けない礎石建てである。通し柱には差鴨居が、差鴨居の上には欄間あるいは土塗り小壁がつく。土葺き瓦屋根には、葺き土が厚く載っている。実験終了後に建物の各部重量を詳細に計測して、建物全体の総重量を算出した結果、597kN であった。

静的加力実験では、最初に各構面の初期剛性を把握するための小加力実験、次に建物が損傷を受けて耐力が低下するまで、図 3 に示すように建物の南北にクレーン車を配置して、正負繰返しの大変形加力実験を行った。最大耐力は 107kN であり、建物重量に対する割合は 0.18 である。実験終了時点では、差鴨居より下の柱の傾斜角が 0.15rad を超えても最大耐力の 75% に相当する耐力で保持していた。柱の傾斜角が 1/60 ~ 1/50rad で土塗り壁にせん断変形による壁土のひび割れが観察され、1/10rad を超える変形になると、柱と差鴨居との接合部で曲げによる柱の割れが発生した。柱に損傷を生じたものの大破・倒壊には至らず、大きな変形性能を保持していると言える。



図 3 明治 31 年築の伝統住宅
クレーン 2 台による水平力繰返し載荷実験

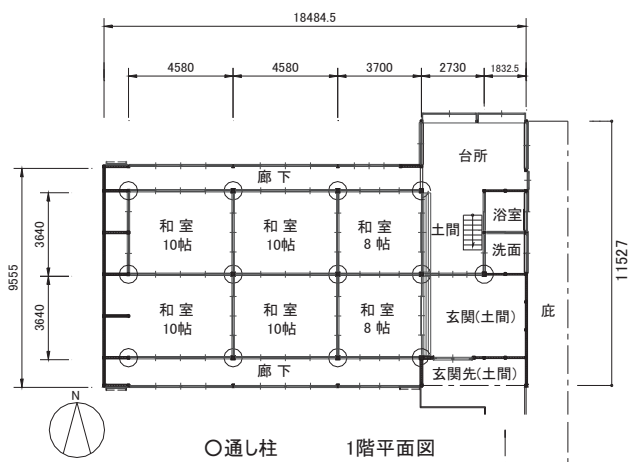


図 4 東三河の伝統木造住宅の平面図

(3) 限界耐力計算による耐震性能評価

建物の耐力は、土壁、小壁、差鴨居、足固めに依っているが、X0 構面の土壁や足固めは劣化が著しいことから、小壁付きの差鴨居の耐力が支配的な状況であった。限界耐力計算¹⁾に基づいて耐震性能を評価すると、劣化の著しい土壁や足固めなどを補修することで、図 5 に示すように大地震（極めて稀に起こる地震）に対して最大変形角が 1/25rad となり、安全限界（1/15rad 程度）までに収まり、耐震性能を確保できることが分かった。さらに、屋根の葺き土を撤去し、屋根重量を軽減することによって耐震性能を向上させることが可能である。

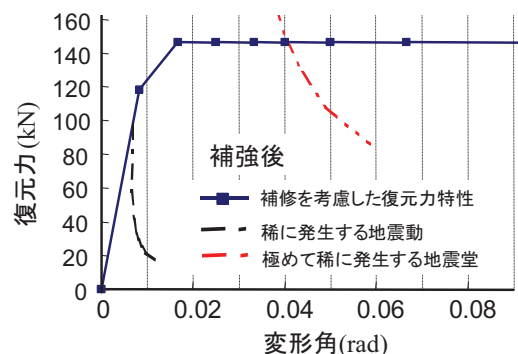


図 5 補強後の耐震性能

4. 伝統構法木造住宅（京町家）の耐震性能評価と耐震補強設計

町家のなかでも、千年以上の歴史を有する京町家は、京都市の都心部に高密度に分布し、特色あるまちなみ景観を形成してきたが、京都市の調査によれば、平成 10 年に総戸数は約 2 万 8 千戸であったが、平成 15 年には総戸数は約 2 万 4 千戸と減少している。一方では、京町家は、優れた意匠性をもつ建物として、その良さも再認識され、復活する機運もあり、保存・再生への取り組みが近年、盛んに行われるようになった。

(1) 既存京町家の耐震性能評価

京都市では、花折断層系など京都盆地を取り囲む多くの断層を起震とする大地震の発生が予想され、平成 15 年に第 3 次地震被害想定がなされ、京都市域に大被害を与えることが想定されている。特に京町家は、間口が狭く奥に長い建物であり、その平面形式の特徴から耐震性については以前から問題視されてきた。しかし、歴史的、意匠的な観点から京町家の調査研究が多くなされてきているが、構造に関する調査は少なく、耐震性は以外にも分かっていないのが現状であった。このような状況から、筆者らは大学研究者、建築構造設計者、建築意匠設計者、大工棟梁とともに京都市のプロジェクト事業として、京町家の分類整理に基づいて 30 棟の建物の構造詳細調査を実施し、京町家の耐震性と耐震補強に関する調査研究を行った^{6、7)}。

a) 構造詳細調査の概要

調査対象の建物は、典型的な京町家の平面形態、立面形態を有し、増改築が少なく建設当時の状態が推測できることを前提に、間口寸法と階数をパラメータとし 30 棟を選出した。間口寸法は 2 間から 6 間、階数は平屋、中 2 階、2 階建て、平面形態は 1 列 1 室から 1 列 4 室と 2 列 2 室、2 列 3 室、建築年代は明治期から昭和初期であった。

b) 耐震性能の評価

対象建物 30 棟の耐震性能を調べるために、構造詳細調査に基づいて各建物の土壁、小壁、軸組などの耐震要素を抽出して各建物の復元力を求め、耐震性能を評価するため、限界耐力計算に基づいて最大応答変形角を求めた¹⁾。図 6 にその結果を示す。図の横軸は各建物の平面形状を示しており、() 内の数値 1 は平屋建て、1.5 は中 2 階建て、2 は 2 階建てを意味する。地震力は安全限界に対応する極めて希に発生する地震動として、建築基準法施行令第 82 条の 6 の加速度応答スペクトルを用い、地盤種別は第 2 種地盤とした。最大応答評価では、算出した復元力を用いて変位増分解析法によった。ここでは、間口や階高などの建物規模と平面形態で評価の基準を統一するために経年的な劣化は考慮していない。

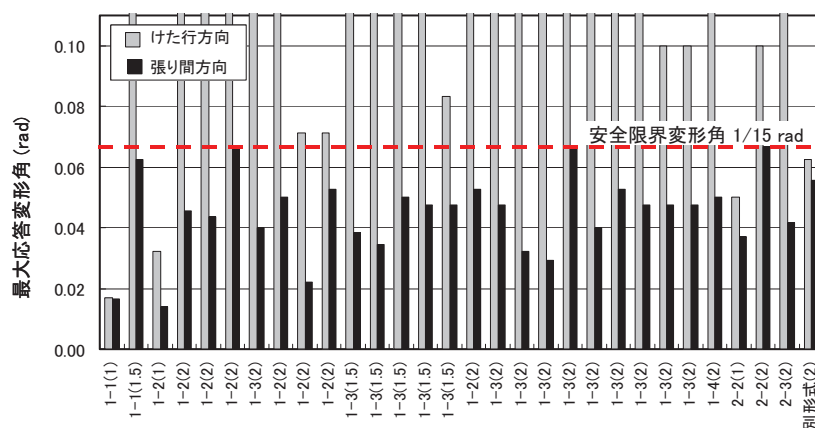


図 6 既存京町家の耐震性能

京町家などの伝統構法木造建

物は、大きな変形性能を有するが、安全限界の目安となる変形角を $1/15\text{rad}$ とすると、図 6 から、各建物の張り間方向の最大応答変形角は概ね安全限界変形角に収まるが、けた行方向では、想定する地盤や地震動に対して安全限界変形角を大きく越え、倒壊の危険性が高いと判断される建物が多い。

以上のように、限界耐力計算による耐震性能評価において、安全限界の検証用地震動として第 2 種地盤での極めて希に発生する地震動を対象にする限り、多くの京町家は大破・倒壊の危険性を有している。ただし、地盤種別が第 1 種地盤の場合には、大きな変形が生じるものの大破・倒壊に至らず、補修によって再使用が可能になるものも多いことも指摘される。また、復元力特性の評価において、検証用復元力特性が実際の実験結果より安全側の評価となっているが、一方では、構造要素の腐朽・蟻害などの損傷がある場合には補修することを前提にしているなど、現状の建物の耐震性能そのものを評価していない。このように耐震性能の評価においては、地盤条件、地震力の想定などいくつかの前提条件に基づいているが、現存する京町家の耐震性能、特にけた行方向の耐震性能は問題となるため、京町家に適した耐震補強などの対策が必要となる。

(2) 京町家の耐震設計・耐震補強設計法の震動台実験による検証

京都に数多く現存する京町家の多くが、明治期から昭和初期にかけて建てられ、耐震性に問題があることが耐震調査で指摘された。また、京町家は、戦後ほとんど新築されることがない状況が続き、耐震・防火基準を満たす京町家を新たに建設することは難しく、現存する京町家の棟数は減少している。京町家を保存・再生するには、耐震性能を把握し、耐震補強法のみならず耐震設計法を確立する必要がある。



図7 京町家2棟の震動台実験
(左：新築京町家試験体、右：移築京町家試験体)

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一環として（独）防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を用いて、移築した古い京町家と新築した新しい京町家の2棟の実大震動台実験を平成17年10月から11月にかけて実施する機会を得た（図7参照）。

a) 実験の目的

実大震動台実験では、実在する典型的な京町家を解体・移築した試験体（移築試験体と称する）を用いて、①既存京町家の振動特性と耐震性能を明らかにする、②既存京町家に耐震補強を施し、その効果を検証することを目的とした。また、③新しく建設する京町家の耐震設計法を検証するために、現行の建築基準法を満たすように耐震設計を行った新築した京町家試験体（新築試験体）を用いて、同時に実験を実施した。

b) 京町家試験体の概要

1) 移築京町家

既存の京町家の耐震性能を調べるとともに耐震補強の効果を検証するために、昭和7年に建てられた京町家を解体して震動台に移築した。平面形式は典型的な京町家で、通り庭と通り庭に面して3室の居室からなる1列3室型と呼ばれる間取りである（図8参照）。なお、腐朽・蟻害による損傷部材、増改築部分などは復元・改良を行っている。この移築京町家の総重量は実測の結果、353kNであった。

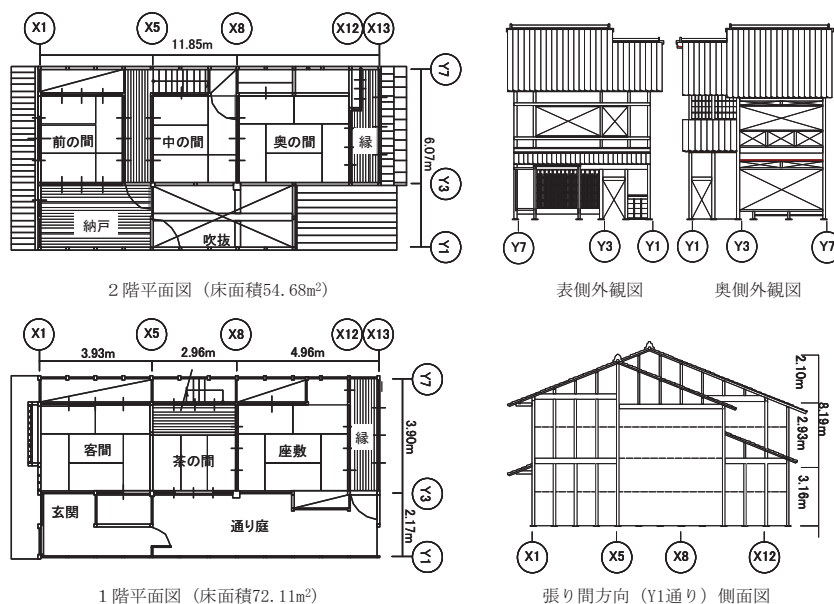


図8 移築京町家の平面図、立面図

2) 新築京町家

新たな京町家を建設可能にするため、京町家の外観意匠・空間構成を継承しながらも、大きな変形性能を有することができる構法を取り入れて、必要な耐震性能を確保する設計法を提案した。移築京町家と同じ規模の1列3室型である（図9参照）。新築京町家の建物総重量は実測の結果、272kNであった。

c) 震動台実験の概要

移築試験体と新築試験体の2棟を同時に加振する震動台実験を行った。実験期間は2005年10月25日から11月1日を第1ステージ、11月2日から7日を第2ステージ、11月8日から11日を第3ステージとして総計48加振を行った。

第1ステージでは、先ず両試験体ともに無補強の状態で、入力地震動は、(財)日本建築センターの人工地震波(BCJ-L2)の1方向入力することを基本として、入力最大加速度を100Gal(cm/s²)から加振し、層間変形角が1/30radを超えるまでの250Galまでとした。両試験体の基本的な振動特性と中地震動に対する地震時挙動、履歴特性などを把握した。

第2ステージでは、移築試験体のみに耐震性能評価に基づいた耐震補強を実施し、前ステージと同程度の層間変形角まで加振した。伝統構法の構造特性を活用した耐震補強手法の有効性を確認した。

移築京町家の耐震補強は、予め行っていた限界耐力計算による耐震性能評価と耐震補強設計に基づいて乾式土壁パネルの袖壁と小壁を組み合わせた門型土壁と木材のめり込み特性を生かしたはしご型フレームによる耐震補強を適用した。実験の結果、補強を行った構面の応答が小さくなり、全体的にバランスが整えられ、これにより建物のねじれ挙動が抑制され、建物全体の揺れも小さくなるなど、耐震補強の効果がみられた(図10参照)。

第3ステージでは、試験体は第2ステージのままであるが、入力地震動を大きくし、大変形領域で振動特性や地震時挙動の把握と限界性能の検証を目的とした。入力地震動は、BCJ-L2を400Galまで入力した後、1995年兵庫県南部地震で神戸海洋気象台で観測された地震波(JMA-Kobe波)の3方向加振を行った。極めて希に発生する地震動(大地震動)に対して両試験体とも倒壊しないことを確認した。

移築京町家は、小地震加振から土壁の亀裂や剥落などの損傷が生じたが、耐震補強を行うことで大地震であるJMA-Kobe波の加振で倒壊しないことが実証できた。一方、新築京町家は、最終加振で柱脚部の滑りが発生し、柱脚部で損傷が発生したが、構造体に著しい損傷は無く、高い耐震性が確認できた。

d) 震動台実験結果のまとめ

移築京町家は、小地震加振から土壁の亀裂や剥落などの損傷が生じたが、限界耐力計算に基づいて耐震補強を行うことで、計測震度6強に相当するJMA Kobe波を入力しても、土壁等に大きな損傷は発生するが、倒壊することなく、補強の効果が確認できた。同様に限界耐力計算に基づいて耐震設計を行った新築試験体は、柱脚の浮き上がりや滑りが生じたが、上部構造には損傷はほとんど発生しなかった。京町家の建物の水平構面は、比較的柔らかく、図11に示されるように平面的に変形しながら揺れることも分かった。

伝統構法木造住宅が持つ大きな変形性能を活用し、限界耐力計算に基づく耐震補強法、耐震設計法を用いることで、既存京町家の耐震補強ができ、また新しく京町家を建築することができることを示した。しかし、柱脚部の滑り、床や屋根などの水平構面の変形については、伝統構法木造住宅の耐震性能を適切に評価する上で、重要な課題である。

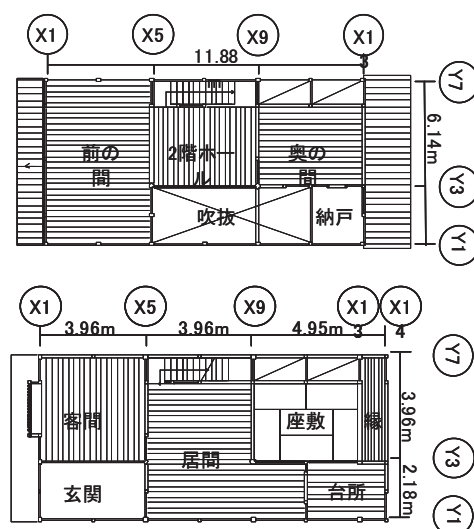


図9 新築京町家の平面図

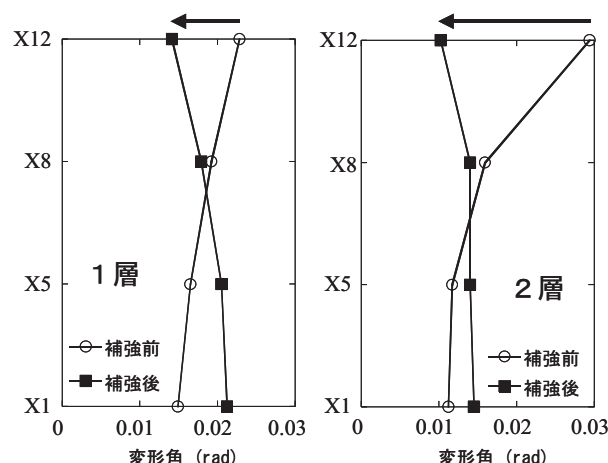
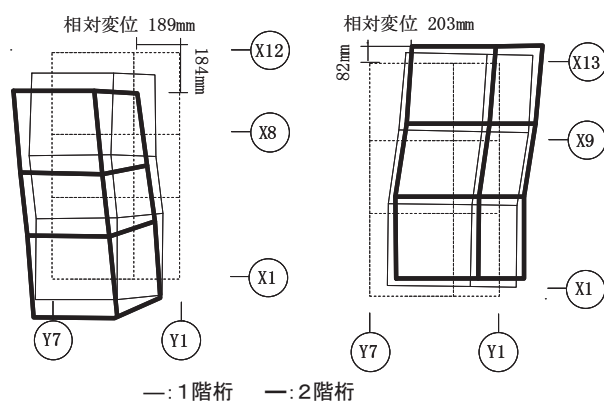


図10 耐震補強前後の最大応答変形角
(BCJ-L2波 200Gal加振時)



a) 移築京町家 b) 新築京町家

図11 JMA神戸波加振時の変形状態

5. 伝統構法木造建物の E-ディフェンス震動台実験による構造力学的解明

伝統構法木造建築物は、構造力学的に未解明な部分がまだ多く残されている。その代表的な課題として柱脚仕様の問題がある。木造建築物では、柱脚を土台に緊結する仕様が、現在、一般的であるが、伝統構法木造建物では柱脚部を土台に固定することなく、足固めを設けて柱脚を礎石等に乗せただけの石場建て構法が多く採用されてきている。石場建て構法では、地震時に柱脚の浮き上がりや滑りが発生する可能性があるが、それらが地震時の建物の揺れや安全性に及ぼす影響は良く分かっていない。また重要な課題として水平構面の問題がある。木造建物では床構面を剛床と仮定することが多く、床構面の剛床仮定を満足するために床倍率の大きな床仕様が一般的になってきているが、伝統軸組構法木造建築物では柔な床仕様が多く用いられてきた。床構面と同様に屋根の架け方など屋根構面の仕様についても、地震時の建物揺れや安全性に及ぼす影響は未解明である。

このような状況から、伝統軸組構法木造建築物を構造力学的に明らかにするために、伝統軸組構法木造建物の実大試験体を製作し、(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)を用いた震動台実験を行った。



図 12 震動台上に設置された標準試験体 2 棟
(左：土台仕様、右：足固め仕様)



図 13 震動台上に設置された切妻屋根試験体 2 棟
(左：長辺折り L 試験体、右：短辺おり S 試験体)

(1) 震動台実験の目的

伝統軸組構法木造建築物には、構造力学的に未解明な部分がまだ多く残されているが、中小の振動台では規模的に難しく、これまで実験的に解明することができていなかった柱脚部、床構面や屋根構面など伝統構法の仕様に注目して、以下の実験を行う。

- 1) 柱脚を土台に長ぼぞ込み栓留めする仕様(土台仕様)と足固めを設けて柱脚部を固定しない仕様(足固め仕様)の 2 種類の試験体を用いて、柱脚部仕様が地震時挙動に与える影響を明らかにする。特に、足固め仕様の場合には、柱脚の滑りや浮き上がりなどが地震時挙動に与える影響、土台仕様では、ほぞの弱軸方向の破壊に注目する。
- 2) 床構面の仕様を剛、半剛、柔な仕様にするとともに、壁配置を換えることによって偏心の大きさをパラメータとした試験体を用いて、地震時挙動を明らかにする。
- 3) 屋根構面の仕様、ここでは一般的な切妻屋根を対象にするが、切妻屋根を短辺方向にかけの場合と長辺方向にかけの場合の 2 種類の瓦葺き屋根の有る試験体を対象に加振実験を行い、屋根のかけ方の違いが建物の挙動に与える影響を明らかにする。

(2) 試験体の概要

上記の実験目的のため、床(水平構面)仕様と柱脚仕様の違いによる影響を主として調べる試験体(以下、標準試験体) 6 体と、屋根仕様の違いをみる屋根付の試験体(切妻屋根試験体) 2 体を製作した。いずれの試験体も、柱一横架材接合部については、既往の実験で優れた変形性能が認められた雇いほぞを採用した。試験体に使用する主要な木材には、徳島県産の杉材の自然乾燥材を用いた。

a) 標準試験体

- 1 列 3 室型平屋建ての同じ平面形状(2 間×6 間)と軸組で柱脚部(土台仕様と足固め仕様の 2 種)及び床仕様

(剛、半剛、柔の3種)が異なる6種類の試験体を製作した(図12を参照)。なお、各々の試験体の短辺方向に設けた壁配置は、偏心率をパラメータとする加振計画に基づき配置換えを行った。

標準試験体の加振実験は、スケジュールに基づき、同じ軸組を用いながら床の仕様を変えた試験体を震動台上に設置換えして実験を行う。剛床仕様は、構造用合板を住宅金融公庫の仕様に基づき構造用合板及び下地となる根太の施工を行った。半剛床仕様の床板は、徳島県産の杉で規格化された厚さ30mmで本実加工が施された製品を用いた。釘は根太上に床板上部面より各々N90を3本打ちとした。柔床仕様は、一般的な木造家屋の畳下地の施工に基づき15mm厚の杉の床板を用い、根太は転ばし根太としている。

b) 切妻屋根試験体

2列3室型平屋建ての同じ平面形状(3間×6間)、軸組、柱脚部(足固め仕様)で、切妻屋根を長辺方向と短辺方向に架ける2種類の試験体を製作した(図13を参照)。試験体は切妻屋根の架けかたの違いによって試験体の呼称を決め、短辺方向に棟が平行のものを「長辺折り試験体」(以下L試験体と呼ぶ)、長辺方向に棟が平行のものを「短辺折り試験体」(以下S試験体と呼ぶ)と呼ぶ。2つの試験体は小屋組の仕様は異なるが、桁から下部の仕様は共通となっている。

(3) 実験の概要

a) 実施体制

京都大学防災研究所と(独)防災科学技術研究所との共同実験である他に、多くの大学等研究機関や伝統構法木造建物に関連する機関、組合等団体、工務店、設計事務所などとの協力のもとに実施した。関連の機関・団体等は以下の通りである。

大学等研究機関：京都大学、福山

大学、広島国際大学、金沢工業大学、豊田工業高等専門学校、広島大学、横浜国立大学、関西大学、福井大学、金沢大学、奈良女子大学、鳥取環境大学

組合等諸団体：特定非営利活動法人日本伝統建築技術保存会、TS ウッドハウス協同組合、京都左官協同組合、京都府瓦工事協同組合、淡路瓦工業組合、京都府建築工業協同組合、京北町森林組合、木考塾、京都建築構造研究会、徳島県立農林水産総合技術支援センター、徳島の設計事務所グループ、西澤工務店、播磨社寺工務店、丸浩工業、徳舩瓦店、国元商会、野村重機、東京測器研究所

b) 実験工程

試験体8体の製作については、主要木材を天然乾燥の後、ヤング係数、含水率などの部材データを計測し、2006年11月より工場にて加工を行い、一度仮組みすることで接合部の精度を確認した。兵庫耐震工学研究センターでの組立は2006年12月より実施した。震動台実験実施期間は2007年1月上旬より約1ヶ月間である。加振実施日は合計5日(標準試験体に3日、切妻屋根試験体に2日)とした。

震動台加振実験は、表

1に示すように、各加振ステージにおいて試験体2体を震動台上に並列に配置して同時に加振実験を行った。標準試験体は、土台仕様1体と足固め仕様1体の2体である。切妻屋根試験体2体の加振実験の2日間ともに公開実験とした。

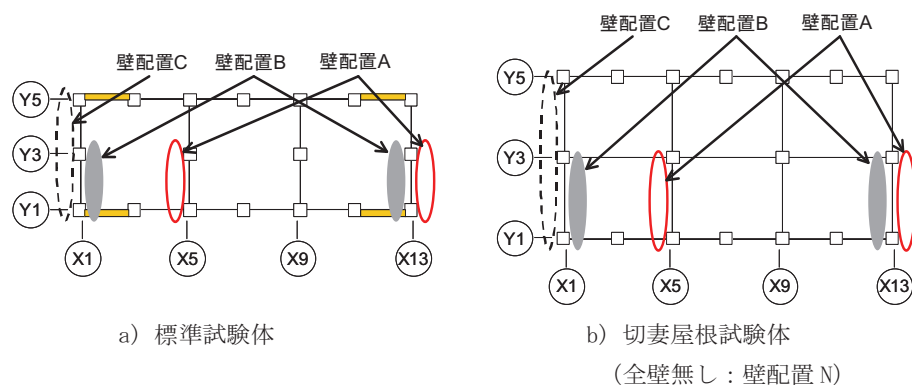


図14 壁配置パターン (—：壁)

c) 加振方法

壁配置を変更することで偏心率パラメータとし、標準試験体では 3 パターン、切妻屋根試験体では 4 パターンの壁配置（図 14）で加振を行った。

入力地震動は、主に日本建築センター模擬波（BCJ-L2）を用いた。日本建築センターが公開している波形（最大加速度 356Gal、継続時間 120 秒）のうち 0～60 秒までの波形について、最大加速度を調節して用いた。試験体短手方向を主要な加振方向とした。大地震による損傷を把握するために、最終段階で 1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震波（JMA 神戸波）を 3 方向入力した。

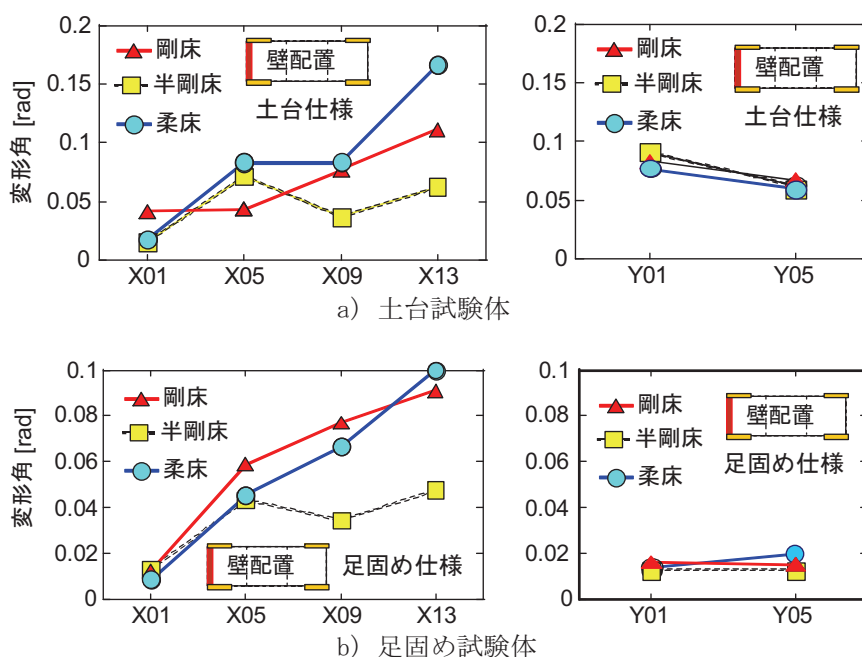


図 15 標準試験体の JMA 神戸波加振時の最大応答変形角

(4) 実験結果のまとめ

標準試験体の土台仕様および足固め仕様ともに、床が剛である場合には、各構面の最大応答変形角の分布は直線的であり、柔床では、壁が無い構面の応答変形角が大きくなっている。偏心が最も大きい壁配置 C で行った JMA 神戸波 3 方向（X 方向：617cm/s²、Y 方向：818cm/s²、鉛直方向：332cm/s²）加振時の主要構面の最大応答変形角を図 15 にそれぞれ示す。各構面の最大応答変形角を比べると、土台仕様試験体よりも足固め仕様試験体の方が小さくなっている。足固め仕様試験体では、床仕様に関わらず X 方向に最大で 20cm 程度、Y 方向に 10cm 程度移動した（図 16 を参照）。柱脚が滑ることによって試験体に入力される地震力が低減されたため、足固め仕様試験体の応答変形角が抑制されたと考えられる。

切妻屋根試験体の JMA 神戸波加振での最大の変形角は、長辺折り L 試験体の長辺方向で 1/15rad、短辺方向で 1/19rad、短辺折り S 試験体の長辺方向で 1/29rad、短辺方向で 1/17rad であった。

柱などの木造軸組にひび割れなどの損傷は見られたが、倒壊に至るほどの著しい損傷ではなかった。標準試験体の足固め仕様と同様に、柱脚が大きく滑ることによって、建物の応答が抑制されたと考えられる。

床や屋根などの水平構面の影響を明らかにすることは、これまでの中規模振動台実験や構造要素実験では困難であったが、今回の実大震動台実験によって、水平構面の剛性が建物の応答に大きな影響をもたらすことが明らかになり、床や屋根などの水平構面の剛性を考慮した耐震性能評価に基づいた耐震設計・耐震補強法の開発の必要性が指摘できた。また、土台を設けない石場建て構法の場合、柱脚の滑りが生じることによる入力の低減効果は確認できたが、

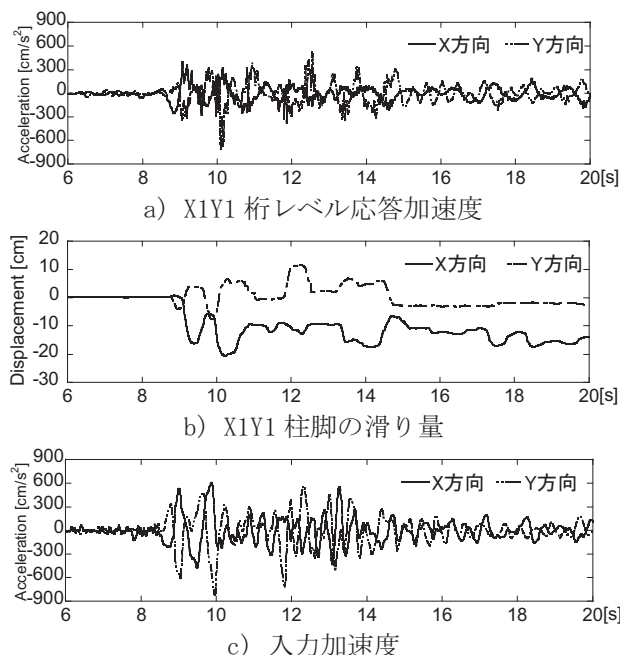


図 16 標準試験体（足固め仕様、剛床、壁配置 C）の JMA 神戸波加振時の柱脚滑り量と加速度時刻歴の比較

この柱脚の滑りの効果を耐震設計や耐震補強設計に取り込むには、柱脚の滑りが生じる条件とともに滑り量の制御法を明らかにする必要がある。また、柱脚を含めた建物各部の安全性を確保する方策を検討する必要がある。

6. おわりに

建築物の耐震性向上を図るためには、その建物の地震時の挙動を把握するとともに耐震性能を適切に評価した上で、耐震設計および耐震補強を行うことが重要であるが、伝統構法木造建物については、複雑な木組みを有していること、地域特有の気候・風土等に応じた様々な構法が存在していること、などから構造力学的に未解明な部分が多く残されているため、本研究では、伝統構法木造建物の地域特性および木造特有の構造特性を調べ、伝統構法木造建物の実大および要素試験体を製作し、振動実験および静的載荷実験を実施し、それらの結果に基づいて、地震時挙動の把握と耐震性能の評価を行い、耐震設計法および耐震補強法の開発を進めてきた。

木造建築物の耐震性能評価法や構造設計法については、現在普及している方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、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構法の木造建築物などは、耐力重視型の壁量計算に基づく構造設計法や耐震性能評価法は適さず、耐力のみならず変形性能を評価し得る限界耐力計算による耐震性能評価法や耐震設計法が適していることが指摘される。

E-ディフェンス震動台実験などの実験的研究と併せて、伝統構法木造建物のモデル化や解析手法の開発など理論解析的研究によって、伝統構法木造建物の構造力学的な課題のいくつかについては解明することができたが、伝統構法木造軸組においては、複雑な仕口等接合部や個々の耐震要素から建物全体の復元力特性の構築など未解明な点が多い。特に、時刻歴地震応答解析及び限界耐力計算によって耐震性能を評価するには、実験的に解明されていない伝統構法の構造要素がまだ多くあり、構造要素の力学特性のモデル化や復元力特性の評価が大きな問題となる。従って、構造要素の実験データのさらなる集積が望まれ、また一方では、構造要素の理論解析モデルによる手法を開発することも必要である。今後、さらに残された課題に対して構造力学的な解明や耐震性能評価法の構築を進めるとともに、耐震性能の向上に関する研究を引き続き行う必要がある。

本研究で得られた研究成果などは、多くの地域に現存する町家など都市型木造住宅や田の字型間取りの農家型木造住宅などに伝統構法木造建築物に適用し得るものであり、伝統構法に適した耐震性能評価法とそれに基づく耐震設計法ならびに耐震補強法の提案など研究成果の普及を目指す。

参考文献

- 1) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法ー,学芸出版社、2004年3月。
- 2) 鈴木祥之(編著)：1995年兵庫県南部地震ー木造建物の被害ー,日本建築学会近畿支部,1995年9月。
- 3) 日本建築学会編：阪神・淡路大震災調査報告 建築編ー4 木造建築物・建築基礎構造,1998年3月。
- 4) 鈴木祥之(編著)：東三河伝統民家耐震調査実験報告書、東三河伝統民家耐震調査実験研究会・京都大学防災研究所,2005年3月。
- 5) 中治弘行、鈴木祥之、後藤正美、岩本いづみ、山田耕司：東三河伝統構法民家の耐震性能評価のための静的繰り返し加力実験、日本建築学会構造系論文集、第612号、pp.133-140,2007年2月。
- 6) 須田達、鈴木祥之、奥田辰雄、小笠原昌敏：京町家の構造調査に基づく構造特性の評価、地域安全学会論文集、No.7、pp.15-21,2005年11月。
- 7) 須田達、鈴木祥之、奥田辰雄、小笠原昌敏：京町家の耐震性能評価と耐震補強設計法、日本建築学会構造系論文集、No.616,2007年6月。
- 8) 杉山亮太、鈴木祥之、後藤正美、村上 博：乾式土壁パネルを用いた木造軸組耐力壁の開発、日本建築学会技術報告集、24号、pp.125-130,2006年12月。
- 9) 岡村雅克、鈴木祥之、須田達、杉山亮太、後藤正美：乾式土壁パネルを用いた有開口架構の耐震性能評価,第12回日本地震工学シンポジウム,pp.838-841,2006年11月。