

## 巻頭言

# 京町家の耐震性能と耐震補強設計

理事 京都大学防災研究所教授 鈴木 祥之

## 1. はじめに

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に分布し、特色あるまちなみ景観を形成してきたが、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。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、また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。

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、建設年代が古い上に、その平面形式や構造形式からも耐震性については以前から問題視されてきた。京都市の都市再生の観点のみならず、住民の安全確保や都市防災の観点からも、京町家の耐震性能の確保・向上は重要かつ緊急課題となっている。

このような背景から、現存する京町家の耐震性能を調べるために、京都市のプロジェクト事業として、京町家30棟の構造詳細調査を実施し、構造的特徴を把握するとともに耐震性能評価のもとに耐震性の問題点を指摘した。次いで、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)を利用する機会を得て、移築した古い京町家と新築した新しい京町家の2棟の実大振動台実験を実施し、耐震性能評価法や耐震補強法の検証を行った。

## 2. 既存京町家の耐震性能

京都市には、建設年代の古い木造住宅が多く存在する。その多くが京町家である。京町家は、間口が狭く奥に長い特徴的な平面形式を有しており、また華奢な構造部材から構成される構造的な特徴からも、耐震性については以前から問題視されてきた。しかし、京町家は、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<sup>1,2)</sup>。

### (1) 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。

現地調査では、現状の平面図、断面図、基礎・床・小屋・屋根伏図、構造用である柱（断面寸法、材種）、壁・垂れ壁（材料、貫の段数、下地竹の状況）、梁・桁等横架材（断面寸法、組み方、材種）や外部仕上げ材料・内部仕上げ材料、仕口・継ぎ手の型式と寸法、床下・小屋裏等の腐朽や損傷状況について調査を行った。

これらの調査から、一般的な京町家の構造的特徴として、主要な耐震要素は土塗り壁（以下、土壁）、土塗り小壁（以下、小壁）と木造軸組である、両妻には、側壁と呼ばれる土壁が全面に設けられ、両妻の軸組は通り柱、半柱と貫で構成され、通り柱と側柱はともに通し柱で母屋や棟木を直接支持する構造となっており、一般には梁等の大きな横架材が入らないことが挙げられる。京町家の典型的な軸組を図1に示す。

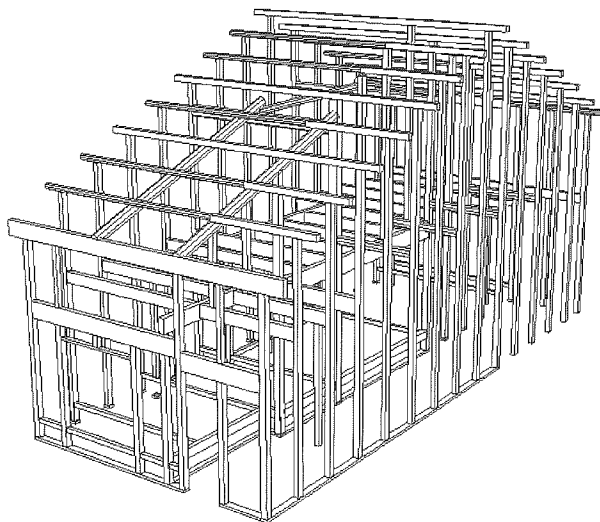


図1 京町屋の主要な軸組

### (2) 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復元力を求め、耐震性能を限界耐力計算<sup>3)</sup>に基づいて評価した。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



京町家を保存・再生するには、京町家の構造特性に適応した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。そこで、京町家のための耐震性能評価法（耐震診断法）、耐震補強要素、耐震設計・補強設計法を開発した。また、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

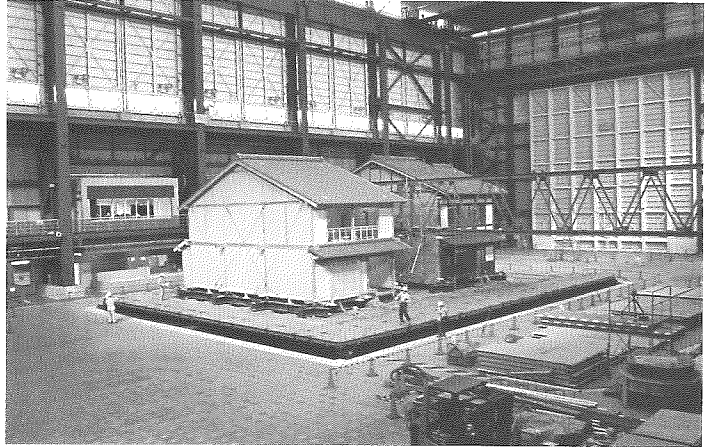


写真1 震動台に設置された京町家2棟  
（左：新築京町家試験体、右：移築京町家試験体）

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）で実験する機会を得て、京町家の実大振動台実験を平成17年10月から11月にかけて実施し、耐震性能評価法や耐震設計・補強設計法の検証を行った。ここでは、写真1のように、移築した古い京町家と新築した新しい京町家の2棟を震動台上に並べて実験を行った。

## （1）京町家試験体の概要

### 1）移築京町家試験体

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、京都市中京区に建つ築73年（1932年建設）の京町家を供出して頂き、解体して移築した（写真2、3）。平面形式



写真2 移築前の建物



写真3 移築された試験体

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。移築試験体の平面図、立面図を図3に示す。

主要構造は伝統構法の軸組と土塗り壁（以後、土壁）で構成されているが、通し柱等が母屋まで立ち上がる古い京町家とは異なり、張り間方向妻壁に胴差、桁を設けている。屋根は瓦葺きで、葺き土は筋葺きである。基礎は延べ石に土台、礎石（ひとつ石）に直接柱を建てる形式である。移築試験体は、同じ平面形式、構造を踏襲したが、土台をなくすな

ど一部変更し、京町家の典型的な構造に近づけた。また、解体工事進行時に判明した腐朽・蟻害等の損傷部材は移築工事の際に新たな部材に取り替えた。壁土や葺き土は解体した土に新たに土、すさを混ぜ再利用した。

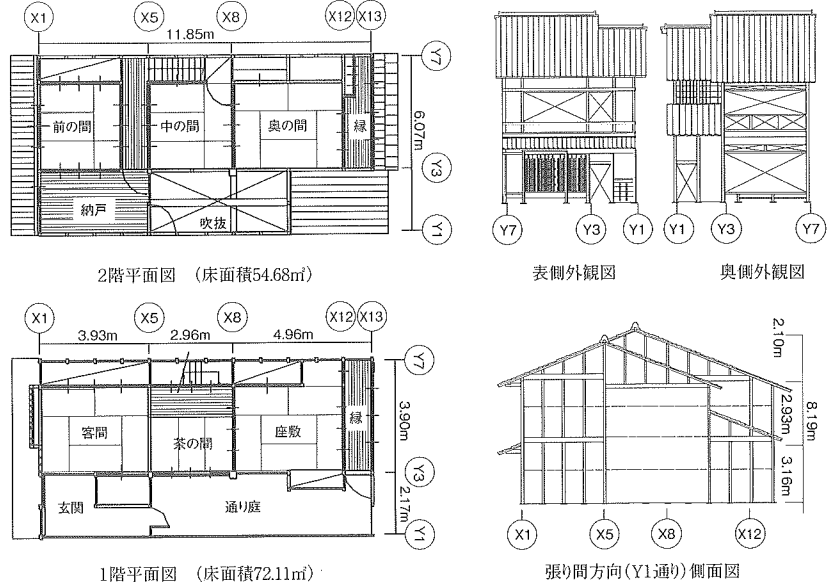
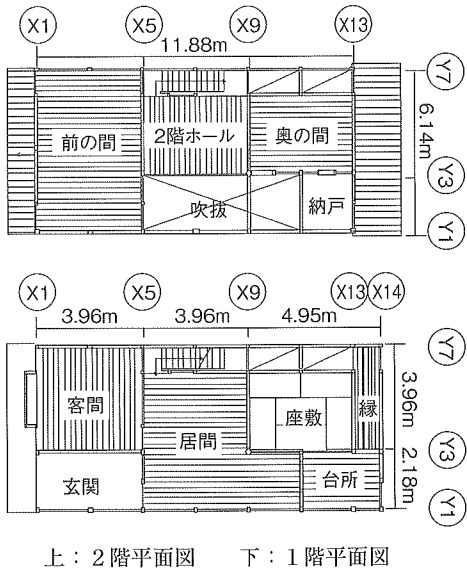


図3 移築京町家の平面図、立面図

## 2) 新築京町家試験体

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。新築試験体の平面図を図4に、立面図を図5に示す。完成した新築試験体を写真4に示す。出入口側で店舗や駐車場にすると壁を設けることが難しいX1のY1-Y7間と、通り庭の上部吹抜部分X9のY1-Y3間に新しい耐震要素である「はしご型フレーム」を設置した(写真5)。



上: 2階平面図 下: 1階平面図

図4 新築試験体平面図

ると壁を設けることが難しいX1のY1-Y7間と、通り庭の上部吹抜部分X9のY1-Y3間に新しい耐震要素である「はしご型フレーム」を設置した(写真5)。

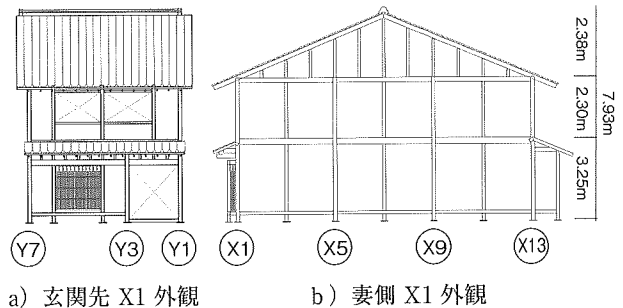


図5 新築試験体立面図 (X1,Y1通り)



写真4 新築試験体（表側）

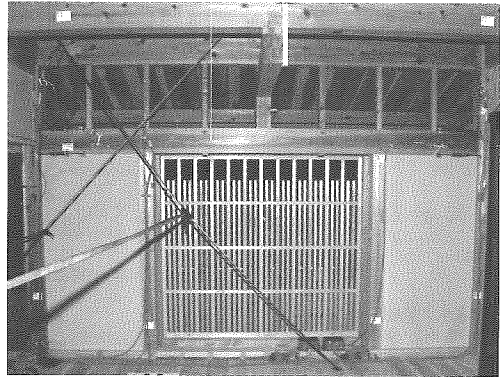


写真5 X1通り玄関に設けられたはしご型フレーム

このはしご型フレームは、木材のめり込みや摩擦を有効に生かした木組みとなっており、伝統構法の軸組と同様な構造力学的メカニズムで成り立っているものであり、伝統構法の軸組を補強する方法として有用と考えられる<sup>3,4)</sup>。

## (2)耐震補強法の検討

移築試験体の構造要素は土壁、小壁、軸組である。これらの耐震要素を既往の研究に基づいてせん断耐力を算出し、主要構面ごとに变形角 1/15rad 時のせん断耐力と耐震要素の耐力構成を図6に示す。張り間方向は、妻側の土壁があり、ベースシア係数は0.40と高いが、けた行方向は、土壁が少なく小壁の比率が高くなり、ベースシア係数は0.15と低い。特に、けた行方向は、主要構面であるX1構面、X5構面に比べてX8構面、X12構面の耐力が低いことがわかる。

限界耐力計算に基づいて移築試験体の張り間方向とけた行方向の最大応答変形角を算出した（図7）。地震力は第2種地盤を想定した場合であり、張り間方向は 1/21rad、

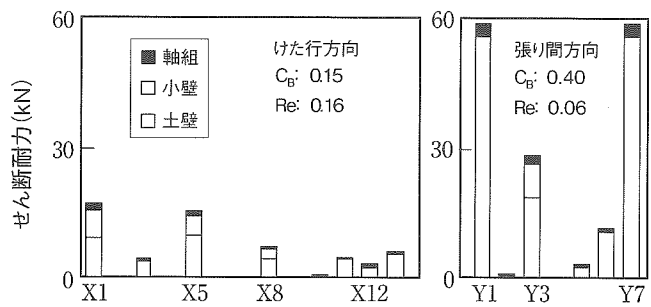


図6 移築京町家試験体の耐力特性

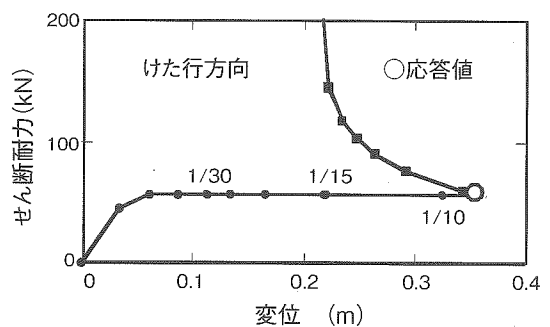


図7 耐震補強前の耐震性能

けた行方向は  $1/10\text{rad}$  を超える結果となった。

移築試験体の水平構面は、十分な水平剛性を有しているとは言い難いので、けた行方向の主要な X1、X5、X8、X12 構面の耐震性能評価を行い、殆どの構面は 2

層の変形に対して 1 層の変形が大きくなるが、X12 構面は 2 層が先行して変形し、X8 構面は  $1/15\text{rad}$  を超えることが分かった。これらのことから X8 構面から X12 構面の間に耐震補強が必要と判断した。

移築試験体の主要な構造要素である土壁や小壁は高い変形性能を有している。そのため、耐震補強において高い変形性能を有する耐震要素を選定する。ここでは、乾式土壁パネル（荒壁パネル）<sup>5)</sup>を用いて構成した土壁、袖壁と小壁を組み合わせた門型土壁<sup>6)</sup>と、はしご型フレーム<sup>3)</sup>を用いて耐震補強設計を行った。

耐震補強は、最も耐力の低い X12 構面の 1 階に門型土壁、2 階に土壁を配置し、通り庭の X10 構面と X12 構面にはしご型フレームを配置することとした（図 8）。

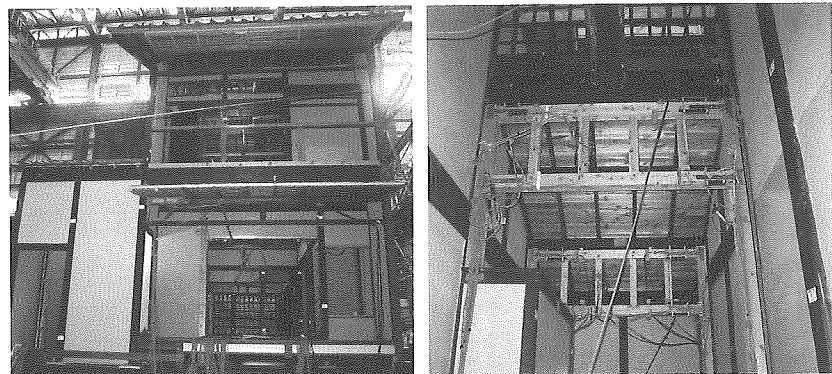


写真6 移築試験体の耐震補強  
左：1階に門型土壁、2階に土壁 右：はしご型フレーム

これらの耐震補強後の耐震性能評価を行い、最大応答変形角は第 2 種地盤とした場合でも  $1/20\text{rad}$  となった（図 9）。補強により、ベースシア係数は 0.15 から 0.23 に、偏心率は 0.16 から 0.03 となり、それぞれ向上している。この耐震補強設計に基づき、振動台実験の第 1 ステージ終了後に、移築試験体の耐震補強工事を行った（写真 6）。

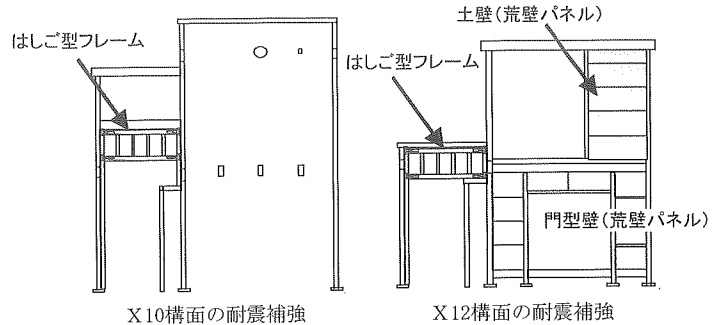


図8 移築試験体の耐震補強

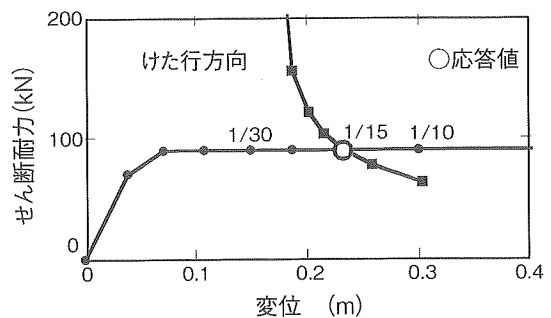


図9 耐震補強後の耐震性能

### (3) 振動台実験の概要

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、入力地震動は、(財)日本建築センターの人工地震動(BCJ-L2)のけた行あるいは張り間方向の1方向入力することを基本として、最大入力加速度を100Gal( $\text{cm/s}^2$ )から加振し、層間変形角が $1/30\text{rad}$ 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。

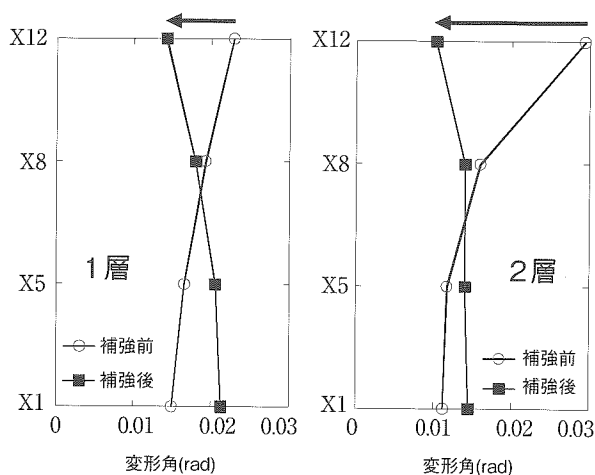


図10 耐震補強前後の最大応答変形角  
(BCJ-L2波200Gal加振時)

第2ステージでは、移築試験体のみ、前述したよう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。

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



外壁土壁の損傷

内壁土壁の損傷

棟瓦の損傷

写真7 移築試験体の損傷状況

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計測震度6強に相当する JMA Kobe 波の加振でも、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。最終の JMA Kobe 波加振後の損傷状況を写真7に示す。

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。

#### 4. おわりに

E-ディフェンスを利用した京町家の実大振動台実験では、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。また京町家など伝統構法に適した耐震補強構法として、乾式土壁パネルを用いた袖壁や小壁とそれらを組み合わせた門型土壁による補強、はしご型フレームによる補強などを開発してきたが、これらの耐震補強がなされた移築京町家が、計測震度6強に相当する JMA 神戸波を受けても、土壁等に大きな損傷は発生するが倒壊しなかったことで、耐震補強構法としても有用であることが確認できた。

伝統構法木造建物については、構造力学的に未解明な部分がまだ多く残されており、実験的、解析的研究のもとに構造力学的な解明が進められている。しかし、今回の京町家振動台実験では、図11に示されるよ

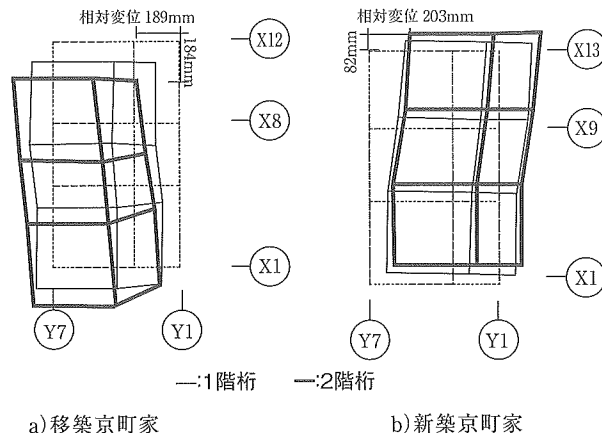


図11 JMA神戸波加振時の変形状態

うに建物が平面的に変形しながら揺れることも分かったが、また新築京町家では、柱脚部の滑りなどが見られた。このような床や屋根などの水平構面の変形や柱脚部の滑りが、建物の地震応答性状に及ぼす影響など良く分かっておらず、伝統構法木造住宅の耐震性能を適切に評価する上で、重要な課題となる。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。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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、pp.149-155、2007年6月.
- 3) 鎌田輝男、須田達、鈴木祥之、岡村雅克：伝統木造軸組住宅の耐震補強、はしご型フレーム耐震補強ユニットの耐震性能、日本地震工学会大会梗概集、pp.90-91、2005年11月.
- 4) Atsuko SHIRAYAMA, Yoshiyuki SUZUKI, Takafumi SASAKI and Hidemaru SHIMIZU: Seismic Performance Evaluation of Traditional Wooden Structures Reinforced with Horizontal Member by Static and Dynamic Tests, WCTE 2006 - 9th World Conference on Timber Engineering - Portland, OR, USA - August 6-10, 2006, Paper Number: 3.2.1.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.