

伝統的構法・木造建物の耐震診断方法と適用性に関する研究

村山 明*・伊藤 敬一**・滝田 貢***

A Study on Methods of Seismic Capacity Evaluation and Their Applications of Traditional Wooden Structures

Akira MURAYAMA*, Keiichi ITOH** and Mitsugu TAKITA***

Abstract

This paper presents application of methods of seismic capacity evaluation in traditional wooden structures. Three methods, first one is based on the ultimate strength, second based on the ultimate energy, third based on the seismic response of deformation, are examined on application. It is evident that some differences are existed in the synthetic values of seismic capacity in the three methods, and there are due to handling of deformation capacity in each method.

Keywords: Traditional wooden structures, Seismic capacity, evaluation methods

1. はじめに

木造建物は、在来軸組構法と伝統的構法・木造建物に大きく分けることができる。在来軸組構法は、耐震要素として壁を持ち、これによって耐震性能を発揮させる構法である。一方、伝統的構法・木造建物は、耐震要素として壁、垂壁付き独立柱、貫、鴨居を持ち、これらによって耐震性能を発揮させる構法である。この種の建物は、柱で構成される伝統的軸組構法（社寺建築）、柱と壁で構成される伝統的軸組壁構法（民家）に分けられる。しかし、この構法の耐震性能評価については、仕口の評価、垂壁、腰壁によるラーメン効果の評価が難しく、法令では耐力壁以外の規定はなく、日本建築防災協会では適用外となっている。

1995年1月の兵庫県南部地震では、伝統的構法・木造住宅にも甚大な被害がみられた¹⁾。この

ため、伝統的構法・木造建物でも耐震補強を進めるために簡易的な耐震性能評価方法を検討する必要性が高まった。2000年に建築基準法を改訂、木造住宅の仕様規定（基礎、接合部、耐力壁の配置など）を大幅に強化、性能規定の導入、限界耐力計算の導入（令82条の6）が行われ、令36条の2の定めによって木造住宅でも適用可能となった。いままで民家や町家のように保有耐力は大きくなくとも変形性能が高い伝統的構法の住宅に対しては構造安全性を確かめる方法が実質的にはなかったに等しい状況だったので、限界耐力計算はこの種の構法について性能評価の道を開いたものと位置づけることができる。しかしながら、適用には耐力壁の荷重変形関係のデータや増分解析が必要となることから、一般的な在来軸組構法の住宅の耐震性能評価について言えば実際は殆ど用いられていないというのが現状である。それでも、近年、耐震要素の実験がされ、耐震要素の復元力特性が明らかになってきたために評価方法として注目されている。

2001年3月、文化庁は、伝統的構法・木造建

平成17年12月16日

* 大学院建築工学専攻博士前期課程・2年

** 大学院建築工学専攻・前教授

*** 大学院建築工学専攻・教授

物に適用可能な耐震性能評価方法として、「重要文化財（建造物）耐震診断指針」（以後、文化庁診断指針と略称）を公表した²⁾。また、2004年7月、日本建築防災協会は、「木造住宅の耐震診断と補強方法」（以後、改訂版診断法と略称）を改訂版として公表した³⁾。その中でも伝統的構法・木造住宅の耐震性能評価方法を新しく追加した。

以上のように、兵庫県南部地震を契機にして、木造住宅の耐震補強を推進することの重要性が広く認識されるようになった。そして、伝統的構法・木造建物でも耐震補強を進めるために簡易的な耐震性能評価方法を検討する必要性が高まった。年々、耐震性能評価方法が整備されてきてはいるが、伝統的構法・木造建物の耐震性能評価方法は、公表、導入された手法が適用しているかが課題となっている。

以上のことから、本研究では以下のことを目的とする。

- (1) 伝統的構法・木造建物の耐震性能評価方法として提案されている手法は、どのような内容と特徴をもっているか明らかにする。
- (2) 既存建物を用いて耐震性能評価方法の適用性について知見をまとめる。

2. 既往の研究

2.1 木造建物の耐震診断法と現状

兵庫県南部地震を受けて2000年に建築基準法の改定が行われた。この改定では、従来からある仕様規定が告示などで一層強化（基礎、接合部、耐力壁の配置）された一方で、耐震性能を別ルートで評価できるよう限界耐力計算が導入された。改定された基準法における木造住宅・耐震関連内容を流れ図の形で整理してみたのが図1である。

この図に示されているように、通常規模の木造住宅は四号建築物として扱われ、許容応力度計算、保有耐力計算などの一貫した構造計算は

課せられず、もっぱら仕様規定によって構造安全を確保する方法が中心になっているのは今までと同様である。新計算法として令82条の6で限界耐力計算が導入され、令36条の2の定めによって木造住宅でも適用可能となった。いままでも民家や町家のように保有耐力は大きくなくとも変形性能が高い伝統的構法の住宅に対しては構造安全性を確かめる方法が実質的にはなかったに等しい状況だったので、限界耐力計算はこの種の構法について性能評価の道を開いたものと位置づけることができる。しかしながら、適用には耐力壁の荷重変形関係のデータや増分解析が必要となることから、一般的な在来軸組構法の住宅の耐震性能評価について言えば実際は殆ど用いられていないというのが現状である。

今回の改定では、兵庫県南部地震の被害分析から仕様規定が強化された。基礎の仕様、柱端部、筋かい端部の接合部の仕様について、それぞれ告示によって細部にわたって規定が示され、特に在来軸組構法の主たる耐力要素である耐力壁については、その配置について大きな変更が加えられた。俗に「4分割法」と呼称される具体的規定が告示1352号に定められ、耐力壁の配置バランスについて数量的な判断基準が示された。それまでは、令46条第1項に耐力壁は「釣り合いよく配置しなければならない」とあるだけでそれ以上の規定はなく、配置の良し悪しの判断は設計者に全面的に任されており、確認申請時の場面でも殆ど不問にされるような状況であった。兵庫県南部地震に限らず、過去の地震被害でも耐力壁の偏在は被害の大きな要因として指摘されていたので、この改定は木造住宅の耐震性能を底上げするものとして評価できるものである。また一方、簡略的なものとは言え、耐震性能を壁量のみならず、その配置によっても数量的に評価するという新しい考え方を示したものとして位置づけることができる。

従来、木造住宅の耐震性能評価は各種仕様と壁量計算で行っていたが、2000年の基準法改定

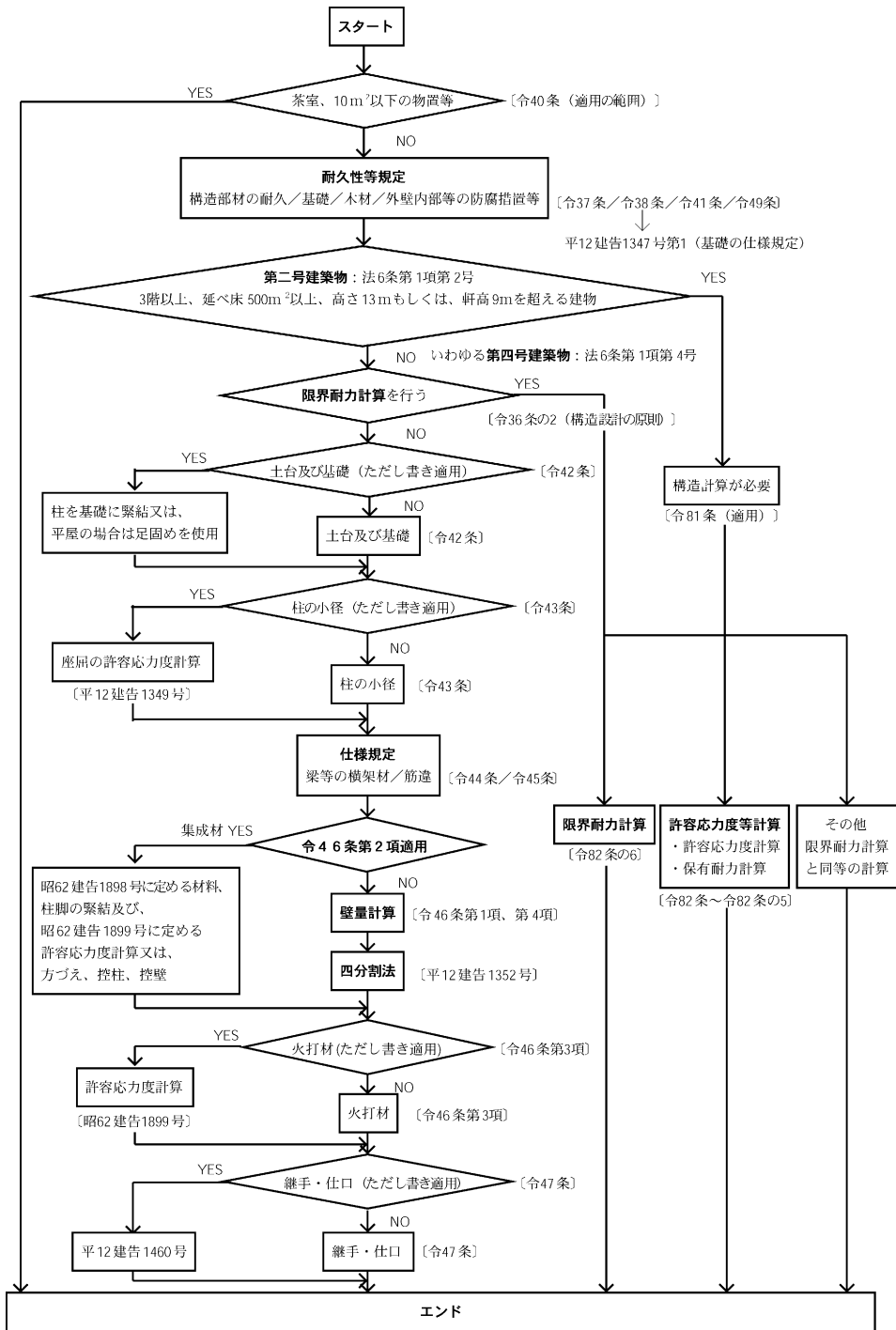


図1 建築基準法で定める木造建物の構造計算ルート

は、仕様規定を強化する一方で限界耐力計算の導入、耐力壁配置バランスの数量評価、また、仕様規定の除外規定として幾つかの仕様について部分的に許容応力度計算を用いるなど、性能評価の観点から一層、構造計算を利用する方向に向けられた改定であったと結論づけることができる。

2.2 耐震要素・復元力特性の実験のまとめ

2000年に法令改定の際に導入された限界耐力計算は、適用するために耐震要素の復元力特性、荷重変形関係のデータや増分解析が必要となることから、殆ど用いられてこなかった。近年、耐震要素の実験が行われ、復元力特性が明らかになってきた。そのために、耐震性能評価方法として注目されている。

そこで、限界耐力計算を適用するための耐震要素の復元力特性とその適用方法をまとめる。今回は、伝統的構法・木造建物の耐震要素である土壁、垂壁付独立柱、貫と補強工事で注目されている仕口ダンパーの復元力特性とその適用方法を以下にまとめる。

(1) 土壁

藤田ら⁴⁾の研究によると、土壁を含む架構の復元力特性は次のようにまとめられる。単位フレームの仕様は、中塗り壁60mm厚、壁内に3～4段の貫材と小舞下地を含む。耐力はこれら

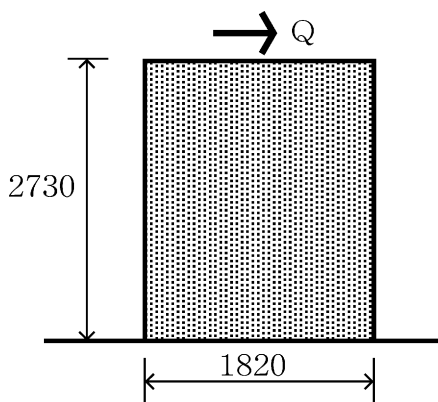


図2 土壁のモデル図

下地の耐力、および周辺のフレーム耐力を含む。単位フレームの保有耐力は9kN、変形限界は1/15とし、柱間寸法および壁厚に比例する。単位フレームの幅は1,820mm、壁厚の基準値は60mmとしてあるので、たとえばスパンが0.91mであれば、単位フレームの復元力を0.91/1.82=0.5倍し、壁厚が120mmであれば、単位フレームの復元力を120/60=2.0倍する。図2に実験体のモデル図を示す。

(2) 垂壁付独立柱

藤田ら⁴⁾、山田ら⁵⁾の研究によると、小壁(土壁)の復元力特性は次のようにまとめられる。単位フレームの仕様は、欄間高さ900mm、中塗り壁60mm厚、壁内に内法貫、小舞下地を含む。耐力は貫の耐力は含まず、周辺フレームの耐力を含む。単位フレームの保有耐力は4kN、変形限界は1/15とする。耐力は、小壁のせいが階高に対して占める割合(=h/H)、壁厚に比例し、柱間寸法には比例しないものとして算定する。また、ほぞの種類での耐力差は見込まない。ただし、柱の耐力の計算によって確認し、柱の折損が生じない場合は変形限界を1/15とするが、柱の折損が生じる場合は変形限界を文化庁の方法によって計算する。図3に実験体のモデル図を示す。

(3) 貫

藤田ら⁴⁾、山田ら⁵⁾、村上ら⁶⁾の研究によると、

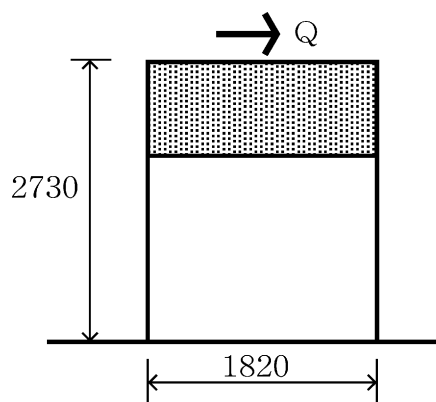


図3 垂壁付独立柱のモデル図

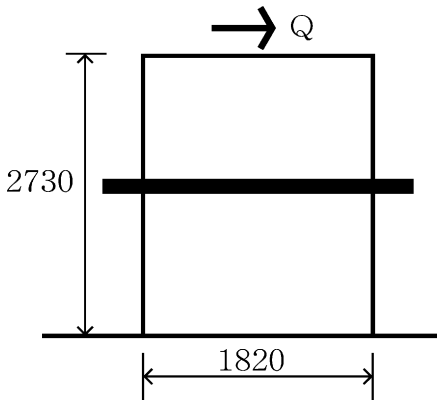


図4 貫のモデル図

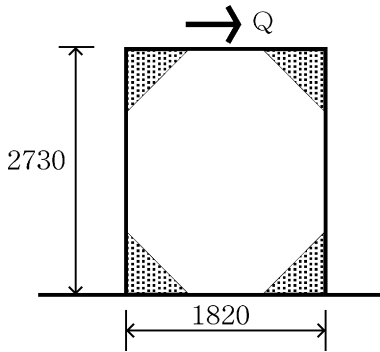


図5 仕口ダンパーのモデル図

中間に貫を含む架構の復元力特性は次のようにまとめられる。単位フレームの仕様は、貫材を1段、通し貫2ヶ所のものである。耐力は貫材1段、通し貫2ヶ所の耐力であり、周辺のフレーム耐力を含まない。単位フレームの保有耐力は貫の断面寸法 $150 \times 250 \text{ mm}$ で 25 kN 、 $24 \times 120 \text{ mm}$ で 1 kN 、 $15 \times 105 \text{ mm}$ で 0.6 kN 、変形限界は $1/15$ 以上とする。耐力は、貫のめり込み面積と貫段数に比例し、階高に反比例するものとして換算する。貫の高さ位置には関係しない。仕口の形状は通し貫、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する。なお仕口内の継手については通し貫でない場合、略鎌は $1/2$ 、外端の大入れは $1/4$ の耐力と見なす。図4に実験体のモデル図を示す。

(4) 仕口ダンパー

一ノ瀬ら⁷⁾、カネソウ株式会社⁸⁾の研究によると、仕口ダンパーの復元力特性は次のようにまとめられる。単位フレームの仕様は、四隅に仕口ダンパーを設置した架構である。仕口ダンパーは、 15 cm 、 20 cm 、 30 cm と3タイプある。耐力は4個の仕口ダンパーが定変位振幅にて振動するときの復元力特性であり、木造架構部分の負担力は除く。標準として振動数 0.5 Hz (周期 2 sec)、 1.0 Hz (周期 1.0 sec)、 3.0 Hz (周期 0.33 sec) の仕口ダンパー架構を示す。耐力は、仕口ダンパーの個数に比例し、階高に反比例し、柱間には関係しない。また、仕口ダンパーの履歴減衰による等価粘性減衰定数は、周期 $0.3 \sim 1.0 \text{ 秒}$ にて $h=40\%$ 、 2.0 秒 にて $h=35\%$ とする。図5に実験体のモデル図を示す。

3. 木造建物の耐震性能評価方法

3.1 法令で定める木造建物の耐震性能及びその評価方法

法令では、木造建物の耐震性能は耐力壁を中心として考えており、壁量と配置バランスによって評価している。耐力壁は、令46条に規定されている。伝統的構法・木造建物に法令を適用すると垂壁、貫等の要素について規定されていないため、評価できない状態になっている。

法令で定められている木造建物の耐震性能評価方法は、仕様規定では令46条の壁量計算法、四分割法(平成12年建告1352号)、性能規定では許容応力度計算等(令82条)、限界耐力計算(令82条の6)等である。伝統的構法・木造建物を評価できる耐震性能評価方法としては、限界耐力計算が挙げられる。

3.2 伝統的構法・既存木造建物の耐震診断における耐震性能評価方法

伝統的構法・既存木造建物の耐震性能評価方法として、2001年3月、文化庁公表の文化庁診断指針、2004年7月に日本建築防災協会刊の改

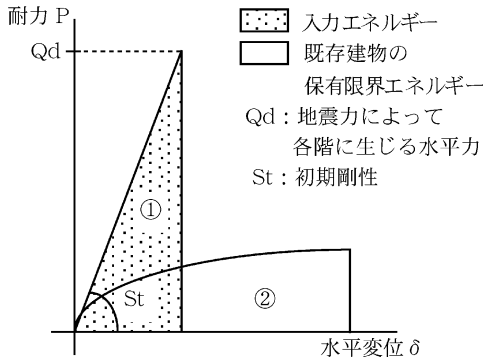


図6 エネルギー—変位一定則の概念図

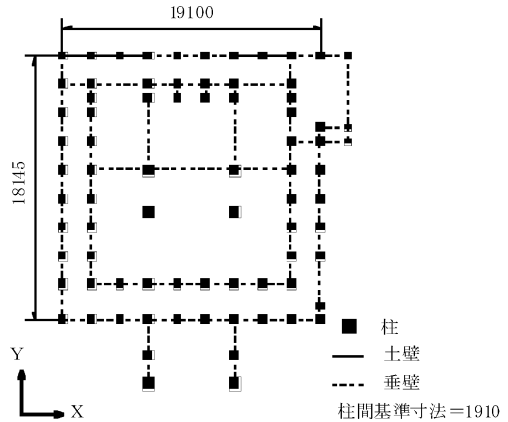


図7 柱・壁伏図

訂版診断法が挙げられる。

文化庁公表の文化庁診断指針は、「所有者診断」、「基礎診断」、「専門診断」の3段階からなる診断法である。このうちの「基礎診断」には、エネルギー一定則の考えをもとに開発された保有限界エネルギーを評価する方法（以後、保有限界エネルギー診断法と略称）と等価線形化法によって応答変形を評価する方法（以後、等価線形化法と略称）がある。保有限界エネルギー診断法で耐震性能評価する際に扱う耐震要素は、土壁と垂壁付独立柱である。適用方法は、土壁と垂壁付独立柱の荷重変形曲線より保有限界エネルギーを算定し評価する。等価線形化法で耐震性能評価する際に扱う耐震要素は、全ての耐震要素である。適用方法は、各耐震要素の復元力特性を求め応答変形角を求める。

日本建築防災協会刊の改訂版診断法とは、「誰でもできるわが家の耐震診断」、「一般診断」、「精密診断法」の3種類からなる診断法であり、伝統的軸組構法・木造住宅にも対応するように改訂された。この手法の中の「一般診断」と「精密診断法」の中の1つである保有耐力診断法は、エネルギー一定則の考えに基づいて開発された保有耐力を評価する方法である。一般診断と保有耐力診断法で耐震性能評価する際に扱う耐震要素は、土壁と垂壁付独立柱である。土壁と垂壁付独立柱の終局耐力より壁強さ倍率の値を用いて評価する。

図6 にエネルギー—変位一定則の概念図を示す。

4. 耐震性能評価方法の適用性についての検討

4.1 耐震性能指標の種類と特徴

総合的に耐震性能を見ていく場合には、耐震性能指標ごとに耐震性能を見ていくことが重要なこととなる。本研究では、耐震性能を見るための耐震性能指標を次の4つの指標を取り上げる。

- 壁量充足率、1/4 側端部分における壁量充足率…耐力壁の壁量割合で耐震性能を評価する考え方である。
- 保有耐力…ある変形時の建物が持っている耐力によって耐震性能を評価する考え方である。
- 保有限界エネルギー…耐力と変形能力によって耐震性能を評価する考え方である。
- 保有限界応答変形…地震力が作用した際にその建物がどのくらいの変形まで応答するかを評価する考え方である。

4.2 既存建物への耐震性能評価方法の適用

既存建物の総合的な耐震性能を見るために、4つの耐震性能指標を見ることのできる次の5つの

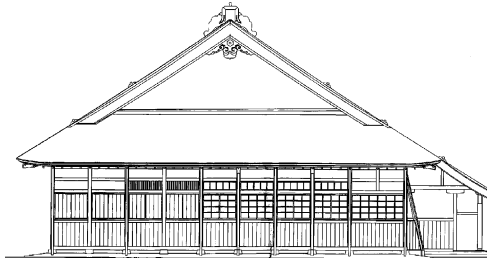


図8 東側立面図

表1 建物規模，柱・壁の量，立地条件

	項目	内容	
建物規模	建設年 (年)	1,650	
	延べ床面積 (m ²)	344.75	
	最高高さ (m)	12.6	
	軒高 (m)	5.3	
	桁行長さ (m)	19.1	
	梁間長さ (m)	21.965	
	柱間隔 (m)	1.91	
柱・壁の量	存在壁率 (cm/m ²)	X	2.77
		Y	0.55
	存在柱率 (cm ² /m ²)	72.7	
立地条件	地震地域係数 Z	0.9	
	地盤	第2種地盤	
	積雪深 (m)	1.32	

表2 建物仕様

項目	内容
屋根	柿葺き＋薄鉄板葺き
柱 (cm)	ヒバ (24×24, 18×18, 13.5×13.5)
壁	土塗壁
床	板張り (火打ちなし)
基礎	玉石
接合部	長ぼぞ差し＋込み栓

評価方法を適用する。

- ① 法令に規定されている壁量計算，四分割法
- ② 防災協会の一般診断
- ③ 防災協会の保有耐力診断法
- ④ 文化庁の保有限界エネルギー診断法
- ⑤ 文化庁の等価線形化法

(1) 既存建物の概要

対象建物は，青森県弘前市に建つ社寺建築「A寺」とする。建物概要として，図7に柱・壁立面図，図8に立面図，表1に建物規模，柱・壁の量，立地条件，表2に建物仕様を示す。

(2) 耐震性能評価結果

既存建物に適用させた5つの耐震性能評価方法の計算結果を表3に示す。

性能評価結果から次のことが言える。法令に定める評価方法の壁量充足率の結果から，X方向0.09，Y方向0.02という結果が得られた。これは，壁の量が非常に少ないことが分かる。1/4側端部分における壁量充足率の結果から，X，Y方向共に片方の領域に壁が無く偏心していることが分かる。

そして，保有耐力による評価では，一般診断，保有耐力診断法ともにX，Y方向の総合評価値が基準値である1.0よりも低いために，倒壊の危険性が高いという結果が得られた。次に，エネルギー一定則にもとづく評価でも保有耐力による評価と同様に，X，Y方向の総合評価値が基準値である1.0よりも低いために，倒壊の危険性が高いという結果が得られた。次に等価線形化法による評価では，評価値がX方向1/20，Y方向1/24であり，倒壊限界の変形角である1/15よりも小さい評価値が得られ，倒壊の危険性が低いという結果が得られた。

この結果から，この対象建物の構造特性は，壁のみで耐震性能を発揮させるのではなく，耐震要素全体によって総合的に耐震性能を発揮させる建物であることが分かる。また，耐力だけでなく耐震性能を発揮させるのではなく変形性能も考慮できる建物であることが分った。つまり，全

表3 耐震性能評価結果

指標	診断方法	方向	保有値		必要値		評価値	
壁量充足率, 1/4側端部分に おける壁量充足率	壁量充足率	X	存在壁量 (m)	4.8	必要壁量 (m)	51.7	0.09	
		Y		1.0			0.02	
	1/4側端部分に おける壁量充足率	X		①		4.8	13.0	0.4
				②		0.0	13.0	0.0
		Y		①		0.0	13.0	0.0
				②		1.0	9.2	0.1
保有耐力	一般診断	X	保有耐力 (kN)	28.9	必要耐力 (kN)	230.6	0.1	
		Y		78.9			0.3	
	保有耐力診断法	X		78.8		267.2	0.3	
		Y		128.7			0.5	
保有限界 エネルギー	保有限界 エネルギー診断法 (倒壊限界・ 大地震動)	X	保有限界 エネルギー ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	52.2	必要エネルギー ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	246.1	0.2*	
		Y		65.2			97.4	0.7*
保有限界 応答変形	等価線形化法 (大地震動)	X					1/20	
		Y					1/25	

注：() は令84条にもとづいて建物重量を精算した値を使用した場合

での耐震要素で耐震性能を粘り強く発揮する建物と言える。

5. ま と め

本研究では、伝統的構法・既存木造建物を対象として耐震性能評価を行った。以下に、耐震性能評価方法の適用性について知見をまとめる。

耐震性能指標別に見ると等価線形化法は、保有限界応答変形を評価することだけでなく保有耐力も評価することができる診断方法である。まず、保有耐力について見てみる。保有耐力を評価する評価方法は、防災協会の一般診断と保有耐力診断法である。これを等価線形化法と比べる。一般診断と保有耐力診断法は、終局耐力、つまり変形角 $\gamma=1/15$ の時の耐力を評価している。また、土壁、垂壁付独立柱のみの

耐力で評価している。それに対し、等価線形化法は、全ての耐震要素の保有耐力を評価している。対象建物のような伝統的構法・木造建物は、在来軸組構法・木造建物のように耐震要素を耐力壁中心に耐震性能を発揮させる建物とは違い、耐震要素として壁、垂壁付独立柱、貫、鴨居等で総合的に耐震性能を発揮させる建物である。そのため、一般診断と保有耐力診断法のように壁、垂壁付独立柱のみで保有耐力を評価する方法よりも全ての耐震要素によって保有耐力を評価する方法の方が耐震性能特性を評価できる。

次に、保有限界エネルギーについて見てみる。保有限界エネルギーを評価する評価方法は、文化庁の保有限界エネルギー診断法である。保有耐力と同様に等価線形化法と比べると、保有限界エネルギー診断法も一般診断と保有耐力診断法と同じで土壁、垂壁付独立柱の保有限界エネ

ルギーのみを評価している。やはり、この指標に置いて等価線形化法の方が全ての耐震要素を評価しているからよりよく耐震性能特性を評価できている。

以上のことから、対象建物のような伝統的構法・木造建物は、耐震性能を耐震要素を総合的に発揮する構法であるから、耐震性能評価方法も等価線形化法のように総合的に評価できる評価方法の方がよい。また、等価線形化法は、地震力をそのまま入力するので、各変形時の構造特性が評価することができる。

参考文献

- 1) 建設省住宅局：木造住宅の耐震精密診断と補強方法，財団法人 日本建築防災協会，1997.1
- 2) 重要文化財(建造物)耐震診断指針，pp. 32～pp. 53, 文化庁文化財部，2001.3
- 3) 国土交通省住宅局：木造住宅の耐震診断と補強方法，pp. 45～pp. 107, 財団法人 日本建築防災協会，2004.7
- 4) 藤田香織ほか：伝統的建築の壁体に関する振動台実験 その2 土壁の地震波加振，日本建築学会大会学術講演梗概集，No. 22075, 1997.9
- 5) 山田真澄ほか：単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価 その3：小壁，全面壁による木造軸組の耐震性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，No. 22173, 2002.8
- 6) 村上秀夫ほか：伝統的木造建築物における継手部の構造実験 その1 仕口形状及び材種の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，No. 22046, 2001.9
- 7) 一ノ瀬博明ほか：木造軸組の単位フレームを用いた振動台実験による制震補強法の検証(その2) 仕口タイプ粘弾性ダンパーによる木造軸組の制震補強，日本建築学会大会学術講演梗概集，No. 22147, 2002.8
- 8) 仕口ダンパーの審査証明書，カネソウ株式会社