

耐震化促進のための社寺建築倒壊実験模型の開発

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL MATERIALS TO DEMONSTRATE COLLAPSE OF WOODEN TEMPLE FOR PROMOTION OF SEISMIC RETROFIT

福本有希 —*1 花井 勉 —*2
 福和伸夫 —*3 魚津忠弘 —*4
 石井 渉 —*5

Yuuki FUKUMOTO —*1 Tsutomu HANAI —*2
 Nobuo FUKUWA —*3 Tadahiro UOTSU —*4
 Wataru ISHII —*5

キーワード：
 社寺建築, 地震被害, 建物倒壊, 耐震補強, 模型実験, ビデオ

Keywords:
 Temples and Shrines, Seismic damage, Collapse, Seismic retrofit, Model experiment, Video

The authors have developed one of teaching materials showing vibration test featuring a temple, which is called 'Otera-bururu'. Based on an analysis of earthquake damage and structural factor of temples, the 1/10 scale wooden temple model placed on hand cart, which is kind of a shaking table, is developed in order to demonstrate the seismic weakness of wooden temple for promotion of seismic retrofit. Model experiment and close-up VTR could show breakup process and appeal an effect of seismic retrofit to the eye and the ear.

1.はじめに

東海・東南海・南海地震、宮城県沖地震など大地震の襲来が懸念される中、建物の耐震化が叫ばれている。特に住宅や学校建築などに対しては、人命確保の観点から様々な自治体で既存不適格建物の耐震診断や耐震補強の補助がおこなわれており、市民の意識関心も高まる傾向にある。

社寺建築については、登録文化財制度の導入などにより保護体制が整備されつつあるものの、未だ耐震化の遅れは否めない。社寺建築の保存は学術的・歴史的価値の継承の点で重要であるだけでなく、地域資源としての活用の点からも維持保全が求められる。これは、社寺が地域における「心」のよりどころであり、多くの文化的遺産を遺すなど地域の象徴的存在であること、さらに広い境内や、井戸の存在、庫裏での炊き出しなどを活用することにより、地域の防災拠点ともなりうるためである。耐震改修をおこなう場合には檀家の合意を得る必要があり、檀家総代の啓発が前提となるが、このとき檀家を媒介として地域全体の意識向上、防災力向上も期待される。このように社寺建築の耐震化促進は重要課題であり、啓発のための教材開発が要請される。

筆者らは住民の防災意識を啓発し、耐震化を促す事を目的として、防災教育用の教材開発を積極的に進めている。中でも、振動実験教材「ぶるる」は、地震時の建物の応答性状や倒壊性状を体感させることにより、耐震壁の量やバランス、屋根の重さによる建物の揺れ方の差異を理解することができるため、高い啓発効果が認められている¹⁾(写真1)。

本研究では一般の社寺を対象として、倒壊実験模型を開発する。

社寺建築の構造的特徴と被害形態を過去の地震被害調査等に基づいて分析し、仕様による壊れ方の違いの観点から、分類・類型化する。教材作成に当たっては、他の「ぶるる」と同様に実演実験が可能な模型サイズにて、大加振をうけた際に揺れ方、壊れ方が視覚的に再現できることを目指す。仕様の詳細は構面試験により確認の上、決定する。最終的に大地震時を想定し、倒壊を含む大振幅の加振を与え、無補強状態及び各種補強後の挙動を把握する。教材として模型実験を活用する方法に関しても検討を加える(図1)。

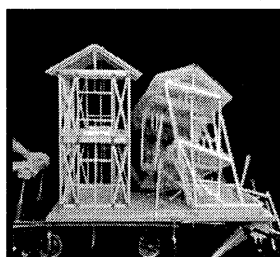


写真1 『木造倒壊ぶるる』

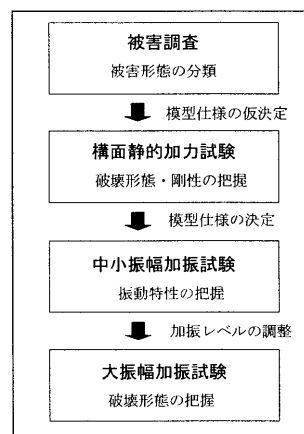


図1 本研究の流れ

*1 東京大学生産技術研究所 博士課程・修士(工学)
 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

*2 えびす建築研究所 代表・博士(工学)

*3 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*4 魚津社寺工務店

*5 日本システム設計

*1 Graduate Student, Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.

*2 Representative, Ebisu Building Laboratory, Dr. Eng.

*3 Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*4 Uotsu Shaji Corporation

*5 Nihon System Sekkei

2. 社寺建築の特徴と地震被害

2.1 社寺建築の耐震性の現状

本報では、社寺建築のうち過去に被害事例の多い寺院建築の本堂を検討対象とする。近世の真宗仏堂ならびにそれに準ずる新仏教系の建築は柱の径が細く、かつ、内法が高く、外陣部分の柱を抜いて広い空間を構成しているため、耐震性に乏しい場合が多い²⁾。兵庫県南部地震においても、特に寺院本堂の被害について見ると、東灘区及び長田区の31棟のうち全壊が半数以上にのぼる³⁾。また、耐震補強を含めた維持管理に関して、国県からの文化財指定を受けていない建物は、指定文化財に比べ不十分である場合が多く、同地震においての被害率が高いことが報告されている⁴⁾。例えば愛知県の場合、指定文化財はわずか6件(2005年3月31日現在)⁵⁾であり、他7000棟あまりの一般的な仏寺への相応の対応が急務である。

2.2 社寺建築の地震被害形態の類型化

本節では、過去の地震被害事例に基づき、社寺建築の構造形式と被害形態の観点から整理し、本研究において再現する被害形態を絞り込む。

2.2.1 建物全体の被害

伝統的木造建物の地震被害のうち、建物全体の倒壊形態及び被害形態は、大きく以下の3つに分けることができる。

- A (小屋組を含め) 倒壊後の形状が原型をとどめない、バラバラになる
- B 軸組が損傷を受け、屋根に押しつぶされる。小屋組の損傷は小さい(写真2)
- C 建物が基礎からはずれ、移動する(写真3)

全壊した建物の被害はA、Bいずれかに分けられると考えられるが、関東地震⁶⁾や兵庫県南部地震³⁾の被害を見ると、いずれにおいてもBの被害例が多いようである。

Bの場合、建物が振れて倒れるケースも多い。尾内⁷⁾は、寺院本堂の被害形態に関して『耐震要素となる壁配置が内陣の後方と両脇に集中するのが典型的な本堂の平面型であり、正面や下陣には壁がほとんど無いという偏心の影響』をうけて、『振れを伴う変形』が生じる場合があると報告している。

Cは、上部架構全体が一体に動くときに起きる被害形式である。腰原⁸⁾によれば、柱脚と基礎が接合されていない伝統的木造建築に特有の被害であり、床が張られていたり、柱脚が地覆でつながっていたりする神社社殿や寺院住宅系の建物で見られる。小規模なズレが非常に多く確認されたとの報告もある³⁾。

そこで、本報では寺院本堂に多く見られる被害としてB(振れ現象を含む)及びCを再現対象とする。

2.2.2 柱貫接合部の被害

Bの被害のうち、特に柱貫接合部に着目し、被害形態を以下の2つに分ける。

- B-1. 柱の折損(写真4)
- B-2. 貫ホゾの抜け、破壊

近世以降の社寺においては、柱の径が細く接合部の断面欠損が大きい、内法貫、小壁との接合部に生じる曲げモーメントに対して相対的に柱が弱いとき、柱が負けて折損する可能性がある(B-1)。本堂と庫裏など異種の建物が連結している場合や、写真4に示す本堂のように、貫せいに比べ、柱幅が非常に小さい場合にこの種の被害が確認される³⁾。

害が確認される³⁾。

B-2は、軸部の被害として最も一般的に見られる被害であり、貫の挿込が浅く金物も使用していないため、柱から貫が抜け出ることにより生じる、との報告がある³⁾。

本研究の模型ではB-1、B-2両パターンの被害を再現する。

2.2.3 土壁の被害

伝統的木造建物の耐力壁である土壁の被害として、亀裂、剥落などがおこると考えられる(写真5)。本研究では簡易的にこの被害を再現する。

2.2.4 その他の被害

この他、瓦の落下も多く見られる被害例だが、今回は構造的な被害を対象とすることとし、瓦落下の被害再現はおこなわない。



写真2 地震被害例³⁾ (B)

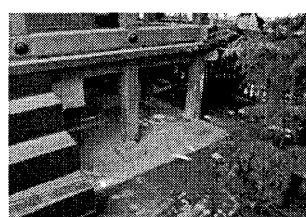


写真3 地震被害例³⁾ (C)



写真4 地震被害例³⁾ (B-1)



写真5 地震被害例³⁾ (土壁の亀裂)

3. 社寺倒壊模型の仕様

3.1 模型の仕様

前節に示した被害分析結果に基づき、倒壊形態が地震被害状況を再現できていることを第一義の目標として模型を作製する。また、本模型は複数回の実演実験による利用を前提としている。このため、①人力による実演加振が可能、②補強の有無による2体を並べた同時加振が可能、③軽トラック等で運搬可能な大きさ、④大振幅加振に対して壊れ方が自然である、⑤模型は短時間の補修により複数回の再利用が可能であること、などを制約条件として、模型の大きさ・仕様を決定した。想定建築年代は江戸時代、縮尺は1/10である。透視図及び軸組図を図2に示す。また、各部詳細図を写真6に、使用材料一覧を表1に示す。

原建物を梁間方向3間、桁行方向3間の寄棟屋根形式、床面積は104.3㎡、柱の太さは180mm、柱間隔は最大で5.46mと設定する。

小屋組については、破壊を想定しないこととし、強固に作成した。屋根の材料は重くて外観が瓦に似た鉛板を使用した。屋根の軽量化を再現する試験体のみ、鉛板の枚数を調整した。

斗拱の組物は屋根荷重を集約して柱に伝達する役割を持ち、地震力を受けた際の相対変形及び摩擦によりエネルギー吸収効果があるとされている。しかし、一般に組物部分の剛性は柱部分に比べ非常に高く、柱部分は大きく変形するものの、組物部分の相対変形量は少ない。また、近年の社寺建築ではきわめて簡素化され、装飾的に使用される例が多いことも踏まえ、今回の試験体においては、組物

の効果は考慮せず、組物部分（平三斗：大斗から実肘木まで）は一体物で作成した。

細径柱の折損を再現する試験体 B-1 においては、柱材として曲げ強度の小さいバルサ材を用いる。小壁にはスチレンペーパーを用いて、真壁状に配する。簡略化するため壁と軸組との間は接合せず、壁体内の貫は表現しない。これは以下の全面壁タイプの土壁（スチレンボード使用）にも共通である。

貫の破壊を再現する試験体 B-2 においては、柱、貫等軸組材として、新築の社寺建築にも使用頻度の高い、ベイヒバ材⁹⁾を使用する。破壊させる柱貫接合部は一般的な指し貫とするが、適宜取替えが可能なように、ホゾはバルサ材の独立部材とし、貫に対して両端を、ベイヒバ材の込み栓を打った構成とする。

また、柱脚—礎石間の固定（拘束）方法に関しては、柱脚の移動を許容するケース(C)と固定するケースの両方を設定する。

本研究では無補強の既存の寺院に加え、これを耐震補強した試験体も作成する。実際の耐震補強事例^{9),10)}等を参考に、表 2 のように補強メニューを設定した。このうち亀壁とは、格子状の壁が回転する際の摩擦により揺れのエネルギーを吸収する制震壁の一種である¹⁰⁾（写真 7）。ここでは、ベニヤ板を用いて真壁状の構造用合板壁（D-2）を、格子壁を用いて亀壁（D-3）を、転がり支承型免震台（D-5）を用いて免震化工法を再現する。

なお、模型は社寺の現場工事に携わる宮大工の手により組み上げた。

3.2 模型の構造性能

3.2.1 構面静的加力試験

接合部仕様の詳細を決定する目的で、構面の静的加力試験を実施し、破壊形態の確認及び剛性の把握をおこなった。いろいろな構成での構面模型を机上に平置きし、柱脚を釘止め固定し、頭貫の先端をバネばかりで引くことにより加力する。

各試験体の破壊形態に関して、B-1【（無補強）柱の折損】タイプでは、小壁がはらんだのち、内法貫→足固め貫位置の順に柱の折損がおきた（写真 8 左）。B-2【（無補強）ホゾの破壊】タイプでは、破壊形態の再現のために、通常より込み栓を増やしてホゾの断面欠損を増やしているが、小壁のせん断破壊ののち、柱との接合部でホゾが壊れた（写真 8 右）。補強試験体ではいずれも、ホゾの破壊が補強面材の破壊に先行して終局状態に至った。

加力試験による構面の荷重—変形関係を、B-1 構面の耐震診断結果¹¹⁾とあわせて図 3 に示す。剛性に関して、本試験体は大変形時の破壊形態の模擬を主眼点としている点、新材を用いて、宮大工が精巧に製作している点などの理由から接合部のガタが少なく、若干高いものとなっている。

なお、立体模型の屋根積載重量は、重い瓦屋根を模した重量相当¹²⁾となるよう、350N と設定する。構面実験結果(B-1)の初期剛性 2.5N/mm に基づくと、大振幅時（1/30）の模型周期は 0.5sec. 程度となる。

3.2.2 中小振幅加振試験

試験体仕様毎の中小変形域(1/300～1/120)の振動特性を把握するために、インパルス加力試験をおこなった。立体模型の桁位置を梁間方向にハンマーで打撃し、地盤位置及び小屋位置における応答加速度から固有周期を把握した。試験結果を表 3 に示す。無補強試験

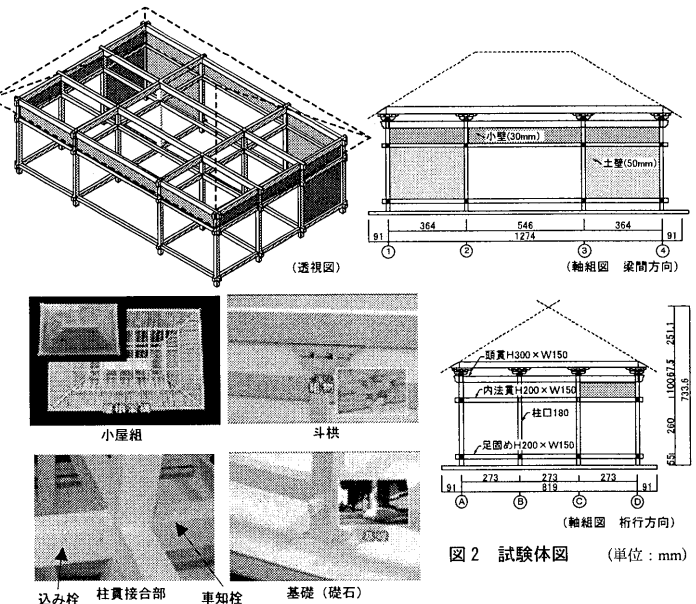


図 2 試験体図 (単位: mm)

写真 6 試験体詳細

表 1 使用材料一覧

礎石	: ベイヒバ	小壁	: スチレンペーパー (2mm 厚)
柱	: ベイヒバ (180×180mm) (一部バルサ)	土壁	: スチレンボード (2mm 厚)
貫	: ベイヒバ (200×150mm)	合板壁	: ベニヤ板 (3mm 厚)
ホゾ	: ベイヒバ	亀壁	: 格子壁 (ベイヒバ)
組物	: ベイヒバ	小壁 (補強)	: スチレンボード
小屋組	: ベイヒバ	床下 (補強)	: 壁 (ベイヒバ)
屋根	: 鉛板	免震層	: 転がり支承型免震装置
静的曲げヤング係数 ベイヒバ: 9.8kN/mm ² バルサ: 4.9kN/mm ² 静的曲げ強度 ベイヒバ: 77N/mm ² バルサ: 36N/mm ²			

表 2 耐震補強方法

- D-1 屋根の軽量化
- D-2 合板補強
- D-3 亀壁補強
- D-4 小壁・床下補強
- D-5 免震化

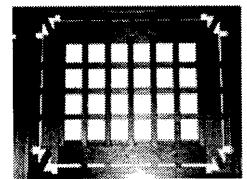
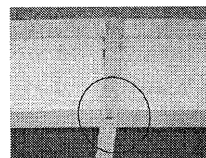
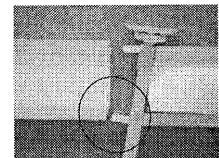


写真 7 亀壁の設置例 (神奈川県 S 寺)



内法貫位置で柱折損



ホゾの破壊、小壁のせん断破壊

写真 8 構面静的加力実験 破壊状況 (左: B-1 タイプ、右: B-2 タイプ)

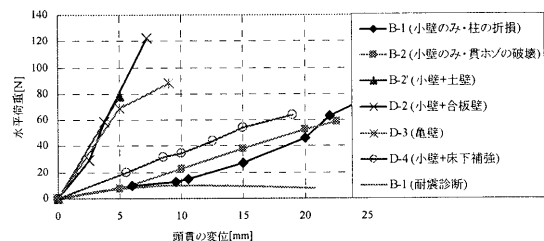
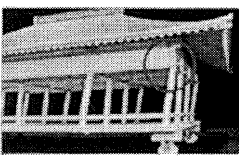
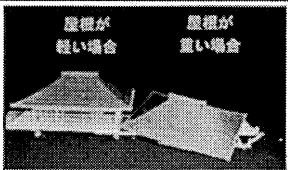
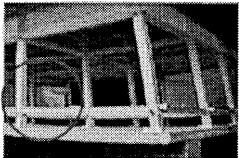
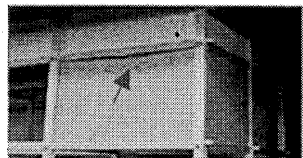
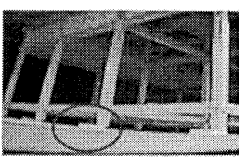
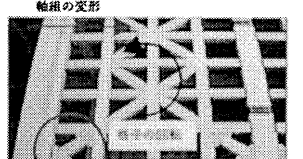
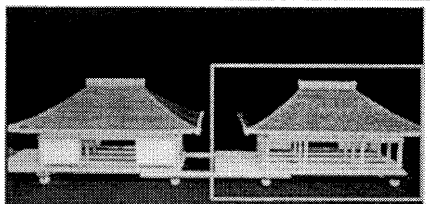
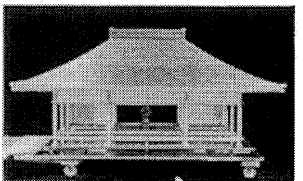


図 3 構面静的加力試験結果

表 3 中小振幅加振試験 固有周期一覧 (単位: sec.)

Case	無補強		補強	
	B-1	C	D-2	D-3
固有振動数	0.25	0.32	0.18	0.17

表 4 大振幅加振結果一覧

無補強試験体	加振状況	補強試験体	加振状況
B-1 【柱の折損】  柱の径：細い 柱：バルサ 小壁：ステンパーパー	 内法貫接合部→足固め貫接合部の順に全ての柱が折損し、倒壊した	D-1 【屋根の軽量化】  積載重量(重い屋根)：35kg (軽い屋根)：17kg	 屋根が軽い場合 屋根が重い場合 屋根が軽い場合、若干振れるものの損傷はない
B-2 【振れ・貫ホソの破壊】  壁の量：少ない 壁の配置：偏っている	 前面側の内法貫ホソの緩み→背面側土壁のせん断破壊→背面、前面ともに貫ホソが壊れ、倒壊した	D-2 【合板補強】  四隅に真壁状に合板を設置	 加振中合板がはらんで、若干変形を許す
C 【礎石からの移動】  柱脚を礎石に固定しない	 礎石上のホソから柱が抜けて、全体が同時に横移動した	D-3 【亀壁補強】  四隅に亀壁を設置	 軸組の変形 格子が回転する際に生じる摩擦により減衰が確保され、架構に大きな変形が生じない
B-2 と B-2' 【壁量が適切で、壁配置が均等な場合】との比較		D-4 【小壁・床下補強】  小壁補強(重ね貼) + 床下補強(礎石-足固め間)	 土壁がせん断変形するが、軸組の損傷はない
加振前  1 回目加振後  2 回目加振後 		D-5 【免震化】  免震装置上に建物を設置	 免震効果により、上部構造は変形しない

体の固有周期は 0.25sec. と、実際の社寺の振動試験結果 (0.49～0.65sec.)¹³⁾ に比べて若干短めとなっている。これは重量が付加された事で中小変形領域では組物による拘束などの要因が加わったものと推察される。なお、補強試験体の固有周期は無補強試験体に比べて短く、補強効果が確認される。

4. 模型を用いた大地震時挙動の再現

4.1 試験概要

無補強試験体及び補強試験体を用いて大地震時を想定した大振幅加振試験を実施した。1 棟または 2 棟の試験体を台車上に設置し、台車を人力で前後に手押しすることにより加振した。

試験体への入力の実験の主旨及び模型の振動特性に基づき、模型の共振を狙った加振とした。試験の一覧を表 4 に示す。

無補強試験体は、人力による数回の加振により倒壊に至った。ほぼ想定通りの被害形態が再現でき、これをビデオによりスロー再生することにより、各部位の損傷過程を把握した。

4.2 再現性

各試験体において、再現された被害状況は以下の通りである。

- ・B-1【(無補強) 柱の折損】タイプでは、2 回目の加振により内法貫や足固貫との接合部で柱が折損し、そのまま平行に倒壊した。
- ・B-2【(無補強) 振れ・貫ホゾの破壊】タイプでは、壁の量が少ない前面側が大きく揺れ、1 回目の加振により前面側の多くの内法貫接合部においてホゾの抜けや破壊が起きた。ほぼ同時に背面側の土壁がせん断破壊し、続けて背面側の内法貫が柱から抜けたため、全体のねじれ応答は小さく、平行に大きく振られて倒壊に至った。並べて置いた四周壁タイプ (B-2') は無被害であった。
- ・C【(無補強) 礎石からの移動】タイプでは、加振開始直後に衝撃的な横揺れをうけ、建物全体がほぼ同時に横滑りして、礎石からずり落ちた。壁が少ないが、剛性の高い小屋組により面内剛性が確保され、建物は剛体的に一体となって動いた。本実験のように水平動のみで上下動の影響がない場合においても衝撃的なパルス波によりこの現象が起こることが確認された。
- ・D-1'【(無補強) 屋根重量が重い】パターンでは、B-2 パターンに比べ背面側土壁がせん断抵抗し、全体に大きく振れ、貫ホゾの折損の後、土壁、小壁の破壊が続いた。
- ・D-1【(補強) 屋根の軽量化】パターンでは、若干振れるものの、損傷は確認されなかった。
- ・D-2【(補強) 合板補強】パターンでは、施工の良否の影響が出る結果となった。壁が柱と十分に接合されていない場合、壁の剥離が起きやすく、本試験では前面側の壁がはらみ、ある程度の変形を許すことになった。真壁追加の場合、四周の十分な接合が重要である。
- ・D-3【(補強) 亀壁補強】パターンでは、格子壁の設置により剛性が向上したことに加え、壁が回転することによる制震効果により、揺れは早く収束した。
- ・D-4【(補強) 小壁・床下補強】パターンでは、補強した部位は被害が少なく、背面側土壁がせん断変形しながら揺れに耐えた。
- ・D-5【(補強) 免震化】タイプは、上部構造は止まったままで、内部に設置した仏具を模した模型も全く動くことがなく免震効果を発揮した。

大振幅時の無補強試験体(B-2)の固有周期は 0.53sec. (変形 1/8)、補強試験体(D-2)では 0.20sec.(変形 1/30)であった。

以上のように概ね意図した被害、補強効果の再現が出来た。また、無補強建物と補強建物を同時に加振することにより、視覚的に補強効果を理解しやすい映像が得られた。また、破壊音により聴覚にも補強効果を訴えかけることができ、耐震化の啓発には大変有効である。さらに目線の高さに据えた親指カメラの映像は恐怖感を抱くほどリアリティがあり、なおかつ、スローモーション、画像の細切れ(パラパラまんが)にすることで、弱点部分の把握に役立つこともわかった。

5. まとめ

社寺建築構法の変遷及び地震被害形態に関する調査に基づき、仕様の違いによる壊れ方の違いに着目し、1/10 模型を用いて大地震を想定した加振をおこなった。各試験体で地震被害と同様の被害形態を再現することが出来、また補強効果も視覚的・聴覚的に表現することができて、耐震化教材としての有効性を確認した。

実際に各地の防災啓発イベント等でこの立体模型を用いたデモンストレーションがおこなわれ(写真9)、聴衆から多くの反響を得ている。本編の内容を活かした DVD も作成しており、併せて教材としての活用が期待される。またホームページ上¹⁴⁾でも映像を含めて紹介している。

今後は実際の被害をより忠実に再現可能な模型製作に取り組むとともに、倒壊実験において詳細な計測・評価をおこなうことにより、構造用の模型実験試験体としての有効性を確認していきたい。



写真9 内閣府・防災まち作りフォーラムにおける倒壊実験の様子

なお、本報は文献¹⁵⁾を基にまとめなおしたものである。

謝辞

社寺の振動試験は藤井智規氏(当時名古屋大学大学院生)により行われた。免震台は THK よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福和伸夫, 花井 勉, 他: 耐震化促進のための木造建物倒壊実験教材の開発, 日本建築学会技術報告集第22号, pp.99-102, 2005.12
- 2) 黒田龍二: 社寺建築および酒蔵の被害と検討, 1995 年兵庫県南部地震一木造建物の被害一, 日本建築学会近畿支部, 1995.9
- 3) 大橋好光: 平成 7 年阪神・淡路大震災 木造住宅等震災調査報告書 3.19 2. 木造社寺建築物 その2, 1997.10
- 4) 加藤邦男, 他: 文化財建造物の耐震的保存方法に関する研究, 平成 7,8 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1997.3
- 5) <http://www.pref.aichi.jp/kyoiku/bunka/pdf/sitei.pdf>
- 6) 腰原幹雄, 藤田香織, 他: 1923 年関東地震による鎌倉の社寺の被害, 日本建築学会構造系論文集, 第 573 号, pp.129-135, 2003.11
- 7) 尾内俊夫: 平成 7 年阪神・淡路大震災 木造住宅等震災調査報告書 3.19 2 木造社寺建築物 その1, 1997.10
- 8) 森林総合研究所監修: 木材工業ハンドブック(改定4版), pp.198-199, 2004.3
- 9) 文化庁建造物課: 重要文化財(建築物)耐震診断指針 参考資料集, 2000
- 10) 石丸辰治, 久保田雅春, 他: 伝統的木造建築物の制震改修について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.421-430, 2001.9
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課監修: 木造住宅の耐震診断と耐震補強一木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版), (財)日本建築防災協会, pp.287-297, 2004
- 12) 花吉朝陽, 大野敏: 文化財建造物の重量について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, F-2, pp.305-306, 2001.9
- 13) 藤井智規, 飛田潤, 他: 文化財の耐震性向上のための社寺建築の振動特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.465-466, 2006.9
- 14) <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/labofT/bururu/e-learning/templateDVD/html/index.htm>
- 15) 石井 渉, 魚津忠弘, 他: 耐震化促進のための社寺建築倒壊の実験模型の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.469-470, 2006.9

[2006年10月20日原稿受理 2007年2月19日採用決定]