

# 耐震化促進のための木造建物倒壊実験教材の開発

# DEVELOPMENT OF TEACHING MATERIALS TO DEMONSTRATE COLLAPSE OF WOODEN HOUSE FOR PROMOTION OF SEISMIC RETROFIT

福和伸夫 —\*1 花井 勉 —\*2  
石井 渉 —\*3 鶴田庸介 —\*4  
倉田和己 —\*4 小出栄治 —\*5

Nobuo FUKUWA —\*1 Tsutomu HANAI —\*2  
Wataru ISHII —\*3 Yousuke TSURUTA —\*4  
Kazumi KURATA —\*4 Eiji KOIDE —\*5

キーワード：  
木造建物, 建物倒壊, 教材, 耐震化, ビデオ

Keywords:  
Wooden house, Collapse, Teaching materials, Promotion of seismic retrofit, Video

The authors have been developed a series of teaching materials showing vibration test, which are called 'bururu', for education of dynamics in University and the enlightenment of disaster prevention consciousness in the society. Here, the 1/10 scale wooden house model placed on hand cart, which is a kind of shaking table, are developed in order to demonstrate the seismic weakness of wooden house for the promotion of seismic retrofit. This model easily show the difference of collapse due to the amount and the balance of seismic resistant member, joint of members, weight of roof, soil stiffness etc.

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、既存不適格木造家屋の耐震化の推進が叫ばれ、様々な自治体で耐震診断や耐震補強への補助が行われるようになった。また、最近では、東海・東南海・南海地震、宮城県沖地震、首都圏直下地震など、近い将来に発生が懸念される地震への備えが急がれている。これらの地震の予想被害量は甚大であり、中央防災会議は、平成16年度末に東海・東南海・南海地震に対する地震防災戦略を策定し、今後10年間で被害を半減させるとの目標を示している。

このように、木造家屋の耐震化は、我が国の喫緊の重要課題である。しかし、木造家屋の耐震診断や耐震補強の進捗状況は芳しくない。耐震化の阻害要因は多々考えられるが、耐震化の必要性を住民に分かりやすく示せていないことも大きな原因である。そこで、筆者らは、住民の防災意識を啓発し、耐震化を促すことを目的として、防災教育用の教材開発を継続的に進めてきた<sup>1)~2)</sup>。中でも、振動実験教材「ぶるる」は<sup>3)</sup>、地震時の建物の応答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させることができるため、高い啓発効果が認められた。様々な種類の講演会、小中学校での授業、住宅フェアなどでの利用を通して、耐震診断・改修を行うきっかけ作りに役立つことが分かった。

当初開発した「ぶるる」は、アタッシュケースの中に、振動台と各種の模型をオールインワン式に内蔵したもので、ユニバーサルジョイントを利用して、手回しハンドルの回転を振動台の並進動に

変換する方式を用いていた(写真1)。その後、より軽量の電動型のものも開発し(写真2)、現在では、全国で、100台を超える「ぶるる」が、耐震教育や防災教育・啓発などに利用されている。しかし、「手回しぶるる」と「電動ぶるる」は、模型が小型であり小中学校の体育館などでの利用が難しいこと、建物を単純化しすぎており現実の木造家屋をイメージしにくいこと、揺れの実験に限られ建物の倒壊状況を見せることができないこと、などの限界を有していた。

そこで、より大型で多人数の前での実演ができ、実際の木造家屋をイメージしながら、耐震上の家屋の弱点や、耐震改修の方法を具体的に示すことができる教材を作ることにした。振動台には市販されている台車を改良したものを採用し、建物は木造家屋の1/10スケールの木製模型とした。開発は2段階で行い、第一段階では、台車型の振動台を開発し、家屋は1階建てで倒壊しないタイプの建物模型を利用した(「台車ぶるる」と呼称)。第二段階では、より建物を精密にモデル化した2階建ての倒壊するタイプの建物模型を作成し

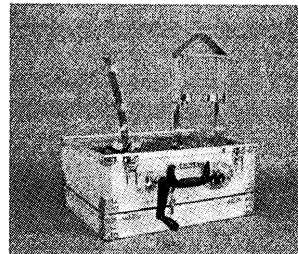


写真1 手回しぶるる

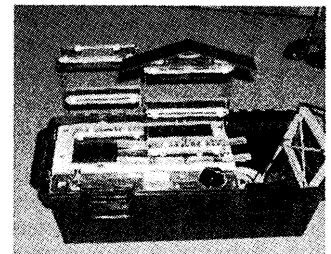


写真2 電動ぶるる

\*1 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博  
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

\*2 ㈱日本システム設計 取締役・博士(工学)

\*3 ㈱日本システム設計

\*4 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

\*5 応用地震計測(株) 課長・工修

\*1 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

\*2 Director, Nihon System Sekkei Co., Dr. Eng.

\*3 Nihon System Sekkei Co.

\*4 Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

\*5 Oyo Seismic Instrumentation Inc., M. Eng.

た（「木造倒壊ぶる」と呼称）。「木造倒壊ぶる」では、台車の上に2棟の家屋を併設し、耐震改修の有無による倒壊性状の差異を実感できるようにしている。

さらに、「木造倒壊ぶる」を用いた各種の実験映像をビデオ収録し、耐震改修促進用ビデオ「模型実験による木造住宅の耐震化対策のポイント」、及び、解説用パワーポイント集を作成した。ビデオ画像はホームページでも公開している。これらの教材は、愛知県建築指導課が作成した耐震改修促進ビデオ「あなたの家は大丈夫？ 木造住宅の耐震診断・改修のすすめ」と一緒に用いることにより、啓発効果を高めるようにしている。

本論では、これらの教材について、その概要を報告する。

## 2. 台車ぶるる

振動台は、図1に示すように、市販の台車を改造したものであり、台車の端部に遊びのある駆動軸を設置し、それを台座の上に載せ、取手を前後に移動させることにより、台車を水平に往復運動させる。台車振動台には、模型を載せるだけでなく、小学生などを載せて揺れを体感させることもできる。

模型は、図2（左）に示すように、概ね1/10スケールの模型になっている。建物を単純化し、柱・梁・屋根から構成した1階建ての木製模型とし、筋かいはい建物周囲の4面に設置でき、マジックテープで着脱可能なようにしている。建物重量に比べ柱剛性が大きいので、図2（右）に示すように柱・梁接合部の仕口を柔軟にして、接合部で変形をさせるように工夫している。模型はキット化しており、子供たちが建物の部材の役割を学びながら建物を作る楽しみを感じられるようにしている。

実験を行う際には、既存の「手回しぶるる」・「電動ぶるる」と併用し、屋根の重さ、筋かいの有無、筋かいの配置（偏心）などによる揺れの違いを示すようにしている。また、玩具用のミニチュア家具を家屋内に置いて家具の転倒もデモンストレーションしている。

この教材は、特に、小学校での防災教育に効果的であり、平成15年度～16年度に愛知県教育委員会が実施した親子参加型地震防災教育などで、30校を超える小学校で利用した。また、防災リーダーや防災ボランティアからの貸与依頼も多く寄せられている。

## 3. 木造倒壊ぶるる

「台車ぶるる」の利用を通して、台車振動台を用いた実験の有効性が確認されたが、利用者から、木造家屋の耐震化の啓発には、各耐震改修方法の効果が具体的に分かる教材が必要であるとの指摘を頂いた。そこで、「台車ぶるる」をベースとして、下記の3つの目標を掲げて、「木造倒壊ぶるる」を試作した。目標は、1) 木造住宅の

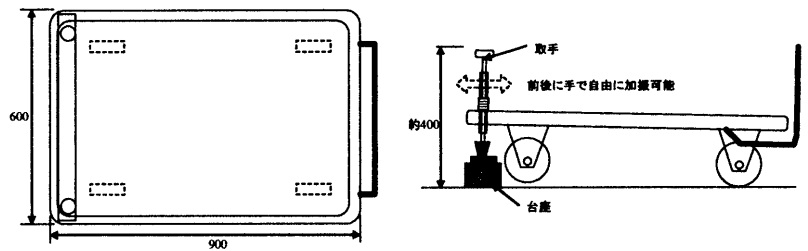


図1 台車振動台の平面（左）と立面（右）

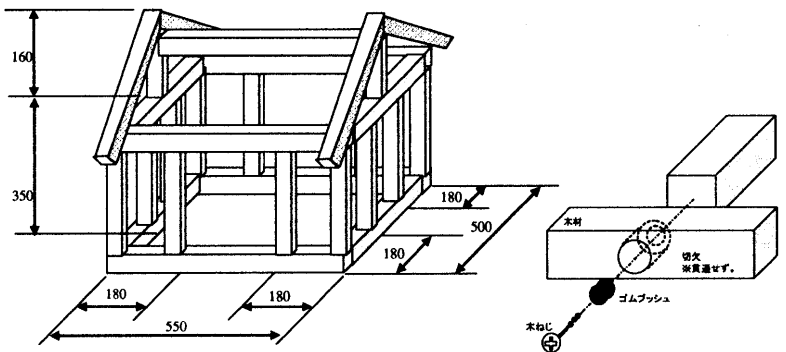


図2 「台車ぶるる」用1階建て木造模型の概観・寸法（左）と仕口部の詳細

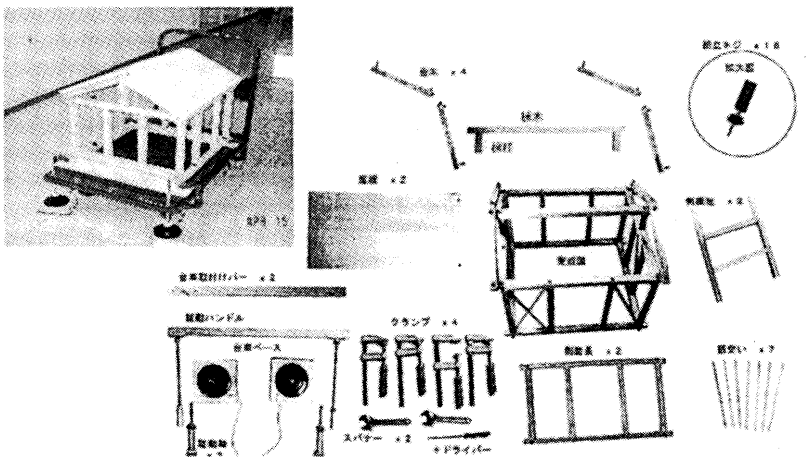


図3 模型のキットと完成写真

代表的な地震被害をなるべく正確に再現できること、2) 様々な構造的要因による揺れ方・壊れ方を簡単に比較・説明できること、3) 持ち運び可能で1回に数パターンの実演が可能なこと、の3つである。

### (1) 模型の概要

建物は、間口2間、奥行き3間の2階建て在来軸組み構法の建物を想定して、縮尺比10分の1の木製模型とした。構造特性の異なる2棟を台車振動台の上に併設し、説明者が台車を加振して実演する形態を想定した。過去の木造家屋の地震被害及び実大木造建物の倒壊実験<sup>4)</sup>などを参考に、壊れる主要因を接合部に特定することにし、部材、接合に強弱をつけた仕様としている。図4に、模型の概要を示す。なお、縮尺による相似則に従うと実物の固有周期 $T$ と比べ模型の固有周期 $T'$ が短くなり( $T'=T/\sqrt{10}$ )、揺れを実感しにくいことから、接合部の剛性を調整することにより時間軸をそろえている( $T' \approx T$ )。さらに組み建てが容易なよう各接合部に工夫を施した。

表1に主な仕様を示す。柱・梁・筋かい・間柱・まぐさなどの基本部材はヒノキとし、基礎にはタモを採用した。柱の破断を模擬する隅角部4本の通し柱と木摺りはパルサ製としている。柱のほぞはプラスチック棒で、柱・梁の接合金物はマジックテープで代用している。床は剛床を模擬する合板とし積載荷重として鉛製の重りを付加している。屋根には桐板製とスチレンペーパー製の重さの異なる2種類の板を用意した。地盤に関しては、軟弱地盤用に介護用の床ずれ防止用ウレタン樹脂を利用している。また、制震補強の一例として仕口部に設置するタイプのダンパーも作ってある。

これらに加え、転倒防止金具が着脱可能な家具(内部に重り設置)、鉄筋及び控え壁を着脱可能にしたブロック塀を準備している。

表1 「木造倒壊ぶるる」の仕様

通し柱：パルサ	梁：ヒノキ
管柱：ヒノキ	基礎：タモ
柱ほぞ：プラスチック棒 (軟質スチロール樹脂)	3つ割筋かい：ヒノキ 筋かい端部：梁短ほぞ
間柱、まぐさ：ヒノキ	接合金物：マジックテープ
床：MDF5.5mm	重い屋根：桐板 6mm
地盤：MDF15mm	軽い屋根：スチレンペーパー 6mm
軟弱地盤：ウレタン樹脂	
構造用合板：3mm 合板隅止め	仕口部ダンパー：金物+粗面用 両面テープ
木摺り：パルサ 1mm	
振動台：台車+加振棒	模型重量 9.1kgf (積載荷重：鉛 1kgf×2を含む)

(2) 模型の構造特性

間口方向の1、2階に、それぞれ4組のたすき掛け筋かいを入れた模型を対象に静的載荷実験と振動実験を実施し、基本的な構造特性を把握した。静的載荷実験では、バネばかりで建物の2階の腰壁位置を水平方向に引っ張り、振動実験では、地盤及び2階床に地震計を設置して振動台を水平加振した。その結果、1階の復元力特性は図5のように、模型の固有周期は表2のように把握することができた。これらの結果は、外内装材のない木造住宅の特性に比較的近い値となっている。

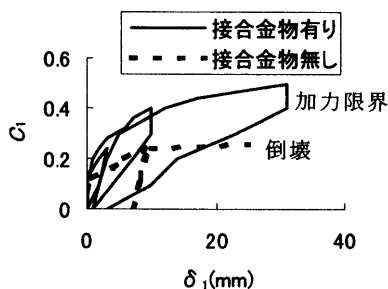


図5 1階の復元力特性

表2 模型の固有周期

加振レベル	接合金物有り	接合金物無し
小	0.21 秒	0.11 秒
大	0.56 秒	0.61 秒

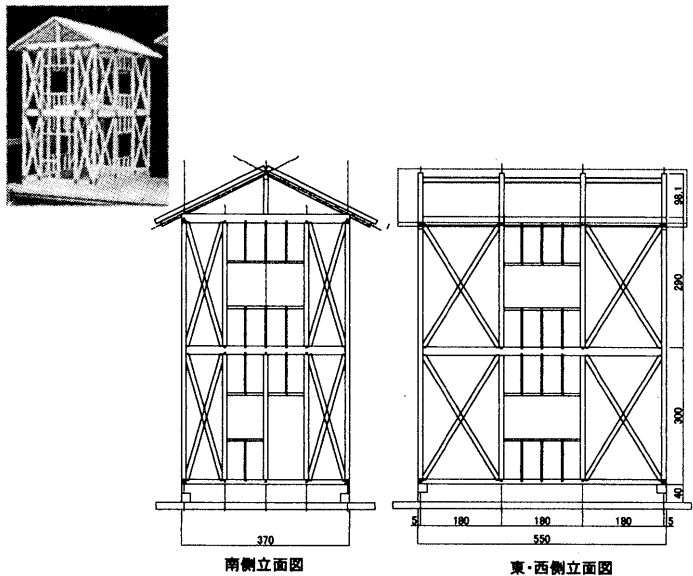


図4 「木造倒壊ぶるる」用2階建て木造模型の概観・寸法

(3) 主な実験メニュー

「木造倒壊ぶるる」を用いた主な実験メニューを表3に一覧する。表に示すように、①筋かいの有無、②接合金物の有無、③平面バランスの良し悪し、④上下バランスの良し悪し、⑤制震補強の有無、⑥屋根の軽重、⑦基礎の良し悪し、⑧地盤の良し悪し、⑨家具の補強の有無、⑩ブロック塀の補強の有無、などによる倒壊性状の差を、左右の建物模型で比較することができる。

「木造倒壊ぶるる」での実験は、それぞれの補強項目ごとの揺れ方の違い、壊れ方の違いが如実に現れ、臨場感あふれる音と共に、極めて高い啓発効果を持っている。また、加振振幅や加振周期による応答の違いも説明できる。実験を補足するために、表3の映像をナレーション付きのビデオ映像にまとめ、「模型実験による木造住宅耐震化対策のポイント」と題した防災教材ビデオも同時に作成した。ビデオ映像によるクローズアップ映像やスロー再生映像を併用することで学習効果を高めることができる。

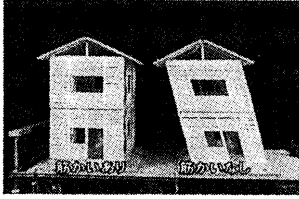
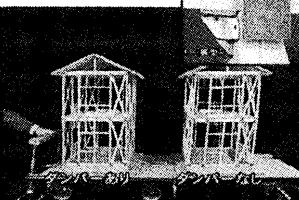
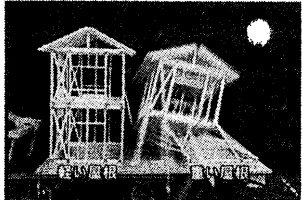
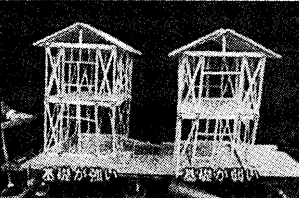
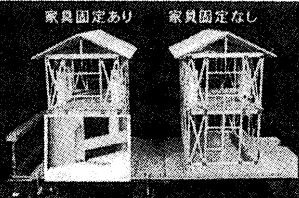
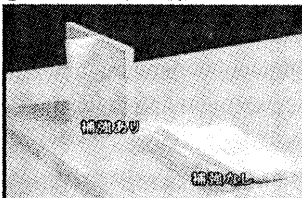
本教材を活用するためのパワーポイント説明ファイルも作成しており、ビデオ映像とパワーポイント教材をDVDに格納し、防災リーダーや木造耐震診断士に利用してもらえるようにもした。また、ホームページでは、動画を準備し、Eラーニング的に振動性状を学習できるようにもしている<sup>9)</sup>。

さらに、地震計や変位計を設置することで、加振から分析、事象説明までを行うことができるので、大学等での講義・実験実習にも有効に活用できる。

4. まとめ

本論では、木造家屋の耐震化普及のための振動実験教材として、台車と1階建て非倒壊型木造縮小模型を利用した「台車ぶるる」と、2階建て倒壊型木造縮小模型「木造倒壊ぶるる」を紹介した。これらの教材は、木造家屋の地震時の揺れ方や壊れ方を実演することができ、啓発効果が高いことを、様々な活動の中で実感してきた。特に、「木造倒壊ぶるる」は、耐震補強項目毎にその補強効果を実証で

表3 「木造倒壊ぶるる」を用いた主な実験メニュー

パターン	内容	パターン	内容
①筋かいの有無 	A棟：筋かい有り B棟：筋かい無し  少しの揺れでB棟は大きく傾く。モルタルの剥がれた木摺り外壁はほとんど揺れに抵抗しない。	②接合金物の有無 	A棟：接合金物有り B棟：接合金物無し  B棟は筋かいに突き上げられた柱がはずれ、接合部材が離散し全体崩壊する。
③平面バランスの良し悪し 	A棟：偏心無し B棟：1階偏心有り  接合金物については、B棟の開口の多い1階が耐力不足で大きく振幅し、通し柱が折れ振じられるように1階が倒壊する。	④上下バランスの良し悪し 	A棟：1,2階合板有り B棟：2階のみ合板有り  B棟は剛性バランスにより1階に損傷が集中する。A棟は開口部の上下にも合板を入れることでバランスを保っている。
⑤制震補強 	A棟：仕口部ダンパー有り B棟：仕口部ダンパー無し  各階柱頭部6箇所に取り付けた仕口部ダンパーのエネルギー吸収により、A棟は振幅が小さく、揺れの収束も早い。	⑥屋根の軽重 	A棟：軽い屋根 B棟：重い屋根  A棟は屋根を軽くすることで慣性力が軽減され、少ない筋かい量でも損傷はほとんどない。
⑦基礎の良し悪し 	A棟：基礎緊結 B棟：基礎接合無し  B棟はアンカーボルトが機能せず建物はロッキングし、隅角部より基礎が崩れ、建物が放り出される。	⑧地盤の良し悪し 	A棟：固い地盤 B棟：軟弱地盤  B棟は軟弱地盤で入力が増幅され上部架構の損傷が大きくなる。地盤との相互作用（ロッキング）現象も見られる。
⑨家具の補強 	A棟：金物による固定 B棟：固定無し  B棟の家具は地震動の早期に折り重なって倒れ、床位置のカメラから逃げる間もないことを実感する。	⑩ブロック塀の補強 	A壁：鉄筋、控え壁有り B壁：補強無し  B壁は慣性力により曲げモーメントの大きくなる根元から倒壊する。

きるのので、耐震改修を推進するために有用な教材になると考えられる。さらに、「木造倒壊ぶるる」を用いた実験映像を編集し、「模型実験による木造住宅耐震化対策のポイント」と題したビデオ教材も作成し、解説用パワーポイント教材をセットにしたDVD教材も作成した。

筆者らは、これらの教材が、我が国の耐震化の進展に少しでも貢献できることを期待している。今後も、耐震化促進教材を継続的に作っていく所存であり、教材の改善のために、忌憚のないご意見を頂けると幸いです。

謝辞

台車型振動台の作成ならびに模型接合部の仕様については、小倉公雄氏と応用地震計測(株)の原徹夫氏のアイデアに負うところが大きい。また、本教材の作成に当たっては、自治体や防災リーダーなど多くの方々から助言を頂いた。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福和伸夫: 減災は防災教育から、特集・防災のためのまちづくり、都市問題研究、第57巻第1号、pp.72-85, 649号, 2005.1
- 2) 福和伸夫, 飛田潤, 鈴木康弘: 中京圏における地震防災力向上のための大学研究者による実践研究, 地域安全学会論文集, No.6, pp.223-232, 2004.11
- 3) 福和伸夫, 原徹夫, 小出栄治, 生田領野: 携帯手回し振動台「ぶるる」の開発, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp.83-86, 2003.6
- 4) 坂本 功, 他: 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その1~14, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.199-225, 2003.9
- 5) <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/labofT/bururu>

[2005年4月18日原稿受理 2005年7月22日採用決定]