

繰返し使用が可能な強非線形建物・地盤実験模型の開発

DEVELOPMENT OF INELASTIC DEVICES OF STRUCTURE AND SOIL FOR REPEATABLE USE

佐武直紀 — * 1 福和伸夫 — * 2

Naoki SATAKE — * 1 Nobuo FUKUWA — * 2

キーワード:

地震防災, 木造住宅倒壊模型, 耐震化啓発, 液状化, フラッシング, 可搬性

Keywords:

Earthquake disaster mitigation, Collapse model of wooden house, Enlightenment of earthquake-proof design, Liquefaction, Flushing, Portability

Two inelastic devices, a collapse model of a wooden structure and a liquefaction model, are developed for repeatable experiments. This paper contains the outline and use of them. In the wooden model, rubber cords and magnets are installed not only for tying beams and columns, but giving restoring force and stiffness to the structure and keeping configuration of each part. In the liquefaction model, flushing system with a small pump demonstrates simplified liquefaction. Thanks to the portability as well as easy repeatable experiments of collapse and liquefaction arriving to inelastic ranges, these are useful for education of earthquake disaster mitigation.

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災から早くも15年が経過したが、その後も各地で震災が発生している。最近5年ほどの間にも、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震および新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2009年の駿河湾沖の地震など、枚挙にいとまがない。これらの地震では、耐震化されていない古い木造住宅やブロック塀の倒壊などの構造物被害に加え、地盤の液状化や大規模な斜面崩壊といった地盤に関わる災害も多く発生した。建築物の耐震化に加え、地盤対策も含めた総合的な地震対策が求められている。

この様な状況を受け、全国の自治体で地震防災への取組がようやく本格化しつつあるが、なかなか効果が上がっていない。例えば建物耐震化についてみると、既存不適格建物が余りに多い現状に加え、耐震補修・補強に要する多額の費用も障壁になっている。地震対策を一層推進するためには、行政側の積極的支援は勿論大切であるが、市民の側でも、地震対策の必要性を肌で感じる事が重要である。

筆者らは、市民の地震防災意識の向上を図るため、各種の地震防災啓発教材「ぶるる」シリーズの開発を進めてきた(例えば^{1)~6)})。開発当初は、例えば建物振動模型の場合、筋交いや耐震壁など耐震要素の有無による建物の揺れ方の違いを、視覚的に理解してもらうことから始め、相応の効果を上げてきた。しかしながら、地震防災啓発の効果を更に高めるには、実際に建物が壊れたり地盤が液状化したりする様子を見せることが、非常に効果的であることが判ってきた。

建物の倒壊や地盤の液状化といった現象は、いずれも強い非線形領域における現象で、これらを模型で表現しようとする、通常は一度限りしか使用出来ないのが一般的であった。これを、簡単に何度も繰返し実験が出来るようにすることで、地震被害の現象を多くの人に更に身近に感じてもらえるものと考え、種々の創意工夫を重

ねた。その結果、木造住宅の倒壊模型と地盤の液状化模型について、簡単に何度も繰返し使用可能な教材として実現することが出来た。

本報告では、これら2つの建物・地盤実験模型(木造住宅倒壊模型、液状化模型)について、その概要および操作活用例を紹介する。

2. 木造住宅倒壊模型

2.1 模型の概要

最近の地震被害からも明らかなように、1981年の建築基準法改正以前に建てられた古い木造住宅には、耐震要素の不足や偏在、過大な屋根重量などに起因して倒壊に至ったものが多い。この点を市民に判り易く示すため、筆者らは既に、写真1に示す倒壊型の木造住宅模型を開発している⁴⁾。この模型は、2棟の精巧な木造住宅模型を加振用台車に載せ、実際に台車を揺らして倒壊させるものである。建物が揺れ始めてから倒壊に至る様子を非常に良く再現出来る教材で演出効果も大きい、部品点数が多いことに加えて、倒壊時に部材がばらばらになるため、再組立に時間を要するのが難点であった。

今回開発した木造住宅倒壊模型(写真2)は、筆者らが以前に開発した非倒壊型の木造住宅振動模型(写真3)⁴⁾を改良し、建物の倒壊実験とその後の再組立を、短時間で何度も繰返し出来るよう工夫したものである。具体的には、建物の柱梁接合部を、非倒壊型の振動模型と同様に一方の梁のみ貫通させ、他の柱・梁部材は、写真4のように通し柱を含めて完全に切り離す。その後、貫通梁と切り離した柱・梁双方の接合部に磁石を取り付けるとともに、接合部から一定の距離の所までゴム紐を取り付けて結合する。ゴム紐は、単に柱・梁部材を繋ぐだけでなく、建物模型全体に復元力と剛性を与える役目を担う。また磁石を利用したのは、磁極の組合せにより柱・梁の方向性を確保するためである。以上示したゴム紐と磁石を

本稿の内容の一部は2007年度日本建築学会大会(近畿)など^{1)~3)}で発表した。

*1 応用地震計測(株) 営業部・工博
(〒336-0015 さいたま市南区太田窪2-2-19)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*1 Marketing Dept., Oyo Seismic Instrumentation Corp., Dr. Eng.

*2 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

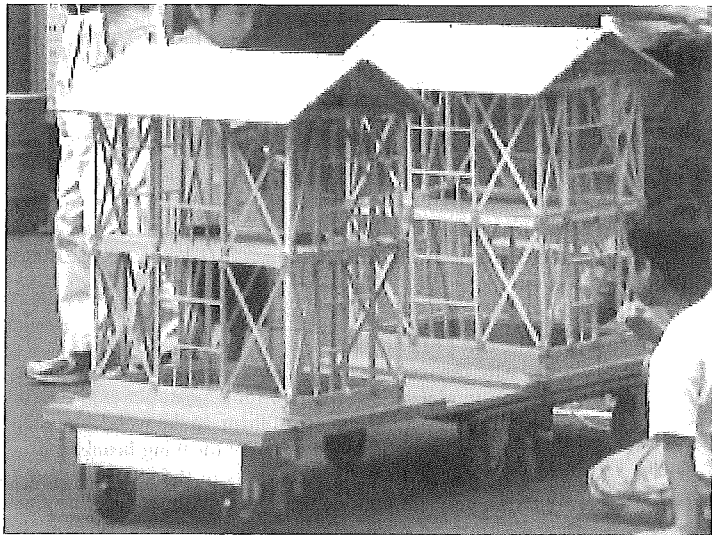


写真1 既開発の倒壊型の木造住宅模型

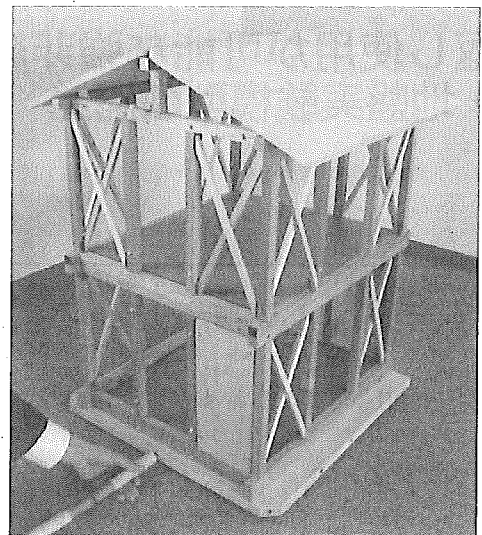


写真2 今回開発の倒壊型模型「ピノキオぶるる」



写真3 既開発の非倒壊型の木造住宅模型

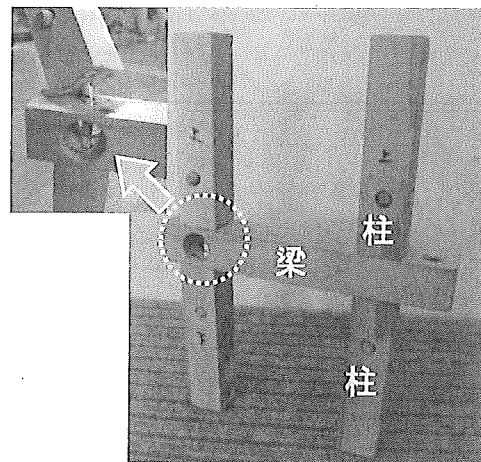


写真4 「ピノキオぶるる」柱梁接合部

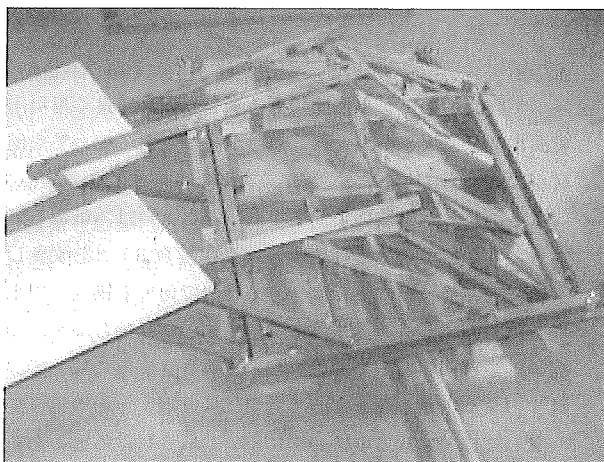


写真5 「ピノキオぶるる」倒壊の様子

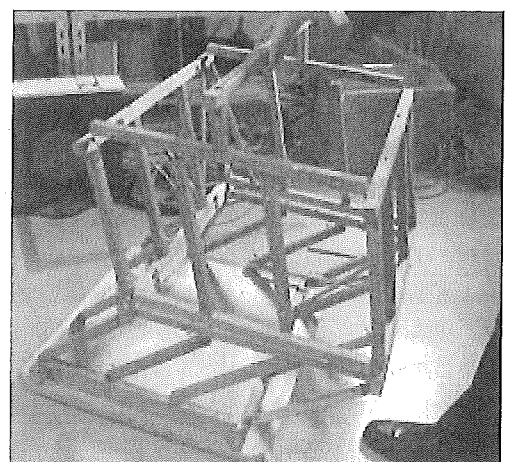


写真6 「ピノキオぶるる」再組立の様子

巧みに利用した仕組により、建物模型を容易に倒壊させ得る一方で、実験後の再組立に要する時間と手間を、大幅に減らすことが出来た。

倒壊時および再組立時の状況を写真5と写真6に示す。再組立は写真6に示すように、模型屋根部の棟木部分を取手にして持ち上げるだけで極めて容易に行える。この様子が、まるで操り人形の操作

に似ていることから、本模型を「ピノキオぶるる」と命名している。

2.2 実験方法

実験は、前述した写真1の倒壊型模型や写真3の非倒壊型模型と異なり、模型の台座部を直接加振する方法で行う。加振は、建物の桁行・梁間方向に加え45度方向からも可能で、これにより、耐震要

索のバランス良い配置について、様々な加振角度で実験出来るとともに、建物の重心・剛心・ねじれ振動といった概念も併せて学べる。

建物模型内に配置する耐震要素（筋交い、耐震壁）を建物本体に取り付ける方法には、マジックテープを用いた。これは、耐震要素に期待される粘りを表現するためである。実際、耐震要素をバランス良く配置した場合は、建物を大きく加振しても倒壊には至らない。

また屋根材については、板厚が厚く重い屋根と、板厚が薄く軽い屋根の2種類を用意した。屋根の重さによる揺れ方・壊れ方の違いを通して、屋根を軽くすることが耐震上重要である点を説明出来る。

3. 液状化模型

3.1 模型の概要

液状化とは、地震における地盤災害の一つで、地下水位の高い緩く堆積した砂地盤が、地震による振動で液体状になる現象をいう。液状化により、比重の大きい地上構造物が沈下・傾斜する一方で、マンホールや下水管など比重の小さい地中構造物が浮き上がるといった現象を生ずる。1964年の新潟地震において、多くの鉄筋コンクリート造の建物が傾斜するなど、液状化現象による被害が社会的に注目されて以来、多くの地震で液状化の被害が確認されている。冒頭で述べたように、地盤改良や杭基礎打設など行政側での液状化対策の推進のみならず、一般市民の側でも、地盤の液状化とその対策について正しい知識を持つことは、地震防災の観点から重要である。

この液状化現象を、現実には即して判り易く再現しようとする場合、現象を目で確認しながら理解する観点から、模型実験装置が有効である。しかし、従来の液状化現象の実験装置は、主に土木・土質工学分野の専門家向けに作られた、大型土槽による比較的大掛かりなものが殆どであった。最近になって、自治体の防災センターなどに、比較的小型で据置型の模型が展示されてきている^{例えば7),8)}が、一般市民にとって、より身近に液状化現象を観察する用途としては、前述の木造住宅倒壊模型と同様に、取り扱いが簡単で繰り返し使用が可能なことに加え、小型で可搬性を有する模型であることが好ましい。

今回開発した液状化模型（写真7）は、以上述べたコンセプトを踏まえて制作されたものである。模型の主な特長を以下に列挙する。

- ① 内部に砂利、砂、建物模型を収めたアクリル製水槽と振動台、水タンクなど全ての要素を一体化し、可搬性を確保した。また、本体に市販のポンプを接続すれば動作するので、扱いが簡単である。
- ② アクリル製水槽は二重化構造で、水を外側水槽と内側水槽との間で循環させる構造により、実験の都度水を注いだり抜いたりする必要がなく、長期に亘ってほぼメンテナンスフリーで使用出来る。
- ③ 内側水槽の水平断面積は、（外側水槽の水平断面積－内側水槽の水平断面積）とほぼ等しくなるよう設計されている。従って、二重水槽の内側と外側の水位が、原理的にほぼ同じ高さとなるため、地下水位の状態を、目視で確認しながら実験することが出来る。
- ④ 液状化しやすい緩く堆積した砂地盤の再現は、本体スイッチの手动操作によりポンプを作動させて砂を水槽下部から水で吹き上げ（フラッシング）、その後、フラッシングを止めて自然に沈降させる仕組とした。従来、この種の簡易な実験装置で液状化を再現しようとする、実験後に砂をかき回すなど、多くの時間と手間を要したが、今回開発の模型では、このポンプを利用したフラッシングにより、僅か1分程度の時間で簡単に再現が可能である。
- ⑤ 加振は、本体レバーの操作による手动方式としたので、液状化現象によって、杭のない建物が沈下し、マンホールが浮き上がるといった様子を、自分の目と手を働かせて観察することが出来る。

3.2 操作例

前節で述べた特長④、⑤の内容に基づき、液状化しやすい砂地盤の再現から加振、更に液状化の発生に至る、一連の模型の操作とそれに伴い生ずる現象の例を写真8に示す。写真8の実験では、左側から順に、（液状化で浮上する）マンホール、（液状化により沈下する）杭のない建物、（液状化しても沈下しない）杭基礎建物を配している。

4. むすび

以上、一般市民への地震防災意識の啓発を目的に、短時間で簡単に繰り返し実験が行える2つの強非線形建物・地盤実験模型（木造住宅倒壊模型、液状化模型）について、概要と実験・操作例を示した。

今回開発した模型は、いずれも取り扱いが容易であるため、大人はもとより未来を担う子供達にも、建物の倒壊や地盤の液状化といったなかなか理解しづらい現象を、自ら主体的に実験し楽しみながら学ぶことが出来る。何よりも、これまで再現が難しかった強非線形性の現象を再現可能にしたという点で、地震防災啓発をはじめ教育面からも大変価値があると考ええる。これらの模型は、既に多くの防災啓発イベントなどで使用し（写真9）、地震対策の重要性を広く市民が理解する上で、非常に役立つという感触を得ることが出来た。

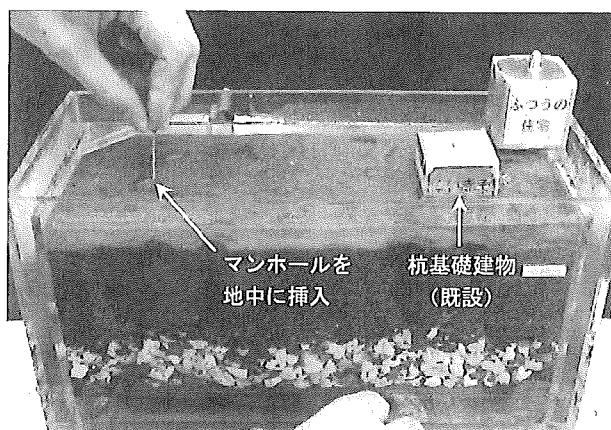
今後これらの模型を、木造住宅の耐震化や地盤の液状化対策の重要性を伝えるためのツールとして、普及展開を図りたく考えている。

謝 辞

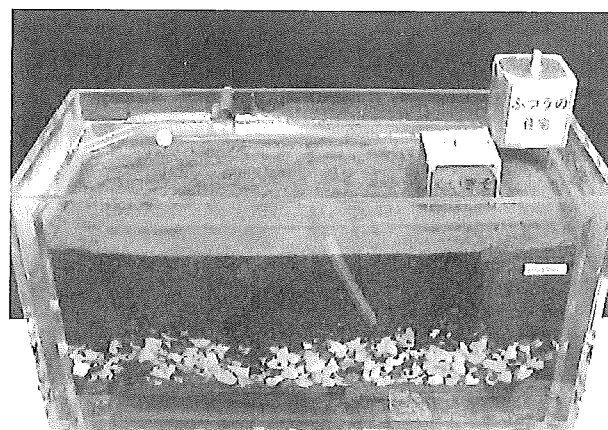
小倉公雄氏には、本開発の基本構想から模型試作・製作指導に至るまで、全面的に御支援を賜りました。元応用地震計測(株)社長の佐竹昭弘氏、元応用地震計測(株)専務の原徹夫氏、応用地震計測(株)専務の梶原透氏、同開発部副部長の小出栄治氏には、一連の「ぶるる」シリーズ開発において多くの御指導・御支援を頂きました。元



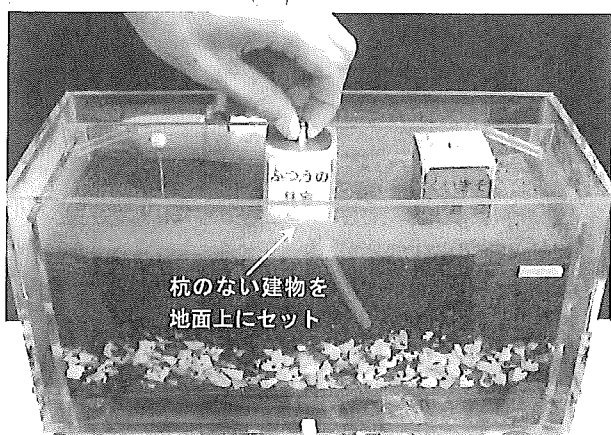
写真7 今回開発の液状化模型



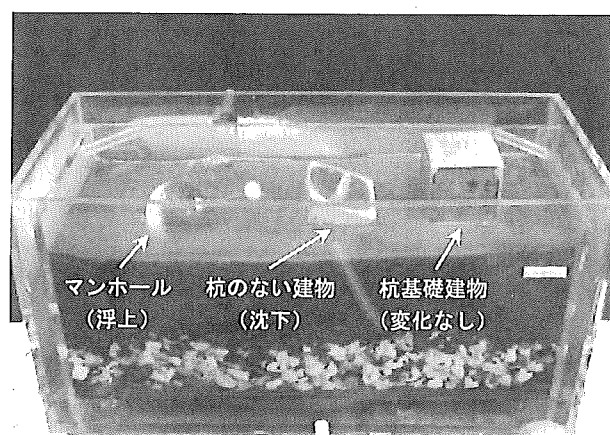
① 砂を水槽下部から水で吹き上げる（フラッシング）。この間に、マンホールを地中に挿入する。



② フラッシングを止め、水位の低下を待つ。



③ 水位が地面より僅かに下がった所で水位低下をストップさせ、杭のない建物を地面上にセットする。



④ 振動台を動かす。加速度が小さいと液状化を生じないが、加速度が大きくなると、写真の様に液状化を生ずる。

写真8 液状化模型の操作例



写真9 「ピノキオぶる」の防災啓発イベントでの使用の様子
(2007年10月21日、みらいこくど新技術フェア[さいたま市]にて)

応用地震計測(株)開発部副部長の飯沼博幸氏、応用地震計測(株)技術管理部の小林幸貴氏、同開発部の牛木章氏には、模型製作や図面化作業などで御協力を頂きました。以上ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐武直紀, 小出栄治: 建物耐震化と防災意識啓発のための木造倒壊実験教材の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), B-2 分冊, pp.629~630, 2007.8
- 2) 小出栄治, 佐武直紀: 建物耐震化啓発のための繰返し実験用木造住宅倒壊模型, 日本地震工学会・大会-2008 梗概集, pp.180~181, 2008.11
- 3) 佐武直紀, 飯沼博幸, 梶原透, 福和伸夫: 地震防災啓発のための小型簡易液状化模型の開発, 日本地震工学会・大会-2009 梗概集, pp.240~241, 2009.11
- 4) 福和伸夫, 花井勉, 石井渉, 鶴田庸介, 倉田和己, 小出栄治: 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11巻第22号, pp.99~102, 2005.12
- 5) 福和伸夫, 佐武直紀, 原徹夫, 太田賢治, 飯沼博幸, 鶴田庸介, 飛田潤: 長周期構造物の応答を再現するロングストローク簡易振動台の開発, 日本建築学会技術報告集, 第13巻第25号, pp.55~58, 2007.6
- 6) 佐武直紀, 福和伸夫, 原徹夫, 太田賢治, 飯沼博幸: 地震防災教育のための津波実験装置の開発, 日本建築学会技術報告集, 第15巻第29号, pp.321~324, 2009.2
- 7) 岡崎市防災展示コーナーHP: <http://www.city.okazaki.aichi.jp/menu1698.html>
- 8) 新城市防災学習ホール HP: <http://bosaihall.jp>

[2009年10月20日原稿受理 2009年12月4日採用決定]