

携帯手回し振動台「ぶるる」の開発

DEVELOPMENT OF HAND ROTATING MOBILE SHAKING TABLE 'BURURU'

福和 伸夫——*1 原 徹夫——*2
小出 栄治——*3 生田 領野——*4

Nobuo FUKUWA Tetsuo HARA
Eiji KOIDE Ryoya IKUTA

キーワード

振動台、模型実験、免震、液状化、動的相互作用、家具の転倒

Keywords:

Shaking table, Model experiment, Base isolation, Liquefaction, Soil structure interaction, Tumble down of furniture

The mobile shaking table named BURURU is developed for the use of teaching dynamics in classroom. The shaking table and many kinds of experiment models are packed in a suitcase. The weight of case is about 10 kg. BURURU uses the mechanism to transform the rotational movement to translational movement. The table vibrates harmonically when rotating the handle in front of the case. The prepared experimental models are the lumped mass model, two story frame structure where the roof, walls and braces are easily put on and taken off, the base isolation system, the tuned mass and liquid damper, the friction damper, the soft soil model and the liquefaction soil model. The students easily understand the dynamic phenomena of structure and soil through the combination of formulation, graph, animation of simulation analysis and the experiments using BURURU.

1. はじめに

昨今の地震関連報道の増加から、一般市民の地震に関する関心が高まり、建物の地震時挙動について分かりやすく説明することが、建築技術者に望まれている。特に性能設計においては、建築技術者が建築主に建物の地震時の挙動を説明し、耐震性能を合意することが、設計の基本となる。一方、兵庫県南部地震における地震被害の経験や、建築基準法の改正などが契機となって、振動教育の重要性が強く認識され、大学教育における振動教育の充実や、建築構造技術者に対する再教育などのニーズが高まってきている。しかし、学生気質の変化や、振動論のとっつきにくさ、社会人になってからの基礎的学習に対する抵抗感などから、従前のスタイルでの振動教育には限界が感じられる。

一般の構造力学の場合には、主として静的現象を取り扱うので、力の流れや変形性状を式やグラフ・変形図から感覚的に理解しやすいが、振動現象は、時間変動を伴う動的な現象であるため、数式やグラフのみでは感覚的な理解が難しい。このため、動的現象を目や体で感じる必要がある。コンピュータグラフィックス(CG)を用いたシミュレーション映像による教育も考えられるが、CG時代の学生にとっては、アニメーションは仮想空間のものと捉えられ、今ひとつ効果が少ないようである。筆者の一人も10年余り振動教育を担う中で、下敷きを使った単純な倒立振り子での揺れの実演が思いのほか効果的であることを実感してきた。

このため、良い振動教育用実験教材をずっと探してきた。市販の小型電磁式振動台も購入したが、重量がかさみ、携帯して講義に利

用するには至らなかった。また、電磁式やモータ駆動型の振動台は、勝手に動くため体感に乏しく、振動の実感という意味では、効果が不十分であった。そこで、手動かつ携帯式の振動台を試作した。その後、約半年間、大学・大学院での講義、構造技術者向けの連続講義、一般向けの講演会などで数十回利用してきた。本論では、振動台の概要及びその利用方法について報告する。

ここで紹介するのは、教室などに携帯し、演台の上で振動実験を簡単に実演できる手動の携帯型振動台である。この振動台は、各種の振動実験模型と一緒にトランクケースに内蔵しており、回転運動を並進運動に変換する機構を用いている。教材の普及のためには、ネーミングも重要であると考え、親しみやすさと、揺れを連想できることから、「ぶるる」と名づけた。「ぶるる」の名前は、携帯型手回し振動台を意味する「運ぶ」「回る」「揺れる」から来ている。「ぶるる」により、以下の成果が期待できると考えられる。

大学・高等などでの振動教育における教育効果の向上：近年の学生は、重要性を実感しないと学習意欲が出ないようである。「ぶるる」の利用により、理論・グラフと実際の揺れを対比させることにより、振動現象を体感させ、建築物の設計における振動挙動の重要性を理解させる。特に、共振実験や自由振動実験を通して、共振(固有振動数)や減衰の大事さ、応答スペクトル、振動モードの概念を学修させる。また、地震被害を受けやすい建物の特徴や、免震・制震の原理、地盤との動的相互作用、液状化なども体験学習させる。

構造技術者の動的な耐震設計法への理解の促進：耐震設計の基

*1 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 教授 工博
(〒464-8604 名古屋市千種区不老町)

*2 応用地震計測(株) 常務取締役 理学

*3 応用地震計測(株) 工修

*4 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻 大学院生 理修

*1 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, D. Eng.

*2 Oyo Seismic Instrumentation Inc., B. Sci.

*3 Oyo Seismic Instrumentation Inc., M. Eng.

*4 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, M. Sci.

本が振動応答にあることを実感させることが第一義と考え、建物の振動応答の基本的な性質、地盤との動的相互作用の重要性、免震設計の基本原則と設計時の注意事項などを、振動実験を通して実感させる。とくに、限界耐力計算法で導入された応答スペクトルと、固有振動数・固有モード・減衰の関係、動的相互作用の概念の理解に役立てる。

建築主と設計者との耐震性能合意のための支援：性能設計の基本である性能合意のため、建築主に建物の地震時の揺れ方を分かりやすく説明する材料とする。特に、バランスよい剛性の配置の重要性を理解してもらう。また、免震や制震の有効性を実証し、これらの普及を促す。

市民の防災意識啓発のための道具の提供：中央防災会議による東海地震の地震防災対策強化地域の見直しや、政府の地震調査研究推進本部による活断層などの長期評価結果の公表に伴い、一般市民の地震に対する関心が急に高まった。「ぶるる」を用いて、建物の揺れ方を実演することにより、過去の地震で被害を生じた建物の特徴を分かりやすく解説し、市民の防災意識啓発を行う。また、市民が自宅の建物の特徴を理解し、適切な耐震改修を行うことを促し、防災対策に繋げる。

2. 振動台機構と実験模型部品

携帯手回し振動台「ぶるる」は、図 1(a)～(c)に示すように、携帯性の良いアルミ製トランクケース内に模型部品と共に納められている。重量は約 10 キロであり、ケース前面の着脱式ハンドルを回転させることによりテーブルを振動させる。

振動台は、35 cm × 18 cm の大きさであり、図 1(d)のような外観と、図 2 に示す平面・立面をしている。ここでは、回転運動を並進運動に変換する機構を利用している。振動台は一定変位振幅で加振し、加振振幅は 0.5cm と 1.5cm に可変である。振動台の加振振動数は、ハンドルの回転速度により調節する。幅広い振動数での加振を可能にするため、途中に歯車を入れることにより 3 倍速での加振も可能にしている。自分の手でハンドルを回すことにより振動台を揺るので、電動式の振動台では味わえない揺れや振動数の体感が可能である。

実験用模型は、図 1(b)～(c)に示すように、全てケース内の内箱に収納されている。模型部品の一覧は表 1 に示す通りである。模型としては、重さ・錘高さ・質点数が可変の板バネ式の倒立振り子（質点系モデルを模擬）、屋根・耐震壁・ブレース（輪ゴムと割り箸）を着脱可能な板バネで構成した 2 階建フレームモデル、各種の免震装置・制震装置、液化化実験用地盤及び構造物模型、ゲルを用いた軟弱地盤模型、家具模型などが用意してある。

これらの模型は、蝶ネジ若しくは粘着樹脂シートにより振動台に固定できる。振動実験状況は図 1(d)～(e)に示す通りであり、同時に複数の模型を載せて実験を実施することにより、構造特性の違いによる振動挙動の差異を実感できる。

3. 主な実験メニューと振動教育での利用法

「ぶるる」は、学部レベルにおける 1 質点系の振動論の初歩的講義、大学院レベルにおける振動モードや地盤との動的相互作用などのやや進んだ講義、技術者を対象とする免震・制震システムの講義

など多面的に振動教育に役立てることができる。以下には、図 3 に示す実験メニューを参照しながら教材としての利用方法を説明する。

1) 質点系の振動

図 3(a)に示すように、振り子の高さや、重さを変化させることにより、固有周期（振動数）と剛性・質量の関係を学ぶ。また、マグネットシートを貼付することにより摩擦減衰を付与し、減衰の大小による振動の減衰の仕方の違いを学ぶ。自由振動実験と共振実験を用いて、固有振動数と減衰を実感し、共振時の減衰付与の重要性を学修する。また、固有周期の異なる 3 つの振り子を同時に加振することにより、応答スペクトルの概念を体得する。さらに、2 質点モデルから高次モード形の振動を実感したり、2 質点の 1 次モード形に等価な 1 質点モデルへの置換や、2 階建フレームの 2 質点モデルへの置換の妥当性を学ぶ。これにより、モデリングの基礎や、モード合成法の概念を身につける。

2) フレームの振動

図 3(b)に示すように、2 階建てのフレーム模型を用いて、フレームモデルの振動実験を行う。屋根の存在による周期の伸びと慣性力の増大効果や、屋根の付加質量置換の妥当性などについて実験的に示す。また、壁式構造とラーメン構造の振動挙動の違いや、壁の偏在によるピロティ建築の 1 階部への変形集中、割り箸や輪ゴムによるブレースの剛性効果、ブレース剛性による応答性状の差などを実験により明らかにし、耐震部材のバランス良い配置の大事さを学ぶ。さらに、耐震壁やブレースの付加による耐震改修効果についても学修する。

3) 免震構造の振動

図 3(c)に示すように、在来建築と免震建築の揺れの違いを実験的に示すことにより、免震の原理を修得させる。免震装置としては、ローラー（ベアリング）支承を基本とし、輪ゴムを利用した復元材との組み合わせ（積層ゴム支承を想定し、建物質量とゴム剛性による周期を付与）、円弧状の凹面を持つ皿を用いた免震装置（FPS を想定、円弧滑り皿の曲率半径による周期を付与）、直線勾配の皿を用いた免震装置（摩擦力と勾配復元力を利用した装置、特定周期を持たないのが特徴）を準備している。

各免震装置の原理と特徴を振動実験を通して学ぶと共に、在来工法との建物の揺れの違いや家具転倒の軽減効果を体感する。さらに、上部構造の剛性不足による免震効果の減少や、の免震システムにおける長周期地震動との共振の懸念、のシステムにおける上部構造重量変化による周期の変化など、免震建物の設計上の注意事項についても学修する。

4) 制震システム

図 3(d)に示すように、制震システムとして、制震壁（マグネットシートを用いた摩擦減衰の付与）、TMD（チューンドマスダンパー：小型の振り子を利用）や TLD（チューンドリキッドダンパー：小型の水槽を利用）などのパッシブ制震装置を準備している。後 2 者については、固有周期を模型試験体と試行錯誤的に同調・変化させることにより、制震効果を確かめると共に、近接固有値問題特有の問題点を理解させる。



(a)運搬時



(b)模型部品収納状況



(c)収納模型部品一式



(d)振動台外観

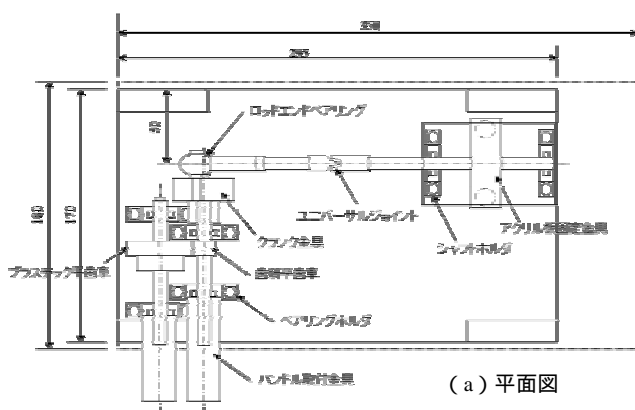


(e)質点モデルとフレームモデル

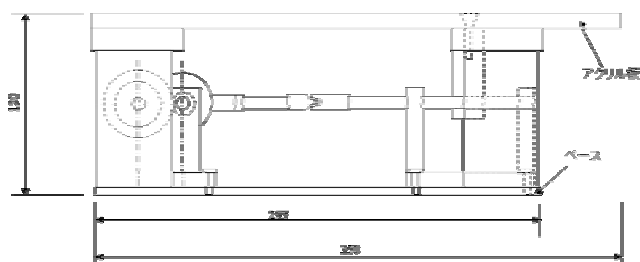


(f)フレームモデルの壁の有無

図1 携帯手回し振動台「ぶるる」の外観



(a) 平面図



(b) 立面図

図2 振動台部分の平面図と立面図

5) 地盤との動的相互作用

図 3(e)に示すように、極めて剛性の小さい ゲルで作った地盤模型を用いて、建物と地盤との動的相互作用について学修する。振動台に直接固定した倒立振子と、地盤模型上に直交して設置した 2 つの倒立振子を同時に加振することにより、3 者の振動モードの違いを実感する。特に、軟弱地盤上の剛性の高い建物では、スウェイとロックングが支配的であり、弾性変形成分が抑制されることを学ぶ。

6) 地盤の液状化

図 3(f)に示すように、同一径のガラスビーズを入れた容器（均等な緩い砂地盤を想定）に水を注入し、振動を与えることにより液状化を再現する。液状化時の水の浮上や、土の締め固めによる液状化抑止効果を実感すると共に、異なる重さの建物の転倒挙動の違い、軽量埋設構造物の浮上、液状化地盤にお

表 1 実験模型部品の一覧

構成部品	寸法	重量	数量	
倒立振り子バネ	t0.25×50(W)×250(H)mm	-	3	
錘(25g)	60(W)×12(D)×12(H)mm	25g	2	
錘(50g)	60(W)×17(D)×17(H)mm	50g	3	
錘(90g)	60(W)×14(D)×14(H)mm	90g	1	
2階建てフレーム	150(W)×50(D)×250(H)mm	-	2	
屋根	170(W)×50(D)×65(H)mm	170g	2	
耐震壁	147(W)×30(D)×123(H)mm	-	2	
輪ゴム	-	-	複数	制振ブレース・免震復元材
筋交い	-	-	複数	割り箸
マグネットシート	50×100mm	-	8	付加減衰材
周期調整用錘	30×15(H)mm	85g	4	
免震ローラ	150(W)×50(D)×18(H)mm	-	1	
免震用外枠	208(W)×62(D)×20(H)mm	-	1	
免震ローラ	150(W)×50(D)×18(H)mm	-	1	
免震用外枠	208(W)×62(D)×20(H)mm	-	1	
免震受台(曲率型)	60(W)×60(D)×10(H)mm	-	1	
免震受台(斜面型)	60(W)×60(D)×10(H)mm	-	1	
ガラスビーズ	0.4mm	-	1	液状化地盤材料
液状化地盤容器	150(W)×60(D)×80(H)mm	-	1	固定用金具を含む
建物模型(杭基礎)	20×32.5(H)mm	-	1	
建物模型(直接基礎)	20×32.5(H)mm	-	1	
建物模型(軽量)	20×32.5(H)mm	-	1	
地下埋設管模型	18×40mm	-	1	
地盤模型	240(W)×120(D)×30(H)mm	-	1	ゲル
家具模型	各種	-	複数	消しゴム

る杭支持の

重要性、など液状化時の建物挙動の違いも学修する。

7) 家具の転倒

様々な形状比の家具の振動実験を行うことにより、家具の形状、大きさ、設置方法（摩擦の有無、固定法、2 段積みなど）による転倒状況の違いを実感する。また、2 階建てフレームモデルを用いて、上階での揺れの増幅による転倒危険性の増大、免震化による家具転倒の軽減効果などを学ぶ。

4. おわりに

本論では、携帯手回し振動台「ぶるる」の開発経緯、振動台の基本的な機構、用意した模型部品と実験メニュー、振動教育における利用法について紹介した。「ぶるる」の基本アイデアは、筆者の一人が大学祭で試作・展示した簡易な模型にある。その後、半年間かけて具体的な教材化を進めた。「ぶるる」試作後、約半年間、学部での講義、構造系大学院生の講義、構造技術者向けの連続講義、専門家、行政マン、マスメディアの記者、一般市民などを対象とする講義・講演会など、既に数十回の利用実績がある。一見して建物の揺れが分かることから、スタジオ撮りなども含め、TVでの実演にも数多く使われてきた。今までの利用の中では、「本当

に良く分かる」、学生からは「初めて共振と減衰の大事さが分かった」、技術者からは「相互作用の大事さが分かった」、技術者・市民からは「免震の意味が良く分かった」、市民からは「ビロッチェの問題点が良く分かった」「液状化現象を初めて見た」といった意見が聞かれた。既に卒業した OB からは、「こんな実験装置を使って講義してくれていたら、凄く違っていたのに」と言った反応をいただいている。押し並べて、教材の効果は大きいように感じられる。「ぶるる」を利用した講演会の受講者から、他の講演を依頼されることも多々有る。最近では、住宅フェアなどでの展示や、静岡の小学校での防災教室での利用も始まっており、振動教材としての利用に加え、防災意識啓発の道具として使われ始めている。

今後は、より効果的な実験模型を開発して教育効果を高めると共に、「ぶるる」普及のための低価格化の努力、モータ駆動制御やセンシング機能の追加による机上実験道具への進化などに取り組む予定である。また、現状、地盤の振動増幅効果についての良い実験模型が準備できていないので、試作検討を進めていく予定である。

謝辞

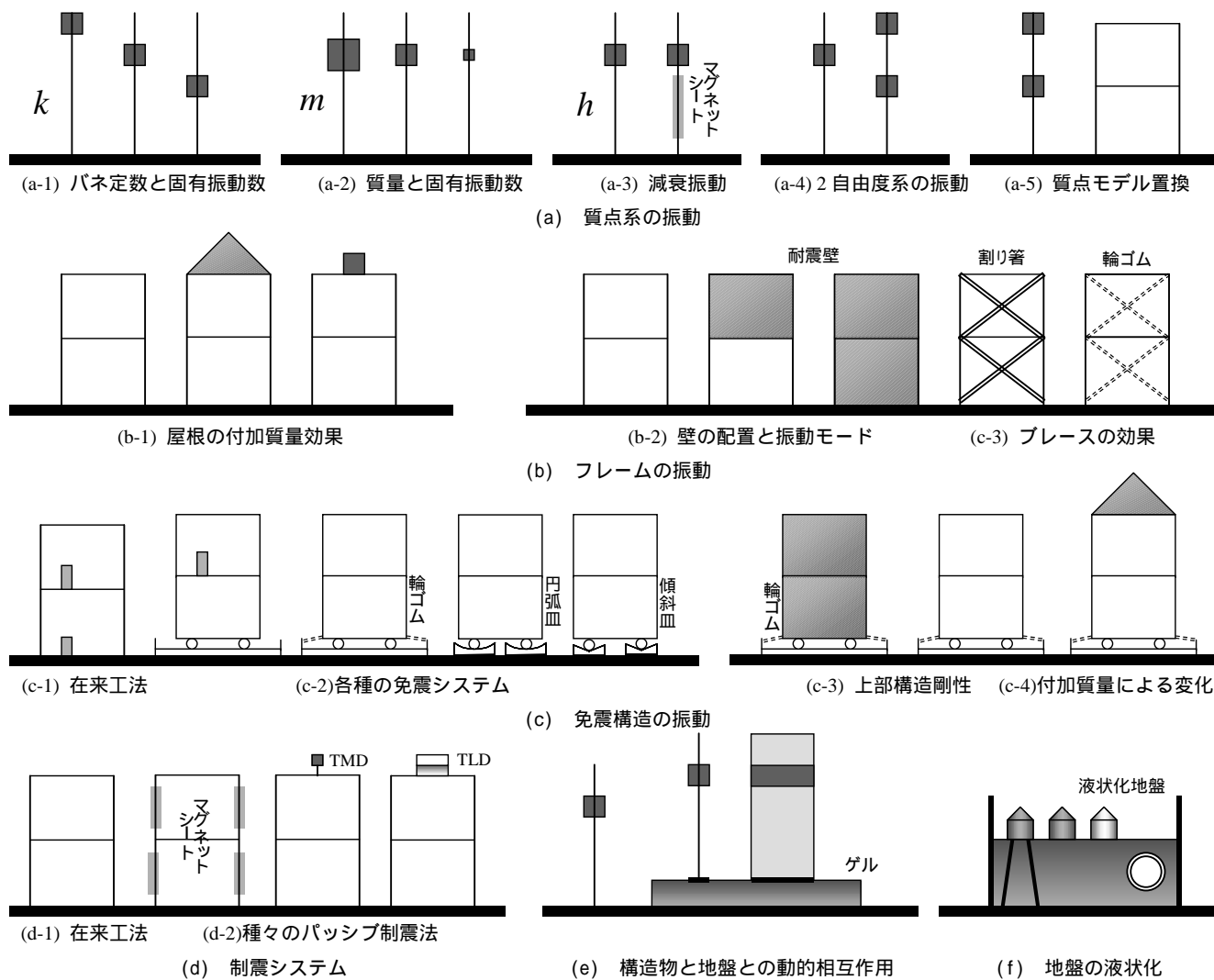


図3 種々の振動実験と振動教育メニュー

「ぶるる」の製作に当たっては、川口エース工業の鈴木勝久氏
にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。