

揺れに対する感覚的理解を支援する 卓上振動実験装置の開発

辻原 治¹・中谷優一²・山村 猛³

¹和歌山工業高等専門学校教授
(〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77)

E-mail:tsujihara@wakayama-nct.ac.jp

²和歌山工業高等専門学校 (〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77)

³エスシー企画株式会社 (〒770-0021 徳島市佐古六番町5-29)

地震による揺れの強さは震度や加速度で表される。しかし、揺れの大きさに対する感覚がないものにとってはリアリティーがない。揺れに対する感覚的な理解は防災教育に対する興味や関心を引く上で重要な役割を果たす。

本研究では、利用者自身が振動台を手動で操作し、振動台の揺れと震度や加速度等との関係やフーリエスペクトルについての感覚的な理解を支援する卓上振動実験教材を開発した。振動台と建物模型に設置されたセンサーで観測された加速度記録はリアルタイムで処理され、波形、最大加速度、震度、フーリエスペクトル等が表示される。また、テキスト出力されたデータを用いることで、振動工学等の座学において、理論の検証に利用できる。

Key Words : vibration, instinctive understading, experimental device, teaching material

1. はじめに

東日本大震災を契機に、継続的な防災教育の重要性が強く認識され、小・中学校でも地震や津波に関する正しい理解と災害時の対応に関する教育が始まっている。地震による揺れの強さは震度や加速度等で表される。しかし、揺れに対する感覚がない者にとってはリアリティーがない。感覚的な理解は防災教育に対する興味や関心を引く上で重要な役割を果たすと考えられる。このことは、小・中学生のみならず、高専や大学の学生への教育についても同様である。

高専や大学における振動工学や耐震工学等の授業においては、教育の柱の一つに地震による地盤と構造物の振動に対する理解がある。振動の問題は一般物理でも扱われるが、専門においては静力学として構造力学を学習した後、構造動力学として高学年で扱われる。また、運動方程式を解くために微分方程式の解法や、地震動のスペクトル解析を行うためのフーリエ変換等の数学の知識が必要になる場合があり、苦手意識を持つ学生が多い。

授業の中で適宜実験を行うことで振動に対する理

解が深まる。しかし、振動台の設備を有している場合でも、研究目的で導入していることが多く、また実験室のスペースの問題もあって、授業で頻繁に利用するのはあまり現実的ではない。さらに、振動実験で得られた加速度データ等はデータロガー等に一旦保存され、オフラインで処理されるのが一般的であり、現象の理解と揺れの大きさの定量的な評価が同時に行える環境にはない場合が多い。

一方、卓上で使用できる振動実験教材としては、各種「ぶるる」シリーズ¹⁾等がある。しかし、模型等の振動のようすを単に見せるのみならず、振動の波形やフーリエスペクトルおよび計測震度等がリアルタイムで表示され、また、その時に得られたデータが振動工学や耐震工学等の授業で学習する理論の検証にも利用できるような教材は見当たらない。

本研究では利用者自身が振動台を任意に動かすことで、揺れの大きさと地震動の指標（震度や加速度等）の関係やフーリエスペクトルとは何か等について等感覚的に理解を支援することができ、かつ振動工学や耐震工学等の座学において、理論の検証や演習に利用できる教育教材としての振動実験装置の開発を目的とした。

2. 教材の概要

2. 1 ハードウェア

装置の構成は、手動のポータブル振動台、建物模型、加速度計、LED 表示器および PC 等からなる。構成図を図-1 に示す。

振動工学等の座学においては、一般に 1 自由度系の自由振動からはじまり、減衰自由振動、強制振動といった流れで授業が展開される。そこでは図-2 に示すようなせん断型 1 自由度系モデルがよく用いられるため、建物模型として図-1 に示すようなモデルとした。図-2 における m 、 c 、 k はそれぞれ質量、減衰係数、ばね定数を表す。

振動台には図-3 に示すように縦横が 30cm で厚みが 5cm の棚板を用い、その底面にキャスターを 4 個、側面 2 箇所に取り手を付けた。取手を持って振動台を揺らすといった単純な構造である。建物模型は図-4 に示すように、厚さ 1mm のアルミ板をカットして作成しており、高さ×幅×奥行きは 25cm×20cm×6cm である。振動台とはボルト・ナットで結合する。

加速度センサとしては株式会社数理計画研究所の GDI-SSS²⁾ を利用しており、XYZ3 軸それぞれ $\pm 1.5G$ まで測定可能である。これは地震計として用いることが想定されていることから、センサとしてはサイズがやや大きい。しかし、建物模型を振動させるためには、梁部分に付加的に質量を加える必要があり、センサの重量を梁部分の重量の一部とみなすことができるため問題にはならない。センサで受信した加速度はインターフェース（株式会社数理計画研究所の GID-SSS/IF232³⁾）を介して PC に取り込まれる。

PC の画面に振動台および建物模型の計測震度や加速度が表示される。しかし、加速度波形やフーリエスペクトルも同時に表示されたため、一定時間間隔（例えば 3 秒：任意に設定できる）毎に更新される計測震度や加速度値を画面表示の中で確認するのは容易ではない。利用した学生から、そのような指摘があり、視認性の高い表示器を作成することとした。図-5 に示すように、アルミ板に孔をあけ、背面か

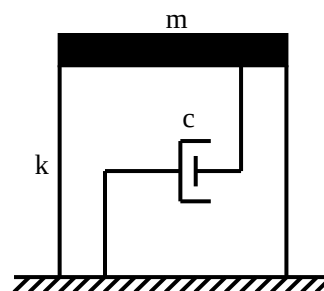


図-2 せん断型 1 自由度系モデル

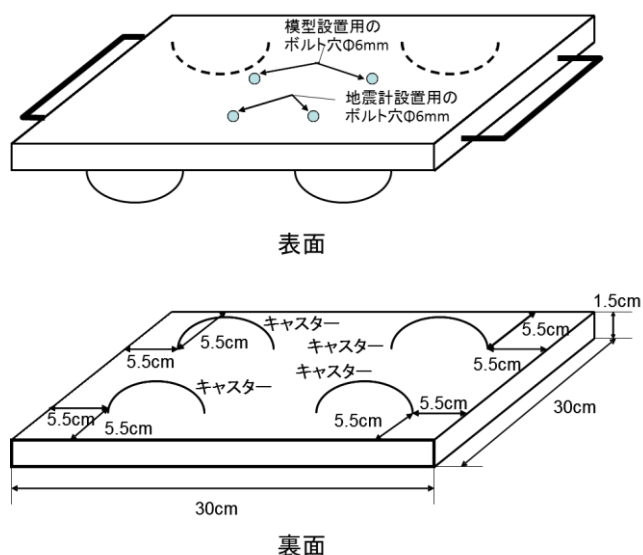


図-3 振動台

ら写真-1 に示すフルカラーLED⁴⁾を取り付ける。LED の背面は図-6 に示すように、RGB の各色と電源に対応する 4 つの端子があり、それぞれにコードをハンダ付けして、コードの他端をコネクタを介して制御基盤に接続する。LED 振動表示器を写真-2 に示す。センサで計測され、PC に取り込まれた加速度値を一定時間間隔ごとに処理し、計測震度や最大加速度を求め、32 個の LED に対してそれぞれ相当する色の情報に変換して送信する。表示例を写真-3 に示

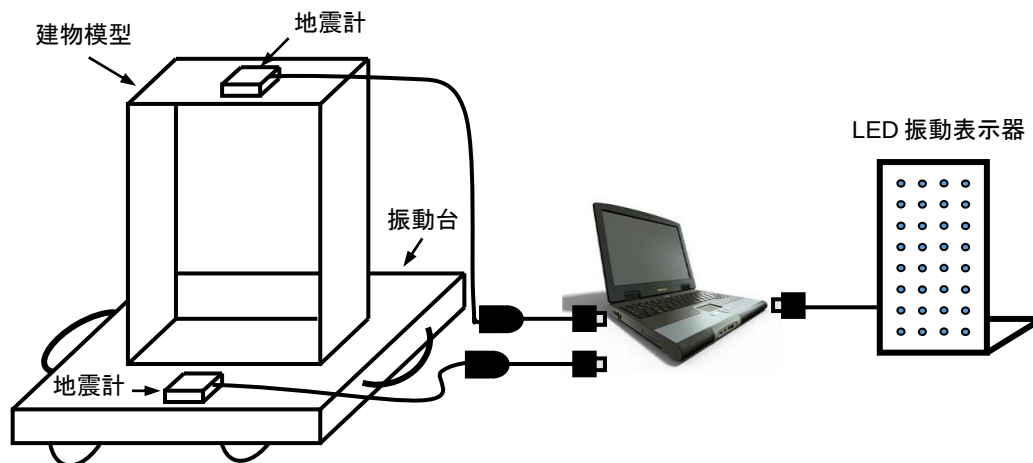


図-1 教材の構成図

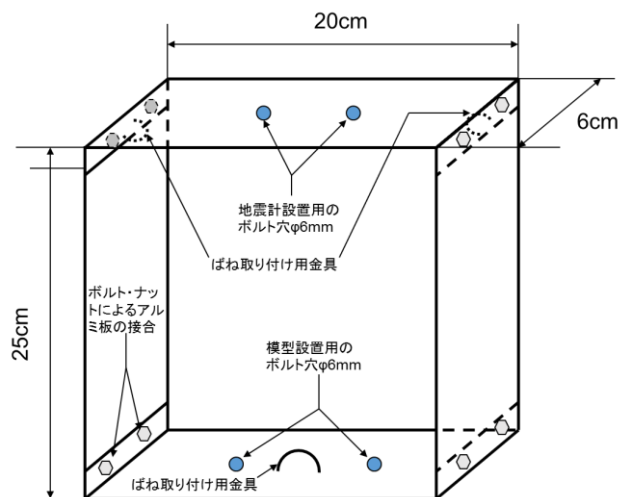


図-4 建物模型

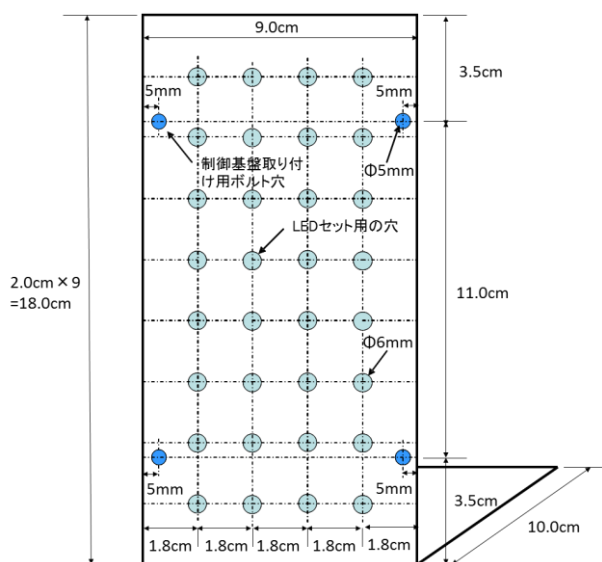


図-5 LED 振動表示器

す。写真の(a)は計測震度を表示するための数字の例である。(b)は建物模型と振動台の最大加速度を比較する際に利用され、左側2列(緑色)と右側2列(青色)のLEDがそれぞれ建物模型と振動台の加速度レベルを表す。加速度レベルのスケージングは任意に設定することができる。

完成した実験装置を写真-4に示す。

2. 2 ソフトウェア

ソフトウェアはつぎの機能からなる。

- 1) 建物模型と振動台に取り付けられた2つの加速度計で観測されたデータの取り込み
- 2) 取り込んだ合計6成分の加速度値の波形表示と指定された時間間隔毎の計測震度およびフーリエスペクトルの計算とPC画面上でのリアルタイム表示



写真-1 フルカラーLED

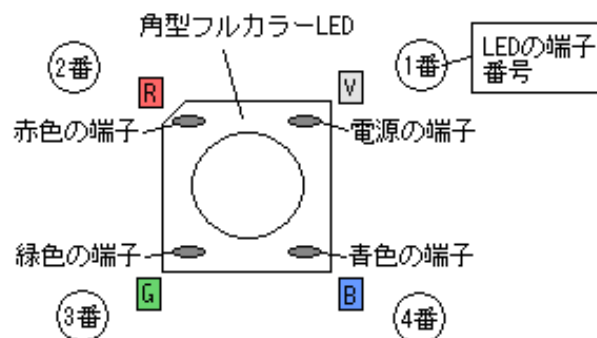
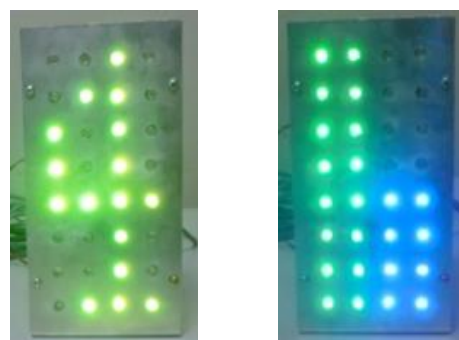


図-6 フルカラーLEDの端子



写真-2 LED 振動表示器の背面



(a) 計測震度4の表示

(b) 最大加速度の比較表示

写真-3 LED 振動表示器による表示例

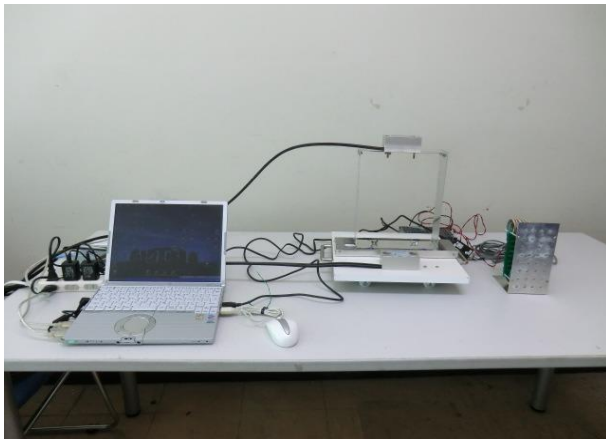


写真-4 振動実験装置

3) 指定された時間間隔毎の計測震度や最大加速度の LED 振動表示器への出力

プログラムの開発に用いた言語は Microsoft Visual Basic 6.0 である。MSComm コントロールを使用することで、シリアルポートを経由したデータの送受信が可能となる。

加速度計からは各軸 100 サンプル/秒でデータを受信する。通信の仕様を表-1 に示す。受信した 3 成分のデータからオフセット値を差し引き、スケールリングファクターを乗じることで加速度値が得られる。図-7 に画面表示の例を示す。これは、振動台に建物模型をセットして、振動台を不規則に動かしたときの建物模型と振動台の加速度波形およびそれぞれのフーリエスペクトルを表す。表示させるセンサ

表-1 通信仕様

送受信		加速度の受信	LED への送信
通信方式		RS-422	RS-485
伝送速度		19.2kbps	500kbps
ビット構成	スタート	1bit	
	データ	8bit	
	パリティ	無し	
	ストップ	1bit	

と成分は選択可能で、ここではセンサ 1（建物模型）とセンサ 2（振動台）の X 方向（振動方向）成分が選択されている。計測震度とフーリエスペクトルの表示・非表示も選択できる。これらを表示する場合は、フーリエスペクトルのタイムウィンドウ(sec)のところで設定された時間毎に更新される。さらに、表示されている加速度波形における最大値および計測開始以降に記録された最大加速度も表示される。

つぎに、LED 振動表示器の制御について述べる。それぞれの LED には RGB を各 16 段階で指定することができ、最大 4096 色の表現が可能である。加速度計から受信したデータの解析および LED 振動表示器への送信が一つのプログラムで同時に処理される。

32 個の LED をそれぞれ任意のタイミングと色で発色させることができる。計測震度を表示する場合は 0~7 で表示される。同時に色でも識別できるように、0 の青色から 7 の赤色まで表示する数字の色

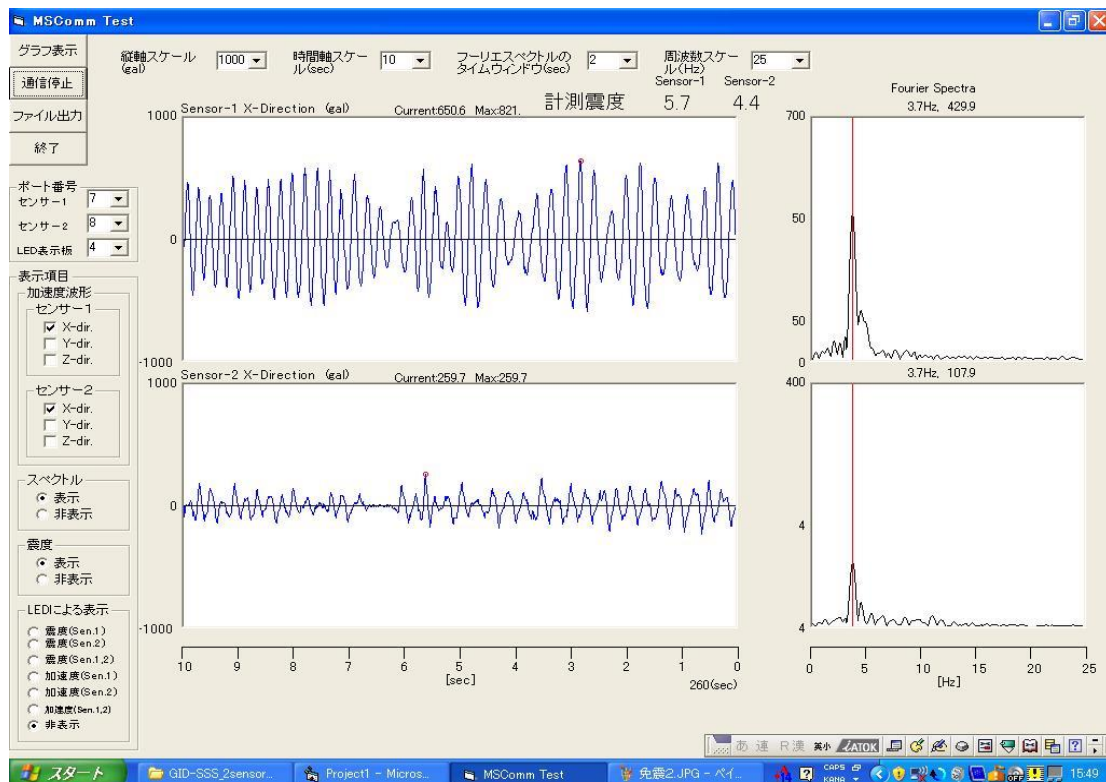


図-7 PC による画面表示の例

を変えている。加速度については、随時更新される1～4桁の数値を目で追うのは容易ではないことから、点灯しているLEDの段数（写真-3の(b)参照）で表すこととした。とくに、振動台と建物模型の加速度の大きさを比較するときには、揺れの相対的な違いがわかりやすく表示される。

3. 教材の利用

3. 1 振動台のみ

建物模型を取り付けずに、振動台のみを自由に振動させ、例えば1Gの振動とはどの程度の揺れか、震度3と7の違い等について、計測される震度や加速度から感覚的に理解することができる。最大加速度と震度は必ずしも対応するものではない。最大加速度はそれ程大きくなくても、震度を大きくするような揺れを試行錯誤で見つけ出させるような体験と、若干の解説によって、震度と加速度の違いについての理解を深めることもできる。実験のようすを写真-5に示す。

地震動や構造物の応答を分析するために、フーリエスペクトルがよく用いられる。しかし、これを理解させるのは容易ではない。フーリエ級数展開は、数学で既に学習しており、これを応用することの意義や意味を説明する教材としても利用できる。短周期と長周期の地震動の違いは、ほぼ一定の調子（周期）で、高速あるいは低速で振動台を揺らしたときに、PCの画面に表示されるフーリエスペクトルのピーク周波数の違いとして現れる。手動であっても、それぞれのフーリエスペクトルにはかなり明瞭なピークが現れる。つぎに、同じ周期で振動させても、振幅を変えることで、フーリエスペクトルのピークのレベルに差が出ることを確認する。このような実験を通じて、振動台の振動とフーリエスペクトルにおけるピークの周波数および振幅の関係がわかる。最後に、振動台を不規則に振動させた場合、フーリエスペクトルに複数の優位なピークが出現すること

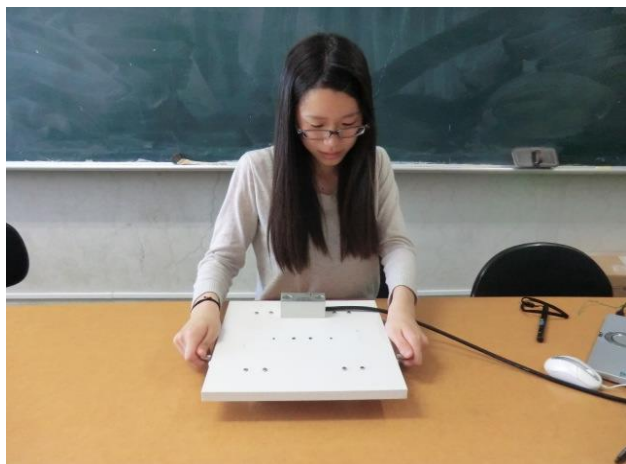


写真-5 振動台のみを用いた実験のようす

を確認すれば、それらが自分自身で発生させた振動に含まれる周波数の成分であることが理解できる。

3. 2 自由振動と固有周期および減衰定数

自由振動は振動の基本である。振動台に建物模型を取り付け、外乱を与えて模型を自由振動させる。

図-8に、建物模型の加速度波形とフーリエスペクトルを示す。フーリエスペクトルからは、そのピーク周波数より固有周期Tを知ることができる。建物模型に利用したアルミ板の寸法や材料定数がわかっているため、予めせん断型1自由度系として計算によって推定した図-2のkおよびmより得られる固有周期と比較する等の演習に用いることもできる。減衰係数cについては、材料や強度等がわかっているにもかかわらず計算できない。図-8の加速度波形は数値としてテキスト出力ができるため、マイクロソフトエクセルに取り込む等して式(1)を用いて減衰定数hを推定し、これよりcの値を求める演習にも使える。

$$\log_e \left| \frac{a_m}{a_{m+1}} \right| = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (1)$$

ここに、 a_m は時刻 t_m における振幅であり、 a_{m+1} は時刻 t_m+T における振幅である。建物模型の減衰の仕方を見て、その減衰定数を知ること、減衰に対する感覚を持つことに役立つ。本研究で用いた建物モデルでは、固有周期が0.196秒で減衰定数が0.008と同定された。

3. 3 強制振動と応答計算

振動台の取手を持って建物模型を強制的に振動させる。振動の周期によるが、建物模型の応答が振動台の加速度の数倍になることがLED振動表示器からわかる。また、建物模型の固有周期に近い周期で振動台を動かしたときに、共振することが模型の動き

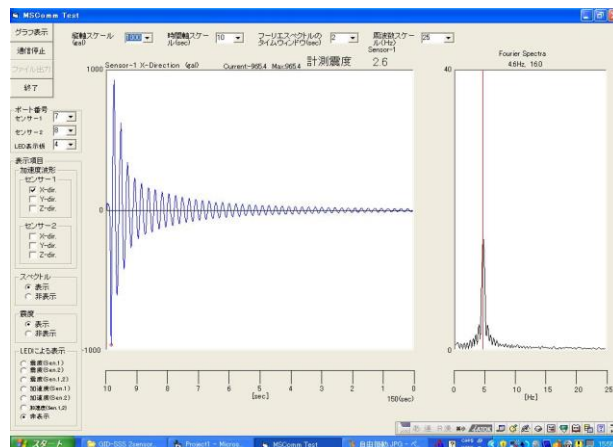


図-8 建物模型の自由振動波形およびフーリエスペクトルの表示

のみならず振動波形や LED 振動表示器から定量的に評価できる。

せん断型 1 自由度系の支点変位による強制振動の運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{y} + 2\lambda n \dot{y} + y = -\ddot{\phi} \quad (2)$$

ここに y , ϕ はそれぞれ質点と振動台の変位を表す。また, n , h はそれぞれ固有円振動数と減衰定数である。式(2)の数値計算による解法は各種提案されている。振動台の加速度と自由振動の実験から求めた固有周期 T ($\omega = 2\pi/T$) と減衰定数 h および強制振動の実験で得られた振動台の加速度記録を用いて式(2)を数値計算により解き, これと建物模型の加速度記録とを比較して示すことで, 応答計算による再現性を検討することも可能である。また, 実験による振動台と建物模型の振動の加速度記録を配布し, 課題として応答計算による再現性を検証させることもできる。図-9 に, 観測された振動台の加速度記録を入力として建物模型の応答計算を行い, 観測記録と比較した結果を示す。若干の差異はあるが, よく対応している。

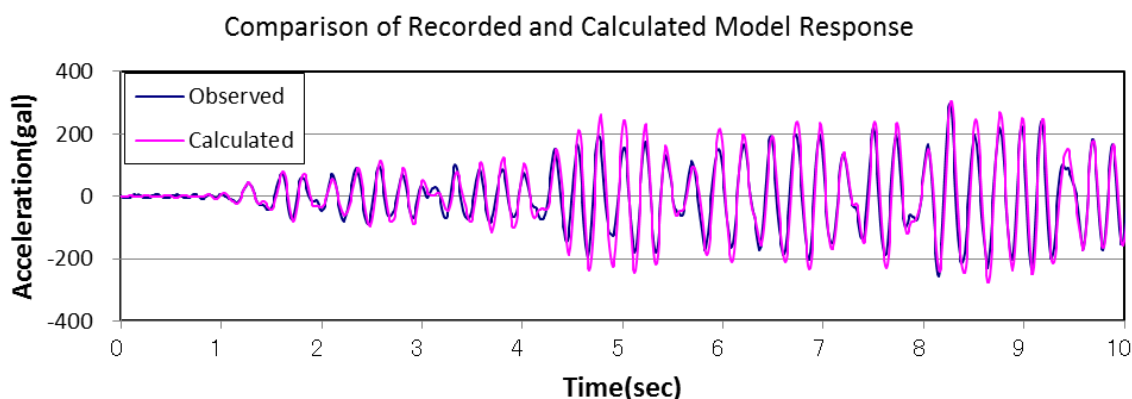
3. 4 耐震補強および免振

耐震補強や免振の効果を示すため, それぞれキットを用意した。耐震補強でよく目にするのは筋交いタイプであることから, 写真-6 に示すバネを用いた。バネ定数は 0.188N/mm のものを用いたが, バネを考慮した応答計算まで行うことは想定していない。免振については, 写真-7 および写真-8 に示すように, 振動台に取り付けた外枠の中に建物模型を取り付けた内枠をセットするものであり, 内枠の底面と側面にはそれぞれキャスターを取り付け, 外枠と内枠が直接接触ないようにしている。また, 外枠の振動方向の両端部にスポンジを配置している。免震キットを取り付けて振動実験を行ったときの PC による画面表示の例を図-10 に示す。免振についても応答計算は想定していない。

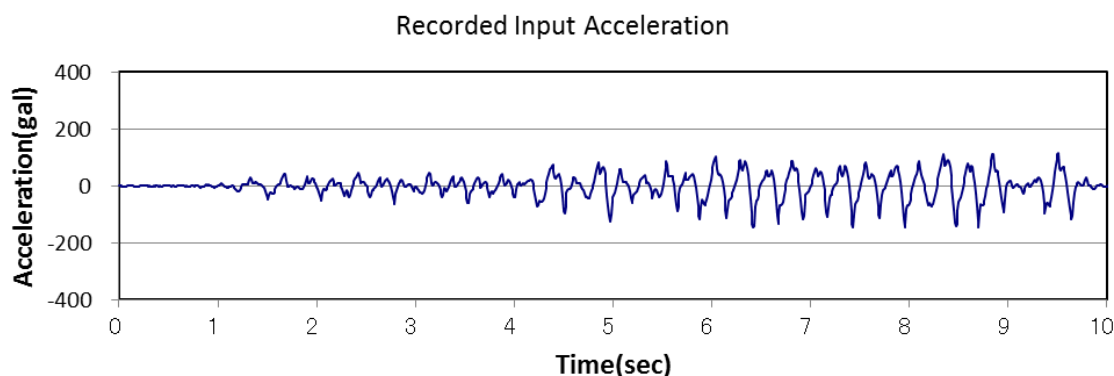
耐震や免振の効果については, PC の波形や LED 振動表示器で確認することができる。

4. 教材の効果

環境都市工学科の 5 年生を対象として, 教材を用いた模擬授業を行った。リアルタイムで表示される



(a) 観測された建物模型の加速度と応答計算結果



(b) 観測された振動台の加速度

図-9 強制振動実験における建物模型の観測記録と応答計算の結果の比較



写真-6 耐震補強した建物模型

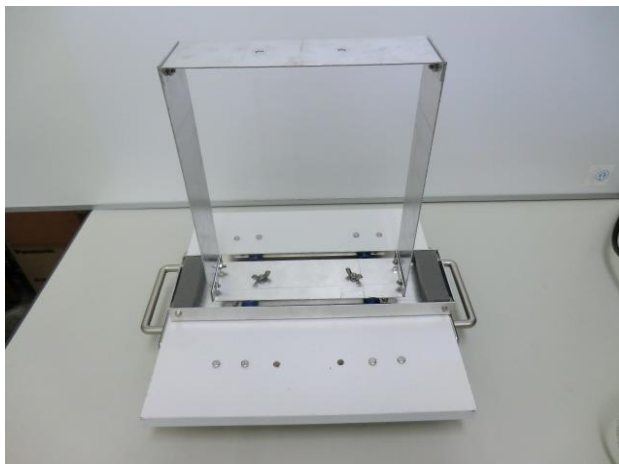


写真-7 免振キットを取り付けた建物模型



(a) 外枠部分



(b) 内枠部分

写真-8 免振キット

加速度波形や震度等を見ながら学生自身が振動台を操作し、傍らで教員が説明するといった形式である。そして、実際に振動台を操作した6人の学生に対して、簡単なアンケート調査を実施した。本教材は、揺れの大きさと地震動の指標（震度や加速度）の関係に対する感覚的な理解を支援することを第一の目的にしていることから、それらの理解に役立ったか否かを問う設問とした。また、フーリエスペクトルの理解において、本教材を用いた実験による効果を評価するための設問も設けた。具体的には、以下の各設問に対して、「全く役立たなかった」の1から「大変役立った」の5まで5段階で回答してもらうこととした。以下に設問を示す。

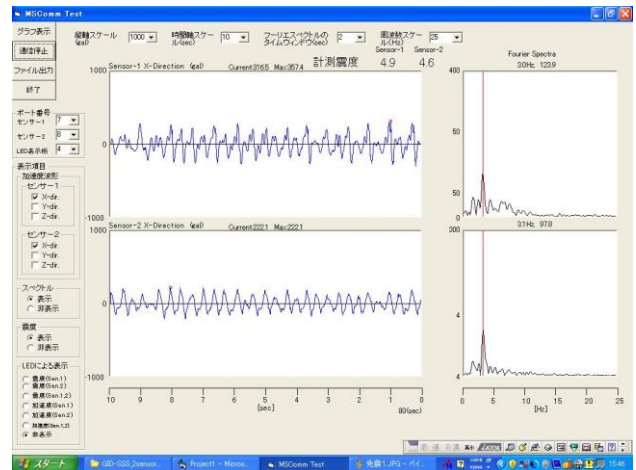


図-10 免振キットを取り付けた実験における画面表示

- ・加速度の大きさの感覚的な理解に役立ったか
- ・震度の大きさの感覚的な理解に役立ったか
- ・フーリエスペクトルの理解に役立ったか

アンケートの結果は、平均すると加速度(4.8)、震度(4.5)、フーリエスペクトル(4.0)であった。加速度と震度に関しては全て4または5の評価であったが、フーリエスペクトルについては評価が分かれた。被験者の数が少ないので統計的な価値はないが、全体として高評価が得られ、教材の有効性について一定の評価が得られた。一方、その説明に手間がかかる項目の順に評価が下がっており、振動台の操作方法や説明に改善の余地があることがわかった。

5. まとめ

本研究では、簡単に持ち運べ、卓上で実験できる振動実験教材を開発した。本教材の特徴は、振動台を利用者自身で操作でき、リアルタイムで振動波形、加速度の大きさ、計測震度、フーリエスペクトル等を確認できることである。これによって、加速度や震度といった地震による振動の指標に対する感覚的な理解を支援し、振動や耐震に関連する授業への興味や関心を高めることができると考えられる。また計測されたデータは、理論の検証等に用いることができる。

本装置は、対象者の知識レベルに応じて、振動の感覚的理解のみの支援から高専・大学における振動論などの講義の補助教材まで幅広く利用できる。

参考文献

- 1) 福和伸夫他：建物耐震化促進のための振動実験教材の開発，地域安全学会論文集，No.7, pp.23-34, 2005.
- 2) 株式会社数理計画研究所：GID-SSS 地震計ハードウェア取扱説明書，URL: http://www.madlabo.com/mad/gid/jishin/pdf/GID-SSS_Hardware_Manual.pdf，2013.5.23閲覧。
- 3) 株式会社数理計画研究所：GID-SSS パソコン接続型

地震計, URL: http://www.madlabo.com/mad/gid/jishin/image/gid-sss_datasheet.pdf, 2013.5.23 閲覧.

- 4) 株式会社秋月電子通商, 角型フルカラーLED
OSTA71A1D-A, URL: <http://akizukidenshi.com/download/OSTA71A1D-A.pdf>, 2013.4.20 閲覧.

DEVELOPMENT OF PORTABLE SHAKING EXPERIMENT DEVICE TO SUPPORT INSTINCTIVE UNDERSTANDINGS OF VIBRATION

Osamu TSUJIHARA, Yuichiro NAKATANI and Takeshi YAMAMURA

The vibration greatness is expressed by such measures as acceleration and seismic intensity. However, it is not realistic for those who have no experiential sense of vibration greatness. The instinctive feel of vibration is important to take an interest in the lessons related to the earthquake disaster prevention.

This paper introduces the portable shaking experiment device which is developed as a teaching material to support the instinctive understandings of the vibration greatness such as acceleration and seismic intensity as well as Fourier spectrum. The data of vibration recorded by accelerometers installed at the shaking table and the structure model are processed immediately and the wave form, maximum acceleration, seismic intensity and Fourier spectra are shown in real time.