

耐震コンテストー地震に一番強い模型はどれだ！？ー

年 縄 巧¹

An Earthquake Resistance Contest -Which vibration model is stable to earthquake?-

Takumi TOSHINAWA¹

Simple vibration models are developed to idealize building structures subjected to earthquake ground motion. Each model has two wooden columns with length 100 to 640mm. Styrofoam cylinders are used to detect the acceleration response of the models instantly. With shaking table tests, it is found that longest-column model has the lowest acceleration response to input ground motion and therefore reduces seismic load showing the reason why high-rise buildings are proof against earthquakes. The vibration models are used at earthquake resistance contests in summer schools of science, Meisei University, to let school children understand the principle of the vibration theory

キーワード：耐震コンテスト 1, 振動台 2, 夏休み科学体験教室 3, 振動模型 4, 地震力 5, 柔構造 6

Keywords: Earthquake resistance contest1, Shaking table2, Summer school of science, Meisei University3, Vibration model4, Earthquake load5, Flexible structure6

1. はじめに

地震や風などの時間的に変化する外力に対する建築構造物の応答を取り扱う動力学は、時間項を考えない静力学に対して応用的な学問分野である。そのため建築分野で動力学を学ぶのは、教養課程で学ぶ簡単な振動論を除いては静力学の履修が一通り終わった学部 3 年生以後になることが多い。しかしながら、我が国でしばしば起こる地震被害は社会的なインパクトが大きくなることが少なくないため、建築構造物の地震応答の基本的な性質を知り、どのような構造物が地震に強い（弱い）のかを小中高生を含め広く一般が常識として知っておくことは大切なことである。

著者は本学理工学部 1 年生の必修科目プロジェクト 1 で「耐震コンテストー地震に強い建物のしくみを知ろうー」というテーマを担当し、動力学に明るくない学部 1 年生が実験と手作業を通じて振動論を理解していく手助けを行なった。担当学生は、前期末の夏休み科学体験教室において自分たちが学んだことを興味を引くコンテスト形式にして、どのような建物が地震に対して強いのかを小中学生に理解してもらうことに努めた。

本稿は、2020 年 4 月に著者が理工学部を去り、そしてこのプロジェクト 1 の担当からはずれるのを機に 2012 年度からの 8 年間に試行錯誤して作り上げた講義内容をメモとして残す。

表 1 耐震コンテスト使用模型と加振波

年度	模型	柱材	判定円柱材料	柱長さ	おもり (粘土)	加振波
2012	3 柱模型	竹ひご (φ3mm)	木質	500~700mm で自作	0,10,20,30g から選ぶ	予選：築館第 1 波 決勝：築館第 2 波
2013			発泡スチロール	300~700mm 9 体から くじで選ぶ	なし	短周期波 (築館第 2 波) 長周期波 (直別 2Hz LPF 波)
2014				100~640mm 10 体から くじで選ぶ		予選：築館第 1 波 500 ガル、 築館第 1 波 1000 ガル 決勝：築館第 2 波 1500 ガル
2015 ~ 2019	2 柱模型 (タイプ I)	檜板 (2mm× 20mm)				

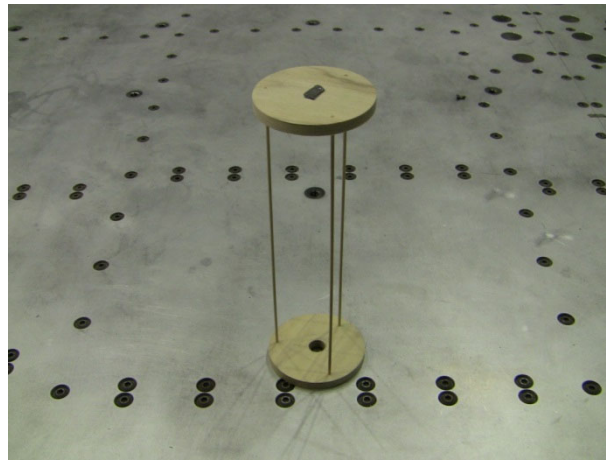


写真1 2012～2014年に使用した3柱模型

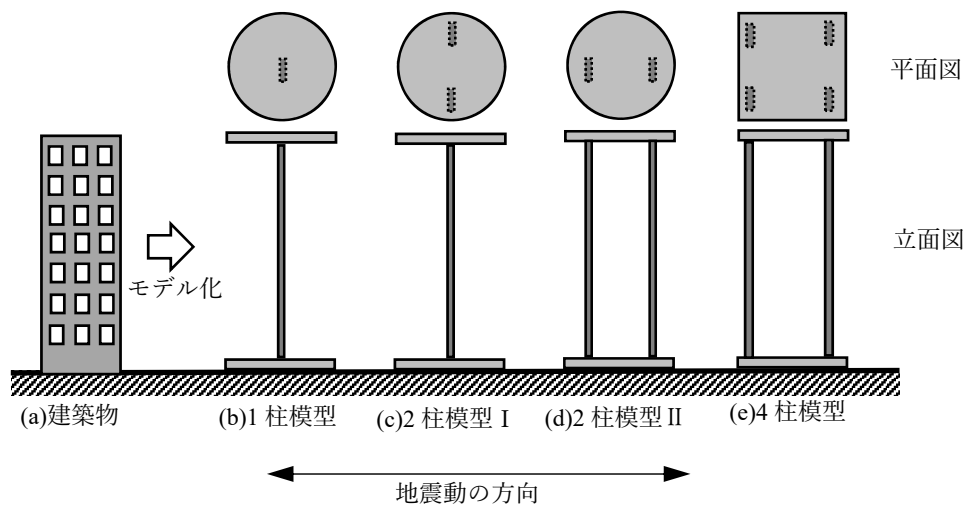


図1 建築物のモデル化

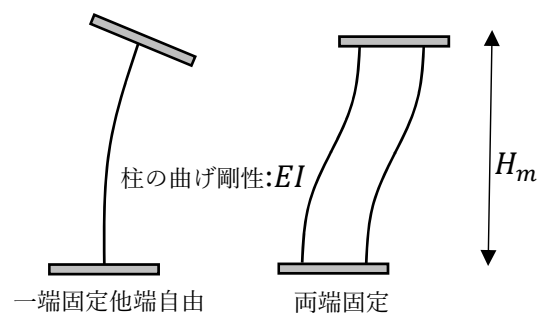


図2 振動タイプ

2. テーマ・モデルの設定

プロジェクト 1 の担当を割り振られたとき、「耐震」というキーワードの基、前提条件が 3 つあった。一つは 30 号館の振動台を使うこと、一つはコンテスト形式にすること、そしてもう一つは短時間（90 分以内）で行うことである。プロジェクト 1 受講者が、夏休み科学体験教室で外部の小中学生に対して最終的に発表会を行うので「おもしろいこと」と「教育的であること」が必須である。また、1 日に最大で 3 テーマ行う夏休み科学体験教室では、1 つのテーマは 90 分以内に行うという制約もある。コンテスト形式は勝ち負けという戦いを行うことによって「おもしろく」そしてなぜその模型が優勝したかが明確にわかる理論があれば「教育的」であり、ロボコンや鳥人間などの好例がある。

「耐震コンテスト」というコンテストは多くの大学、高校で行われている。古くは木材を柱にしてトップに重りを載せ振動台でゆすり、模型が壊れるかどうか競うものがあった。現在では「つまようじタワー耐震コンテスト」が主流のようであるが、これはそもそも高校生向けで、作るのにも時間がかかる。そこで短時間で勝敗が明確にわかる振動模型を模索した。

表 1 に耐震コンテストで用いた模型を年度毎に示す。2012～2014 年度は写真 1 に示すように直径 100mm の木製円盤に $\phi 3\text{mm}$ の竹ひごを差した 3 柱模型を使用した。これは 2012 年 5 月に開業したスカイツリーからヒントを得たものであり、柱に竹ひごを差しこむだけなので参加者が自由に長さを変えて作成できる。この模型は明確な共振モードを持つが並進以外にねじれのモードが生じ、1 自由度系にモデル化することがむずかしいという難点があった。

図 1(a) のような建築物を振動モデル化する場合、3 柱模型以外で簡単なものは図 1(b)～(c) のようなものが考えられる（模型の柱と土台・天板の接合部は直角を保つように固定

する）。柱数は(b)が 1 本、(c)、(d)が 2 本、(e)が 4 本であり、(c)と(d)の違いは振動方向に対して柱を (c)は横、(d)は前後に配置することであり、それぞれ 2 柱模型Ⅰ、2 柱模型Ⅱと呼ぶことにする。ここで柱の断面形状は振動方向が薄い矩形断面である。

これらの振動模型は柱の配置によって図 2 のような一端固定他端自由、または両端固定の振動をする。表 2 は各振動模型の振動タイプと柱の曲げ剛性が EI のときの剛性（式 (1)～(4)）を示す。(b)、(c)、(d)、(e)になるにつれ剛性が高くなり模型が強くなっていく。表には構造のシンプルさ（簡単な理論と比較するため 1 自由度系にモデル化可能かどうか）、強さ（座屈）、長周期化のしやすさの項目も付けている。ここで長周期化とは、具体的には模型の固有周期を 1 秒程度以上にするものである。これは、室内実験用の模型は規模が小さいため固有周期が短くなってしまうが、後述するように今回の耐震コンテストでは地震力が小さいものを勝者とするので長周期化して地震力を小さくできるタイプを準備する必要があるためである。

1 柱模型は構造的にはシンプルであるが柱を長くすると座屈しやすくなるというデメリットがある。また、柱が中央にあるため振動台に 1 点でネジ固定することができないという実用上の問題もある。4 柱模型は座屈に対する強度はあるが、長周期化がむずかしい。また、ねじれモードが生じる可能性がある。

2 柱模型Ⅱは構造がシンプルであるが、剛性が高く長周期化がむずかしい。2 柱模型Ⅰは構造がシンプルであり、座屈長さも比較的長く長周期化が可能である。以上の検討から、2015 年度からの耐震コンテストで使用する模型は 2 柱模型Ⅰのタイプとした。

表 2 振動模型の特徴

模型名	振動タイプ	バネ (剛性)	構造のシンプルさ (1 自由度系へモデル化?)	強さ (座屈)	長周期化 (>1s?)
(b) 1 柱模型	一端固定他端自由	$\frac{3EI}{H_m^3}$ (1)	◎	×	◎
(c) 2 柱模型Ⅰ	一端固定他端自由	$\frac{6EI}{H_m^3}$ (2)	◎	△	○
(d) 2 柱模型Ⅱ	両端固定	$\frac{24EI}{H_m^3}$ (3)	◎	○	△
(e) 4 柱模型	両端固定	$\frac{48EI}{H_m^3}$ (4)	△	◎	×

EI : 柱の曲げ剛性 H_m : 模型高さ

3. 地震に強い建物

建物を地震に対して強くするには、建物の強度を上げる方法と地震力を下げる方法がある。前者は筋かいやブレースを使って建物の強度を上げ地震力に抵抗する。後者は建物の質量を軽くしたり、固有周期を伸ばしたりして地震力を小さくする。「つまようじタワー」に代表される耐震コンテストは前者に属し、破壊の有無で勝負を決める。本コンテストでは後者の考えに基づき、地震力の小さい模型を地震に強い模型として勝者とすることにした。地震力の大小を決めるために地震力に関する「ゆれ」を判定尺度とした。

3.1 地震力に関する「ゆれ」

「ゆれ」という言葉は一般的に用いられているために馴染みやすいが逆に意味が広い。身近で「ゆれ」という言葉は、見た目の振幅すなわち「変位」と取られることが多いように思う。ところが地震の際、報道など使われる「ゆれ」は例えば、「各地の『ゆれ』」と言われるように震度を指しており、これは加速度または速度と関連が深い。

加速度と速度は、変位をそれぞれ2階、1階微分したものであるから、変位と関係はあるものの見た目は全く異なる。例えば、ゆっくりと大きく変位するものでも加速度の値はそれほど大きくない。これは、ゆれの周期が長くなると変位は大きくなるが、逆に加速度は小さくなるからである。

地震力は振動体の質量と応答加速度の積で表されるから、強度と質量が同じ建物が地震に強いかな否かを判断する場合は、応答加速度を尺度とするのがよい。そこでプロジェクト1の授業や耐震コンテスト前には「ゆれ」＝「見た目の振幅」ではなく「加速度」であることを明確に説明した。

3.2 「ゆれ」の大小の判定

前節で述べた考えから、模型のゆれ（＝応答加速度）が最も小さいものをコンテストで勝つというルールにした。加速度の大きさは、通常は加速度センサーなどを取り付けて応答加速度を計測してその最大値を見ればよいが、モデ

ルにセンサーを取り付けてデータを計測し評価するのは時間がかかり現実的ではない。そこで応答加速度の大きさを簡単に知る方法を考えた。

図3に水平方向に一定の加速度 α で動く床の上に乗る高さ H 、幅 B 、質量 m の剛体を示す。重力加速度を g とすると、加速度座標系では、剛体には重力 mg と、床の加速度と逆向きの慣性力 $m\alpha$ がはたらく。剛体と床が滑らなければ式(5)の加速度 α で転倒し始める。この α を転倒開始加速度と呼ぶことにする。

$$\alpha = \frac{B}{H} g \quad (5)$$

したがって、モデル上板に剛体を載せてその転倒の有無を観察すればモデルの最大応答加速度を知ることができる。この方法は、地震工学分野では墓石の転倒状況から被害地震の震度分布を推定する際に使われてきたものである。

実際に使う剛体は円柱であるので、これを判定円柱と呼ぶことにした。判定円柱の直径（幅） B を40mmと一定にし、高さ H を色々に変えて転倒開始加速度を測定した。表3は $H=40$ 、60、80、100mmのときの転倒開始加速度 $\alpha(\text{cm/s}^2)$ である。

表1に示すように、耐震コンテストの初期（2012年）では判定円柱は木質とし、上板に直に円柱を置いて判定を行った。当時は円柱に粘土を付けてモデルの周期を自由に変えることができるルールにしていたが、円柱の下部に粘土を付けて座りをよくして倒れにくくなるようなモデルを作った参加者が優勝してしまい、コンテスト本来の主旨からはずれてしまったので、2014年以後は模型や判定円柱に粘土を付けないようルール変更した。また、判定円柱自体が質量を持っていると系全体の固有周期が変化してしまうので2013年以後は材質を木質から発泡スチロールにした。さらに円柱と上板が滑ると判定円柱が転倒しないので模型と上板の接触面にサンドペーパーを貼付し滑りを抑えた。

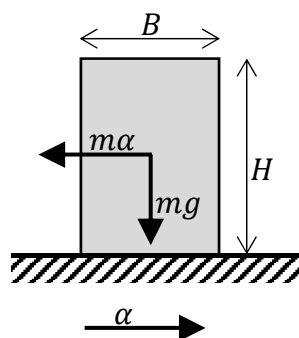


図3 地動加速度を受ける剛体

表3 判定円柱の転倒開始加速度 $\alpha(\text{cm/s}^2)$

H (mm)	40	60	80	100
α (cm/s ²)	980	653	490	392

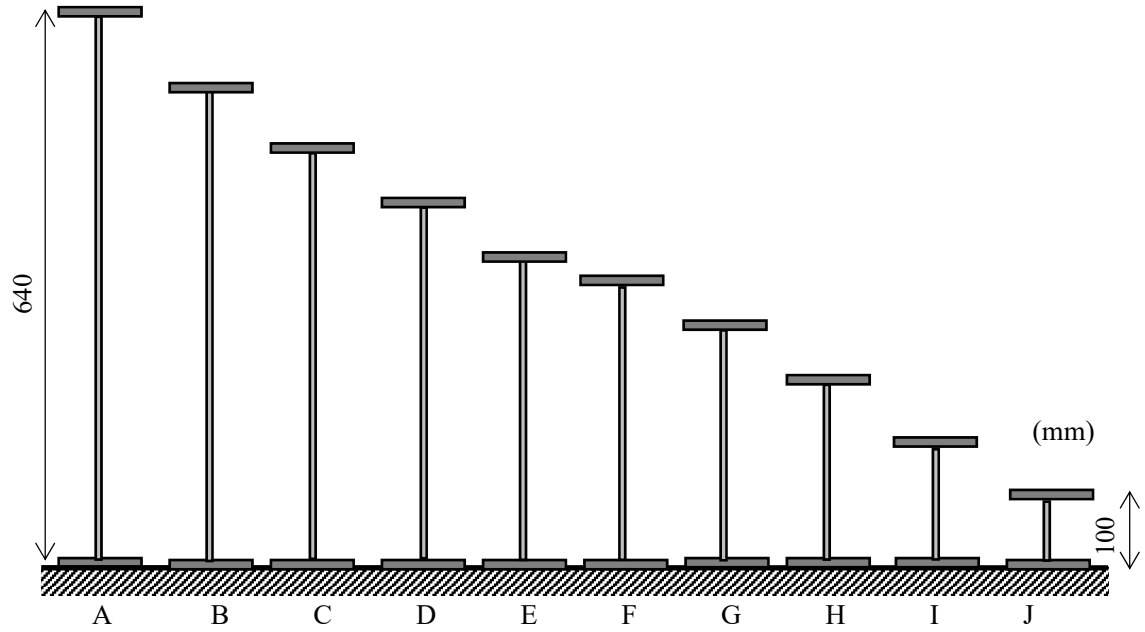


図 4 耐震コンテストで使した 2 柱模型

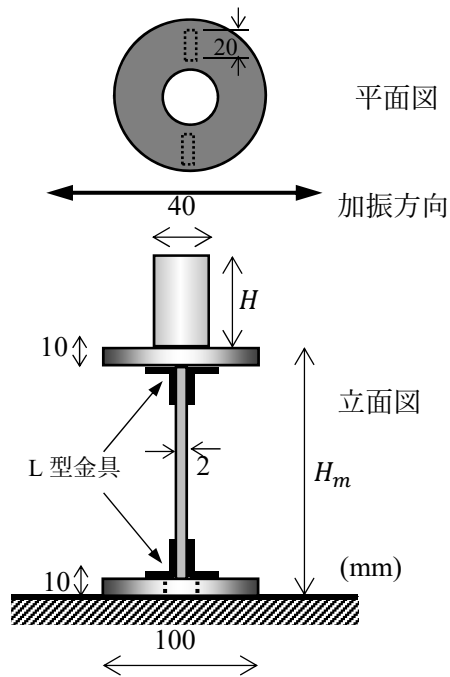


図 5 判定円柱を載せた 2 柱模型

表 4 模型の高さ H_m (mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
640	525	450	400	360	330	305	285	200	100

4. 耐震コンテスト概要

この章では耐震コンテストで使用した振動模型、加振波、ルールについて詳述する。

4.1 使用模型

図 4 に耐震コンテストで使用した 2 柱模型、図 5 に模型に判定円柱を載せた状態を示す。柱は幅 $b=20\text{mm}$ 、厚さ $D=2\text{mm}$ の檜板を、上板、下板は直径 100mm、厚さ 10mm のポプラ材を使用し、模型の柱と上板・下板は直角を保つように L 型金具で固定する。コンテスト参加者が最多で 10 名まで対応するため、模型高さ H_m が最高 640mm、最低 100mm の模型を 10 体作成し、高い方から順に A~J と呼ぶことにした。表 4 に各模型の高さ $H_m(\text{mm})$ を示す。

4.2 加振波形

耐震コンテストでは、図 6 に示すような 2011 年東北地方太平洋沖地震の際、宮城県築館市で観測された地震波（築館波）の南北方向成分を原波として加振波を作成した。この地震動は大きく 2 つの波群で構成され、最大加速度値は、第 1 波群は 1200 ガル($\text{gal}:\text{cm/s}^2$)程度、第 2 波群は 2700 ガル程度となっており、第 2 波群の地震動の方が大きい。なお、コンテスト終了時にこの地震動の 3 方向成分を振動台で再現して希望者に体験してもらった。

この原波から大きさの違う 3 つの加振波を作成した。第 1 波群の最大値を 500 ガルに振幅調整したものを最も小さい加振波とし、この加振波を 2 倍したものを 2 番目の加振波に、第 2 波群の最大値を 1500 ガルに振幅調整したものを最も大きい加振波とし、それぞれ、「築館第 1 波 500 ガル」、「築館第 1 波 1000 ガル」、「築館第 2 波 1500 ガル」と呼ぶことにした。加振波の時刻歴波形を図 7 にその加速度応答スペクトル（減衰 5%）を図 8 に示す。築館第 2 波 1500 ガルは周期 0.2~0.3s で応答加速度が 3000 cm/s^2 を超す強い地震動であることがわかる。築館第 1 波 1000 ガルは築館第 1 波 500 ガルを 2 倍したものであるため応答値の大小に逆転はないが、築館第 1 波 1000 ガルと築館第 2 波 1500 ガルでは 0.1~0.2s と 3s 付近に大小の逆転が見られる。これは原波の持つ振動成分の違いによるものである。

4.3 ルール

図 9 に耐震コンテストで配布したルールを示す。模型は 10 体準備されているので、くじ引きで順番を決め模型を選んでもらった。加振ステージは 4 つありそれぞれ、第 1、第 2、ファイナル、最下位決定戦と呼んだ。

第 1、第 2 ステージは予選であり、それぞれ築館第 1 波 500 ガル、築館第 1 波 1000 ガルで加振し高さ $H=60\text{mm}$ の判定円柱(転倒加速度 $\alpha=653$ ガル)が倒れるか否かで選抜する。加振は 1 体ずつ行い、判定円柱が倒れなければ次のステージに進める。

ファイナルでは、第 2 ステージで勝ち残った模型を同時に並べて高さ $H=60\text{mm}$ の判定円柱を乗せ、築館第 2 波 1500 ガルで加振する。判定円柱が倒れなかった場合は、判定円柱の高さ H を 80mm、100mm と上げていき、勝ち残り者を

決めた。

優勝者を決めるのはファイナルで終わりであるが、第 1 ステージで負けてしまった参加者はその後のステージに参加できないので、築館第 1 波 500 ガルを用いて判定円柱の高さを 50mm、40mm と下げて最も地震力が大きくなる模型を探しこれを最下位とする。なお、最下位決定戦で複数の模型の判定円柱が倒れた場合には先に倒れた模型を最下位とした。

4.4 模擬コンテスト

プロジェクト 1 の開始時のガイダンスで、受講者に模擬コンテストを体験してもらった。2019 年度は、受講者が 16 名であったので 1 組 2 名で合計 8 組にして模型を選んでもらった。模型選出前に優勝模型を予想してもらった結果、J が 10 名、A が 3 名、H が 2 名となっており、多くの受講者が背の低い模型が優勝する（地震に強い）と予想している。

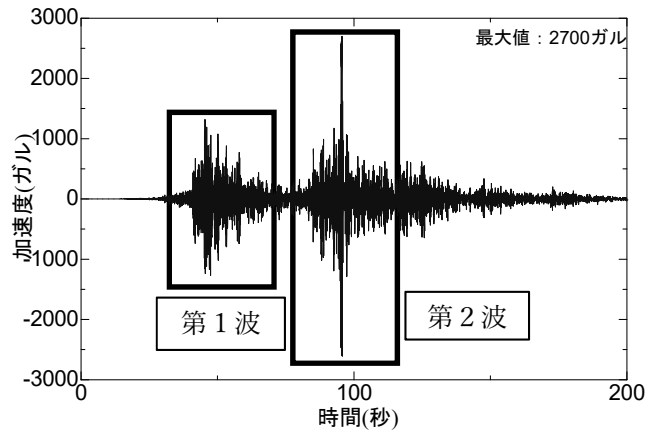
8 組が選んだ模型 8 体の結果を表 5 に示す。模型高さ $H_m=100\text{mm}$ の J と、 H_m が 360mm 以上の模型（E、C、B、A）が第 1 ステージを通過し、第 2 ステージでは $H_m=100\text{mm}$ の J と H_m が 400mm 以上の模型（C、B、A）がファイナルに進出した。ファイナルでは判定円柱高さ $H=60\text{mm}$ で H_m が 100、450mm の模型（J、C）が脱落した。判定円柱の高さを 80mm にすると H_m が 525mm の模型 B が脱落し、 $H_m=640\text{mm}$ の模型（A）が残り優勝した。ただし、模型 B は 2018 年度の模擬コンテストでは $H=80\text{mm}$ で不転倒、 $H=100\text{mm}$ で転倒であった。いずれにしても、模型 A が最も応答加速度が小さい模型であった。さらに、最下位決定戦から、 H_m が 200mm と 285mm の 2 つの模型（I、H）が倒れたが、 H_m が 200mm の方が先に判定円柱が倒れたのでこの模型（I）が最も地震に弱いことがわかった。これらの結果をまとめると以下のようになる。

- ・背の高い模型が地震に強い（模型 A）
- ・極端に低くてもそこそこ強い（模型 J）
- ・中途半端に低い模型が地震に弱い（模型 I）

上記の結果は、ほとんどのプロジェクト 1 受講者や科学体験参加者の予想に反するものであった。

4.5 結果の解釈

図 10 にコンテスト後に行った解説図を示す。横軸は建物の周期（ゆれのゆっくりさ）、または建物の高さ、縦軸は建物に加わる地震力である。この図の概形は実際の耐震設計で用いられている設計スペクトルと同等のものである。この図を用いて、建物の周期が長くなると地震力が小さくなるのでコンテストで背の高い模型が優勝した理由を説明した。また、超高層建築物や免震建築物が地震に強い根拠も説明した。



2011年3月11日東北地方太平洋沖地震宮城県栗原市築館（南北方向）

図 6 耐震コンテストで使った加振波の原波

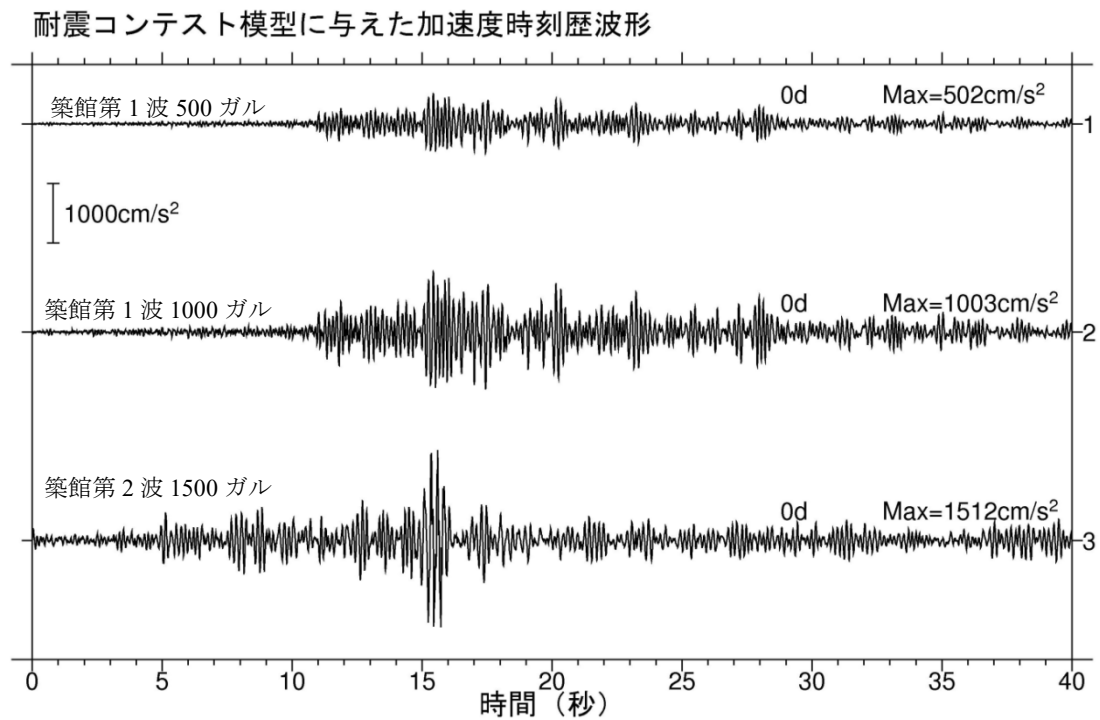


図 7 耐震コンテストで使った加速度時刻歴波形

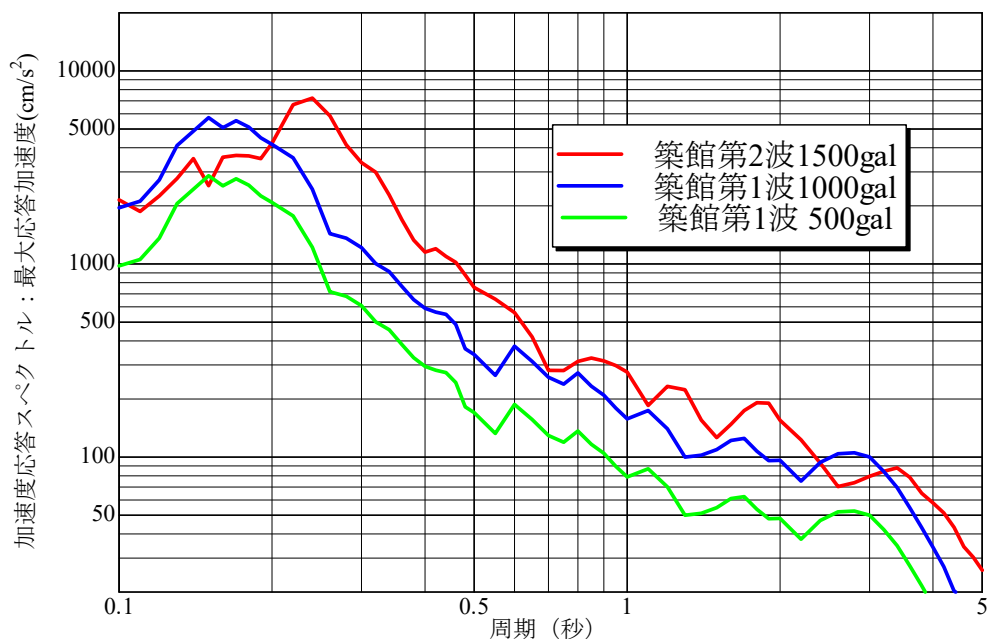


図 8 耐震コンテストで使用した加振波の加速度応答スペクトル (h=5%)

耐震コンテスト

地震に一番強い模型はどれだ！？

競技ルール

- ・くじで順番 1、2、3... を決める。
- ・1 の人から A～J の振動模型のいずれかを選んでいく。
- ・各ステージで数の大きい人から模型をゆすっていく。

勝敗ルール

自分の模型に判定円柱を載せ加振波（再現地震波）に対して倒れなかったら勝ち残り次のステージに進む。ファイナルステージでも円柱が倒れなかった模型（または最も遅く倒れた模型）が優勝。

ステージ	加振波	判定円柱の高さ
第 1（一休ずつ）	築館（つくだて）第 1 波 500 ガル	6cm
第 2（一休ずつ）	築館第 1 波 1000 ガル	6cm
ファイナル （並べて勝負）	築館第 2 波 1500 ガル	6cm 8cm 10cm
最下位決定戦 （並べて勝負）	築館第 1 波 500 ガル	5cm 4cm

※ ファイナルステージで複数の模型が残った場合は円柱の高さを高くして再加振。

※ ファイナルですべて円柱が倒れた場合は先に倒れた方が負け。

※ 第 1 ステージで円柱が倒れてしまった人はファイナル終了後に最下位決定戦をやります。円柱が（早く）倒れた人が最下位。

明星大学 夏休み科学体験教室

図 9 耐震コンテストで配布したルール説明書

表 5 模擬コンテスト(2019 年度)の結果

なまえ		シン	コウ スケ	アリタ	ケース スケ	クニモ ト	ナカジ マ	マツコ	サンシ ヤイン
くじ		3	1	2	4	7	6	8	5
模型		J	I	H	G	E	C	B	A
模型高さ (mm)		100	200	285	305	360	450	525	640
第 1 ステージ	60mm	○	×	×	×	○	○	○	○
第 2 ステージ	60mm	○	—	—	—	×	○	○	○
最下位決定戦	40mm	—	××	×	○	—	—	—	—
	50mm	—	—	—	—	—	—	—	—
ファイナル	60mm	×	—	—	—	—	×	○	○
	80mm	—	—	—	—	—	—	×(○)	○
	100mm	—	—	—	—	—	—	—(×)	—

○：判定円柱不転倒； ×：判定円柱転倒； ××：判定円柱が先に転倒

↑ (○) は 2018 年度

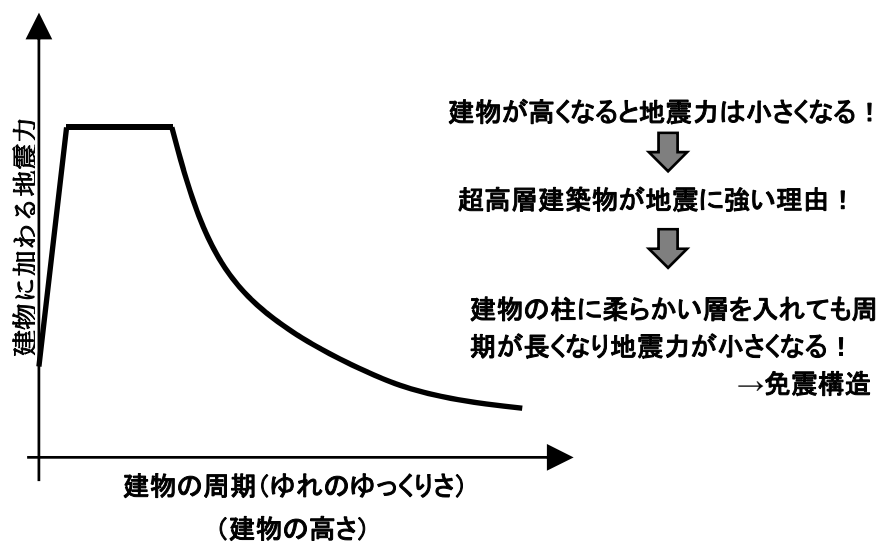


図 10 耐震コンテスト後に説明した解説図

5. コンテストで用いた模型の振動特性

プロジェクト1では、実験や解析の結果を用いて耐震コンテストで用いる模型の振動特性を調べた。

5.1 実験固有周期と減衰定数の算出

耐震コンテストで用いた10体の模型を自由振動させ、レーザー光を柱部に照射して模型の変位を測定した。図11は変位時刻歴波形であり学生が読み取りやすいように目盛を方眼状に描いている。これらの自由振動変位時刻歴波形から固有周期 T と減衰定数 h を読み取った。図12は変位時刻歴波形の例である。変位時刻歴波形の2つのピークに注目し、式(6)により自由振動周期 T を算定し、これを模型の固有周期 T とした。

$$T = \frac{t_2 - t_1}{n} \quad (6)$$

同様に減衰定数 h を式(7)により算定した。

$$h = \frac{1}{2n\pi} \log_e \frac{pl_1 + pr_1}{pl_2 + pr_2} \quad (7)$$

ここで、 t_1 、 t_2 はそれぞれ第1注目ピーク、第2注目ピークの時間(s)、 pl_1 、 pr_1 は第1注目ピークの正側と負側の片振幅、 pl_2 、 pr_2 は第2注目ピークの正側と負側の片振幅である(図12参照)。また、 n は $t_1 \sim t_2$ の山の数である。表6は各模型の読み取り値とそれによる T (s)、 h (%)の算定結果である。これらの値 T 、 h を模型高さ H_m に対してプロットすると図13のようになる。周期 T は0.06~1.16sに分布し、模型高さに応じて長くなっている。また、減衰定数 h は0.6~1.3%に分布し背の高い模型と背の低い模型が大きめ、その間の高さの模型は小さめの傾向がある。

5.2 理論固有周期の算出

5.1の実験結果と模型の固有周期の理論値を比較した。質量 M とバネ K からなる一質点系の固有周期 T は式(8)で表される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (8)$$

2柱模型の場合、バネ K は柱のヤング率 E と振動方向の断面2次モーメント I と固定度で決まる。

この2柱模型の場合、表2に示したように一端固定他端自由の振動をするので式(2)のようになる。

したがって、固有周期 T は式(9)のように書き換えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{MH_m^3}{6EI}} \quad (9)$$

柱は幅 $b=20\text{mm}$ 、厚さ $D=2\text{mm}$ の檜板を使用しているので振動方向に直交する中立軸に関する断面2次モーメント I は式(10)のようになる。

$$I = \frac{bD^3}{12} = \frac{20 \times 2^3}{12} = 13.33\text{mm}^4 \quad (10)$$

耐震コンテストで使用した檜材のヤング率を実験で求めてみる。図14に示すような支点長さ $L=300\text{mm}$ の単純梁を檜板で作成し、中央に1個約60gの重りを載せていき、中央点の鉛直変位 $\delta(\text{mm})$ を計測する。表7は計測結果である。重りの質量を鉛直荷重 $P(\text{N})$ に換算し、 δ に対する P をプロットすると図15のようになった。 P と δ には相関が見られたので最小二乗回帰すると

$$P = 0.482\delta + 0.091 \quad (\text{N}) \quad (11)$$

となった。また、長さ L 、曲げ剛性 EI の単純梁の鉛直変位 δ は鉛直荷重 P と式(12)の関係があるので

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (12)$$

E について表すと式(13)のようになる。

$$E = \frac{P}{\delta} \frac{L^3}{48I} \quad (13)$$

式(13)に $I=13.33\text{mm}^4$ 、実験結果の $P/\delta=0.482(\text{N/mm})$ 、 $L=300\text{mm}$ を代入すると $E=2.0 \times 10^9(\text{N/mm}^2)=20\text{GPa}$ となった。

これらの諸量を式(9)に代入して模型の理論固有周期 T を求めると表8のようになる。ここで質量 M は図16に示すように模型上半分の振動に関係する部分の質量である。得られた理論固有周期と実験固有周期の比較を図17に示す。実験値は理論値よりやや長めになっており、特に周期が長い(背の高い)模型ではずれが大きい。この理由としては、背の高い模型は変位応答が大きくなり柱脚部が完全な剛接合とならず周期が伸びたということが考えられる。また、単純梁の鉛直荷重実験で算定された $E=20\text{GPa}$ という値は文献に載る檜のヤング率(5~15GPa)よりやや大きい。実際、他年度に行った実験結果では $E=10\text{GPa}$ と算定された場合もあるので耐震コンテスト模型で使用した檜板のヤング率はもう少し小さい可能性もある。

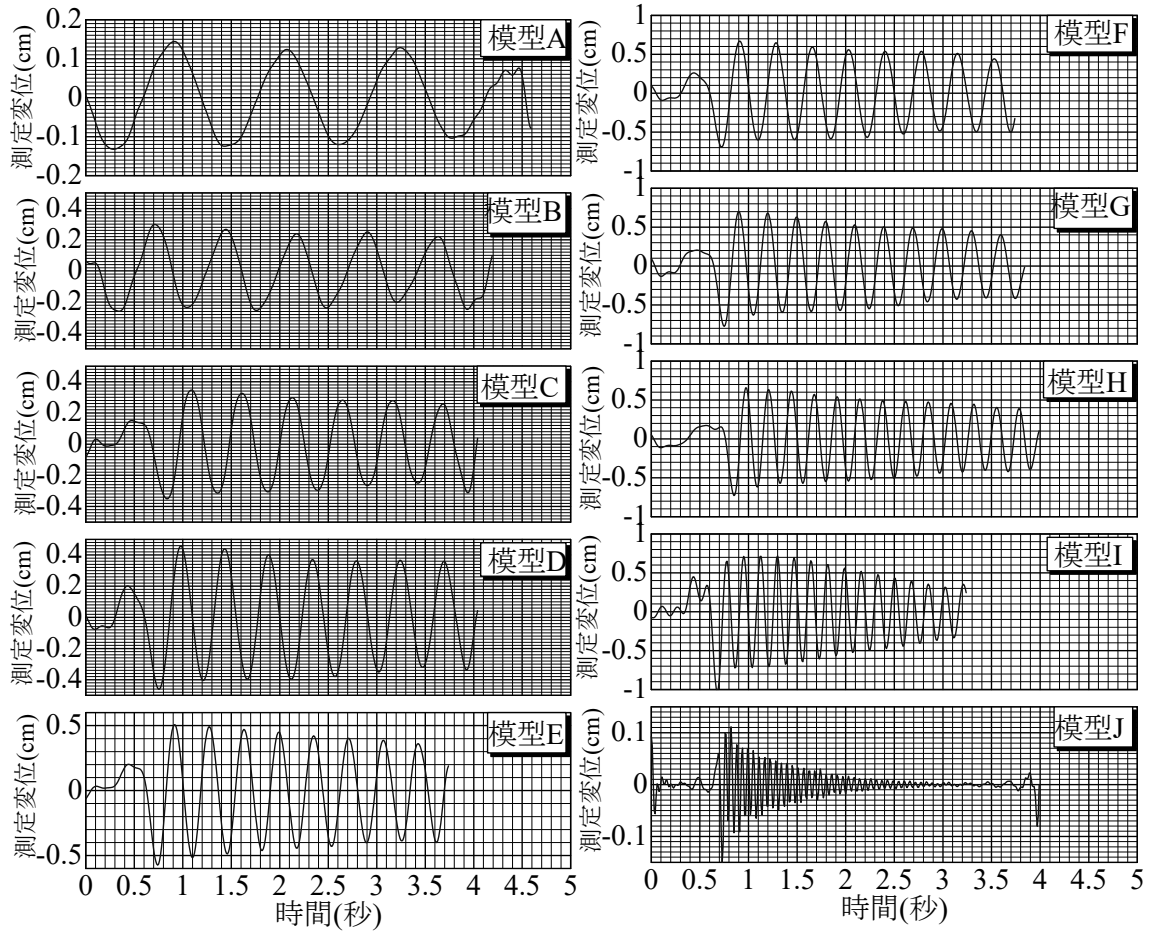


図 11 耐震コンテストで用いた模型の自由振動変位時刻歴波形

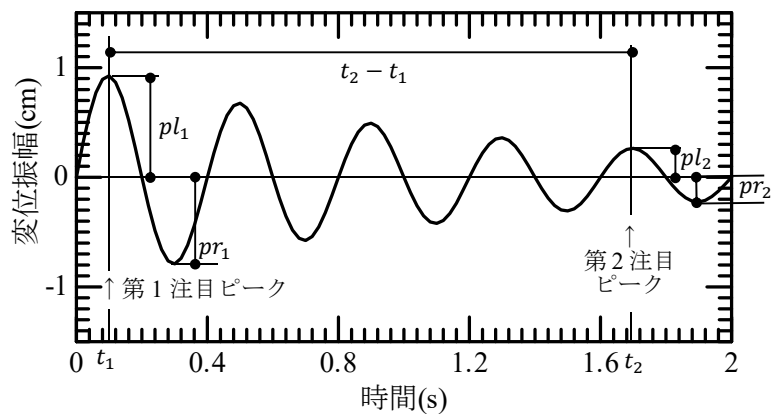


図 12 自由振動時刻歴波形から周期と減衰定数を算定するための諸量の読み取り

表 6 各模型の読み取り値とそれによる固有周期(s)、減衰定数(%)の算定結果

模 型	t_1 (s)	t_2 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	n	T (s) $\left(\frac{t_2 - t_1}{n}\right)$	pl_1 (cm)	pr_1 (cm)	$pl_1 + pr_1$ (cm)	pl_2 (cm)	pr_2 (cm)	$pl_2 + pr_2$ (cm)	$\frac{pl_1 + pr_1}{pl_2 + pr_2}$	h (%)
A	0.92	3.24	2.32	2	1.16	0.14	0.12	0.27	0.13	0.10	0.23	1.16	1.15
B	1.71	4.63	2.92	4	0.73	0.30	0.23	0.53	0.25	0.20	0.45	1.18	0.88
C	1.09	3.68	2.59	5	0.52	0.35	0.31	0.66	0.28	0.25	0.53	1.25	0.89
D	0.98	3.69	2.71	6	0.45	0.46	0.41	0.86	0.37	0.32	0.69	1.26	0.73
E	0.91	3.43	2.52	7	0.36	0.51	0.52	1.02	0.39	0.39	0.78	1.32	0.74
F	0.92	3.53	2.61	7	0.37	0.66	0.60	1.26	0.44	0.50	0.95	1.33	0.65
G	0.90	3.60	2.70	9	0.30	0.70	0.63	1.34	0.40	0.42	0.82	1.63	0.86
H	0.97	3.78	2.81	12	0.23	0.66	0.62	1.27	0.39	0.40	0.79	1.62	0.64
I	1.47	3.02	1.55	9	0.17	0.69	0.64	1.34	0.31	0.34	0.65	2.06	1.28
J	0.99	1.91	0.92	16	0.06	0.07	0.06	0.13	0.02	0.02	0.04	3.49	1.24

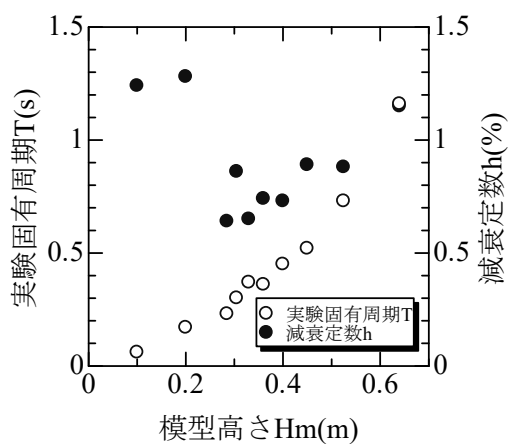


図 13 模型高さに対する実験固有周期と減衰定数のプロット

表 7 単純梁の鉛直荷重実験結果

m(g)	P(N)	δ (mm)
30	0.29	0.48
92	0.90	1.66
154	1.51	2.81
216	2.12	4.27
278	2.72	5.48
340	3.33	6.71

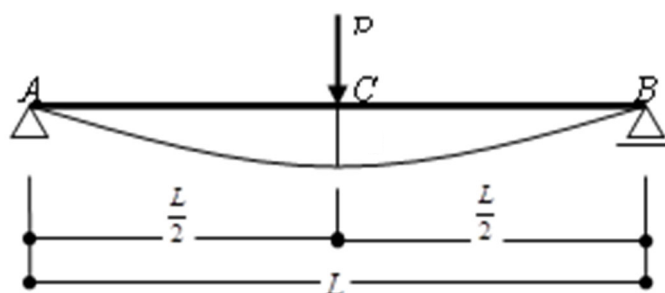
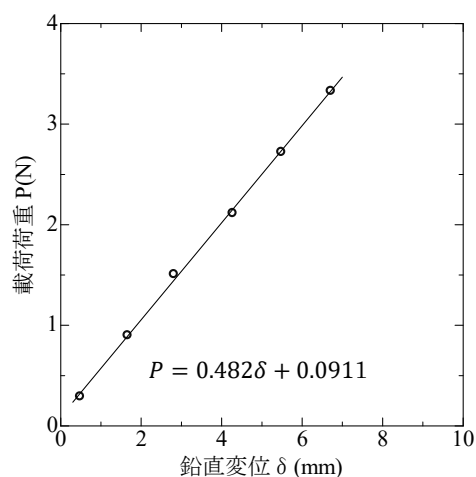
図 14 単純梁に鉛直荷重したときの中央点のたわみ δ 

図 15 単純梁の鉛直荷重実験による鉛直変位に対する荷重のプロット

表 8 理論固有周期の算定と実験固有周期との比較

模 型	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
模型高さ $H_m(\text{mm})$	640	525	450	400	360	330	305	285	200	100
上半分質量 $M(\text{kg})$	0.115	0.100	0.105	0.110	0.110	0.100	0.115	0.950	0.975	0.105
断面 2 次モーメント $I(\text{m}^4)$	$4/3 \times 10^{-11}$									
バネ定数 $K(\text{N/m})$	6.1	11.1	17.6	25.0	34.3	44.5	56.4	69.1	200	1600
理論固有周期 $T(\text{s})$	0.86	0.60	0.49	0.42	0.36	0.30	0.28	0.23	0.14	0.05
実験固有周期 $T(\text{s})$	1.16	0.73	0.52	0.45	0.36	0.37	0.30	0.23	0.17	0.06

柱材（檜板）の諸量： $b=20\text{mm}$ 、 $D=2\text{mm}$ 、 $E=2.0 \times 10^{10}\text{N/m}^2$

M : 模型上半分の質量(kg)

K : 模型のバネ定数(N/m)

H_m : 模型の高さ(m)

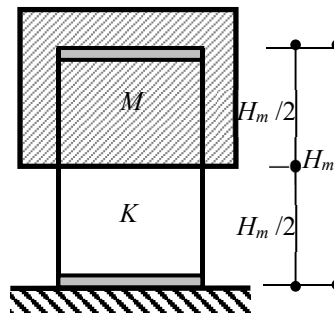


図 16 振動に関する質量の範囲

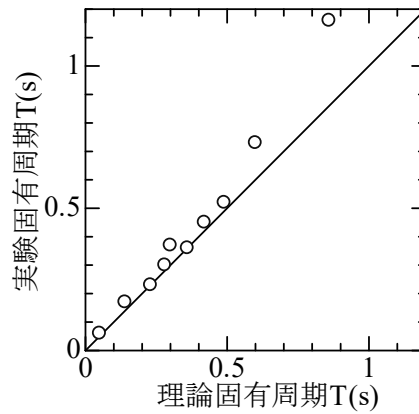


図 17 実験固有周期と理論固有周期の比較

6. コンテスト模型の地震応答

5.で求めた実験固有周期 T と減衰定数 h を用いて直接積分法により各模型のコンテスト加振波に対する時刻歴応答を計算した。

図 18、19 は、それぞれ築館第 1 波 500 ガル、築館第 2 波 1500 ガルに対する各模型の実験固有周期 T と減衰定数 h を用いて計算した加速度応答時刻歴波形である(築館第 1 波 1000 ガルについては、築館第 1 波 500 ガルを 2 倍したものなので図は割愛した。図 18、19 を見ると、特に模型 H、I の加速度応答が大きいことがわかる。

応答加速度の時刻歴波形から最大値を読み取り、模型の高さに対してプロットすると図 20 のようになる。ここで●、●、●はそれぞれ築館第 1 波 500 ガル、築館第 1 波 1000 ガル、築館第 2 波 1500 ガルに対するプロットである。模型の背が高くなると周期が長くなるからこのプロットの形状は図 8 の加速度応答スペクトルと類似した形状となる。

築館第 2 波 1500 ガルに対する最大加速度応答値で見ると背の高い模型(A、B)では 500cm/s^2 以下と小さく、200～300mm の模型(H、I)では 5000cm/s^2 以上と大きい。多くの場合●、●、●の順に応答値も大きくなっていくが、図 8 の加速度応答スペクトルで見たように築館第 1 波 1000 ガル(●)と築館第 2 波 1500 ガル(●)は低い模型(I)の応答の大小が逆転しており、また高い模型(A)の応答はほぼ同じである。これは、前述のように第 1 波と第 2 波の持つ周波数成分の違いが原因である。

図 20 には 4.4 の模擬コンテストで行った判定円柱の転倒の有無も加えてある(模擬コンテストで選ばれなかった D、F の 2 つの模型は他日行った結果で補足した)。ここで、○は転倒、○は不転倒を表し、○内の数字は判定円柱の高さ(cm)を表している。また、図には判定円柱の転倒開始加速度(表 3 参照)も—で示している。

模型 C の最大加速度応答値を見ると、築館第 1 波 500 ガルと築館第 1 波 1000 ガルでは 400cm/s^2 以下であり 6cm の判定円柱(転倒開始加速度： 653 cm/s^2)は転倒しないが、築館第 2 波 1500 ガルでは最大応答加速度が 1000cm/s^2 を超え判定円柱は転倒している。また、模型 G では、築館第 1 波 500 ガルの最大加速度応答値は 850 cm/s^2 程度であるが 6cm の判定円柱(転倒開始加速度： 653 cm/s^2)は転倒し、4cm の判定円柱(転倒開始加速度： 980 cm/s^2)は不転倒である。

模型 J では最大加速度応答が 1000 cm/s^2 を超えても 6cm の判定円柱(転倒開始加速度： 653 cm/s^2)が不転倒であり、このように振動数が高いと判定円柱は転倒しにくい傾向がある。これは式(5)が静的な慣性力に対して導かれたものであり、低振動数では適用性が高いが、高振動数では転倒し始めるとその方向と逆向きに慣性力が働き転倒を抑制するためと考えられる。

模型 B は築館第 2 波 1500 ガルで最大応答加速度が 430cm/s^2 であるが 8cm の判定円柱(転倒開始加速度： 490 cm/s^2)が転倒している。ただし、2018 年度は 8cm は不転倒

で、10cm(転倒開始加速度： 392 cm/s^2)で転倒している。同一条件で転倒の有無が分かれるのは判定円柱の個体差や据え付け方、入力波のばらつき等が原因と考えられる。

このように、背の低い模型では転倒開始加速度を超えても判定円柱が倒れにくくなること、同じケースでも判定円柱の転倒・不転倒の結果が変わることが稀にあるものの、判定円柱を用いればその模型の最大加速度応答値を簡単に知ることができる。

耐震コンテスト模型の築館NS第 1 波500ガルに対する加速度応答時刻歴波形

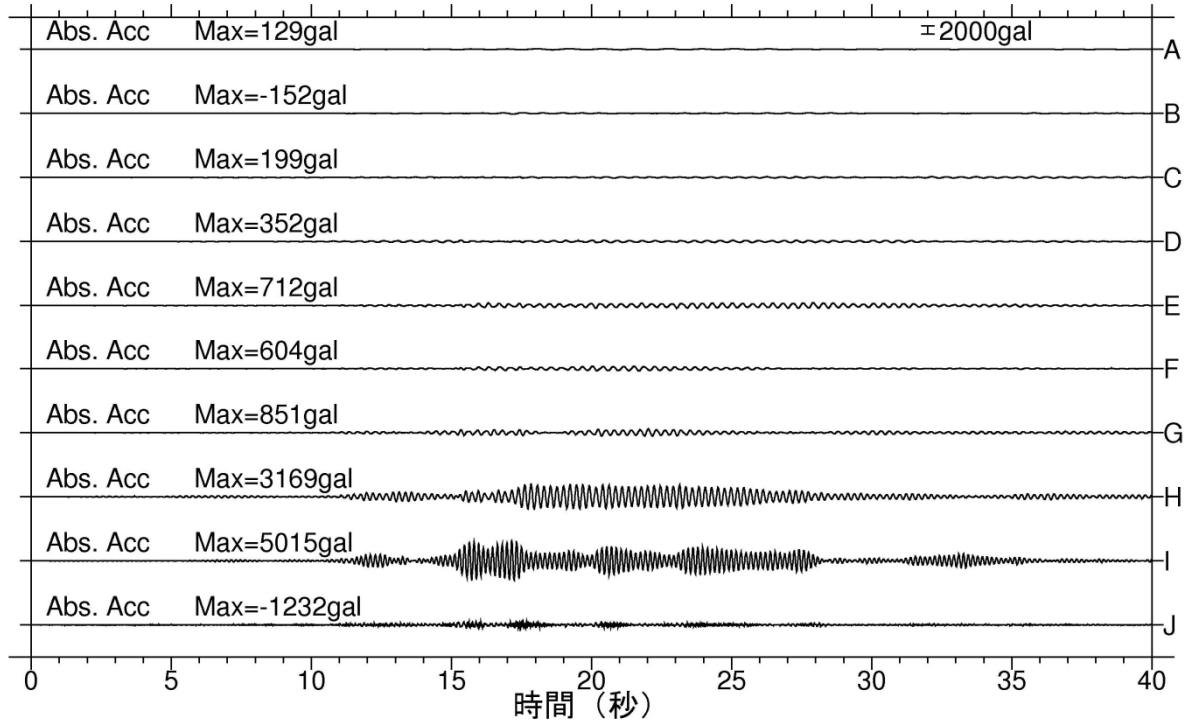


図 18 築館第 1 波 500 ガルに対する加速度応答時刻歴波形

耐震コンテスト模型の築館NS第 2 波1500ガルに対する加速度応答時刻歴波形

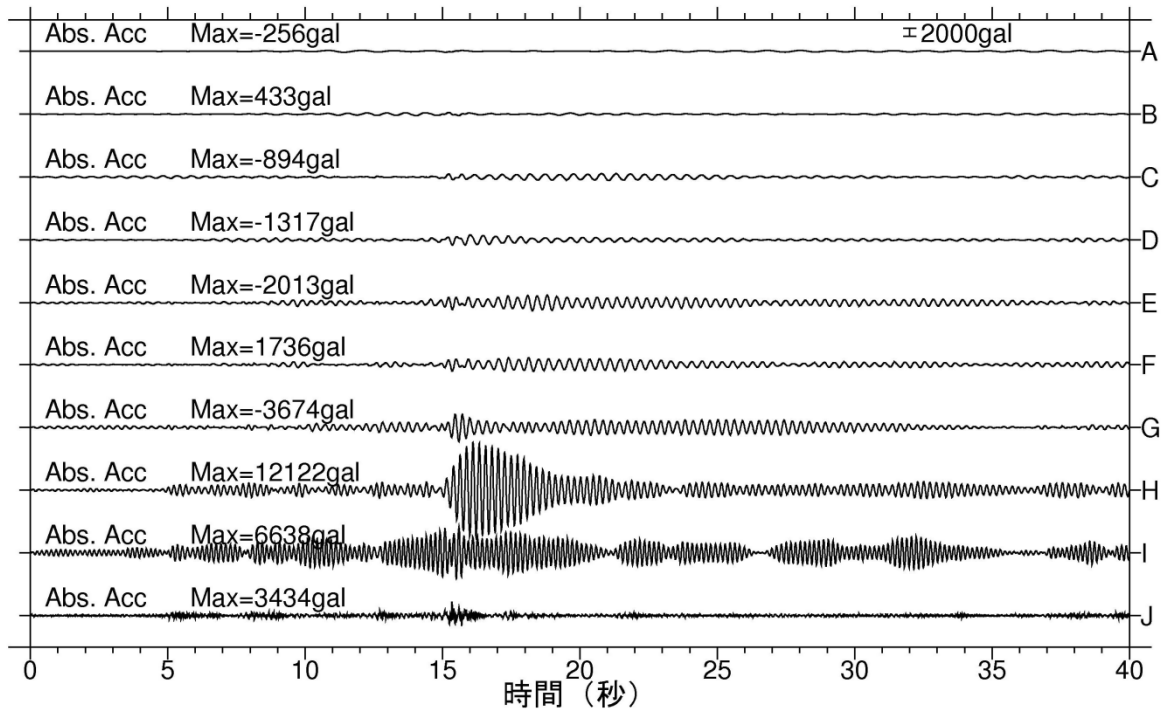


図 19 築館第 2 波 1500 ガル波に対する加速度応答時刻歴波形

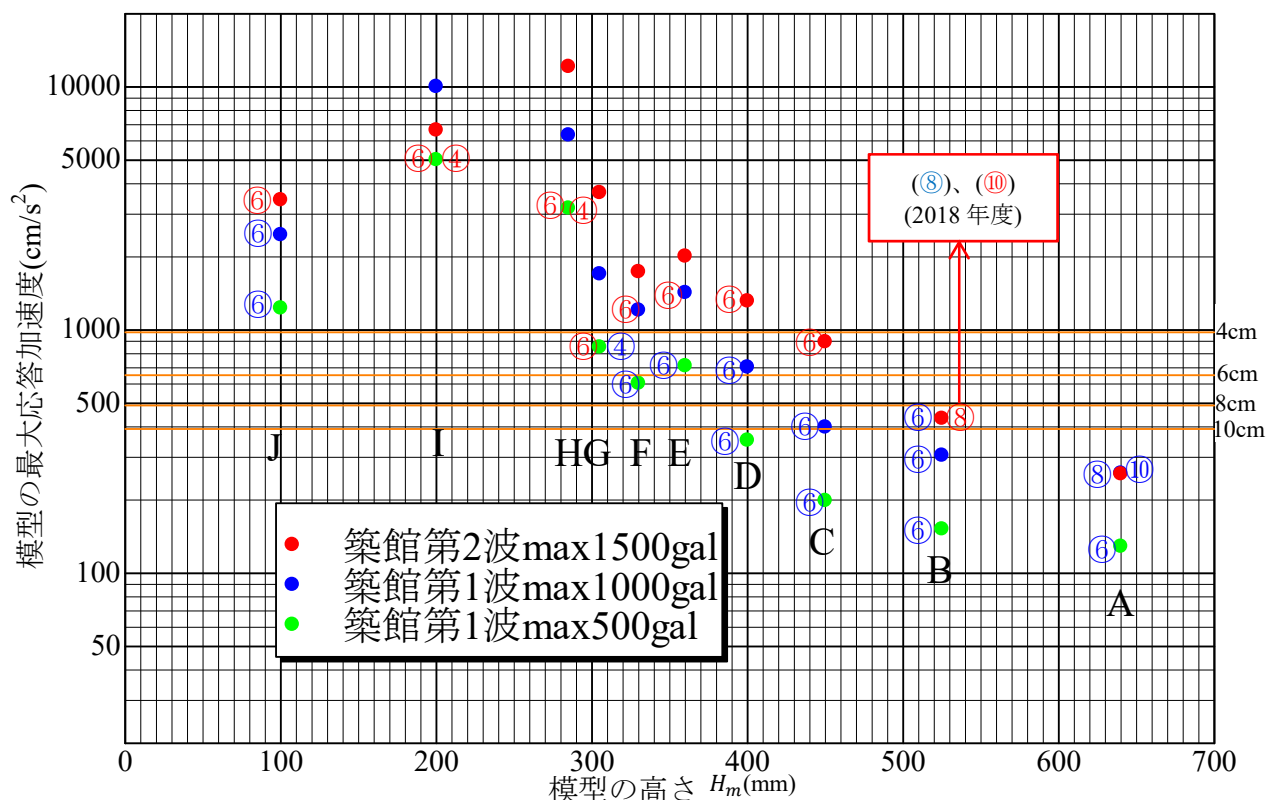


図 20 耐震コンテスト地震波に対する最大加速度応答値

7. おわりに

本稿では、プロジェクト 1 と夏休み科学体験教室でテーマとした「耐震コンテスト」についてその運用ルール、使用模型の特性、基礎となる理論について紹介した。本耐震コンテストでは地震力が小さくなる模型を地震に強い模型として勝者を決めるというルールにした。2014 年以後は、すでに準備されている模型を参加者が選ぶという形式を取ったが、より参加意識を高めるには自ら模型を作成して対戦する形式が望ましい。また、判定円柱の有無で勝敗がすぐにわかるとは言えるものの、模型が壊れるか否かで勝敗を決めた方が迫力がある。そこで、次の展開として強度型の模型を参加者自らが短時間で作成して対戦するような模型とルールを考えて再び科学体験教室に戻ってきたい。