

# 制震構造を活かした絶対に壊れないジェンガ

## 1. 研究の目的と意義

建物を倒れづらくするには免震、制震、耐震の三つの方法がある。その中の揺れと逆向きの力により揺れを抑える制震構造のひとつは、巨大な振り子を利用して地震に備える有効な手段の1つとされている。物理の授業で学んだことが最新技術として高層ビルに応用されていることを知り、実験装置であるジェンガを人工的な揺れに対して強固にすることで振り子の有効性を明らかにしようと考えた。

## 2. 研究の手法

### ①3つの倒壊対策の方法について

- ・免震…建物の土台と地盤の間に装置を挟み、揺れを伝えにくくする構造
- ・制震…揺れを吸収する装置を用いて、揺れを制御する構造
- ・耐震…建物自体を補強し、強度を高くする構造

### ②使用した材料・道具

- ・力学台車(地震による揺れを再現) ・おもちゃのジェンガ(建物を模型化)
- ・自作振り子(木材、分銅(ひも付き)) ・粘土(対照実験のため)

### ③実験方法

地震による揺れを抑える方法を模型化するために力学台車の上におもちゃのジェンガを載荷し、その上に振り子を置いて力学台車を静的(周期約1秒)、動的に振動を与える。その際、振り子のひもの長さ(0、1、3、5.5、8.5、10 cm)や置く階数(0~5段)、振幅(15、30、45 cm)を変えて、模型が崩れるまでの回数を数え、それぞれを比較して建物が倒れづらい条件は何なのかを調べる。対照実験として振り子のおもりの代わりに同質量(100 g)の粘土で実験を行った。

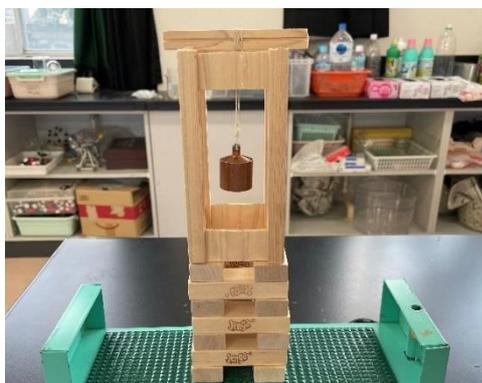


図1 振り子のひも 8.5 cm、ジェンガを振り子の下に置いたとき



図2 振り子のひも 8.5 cm、ジェンガを上下に置いたとき

## 3. 結果

表1 静的に(周期約1秒)揺らした場合(振幅 30 cm)粘土 表2

静的に(周期約1秒)揺らした場合(振幅30cm)振り子

段数	粘土 1回目	2回目	3回目	平均
0段	18	48	15	27
1段	6	8	4	6
2段	21	35	40	32
3段	3	48	4	18
4段	10	16	29	18
5段	15	5	5	8

振り子ひも 段数	8.5 cm 1回目	2回目	3回目	平均
0段	30	35	39	35
1段	25	16	15	19
2段	113	93	97	101
3段	25	34	39	33
4段	5	9	3	6
5段	25	8	39	24

表2では表1と比べ、4段の場合を除き、模型が崩れるのに要した揺れの回数が増加していることから振り子の制震効果が確認できる。

表3 静的に(周期は約1秒)揺らした場合(振幅30cm)

ひも 段数	0 cm	1 cm	3 cm	5.5 cm	8.5 cm	10 cm
0段	8	16	14	8	72	93
1段	18	17	12	32	6	149
2段	4	8	21	6	39	188
3段	32	29	19	82	101	163
4段	6	19	19	24	19	72
5段	27	7	12	7	35	85

表4 振幅15cm

ひも 段数	0 cm	1 cm	3 cm	5.5 cm	8.5 cm	10 cm
0段	60	98	103	72	90	130
1段	20	15	117	139	101	132
2段	19	12	44	213	127	147
3段	13	47	55	167	40	29
4段	52	33	24	24	41	48
5段	13	10	26	46	61	76

表5 振幅45cm

ひも 段数	0 cm	1 cm	3 cm	5.5 cm	8.5 cm	10 cm
0段	4	7	10	8	15	2
1段	6	10	4	7	5	4
2段	21	7	11	9	8	3
3段	21	13	4	5	5	4
4段	24	6	3	2	4	2
5段	7	5	2	7	3	9

表3では、ひも10cmで2段、表4ではひも5.5cmで2段と、それぞれ最適条件がある。

表 5 では、振り子の制振効果が小さい。

表 6 動的に(素早く)揺らした場合

ひも 段数	0 cm	1 cm	3 cm	5.5 cm	8.5 cm	10 cm
0 段	1	8	4	3	2	2
1 段	3	9	2	6	3	4
2 段	4	11	2	2	3	3
3 段	6	15	9	4	2	4
4 段	8	3	3	2	2	2
5 段	13	6	3	2	3	9

表 6 では、動的に(素早く)揺らした場合、振り子の制振効果がほとんどなかった。

#### 4. 考察

実験から模型の固有周期と一致する条件で、振り子の制振効果が最大になると考えられる。波の強さについて、正弦波では次式で表される。

$I=2\pi^2\rho v f^2 A^2$  波の強さ  $I$ ( $J/m^2 \cdot s$ )、媒質の密度  $\rho$  ( $kg/m^3$ )、速さ  $v$ ( $m/s$ )、振幅  $A$ ( $m$ )、振動数  $f$ ( $Hz$ )

揺れの波の強さは振幅が大きいほど大きいと考えられ、振幅 45cm では実験で用いた振り子の制振限界を超えたと考えられる。また、ビルの固有周期は同じ構造なら高さにはほぼ比例し、鉄構造の場合ビルの周期は高さの 0.03 倍となる。200m なら 6 秒である。一方、通常地震の揺れの周期は 0.5~2.0 秒と短く短周期地震動と呼ばれる。2~10 秒の周期の揺れは長周期地震動と呼ばれ、マグニチュード 8 以上の大規模地震で発生しやすい。高さ 200m ビルの固有周期は、この長周期振動と一致すると共振して揺れが一層大きくなる。よって本実験が示すように、限界はあるが、模型のような柔構造建築に振り子式の制振装置が有効である。

#### 5. 今後の課題

今回の研究で試みた揺れは周期が不正確のため機会があれば振動周期を正確に測定できる実験機器を用いて、周期を変えて振り子の制震効果を調べたいと考えている。

#### 6. 参考文献

- ・藤井良明『マンションの地震対策』岩波新書, 2006
- ・「超高層ビル屋上に巨大振り子、長周期地震動の揺れ半減」日本経済新聞社  
[https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2302D\\_T20C13A800000](https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2302D_T20C13A800000) (2022. 7. 12 参照)
- ・「地学班 五重塔に学ぶ制震技術とその応用」滋賀県立彦根東高校 <http://www.hikonehg-h.shiga-ec.ed.jp/blog/wp->  
(2022. 7. 12 参照)

#### 謝辞

本研究を進める際、東京都市大学建築都市デザイン学部建築学科の落合陽先生には大変お世話になりました。誠にありがとうございました。