

垂直差し込み式剛体振り子の地震動に対する応答

～吊り照明の安全性向上を目指して～

2年3組 島津 凜 2年3組 水谷 心実
2年4組 井上 直央 2年4組 木口 倅寧
指導者 松岡 拓哉

1 課題設定の理由

令和6年4月愛媛県南予地域では、震度6弱の大地震が発生し、今後も南海トラフ巨大地震をはじめとした大規模な地震が発生するリスクが高いとされている。地震発生時の教室での危険を考えた際、天井から吊り下げられている照明が目についた。現在、愛媛県南予15校の高校のうち10校で使われているが、地震が発生した際、吊り照明が地震動に共振し、大きく振動したり場合によっては落下するリスクが考えられる。しかし、吊り照明には手元の照度の大きさなどにおいて通常の貼り付け型の照明に比べ優位な側面も存在するため、今回は低コストで耐震性を向上させられる方法はないか検討する。



図1 教室の吊り照明

実際に教室の吊り照明の構造を調べてみると、固定子は垂直方向に設置されており（図2）、以後これを我々は、垂直差し込み式剛体振り子と呼ぶこととする。LEGO スパイクを用いて実験装置（吊り照明の模型及び地震動発生装置）を作成し、振動を与えることで、吊り照明の地震動に対する応答を調べる。また、適切な制振構造を施すことにより簡易的に安全性を向上させる方法について検討を行う。

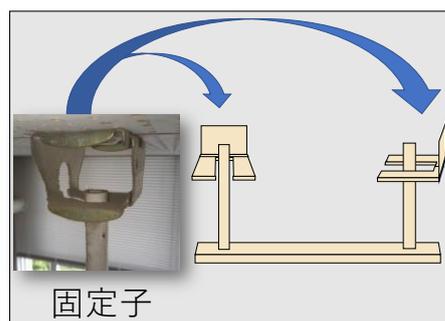


図2 吊り照明の簡略図

2 仮説

- (1) 外力を加えて揺らした吊り照明の様子をハイスピードカメラで撮影し解析すると、実測された固有周期は、約1.3sであると分かった。よって、南海トラフ巨大地震などの長周期地震動に対する共振のリスクは低いのではないか。
- (2) 垂直差し込み式構造により、地震動に共振する固有周期が変化するのではないか。
- (3) 照明の上部に固有周期が等しい振り子を取り付けることで振幅を小さくすることができるのではないか。

3 実験準備

- ① 実際の吊り照明と縦横比やおおよその質量分布を合わせた模型（図3）をLEGOブロックを用いて作成する。（棒の長さ：17.5cm、棒の質量：3.8g、照明部の質量：38.5g）

剛体振り子の周期を求める公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{I}{Mgd}}$ から、この模型の固有周期の理論値は、約

0.82s と求まる。

$$\begin{aligned} & \cdot T = \text{周期[s]} \quad \cdot M = \text{質量[kg]} \quad \cdot I = \text{慣性モーメント[kg} \cdot \text{m}^2] \\ & \cdot d = \text{支点と重心の距離[m]} \end{aligned}$$

- ② LEGO スパイクを用いて、モーターの回転を振動に変換するためのクランク機構を作成する。(図4)
- ③ 吊り照明の固定子を LEGO ブロックと銅板で再現する。(図5)
- ④ 模型の変位を測定するための距離センサー (イージーセンス) を装置に組み込む。(図6)
- ⑤ 出力するモーターの回転数は Physon のプログラミングで制御する。

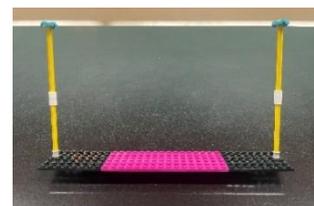


図3 吊り照明の模型

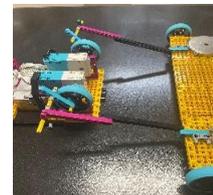


図4 クランク機構



図5 固定子

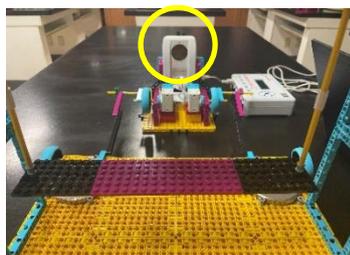


図6 距離センサー



図7 装置の全体図

4 実験 I

(1) 概要

固定子を吊り照明と同じく互いに垂直方向になるように設置した「垂直設置方式」と、比較対象として固定子を同じ向きになるように設置した「平行設置方式」を用意する。それぞれの設置方式について同様の振動実験を行い、固有周期の測定を行う。

(2) 方法

垂直設置・平行設置のそれぞれについて、モーターから任意の周期の振動を出力し、それぞれの振幅の大きさを比較することで、地震動に共振する固有周期を求める。出力する周期は、0.52s から 0.92s の間で 0.05s ずつ変化させ、出力する振幅 (回転運動の直径) は、8 cm とする。測定は各 30 回振動ずつ行い、その平均振幅をグラフにまとめることで、設置方式が模型の固有周期に与える影響を調べる。

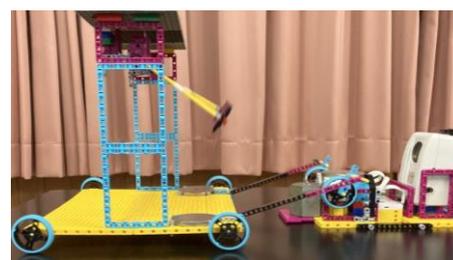


図8 模型の振動の様子

(3) 結果・考察

ある測定における模型の変位と時間の関係をグラフに表すと図9のような正弦波に近いグラフとなる。このグラフの各振動における最大値と最小値の差をとり、これを振幅とする。

地震動発生装置から出力した各周期ごとに振幅の平均値を求め、まとめたグラフが図10である。平行設置方式の固有周期は約 0.82s であり、これは剛体振り子の周期の公式から求めた理論値と一致する。一方、垂直設置方式の固有周期は約 0.72s であり、理論値よりも小さくなったことから垂直設置方式は、固有周期を小さくする効果があると分かる。したがって、

実際の吊り照明は、1.3s 以下で共振すると考えられ、仮説（1）で述べたように長周期地震動に対する共振のリスクは小さいと考えられる。一方、周期が 1.0～2.0s 程度の短周期地震動への対策が特に必要となる。また、それぞれの最大振幅に大きな差は見られない。したがって、垂直設置方式に振幅を抑制する効果はないが、金属棒の部分が2つとも外れ、吊り照明が落下する可能性は低くなると考えられる。

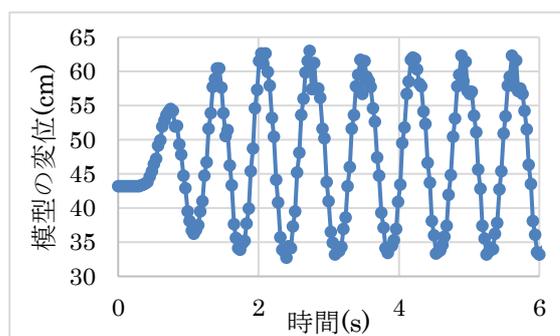


図9 振動中の模型の変位と時間の関係

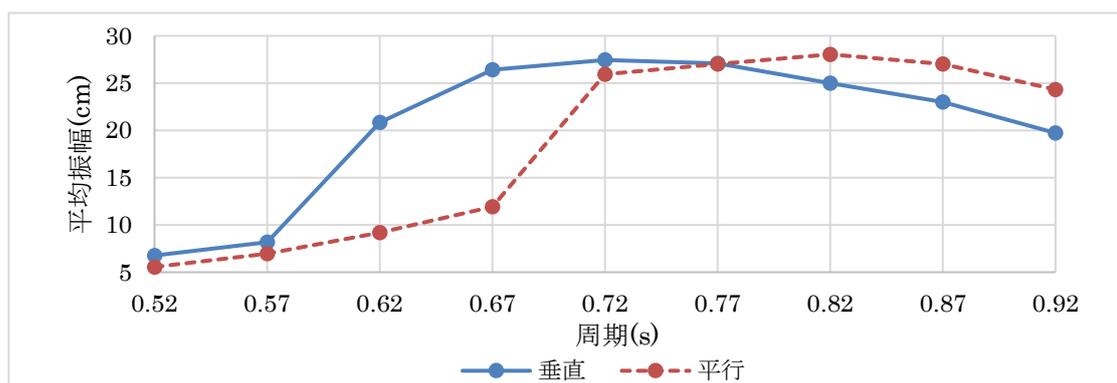


図10 与えた周期と模型の平均振幅の関係

5 実験Ⅱ

(1) 概要

模型に制振振り子を取り付けることで、振動抑制効果が得られるかを検証する。また、最も最も効果的なおもりの質量を求める。

(2) 方法

模型に制震振り子を取り付けた状態（図11）と、取り付けしていない状態のそれぞれについて、模型の固有周期（0.72s）の振動を与える。制振振り子のおもりの質量は、20g から 70g の間で、質量を 10g ずつ変化させていく。各 30 回ずつ振動させ、平均振幅をグラフにまとめる。制振振り子の糸の長さは、

$$l = \frac{gT^2}{4\pi^2} \text{ [m]}$$

より、周期 T に 0.72 を代入して、13cm とし、振り子の振動を安定させるため、実験装置から与える振幅を 3 cm に変更する。

(3) 結果・考察

図12より、制振振り子の質量が 50g のときに模型の平均振幅が 10cm で最小となること分かる。振り子を取り付けるために付け加えた棒（6.7g）を合わせると模型の質量は 52.8g であることから、吊り照明の質量と同程度の質量の振り子を取り付けることで振動を抑えられる効果を最も発揮できると言える。

図13は、制振振り子を取り付けた模型の変位と時間変化をグラフに表したものである。模型の振幅は周期的に変化しており、模型と制振振り子の間で周期的に運動エネルギーを交換

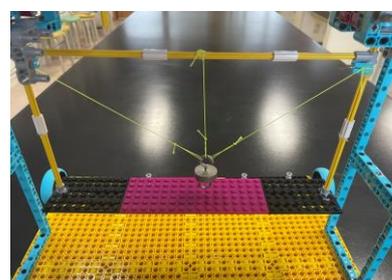


図11 制振振り子

し合っていることが推測できる。このような現象が起きる理由は、両者の振動時の位相がわずかに異なることで、相対的な振動が繰り返し続けるためだと考える。

制振振り子の質量が模型と比べ小さいときには、エネルギーが制振振り子側に移った際に振り子が大きく振動することになり、この振動を受けて模型の振幅も増幅させられていくと考えられる。また、制振振り子の振幅にも上限があるため、質量が小さすぎる場合にはエネルギーを逃がす効果が弱まる。一方、制振振り子の質量が模型と比べ大きいときには、エネルギーが制振振り子側に移った際の振り子の振幅は小さくなり、この側面においては、模型の振幅を減衰させていく。しかし、質量が大きい振り子は、地震動から過剰な運動エネルギーを供給され続けるため、こちらの影響の方が強く表れると、模型の振幅が増幅させられていってしまう。この分岐点となる点が、今回の実験から、模型と制振振り子がほとんど同質量となる点であると我々は結論付ける。

さらに、制振振り子を取り付けずに振動を与えた際の平均振幅は約 22.1cm であったことから、制振振り子により照明の振幅を約 0.45 倍に低減させる効果が期待できると分かった。

5 まとめ

実験より、垂直設置方式は固有周期を小さくする効果があることから、特に短周期地震への対策が必要であると分かった。また、制振振り子を取り付けにより振幅を低減する効果が期待でき、照明本体と同質量程度の制振振り子が最も効果を発揮すると考えられた。他の対策方法として、吊り照明を天井に完全に固定することで揺れを抑える方法も考えられるが、地震のエネルギーを逃がすことができず、固定子部分に大きな負荷がかかることが予測される。

6 今後の課題

研究を通して、教室の吊り照明の地震動に対する応答を明らかにすることができ、その対策についても明示できた。今後は、実寸大のスケールにより近づけて実験していきたい。

7 参考文献

- ・岡山県立玉島高等学校「300 円の安全対策～制震カバンで安全な学校生活」
- ・日本機械学会 機械工学辞典 <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/>

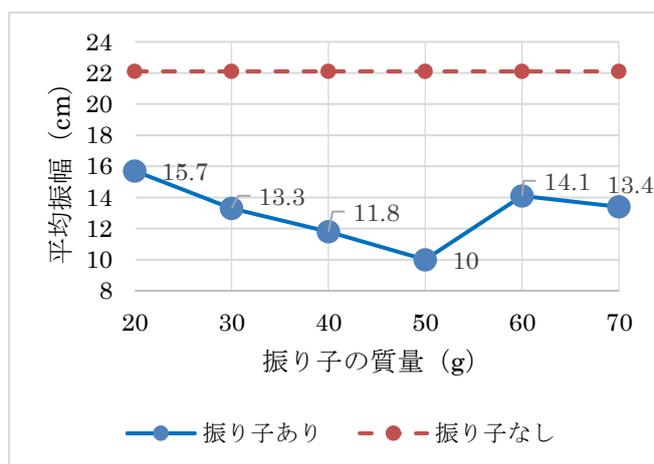


図 12 制振振り子の質量と模型の平均振幅の関係

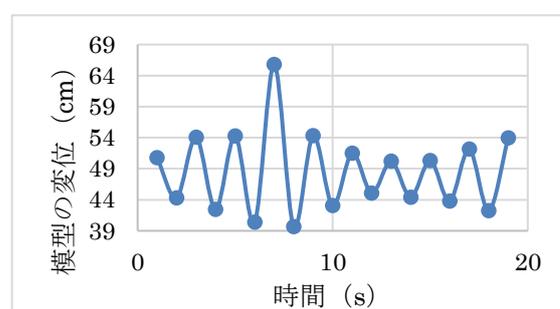


図 13 制振振り子取り付け時の模型の振動