

横揺れに対する円柱及び正角柱の運動の解析

三野 依那 正木 凜 溝淵 水月

要旨

本研究は周の長さを統一した空洞の柱に於いて、断面図形の違いにより横揺れを与えた際の揺れの大きさに違いが生じる原因について研究を行った。実験を通して、断面図形を正多角形及び円にした場合の、各図形の揺れの大きさの度合い及び動きの特徴について調べた。

結果として振幅 46mm, 振動数 6.3Hz の場合、揺れの小さい順に、円, 正方形, 六角形, 五角形, 三角形, 振幅 40mm, 振動数 6.3Hz の場合、揺れの小さい順に、正方形, 円, 六角形, 五角形, 三角形 となり角の数が奇数のものは揺れに弱く、円に近づく、すなわち角の数が増えるにつれて揺れの耐性が大きくなるわけではない。

横揺れに対する動きについては、正方形, 正六角形では短辺で着地する動き, 正五角形, 円では回転する動きがみられた。

1. 研究目的

被災地や難民キャンプなど、資源が限られた場所で、安価で丈夫な紙管を使って建築物を作る、建築家の坂茂氏の作品を見て、紙の強度に興味を持つようになった。そこで紙管をアレンジすることで、建築物をより丈夫で地震の揺れにも耐えられるようにすることができるのではないかと考えた。

揺れと柱の先行研究を調べていく中、小川信行氏の研究より、揺れを与えると、揺れは次第に減少することが分かった。また、そのエネルギーの減衰率は、「加振波数」、「形状」、「基盤条件」の三つに依存する。本研究は其中でも、特に「形状」に注目し、研究をした。

研究の目的は、同じ横揺れを与えた際に、断面図形の違いによる、柱の揺れの大きさに違いが生じる原因、および振動する際の動きの特徴を見つけることである。なお、本研究では円柱, 正六角柱, 正五角柱, 正四角柱, 正三角柱を用いており、以後の記述では、断面図形の名称として、円, 六角形, 五角形, 正方形, 三角形と呼ぶ。



図1 紙管

2. 研究方法

2-(1) 実験の目的

実験の目的は揺れの耐性の大きさの順位をつけることである。これにより、揺れを与えた際の、柱の上端に伝わる揺れが大きいもの、小さいもので分類し、規則性を見つけようと試みた。

2-(2) 実験器具

角柱 (図 2~6), 地震発生装置 (約 450mm×300mm×53mm), 距離センサー, インタフェース, ラボジャッキ, パソコン, カメラ

ソフト: Excel, PASCO Capstone (図 7)

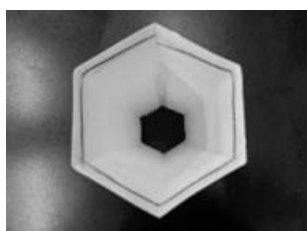


図2 正六角柱



図3 円柱



図4 正五角柱

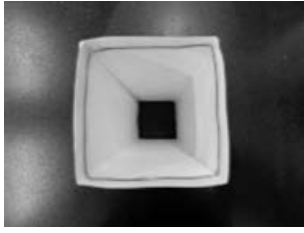


図5 正四角柱



図6 正三角柱

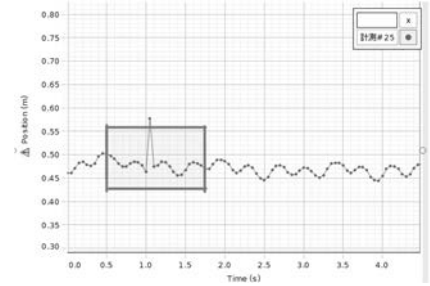


図7 PASCO Capstone

2-(3) 実験装置 (図8)

- i) 円柱および底面の図形が、六角形、五角形、正方形、三角形の角柱を紙と針金で作る。
(針金は、底面図形の形を保つために使用。) なお、柱の質量はすべて統一してある。
 - ii) パソコン、距離センサー、地震発生装置、柱をセットし、地震発生装置のスイッチを入れ、約10秒間距離センサーを用いて柱の運動の様子を計測。
 - iii) 距離センサーで、角柱と距離センサーの間の距離を0.050秒ごとに測定し、10秒間でとった約200個のデータをExcelに移す。
 - iv) 10秒間の距離の平均値を求める。(この位置を基準の位置とする。)
 - v) 約200個の値と基準の位置とのずれを計算する。
 - vi) v) で求めたずれを2乗した値の合計をデータの個数で割り、分散を求める。
 - vii) 10回分の分散の値の平均を求める。
- 図形間で比較し、分散の平均が小さいほど、柱の上端に伝わる揺れが小さい。

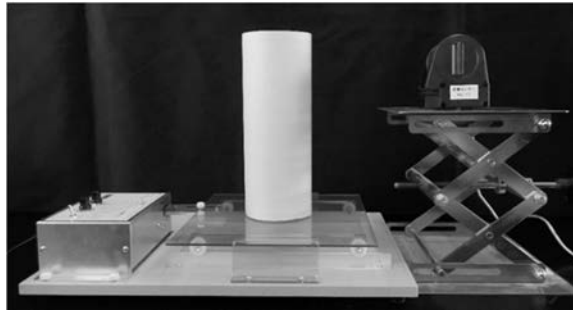


図8 実験装置

2-(4) 実験条件

以下の二種類の条件のもと実験を行った。

実験① 振幅 46mm, 振動数 6.3Hz

実験② 振幅 40mm, 振動数 6.3Hz

振幅、振動数の設定については、振幅や振動数が大きすぎる、または小さすぎる場合、柱がすぐに転倒し、柱ごとの揺れの大きさを比較しにくいいため、比較しやすい値に設定した。

2-(5) 予備実験

柱の向きについて、加振方向に対して、正方形、六角形はそれぞれの辺または角がくる場合があるため、向きによる変化がないかどうかを調べた。実験の結果、どちらの柱も、加振方向に辺がくる場合は、そのままの方向で動き、加振方向に角がくる場合は揺れを与えてすぐ回転し、加振方向に辺をおいた場合と同様の動きをする。したがって、本実験において、初期の位置による揺れの大きさへの影響は考慮しない。

2-(6) 動画分析について

柱の動きについて詳しく知るため、それぞれの柱ごとに上端及び横から動画を取り、特徴をとらえようと試みた。

- i) 柱の動きの軌跡を調べるため、柱の上端から動画を撮影し、辺上のある一点に着目して軌跡をたどり、グラフで再現した。(動画解析ソフト Kinovea 使用)

ii) 柱の運動の様子を横から撮り、動画をスローで再生し、動き（着地の仕方など）の解析を行った。（図9,10）

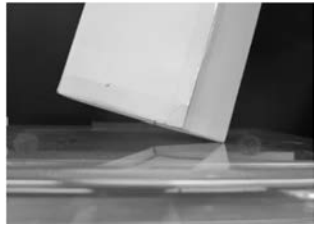


図9 横から見た運動の様子

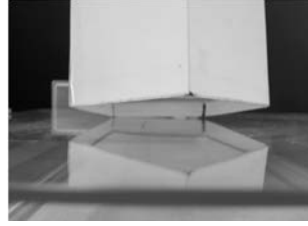
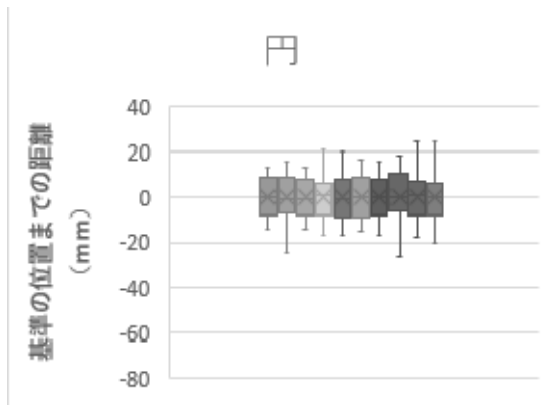


図10 下から見た運動の様子

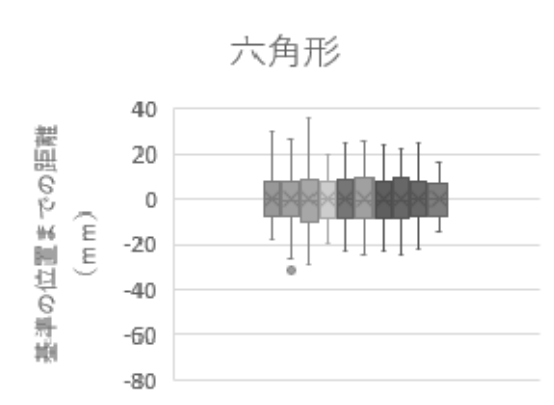
3. 結果

実験① 振幅46mm, 振動数6.3Hzの場合

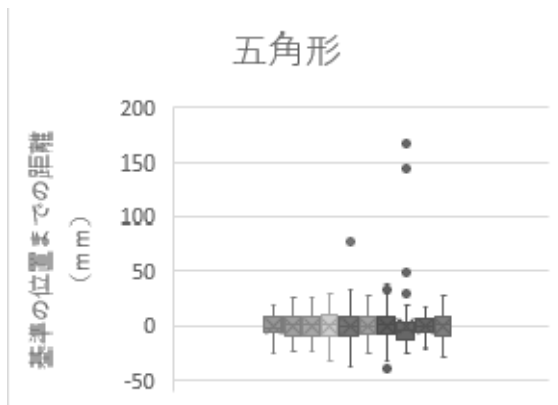
実験を行った際、三角形はすぐに転倒し、10秒間計測できなかったため記録はなし。グラフ1,2,3,4は各図形で10秒間計測して得られたデータを箱ひげ図にしたものである。縦軸は基準の位置までの距離を表している。五角形は動きが不安定であり、飛び値が多くなっている。



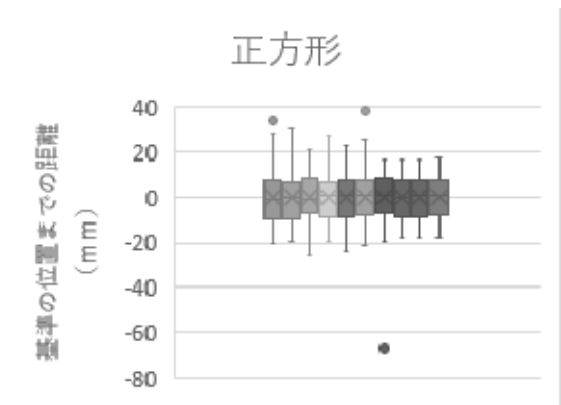
グラフ1 円の基準の位置までの距離



グラフ2 六角形の基準の位置までの距離



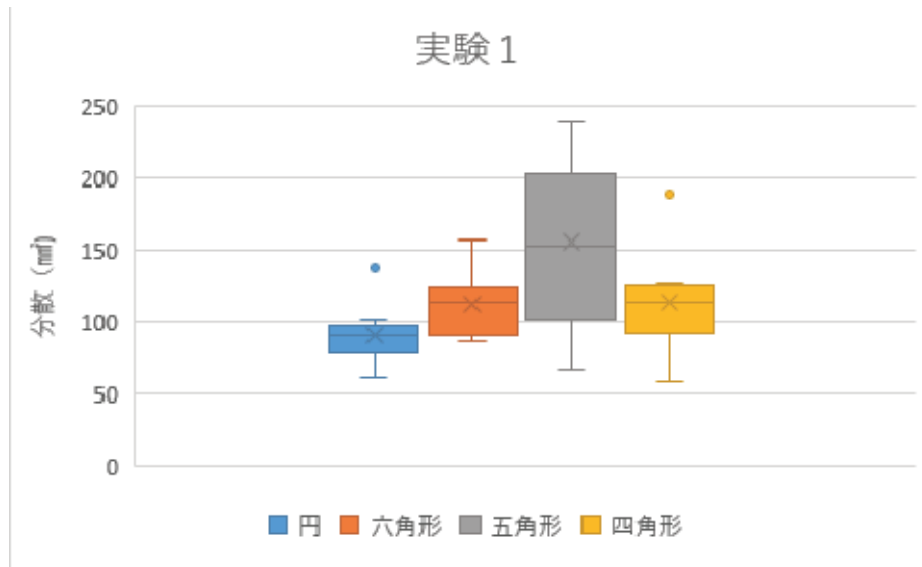
グラフ3 五角形の基準の位置までの距離



グラフ4 正方形の基準の位置までの距離

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
円	70.48	101.50	60.96	96.22	88.42	82.28	83.89	138.63	94.69	92.62	90.97
六角形	157.33	121.89	109.12	107.75	120.07	121.33	128.78	90.32	90.19	87.24	113.40
五角形	95.91	143.26	143.26	181.51	239.49	103.51	231.94	194.17	67.72	164.02	156.48
四角形	93.00	126.48	189.69	91.04	114.90	125.18	109.77	116.25	115.25	58.36	113.99

表1 各図形の10回分の分散とその平均 (mm)



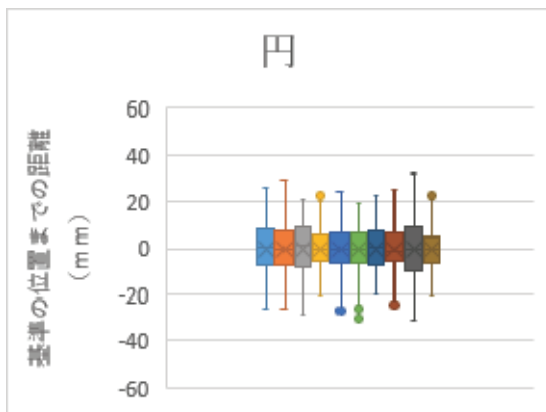
グラフ 5 各図形の 10 回分の分散とその平均

各図形の 10 回分の分散の値及び分散の平均値を表にまとめると表 1 のようになった。図形間で平均値を比べた結果、揺れの小さい順に、円、正方形、六角形、五角形、三角形 となった。また、グラフ 5 は、表 1 を箱ひげ図に表したものであり、箱の大きさによって、分散のばらつきが分かる。平均値はバツ印で表している。

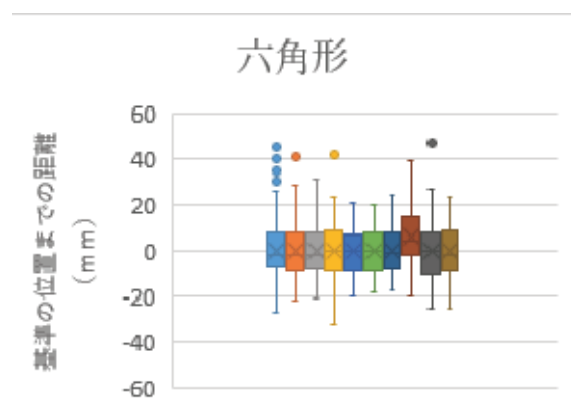
グラフより、五角形はばらつきが大きいことがわかる。その原因は、五角形は不安定なため実験ごとの差が大きいことが考えられる。

実験② 振幅 40mm, 振動数 6.3Hz の場合

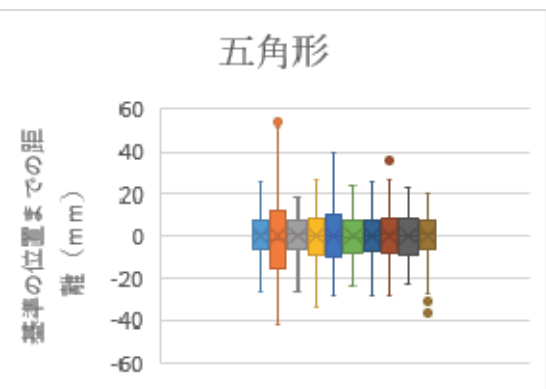
実験を行った際、三角形はすぐに転倒し、10 秒間計測できなかったため記録はなし。グラフ 6-9 は各図形で 10 秒間計測して得られたデータを箱ひげ図にしたものである。



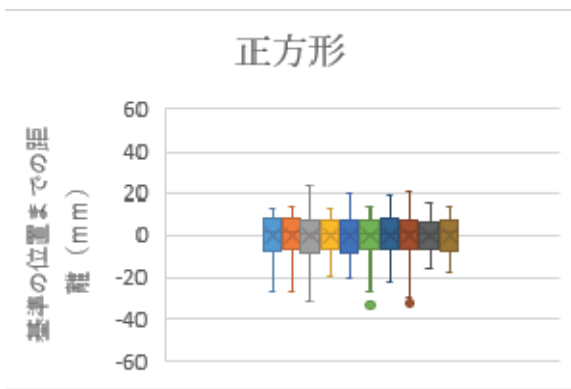
グラフ 6 円の基準の位置までの距離



グラフ 7 六角形の基準の位置までの距離



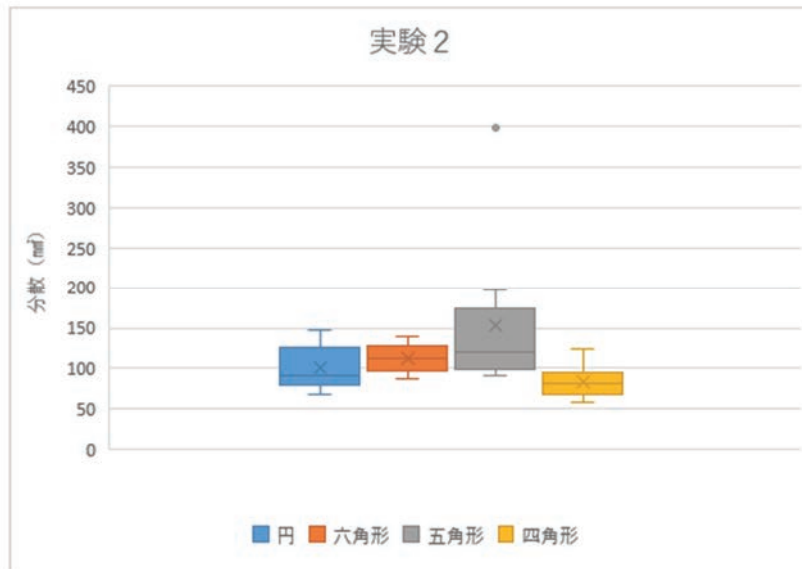
グラフ 8 五角形の基準の位置までの距離



グラフ 9 正方形の基準の位置までの距離

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
円	129.10	119.35	125.03	68.93	81.58	85.96	97.71	81.65	148.19	72.41	100.99
六角形	129.37	122.19	97.04	128.08	102.64	95.23	86.93	126.68	140.07	98.32	112.65
五角形	100.19	398.51	91.14	166.16	197.03	111.44	94.79	134.00	113.77	125.07	153.21
四角形	77.69	81.98	124.15	61.90	82.86	80.28	94.72	95.00	58.17	70.96	82.77

表2 各図形の10回分の分散とその平均 (mm²)



グラフ10 各図形の10回分の分散とその平均

各図形の10回分の分散の値と分散の平均値を表にまとめると表2のようになった。同様に計算した結果、揺れの小さい順に、正方形、円、六角形、五角形、三角形 となった。こちらにおいても、五角形は値のばらつきが大きいことがわかる。(グラフ10)

両実験の平均を比較した結果、円を除いた六角形、五角形、正方形においていずれも振幅40mmに比べ、46mmの場合の方が大きくなっている。円が異なる結果となった原因として、40mmの場合の揺れの大きさが大きかったことが考えられる。

4. 考察

4(1) 実験1,2の考察

五角形と三角形のように角の数が奇数のものは揺れに弱く、また、正方形は円よりも揺れに強くなることがあったため、角の数が多いほど揺れが小さくなるわけではないといえる。

そこで、柱の軌跡を調べ、その原因の解明を試みた。

4(2) 先行研究

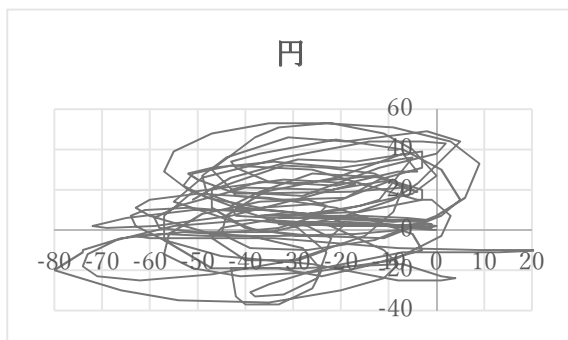
西村督氏の研究「水平動下で柱の回転運動を伴う伝統木造建物の動揺現象発生メカニズムの解明」では地震動を受ける石場建て伝統的木造建築物の円柱を想定した加振実験で観察された加振方向のロッキングから鉛直軸回りの回転挙動への運動推移が、これまで報告されていない臨界挙動であることを理論的に明らかにした。空洞ではない場合の柱の運動についての研究であったが、円柱および角柱の動きについて記述において本研究で観察された柱の動きと一致するものが見られた。本研究の実験の結果と合わせると、三角形では共通して加振方向へ転倒する動き、正方形、五角形、六角形、円では共通して鉛直軸周りに回転し、振動する動きが見られた。また、角柱は円柱とは異なる不連続な動きをすることを、五角形と六角形で見られた。

4(3) 動画分析よりわかったこと

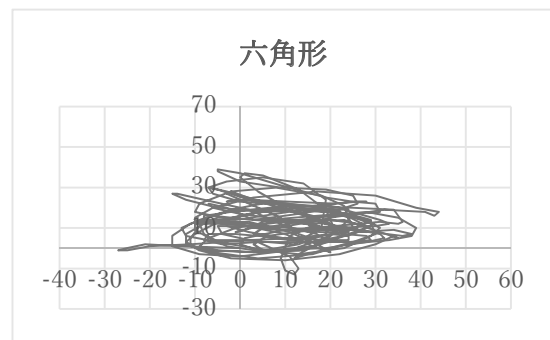
<上から見た場合>

グラフ11,12,13,14は、柱の辺上のある一点を基準に着目して、柱の動きの軌跡を表に表したものである。なお、グラフの座標軸の値が取る範囲はすべての図形で統一している。三角柱に関して、揺れを与えるとすぐ

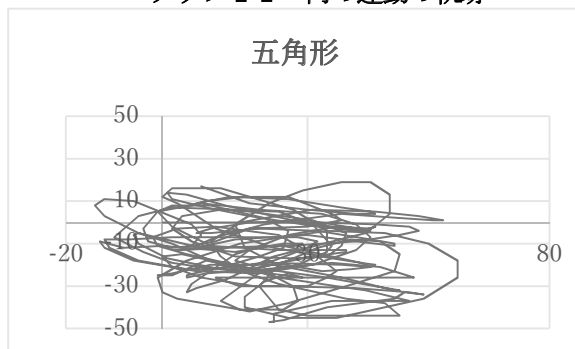
に倒れてしまったため、記録なし。軌跡の形状に着目すると、円は円、正方形は直線、六角形は広い楕円、五角形は狭い楕円を描き、角の数が多くなるにつれて、円を描くような軌跡になる。しかし、実験の結果より、正方形が円よりも揺れの耐性が大きくなることもあったため、軌跡で円を描くほうが安定するとは限らないと考えられる。



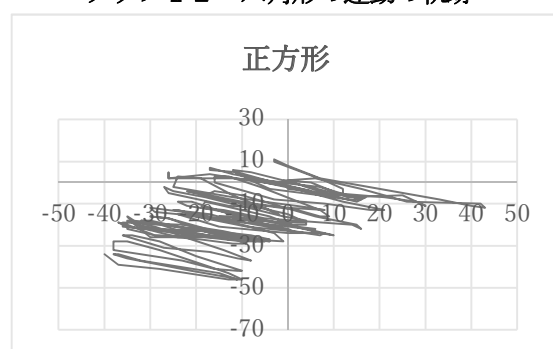
グラフ 11 円の運動の軌跡



グラフ 12 六角形の運動の軌跡



グラフ 13 五角形の運動の軌跡



グラフ 14 正方形の運動の軌跡

<横から見た場合>

横から見た動画をスローで再生し、動きの解析を行った結果、以下のことが分かった。円は回転し、時計回りや反時計回りに描く動きを繰り返す。正方形は対辺で交互に着地する。六角形は回転に対辺で着地する不規則な動きが加わり、五角形は回転により複雑で不規則な動きが加わる。

4(4) まとめ

上や横から見た動画を解析した結果を統合した結果、以下のことが分かった。正方形は対辺で交互に着地するため、直線的な軌跡を描き、五角形、六角形、円は回転する動きを含むため、円のような軌跡を描く。また、六角形は対辺で着地する、正方形に似た動きも含むため、軌跡で描く円は直線寄りで狭くなる。

以上のことを表にまとめると、次の表のようになる。(表3)

図形	三角形	正方形	六角形	五角形	円
実験	揺れ大きい (奇数弱い)	円、六角形より揺れ に強いこともある		揺れ大きい (奇数弱い)	
上 (軌跡)		直線	狭い楕円	広い楕円	円
上, 横		対辺で交互に着地	対辺で交互 に着地		
横			回転 不規則的な 動き	回転 不規則的な動 き	回転 時計回りや反時計回り の動きを繰り返す

表3 各図形の運動の特徴のまとめ

4(5) 追加

揺れの大きさと重心からの距離との関係についても調べた。結果として、重心から辺までの距離は小さい順に、正方形、五角形、六角形、円、三角形 となり、角から重心までの距離は小さい順に、円、六角形、五角形、正方形、三角形 となったため、特に関係性は見られない。

5. 結論

5-1) 結論

動画の分析より、正方形、六角形、五角形、円の順番に性質が近くなることが分かった。円と正方形はそれぞれ回転と対辺で着地するのみの動きを含むが、六角形や五角形は不規則な動きが加わり揺れの耐性が弱くなり、転倒しやすくなる。また不規則の動きの中でも、六角形は対辺で着地する不規則な動きが加わるが、五角形の場合はもっと複雑で不規則な動きが加わるためより弱くなる。

正方形は必ず辺で着地し、円も角張っておらず辺で着地するため安定である。一方で、六角形や五角形は辺と角両方で着地する。その中でも、六角形は辺で着地した後は再び辺で着地し、角で着地した後は再び角で着地し、ある程度の安定性はあるが、五角形の場合、辺で着地した後は角で着地し、角で着地した後は辺で着地し、不安定になる。

5-2) 課題

- ・接地面との摩擦について

本研究では、三角形は測定開始後すぐに転倒し、また五角形は不安定のため実験ごとのばらつきが大きく、実験データの精度を低めたため、実験の回数を増やし、精度を高める方法を再検討することが必要と考えられる。

- ・円は側面が曲面であるため、距離センサーが正確にあたらなかった。
- ・振動数や振幅を決める際に、物体の固有振動を考慮していなかった。
- ・柱は手作りであるため、データに影響を与えた可能性がある。

5-3) 今後の計画

- ①現段階で不規則と結論付けている五角形の動きの規則性について
- ②空洞でない場合の柱の動きについて
- ③他の条件（振動数、振幅、周の長さを変えた場合）下での揺れの大きさの順位について
- ④揺れの耐性が最も小さかった三角形の耐性を上げる方法について調べていきたい。

6. 参考文献

- ・小川信行「角柱のロッキングと転倒に関する一考察」 Report of the National Research Center for Disaster Prevention 1977-11
- ・Kimura, H., and K. Iida (1934): On rocking motion of column (1) (in Japanese). Zishin, vol. 6, No. 3
- ・Kimura, H., and K. Iida (1934): On rocking motion of column (2) (in Japanese). Zishin vol. 6, No. 4.
- ・Ikegami, R., and F. Kishinoue (1947): A study on the overturning of rectangular columns in the case of Nankai earthquake on December 21, 1946. Bull. Earthq. Res. Inst, vol. 25.
- ・Ikegami, R., and F. Kishinoue (1950): The acceleration of earthquake motion deduced from overturning of the gravestones in the case of the Imaichi earthquake on Dec. 26, 1949. Bull. Earthq. Res. Inst., vol.28
- ・Hatano, T. (1959): An examination of the rocking phenomenon (in Japanese). Transactions of The Japan Society of Civil Engineers, No.62.
- ・Mochizuki, T., and K. Kobayashi (1976): A study on acceleration of earthquake motion deduced from the movement of column (in Japanese). Transactions of The Architectural Institute of Japan, No. 248.
- ・西村督 金沢工業大学・環境・建築学部・准教授 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書 「水平動下で柱の回転運動を伴う伝統木造建物の動揺現象発生メカニズムの解明」
<https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-21656137/21656137seika.pdf>

7. 謝辞

ご指導いただいた、伊賀先生をはじめとする本研究に携わっていただいたすべての方々に、深くお礼申し上げます。ありがとうございました。