

蛇腹折り円筒の支承への利用

石川県立金沢泉丘高等学校理数科2年
1班 大塚直人 坂爪洸太 高瀬裕司 西山純矢 道下颯人

研究要旨

近年、高度成長期に作られた橋の老朽化が進んでおり、この老朽化した橋を作り直すことが求められている。我々は、従来のものより水平力に対する強度が高い、蛇腹折り円筒を用いた橋の支承を提案したい。本研究では、蛇腹折り円筒の利用のために、その基礎的な性質である鉛直方向の力に対する強度と水平力に対する強度を、段数変化や幅変化の観点から調べることを目的とした。結果は、鉛直方向に対する強度は段数、幅が少なくなるほど小さくなり、水平力に対する強度は、強度を最大にする適度な段数が存在するというものだった。

1.研究背景

近年、一枚の板を折り曲げることで、様々な機能を持たせる「折り紙工学」が注目されている⁽¹⁾。実用例として、ダイヤモンドカットを施した飲料缶や、折りたたみと展開が容易に行えるミウラ折りで畳まれたソーラーパネルなどがある。折り紙工学に興味を持ち、調べるうちに、「蛇腹折り円筒」というものを発見した。蛇腹折り円筒とは、台形が連なって側面が蛇腹折りと同様の形状をした円筒のことである。この円筒は、縦方向にばね性、横方向に弾塑性をもつ。この蛇腹折り円筒を社会に生かすアイデアとして、支承への利用を検討している。橋の支承は、地震が起きたときに生じる水平・鉛直の両方向の力に対して高い強度を持つ必要がある。蛇腹折り円筒は水平力に対して高い強度を持つと言われており、支承に活かせば橋の強度を更に上げられると考えている⁽²⁾。

2.先行研究

先行研究では、アルミニウムで10段の円筒を作った場合の強度のシミュレーションが行われていた⁽²⁾⁽³⁾。シミュレーションから、折りたたんでいない角柱の高さを基準としたときの相対的な高さが高くなるほど強度が高くなること(図1)、円筒の底面の角の数が多くなるほど強度が高くなること(図2)がわかっている。

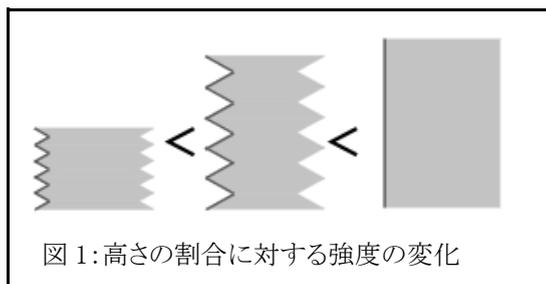


図1: 高さの割合に対する強度の変化

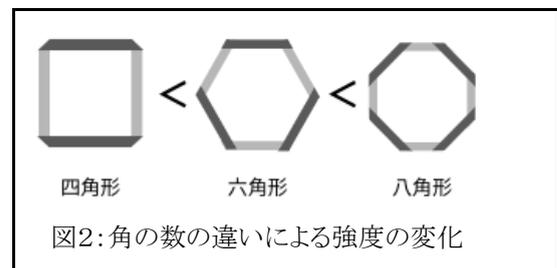


図2: 角の数の違いによる強度の変化

3.本研究で明らかにしたいこと

先行研究によって蛇腹折り円筒の高さを変化させたときの強度の変化が調べられていた。しかし、支承は橋の主桁と橋台の間の部品であり、支承の高さはその幅に合わせて作る必要がある。したがって、高さを一定にした上で、円筒の段数変化と強度の関係、幅変化と強度の関係をすることが重要となる。そこで、円筒の高さを揃え、円筒の段数変化、幅変化による鉛直方向の力に対する強度の変化や、段数変化による水平力に対する強度の変化について明らかにすることを本研究の目的とする。

4.実験で使用した蛇腹折り円筒について

側面に並んだ台形の枚数を段数とした。また、円筒を真上から見た時の、中心の穴から台形の上底までの距離を幅、上面の多角形の周の長さを円筒の周の長さとした。例えば、図3は、8段、幅10mm、周の長さ200mmの円筒である。

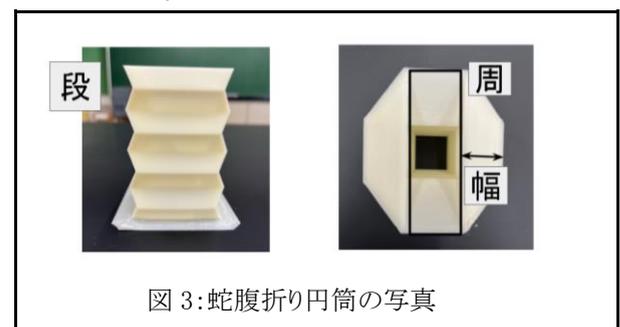


図3: 蛇腹折り円筒の写真

5.実験 1 の実験方法と予想される結果

《実験器具》

体重計 1 台、ジャッキ 1 個、スタンド 4 個

《ねらい》

蛇腹折り円筒の段数を 4 段、8 段、16 段と変化させたときの、鉛直方向の力に対する強度の変化を明らかにすることをねらいとした。

《実験手順》

1. 3D プリンターを用いて蛇腹折り円筒のモデルを作成した⁽⁴⁾。材料は ABS 樹脂とし、円筒の高さは 80mm、周の長さは 200mm とした。
2. 体重計の上に蛇腹折り円筒を載せ、その上にスタンドで固定したジャッキを設置した。この際、ジャッキは水平になるように取り付けた。
3. ジャッキについているレバーを回し、ジャッキを伸ばすことで円筒に力をかけていった。この時、蛇腹折り円筒にかかる力は体重計が示す値と等しくなるので、この値を記録した。
4. 力の大きさがある値を超えると、円筒が壊れ、体重計の値が急激に減少するので、その直前の値を円筒の強度として記録した。

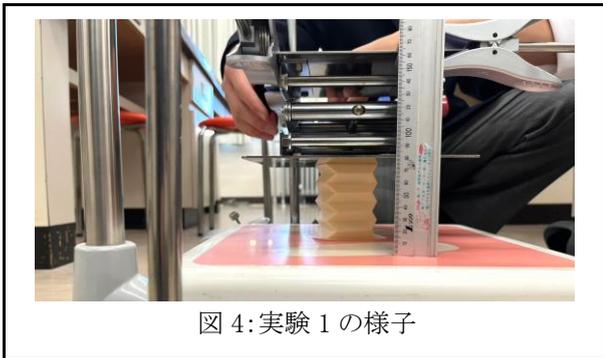


図 4: 実験 1 の様子

《予想される結果》

段数が増えるほど強度が高くなると予想する。蛇腹折り円筒に加えられた力は、側面の台形に分散されると考えられる。側面の台形の数には円筒の段数に比例して増えるため、円筒の段数が多いほど、より多くの側面に力が分散され、円筒の強度は高くなると考えられる。

6.実験結果

鉛直方向の力に対して段数が小さくなるほど強度が大きくなった。

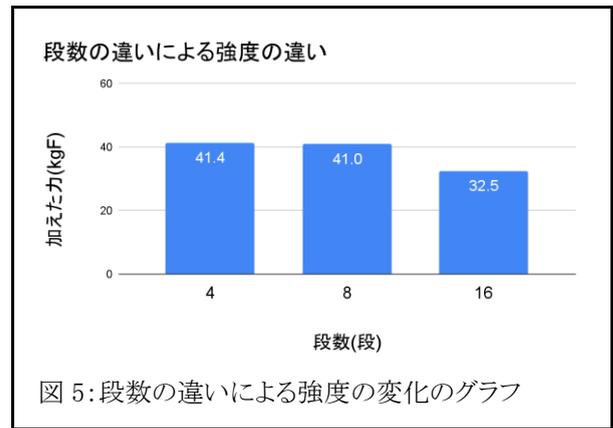


図 5: 段数の違いによる強度の変化のグラフ

7.実験 1 の結果の考察

円筒の段数が増えるほど円筒の強度が高くなるという予想に反し、段数が少なくなるほど強度が高くなった。理由は、段数が少なくなるほど側面の台形同士がなす角度が大きくなり、台形同士のなす角を狭める方向に働く力の成分が小さくなったことで、接合部が割れにくくなったからだと考える。

また、16 段の円筒には、バネのような他の円筒にはない強い弾性が見られた。実験で観測された体重計の値の急減についても、他の円筒と比べて減少幅が小さかった。壊れた後も負荷をかけてゆくと、力に応じて円筒の高さが縮んだが、加えた力が 60kgF になっても完全に壊れることはなかった。実験後、装置から取り出した円筒は、手で力を加えると縮んだが、手を離すと元の高さへと戻った。このような性質が生じた理由として、一度円筒をつぶしたことで、伸縮に伴って変形する箇所には多数のひびが入り、伸縮しやすくなったからだと考えられる。16 段以外のものに弾性が生じなかったことについては、16 段以外の円筒は伸縮に伴って側面の台形に生じる歪みが大きく、弾性が生じる前に、層がはがれる、ずれるなどして、蛇腹折り円筒の形を保てなくなったことが原因として考えられる。

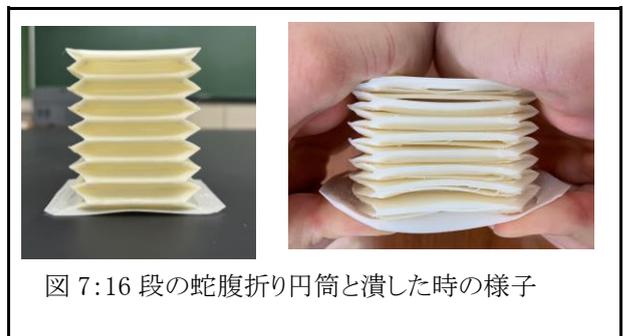


図 7: 16 段の蛇腹折り円筒と潰した時の様子

8.実験 2 の実験方法と予想される結果

《実験器具》

実験 1 と同様

《ねらい》

蛇腹折り円筒の幅を 5mm、10mm、20mm と変化させたときの鉛直方向の力に対する強度の変化を明らかにした。

《実験手順》

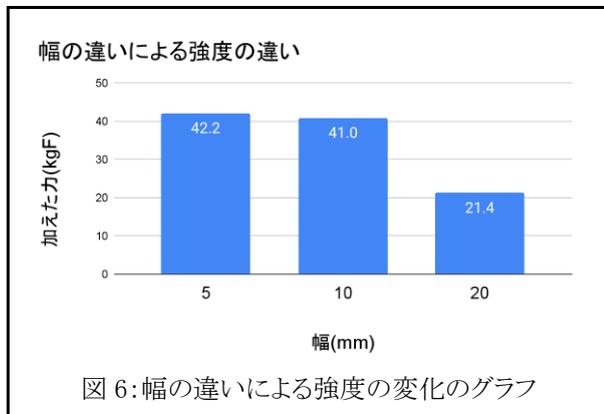
実験 1 と同様

《予想される結果》

側面の幅が小さくなるほど強度は高くなると予想する。これは、実験 1 の結果より側面の幅が小さくなるほど面と面の結合部分の角が大きくなり、力を加えた際に壊れにくくなると考えられるからである。

9. 実験 2 の結果

幅が小さくなるほど、鉛直方向の力に対する強度が高くなった。



10. 実験 2 の結果の考察

幅が小さくなるほど強度が大きくなるという予想は正しかった。幅が小さいほど、側面の台形のなす角は小さくなるので、実験 1 の考察で述べたことと同じことが成り立つ。

11. 実験 3 の実験方法と予想される結果

《実験器具》

体重計 1 台、ジャッキ 1 個、台 1 つ、固定具 1 つ

《ねらい》

蛇腹折り円筒の段数を 4 段、8 段、16 段と変化させたときの、水平力に対する強度の変化を明らかにした。

《実験手順》

1. 実験 1 と同様のモデルを作成した。また、モデルを固定するための固定具も 3D プリンターを用いて作成した。固定具の高さは、円筒の高さの半分である 40mm とした。
2. 体重計の上に適当な高さの台を載せた。体重計の横にジャッキを設置し、体重計上の箱より高くなるように伸ばしておいた。

3. ジャッキの上にモデルの下半分を載せ、固定具を被せてから体重をかけ固定した。
4. ジャッキをゆっくりと縮め、固定具と台で円筒を挟むことで水平力を加えた。
5. 力の大きさがある値を超えると、円筒が壊れ、体重計の値が急激に減少するので、その直前の値を円筒の強度として記録した。

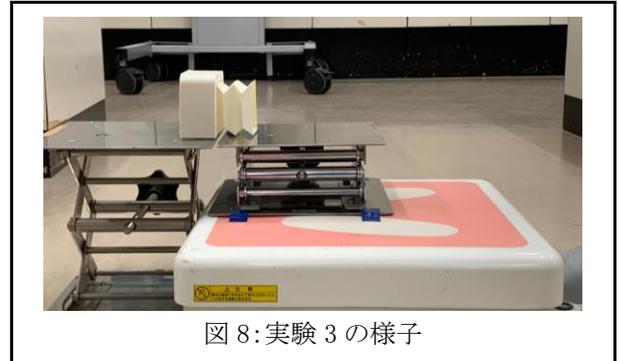


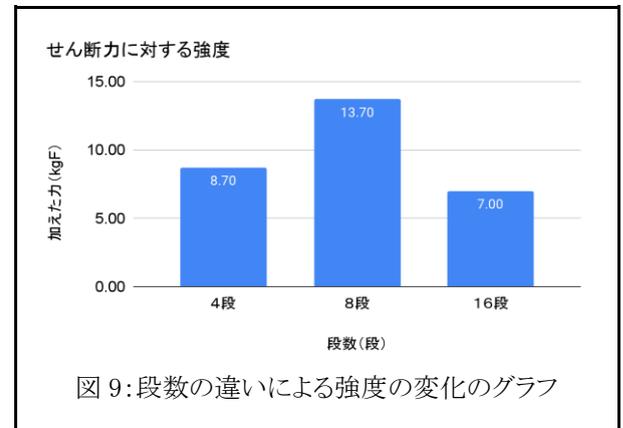
図 8: 実験 3 の様子

《予想される結果》

段数を増やすほどその形状はバネに近くなるため、強度は高くなると考えられる。

12. 実験 3 の結果

8 段の蛇腹折り円筒が最も強度が高く、16 段の蛇腹折り円筒が最も弱かった。



13. 実験 3 の考察

実験装置で円筒に力を加えると、固定具とジャッキから、互いに逆向きの力が円筒に働く。円筒の構造上、段数が多いほど 2 力の作用点の距離が小さくなり、円筒に働くモーメントが小さくなる。この影響により、4 段よりも 8 段のほうが、破壊時に体重計が示す値が大きくなったと考えられる。

8 段よりも小さい値を示した 16 段の円筒は、側面の台形と地面との角度が特に小さく、側面の台形が大きくせり出した形状をしている。これは「オーバーハング」と呼ばれ、写真のように樹脂が垂れ下がってしまい、一

一般的に 3D プリンターによる印刷が難しいとされている。この垂れ下がりにより、層同士の密着が弱くなり、測定結果が期待される値よりも小さくなってしまったと考える。今回作成したモデルでは見受けられなかったが、実験 2 で使用したような層の幅が大きい円筒についても、同様のことが発生すると考えられる。

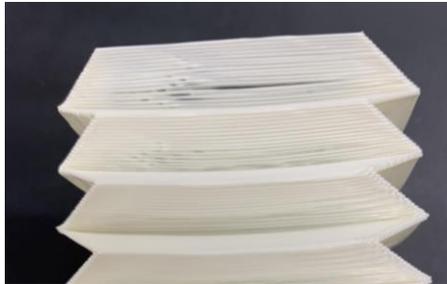


図 10: 垂れ下がった樹脂

14. 今後の課題

段数を適切に設定すれば、16 段の円筒に見られた弾性と、段数が少ない円筒の持つ強度を両立できると考えている。今回作成しなかった段数の円筒についても実験を行うことで、最適な段数を見出したい。

水平力に対する強度を測定した実験 3 については、加えられた力にモーメントも含まれており、正確なせん断強度を測定できていない可能性がある。円筒の両端を完全に覆い、力を加えていっても円筒が回転しないようにした上で破壊時のせん断応力を測定するなどすることで、より高精度な測定を実現したい。

3D プリンターで作成したモデルで実験を行ったが、段数が多い円筒については、3D プリンターの方式から、高精度な印刷が困難であった。円筒の作成について、形状によらず高品質で作成できる他の方法も考えておく必要がある。

15. 参考文献

1) 科研費(2020). 科学研究費助成事業 研究成果報告書.

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-18K18741/18K18741seika.pdf>.2022 年 6 月 19 日

2) 柴田勝也、長谷部薫、後藤文彦(発行年不明). 蛇腹折り構造を用いた支承の挙動.

<https://www.str.ce.akita-u.ac.jp/~gotou/tebiki/pdf/sy11si.pdf>.2022 年 6 月 15 日

3) 石崎博之、後藤文彦(発行年不明). 伸縮できる円筒折り紙構造の弾塑性挙動.

<https://www.str.ce.akita-u.ac.jp/kouzoug/pdf/so10is.pdf>.2022 年 6 月 20 日

4) 後藤文彦、鶴田翔(発行年不明). 蛇腹折り円筒の力学的挙動と 3D プリンターの可能性.

<https://www.str.ce.akita-u.ac.jp/~gotou/tebiki/pdf/s013ts.pdf>.2022 年 6 月 22 日