

飛び移りを伴う螺旋折り円筒の挙動

土木環境工学コース 7015831 中村 夏紀
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

折り紙構造とは紙やアルミなどのような薄いものに折り紙のように折り目を入れた構造である。缶や自動車、建築物などにも利用されており、中でもミウラ折り¹⁾は宇宙船のソーラーパネルにも応用されている。螺旋折り円筒もまた折り紙構造の一つであり、螺旋折り円筒の上端に荷重をかけると回転しながら折り畳むことができ、また展開させることもできるものである。螺旋折り円筒の折り畳まれ方や特徴を理解することで、工事現場の仮囲いや災害時の応急構造物、医療器具などへ応用することも期待できる。そのため本研究では螺旋折り円筒を応用していくにあたって半径や高さ、角の数などの条件の変化による折り畳まれやすさの違いを有限要素解析ツールの Salome-Meca を用いて解析していく。

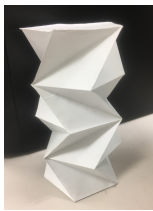


図-1 折り畳み前



図-2 折り畳み後

2. 解析手法

図-3 に示すように α, β に一定の条件が成り立つ時、螺旋折り円筒を折り畳むことができる。角数、半径、高さなどを決めたら Salome-Meca より螺旋折り円筒のジオメトリを作成し、計算した回転角の分円筒の上端の全ての角を回転させる。螺旋折り円筒に対して鉛直下向きに荷重をかけた場合の挙動を解析するのだが、今回は変位制御とし、どのくらいの変位の時にどのくらいの応力がかかっているのか

を見ていく。螺旋折り円筒の上に載荷線固定線に平行な薄い箱を作り、この箱と螺旋折り円筒の載荷線との変位を共有している。よって(箱の変位) = (螺旋折り円筒の変位) となるので、箱の変位を見ることが螺旋折り円筒の変位も分かる。見ていきたいのは変位と荷重の関係なので、応力に箱の面積をかけることによって荷重を算出する。解析は変位制御で行うが、まず線形解析を行ってみた結果を図-5 に示す。線形解析では、円筒がそのまま潰れ、円筒上部が外側に広がった変形となっており、螺旋折り円筒の折り畳み挙動を追跡することはできない。次に、幾何学非線形解析を行った結果を図-6 に示す。幾何学非線形解析では、螺旋折り円筒を構成する三角形の面の弾性変形により折り畳み現象が発生する様子を再現できている。このときの荷重-変位関係を図-7 に示すが、最初 圧縮 (負) を受けながら円筒上面が初期値 0 の変位から、折り畳まれることで変位が増加していき、荷重があるピークに達すると、そこから圧縮力が除荷されていき、荷重が引張力に転じる。つまり、荷重を載荷しなくても勝手に縮もうとする飛び移りのような現象が起きていると考えられる。そして、その引張力が 0 になるところで、完全に折り畳まれることが確認できる。



$$\alpha = \frac{\pi}{n}$$
$$\beta = \arcsin \frac{\sqrt{h^2 + (2r \sin \frac{\theta}{2})^2}}{2r}$$

h : 高さ, n : 角数
 r : 正 n 角形の外接円半径
 θ : 上下面の相対ねじれ角
 θ は h, r, n によって定まる

図-3 回転角

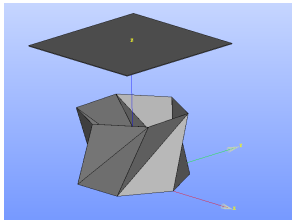


図-4 解析する際のジオメトリ

3. 数値計算

今回は4角～8角と12角の6通りで解析を行った。高さ、半径、厚さは全て100mm, 80mm, 0.1mmとし、折り目はヒンジとなっている。厚さの内側の線を下端は固定線、上端は载荷線としている。変位制御であり、螺旋折り円筒が完全に折り畳まれるまでの挙動を見たいため、変位を100mmまでと設定している。螺旋折り円筒の上部にある箱は200mm, 200mm, 0.1mmなので、Salome-Mecaにより算出された変位に対する応力に箱の面積をかけ、荷重を求める。

角の数を増やしていくと折り畳まれるのに必要な荷重が小さくなっていくことが分かる。角の数を増やすと円柱の形に近づいていくが円柱は折り畳むことができない。そのためどこかで角数が増えると必要な荷重が小さくなるという傾向に変化があると予想し解析を進めていたが、角が増えると解析も難しくなっていく。12角の解析まで行うことができたがここまでは変化がなく荷重がどんどん0に近づいていくことが分かった。

また4角のみ他のものと比べて荷重の増減が激しい。これは螺旋折り円筒は高さ、半径、角数の関係によって折り畳む際に座屈してしまうことがあるためである。今回の半径と高さとの条件では4角以下の螺旋折り円筒の場合座屈することになる。そのため座屈している変位で荷重が大きく変動していると考えられる。

4. まとめ

幾何学非線形を考慮した変位制御の解析を行うことで、螺旋折り円筒の折り畳み挙動を再現することができた。螺旋折り円筒の折り畳みは、飛び移りのような現象で、ある程度圧縮を加えると、ある臨界点で勝手に折り畳まろうとする挙動が確認できた。角数を変えて解析したところ、角数が多くなるほど、小さい荷重で折り畳めることが分かった。螺旋折り円筒は、角数が多くなるほど製作は困難になるだろうから、必ずしも角数の多い円筒の方が応用性があるとは言えないが、こうした螺旋折り円筒の特徴的な挙動が明らかになることで、より実用的な螺旋折り円筒の応用が期待される。

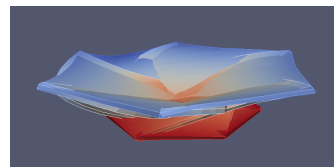


図-5 線形解析での折り畳み

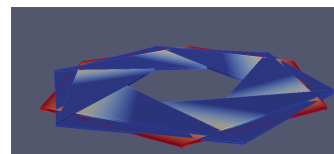


図-6 幾何学非線形解析での折り畳み

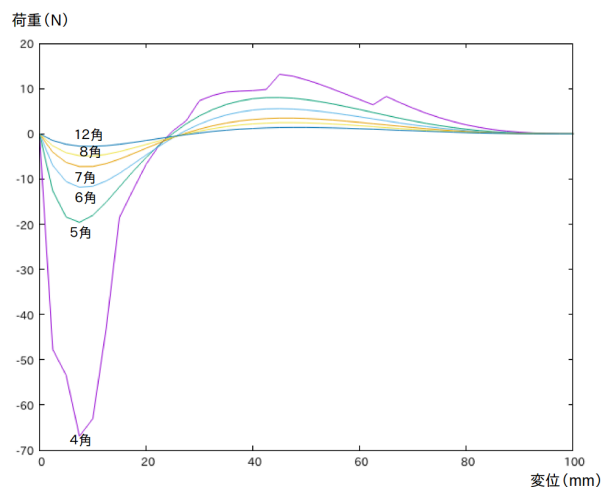


図-7 それぞれの角数での変位荷重曲線

参考文献

- 1) WIRED「折り紙の構造」を統計力学で分析すると、新しい世界が見えてきた