

折り畳み可能円筒折り紙構造の挙動

環境構造工学講座 05605 稲荷 優太郎
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

ミウラ折り¹⁾などに代表される折り紙工学を利用した構造は、コンパクトに折り畳んだ状態で宇宙空間まで運搬してから展開して利用する太陽電池パネルなどの柔軟宇宙構造物への適用に留まらず、航空機、自動車、建築物、更には缶飲料などの身近なものまで、さまざまな分野に応用され得る可能性を秘めていることが近年になって注目され始めている。互い違いに並ぶ台形の折り曲げパターンにより構成される折り畳める円筒折り紙構造は、材料の弾性変形によって伸び縮みが可能である。そこで本研究では、アルミの円筒折り紙構造が引き伸ばし・押し畳みで破壊するメカニズムや、折り紙構造が破壊せずに、ばね性能を発揮する折り目パターンについて数値的に解析する。

2. 解析手法

ここで扱う円筒折り紙構造は図-1のような周 s 、高さ h の 1 枚の板を貼り合わせてできる円筒に、図-2 のような台形パターンの折り目をつけたものである。折り方によって図-4 のように周方向の折り目の数を変えることもできるし、図-5 のように初期高さ a も変えることができるが、隣接する折り線が重なったりせずに折り紙構造として成立するには、以下の条件を満たす必要がある。

$$n > \frac{hm}{s} \left(\frac{1}{\tan \frac{2\pi}{m}} + \frac{1}{\sin \frac{2\pi}{m}} \right) \sqrt{1-a^2} \dots\dots\dots (1)$$

今回は、図-4 のように周方向の折り目 (内側の空洞部の射影が作る多角形の角数) が 4 角形、6 角形、8 角形の、3 種類を解析する。その 3 種類それぞれで、図-5 のように無載荷の初期状態で完全に折り畳まれて高さのない状態 (初期高さ=0) から、無載荷の初期状態で高さ方向の折り目がない角柱 (初期高さ=1) まで変化させて解析した。3 種類の折り畳み段数は 20 段で一定にする。解析には、GPL ライセンスの有限要素解析ツール CalculiX²⁾ を用いる。材料諸元は、板の厚さ 0.2mm、円筒の高さ $h=12\text{cm}$ 、円筒の円周 $s=18.85\text{cm}$ 、ヤング率 69GPa とする。要素は 6 節点 3 角形シェル要素を用い、要素分割は 1 個の台形につき 12 分割する。境界条件は、図-6 のように、下端開口部の各節点を、 x, y, z 方向変位を拘束し、上端開口部の各節点の x, y 方向変位を拘束する。載荷方法は、上端開口部の各節点に等分布に載荷する。

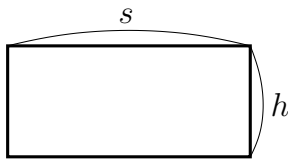


図-1 1枚の板

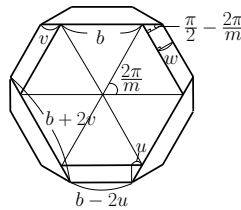


図-2 周方向折り目

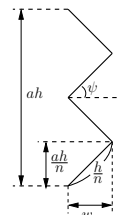


図-3 高さ方向折り目



図-4 周方向パターン

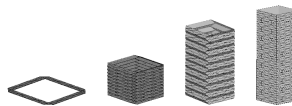


図-5 初期高さ

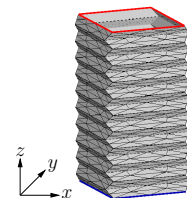


図-6 境界条件

3. 計算結果

載荷節点の荷重の総和を、上端開口部の 1 節点の軸方向変位で除して、ばね定数を求める。ばね定数と初期高さの関係を図-7 に示す。圧縮荷重でも、引張荷重でもばね定数は同じになる。4, 6, 8 角形の曲線が重なっていることから、周方向の折り目 (内側の空洞部の射影が作る多角形の角数) によるばね定数の違いは小さいことがわかる。また、

初期高さが0.9より高くなると、ばね定数は急激に増加していることから、初期高さの影響が大きいといえる。初期高さが1の角柱のばね定数は、4角柱が198MN/m, 6角柱が204MN/m, 8角柱が207MN/mになった。

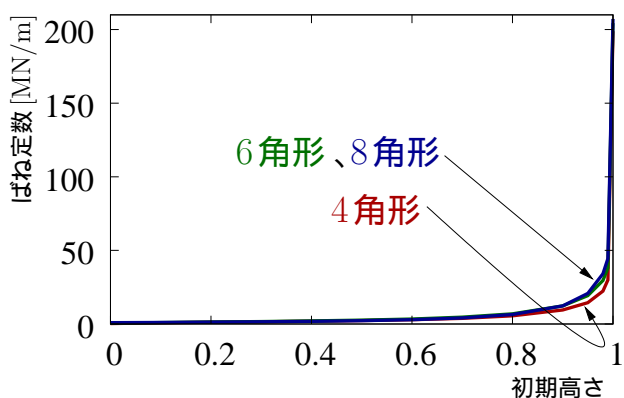


図-7 ばね定数

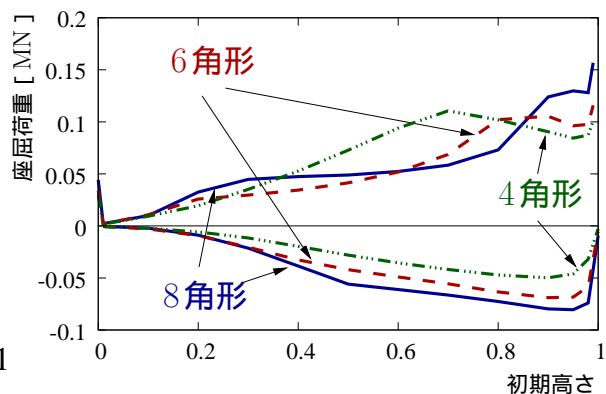


図-8 座屈荷重

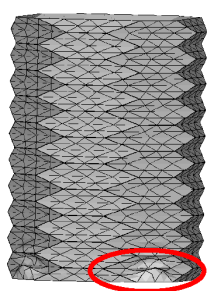


図-9 引張による座屈モード

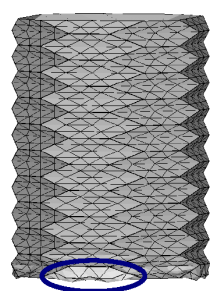


図-10 圧縮による座屈モード

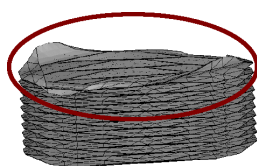


図-11 初期高さが低い時の座屈モード

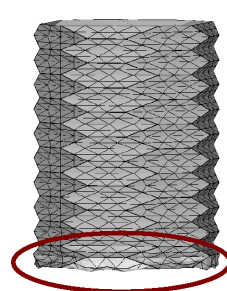


図-12 初期高さが高い時の座屈モード

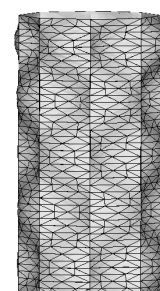


図-13 八角柱の座屈モード

座屈荷重と初期高さの関係を図-8に示す。引張による座屈荷重を正で、圧縮による座屈荷重を負で示す。圧縮による座屈は周方向の折り目が多いほど、座屈荷重が大きくなっている。つまり、周方向の折り目が多いほど座屈しにくくなっている。また、初期高さが高くなるほど座屈荷重が大きくなっている。初期高さが1で急激に座屈荷重が小さくなっているのは、座屈モードが異なるせいだろう。高さ方向に折り目がついている場合は、1部の折り目パターンに局部座屈が生じ、高さ方向に折り目がついていない場合(角柱)は、図-13のように側面が板として座屈しているようだ。引張による座屈は、周方向の折り目や初期高さの違いによる規則性は、見られなかった。荷重方向の違いによる座屈モードの違いを図-9、図-10に示す。引張による座屈モードは図-9のように谷折り部に局部座屈を生じる傾向があるが、圧縮による座屈モードは図-10のように山折り部に局部座屈を生じる傾向がある。初期高さの違いによる座屈モードの変化を図-11、図-12に示す。初期高さの低い時の座屈モードは図-11のように載荷端側に局部座屈を生じる傾向があるが、初期高さの高い時の座屈モードは図-12のように固定端側に局部座屈を生じる傾向がある。

4. まとめ

- ばね定数は圧縮も引張も同じになる。初期高さが高くなるとばね定数が大きくなることから、ばね定数は初期高さに依存していることが確認された。初期高さが0.9付近まではばね定数が低いままで、0.9付近から急激に硬くなっているため、初期高さが0.9未満のものが折り畳み・展開性能が優れているといえる。
- 圧縮による座屈は、周方向の折り目を増やすと座屈荷重が大きくなった。また、初期高さが高いほど座屈荷重が大きくなった。引張による座屈も、似たような傾向はあるが圧縮の場合ほど規則的ではない。
- 座屈モードは圧縮・引張や、初期高さの影響を受けて様々なパターンを示す。

参考文献

- 1) Koryo MIURA : Proposition of Pseudo-Cylindrical Concave Polyhedral Shells, ISAS report, Vol.34, No.9, pp. 141-163, 1969.
- 2) <http://www.calculix.de/>