

伸縮できる円筒折り紙構造の弾塑性挙動

環境構造工学講座 07604 石崎 博之
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

伸縮できる円筒折り紙構造は、初期高さや折りパターンを調節することで、鉛直方向のバネ剛性とせん断方向のバネ剛性を比較的自由に設定できる。本研究では、こうした円筒折り紙構造の性質を、いくつかの機能をあわせ持つ支承として利用する可能性を検討している。例えば、機能分離型支承などでは、積層ゴム部分に鉛直方向の荷重支持や水平方向の移動を受け持たせ、内部の鉛プラグのせん断による塑性変形によって地震エネルギーを吸収する機能を受け持たせるが、円筒折り紙構造の鉛直方向、せん断方向のバネ剛性や、せん断による弾塑性変形を、こうした支承の機能として利用できないだろうかということである。伸縮できる円筒折り紙構造の鉛直、せん断バネ剛性については、比較的自由に設定できることを著者らの一部が確かめているが¹⁾、本研究では、更にせん断による弾塑性特性について数値的に検討する。

2. 解析手法

本研究で対象とする伸縮できる円筒折り紙構造は1枚の板に折り目をつけてつくられた円筒である。周方向パターン数は図-1に示すように4、6、8角形の3種類を使い、初期高さが0(完全に折り畳まれる状態)から1(角柱)に変化にしたがってどのような挙動を示すか数値解析する。なお、折り畳み段数は20で一定にしている。数値解析には有限要素解析ツール CalculiX²⁾を用いる。境界条件は、鉛直、水平方向荷重ともに、下端開口部の各節点を完全拘束、上端開口部の各節点を荷重方向以外の完全拘束とする。また、円筒折り紙構造を支承に利用する場合、1枚の板をプレス加工などで折り曲げて溶接接合すると溶接部が弱点となることが想定され、接

合しない切れ目のある円筒としての利用も考えられる。切れ目のあるモデルは、切れ目部に節点を2個設けて二分された節点と同じ座標点に位置する。

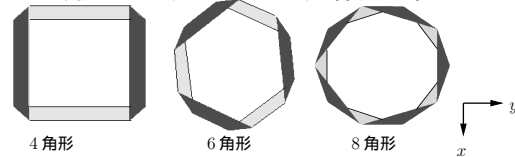


図-1 周方向パターン数

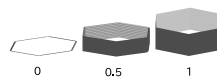


図-2 初期高さ

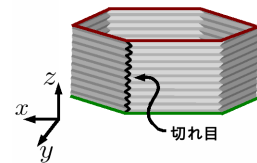


図-3 境界条件

3. 数値解析

荷重の載荷方法は、鉛直、水平どちらも上端開口部の各節点に等分布荷重とする。荷重 $P(10\text{kN})$ と載荷方向変位 δ から円筒のバネ定数 $k = \frac{P}{\delta}$ を求め、材料のヤング率から求まる円断面円筒の軸方向バネ定数 $k_{円} = \frac{EA}{\ell}$ で無次元化する。なお、 A は開口端部断面面積である。円筒の材料諸元は表-1に示す。

表-1 材料諸元

厚さ t	3mm
円筒の高さ h	20cm
円周 s	30cm
ヤング率 E	206GPa
ポアソン比	0.30

切れ目のない円筒に対して、有限要素解析の荷重と変位の関係から求めた鉛直バネ定数とせん断バネ定数を無次元化して図-4に示す。鉛直バネは、初期高さが高くなるほど大きくなり、特に初期高さ0.8付近から急激に大きくなる。一方、せん断バネは、初期高さが高くなるほど小さくなる傾向があり、

初期高さ 0.2 程度以上では、それほど大きくは変化しない。4, 6, 8 角形の断面形の変化に対しては大きな変化はないが、角数の少ない断面の方がやや小さめのバネ定数となる。

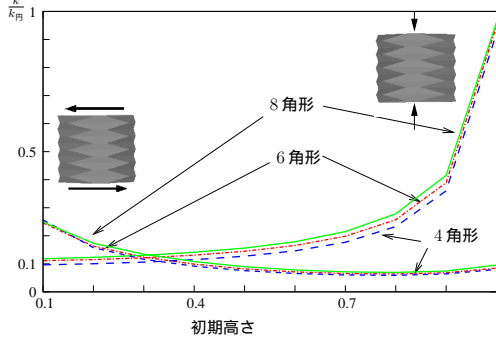


図-4 バネ定数の無次元化 (切れ目なし)

同様に、切れ目のある円筒に対して求めた無次元化バネ定数を図-5 に示す。全体的な傾向は、切れ目のない場合とほぼ同様であるが、切れ目のある円筒の方が鉛直で 2 割程度、せん断で 5 割程度 バネ定数が小さくなる。

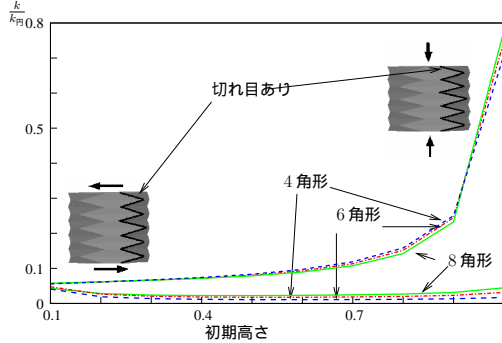


図-5 バネ定数の無次元化 (切れ目あり)

この円筒構造を鉛直バネと水平バネの機能を併せ持つ支承として利用することを考えた場合、橋梁の自重や活荷重を支持し得る大きめの鉛直バネと地震による水平変位を吸収し得るやわらかめの水平バネの組み合わせを有する初期高さ 0.9 付近の折り目パターンが候補となる。そこで、初期高さ 0.9 の円筒に対して、せん断外力を加えた弾塑性解析を行う。弾塑性モデルは、 $E\varepsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^{n-1} \sigma$ で表される Ramberg-Osgood 則において $\alpha = 0.5$, $n = 100$ 降伏応力 $\sigma_0 = 245\text{MPa}$ とする (図-6)。切れ目のない円筒に対する水平荷重と変位の関係を図-7 に示す。いずれの断面の円筒でも荷重-変位曲線は、荷重が 40kN 付近から塑性化により剛性が低下しはじめ、特に断面の角数が少ないほど低い荷重で剛性が

低下する。同様に、切れ目のある円筒に対して求めた水平荷重と変位の関係を図-8 に示す。全体的な傾向は、切れ目のない場合とほぼ同様であるが、切れ目のある方がより小さい荷重で塑性化が起こり剛性も低下している。

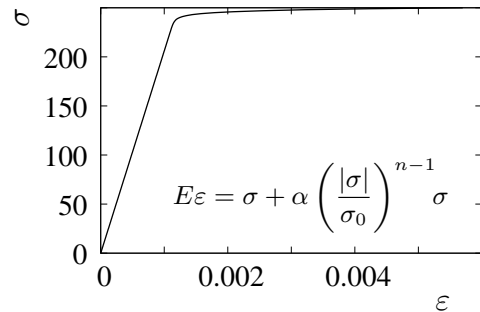


図-6 弾塑性モデル

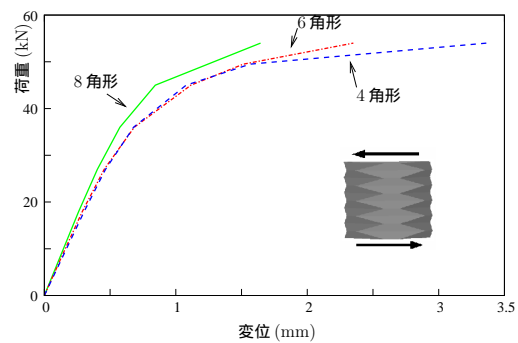


図-7 荷重-変位曲線 (切れ目なし)

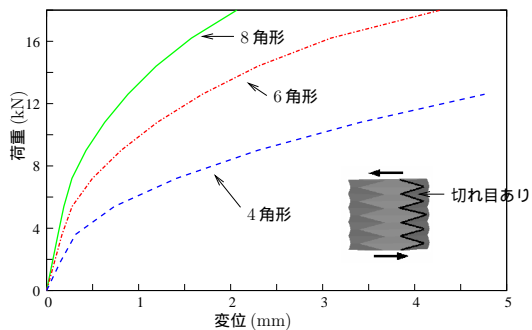


図-8 荷重-変位曲線 (切れ目あり)

4. まとめ

伸縮できる円筒折り紙構造の鉛直バネ定数は、初期高さ大きいほど大きくなる一方、水平バネ定数は初期高さが大きくなるほど小さくなる傾向がある。角数による違いはあまりないが、角数の少ない円筒の方がバネ定数が小さくなる。せん断を受けた場合の弾塑性挙動は、角数の少ない円筒ほど低い荷重から塑性化による剛性低下が認められる。

参考文献

- 1) 柴田勝也, 後藤文彦: 折り畳み円筒折り紙構造のバネ性能, 平成 21 年度 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), I-27, 2010.
- 2) <http://www.calculix.de/>