

蛇腹折り構造を用いた支承の挙動

環境構造工学講座 修工 10-182 柴田 勝也
指導教員 長谷部 薫
後藤 文彦

1. はじめに

近年、薄い1枚の板を折り曲げて様々な機能を持たせることのできる折り紙工学を利用した構造が注目されており、宇宙構造などで知られるミウラ折りでは折り畳みの観点に注目し衛星などの構造物を小さく折り畳んでから宇宙空間へ運搬し、そこから展開させて使用するという利点が挙げられる。このことから、運搬するときコンパクトにできるためコストを削減することができる。また、折り紙工学は自動車のエアバック、建築物、医療として心不全の患者に用いられるなど様々な分野で利用され、より広い領域での応用が期待されている。

本研究では、蛇腹折り円筒が持つバネ特性とせん断による弾塑性特性を橋梁の機能分離型支承のように利用することを想定している。実際の機能分離型支承では、通常時や地震時の鉛直力や水平力を積層ゴム部分に受け持たせて、内部の鉛プラグのせん断による塑性変形によって地震時のエネルギーを吸収している。そこで、蛇腹折り構造の鉛直方向、せん断方向のバネは、通常時のバネ支承として期待し、地震時の水平振動のエネルギーをせん断による塑性変形で吸収する機能について、有限要素モデルに交番载荷を行うことで検討する。

2. 解析手法

解析方法として、オープンソースの有限要素解析ツール CalculiX を用いて、蛇腹折り円筒をモデル化する方法について説明する。円筒に近い構造に互い違いの台形の折り目を交互に配置したシェル構造を構成し、要素は6節点3角形シェル要素を用いて1つの台形の折り目に対して12の要素で構成させる。周方向の角数(周方向の1枚の台形の折り目)を周方向パターン数、高さ方向の段数(高さ方向の1枚の台形の折り目)を高さ方向パターン数と称

し、パターン数は互い違い台形の折り目の構造のため、周方向パターン数は偶数の形のみ構成することが可能である。

また蛇腹折り円筒は、様々な形に折り畳む事が可能であるが、周方向の長さ、高さ方向の長さ、周方向の折り目の数、高さ方向パターン数にある条件があり、それらを全て満たされる断面形状でなければ、蛇腹折り円筒として構造できない。今回は橋の支承として利用することを想定しているので周方向の円周 $s = 400\text{mm}$ 、折り畳む前の高さを $h = 200\text{mm}$ 、厚さ $t = 1, 3, 5\text{mm}$ 、鋼板のヤング率 206GPa とする。

蛇腹折り円筒を実際に作る場合、鋼板を折り曲げて作成するのであまり高さ方向パターン数が多いと作成しづらいと思われるので今回は高さ方向のパターン数を10段として解析を行う。

表-1 材料諸元

厚さ t	1mm, 3mm, 5mm
円筒の高さ h	200mm
円周 s	400mm
ヤング率 E	206GPa
ポアソン比	0.30

また周方向パターン数は図-3 に示すように4, 6, 8角形の3種類に分けてどのような挙動を示すのか解析を行っていった。初期高さとは図-4 に示すように载荷する前の軸方向の高さが折り畳まれて0の状態を(初期高さ=0)とし、折り畳まずに高さが1の角柱の状態(初期高さ=1)とする。

境界条件は、鉛直方向荷重の場合、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。水平方向荷重の場合、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荷重方向変位以外を拘束し回転方向も拘束する。

加工方法は、プレス加工を想定しているが、一枚の板を折り曲げてから溶接で接合した場合、溶接箇所が欠点になるため、溶接せずに、切れ目のある状態で用いることも想定して、円筒が閉じたモデルと切れ目のあるモデルとを考える。

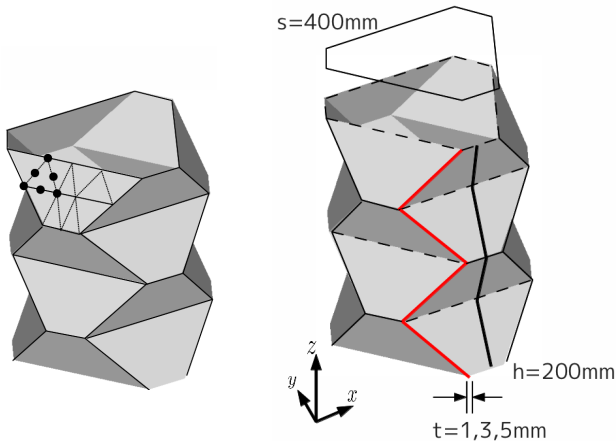


図-1 解析モデル

図-2 解析に用いた断面形状



図-3 周方向パターン数

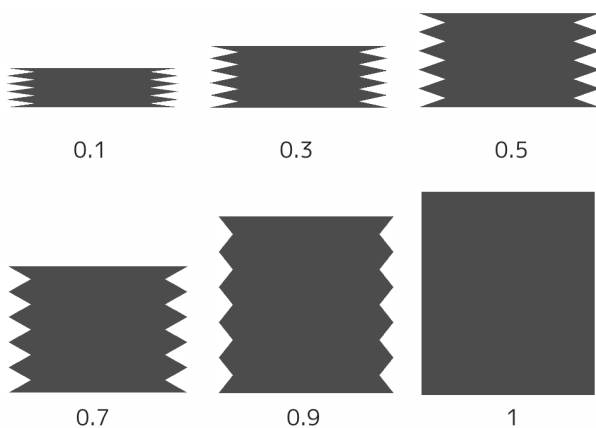


図-4 初期高さ

3. 解析結果

(1) バネ定数

バネ定数と初期高さの関係を図-5 と図-6 に示す。荷重 P と荷重点の荷重方向変位 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 $k_{円} = \frac{EA}{\ell}$ で無次元化している。ここでの E はヤング率、 A は開口端部断面積である。

初期高さが大きく(角柱)なるにつれて $\frac{k}{k_{円}}$ の値が大きくなっているのが鉛直方向に荷重した結果である。初期高さが小さいとき $\frac{k}{k_{円}}$ の値が大きい方のグラフが水平方向に荷重した結果である。鉛直方向の傾向は切れ目のない蛇腹折り円筒は4角,6角,8角の順に剛性が大きくなるという結果が得られた。切れ目のある蛇腹折り円筒は逆に8角,6角,4角の順に剛性が大きくなるという結果が得られた。

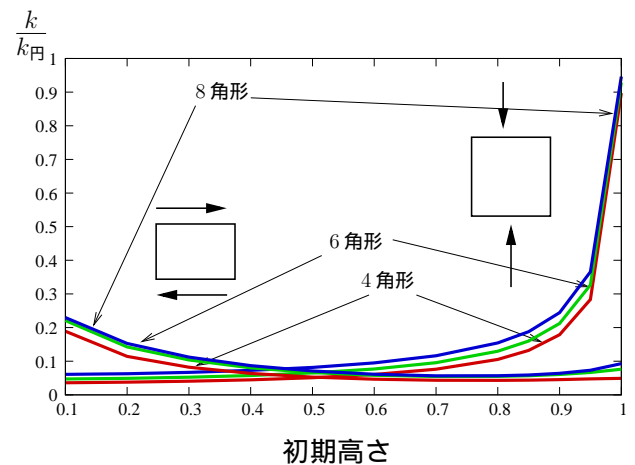


図-5 ばね定数 (切れ目なし)

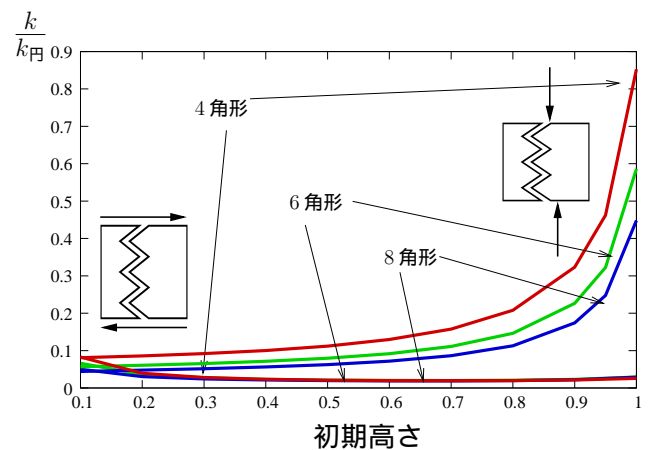


図-6 ばね定数 (切れ目あり)

(2) 弾塑性解析

弾塑性モデルは、 $E\epsilon = \sigma + \alpha\left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0}\right)^{n-1}\sigma$ で表される Ramberg-Osgood 則を用い、収束性が落ちない範囲で完全弾塑性に近くなるように、 $n = 8$ を用いる。また、他のパラメータは $\alpha = 0.5$ 、降伏応力 $\sigma_0 = 245\text{MPa}$ としている。この式を用いて、完全弾塑性に近いモデルを作成し交番载荷の解析を行う。交番载荷は、上端開口部各節点に水平方向外力を荷重制御で与えることで円筒にせん断を与える。解析では、初期高さの異なる2つの蛇腹折り円筒の比較の他、厚さの異なる蛇腹折り円筒の比較と切れ目のある蛇腹折りとなし蛇腹折りを比較する。

応力

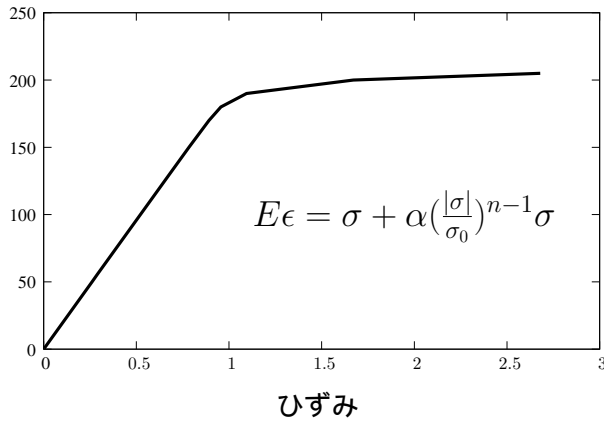


図-7 弾塑性モデル

(3) 交番载荷

交番载荷試験は塑性を入れた蛇腹折り円筒モデルに载荷していき、ある程度の荷重まで達したら除荷、逆方向に载荷してこれを繰り返していく試験方法である。今回の数値解析では図-8 に示すように最初の正荷重の载荷の際に、最も低い荷重で塑性化が認められた蛇腹折り円筒の除荷開始荷重を正負交番荷重の折り返し点の目安として、制御可能な範囲で、なるべく（絶対値が）その荷重付近で除荷、再载荷を行い、ほぼ同じ交番区間でのエネルギー吸収量を比較する。

また、支承として利用するには図-5 のバネ定数でも示すように鉛直方向荷重にもある程度剛性が高い初期高さが 0.9 ぐらいの蛇腹折り円筒が適している

と考え、初期高さを変化させる以外の交番载荷を行うのは初期高さが 0.9 の蛇腹折り円筒に統一する。

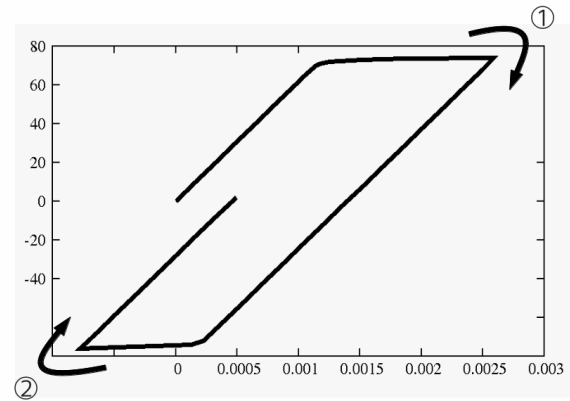


図-8 再計算 (リスタート)

(4) 厚さ変化

蛇腹折り円筒の厚さを 1mm, 3mm, 5mm と変化させた結果を図-9 から図-11 に示す。図-9 は 4 角形の結果で図-10 は 6 角形、図-11 は 8 角形の結果を示している。4 角形は 1mm, 3mm, 5mm とすべて交番载荷できたが 6 角, 8 角形は厚さが 1mm だと交番载荷できなかった。また、厚さを変化させた蛇腹折りの荷重範囲を同じにして比較したかったが、厚さが小さい方の荷重に合わせて厚さが大きいモデルは弾性域のまま交番载荷ができなかったため厚さそれぞれ正負の繰り返しの荷重を揃えて交番载荷を行う。厚さの大きい蛇腹折りの弾性域は直線で示している。

荷重

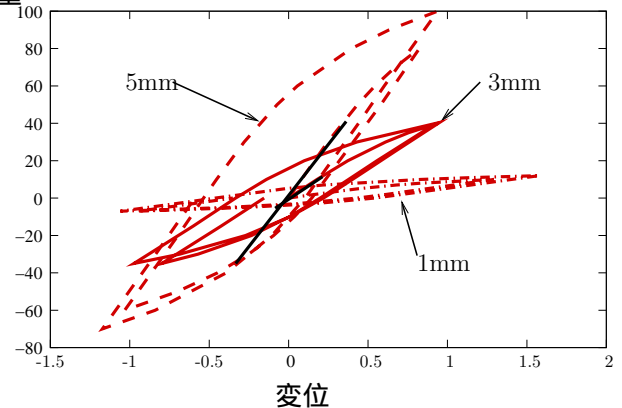


図-9 厚さ変化 (4角)

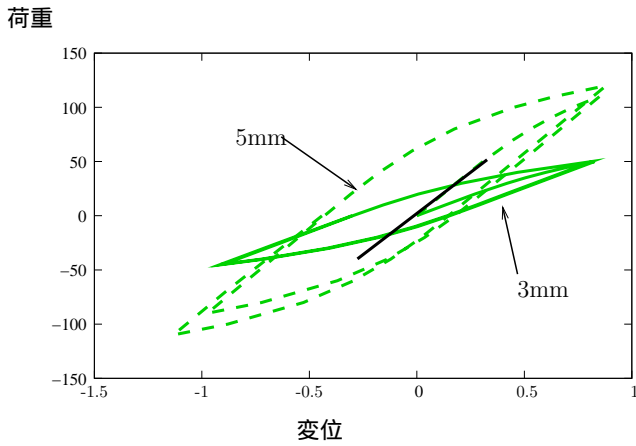


図-10 厚さ変化 (6角)

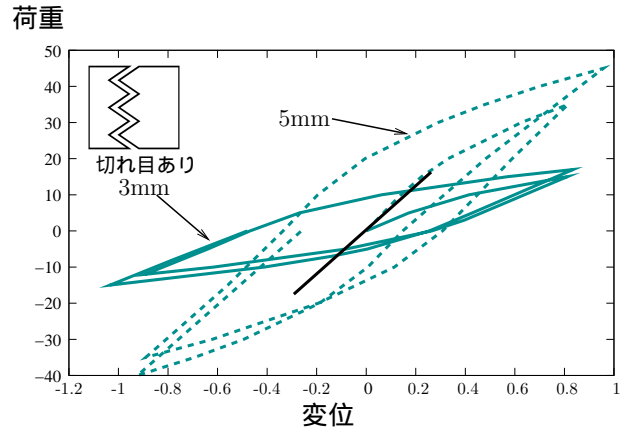


図-13 厚さ変化 (6角, 切れ目あり)

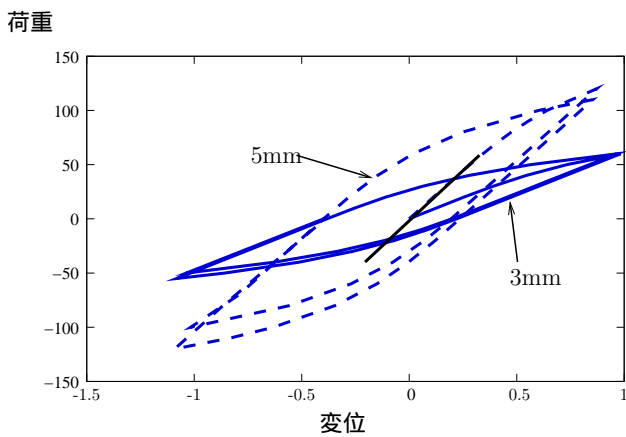


図-11 厚さ変化 (8角)

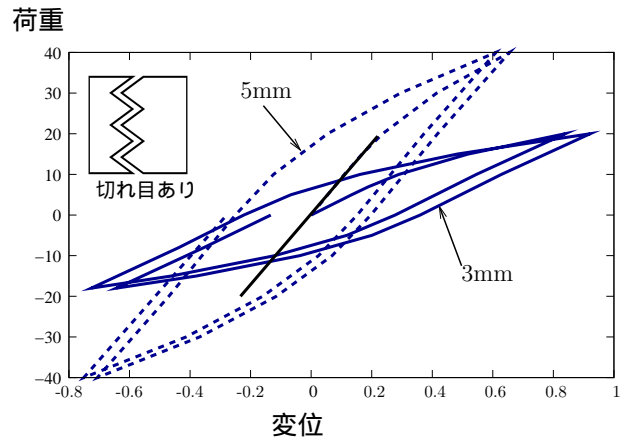


図-14 厚さ変化 (8角, 切れ目あり)

切れ目のある蛇腹折り円筒も同様に厚さを変化させて解析を行なった．その結果を図-12 から図-14 に示す．切れ目のある蛇腹折り円筒はすべて 3mm, 5mm しか解析ができなかった．厚さが 1mm だと小さい荷重で塑性化してしまい変位が大きくなりすぎて交番載荷ができなかった．

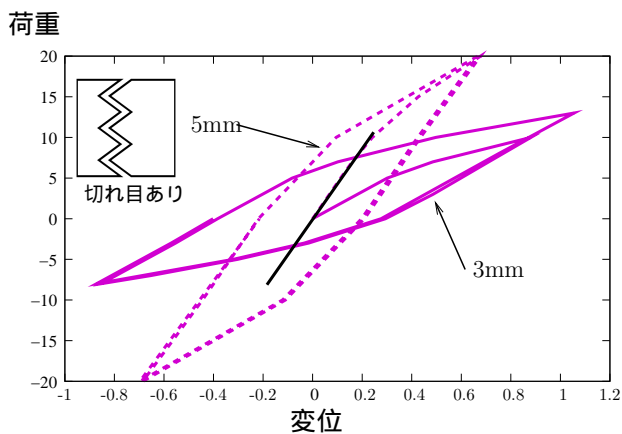


図-12 厚さ変化 (4角, 切れ目あり)

(5) 初期高さ変化

閉じた蛇腹折り円筒の初期高さを変化させた結果を図-15 から図-17 に示す．初期高さは 0.9 と 0.6 で比較を行なった．厚さを変化させた場合と異なり，初期高さ 0.6 と 0.9 では交番載荷させる荷重範囲に大きな違いはなくほぼ同等の荷重範囲となった．

また，4角，6角，8角どの角数での蛇腹折り円筒でも初期高さ 0.6 と 0.9 で大きな変化は見られず，塑性変形によるエネルギー吸収量に大きな差はないという結果となった．

図-5 で示したバネ定数のグラフでも水平方向でのバネ定数は初期高さ 0.6 と 0.9 で大きな変化がなかったが，交番載荷を行なった結果も同じように違いは大きくなかった．

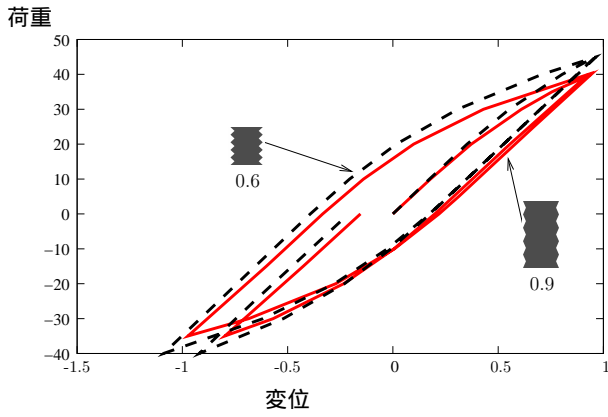


図-15 初期高さ変化 (4角)

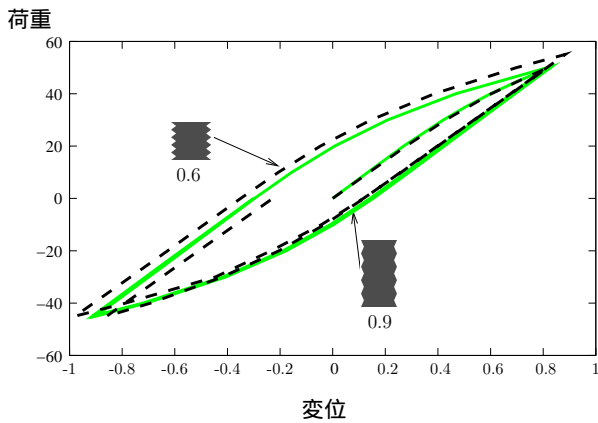


図-16 初期高さ変化 (6角)

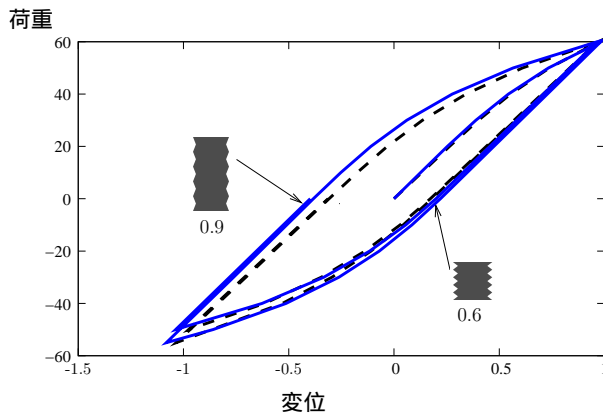


図-17 初期高さ変化 (8角)

切れ目のある蛇腹折り円筒でも同様に初期高さを
 変化させた結果を図-18 から図-20 に示す．切れ目
 のある蛇腹折り円筒の場合は，閉じた蛇腹折りと異
 なり，初期高さが違うことによってせん断変形によ
 るエネルギー吸収量が大きく違うという結果が得ら
 れた．

図-6 に示すバネ定数のグラフでは切れ目のない

蛇腹折りと同じように初期高さ 0.6 と 0.9 で違いは
 ほとんどなかったが，交番载荷を行なった結果で
 は大きく異なる結果となった．傾向としては 4角,6
 角,8角どの角数でも初期高さが角柱に近い 0.9 の方
 が同じ荷重範囲でもエネルギー吸収量が大きいとい
 う結果が得られた．

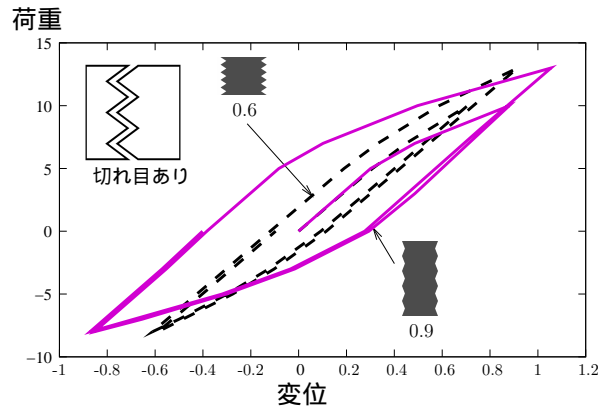


図-18 初期高さ変化 (4角, 切れ目あり)

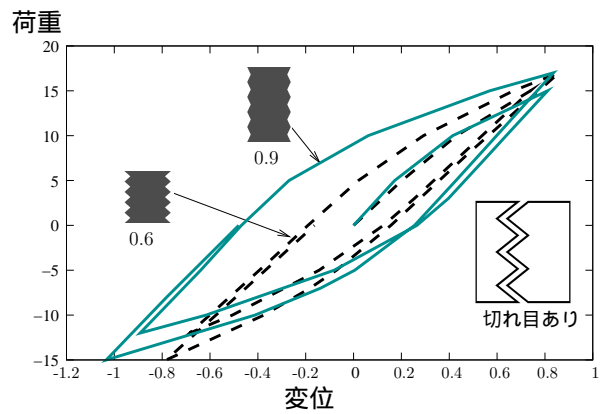


図-19 初期高さ変化 (6角, 切れ目あり)

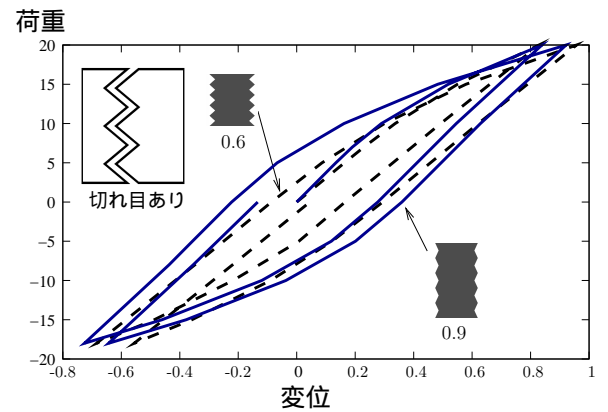


図-20 初期高さ変化 (8角, 切れ目あり)

(6) 切れ目比較

切れ目のある蛇腹折り円筒と切れ目のない蛇腹折り円筒の比較を図-21 から図-23 に示す。切れ目がある蛇腹折り円筒は小さい荷重で塑性化してしまい、厚さが同じ 3mm だと同じ荷重で比べることができなかった。切れ目のある蛇腹折り円筒の交番载荷の荷重範囲では切れ目のない蛇腹折りは弾性域で塑性変形によるエネルギー吸収はできないという結果が得られた。

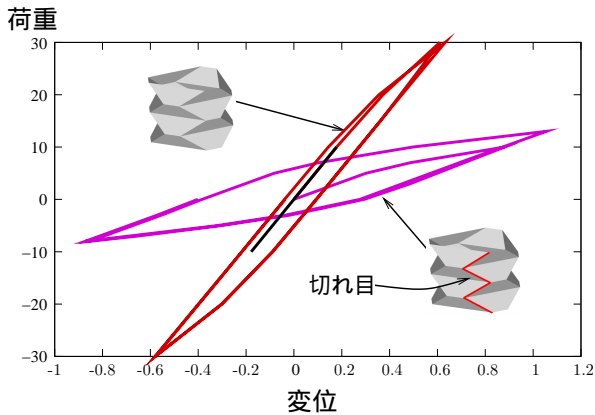


図-21 切れ目ありなし (4角)

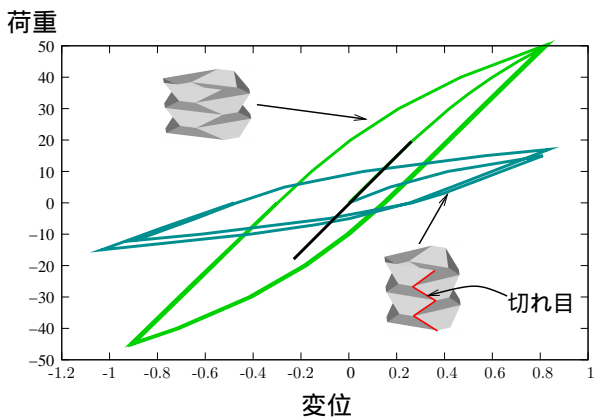


図-22 切れ目ありなし (6角)

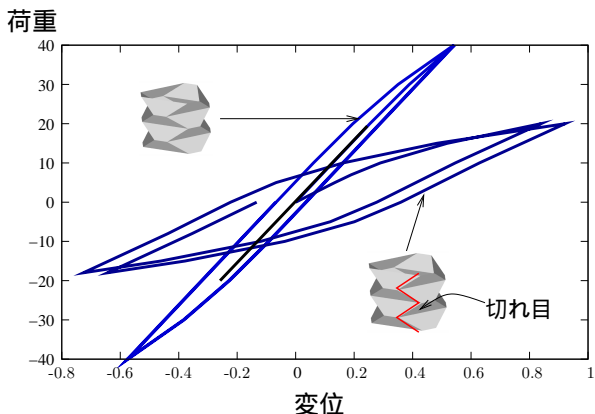


図-23 切れ目ありなし (8角)

4. まとめ

- 厚さ変化では厚さが 1mm の蛇腹折りでは交番载荷が行えず、厚いほうが剛性は大きく、薄いほうが塑性変形しやすいという結果が得られた。
- 蛇腹折り円筒に切れ目がない場合は、初期高さの違いによって、せん断を受けた場合の塑性変形によるエネルギー吸収量に大きな差は認められないが、切れ目がある場合は、初期高さの高いほうが、エネルギー吸収量が明らかに大きくなることがわかった。
- 交番载荷を行った結果とバネ定数の結果を合わせてみると鉛直方向にある程度剛性が高く、地震時のエネルギー吸収量も大きいのは初期高さ 0.9 程度の蛇腹折り円筒ということがわかった。

参考文献

- 1) <http://www.calculix.de/>
- 2) 石崎 博之 柴田 勝也 後藤 文彦 : 伸縮できる円筒折り紙構造の弾塑性挙動, 平成 22 年度 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), 2011
- 3) 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), 2010