

ケント紙を用いた伸縮できる円筒折り紙構造の圧縮試験

環境構造工学講座 06652 門間 亘
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

折り紙工学は近年様々な分野で応用され注目されている。例えば、ミウラ折りに代表される展開構造は、折り畳んだ状態で宇宙に運び宇宙空間で展開する宇宙構造物のソーラーパネルなどに利用される。一方、折り紙構造は、展開構造に限らず、高強度やバネ性能など、その多様な機能によって、医療機器や自動車、缶飲料などにも応用されている。本研究では、伸縮可能な円筒折り紙構造が、橋の支承など土木構造物に応用される可能性を想定し、その基本特性を有限要素法により数値解析するとともに、ケント紙を用いたモデルによる実験で数値解析の精度を考察する。

2. ケント紙の材料試験

ケント紙で製作した円筒折り紙構造のモデルを数値解析と比較するため、ケント紙のヤング率を求める。ケント紙で作った円柱に写真-1のようにアクリル板を載せ、フックに糸で重りを吊るして試験を行う。ケント紙は文運堂 B-2004 である。荷重-変位曲線の 1 例は図-1 のようになり、回帰直線の傾きからバネ定数 k と断面積 A を求め、 $E = \frac{kh}{A}$ からヤング率を算出すると 93.7MPa となる。

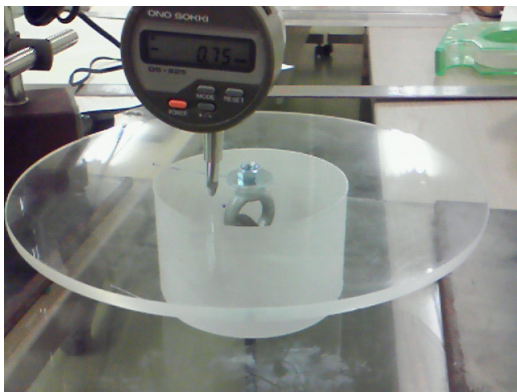


写真-1 ケント紙の圧縮試験

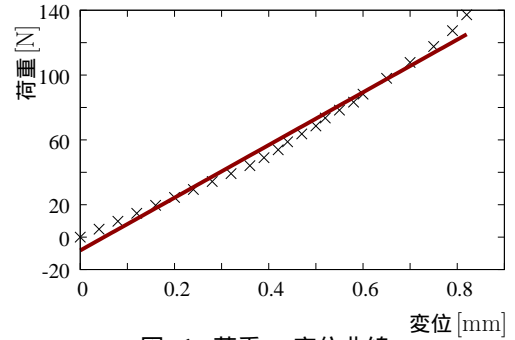


図-1 荷重 - 変位曲線

3. 圧縮試験方法

対象とする円筒折り紙構造は、周囲 $s = 480\text{mm}$ 、高さ $h = 160\text{mm}$ 、厚さ $t = 0.23\text{mm}$ のケント紙に図-2 のような台形の折り目パターンで作られる正多角形が高さ方向に多段つながっている。この円筒は台形の斜辺の角度を変えることで、円筒の初期高さを変えることができる (図-3)。今回は、4角、6角、8角の 3 種類の断面に対し、角柱の高さを 1 としたときの初期高さが 0.25、0.5、0.75 となる円筒を作り試験を行う。なお、いずれの試験体でも高さ方向パターン数は 10 段とする。試験方法は、ケント紙の圧縮試験と同様に、写真-2 のようにアクリル板を介して重りを載荷して行う。

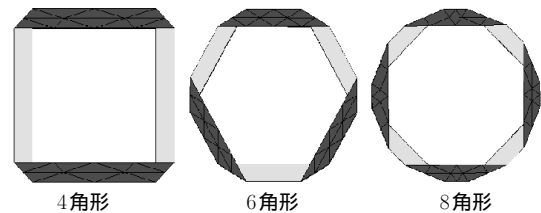


図-2 周方向パターン

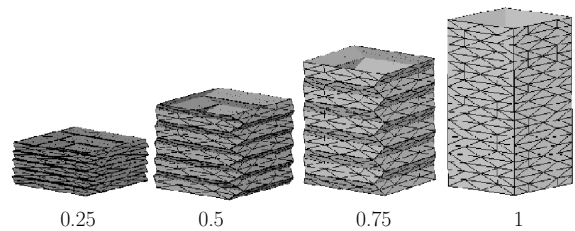


図-3 初期高さ

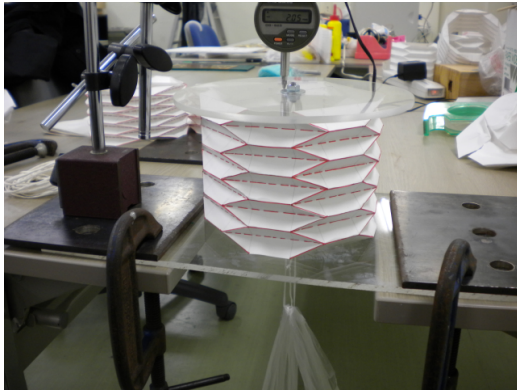


写真-2 円筒折り紙構造の圧縮試験

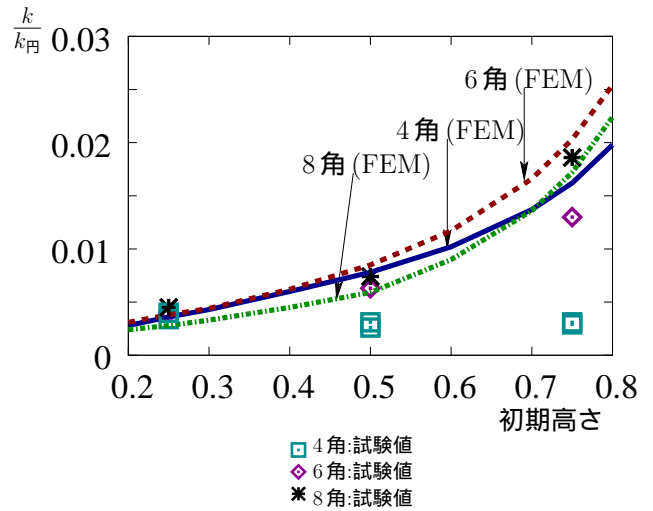


図-5 $\frac{k}{k_{\text{円}}}$ - 初期高さ

4. 数値解析手法

ケント紙による試験と同様のモデルを6節点シェル要素を用いて有限要素解析する。解析には、GPLライセンスの有限要素解析ツール CaliculiX¹⁾を使う。下端開口部は x, y, z 方向を拘束し、上端開口部は x, y 方向のみを拘束し、 z 方向に等分布载荷する。

5. 結果

圧縮試験の荷重-変位曲線の一例をFEMによる解析値と併せて図-4に示す。これは载荷初期でFEMと比較的近い値を取るケースだが、いずれのケースでも荷重がある程度大きくなると、剛性が低下する傾向が見られる。そこで、こうした剛性低下が現れる前の初期の分布からそれぞれの試験体のバネ定数を算定する。

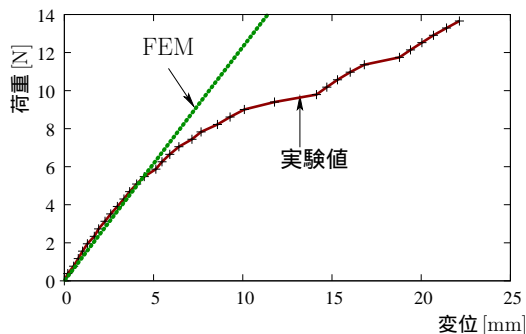


図-4 荷重 - 変位曲線 (8角, 初期高さ 0.75)

具体的には、荷重 P を変位 δ で除した $k = \frac{P}{\delta}$ を初期の線形分布範囲で回帰してバネ定数を求める。円断面円筒のバネ定数 $k_{\text{円}} = \frac{EA}{h}$ で無次元化したバネ定数を図-5に示す。

FEMによる解析結果を見ると、4角、6角、8角の円筒で特に大きな違いはないが、いずれも初期高さが高いほどバネ定数も大きくなっている。これに対し、ケント紙模型の実験では、6角と8角の円筒は、初期高さが高いほどバネ定数も大きくなる同様の傾向が認められ、値もFEMと比較的近いが、4角の円筒だけは、初期高さが高い方がバネ定数が小さくなる逆の傾向が認められ、値もFEMよりもかなり低めである。4角の円筒は他の円筒と比べると台形パターンの底辺の部分長くなるが、この部分は水平方向の折り目となり、軸圧縮に対して折り曲げられやすい。ケント紙の折り目は、折り方によっては剛結の折れ板よりはヒンジに近い接合条件にもなるため、水平方向の折り目の占める割合が大きくなると、折り目を剛結でモデル化しているFEM解よりも剛性がかなり低くなるのではないかとと思われる。つまり、このような角柱の円筒折り紙構造をバネに利用する場合、台形底辺部分が長くなる4角よりは6角や8角の円筒の方が折り目加工の影響を受けにくいと思われる。

参考文献

1) <http://www.calculix.de/>