

I-356 側圧を受ける薄肉弾性円筒シェル の有限要素法による座屈解析と座屈荷重の算出法の検討

武蔵工業大学 学員 小川 研一  
 武蔵工業大学 正員 増田 陳紀  
 東京都庁職員 長野' 克也  
 日本車輛製造 澤田 建二

1. はじめに

最近、護岸工事等では、従来のコンクリートケーソンに加えて鋼製円筒シェルケーソンも用いられるようになってきているが、この場合特に施工中の各種荷重下における円筒シェルの座屈が無視し得ない問題となる。本研究では、このような構造物の設計を行う上での基礎的検討として、側圧を受ける薄肉円筒シェルの座屈挙動を有限要素法により解析する際の、座屈荷重の算出法を考察する。

2. 使用する数値解析手法

本研究で対象とするシェルの座屈を解析する場合、板の座屈解析に比してかなり細かい要素分割の下で固値解析あるいは反復計算を要する非線形構造解析が必要となりいずれにしても著しい計算量の増加となる。できるだけ計算を制約し無駄のない解析を行う方法として、相対的に粗い分割での全体構造解析から変形応答の対称性を見だし、対称条件を考慮して構造の一部分を抽出し相対的に細かな要素分割で詳細な解析を行なう方法が考えられる。側圧を受ける円筒シェルが周方向に波数を生じる座屈様式では周方向波数が予測できないため、まず粗い要素分割で試計算を行う。その際、周方向波数を伴わない軸対称座屈が生じないように、経路の分岐を誘発すべく載荷荷重に偏心を与える。座屈挙動から対称性が確認できれば、そこから1波部分を抽出して細かい要素分割を施した解析モデルを用いて座屈耐力を求めることにする。

2. 1 幾何学的非線形静的応答解析法

基本として用いる解析方法は、吉田・増田・松田ら<sup>1)</sup>によって開発された、幾何学的非線形解析手法である。要素には、応力仮定のハイブリッドに基づいて誘導された1節点6自由度計18自由度の三角形薄板線形要素を用いている。本研究の数値解析での増分の制御は、荷重制御によることとする。

2. 2 解析モデル

解析対象は両端とも軸方向変位自由な単純支持された円筒シェルとし、一様側圧が作用する問題について考えた。構造諸元を図-1に、荷重条件を図-2に示す。部分構造解析モデルは、全体構造の1/2部分について周方向24分割、軸方向10分割の要素分割を施した試計算から周方向9波の座屈波形を生じたことより、1波分に相当する1/9部分を抽出したモデルとした。要素分割は、周方向24分割、軸方向30分割とした。荷重載荷の際、各節点における節点荷重 $P'$ に対して式(1)を用いて、荷重に偏心を与えた。(図-3)

$$P = P' + 0.0005 \times P' \times \cos(9\theta) \quad (1)$$

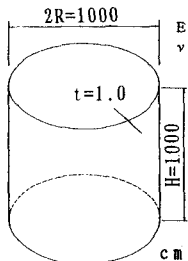


図-1 構造諸元

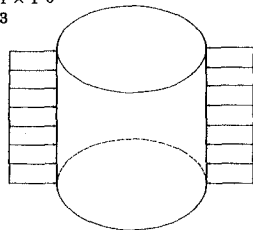


図-2 荷重条件

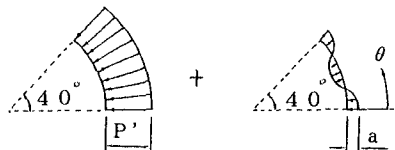


図-3 荷重偏心

3. 数値解析手法の検証

解析結果から、最大変位点における荷重と半径方向変位の関係を図-4に示す。図中の点線は、植村らによる理論座屈荷重<sup>2)</sup>を示したものである。その値を挟む図-4のP点、R点での円筒シェルの変形形状を、半径方向のたわみ等高線図と波形で図-5に示す。等高線は半径方向変位0.25cmの間隔、変位図は波線の右側が円筒内側への変位で左が円筒外側への変位を表わす。荷重-変位の関係より、P点以降、荷重の変位に対する増加割合は大きく減少していることが読み取れる。

以上のことより、本数値解析の妥当性が得られ、また理論解析と一致することが判る。

4. Southwellの方法<sup>3)</sup>による座屈荷重の算出に関する検討

座屈荷重の算出には、側圧を受ける円筒シェルの座屈挙動は棒の圧縮による座屈挙動に類似していることが知られていることより、Euler座屈の実験値から座屈荷重を定めるのに用いるSouthwellの方法を用いることとする。しかし非線形応答解析から得られた荷重-変位の関係のどの範囲を対象として選択するかが問題となる。この範囲の選択方法について検討を行った。適用する最初のSTEP番号をm、最後のSTEP番号をn、計算値をF(m,n)とし、mを固定してnを1STEPずつ増やしたときの計算値と理論解との関係について検討した。表-1は、例としてm=11(STEP)の場合について示したものである。また、nを増やしたときのFの増加量を図-6に示す。図-5よりnを増やしていくと徐々に増加量は多くなり、最大となった後、減少していく。植村らの理論解は増加量が最大のSTEP間に挟まれている。次に、固定するmを変え、増加量が最大となる区間の平均の計算値と理論解との差を表-2に示す。このことから、増加量が最大となる区間のF(m,n)、F(m,n+1)の平均の値を考えることで、理論解との差が6%以内で得られることがわかる。

5. おわりに

上述の検討例は一樣側圧を受ける場合を対象としたものであるが、一般的に側圧を受ける円筒シェルに関する研究は十分になされておらず、境界条件、荷重条件の違いが座屈挙動や座屈荷重に与える影響を解明する必要がある。周方向と軸方向との波形が連成する場合に対する座屈荷重の算出法の適用性は今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 吉田裕・増田陳紀・松田隆：薄板で構成される立体構造物の弾塑性・大変位離散化要素解析法, 土木学会論文集第288号, PP.41-55, 1979.8.
- 2) 植村益次・森田道子：直線的に変化する外圧による円筒かくの座屈, 日本機械学会論文集(第1部), 37巻, 298号, pp.1100-1106, 1971.6.
- 3) Timoshenko.S.P and J.M.Gere: Theory of Elastic Stability, 2nd ed. McGraw-Hill, pp.278-300, 1961.

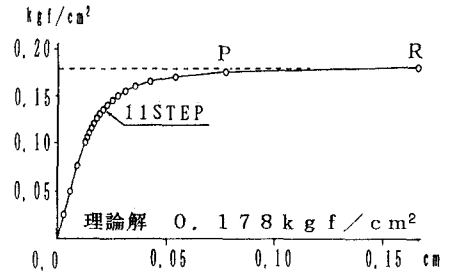


図-4 荷重と半径方向最大変位の関係

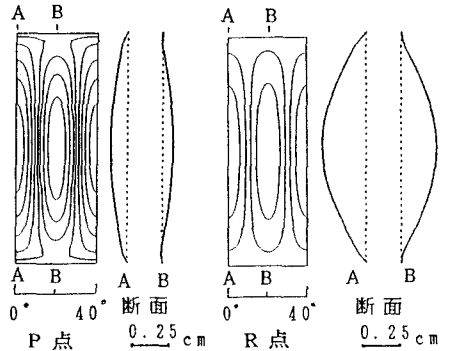


図-5 変形図(周方向24,軸方向30要素分割)

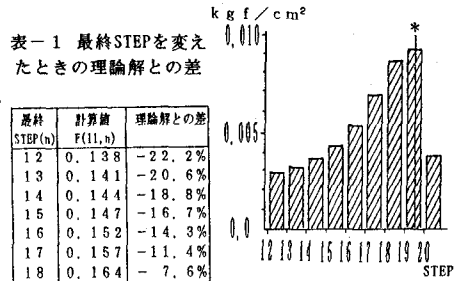


表-1 最終STEPを変えたときの理論解との差  
\*に理論解が存在する11STEP固定(m=11)

最終STEP(n)	計算値 F(11,n)	理論解との差
12	0.138	-22.2%
13	0.141	-20.6%
14	0.144	-18.8%
15	0.147	-16.7%
16	0.152	-14.3%
17	0.157	-11.4%
18	0.164	-7.6%
19	0.172	-2.7%
20	0.181	2.4%

表-2 固定するSTEPを変えたときの算出座屈荷重と理論解との差

固定STEP(m)	計算値	理論解との差	固定STEP(m)	計算値	理論解との差
4	0.171	-3.4%	12	0.176	-0.6%
5	0.176	-0.6%	13	0.176	-0.6%
6	0.181	2.4%	14	0.175	1.1%
7	0.167	-5.6%	15	0.175	1.1%
8	0.174	0.9%	16	0.175	1.1%
9	0.171	-3.4%	17	0.175	1.1%
10	0.169	-4.5%	18	0.176	-0.7%
11	0.177	0%	19	0.182	2.4%