

円筒形シェルの線形解析 Finite element analysis of cylindrical shell

○岡田貴裕¹, 近藤典夫²
*Takahiro Okada¹, Norio Kondo²

Abstract: Cylindrical tanks that store petroleum and liquefied natural gas occupy an important position for disaster prevention, and consideration of seismic safety of cylindrical tanks is extremely important. In this paper, as a preliminary stage of analysis of the entire cylindrical tank, linear analysis using a finite element method is performed on a cylindrical shell cut off the tank side face, and displacements obtained by analysis under different support conditions are compared.

1. はじめに

石油や液化天然ガスを貯蔵する円筒形タンクは防災上重要な位置を占め、地震国である我が国においては、円筒形タンクの耐震安全性の検討は極めて重要である。これらの地震時における動液圧の値および分布、スロッシングによる液面動揺などの動的解析はタンク的设计上必須であり、その解析手法としては、タンクを肉薄の湾曲面を有する円筒形シェルとして取り扱う手法がある。

本論文では、円筒形タンク全体の解析を行う前段階として、タンク側面を切り取った円筒形シェルについて有限要素法を用いた線形解析を行い、異なる支持条件による解析で得られた変位を比較する。

2. 解析モデル

本論文では図 1 に示すような半径 100[in]の円筒形タンクの側面を 20[in]四方に切り取った円筒形シェルの解析を行う。

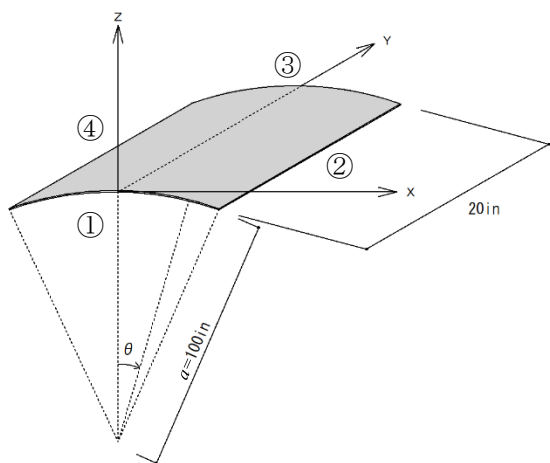


図 1.円筒形シェルのモデル

なお、円筒形シェルの厚みは $t=0.125$ [in], ヤング係数は $E=4.50 \times 10^5$ [lb/in²], -5.74 [rad] $\leq \theta \leq 5.74$ [rad], ポアソン比

$\nu=0.3$ とする。

3. 荷重条件

荷重は、図 2 に示すような、シェルの円弧の中心軸上からシェル側面に向かって放射状に作用する等分布荷重 p を想定する。なお、 $p=0.16$ [lb/in²]とする。

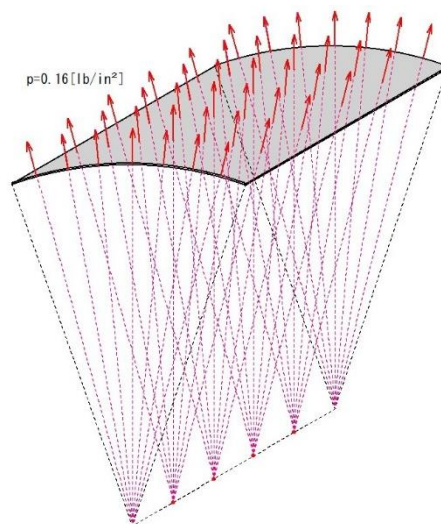


図 2.等分布荷重 p が作用する円筒形シェル

4. 支持条件

円筒形シェルの支持条件については、図 1 に示すモデルを、以下の表 1 が示すような、4 辺全て固定端の場合(case1)と、②、④を固定端、①、③を自由端とする場合(case2)の 2 ケースを考える。

表 1.case1,case2 における各辺の支持条件

	Case1	Case2
①	固定端	自由端
②	固定端	固定端
③	固定端	自由端
④	固定端	固定端

5. 変位計算

本論文では、円筒形シェルの微小領域における力のつり合いと、応力-ひずみ関係、ひずみ-変位関係によって導かれる以下の式を用いて変位計算を行った。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} - \nu \frac{\partial w}{\partial x} + k \left(\frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial \theta^2} \right) + \frac{a^2}{B} X = 0 \dots (1)$$

$$\frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial w}{\partial \theta} + k \left(\frac{3(1-\nu)}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{3-\nu}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial \theta} \right) + \frac{a^2}{B} Y = 0 \dots (2)$$

$$\nu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \theta} - w + k \left(\frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial \theta^2} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \frac{3-\nu}{2} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial \theta} - \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - 2 \frac{\partial^4 w}{\partial^2 x \partial^2 \theta} - \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - w \right) + \frac{a^2}{B} Z = 0 \dots (3)$$

ここで、 a は円筒形シェルの半径、 B は伸び剛性、 D は曲げ剛性、 u,v,w はそれぞれ x,y,z 方向の変位、 X,Y,Z はそれぞれ x,y,z 方向の体積力である。

6. 計算結果

case1,case2の解析結果をそれぞれ表2と表3に示す。また、図1のモデルを x,y 両方向に8分割したとき、 ix,iy はそれぞれ x,y 方向の節点番号を表す。図3にはCase1とCase2の中央変位 w の理論解との比較を示す。

Case1に比べてCase2の方がわずかに中央変位が大きくなっている。これは、Case2では①③を自由端としていることが要因で、荷重に抵抗する辺が少ないためである。

表 2. case1 の z 方向変位の計算結果

		z方向変位[in]								
iy \ ix		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0.0054	0.0115	0.0148	0.0158	0.0148	0.0115	0.0054	0
3		0	0.0095	0.0228	0.0312	0.0339	0.0312	0.0228	0.0095	0
4		0	0.0103	0.0268	0.0383	0.0423	0.0383	0.0268	0.0103	0
5		0	0.0103	0.0274	0.04	0.0443	0.04	0.0274	0.0103	0
6		0	0.0103	0.0268	0.0383	0.0423	0.0383	0.0268	0.0103	0
7		0	0.0095	0.0228	0.0312	0.0339	0.0312	0.0228	0.0095	0
8		0	0.0054	0.0115	0.0148	0.0158	0.0148	0.0115	0.0054	0
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3. case2 の z 方向変位の計算結果

		z方向変位[in]								
iy \ ix		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0	0.0093	0.0287	0.0453	0.0516	0.0453	0.0287	0.0093	0
2		0	0.0097	0.0276	0.0426	0.0483	0.0426	0.0276	0.0097	0
3		0	0.0096	0.0271	0.0412	0.0466	0.0412	0.0271	0.0096	0
4		0	0.0097	0.0269	0.0406	0.0457	0.0406	0.0269	0.0097	0
5		0	0.0097	0.0268	0.0404	0.0455	0.0404	0.0268	0.0097	0
6		0	0.0097	0.0269	0.0406	0.0457	0.0406	0.0269	0.0097	0
7		0	0.0096	0.0271	0.0412	0.0466	0.0412	0.0271	0.0096	0
8		0	0.0097	0.0276	0.0426	0.0483	0.0426	0.0276	0.0097	0
9		0	0.0093	0.0287	0.0453	0.0516	0.0453	0.0287	0.0093	0

また、図4は変形後の円筒形シェルの図を示す。なお、実際の変位は微小なため、見やすくするために変位を100倍にしている。

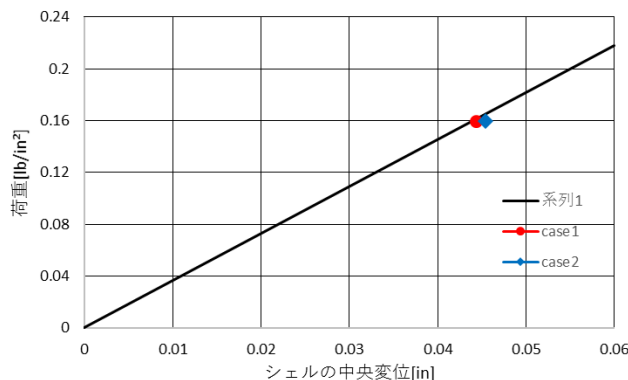


図 3. 円筒形シェルの中央変位

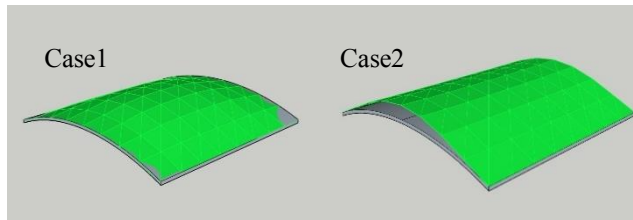


図 4. 変形後の円筒形シェル

7. おわりに

支持条件の違いによって、変位の解析結果に差が生じることが分かった。今回の結果を踏まえ、今後は円筒形シェル全体の解析を行い、荷重条件も地震力などのより複雑なものにして解析をしていきたい。また、今回の解析結果で、Case2は①③辺の中央変位が最大となったが、この理由についても解明していきたい。

参考文献

[1] O.C.ツィエンキーヴィッツ：マトリックス有限要素法, pp.510-511
 [2] 坪井善勝：曲面構造・シェルの理論とその応用
 [3] 河野和間：鋼製円筒形タンクの構造設計について, 圧力技術, 第15巻第2号, pp.29
 [4] 迫田治行：円筒形液体タンクの動的解析に関する一考察, 圧力技術, 第15巻第2号, pp.50