

○ 豊田高専 (正) 赤木知之  
東京電力 (正) 田村滋美  
日本大学 (正) 色部 誠

## 1. まえがき

大型の屋外燃料タンクは、一般に図-1に示すような鋼製円筒形のものが多い。不等沈下は、このタンク本体を支持する基礎地盤の変形特性の不均一性に起因し、側板直下の円周に沿った沈下の不均性、および、タンク底板の起伏の2種類に分けて考えられる。

側板直下の円周に沿った不等沈下は、側板を变形させ、結果として円筒の真円度を損ない、浮屋根の作動に支障を与え、タンクの機能を失なわしめる。したがって、不等沈下によるタンク本体の变形を解析的に予測できれば、不等沈下の許容値をきわめて厳密に定めることができ、結果としてタンクの施工管理の向上に大きく寄与するものと思われる。

タンク本体の形状は、もともと軸対称であるが、普通、不等沈下そのものの現象が三次元的なひずりを示すため、タンクの变形は軸対称とならず、その解析には三次元的な取り扱いが必要となる。従来は、タンクを軸対称体として扱い、側板下の円周に沿った不等沈下をフーリエ級数で近似し、その沈下に対応する荷重もフーリエ級数展開して解析されていた。しかし、そのような解析方法では、きわめて限られた不等沈下パターンしか扱うことができない。有限要素法は、このような殻の三次元解析に対して強力な手段になりえ、平面向題および軸対称向題と比較してもほとんど変ることのない労力でその解析を遂行できる。本報告では、殻としてのタンクを平面要素の集合として考える、いわゆる三次元薄板構造の解析プログラムを開発して問題の処理にあたる。要素は、側板および底板ともに面内变形および面外变形に抵抗できる、いわゆる殻要素とする。タンク側板の半径方向変位は、タンク半径に比較して十分小とみなせるので、微小変形理論の範囲内で解析する。地盤は、単純に弾性バネで置き換え、いわゆるウィンフラー地盤として扱い、不等沈下はそのバネ定数を変化させることによって導入される。解析は、不等沈下量が実際に観測された結果と一致するまで繰り返される。

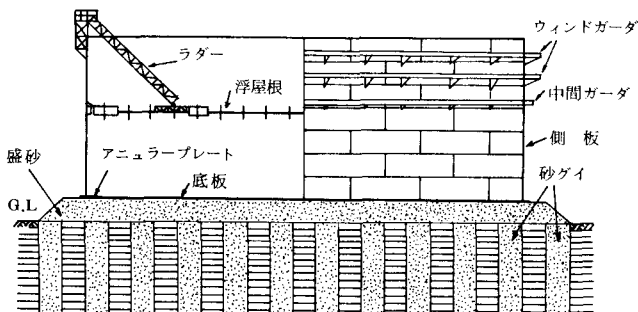


図-1 浮屋根式鋼製円筒タンクの概容

## 2. 殻構造の有限要素解析

殻の有限要素解析は、比較的最近になって手掛けられたもので、その発展は将来の課題であらう。現在までのところ、つぎのような有限要素が開発され、実際問題の解析に使用されている。(1) 膜心力状態に対する三角形曲面要素、(2) 長方形曲面要素、(3) Herrman の三角形平板要素、(4) 三角形および長方形平板要素、(5) 軸対称殻環状要素。本研究では、(4) の有限要素を使用している。三角形平板要素の剛性マトリックスは、Zienkiewicz<sup>1)</sup>が、長方形要素は Clough<sup>2)</sup>が、それぞれ最初に開発している。これらの要素の変位関数には、たとえば、長方形要素では式(1)のような表示を用いる。

$$w(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \alpha_7 x^3 + \alpha_8 x^2 y + \alpha_9 xy^2 + \alpha_{10} y^3 + \alpha_{11} x^3 y + \alpha_{12} xy^3 \quad (1)$$

式(1)によれば、 $x = \text{一定}$ 、または、 $y = \text{一定}$ 、の任意の直線上で、板の面外変位  $w$ 、および、その法線方向への勾配  $\partial w / \partial x$  は三次曲線状に変化する。そして、 $w$  の連続条件はすべての要素境界線上で満足されているが、法線

方向のたわみ角には不連続が生じるため、これは非適合な要素である。したがって、解の精度はあまり期待できないかも知れない。そこで、最初に解の精度に関する検討が必要となろう。図-2は、底板を三角形平板、円筒部を長方形平板要素として我々が作成した三次元薄板構造解析プログラムを、底板固定タンクの内圧による解を示したものである。他の有限要素による結果との比較はしていないが、厳密解との比較によれば、概ね我々の目的を達しうる結果と言えるであろう。応力値については、さらに細かい要素分割を必要とするようである。

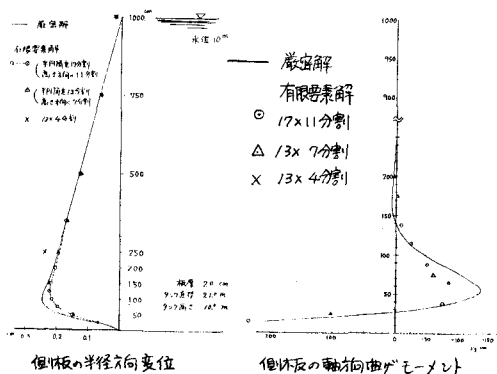


図-2 底板固定タンクの内圧による解

### 3. 不等沈下によるタンクの変形

我々は、タンクを建設すれば必ず不等沈下を起すと思われる地盤に、浮屋根式タンクを建設せざるをえない現場に遭遇した。このような場合、その不等沈下量を確認しめることは当然のこととして、次にその不等

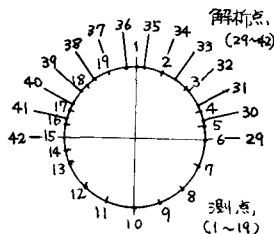


図-4 測点および解析点

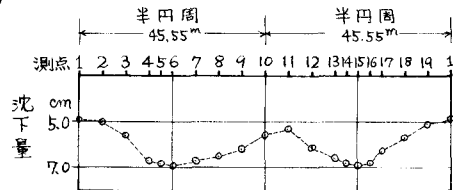


図-3 側板直下の円周に沿った沈下(実測)

沈下パターンに対するタンク本体の変形も解析的に予測できれば、をわめて好都合であることも痛感した。図-3がタンク側板直下の円周に沿った不等沈下の実測結果の一例である。なお、測点、および、解析点の位置を図-4に示す。不等沈下に対するタンク本体の変形は、タンク頂部の直径変化としてのみ観測された。これらの結果を、式(2)および式(3)で定義される不等沈下に関するパラメーターで整理し、表-1に示す。

$$\delta_s = S_{pmax} - S_{pmin} \quad (2)$$

$$\tan \theta = (S_{pi} - S_{pi+1})_{max} / l \quad (3)$$

ここに、 $S_p$ は殻に沿う距離 $l$ ごとに設けられた測点の沈下で、 $\delta_s$ を最大不等沈下、 $\tan \theta$ を殻・最大勾配と呼ぶ。

つぎに、図-2に示した解析を、底板固定とせず、底板をウィンフラー地盤上に乗せ、そのバネ定数を適当に変えて、所望の不等沈下が起るよう期待して行った結果の一例を、図-5、図-6に示す。結果の説明は後述する。

### 参考文献

- 1). "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics", McGraw-Hill, 1967
- 2). "Finite element stiffness matrices for analysis of plate bending", Proc. Conf. on Matrix Methods in Structural Mechanics, AFFDL-TR-66-80, 1965

表-1 不等沈下とタンクの変形(実測)

| 最大不等沈下<br>$\delta_s$ | 最大勾配<br>$\tan \theta$ | タンク頂部直径変化 |          |
|----------------------|-----------------------|-----------|----------|
|                      |                       | 測点 1-10   | 測点 6-15  |
| 4.4 cm               | $4.31 \times 10^{-3}$ | -26.0 cm  | +22.5 cm |
| 4.9                  | 4.22 "                | -25.0     | +21.5    |
| 4.8                  | 4.13 "                | -24.5     | +20.5    |
| 4.2                  | 3.59 "                | -23.6     | +17.3    |
| 4.0                  | 3.95 "                | -21.0     | +16.8    |
| 3.5                  | 3.05 "                | -19.9     | +15.2    |
| 2.0                  | 1.98 "                | -12.4     | +7.8     |

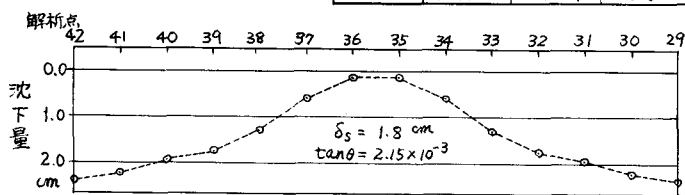


図-5 側板直下の半円周に沿った沈下(解析)

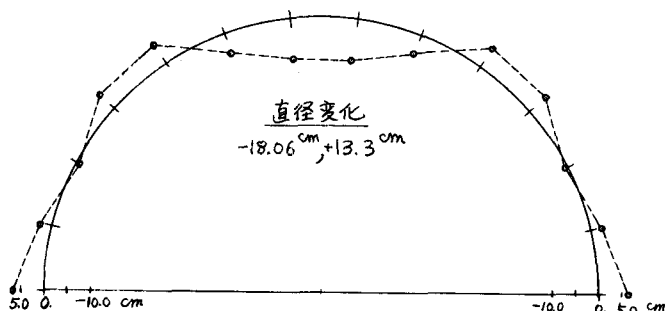


図-6 タンク頂部の変形(解析)