

## 1. はじめに

平底円筒貯槽は石油の大規模貯蔵用タンクとして最も一般的に用いられる形式であり、内容物の流出事故は、その社会的な影響上最も懸念されるものである。平底円筒貯槽では、側板と底板の結合部近傍に応力が集中しやすく、地震時この部分に亀裂または破断が生じ、ヤード内に油が流出した例があり(宮城県沖地震(1978年))、また側板下端付近の座屈や像の足型変形が見られている(チリ地震(1985年))。

大型の石油タンクは、通常アンカーせず基礎上に設置されており、このため地震時に底板の一部が基礎から浮き上がることが知られているが、最近地震後の被害調査や実験研究から、前記2つの被害形式が底板浮き上りと深い関係があることが明らかとなった。すなわち、地震時にタンクに作用する転倒モーメントにより底板に浮き上がりが生じると、側板下端の狭い領域に接触部分が集中し、軸圧縮力が大きくなり、また浮き上り側では底板が基礎により支持を失うため、隅角部に大きな曲げ応力が生じるのである。著者らは実機との相似を満足した大型タンク模型による傾斜実験を実施し<sup>1, 2)</sup>、この浮き上り挙動を詳細に調べ、大型実機タンクでの浮き上りに関連する諸現象をかなり明らかにすることができた。ここでは主に、それとの関連で開発された底板浮き上り挙動解析法について説明し、本解析法の実機タンクに対する適用例を紹介する。

## 2. 浮き上り挙動解析法

計算を簡単にするために、以下に示す3つの仮定を設ける。

- ① タンク側板は、微小変形理論により扱う。
- ② 仮定①により、側板に作用する力が決まれば側板の自由度は側板下端の自由度のみを残して消去することができるが、この点の鉛直方向変位以外の成分は無視する。
- ③ 底板は非線形梁の集合として取り扱う。

ここに示した3つの仮定により、側板については微小変形シェル理論、底板については大変形梁理論により取り扱い、タンク全体の力の釣り合いを側板下端での鉛直方向の力の釣り合いに置き換える。具体的には、側板側の断面力と底板側の断面力が等しくなることから、力の釣り合い残差式を(1)式のように導いているが、前者はさらに側板に作用する液圧による等価節点荷重と側板の変形に伴う断面力に分けて扱っている。

$$L(v) = N_s(v) + N_b(v) - N_p \quad (1)$$

ただし

- $L(v)$  : 残差(厳密解ならば0)  
 $N_s(v)$  : 側板の変形による断面力  
 $N_b(v)$  : 底板の断面力  
 $N_p$  : 側板に作用する圧力による等価節点力  
 $v$  : 側板下端の鉛直方向変位

以下、 $N_s$ 、 $N_b$ 、 $N_p$ の求め方を簡単に説明する。

Fig. 1に示すように、シェルに働く力の釣り合いを求めると、(2)式のようなになる。ただし $\{X_s\}$ はタンク側板の $v$ 以外の変位成分である。

$$\begin{bmatrix} K_s & K_{sv} \\ K_{vs} & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ N_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

(2) 式から  $\{X_s\}$  を消去することにより、(3) 式を得る。

$$\begin{aligned} & ([K_v] - [K_{vs}] [K_s]^{-1} [K_{sv}]) \{V\} \\ & = - [K_{vs}] [K_s]^{-1} \{P_s\} - \{N_b\} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式から  $\{N_s(v)\}$ 、 $\{N_p\}$  は (4) 式のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} \{N_s(v)\} &= ([K_v] - [K_{vs}] [K_s]^{-1} [K_{sv}]) \{V\} \\ \{N_p\} &= - [K_{vs}] [K_s]^{-1} \{P_s\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、本解析では取り扱い上の簡便さから、 $\{N_p\}$  については膜力の釣り合い式を解いて得られる静定解を用いている。

$\{N_b\}$  は、Fig. 2 (a) に示すような梁プログラムにより求めている。これにより求まる鉛直方向変位 ( $V$ ) - 底板側断面力 ( $N_b$ ) の関係の一例を Fig. 2 (b) に示す。図のように ( $V - N_b$ ) 関係は非線形性があるので、浮き上り側と接触側で異なるため両者の境界となる位置を少しずつ変化させながら、繰り返し計算により解を求める。ここで示した解析法は、前述の傾斜実験の結果と比べた時、十分なものであることが確認されている<sup>3)</sup>。

### 3. 解析例

この浮き上がり挙動解析法の実機タンクへの適用例を示す。解析対象としては、Fig. 3 に示すような諸元を持つ、容量 3,000m<sup>3</sup> と 20,000m<sup>3</sup> の大小2つのタンクを選んだ。解析例は、応答震度 (Kh) が 0.2 から 0.5 の間で、応答挙動がどのように変化するかを計算したものであり、それぞれのタンクについての結果を Fig. 4, 5 に示す。

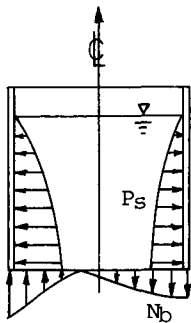
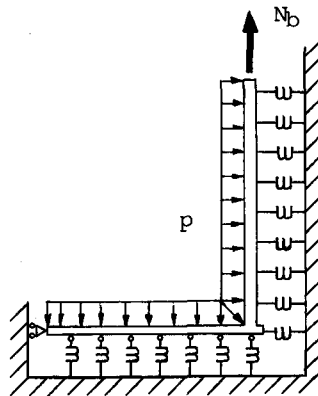
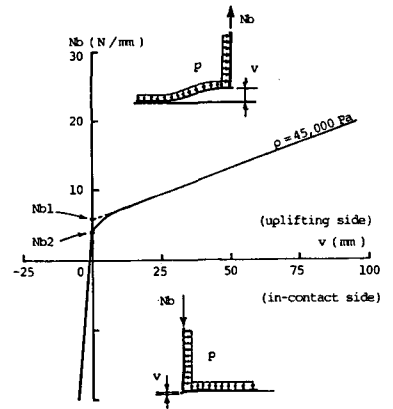


Fig. 1 Shell Model



(a) Beam Model



(b)  $v - N_b$  Relationship

Fig. 2 Base Plate Model

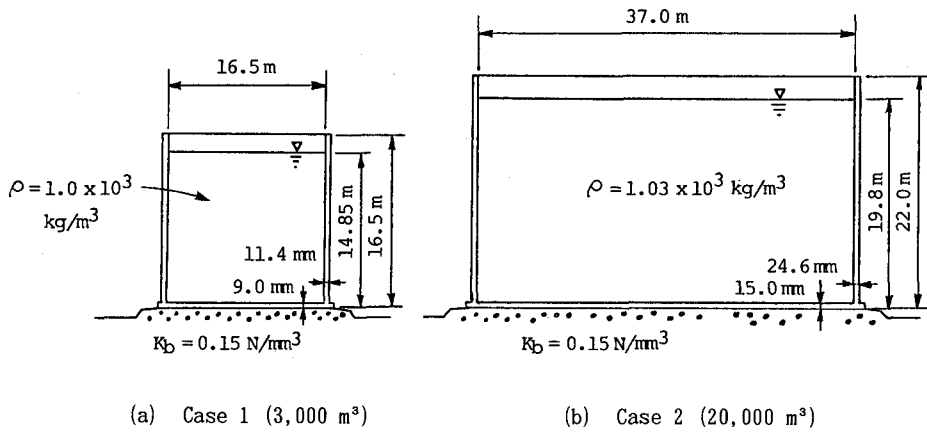


Fig. 3 Calculation Cases

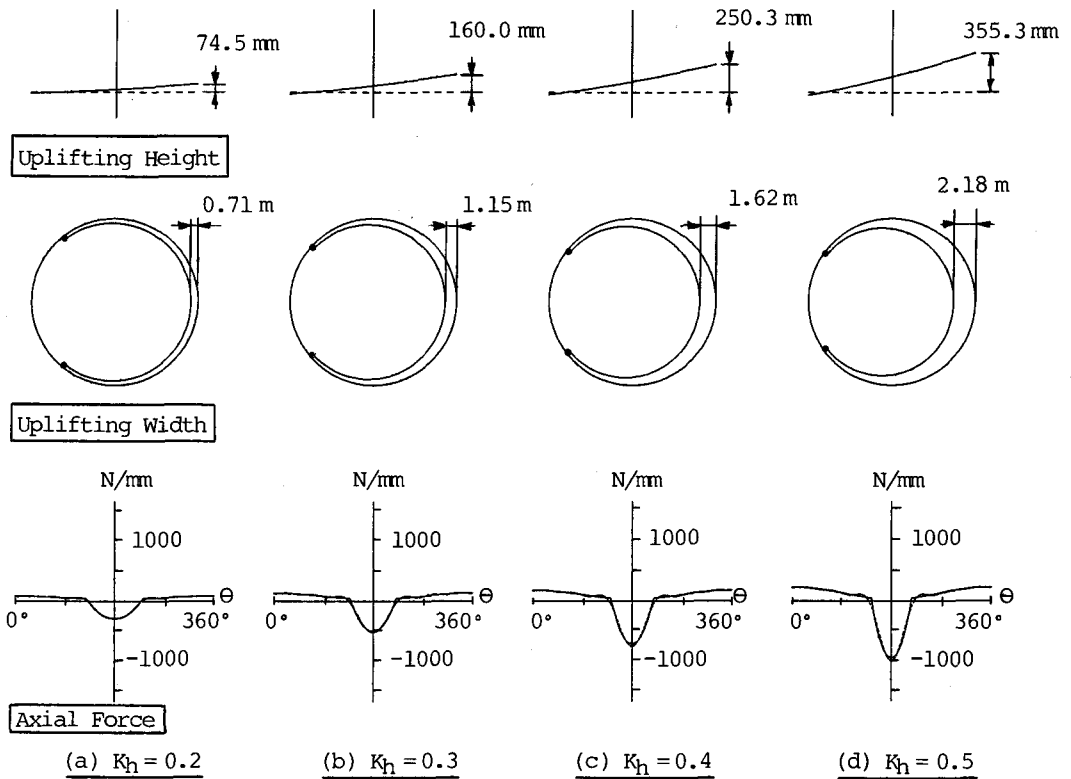


Fig. 4 Uplifting Height & Width and Axial Force Distribution  
(Case 1 : 3,000 m<sup>3</sup> Oil Storage Tank, No Roof)

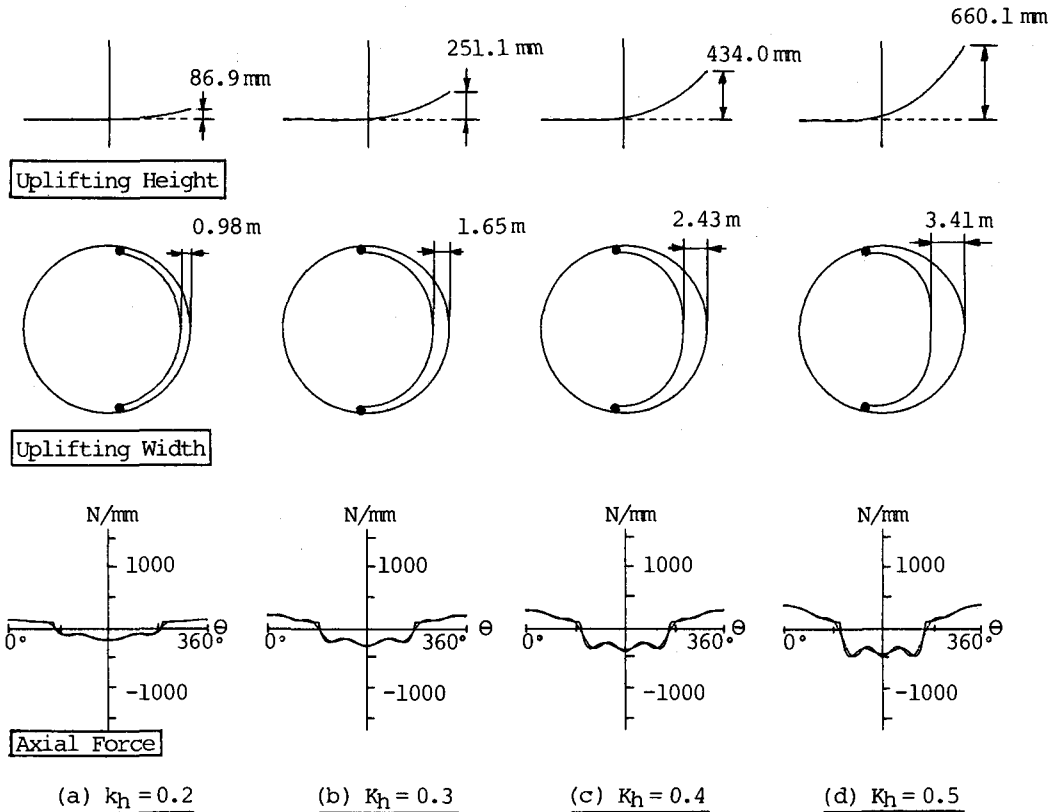


Fig. 5 Uplifting Height & Width and Axial Force Distribution  
 ( Case 2 : 20,000 m<sup>3</sup> Oil Storage Tank, No Roof)

3,000 m<sup>3</sup> タンクは、内径が小さく、シェル自身の剛性が高いため、側板下端は浮き上がりを生じた際も同一平面内にあり、横方向から見た浮き上がり高さ（図上段）はほぼ直線状になる。側板下端の基礎との接触範囲は狭く、軸圧縮力は大きな値となる。これに対し、20,000 m<sup>3</sup> タンクは、シェルの剛性が低いため、側板はかなり変形し、側板下端は曲面上にある。この場合、基礎との接触範囲は広く、軸圧縮力の集中は無いが、浮き上がり高さおよび浮き上がり幅が大きくなる。

計算では、側板下端の鉛直方向変位を周方向にフーリエ級数に展開して扱っているが、この計算例では0次から7次までの8項を採用している。また、図の下段に示した実線および点線は、それぞれ(Nb)および(Np - Ns)を示しており、これらが良く一致していることから、解は8項で十分の精度を持っていることが分かる。

#### 参考文献

- 1) 坂井、磯江、平川、面谷：平底円筒タンクの大型相似模型による傾斜実験、第7回日本地震工学シンポジウム、1986-12
- 2) 坂井、磯江、平川、面谷：大型相似模型による平底円筒貯槽の傾斜実験、土木学会論文集 第404号 / I-11、1989
- 3) SAKAI F., ISOE A., HIRAKAWA H., and MENTANI Y.: Experimental Study on Uplifting Behavior of Flat-Based Liquid Storage Tanks without Anchors, Proc. 9WCEE, Tokyo, 1988