

I-571 大型相似模型傾斜実験による円筒タンクの地震時底板滑り挙動の研究

川崎重工業 正員 磯江 暁 川崎重工業 正員 坂井 藤一

1. はじめに

先に著者らは、アンカー・ストラップ付きタンクの耐震安全性を検討する目的で、直径9.6mのアルミニウム合金製大型相似模型による傾斜実験を実施した¹⁾。通常円筒タンクの耐震設計では、底板部の水平移動はないものと考え、側板を固定支持または単純支持などの条件の下に解析するのが、一般的である。しかし、底板と基礎の間の相関挙動は、実際にはきわめて複雑なものと予想され、今回の実験では底板の詳細な応力を含めて、滑りの挙動なども調査している。たとえば、Fig. 1は、今回実施した実験ケースのうち、アンカー・プレストレスが最大のケースRppC13の滑り変位を示しているが、この量は傾斜角の増大とともに幾何級数的に増加し、 $\phi = 18.8^\circ$ の時1.5～1.8mm程度の値を示している。図中、実線で示しているのは、後述する非線形3次元FEM解析の結果である。また、Fig. 2は側板下端近傍のフープ力の周方向分布図であるが、実験結果は明らかに底部単純支持の解とは逆の傾向を示しており、これは底板の滑りなどによる影響が現われていると見られるものである。

2. 非線形3次元FEM解析

底板の滑りおよび浮き上りを考慮したタンクの挙動を、(1)式のように表わす。

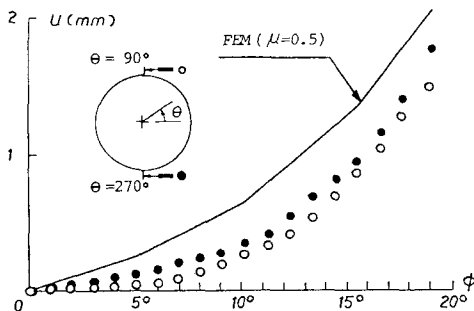
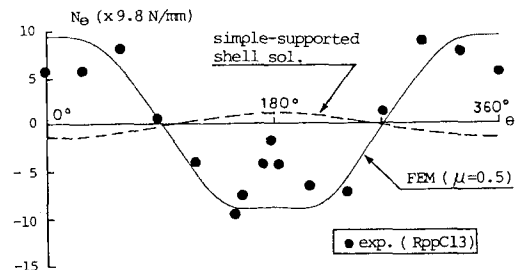
$$[K] \{x\} = \{F_p\} + \{F_s\} \quad (1)$$

ただし、 $\{x\}$ はタンクの変位、 $[K]$ はタンクの剛性行列、 $\{F_p\}$ はタンクに作用する液圧およびアンカー張力を表わしている。また、 $\{F_s\}$ は底板-基礎間の摩擦および接触によりタンクに作用する力を表わしているが、変位 $\{x\}$ の関数となっており、このため(1)式は非線形方程式となる。他の2項に対しては線形項のみを考慮することとし、ここでは(1)式を(2)式に置き換え、繰り換し計算により解を求めた。

$$\left. \begin{aligned} \{F_s, 0\} &= 0, \quad \{x, n\} = [K] (\{F_p\} + \{F_s, n-1\}) \\ \{F_s, n\} &= \{f(\{x, n\})\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

底板が $\{x, n\}$ 変位した場合の接触力および摩擦力は、それぞれつぎのように求めた。すなわち、接触力は、タンク底板がウィンクラーバネとして仮定した基礎に密着しているとし、 $[K]$ の中にこの剛性を加えておき、底板の鉛直方向位置が初期位置より上側にある点については、ウィンクラーバネの張力を相殺する力を負荷している。また摩擦力については、底板各点が水平方向バネにより支えられているものとし、ある値以上の水平力に対しては、このバネ力を静止摩擦力に相当する一定値としている。

ここではリング型をした半解析的要素を用いており、変位や内力が周方向にはフーリエ級数より表わされているため、これら接触力および摩擦力を変位から直接求めることはできない。このため、変位よりまず周方向72点の力を計算し、それを最小2乗法によりフーリエ級数に置換している。

Fig. 1 Sliding Displacement (RppC13, $z = 0\text{mm}$)Fig. 2 Hoop Force Distributions in the Circumferential Direction ($\phi = 18.9^\circ, z = 30\text{mm}$)

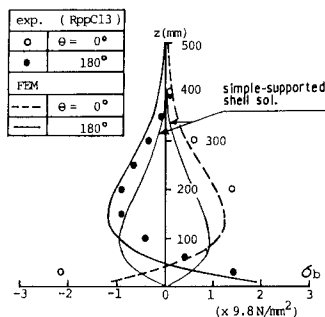


Fig. 3 Axial Bending Stress Distribution in the Vertical Direction ($\phi=18.9^\circ$)

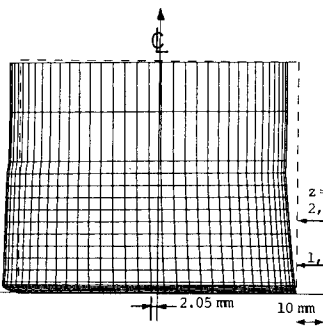
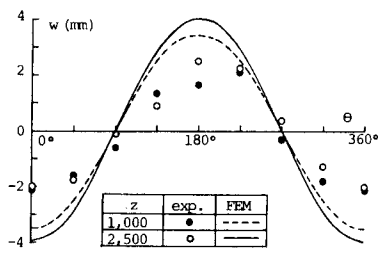


Fig. 4 Radial Displacement ($\phi=18.9^\circ$)



(b) Comparison between Exp. and FEM

3. 解析結果と実験結果の比較

Fig. 1の滑り変位は、実験値と解析値がよく対応している。解析値の方がやや大きいのは、摩擦係数が0.5より大きかったためと考えられる。またFig. 2のフープ力の傾向も実験と解析でよく一致している。Fig. 3には、側板に生じる鉛直方向曲げ応力高さ方向分布を示すが、解析結果は側板下端で応力が逆符号になる様子をよく捉えている。Fig. 4に、タンク側板の半径方向変位を示す。図(a)を見ると、 $\theta = 90^\circ$ の位置では約2mmの接線方向変位が生じているが、 $\theta = 0^\circ$ および 180° の位置では変位は小さく、ほとんど移動していないと言ってよい。高さ1,000 および2,500 mmの位置での側板半径方向変位を比較すると（図(b)）、底板の滑り変位と同様、解析値の方が大きくなっている。Fig. 5には、側板のミーゼス・インテンシティの高さ方向分布が示してあるが、本非線形FEMによる解析結果は実験値の傾向をよく捉えている。

4. まとめ

円筒タンクに地震時水平力が作用した場合、底板の一部に滑りが生じ、側板下端付近は複雑な挙動を示す。今回の実験および解析により隅角部および底板に生じる応力の挙動を把握することができた。底板あるいは隅角部付近のこれらの挙動は、従来ほとんど解明されていないが、強度上重要な部分であるので、今後より詳細な研究が必要と思われる。

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

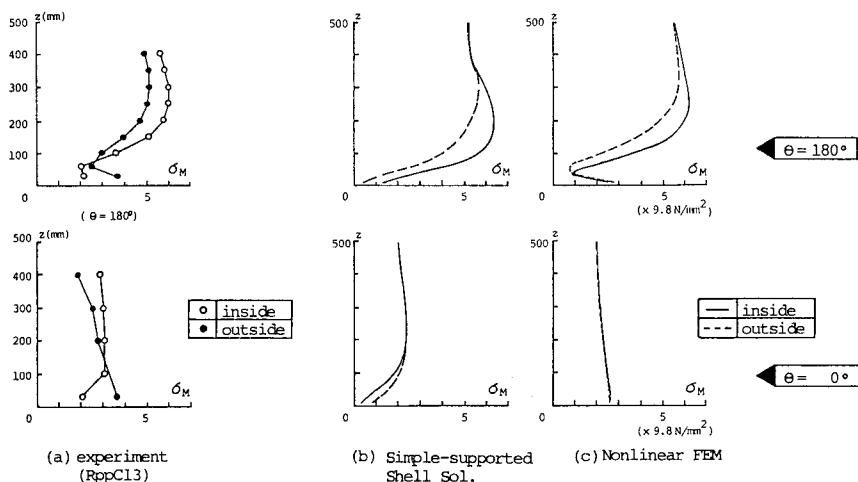


Fig. 5 Mises Intensity ($\phi=18.9^\circ$)