

B-14

地震力が作用する軸対称円筒形タンク内の液面動揺に関する有限要素解析

Finite Element Analysis for Sloshing in Axial Cylindrical Tanks Subjected to Seismic Forces

○李濟援¹, 近藤典夫²

Jewon Lee¹, Norio Kondo²

In the 2003 Tokachi-oki earthquake, sloshing of the liquid inside the tank caused a fire. The sloshing of liquid in tanks is an important issue to be studied. In order to confirm the safety of cylindrical tanks and to improve the seismic design technology, a finite element analysis of the sloshing behavior of the contents of cylindrical tanks in response to seismic motions was conducted by analyzing the sloshing of liquid in cylindrical tanks in response to earthquakes.

1. はじめに

危険物を扱う円筒タンクにおいて、タンクの安全性を考慮するうえで液体の挙動を検討することが重要である。2003年十勝沖地震ではタンクの内用液のスロッシングが一因となり火災が発生した。また、同様に1964年の新潟地震でもタンク火災が発生しており、内部液体のスロッシングは重要な検討事項である。

そこで、有限要素解析をもとに地震に対する円筒タンク内液体のスロッシングを解析することで、円筒タンクの安全性の確認と耐震設計技術の向上を目的として数値計算を行ったので、地震動に対する円筒形タンクの内部液体のスロッシング挙動の結果を報告する。

2. 解析モデル

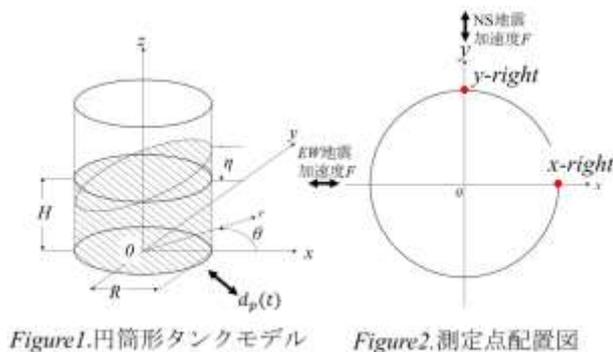


Figure1.円筒形タンクモデル

Figure2.測定点配置図

本研究で使用した液面動揺解析モデルを Figure1.に示す。タンクの大きさは、直径を $D(=2R)$ 、静水面高さを H 、動揺時の液面の変位を η で表し、タンクの中心から半径方向の座標を r 、円周方向の角度を θ とする。 F は加振加速度とし、それぞれの変位 η の計測点を Figure2.に示す。タンクの側面は剛体とし、液体とタンク底面、側面の摩擦は 0 として与え、スリップ条件を適用した。解析における条件を Table1,2 に示す。本研究のケース 1,2 では、 x 軸方向のみに正弦波の加速度を与え、液面動揺を発生させる。

ケース 1,2 においては一定周期の加振振動を $t=0.0[s] \sim 40.0[s]$ まで、ケース 3 においてはエル・セントロ地震動を用いて、 $t=0.0[s] \sim 340.0[s]$ まで解析した。なお、加振振動数 f_A, f_B は液体の固有振動数 f_0 に対して、各々 93% と 107% に対応した振動数である。

Table1.計算パラメータ

記号	ケース1	ケース2	ケース3	
静水面高さ [m]	H	0.2	0.6	20
直径[m]	D	1.0	1.0	80
水深比	H/D	0.2	0.6	0.25
レイノルズ数	Re	3000	3000	3000
減衰定数 [%]	ζ_i	0.1	0.1	0.1
液体の一次固有振動数 [Hz]	f_0	0.757	0.945	0.120

Table2.加振条件

加振振動数：ケース1	$f_A = 0.701[Hz]$	$f_B = 0.812[Hz]$
ケース2	$f_A = 0.875[Hz]$	$f_B = 1.014[Hz]$
加振振幅：ケース1	$X_A = \pm 5.0 \times 10^{-4} [m]$	$X_B = \pm 5.0 \times 10^{-4} [m]$
ケース2	$X_A = \pm 5.0 \times 10^{-4} [m]$	$X_B = \pm 5.0 \times 10^{-4} [m]$

3. 基礎計算

液体の運動計算にはナビエ・ストークス(N-S)方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\text{無次元動圧} : P = p + \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\text{フルード数} : F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

を使い、液面の無次元高さ h は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_\beta \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} = u_\alpha \quad (4)$$

を適用した。これらの式は有限要素法を使って、離散化を行った。また、これらの式はそれぞれ、流速を u_i 、応力を σ_{ij} 、動圧を P 、全圧力を p 、代表速度を $V(=1[m/s])$ 、重力加速度を $g(=9.8[m/s^2])$ 、代表長さを $L(=D)$ として

1 : 日大理工・院(前) 2 : 日大理工・教員・海建

計算を行った。

4. 計算結果

4.1 正弦波の加振によるスロッシング

正弦波の加振は x 方向のみ与えた。

Figs3 と 4 は、加振振動数 f_A を使ってケース 1 と 2 に対して、線形ポテンシャル理論と $N-S$ 式による液面変位 $\eta (=Dh)$ の比較を示してある。両ケースともに液面変位 η の振れ幅に大きな差は見られないが、周期に差が生じている。

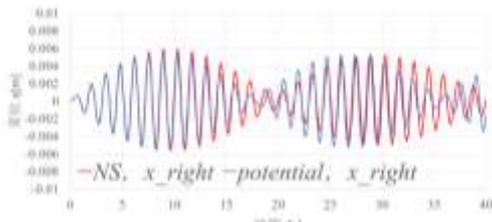


Figure3. ケース1における液面動揺の時刻歴曲線
NS解とポテンシャル解の比較(加振振動数 $f_A=0.701$ [Hz])

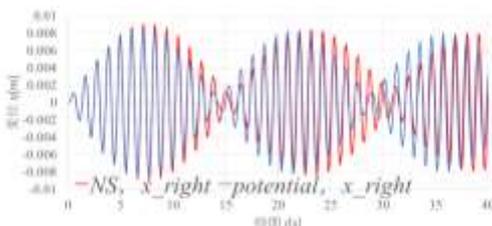


Figure4. ケース2における液面動揺の時刻歴曲線
NS解とポテンシャル解の比較(加振振動数 $f_A=0.875$ [Hz])

Figs5 と 6 は、ケース 1 と 2 に対して加振振動係数 f_A と f_B の違いによる液面変位 η の相違を示している。両ケースともに液面変位 η の振れ幅に大きな差は見られないが、周期に差が生じている。

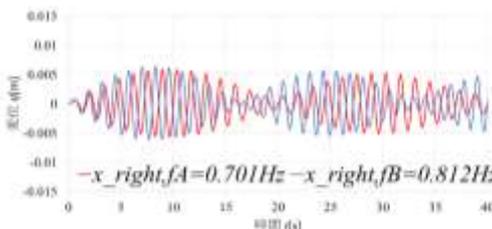


Figure5. ケース1における液面動揺の時刻歴曲線
加振振動数による比較(加振振動数 $f_A=0.701$ [Hz], $f_B=0.812$ [Hz])

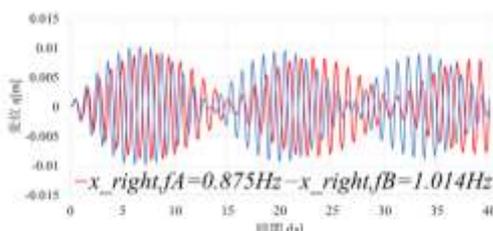


Figure6. ケース2における液面動揺の時刻歴曲線
加振振動数による比較(加振振動数 $f_A=0.875$ [Hz], $f_B=1.014$ [Hz])

4.2 エル・セントロ地震動によるスロッシング

短周期振動であるエル・セントロ地震動を使って、円筒形タンクを加振することで、実際の地震動に対する円筒形シェル容器内の液体のスロッシングの挙動を確認する。円筒形タンクを NS, EW の両方向に加振した時の、 $y-right$ と $x-right$ の位置の液面変位 η の結果を Figs7 と 8 にそれぞれを示す。NS 方向のほうが EW 方向に比べて、液面変位 η の振れ幅が大きいことが分かった。

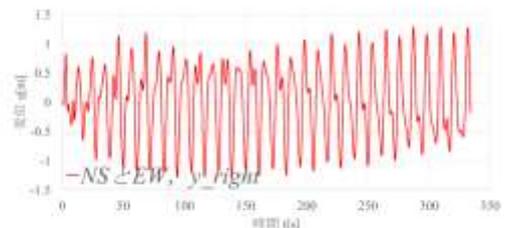


Figure8. エル・セントロ地震動加震時の
液面動揺の時刻歴曲線, $y-right$

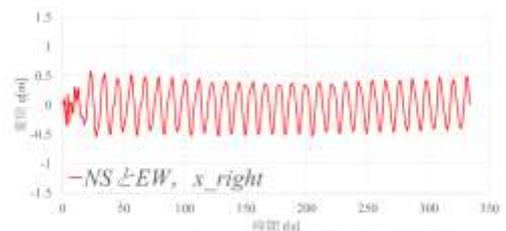


Figure7. エル・セントロ地震動加震時の
液面動揺の時刻歴曲線, $x-right$

5. おわりに

本研究では、円筒形タンク内における液体の液面動揺を解析することで、 $N-S$ 式の妥当性を示した。また、水深比 (H/D) の加振振動数 f による液面変位 η の変化と、エル・セントロ地震動を使って、短周期振動に対するスロッシングの挙動を確認した。今後は、長周期振動に対するスロッシングの挙動についても解析する予定である。

6. 参考文献

- [1] 田中宏明, 中山司:「三次元貯槽内の非線形スロッシングに対する境界要素解法」, 日本機械学会論文集(B編), vol.57, No.538, pp.8-14, 1991
- [2] 曾我部潔, 重田達也, 柴田碧:「液体貯槽の耐震設計に関する基礎方程式」, 東京大学生産技術研究所報告, vol.26, No.7, pp.14-21, 1977