

浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析

○ニュートンワークス(株) 正会員 長沼 寛樹 中央大学 学生員 有田 新平
中央大学 学生員 樽川 智一 中央大学 正会員 平野 廣和

1. はじめに

2003年9月26日に発生した十勝沖地震(M=8.0)は、やや長周期の揺れを生じたことから、苫小牧市を中心に数多くの石油タンクが被害を受けた。地震の主たる被害は、浮屋根式石油タンクの浮屋根が損傷を被ったもので、中には浮屋根が浮力を失って液面下に沈没し、油面が大気にさらされるという危険な事態にまで至るものもあった。この浮屋根の損傷は、地震の揺れに伴う貯蔵液の液面揺動(スロッシング)により発生したものと考えられる。

一方、弾性体である浮屋根を考慮したタンクのスロッシング数値解析例は少ない。これは、構造 - 流体連成問題を取り扱うことから、解析がたいへん複雑になることによる。このため浮屋根構造を持つタンクに関するスロッシング解析手法は必ずしも確立されているとは言えない。

このような背景から、本報では浮屋根式タンク構造のスロッシング現象に対する数値解析手法を確立することを目的とする。具体的には流体振動をポテンシャル理論で仮定し、有限要素法により浮屋根式石油タンクに対して構造 - 流体連成解析を行うものである。なお、本解析には汎用の構造・流体解析ソフトであるADINAを用いて行う。

2. ポテンシャル理論によるスロッシング解析

(1) 支配方程式

流体運動を非粘性非圧縮、渦なし、波面の変形は微小であると仮定したとき、流体の運動は速度ポテンシャル ϕ として連続の方程式で表される。

$$\nabla^2 \phi = 0$$

(2) 2次元矩形タンクでの解析

ポテンシャル理論では、微小振幅に基づくスロッシングモードの理論解と良い一致が得られるが、有限振

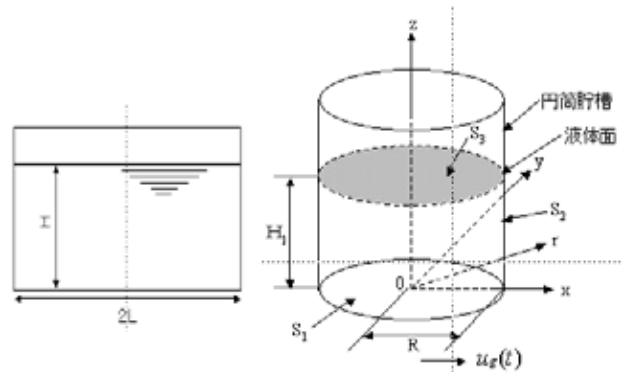


図-1 矩形タンク諸元

図-2 円筒貯槽

表-1 矩形内流体のスロッシング固有振動数(Hz)

	モード1	モード2	モード3	モード4
理論解	0.1891	0.2788	0.3421	0.3950
計算解	0.1891	0.2790	0.3433	0.3993

幅や波の非線形問題には適用できないとされている。しかし、タンクで生じるスロッシング現象を見た場合、タンク内で生じる流体の運動は比較的緩やかな動きであることがわかる。これより、まず図-1に示す2次元の矩形タンクにおけるスロッシング解析を行い、スロッシング固有周波数を求める。

結果を表-1に示す。1次モードから4次モードまでほぼ解析結果と理論解が一致する。2次元矩形タンクの解析結果より、本解析手法は有効であると考えられる。

3. 3次元浮き屋根式円筒タンクの解析

(1) 座標系と境界条件

図-2に示すような円筒貯槽を剛体と仮定し、座標系を定める。これに水平地震動変位 $u_{g(t)}$ を受けるときの側面、底面、及び自由表面における境界条件は次式で表される。

$$\partial \phi / \partial r |_{r=R} = \dot{u}_g \cos \theta$$

$$\partial \phi / \partial z |_{z=0} = 0$$

$$\partial^2 \phi / \partial t^2 + g \partial \phi / \partial z = 0, \quad z = H = H_1$$

キーワード : スロッシング解析, 構造 - 流体連成解析, 浮屋根式タンク

連絡先 : 〒104-0031 東京都中央区京橋 1-16-10 tel.03-3535-2631 fax.03-3535-2640

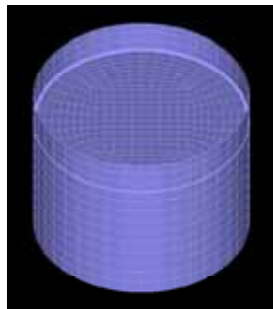
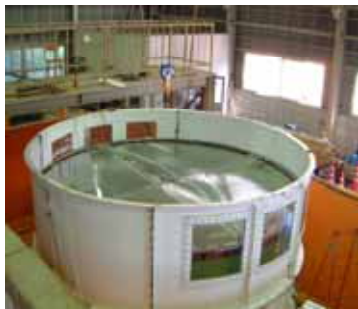


写真-1 振動実験のタンクモデル 図-3 解析モデル

表-2 起振条件

入力波	条件
正弦波	起振周波数: 0.46Hz 起振振幅: 変位制御 ±3mm (10秒) ±5mm (20秒) ±3mm (10秒)

(2) 解析モデル

写真-1 に示すような井田ら¹⁾により行われたスロッシング実験結果との比較を行う。このモデルは、苫小牧で火災事故が発生した貯槽タンクの 1/10 モデルである。直径 4m、高さ 2.5m の円筒タンクに水深 2m の位置までに水を張っている。浮屋根は、直径 3.95m、厚み 4.5mm の中空ポリカーボネートシートである。

有限要素分割図を図-3に示す。浮屋根は弾性体とし、ポリカーボネートシートの剛性を採用している。

(3) 加振条件

加振条件は、井田らの振動実験条件と同一条件下での解析を目的としている。この条件を表-2 に示すように、水平方向からの正弦波(このタンクのスロッシング1次固有周波数である 0.46Hz)である。加振は 40 秒間を基本としている。

(4) 解析結果

図-4 に起振軸上の端の部分の浮屋根の鉛直加速度を、図-5 に同位置での浮屋根の鉛直変位をそれぞれ示す。起振後 10 秒から 30 秒までの間の浮屋根の挙動に関しては、実験値も解析値もほぼ同様な挙動を示していることがわかる。これより、この間においては、本解析手法で示した構造 - 流体連成解析の有効性が確認できた。

しかし、加振後 30 秒を超えると位相のずれは無いものの、加速度、変位ともに振幅量に差が生じている。これは解析・実験条件において 30 秒を過ぎると加振振幅を ±5mm の定常状態から ±3mm に絞っている。実験の場合はここでタンク内の水の減衰効果が作用するのに対し、解析ではポテンシャル理論のみで減衰項を付加していない

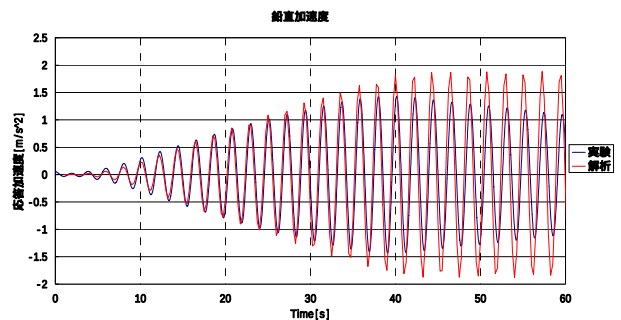


図-4 浮屋根の起振軸端の鉛直加速度

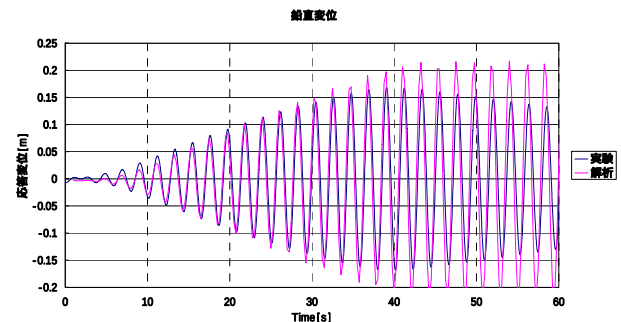


図-5 浮屋根の起振軸端の鉛直変位

ことから、流体の減衰効果が反映されていない。この両者の条件の違いが顕著に現れた結果と思われる。

4. おわりに

剛性を持った浮屋根を有する円筒形タンクの 1 次固有振動数での加振時のスロッシング現象を構造 - 流体連成解析により、実験結果をほぼ再現することができた。

しかしながら、本解析ではポテンシャル理論であり、減衰項が加味されていないので、加振振幅減少後の減衰状態を再現するには到らなかった。実際のスロッシング現象は、加振時のみならず加振後の浮屋根の挙動が重要であり、ともすると加振後に被害が生じる場合も考えられる。なお、現在、ポテンシャル理論に減衰項を加味した解析を実施中である。

流れの場に注目した場合、タンク内の流れが遅いことからポテンシャル理論が適用できたと考える。本来ならば Navier-Stokes 方程式を扱うべきであるが、計算時間の問題、時間積分上発生する人工粘性の問題等解決すべき問題が残されている。工学的にはポテンシャル理論でも十分可能であることを示唆したい。

< 参考文献 >

1)井田他：浮き屋根式タンクのスロッシング減衰に関する振動実験，第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会，2005