

小型円筒形タンク内の非線形液面動揺に関する実験結果と数値解との比較検討

On the experimental result and numerical solution for Nonlinear sloshing of a liquid in a small cylindrical tank

○遠藤優太¹, 近藤典夫²Yuta Endo¹, Norio Kondo²

For the past damage of cylindrical storage tanks, measures have been taken to lower the oil level to prevent liquid leakage and collision with structures such as floating roof pontoons. However, there is a concern that larger liquid level upset may occur in case of higher-than-expected seismic motions. In this paper, a liquid level motion analysis is carried out as a preliminary to the coupled analysis with the floating roof, assuming resonance due to sinusoidal vibration. In addition, horizontal vibration tests are conducted using a small model in order to compare the results with the numerical analysis and verify the validity of the analysis.

1. はじめに

過去の円筒形貯槽タンクの被害[1]に対して、液体の漏洩及び浮屋根式のポンツーンなど構造物の衝突防止のために貯蔵する石油の液位を低下する措置が施されている。しかし、想定以上の地震動が発生した場合、より大きな液面動揺が発生する事も懸念される。本論文では、浮屋根との連成解析の前段階として正弦波の振動による共振を想定した液面動揺解析を行う。また、本数値解析との比較を行い、妥当性を検証するため、小型模型による水平加振実験を行ったため、その結果を報告する。

2. 液面動揺解析モデル

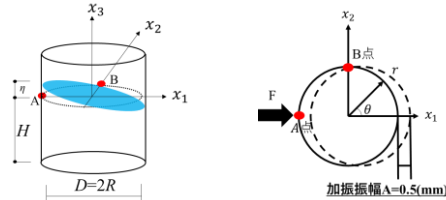


Figure1.計算モデル Figure2.真上から見た図

本研究で使用した液面動揺解析モデルを Fig1.に示す。タンクの大きさは、直径を D 、半径を R 、静水面高さを H 、動揺時の変位を η で表し、タンクを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 x_1 軸方向の加振加速度を示し、点 A、点 B は変位の計測点である。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。本研究では、 x_1 軸方向のみに正弦波の外力を加え、強制的に液面動揺を発生させる。

3. 基礎方程式

液体の運動計算にはナビエ・ストークス方程式による非線形解析を行い、無次元応答変位 h の計算には、高さ関数法を適用している。これらの式には有限要素法を使って、空間の離散化を行っている。

次に本数値解による液面動揺の h を理論解による変

位 $\eta(=Dh)$ と比較するため、曾我部ら[2]の線形ポテンシャル理論から導かれた数式を用いた。

4. モデル実験と実験方法

実験モデルは Fig3.に示すように内径 $D=0.20$ [m]、容器の高さ $L=0.20$ [m] のアクリル製の円筒形タンクを使用し、これに静水面高さ $H=0.12$ [m]、 0.042 [m]、 0.03 [m] まで水を充填した。円筒形タンクモデルの一次固有振動数は[2]の角振動数の式から $f_1=2.11$ 、 $f_1=1.72$ 、 $f_1=1.515$ [Hz]と求まる。

そして、実験モデルに取り付けたアルミ製の囲いに fig4 に示すレーザー変位計(IL-300)を設置し、水面に浮かべた反射板から壁面付近の変位 η を 2 点計測する。計測時間と加振は $t=0.0$ [s]~ 50.0 [s]まで 0.01 [s]刻みで行った。Table.1 に加振条件を示す。

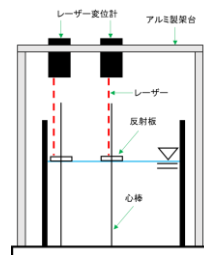


Figure3.正面図

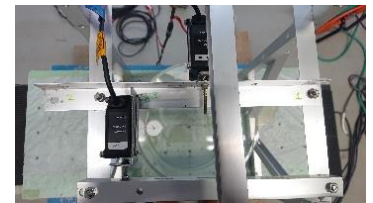


Figure4.真上から見た図

Table1.加振条件

入力:正弦波	加振振動数:	ケース1 $H=0.12$ [m] $f=1.69$ - 2.53 [Hz]
		ケース2 $H=0.042$ [m] $f=1.55$ - 1.89 [Hz]
		ケース3 $H=0.03$ [m] $f=1.36$ - 1.67 [Hz]
加振振幅:		$A=\pm 0.0005$ [m]

5. 実験結果と線形解、N-S 方程式の比較

本章では、線形ポテンシャル理論による厳密解と N-S 式による数値解を用いて実験結果との比較を行う。Table.2 に本研究で使用した計算パラメータを示す。

線形ポテンシャル理論に用いる小型タンクの減衰定数 ζ は 0.65% 、N-S 式に用いるレイノルズ数 Re は 3000 とした。

各加振条件での液面動揺の時刻歴曲線を Fig.5 と 6 に示す。各応答曲線を Fig7 と 8 に示す。青線の包絡線は実験値、赤線は NS 式による計算結果、黒線は線形ポテンシャル理論による計算結果を示す。

Fig.5 はケース 2 で $f=1.704$ [Hz]を与えた時の A 点で求めた変位 η の時刻歴曲線を示す。実験値での最大変位は $\eta_{max}=0.03351$ [m]という結果となった。本研究の非線形解析は $\eta_{max}=0.03546$ [m]となり、最大変位は非常に近い結果となった。速度ポテンシャル理論では、時間経過による液面動揺は捉えているが、 $\eta_{max}=0.02408$ [m]と過小評価となっている。

Fig.6 はケース 3 で $f=1.545$ [Hz]を与えた時の A 点で求めた変位 η の時刻歴曲線を示す。実験値での最大変位は $\eta_{max}=0.0280$ [m]で上下非対称な曲線になり、非線形による液面動揺が現れている事が分かる。本研究の N-S 解の最大変位は $\eta_{max}=0.0315$ [m]となり、NS 解は僅かに大きくなったが、実験に近い液面動揺を再現している。

Fig7 は水深比(H/D)=0.21 の応答曲線を示す。線形解、NS 解析共に共振振動数 $f_1=1.72$ [Hz]で最大変位となり、実験値も同じ結果となった。しかし、線形解析では一次共振点付近での最大変位を過小評価している結果となっている。

Fig8 は水深比(H/D)=0.15 の応答曲線を示す。線形解では、共振振動数 $f_1=1.515$ [Hz]で最大変位となり、応答曲線は左右対称となる。しかし、実験値、NS 解では、 $f=1.545$ [Hz]で最大変位となり、共振点が右にずれる結果となり、非線形動揺が現れている事が分かった。

Table2.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	0.12	0.042	0.03
直径 [m]	D	0.2	0.2	0.2
水深比	$\frac{H}{D}$	0.6	0.21	0.15
レイノルズ数	Re	3000	3000	3000
減衰定数 [%]	ζ_i	0.65	0.65	0.65
一次固有振動数 [Hz]	f_1	2.11	1.72	1.515

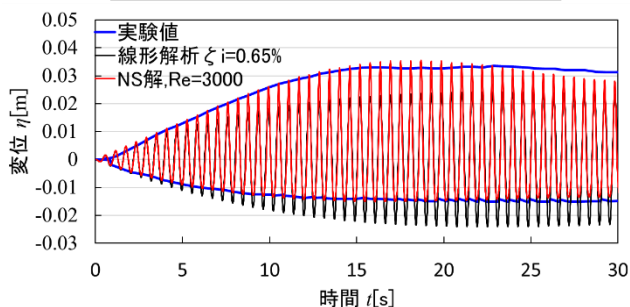


Figure.5 ケース 2 での液面動揺の時刻歴曲線 ($H=0.042$ [m]、 $D=0.2$ [m]、加振振動数 $f=1.704$ [Hz] A 点、タンク固有振動数 $f_1=1.72$)

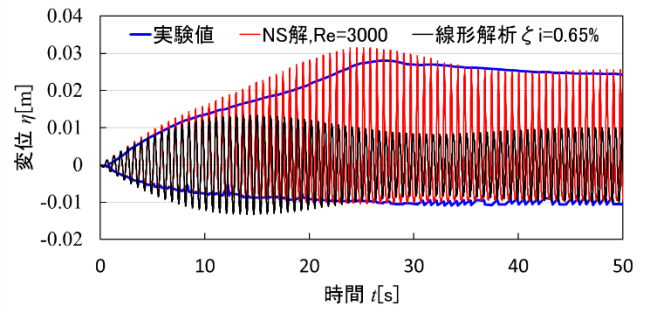


Figure.6 ケース 3 での液面動揺の時刻歴曲線 ($H=0.03$ [m]、 $D=0.2$ [m]、加振振動数 $f=1.545$ [Hz] A 点、タンク固有振動数 $f_1=1.515$)

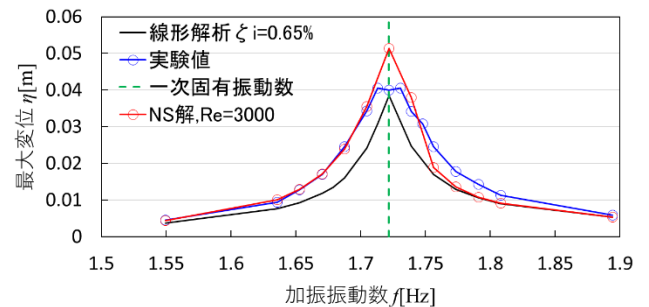


Figure.7 ケース 2 A 点での液面動揺の応答曲線 ($H=0.042$ [m]、 $D=0.2$ [m]、加振振動数 $f=1.55-1.89$ [Hz]、タンク固有振動数 $f_1=1.722$)

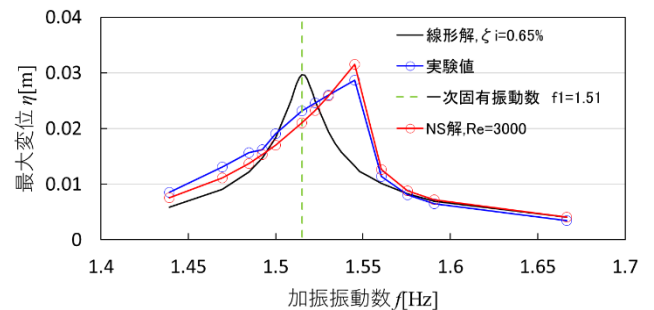


Figure.8 ケース 3 A 点での液面動揺の応答曲線 ($H=0.03$ [m]、 $D=0.2$ [m]、加振振動数 $f=1.36-1.67$ [Hz]、タンク固有振動数 $f_1=1.515$)

6. おわりに

円筒形タンク内の水深比(H/D)による共振点の変化および非線形液面動揺が現れている事が実験値と N-S 解析との比較で捉えられた。今後は $H=8$ cm、 6 cm での比較を追加するとともに、スワーリング現象についても捉える予定である。

参考文献

- [1] 危険物保安技術協会：平成 15 年十勝沖地震危険物施設の被害記録、平成 16 年 12 月
- [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的研究、東京大学生産技術研究所報告、第 26 巻 第 7 号、昭和 52 年 3 月