

傾斜した貯蔵タンクのスロッシング現象に関する実験

○愛知工業大学 正会員 鈴木森晶
 愛知工業大学 正会員 奥村哲夫
 岐阜大学大学院 山城屋誠一

1. はじめに

2003年の十勝沖地震で、長周期地震動による共振によって、石油貯蔵タンク内容液にスロッシング現象が発生した。その結果、貯蔵タンクに火災が発生したことは記憶に新しい。

一方、1995年の兵庫県南部地震では、液状化、側方流動などの地盤変形、座屈、浮き上がりによるタンク自体の傾斜が報告されている¹⁾。このようなタンクは主に直径約30m以下の小規模タンクであり、比較的民家の近くに存在し、全国の石油タンク総数約86,000基中のおよそ9割を占める。しかし、これらのタンクに対する安全対策は十分になされてこなかったのが現状である¹⁾。

本研究ではタンクの傾斜に注目し、傾斜率を0%~25%まで変化させた場合、スロッシング現象の固有振動数、最大波高などがどのように変化するかを把握することを目的とした実験を行う。

2. 実験概要

実験に用いたタンクは直径600mm、高さ500mmの塩化ビニル製である。このタンク内に直径590mm、厚さ1mmのビニル製で、質量比を考慮し、質量470gの浮き屋根モデルを浮遊させる²⁾。内容液は入浴剤を混入し着色した水道水を使用する(図-1参照)。実験では、浮き屋根の有無、液深、傾斜率をパラメータとし、表-1に示すように計36ケースについて行った。スロッシングの1次固有振動数 $f(\text{Hz})$ は次式で求めることができる³⁾。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r} \times 3.68 \times \tanh\left(3.68 \times \frac{H}{r}\right)} \quad (1)$$

ここで、 H : 液深(m), g : 重力加速度(m/s^2), r : タンクの半径(m)である。

3. 実験結果

3.1 固有振動数との関係

実験より得られた各々の液深、傾斜率と固有振動数との関係を表-2に示す。表より、傾斜率0%における各液深の1次モードのスロッシング固有振動数は理論値とほぼ一致している。また、図-2には、縦軸に固有振動数を、横軸に傾斜率

$\theta(\%)$ をとり、液深200mmでの両者の関係を示す。なお、図中の理論値は、タンクが傾斜することによって、液面が楕円形になり、この時の長径を見かけ上の直径とした時の値として算出した。図より、傾斜率の増加に伴い固有振動数も見かけ上の直径の理論値と同様の傾向を示していることが分かる。

液深と振動数の関係については、式(1)から液深が大きくなると固有振動数も大きくなることは明らかである。しかし、式(1)はタンクの内径 r と液深 H のみがパラメータとなっているため傾斜率が20%程度に大きくなるとやや差が大きくなるようである。

表-1 実験ケース概要

浮き屋根	有り, 無し	2 ケース
液深	100mm, 200mm, 300mm	3 ケース
傾斜率	0%~25%	6 ケース

表-2 液深、傾斜率と固有振動数の関係(浮き屋根無し)

液深 \ 傾斜率	理論値	実験値					
	0%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
100mm	0.91	0.92	0.92	0.91	0.90	0.89	0.86
200mm	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.11	1.10
300mm	1.20	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17

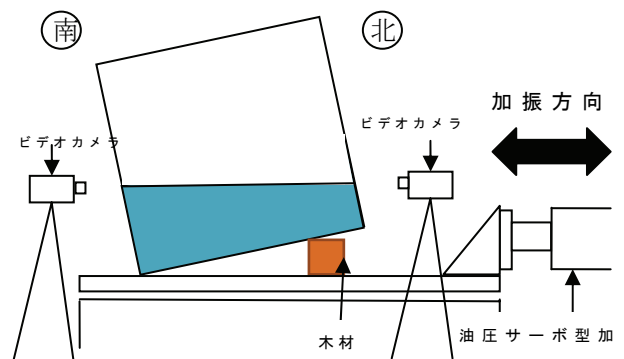


図-1 実験装置の模式図

3.2 スロッシング波高の検討

図-3には、浮き屋根が無い場合の傾斜率とスロッシング波高(η_{max})の関係を各液深について示し

た. 同様に, 浮き屋根のある場合の結果を図-4に示した.

図-3より, 液深 100mm における液面挙動は傾斜率の増加に伴い減少傾向にあり, 液深 200mm ではほぼ一定値であった. 一方で, 液深 300mm では増加傾向にあり, 特に傾斜率 0%と 25%を比較すると, 25%では波高(η_{max})が 60mm(直径に対して約 10%)増大した.

また, 実験時における液面挙動の観察では, 液深 100mm 時に傾斜率の増加に伴う液面挙動の著しい変化がみられた. 特に傾斜率 25%では, タンク南側での内溶液の滞水と北側への跳水現象が繰り返し確認された.

図-4より, 各液深ともに傾斜率による液面挙動は, 浮き屋根無しの状態と比較して最大 5mm 程度の変動幅となり, 概ね同程度を保っている. つまり, 浮き屋根式タンクにおいては傾斜による影響が非常に少ないことがわかった. しかしながら, 浮き屋根が有る場合は, 加振後しばらくすると, 南北のタンク側壁に浮き屋根が衝突する現象が確認された. この現象は傾斜率の増加に伴い顕著に現れ, 液深が大きいほど衝突する現象が激しくなった. これはタンクの傾斜によりタンク側面と浮き屋根の隙間が増加することで, タンク内での浮き屋根の移動距離が増え, 結果的に衝突速度が増加したことが主因であると考えられる. なお, 本実験で用いた浮き屋根はポンツーンに相当する部分に用いた材料の浮力が大きく, 沈没することは無かったが, 実物では, ポンツーンの損傷などに起因して沈没などが懸念される.

4. 結論

本実験より得られた結果を以下に示す.

- 1) タンク傾斜時における固有振動数は, どの液深においても傾斜率が大きくなるにつれ減少した.
- 2) 傾斜したタンクの楕円状液面の長径を見かけ上の直径とすると, 理論値と実験値の固有振動数は比較的一致する.
- 3) 浮き屋根無しの場合, 傾斜率の違いによって液面挙動の変化が顕著に現れたが, 浮き屋根有りの場合, 各液深, 各傾斜率による液面挙動の変化は小さかった.
- 4) タンクが傾斜するほど浮き屋根がタンク側面に激しく衝突することが確認された. この衝突は浮き屋根の破損, 沈没, 浮き屋根上部への内溶液の漏水, タンクへの損傷などに繋がり, 甚大な被害が生じる可能性があるかと推察される.

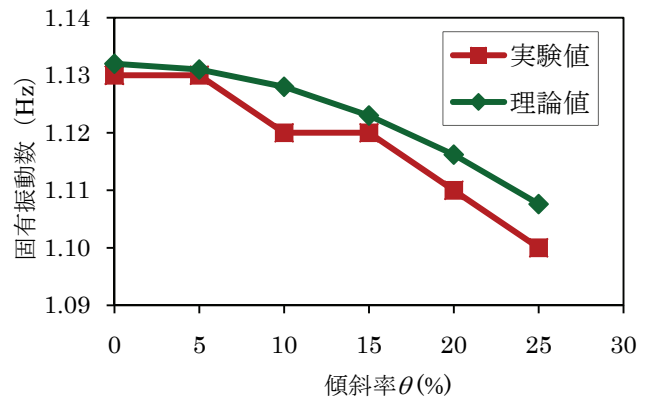


図-2 傾斜率と固有振動数の関係 (液深 200mm, 浮き屋根無し)

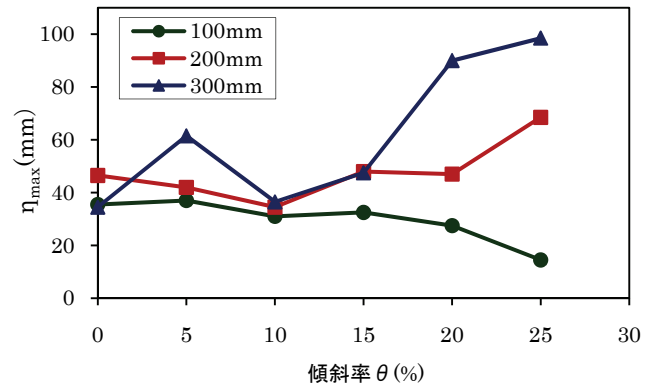


図-3 傾斜率と η_{max} の関係 (浮き屋根無し)

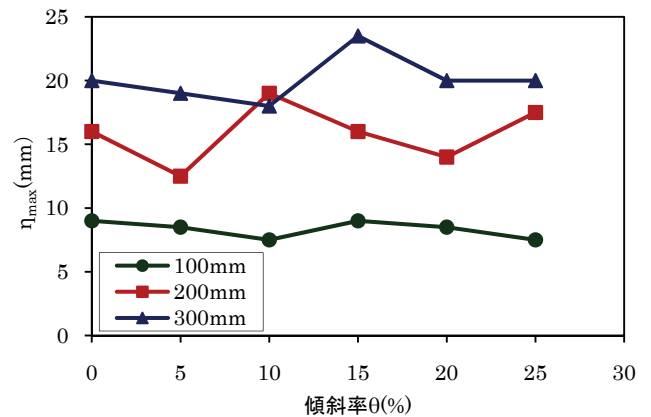


図-4 傾斜率と η_{max} の関係 (浮き屋根有り)

謝辞: 本研究は愛知工業大学地域防災研究センターの支援を受けて行ったものである. ここに謝意を表す.

参考文献

- 1) 消防研究センター, 研究紹介 http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=JRR1&ac2=22&ac3=513&Page=hpd_view, 2009.12.16
- 2) 坂井藤一, 西松正弘, 小川浩: 浮き屋根式石油貯槽のスロッシング性状に関する研究, 川崎重工業(株)技報, 第 74 号, pp.60-66, 1980.4.
- 3) 井田剛史, 平野廣和, 鈴木森晶, 坂東讓, 佐藤尚次: 浮き屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策 - ϕ 0.6m タンクモデルの振動実験 -, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.242-251, 2007.3