

浮屋根タンクのスロッシング固有周波数の確認

○中央大学 学生員 有田新平 (株)川口ゴム 正会員 井田剛史
中央大学 正会員 平野廣和 中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

2004 年 9 月に発生した北海道十勝沖地震のやや長周期の地震動の影響により、出光興産北海道製油所内の石油貯蔵タンクの浮屋根が沈没、石油タンクの全面火災にまで拡がり、大きな社会的影響を与えたことは記憶に新しい。これまでもプレート境界型の大規模地震が発生するたびに、全面火災とはいかなくとも浮屋根沈没による火災発生被害が起きている。これらの被害が起きる原因としては、石油タンクの液面揺動の励起（スロッシング）が発生することでの浮屋根の破壊や液漏れによるものと考えられている。

スロッシング現象は、1964 年新潟地震の調査から得られた山本らの研究¹⁾から、浮屋根の存在は 1 次の固有振動数にほとんど影響をしないことを示している。また坂井らの流体 - 弾性体連成振動研究²⁾でもスロッシングの 1 次モードに浮屋根の存在はほとんど影響を与えないことを示している。このため、40 年余りの間、若干の研究を除いてはほとんど浮屋根のない状態のスロッシングを扱う研究が主であった。しかし、これらの研究は直径 1m 程度までのモデルで確認されたものであり、実機まで拡張できるか否かは確認をされていない。

以上の様な背景から、本報告では、浮屋根の有無に関して、スロッシングの挙動と固有周波数の確認をおこなうために、φ-600 と φ-4000 の 2 種類のタンクにおいて加振実験を行い、固有周波数に関してそれを報告するものである。

2. スロッシング

大型石油タンクのスロッシングに強く影響する周期は、約 3～15 秒のやや長周期地震動であり、その地震動は、主に表面波から構成されている。ある地点でのやや長周期地震動は、震源特性と伝播特性との積で表現される。この長周期地震動とタンク貯蔵液の持つ固有周波数が一致することにより、液面が動揺し、このエネルギーが蓄積され大きな波高をもたらす。

一般に円筒タンクのスロッシング固有周波数 f は、タンク半径 R と液面高 h の関係から求めることができ、式(1)で表すことができる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh\left(1.841 \frac{h}{R}\right)} \quad (1)$$

3. タンクモデル

実験に用いたタンク（φ-600、φ-4000）のモデルをそれぞれ写真-1 に、浮屋根モデルを写真-2 に示す。またその諸元と(1)式から求めたスロッシングの固有周波数を表-1 に示す。

4. 実験方法

4-1 φ-600

φ-600 のタンクモデルをベーススライダー上に設置し、油圧サーボ式試験機で正弦波（水平起振）を与えた。固有周波数でタンクモデルを起振し、スロッシングを発生させるため、浮屋根がない状態でその固有周波数について確認を行った。つまり、式(1)から求められる固有周波数は、1.1Hz と推定されるが、実際にその前後周波数 1.0～1.2Hz で起振し、発生するスロッシングの挙動を確認した。

なお、起振条件は ±0.5mm の変位制御で 10 秒間行った。



φ-600 高さ 500mm



φ-4000 高さ 2500mm

写真-1 タンクモデル



φ-590 厚み 1mm



φ-3950 厚み 4.5mm

写真-2 浮屋根モデル

表-1 スロッシング周波数

	タンクの直径	
	φ-600	φ-4000
水位 (m)	0.2	2
スロッシング固有周波数 (Hz)	1.1	0.46

4 - 2 ϕ -4000

ϕ -4000 のタンクモデルを設置した架台を、大型油圧ジャッキを用いて、水平方向から正弦波及び苦小牧で発生した地震と同様の水平波の起振を行った。

正弦波では浮屋根ありの状態で算出したスロッシング周波数の前後の周波数の正弦波で発生する波高から確認を行った。また、苦小牧の地震波を 1/10 スケール（ ϕ -4000）のスロッシング周波数に合致するように、地震波データのサンプリングを調整し、地震波の卓越周波数をずらしていき、スロッシングの波高から確認を行った。なお、正弦波の確認では起振振幅 $\pm 3\text{mm}$ 、起振時間 3 秒で行った。

5．実験結果

5 - 1 ϕ -600

浮屋根なしにおいて正弦波起振の周波数と液面波高の関係をグラフを図-1 に示す。

(1)式より算出したスロッシングの周波数は 1.1Hz であり、それに近づくにつれ液面の波高が上昇していることがわかる。振動数が 1.1Hz ではタンク外へ液体が噴出し最大波高が生じて、スロッシング周波数だと確定できる。また、砕波は波高が $\pm 15\text{cm}$ を超えたあたりで発生した。これによりスロッシング周波数を確認することができた。

5 - 2 ϕ -4000

浮屋根ありにおいて正弦波起振の周波数と液面波高の関係をグラフを図-2 に示す。

(1)式より算出したスロッシング周波数は 0.46Hz であり ϕ -600 の時と同様に、0.46Hz において最も発生した波高が高いことがわかる。0.4Hz の正弦波で起振した時よりも 2 倍程度の波高となった。またこの時 ϕ -600 と同様に砕波し、両者共に(1)式より算出した値と一致した。

次に苦小牧の地震波データの調整して、地震波の卓越周波数を変化させた時の、卓越周波数と液面波高の関係を図-3 に示す。なお、この時には浮屋根なしの状態である。同様に算出したスロッシング周波数 0.46Hz 付近において、最大の液体の波高になっており、算出した値と一致していることがわかる。形が図-1,2 より整っていないのは地震波に卓越周波数以外にも多くの周波数成分が存在していることが影響していると考えられる。さらにこの波高が最大の卓越周波数を持つ地震波を用いて、浮屋根がある状態で加振した。このとき、浮屋根に付けられた加速度計より測った応答加速度の周波数スペクトルを図-4 に示す。これを見ると 1 次の卓越周波数は 0.46Hz であり、算出した値と一致していることがわかる。また、これにより浮屋根がある時と、ない時でもスロッシング周波数は変わらないことを示している。

6．まとめ

今回、スロッシングの挙動と固有周波数の確認を行い以下のことがわかった。

- ・ スケールの違う 2 種類のタンクにおいて(1)式の有用性を示すことができた。
- ・ スケールの大きい (ϕ -4000) 場合においても浮屋根の有無に関らず両者共に周波数は合致した。

今後は著者らの提案する制振装置がスロッシングの固有周波数に与える影響、制振装置の効果に対して検討を行っていく。

参考文献：1)山本善之：地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力，高压ガス Vol.3.1,1965

2)坂井藤一他：浮屋根式貯槽のスロッシングに関する一研究（解析と実験），圧力技術，Vol.15, No.1, 1979

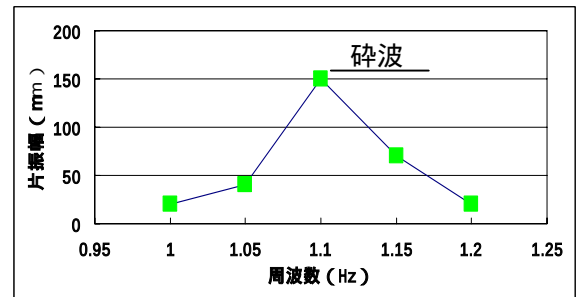


図-1 起振の周波数と液面波高

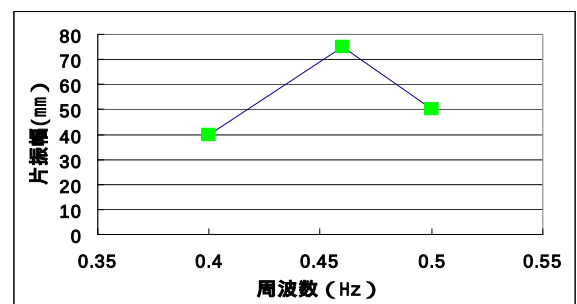


図-2 起振の周波数と液面波高

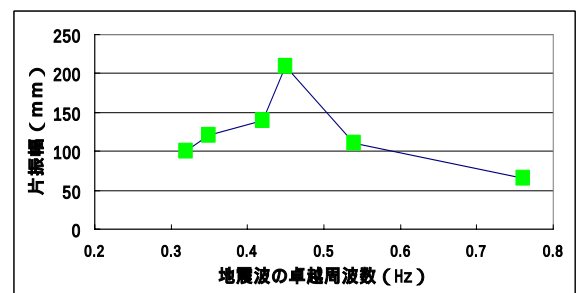


図-3 地震波の卓越周波数と液面波高

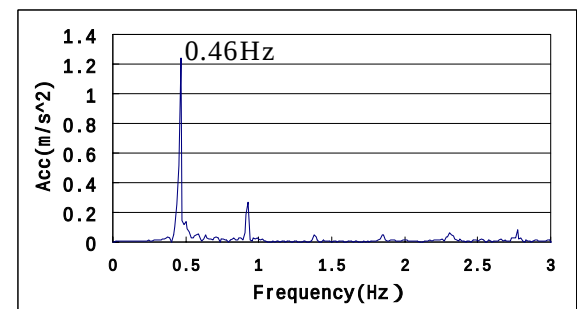


図-4 浮屋根の応答加速度の FFT