

## スロッシングによる浮き屋根式タンクの強度に関する研究

中央大学 学生会員 有田新平 中央大学 正会員 平野廣和  
 中央大学 正会員 佐藤尚次 愛知工業大学 正会員 奥村哲夫

### 1. はじめに

2003年9月に発生した北海道十勝沖地震(M8.0)でのやや長周期地震動の影響により、震源から200km以上離れた苫小牧地区において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、大きな社会的関心を集めた。これらの被害の原因としては、石油タンクのスロッシング(液面揺動の励起)が発生することで浮屋根が損傷し、浮力の低下によって沈没し、油面が大気にさらされたことによると考えられている。

このような背景から、本研究は、制振方法として浮屋根の外周部にゴム製の減衰材(以下バッファー)を設置することによって、スロッシングの抑制かつ浮屋根破壊防止を目的としている。本報告ではスロッシング時の浮屋根に発生する歪み・挙動に着目し、減衰材を用いた浮屋根のひずみ低減効果について大型振動台にて加振実験により検討する。

### 2. 実験モデル

#### 2.1 浮屋根式タンクモデル

実験に用いたタンクモデルは外径4000mm、高さ2500mmの鋼製で、振動台にボルトで固定し、水を2000mmまで満たした。浮屋根モデルは外径3950mm、厚さ4.5mmの中空樹脂を用い、外周にL-40アングルを設置し浮屋根式タンクをモデル化した。それぞれを写真-1に示す。振動台は愛知工業大学所有の大型振動台を使用した。

#### 2.2 バッファーモデル

バッファーは、浮屋根の外周部に取付け、スロッシング時にタンク側板と衝突して変形することによる粘性減衰とタンク側板との摩擦減衰によってスロッシングの抑制するものである。本実験では、バッファーの材質を剛性及び粘性減衰(損失係数)が異なる2種類と、それぞれに対し、図-1に示したバッファー形状2種とし、計4種類とした。表-1に本実験の実験パターンとバッファーの諸元を示す。

### 3. 計測項目と入力条件

一般に円筒タンクのスロッシング1次の固有周波数 $f$ 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。

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

実験は、タンクモデルをボルトで固定した振動台に、式(1)より求まる1次スロッシング固有周波数(0.47Hz)の正弦波を入力する変位制御で行った。起振時間は、立上振動10秒、本振動20秒、収束振動10秒で行った。本振動の振幅は3mmである。

計測項目は、浮屋根の4半円上及び浮屋根の中心から0.3Rと0.6Rの起振軸上の計6箇所に加速度計を設置し、各位置での鉛直方向及び水平方向の応答加速度を計測した。また、歪みゲージも同様の箇所に貼り付け、半径方向と円周方向の歪みを計測した。



タンクモデル



浮屋根モデル

写真-1 実験モデル

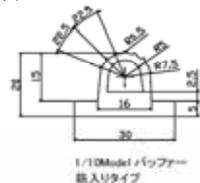
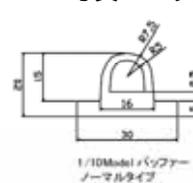


図-1 バッファーの形状

表-1 バッファーの諸元

材質	形状	摩擦係数	損失係数 (25)	ゴム硬さ
バッファーなし				
TYPE-A	ノーマル	0.95	0.13	A80
	筋入り	0.86		
TYPE-B	ノーマル	0.56	0.16	A70
	筋入り	0.63		

キーワード: スロッシング, 振動実験, 浮屋根式タンク

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

## 4. 実験結果

### 4.1 歪み (時系列)

浮屋根上における最大歪みが計測された 0.6R の位置での半径方向の時系列グラフを図-2 に示す。バッファなしを見ると、起振開始から歪みが増幅し、さらに起振終了後

(40 秒後)も増幅し続け、最大で 1500  $\mu$  が生じた。

つまり、スロッシングの 1 次モードに対する浮屋根の歪みへの影響は、強制振動終了後、更に大きくなっていくという事がわかる。これに対してバッファを取り付けた場合、全ての種類で起振終了時からの歪みの増幅は見られずに減衰し、最大歪みも小さくなっていることがわかる。材質別に見ると、剛性が高く、摩擦係数の大きい TYPE A ノーマルの減衰が大きくなっている。しかし、TYPE A 筋入りでは、摩擦係数が小さい分減衰も遅くなっている。それに対し、TYPE B では摩擦係数が低く摩擦減衰の寄与は小さいが、低剛性のためにバッファの変形が大きくなり、ゴムの持つ粘性減衰でのスロッシング減衰効果が得られたものと考えられる。従って、TYPE-B では TYPE-A 程の形状による減衰効果の差が生じなかった。

### 4.2 歪み (FFT)

次に、ゴム硬さの違いによる浮屋根の歪みへの影響に着目するため、TYPE A, B ノーマルの歪みをスペクトルで検証する。図-3 に起振中である 0 秒～50 秒及びバッファなしの 50～130 秒における歪みスペクトルを示す。バッファなしの 0～50 秒では、1次の0.47Hz が卓越している。しかし、起振終了後の 50～130 秒では、2次の高調波成分の増幅が見られる。これは液面のモード変化が浮屋根の歪みに影響を与えたものと考えられ、この成分が最大歪みを示し、時系列で見られた起振終了後の歪みの増幅に関与しているものと考えられる。従って、本成分をバッファによりいかに低減できるかが重要なポイントとなる。そこで、TYPE A を見ると、1次の周波数は低減しているが、2次の高調波成分が大きくなっている。これは、浮屋根外周部でバッファが強制的に拘束したために、浮屋根デッキ部での歪みが増加したものと考えられる。それに対し、TYPE B では、1次の卓越周波数を低減しているのに加え、その高調波成分も低減していることが分かる。

## 5. まとめ

高剛性を有するバッファは、その拘束力によりスロッシングを減衰させる効果が高くなるが、浮屋根に発生する歪みに影響を与えることも考えられる。そのため、TYPE - B のように摩擦減衰に頼るのではなく、バッファの変形による減衰を大きくすることで、浮屋根に発生する歪みを効率的に抑えることができるという所見を得た。本研究により、地震時に石油貯蔵タンクにスロッシングが発生した際に、バッファを用いることで浮屋根に発生する歪みの低減効果を示すことができた。

参考文献：1) 坂井藤一：2003年十勝沖地震における浮屋根式タンクの被害について、日本鋼構造協会、JSSC 52, 2004.4.

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

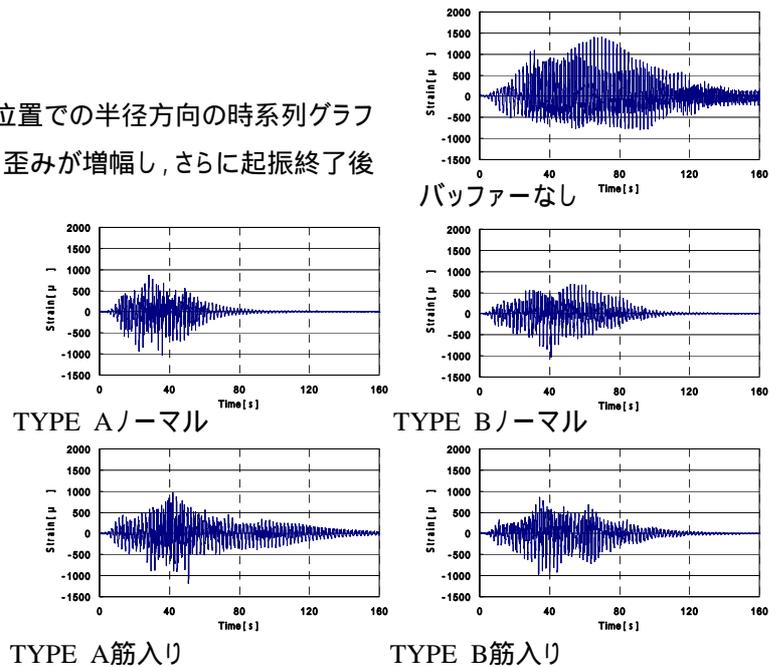


図-2 0.6R 半径方向ひずみグラフ

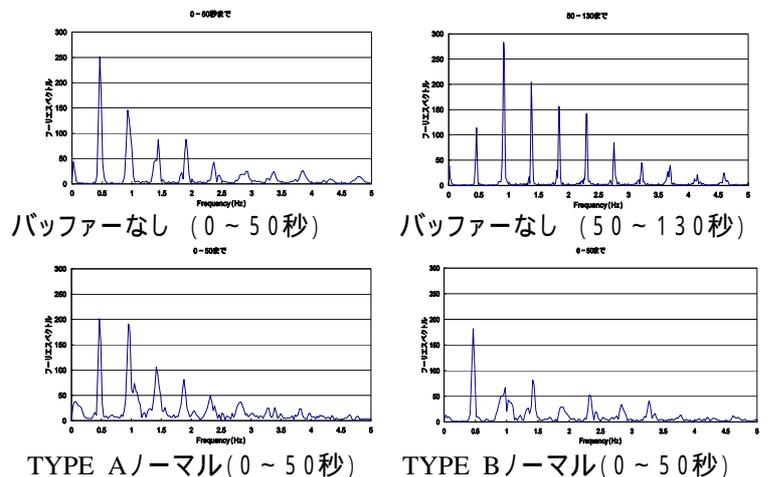


図-3 0.6R 半径方向ひずみ FFT