

浮屋根式タンクのスロッシング減衰対策とその減衰挙動について

(株)十川ゴム 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 中井商工(株) 正会員 連重俊

1. はじめに

やや長周期の地震により石油タンク貯蔵液のスロッシングが発生し、浮屋根の沈没、破壊、そして最悪の場合、火災発生といった問題が生じている¹⁾。それらの対策として、著者らは浮屋根外周部にゴム製制振材を設置することで、スロッシング減衰と浮屋根の損傷防止効果があることを提案し、φ4mの浮屋根式タンク（1/10 スケールレベル）にての振動実験を行い、その効果を確認している²⁾。さらに、本報では、制振材として適用するゴムの剛性や粘弾性特性等がスロッシング減衰効果に及ぼす影響について確認するための振動実験を実施し、そのメカニズムを検討した。

2. モデル実験による検討

実験モデルは、写真1のような直径4m、高さ2.5mの円筒状鋼製タンクを製作し、これに水深2mまで水を充填し、水平方向に移動する架台に設置した。また、水面上には、直径3.95m、厚み4.5mmの中空ポリカーボネートシートと外周をL40アングルで固定した浮屋根モデル（写真2）を浮遊させ、実際の貯蔵タンクをモデル化した。

(1) 実験方法

実験は、タンクモデルを設置した架台を大型油圧ジャッキで水平方向から正弦波起振を行なった。起振条件を表1に示す。

表1. 起振条件

波形	起振周波数	振幅条件
正弦波	0.47Hz	±3mm（本振動時） 立上10秒-本振動20秒-収束10秒

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。

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

ここで ε_i は $J_1'(\varepsilon_i)=0$ の i 番目の正根、 J_1 は第1種ベッセル関数である。

ε_i は1次モードでは1.841、2次モードでは5.33である。本タンクモデルでは、式(1)より、1次モードが0.47Hzとなる。

(2) スロッシングの減衰について

図1のバッファ（ゴム）をノーマルタイプと筋入りタイプの2種類製作し、ゴム材質も2種類（TYPE-A及びB）とした。表2に本実験パターンとバッファの諸元を示す。浮屋根がタンク側面と衝突するエネルギーを吸収、減衰させ、さらにスロッシングによる液面の動揺を抑えること目的として、バッファを写真2の浮屋根モデル外周部に取付け、その制振効果を確認した。

なお、ゴム種類はTYPE-Aがゴム硬さA80、TYPE-BがA70とした。

(3) 計測方法について

計測方法としては、浮屋根の4半円点及び起振軸上の0.3R及び0.6Rの位置に加速度計及び歪みゲージを取付け、起振時の各位置における加速度及び歪みを測定した。そして、浮屋根の振動減衰曲線、周波数スペクトルからバッファ有無による減衰性能の比較評価を行った。



写真1. タンクモデル振動実験



写真2. 浮屋根モデル

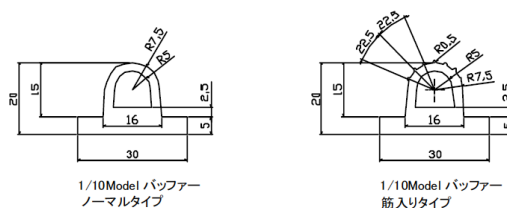


図1. バッファの形状

表2. バッファの諸元

材質	形状	摩擦係数	損失係数 (25℃)	ゴム硬さ
バッファなし				
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		

3. 結果

スロッシング減衰効果の比較として、バッファーなしとTYPE-A ノーマルタイプの0.3Rにおける加速度波形及びフーリエスペクトルを図2に示す。バッファーなしに比べバッファーありでは加速度の増幅が抑制され、かつ起振終了（40 秒）後すぐに減衰していることがわかる。また、フーリエスペクトルからも1次モードのピークを5分の1以下に低減していることがわかる。各バッファーモデルの減衰効果を比較するため、加速度波形から求めた減衰定数を表3に示す。その結果、TYPE-A（ノーマル）で最も減衰定数が高くなった。

次に各モデルの0.6Rにおける歪みについて、起振時及び起振後のフーリエスペクトルを比較すると、図3のようにバッファーなしは、起振後に2倍成分を中心に高次成分の増幅が見られる非線形挙動が確認された。一方、バッファーありでは、バッファーなしに比べ、共に最大振幅とその増幅は抑制されている。しかし、TYPE-Aは起振後こそスロッシング減衰効果が大きいために歪みが低減されているが、起振時には2倍成分がバッファーなしに比べて30%大きくなった。これは、TYPE-Aが高硬度・高摩擦であることから、浮屋根外周部で浮屋根の運動を強制的に拘束して減衰させたため、逆に浮屋根中心部の歪みを増大させたと考えられる。それに対し、TYPE-Bでは低硬度・低摩擦であることから、浮屋根外周部での拘束力が小さく、浮屋根の動きにゴムが変形追従して減衰させるため、起振時における浮屋根中心部の歪みを抑制したと考えられる。起振後は浮屋根外周部での拘束力が小さく、減衰効果がTYPE-Aに比べて劣るため、非線形挙動による浮屋根の歪みが多少残るものの、バッファーなしの50%に歪みを抑えていることがわかる。

4. まとめ

本研究より、バッファーの剛性、摩擦特性、粘弾性特性の違いによって、スロッシングの制振効果に影響を及ぼすことが確認できた。つまり、TYPE-Aのように摩擦減衰に依存する減衰方法ではスロッシング減衰効果が高くなる反面、浮屋根耐力への影響や減衰効果のバラツキが考えられ、TYPE-Bでは、ゴム変形時の内部減衰によるスロッシング減衰であるため、浮屋根中心部の歪みが増大せず安定的にスロッシングを抑制する効果も確認できた。今後の課題としては、バッファーを用いた制振装置を設計する上で浮屋根等の構造面への影響を詳細に検討する必要があると考える。

参考文献

1) 屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書，危険物保安技術協会，2004.9

2) 井田剛史，平野廣和：浮屋根式タンクのスロッシング減衰に関する検討実験，土木学会 H17 年度全国大会，2005.9

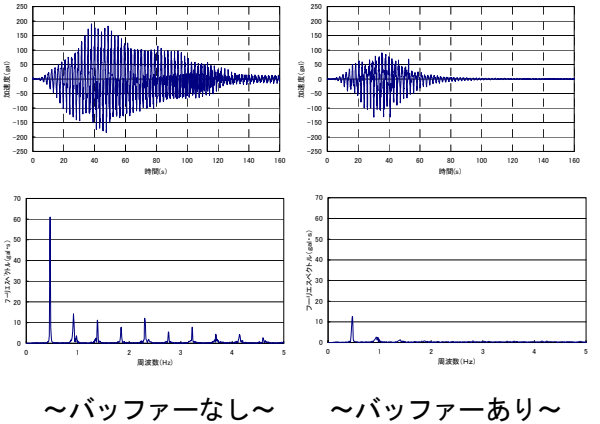


図2. 浮屋根の加速度波形及びフーリエスペクトル

表3. 各モデルでの減衰定数

材質	形状	減衰定数
バッファーなし		0.0083
TYPE-A	ノーマル	0.0266
	筋入り	0.0102
TYPE-B	ノーマル	0.0154
	筋入り	0.0141

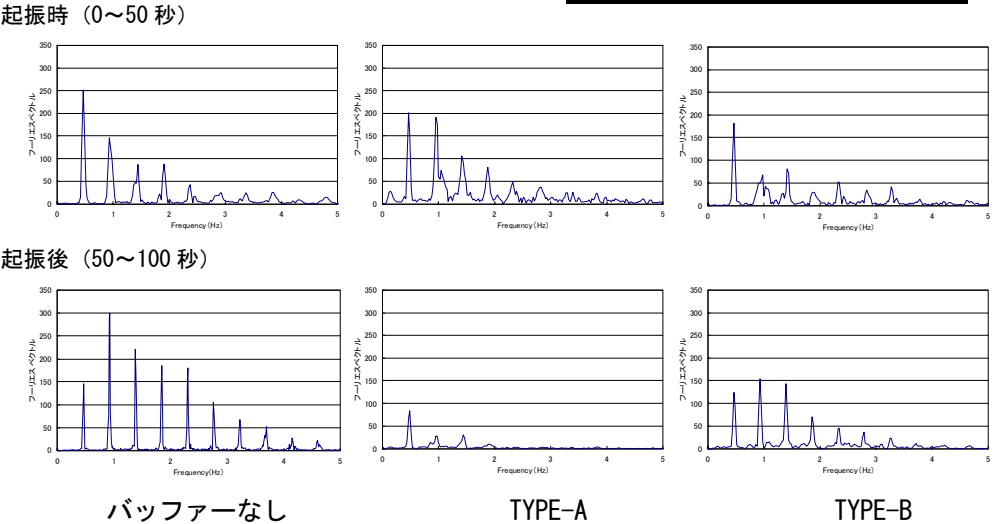


図3. 各モデルでの歪みフーリエスペクトル