

浮屋根式タンクのスロッシング減衰効果の研究

(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 愛知工業大学 正会員 奥村哲夫

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。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、4m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。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



写真1. タンクモデル振動実験

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。

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

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_1 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、2次モードが0.82Hzとなる。

(2) スロッシングの減衰について 図1のバッファー(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。そして、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、バッファーを写真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の位置に加速度計を取付け、起振時の各位置における水平及び鉛直方向の加速度を測定した。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ー有無による減衰性能の比較評価を行った。



写真2. 浮屋根モデル

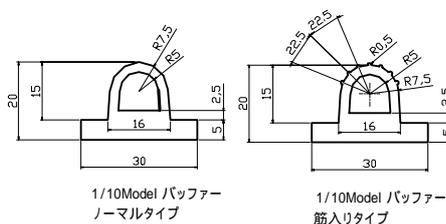


図1. バッファー(ダンパー)形状

3. 結果結果および解析結果

バッファ有無での減衰波形の違いとして、バッファなしと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。バッファを取付けることで、加速度の増幅が抑制され、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。各バッファモデルの減衰効果を比較するため、加速度波形から減衰定数を同定する。

浮き屋根式タンクを1自由度-質量系と仮定すると浮き屋根の減衰振動は次式で表せる。

$$\eta(t) = Ae^{-\omega_0 t} \cos(\omega_q t - \theta_0)$$

ω_0 : 減衰固有角振動数、A: 振幅、 θ_0 : 位相差、 ω_q : 固有角振動数

浮き屋根の実測値 $\eta_{exp}(t)$ が得られていれば同定することが可能である。ここでは次式に示す目的関数 Obj を最小にするように、シンプレックス法を用いた非線形最適化により4つのパラメータの同定を行った。

$$Obj = \|\eta(t) - \eta_{exp}(t)\|$$

この解析結果から得られた各バッファモデルの減衰定数を表2に示す。水タンクの減衰定数が0.5%程度であることから、浮き屋根による減衰効果が付与されたとした場合、バッファなしの0.8%は妥当な数値と言える。それに対し、バッファを設置することで減衰定数が最大3%弱まで上昇することがわかる。これは、タンク側面とバッファの接触によって得られた減衰効果であり、その減衰メカニズムはバッファとタンク側板の接触による摩擦減衰とバッファの変形による粘性減衰が考えられる。そこで、各バッファモデルの粘性減衰として材料の損失係数（25）を、摩擦減衰として動摩擦係数を計測した結果を表3に示す。これより、TYPE-A は高硬度（A80）であることからゴムが変形しにくく、さらに摩擦係数が高いため、ゴムとタンク側面との接触による摩擦が浮き屋根の減衰に寄与したものと考えられる。それに対し、TYPE-B はゴムが低硬度（A70）であるため変形しやすく、また表2の減衰定数において、ゴム形状による差が見られないことからゴムの変形による粘性減衰の影響が寄与したものと考えられる。

4. まとめ

本研究より、バッファの剛性、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された。しかし、TYPE-B では、ノーマルと筋入りの摩擦係数が逆転しているように、ゴムの変形による摩擦係数への影響もあり、減衰メカニズムが複合化かつ複雑化する。今後もこのメカニズムの究明を進め、さらに浮き屋根の強度に及ぼす影響についても検討が必要である。本研究は、中央大学、中井商工(株)、(株)十川ゴムの共同研究である。

参考文献

- 1) 石橋博人, 葉山眞治: 浅水波理論式を応用したスロッシングの非線形応答, 日本機械学会論文集 C 編 55 巻 511 号, 1989
- 2) 屋外タンク貯蔵所浮き屋根審査基準検討会報告書, 危険物保安技術協会, 2004.9

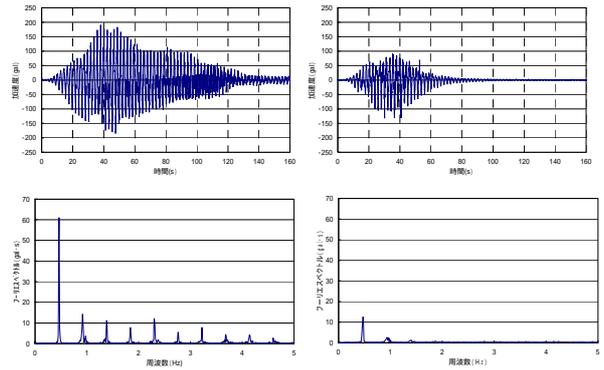


図2. 浮き屋根の加速度波形及びフーリエスペクトル

表2. スロッシング波高

材質	形状	減衰定数
バッファなし		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

表3. スロッシング材料特性

材質	形状	摩擦係数	損失係数
TYPE-A	ノーマル	0.95	0.13
	筋入り	0.86	
TYPE-B	ノーマル	0.56	0.16
	筋入り	0.63	