

1600KL 浮屋根式タンクでのスロッシング減衰装置の検証実験

(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。本実験では、直径約 15m の浮屋根式タンク（1600KL）での振動実験を行い、ゴム製減衰材（以下、バッファと呼ぶ。）を用いることで得られるスロッシング減衰効果について検証した。

これまでに我々の研究グループでは直径 4m タンクでの実験（1/10 スケール）にてバッファの減衰効果を確認していることから、実タンク実験でバッファのスロッシング減衰効果を実証することを目的とする。

2. タンク及びバッファモデル

実験モデルは、図 1 のような直径約 15m、高さ約 10m、1600KL のインナーフロートデッキ（シングルデッキ）で、これに水深 2m まで水を充填し、写真 1 のようにタンクの底部に造波装置を設置した。この造波装置は、エアシリンダーを電磁弁で制御することで、式（1）から求められる 1 次の固有周波数に同調させて造波板を稼動させた。

バッファモデルは、本実験タンクの浮屋根質量と速度応答スペクトルから浮屋根がタンク側面へ衝突する際のエネルギーを算出し、そのエネルギーを十分に吸収できるポテンシャルエネルギーを有し、かつスロッシングの減衰効果を得るために高減衰性ゴム配合および形状設計を行った。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¹⁾。

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

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_1 は 1 次モードでは 1.841 である。本タンクモデルでは、1 次モードで 0.16Hz となる。

（1）実験方法 実験は、タンク底部に設置した造波装置で起振を行なった。起振条件を表 1 に示す。

表 1. 起振条件

固有周波数	振幅条件（起振時間）
0.16Hz	3 分

表 1 の起振条件にてスロッシングが発生させた時の浮屋根上に生じる加速度、変位（波高）およびひずみを計測した。計測箇所は、浮屋根の 4 半円点と起振軸上の 0.3R 及び 0.6R の位置に加速度計およびひずみゲージを、さらに浮屋根の起振軸上端部に変位計を取付け、起振時の各位置における水平及び鉛直方向の加速度、ひずみおよび変位を測定した。そして、浮屋根の振動減衰曲線からバッファ有無による減衰性能の比較評価を行なった。

（2）バッファモデルについて バッファモデルを図 2 に示す。図 2 のバッファ（長さ 1m）を写真 3 のようにポンツーンアウターリムに一定間隔で 32 本設置した。動揺する浮屋根がタンク側面と衝突する際におけるエネルギーをバッファで吸収し、減衰させることで、スロッシングによる液面の動揺を抑制する効果を期待する。なお、ゴム種類は EPDM で、ゴム硬さ A70 とした。

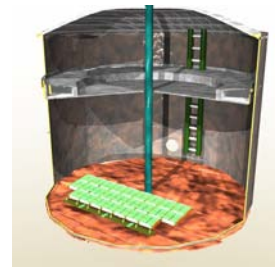


図 1. 1600KL インナーフロートタンク



写真 1. タンク内に設置した造波装置

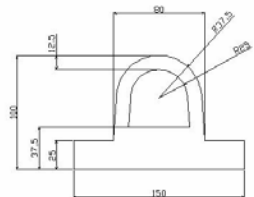


図 2. バッファ（ダンパー）形状



写真 3. バッファの取付け

3. 結果

バッファ有無での浮屋根変位量を図 2 に示す。バッファなしに対し、バッファを設置することで浮屋根の変位が半減していることがわかる。つまり、バッファによってスロッシング時の浮屋根揺動を抑制する効果が認められる。一方で、バッファを浮屋根に取付けたことで浮屋根に過大なひずみが生じていないかを確認する必要がある。そこで、浮屋根上のひずみを図 3 に示す。バッファを設置した場合でも、過大なひずみが生じていないことがわかる。つまり、浮屋根の運動エネルギーをバッファの変形によるポテンシャルエネルギーで吸収・逸散させていることが考えられる。

次にバッファの減衰効果を確認するため、変位波形から浮屋根の減衰定数を同定する。

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

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

ω_q : 減衰固有角振動数, A: 振幅, θ : 位相差

ω_0 : 固有振動数, ζ : 減衰定数

ここに浮屋根の実測値 $\eta_{\text{exp}}(t)$ が得られていれば、これらのパラメータを、シンプレックス法を用いた非線形最適化により同定することが可能である²⁾。

この解析結果から得られたバッファ有無による浮屋根の減衰定数を表 2 に示す。波高レベルが 5cm と低い場合、バッファなしの減衰定数は、約 0.8% であった。本タンクの減衰定数は、以前消防研究センターが気泡注入法で実施した実験でも 0.7~0.9% と報告されており、本実験でも妥当な数値を得たと考える²⁾。それに対し、バッファありでは減衰定数が約 1.6% 程度まで上昇させることが確認でき、バッファ変形によるエネルギー吸収でスロッシングの減衰効果が得られたと考えられる。しかしながら、波高を上昇させて 20cm レベルにすると、バッファなしの場合、図 1 に示した梯子（ゲージポール）に浮屋根が衝突することで波高が抑制されるため、減衰定数が高くなる。これは本タンクに特有の傾向とも言える。それに対し、バッファありの場合、梯子に衝突することなく、また波高にも依存することなく安定した減衰定数を示すことがわかった。

4. まとめ

本研究により、実タンクにおいても、これまでのモデル実験で得られたようにバッファのスロッシング減衰効果が認められた。さらにこれまで確認事項としていたバッファによる浮屋根強度への影響についても、適切なバッファ剛性設計により、浮屋根強度にも悪影響を与えないことが確認できた。しかし、本タンクでは梯子等の障害物が多く、被害の大きくなる大振幅での評価は難しいと考えられる。そこで、今後さらに種々の実タンクでの実験データ採取を重ねて、タンクの各仕様に基づいたバッファ設計の最適化を進め、浮屋根式タンクのスロッシング減衰装置として実用化を計画している。

参考文献

- 1) Housner, G. W. : Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 47, 1957.
- 2) 西晴樹：実タンクによるスロッシング挙動，第 9 回消防防災研究講演会資料，(独)消防研究所，pp. 19-32，2006. 2

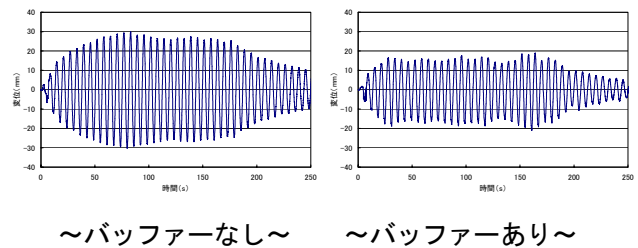


図 2. 浮屋根の変位データ

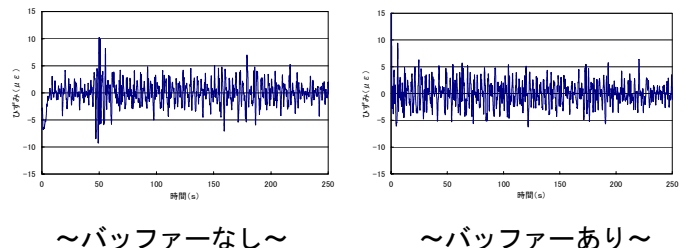


図 3. 浮屋根のひずみ

表 2. 浮屋根の減衰定数

材質	減衰定数	
	波高レベル 5cm	波高レベル 20cm
バッファなし	0.0081	0.0195
バッファあり	0.0160	0.0172