

スロッシングによる浮屋根式タンクの挙動に関する一考察

神奈川県庁* 正会員 有田新平 (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

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。2003 年 9 月に発生した北海道十勝沖地震で貯槽屋外タンクの浮屋根がスロッシングで沈没をした。現地調査の結果、浮屋根デッキ部が破損して浮力が大きく失われたことによる。本報ではこの沈没した貯槽の 1/10 モデルを用いて振動実験を行い、浮屋根の挙動の把握を行った。その結果、浮屋根が 1 次のスロッシング振動から減衰状態に移行した時、浮屋根デッキ部中央を上下させる 2 倍波（1 次固有周波数の 2 倍）の現象が確認された。これが浮屋根デッキ部破損の一つの要因となったことが考えられるので、この現象に関して報告する。

2. 浮屋根の損傷状況

苫小牧において幸い火災は免れたが浮屋根が沈没した 40061 タンクは、調査記録によると地震発生から 4 日後の 9 月 30 日に沈没が確認されている。事故後の開放点検被害調査によると、全周で 26 個のボンツーンの内 6 個の破損が確認されている。タンクのデッキ部は、全面が下方に大きく撓んだ形跡が認められ、ボンツーンとデッキ部の取付溶接部の 2 ヶ所での破断、デッキでの 220mm の亀裂の発生なども認められている。さらに、本タンクの浮屋根の沈没原因は、デッキが破損した状態でボンツーンが局所的に破損し、浮屋根が傾斜したことによって浮屋根上に滞油し、健全なボンツーンにも危険物が流入して行くにつれて浮屋根が沈没したものと推定している。なお、健全なボンツーンへの危険物の進入は、デッキ部に設置されている点検用のマンホールからと推測されている。

ここで注目すべきことは、タンクのデッキ部において全面が下方に大きく撓んだ形跡が認められたことである。1 次モードが支配的な場合は、浮屋根端部の問題であるので、デッキ部全面が面外変形の影響により大きく撓むとは考えにくい。一方、浮屋根がスロッシング高次モード（主として 2 次モード）の影響を受けた場合は、デッキ部分には半径方向の膜力が生じ、外周ボンツーン部はタンク中心方向へ引っ張られ、全体的に楕円化変形傾向を示めす。この結果、デッキ部が波打ち現象を起こしてデッキ板平面から大きく面外撓みを生じることが指摘されている。しかし 40061 タンクの場合はスロッシングの 1 次モードが支配的な状態で浮屋根が動いたとされていることから、高次モードで発生する浮屋根デッキ部の面外変形による撓みがこの状況で生じたのかを検討する必要がある。

3. 実験モデル

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。



タンクモデル



浮屋根モデル

写真-1 実験モデル

4. 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

*研究当時 中央大学大学院理工学研究科

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個所に貼り付け、半径方向と円周方向の歪みを計測した。

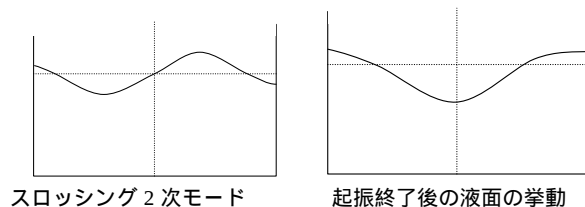


図-1 液面の挙動

5. 実験結果

5.1 浮屋根なし - 自由表面（目視） -

自由表面で起振すると、起振軸に対して最大の波高になり、スロッシングの1次のモードで液面揺動が生じる。しかし、起振が終了する 40 秒を過ぎたあたりから、全体が回転し始め、中央部分が大きく盛り上がりし凹凸が生じるようになった。スロッシングの2次モードとは違う形状で位相差があるような様子でありその差異を図-1 に示す。更に時間が経過すると、タンクの側板で反射しあい、砕波し複雑な挙動を示した。

5.2 浮屋根あり

自由表面下の実験では、起振終了後から、液面の中心部分で凹凸する挙動が確認された。この挙動の検証のために、中心部に近い 0.3R での時系列応答加速度、スペクトル及び歪みの最大値を計測した 0.6R の半径方向の時系列波形、スペクトルを図-2 に示す。0.3R における時系列応答加速度を見ると、起振終了後から緩やかに減衰していくが、歪みの時系列グラフでは、起振終了後から増幅し、最大値に達している。フーリエスペクトルに着目すると、歪み加速度共に起振中は1次スロッシング固有周波数である 0.47Hz が卓越しているが、起振終了後(40 秒後)からは1次スロッシング周波数の2倍波成分である 0.92 ~ 0.93Hz の2倍波に卓越周波数が変化している。この浮屋根上に生じた2倍波は、自由表面での実験時に現れた液面中心部の凹凸だと考えられ、この液面のモード変化が浮屋根に大きな歪みを与えたと推測できる。

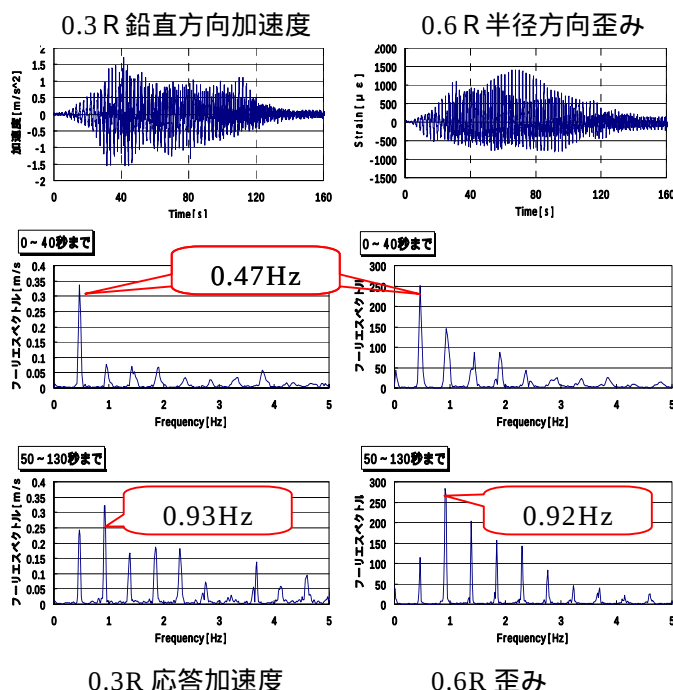


図-2 時系列グラフと時間別フーリエスペクトル

表-1 スロッシング周波数

	1次モード	2次モード	3次モード
理論値	0.47Hz	0.81Hz	1.03Hz
解析値	0.47Hz	0.81Hz	1.03Hz

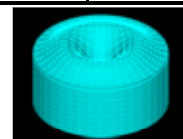


図-3 1次スロッシング周波数の2倍波の液面モード

6. スロッシング解析

汎用解析ソフト ADINA を用い、液面のモード解析を行った。流体要素をポテンシャルベースの 3D solid 要素を用いた。スロッシング周波数は表-1 のように 1 次モードから 3 次モードまで計算値と理論値が良く一致した。また、1 次スロッシングモードの約 2 倍値である 0.93Hz の液面のモードを図-3 に示す。図-3 を見ると、自由液面の実験時に見られた液面中心部が凹凸する挙動であり解析からもこれを確認することができた。

7. まとめ

本研究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の、浮屋根の挙動と発生する歪みに関して把握することができた。特に、1 次のスロッシングモードでは起振終了後から、2 倍波成分が卓越し、浮屋根に大きな歪みを与えるという新たな知見を得た。これが浮屋根デッキ部に面外変形の撓みを生じさせた原因の可能性が考えられる。

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

3) 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