

## スロッシング時の液面挙動の模型振動実験と有限要素法解析

早稲田大学 学生会員 ○稲葉 淳  
 早稲田大学 フェロー 清宮 理  
 株式会社テラバイト 古川 巖

**1. はじめに**、2003年9月に発生した十勝沖地震は震央から200km以上離れた苫小牧地区において、貯油タンクの石油が溢流し、タンク全面の火災等の被害が生じた。このような事態が生じた原因の1つには、約3～15秒のやや長周期地震が2分以上続いたため、石油タンクのスロッシングが生じて想定以上に液面が揺れ、浮き屋根を破壊、また浮き屋根型は油と接する蓋部分が動くためにタンクの内側と接触、摩擦や静電気により出火したと考えられている。今後想定される巨大地震において、スロッシングの被害を最小限に抑えるため解析が必要である。そこで液面挙動および蓋の歪みについて有限要素法による動的応答解析結果と模型振動実験結果の比較検討を以下に述べる。



写真1 タンクの被害

**2. 模型振動実験** 模型振動実験の概要を写真2に示す。模型縮尺は1/10である。模型実験のタンクは内径568mmの亚克力製で内溶液は水を用いた。蓋は亚克力製で厚さ1mm直径563mmである。蓋の端から3cmの箇所に円状に発泡スチロール(ポンツーンの代わり)を取り付け、蓋を浮かす。入力波は苫小牧地震を用いた。水深12cm、18cm、24cmでスロッシングを再現する。測定項目として側壁から3cmはなれた箇所の液面変位および蓋の中央と両端の歪みを加振軸に対して0度、45度、90度の3軸ゲージで測定する。また減衰に関しては本解析ではRayleigh減衰を用いており、正弦波を入力波として得られた液面変位の時刻暦から20個の波形ピーク値を取得し、最小二乗法により対数線形回帰させ、減衰定数を求める。タンクの固有周期はタンクの内径と水深に依存しており、以下の(1)式で与えられる。



写真2 模型振動実験の概要

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{1.841g} \coth\left(\frac{1.841H}{R}\right)} \quad (1)$$

**3. 有限要素法解析** 図1に有限要素法モデルの概要を示す。解析においては、タンクの側壁に設置した加速度計で測定された加速度波形を入力波として用いる。解析モデルはシングルデッキを想定し、タンクのサイズは模型実験と同じで行う。側壁、浮き屋根、ポンツーンはシェル要素、液体は流体要素、浮き屋根の浮力はソリッド要素を用いている。要素数はそれぞれ側壁336個、ポンツーン48個、浮き屋根192個、液体2448個、浮き屋根の浮力192個、全体の要素数は3216個である。蓋を有する場合の解析として、液体の自由表面と同一接点上にシェル要素を想定して剛性を持たせた。蓋はタンクの底面からソリッド要素でポンツーンによる浮力と同様の力を与えて仮想的に水面に浮かべている。

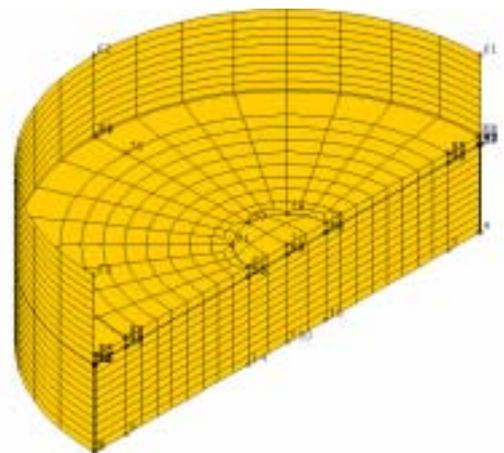


図1 解析モデルの概要(対称モデル)

キーワード タンク, スロッシング, 長周期地震動, 模型振動実験, 有限要素法解析

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学 社会環境工学科 清宮研究室 TEL 03-5286-3852

**4. 実験と解析との比較と考察** タンクの側壁に取り付けた加速度計により測定された加速度をフーリエ解析した。その結果を図2に示す。また(1)式よりもとめた固有振動数とフーリエ解析の卓越振動数を表1に示す。フーリエ解析の結果1.025Hzが卓越しておりタンクの固有周期とも近い値になっている。また同時に長周期成分も卓越しているためスロッシングを確認できた。実験における液面変位を図3、解析における液面変位を図4、実験における蓋の歪みを図5に示す。実験における歪み波形は、雑音等を含んでいるため

20Hz以上の周波数をカットした。正弦波から得られた減衰定数は蓋なしの場合、減衰定数 $h=0.212\%$   $\alpha=0.0186$   $\beta=2.135 \times 10^{-4}$  蓋ありの場合 $h=1.86\%$   $\alpha=0.168$   $\beta=1.874 \times 10^{-3}$  という結果を得た。減衰定数については蓋ありの方がかなり大きな値になった。蓋の存在と衝突による効果が非常に大きいと考える。図3と図4の比較から液面変位について解析により実現を再現することができた。実験結果が若干小さい値になっている点は、スロッシングがおきた後液面が回転し始め、回転防止のポールに接触することによる摩擦で減衰効果が若干出たと考えられる。また液面の振動が大きくなると蓋が液面から離れる現象が見られた。しかし解析において蓋と水面を同一接点にしても大きな差異がない結果が得られると考えられる。歪みに関しては、図5に示すようにスロッシングが生ずると300 $\mu$ 程度の大きな歪みが生じていた。特にスロッシングが起きている20秒後からは蓋と側壁が衝突することによって生じるスパイク波が存在した。タンクの被害例にあるように側壁との衝突現象を本実験で確認できた。加振軸に対して0度の場合、計測点に近いほど歪みは大きいが90度では中央の方が小さく端に近づくにつれ歪みは大きくなった。

**5. まとめ** 有限要素法解析でスロッシングをかなり良く再現できた。今回の蓋を液面と同一接点で考えても十分に有効な結果を得ることができた。しかし歪みに関しては蓋と液面の衝突を再現するには至っていない。液体と蓋との連成、特に両者が接触する、しないの条件を適切にモデル化する必要が今後ある。

- 参考文献**
- 1)長沼寛樹, 松田宏: 浮き屋根式タンクのスロッシング解析手法に関する基礎的研究、タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集 2005年7月 p.p19-22
  - 2) 河野和馬: 円筒形貯槽の液面動揺最大波高算定に関する各種耐震設計基準における設計地震動の比較・検討、基本方針専門委員会資料、2003年11月
  - 3) 気象庁: 平成15年度十勝沖地震の最大速度値と共振波形

[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/20030926\\_tokachi/acc\\_data/table\\_200309260450.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/20030926_tokachi/acc_data/table_200309260450.html)

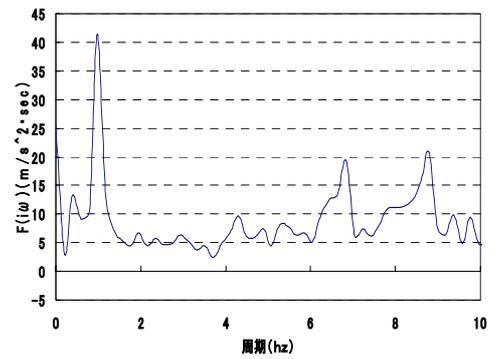


図2 フーリエ解析結果

表1 卓越振動数と固有振動数(水深12cm)

卓越振動数(Hz)	0.977
固有振動数(Hz)	1.025

蓋小敷ふたあり120mm

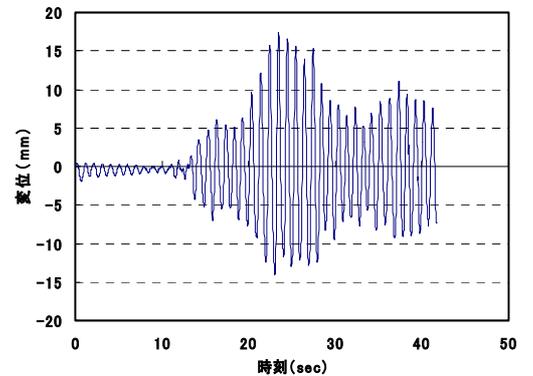


図3 液面変位実験結果

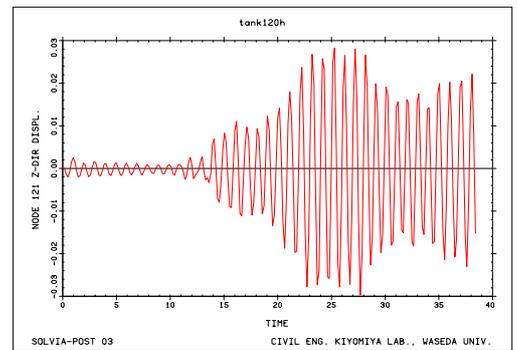


図4 液面変位解析結果

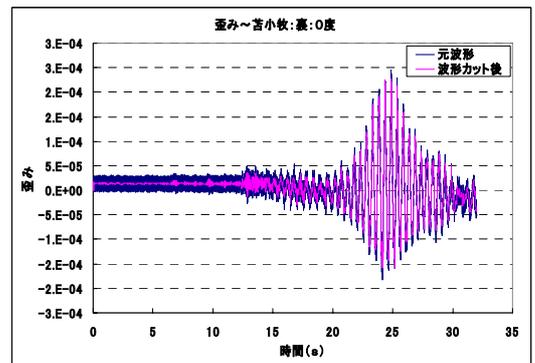


図5 歪み実験結果