

スロッシング現象に関する周波数特性

徳山工業高等専門学校 学生会員 ○石田 亮

徳山工業高等専門学校 正会員 原 隆

1.序論

スロッシング現象は、長周期地震動の卓越周期とタンク内容液の固有周期が一致することにより、タンク内溶液が共振し、液面が激しく揺れる現象である。昭和 39 年 6 月 16 日、新潟県の粟島南方沖 40km を震源とする M7.5 の地震が発生し、新潟市内で石油タンク 5 基が全面火災に至った（新潟地震）。また平成 15 年 9 月 26 日、北海道の十勝沖を震源とする M8.0 の地震が発生し、震源から 200km 以上はなれた苫小牧市内で、7 基の石油貯蔵タンクの浮屋根が沈没、2 基のナフサタンクで全面火災に至った（十勝沖地震）。これまでもスロッシング現象が原因と思われる浮屋根の損傷、沈没、溢流による油面の露出等、危険な事故が多数報告され、多くの研究者によって工学的解析は進められている¹⁾が、タンクに影響を及ぼす恐れのある長周期地震動、スロッシングによる溢流など十分な解明はされていない。しかし、これらに対応するため石油タンクにおける空間余裕高さや浮屋根構造を改善すると、莫大な費用がかかるだけでなく、多量の石油が備蓄できなくなるという問題点が挙げられる。

本研究では、粒子法^{2), 3), 4)}によるスロッシング挙動の数値解析と、浮屋根式タンク模型での模型実験⁵⁾との比較検討をおこない、スロッシング挙動のメカニズムを調査する。そして、圧力分布図による粒子の相互関係ならびに浮屋根、壁面に作用する圧力を検証し、応答減衰曲線、共振曲線を用いてスロッシング現象の周波数特性を算出することを目的とする。

2.モデル実験による検討

実験モデルは、図-1 のような直径 2m、高さ 55cm の円筒状アクリル製タンクを使用し、これに水深 30cm まで水を充填し、水平方向に移動する起震装置に設置する。また、水面上には、直径 2m のポリプロピレンシートの内周に直径 1.85m、高さ 15mm、厚さ 1mm のアルミ製アングルを取り付けた浮屋根モデル（図-2）を浮遊させ、実際の貯蔵タンクをモデル化した。

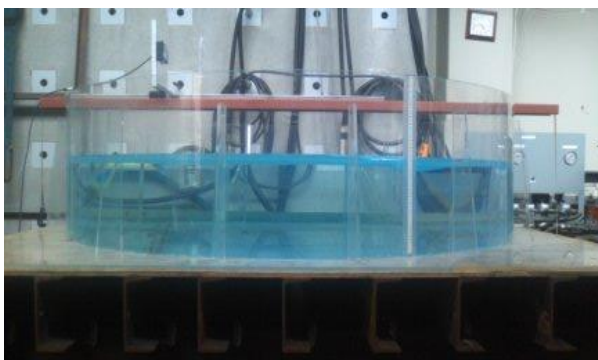


図-1 起震実験モデル

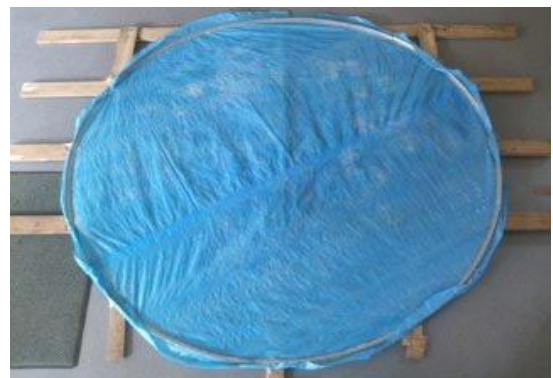


図-2 浮屋根モデル

（１）実験方法

本研究ではタンクモデルを設置した起震装置を、サーボアクチュエータを用いて、水平方向から振幅 4mm、固有周波数 0.479Hz(正弦波)を基準として 0.4,0.45,0.479,0.5,0.55Hz の水平方向の起震を行う。また、計

測方法としては、タンク上部に取り付けた鋼材に CCD レーザー変位計 LK-Navigator (Keyence 製)を設置し、タンクモデル末端から 10cm 毎に起震時の各位置における鉛直方向の変位を測定する。なお、計測点数は起震性能 30 秒(3000 点)、減衰性能 90 秒(9000 点)、計 12000 点のデータを有する。また、ビデオカメラで液面形状・波高の撮影を行い、MoveTr2D(New Version)により実験計測値の各点(計 20 点)で横断形状の変位量を算出する。これにより、計算値の载荷開始点と実験値の载荷開始点を一致させ、タンク全体の液面横断形状を測定する。そして、浮屋根の振動減衰曲線から pp と、pp+アルミの有無による減衰性能の比較検討を行う。起震条件を表 - 1、CCD レーザー変位計 LK-Navigator (Keyence 製)を図-3 に示す。

表 - 1 起震条件

入力波	条件
正弦波	起震周波数 : 0.4, 0.45, 0.479, 0.5, 0.55Hz 起震振幅 : $\pm 4\text{mm}$ 統一 (変位制御)



図-3 CCD レーザー変位計 LK-Navigator

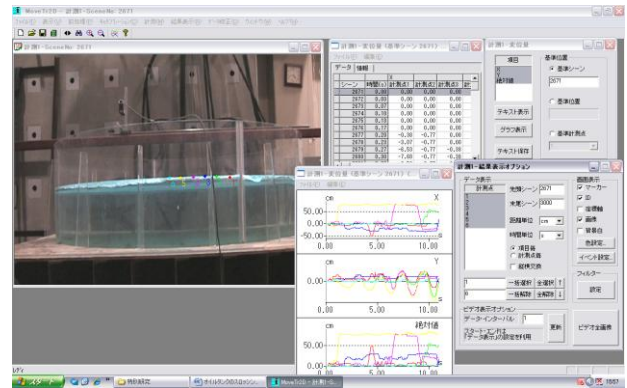


図-4 MoveTr2D(New Version)

3.実験結果

(1) 液面横断形状

タンク全体の水面形を把握できるように設置したビデオカメラから円筒容器におけるスロッシングの液面横断形状を求めると、図-5 から非線形挙動が認められる。これは、浮屋根付きタンクモデルのスロッシングにおける流体構造連成挙動が、流体の乱流挙動を起因し、各応答減衰曲線に影響したものと考えられる。また、起震载荷時では容器中心を境に凹凸挙動を示す。

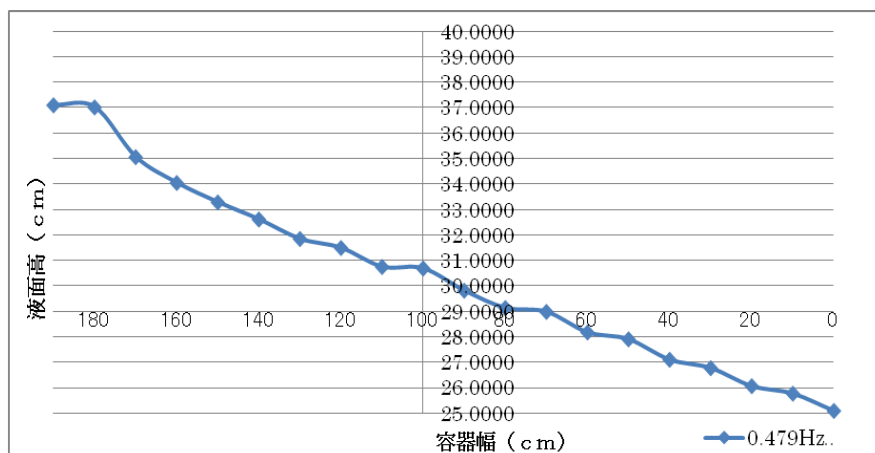


図-5 液面横断形状(0.479Hz : 20sec)

(2) 応答減衰曲線

各起震条件での浮屋根(ポリプロピレンシートプラスアルミ製アングル)鉛直方向の応答減衰曲線を図-4～8に示す。浮屋根による5点での応答減衰曲線を比較すると、図-6及び図-10では基準値0.479Hz同様、共振増幅による液面高の上昇が認められるが、起震中(30秒)に二度減衰傾向に赴き、定水位に戻る曲線形状が確認できる。これは、タンクの固有周期と起震条件である正弦波(長周期地震動)がかすかに一致せず十分な共振現象が得られないため、発生する波高が共振増幅途中に低減されたものであると考えられる。なお、同現象は図-7から20秒付近の減衰傾向について低減時間に差異が生じたため、加速度減衰が大幅に低減された。また、計5点の応答減衰曲線から最大波高と最低波高に着目すると、上下正対象な曲線分布は認められず、マイナス方向の数値がプラス数値を超越する非対象な曲線分布が認められる。

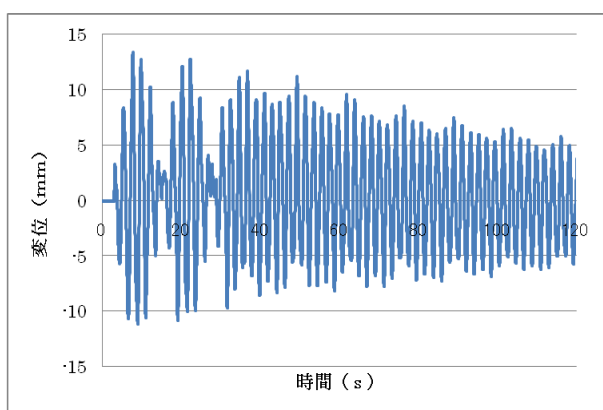


図-6 0.4Hz の応答減衰曲線(roof)

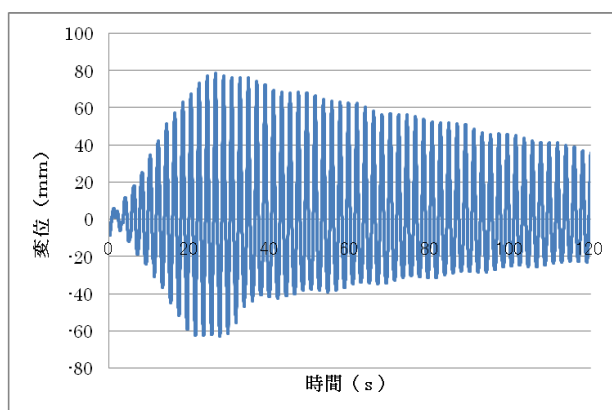


図-9 0.5Hz の応答減衰曲線(roof)

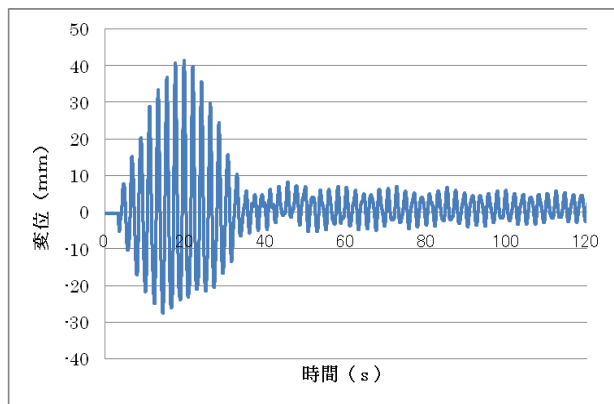


図-7 0.45Hz の応答減衰曲線(roof)

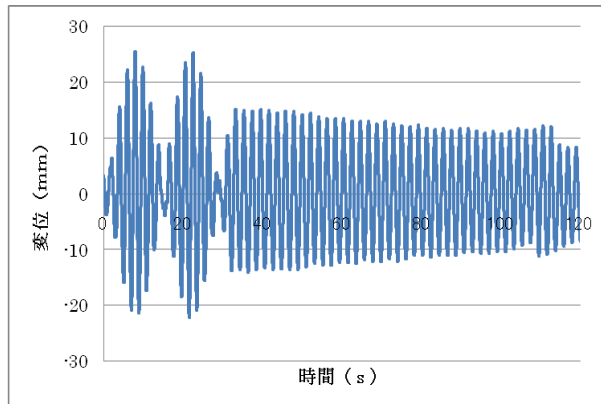


図-10 0.55Hz の応答減衰曲線(roof)

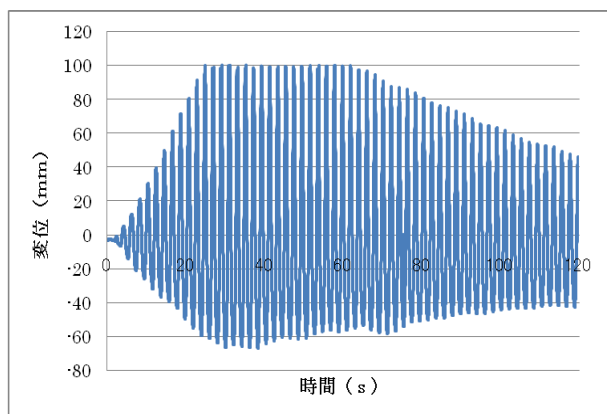


図-8 0.479Hz の応答減衰曲線(roof)

(3) 共振曲線

本研究では、タンクモデル末端部(0cm, 200cm)の応答減衰曲線から双方の計測値より最大値を採用し、最大振幅と振動数の関係を図示する。図-9 に計測点数 2000 点間の共振曲線(ポリプロピレンシートのみ, ポリプロピレンシートプラスアルミ製アングル)を示す。入力波数 0.479Hz, 浮屋根装置 pp のみににおける共振曲線では、図-9 から最高液面高 85.46mm の上昇, 浮屋根装置 pp プラスアルミも同様に最高液面高 71.39mm の上昇が認められた。これは、スロッシング(長周期地震動)の卓越周期と 2m タンクモデルの固有周期が的確に一致し、タンクモデル内の水が共振増幅する振動数によるものと考えられる。また、浮屋根装置 pp のみににおける共振曲線が 0.4, 0.45, 0.479Hz 時点で浮屋根装置 pp+アルミの共振曲線より上位に認められるが、これはアルミ製アングルの設置により浮屋根装置全体の密度増加が生じ、減衰が増大している。一方、0.5, 0.55Hz 時点では浮屋根装置 pp のみににおける共振曲線が浮屋根装置 pp+アルミの共振曲線より下位に位置しており、これは液面形状が非線形挙動を示しているため減衰が生じなかったものと考えられる。

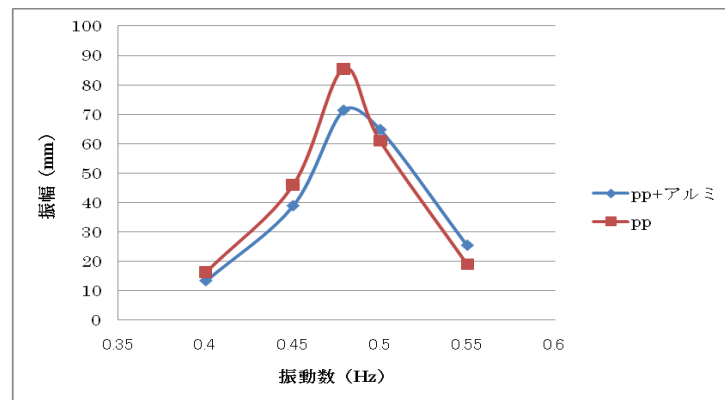


図-9 共振曲線 (pp のみ, pp+アルミ)

4. 結言

本研究より得られた結果を以下に示す。

- 1) 振動数 0.4, 0.55Hz では起震中(30 秒)に減衰傾向に赴き、定水位に戻る曲線形状を示す。
- 2) 応答減衰曲線より、液面の沈下数値が上昇数値を超越する非対象な曲線分布が認められる。
- 3) 浮屋根付きタンクモデルのスロッシングにおける流体構造連成挙動が、流体の乱流挙動を起因し、非線形挙動を示す。

共振曲線より、振動数に対する振幅は 0.479Hz で共振増幅し、最大液面高を示す。また、0.479Hz 基準に前後関係で波の碎波による液面高の減衰が認められる。

参考文献

- 1) 野田博,中山明彦,谷垣正治,鈴木亨,中南滋樹:浮遊式ネットを用いた石油タンクの液面揺動装置の開発(その3)CFDによるスロッシング現象と浮遊式ネットの効果の再現,日本建築学会大会学術講演梗概,pp587-588,2007
- 2) S.Koshizuka and Y.Oka, : Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation Of Incompressible Fluid, Nuclear Science And Engineering, Vol.123, pp421-434, 1996
- 3) 越塚誠一編著:粒子法シミュレーション-物理ベース CG 入門, pp1-66, 培風館, 2008
- 4) 越塚誠一著, 日本計算工学会編: 計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法, pp1~25, 2005
- 5) 勝井勇次, 勝井勝, 原隆, 依田照彦: 浮屋根式貯蔵タンクにおけるスロッシングの抑制に関する実験的研究(その3), 平成 20 年度土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会 CD-ROM, 2008
- 6) プロメテックソフトウェア株式会社, 日本 SGI 株式会社: FLUIDSISTA version2.0 ユーザーマニュアル, 2008
- 7) 伊澤誠一郎, 佐野友哉, 豊田篤, 熊鰲魁, 福西祐: 自由表面及び相変化を伴う非圧縮性流れの SPH シミュレーション, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, pp1-6, 2005