

PS-9 LNG タンクの大型模型実験と動的構造応答解析

構造安全評価系 *馬 沖、岡 正義、安藤 孝弘
 構造基盤技術系 穴井 陽祐
 特別研究主幹 田中 義照
 川崎重工業株式会社 松原 直哉

1. はじめに

液化天然ガス (LNG) の輸送ニーズ拡大に応えるため、輸送効率の高い新形式の LNG 船の開発が進められている¹⁾。LNG 運搬船は、タンク形式に応じて、MOSS 型、メンブレン型、SPB 型に分類され、本研究では MOSS 型タンクを対象とする。従来の MOSS 型タンクは、球形および球形ストレッチタンクであったところ、積載量を増すため、円筒と回転楕円を組み合わせた新形状のタンクが提案されており、このタンクの安全性の評価を目的に研究を行った²⁾。

MOSS 型タンクの特徴の一つに、積付液位の制限がないことが挙げられる。MOSS 型タンクの場合、半載状態でタンク内流体の同調流れ (スロッシング) が起きたとしても、角を持つ構造でないため、空気圧縮を伴うピーク衝撃圧は発生しないためである。しかし、タンク形状を変更したことでスロッシングの発生やその衝撃の特性が異なる可能性がある。

そのため本研究では、このような新形式タンクのスロッシングに対する安全性評価のため、大型模型による動揺試験と LNG タンクの有限要素 (FE) 構造解析を行い、球形タンクと比較することでその安全性を調べた。

2. 模型実験

真球タンク及び新形式タンクの亚克力製模型を用いて動揺試験を行った。模型の寸法はともに直径 (内径) $D=1.2\text{m}$ とした。試験に用いたタンクを図-1 に示す。動揺試験は、海上技術安全研究所の波浪荷重試験装置内の水平動揺装置 (定格: 変位 $\pm 150\text{mm}$ 、荷重 10tonf) を使用した。

動揺時に水平方向へ発生する力 (F_x, F_y) を大型分力計 (定格 1.5tonf) で、タンク壁面に作用する水圧を小型圧力センサ (共和電業 PS-05KD) で、それぞれ計測した。圧力センサの配置を図-2 に示す。図は真球タンクであるが新形式タンクも同じ要領で配置している。圧力センサは、緯度は 10 度又



図-1 新形式タンク模型 (動揺装置に搭載した状態)

は 20 度刻みに、経度は図に示した 0 度の他、45 度、90 度、180 度に配置した。

動揺試験は、規則動揺及び不規則動揺を行った。本論では、規則動揺の結果について述べる。試験条件を表-2 に示す。

表-1 模型及び液体の質量 (単位: kg)

		真球タンク	新形式タンク
模型質量		163	168
液体 質量	29%	190	220
	50%	460	510
	65%	650	690

表-2 試験条件

パラメータ	設定値
液位 H/D	29%, 50%, 65%
動揺振幅 A	20mm, 40mm, 60mm, 80mm
周期 T	同調周期及びその前後で計 7 点程度

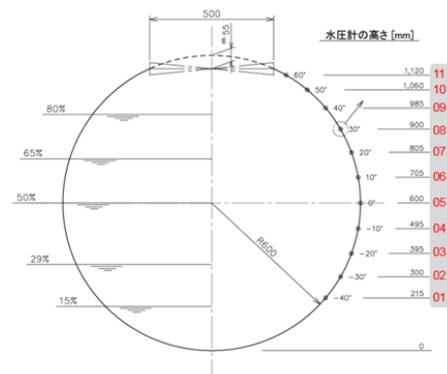


図-2 圧力センサの配置

3. 実験結果

動揺方向の力 (F_y ; 以下単に「荷重」という) の実験結果を図-3 に示す。縦軸は、動揺振幅 $A(=\text{amp.})$ で割った値で表示している。また、模型及びガイド装置の質量慣性力は解析で除去している (ただし液体質量の慣性力は含む)。新形式タンクの荷重が比較的大きいのは、タンク内液体の質量差が主要因である。短周期の箇所において、大振幅で荷重が大きくなっているのは、水平回転流れである「スワリング」によってタンク液体が大きく流動した結果である。また、新形式タンクの $A=60\text{mm}, T=0.8\text{s}$ において荷重が減少しているのは、

動揺が速すぎて内部の液体が周期的に流ることができず、スロッシングが起きなかったことによるものである。一方、真球タンクでは、同じ条件でスロッシングによる高い荷重が計測されており、タンクの形状の差によるものと考えられる。このように、詳細にはタンク形状で差が出ることもあるが、全体的な傾向に大差はないと言える。

水圧の計測波形の例を図-4 に示す。スロッシングによって衝撃圧が作用していることが分かる。次節ではこの圧力データを基にタンクの FE 解析を行う。

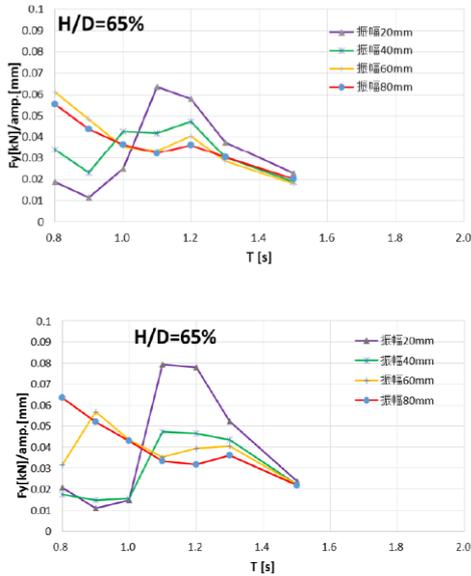


図-3 荷重の比較 (上: 真球タンク、下: 新形式タンク)

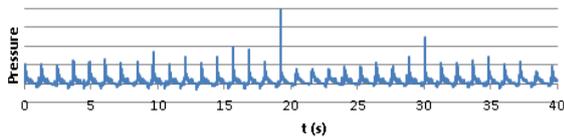


図-4 圧力の計測例 (真球タンク, H/D=65%, A=60mm, T=1.2s)

4. FE 解析

設置した圧力計で得られた圧力データを入力として、LNG タンクの FE 解析を行った。離散的に計測した圧力データを FE モデルの入力データにするため、3次元内挿でマッピングして圧力分布を求めた。FE モデルは、直径約 40m の実スケールとし、1 辺約 1m のシェル要素 (要素数: 約 9000) を用いた。板厚については、ここでは荷重特性の影響を主眼にすることから一様板厚(t=50mm)とした。スロッシングが発生した試験条件で、最大の圧力が作用した瞬間の圧力を FE モデルに静的に与えた。境界条件は、スカートで支持される箇所 (球形タンクは赤道、新形式タンクは円筒下部) にある節点で、円筒座標系の周 (θ) 方向の変位、上下(z)方向の変位、放射(r)軸周りの回転を固定、r 方向変位、 θ 軸周りの回転、z 軸周りの回転を自由、とした。

4.1 静解析

FE 静解析で得られた応力分布を図-5 に示す。タンク形状

で同調周期が変わるため、試験条件は異なっている。新形式タンクの方が、高い箇所でも最大応力を生じているのは、曲率の高いところで高い水圧が生じたことが原因である。また、最大応力を相対比較すると表-3 の様になり、新形式タンクの方が応力レベルは低い。

4.2 動的構造応答解析

図-4 の水圧波形をみると、ピーク圧力の作用時間は短いため、動的影響を考慮すると静荷重の場合と構造応答が異なる可能性があるため、圧力の時刻歴を入力として FE 動的構造応答解析 (動解析) を行った。結果を表-3 に示す。今回対象とした荷重条件では、動的影響によって応力が増える結果が得られ、今後、動的応答の評価手法の整備が必要と考えられる。

比較対象とした試験条件では、静解析と動解析ともに新形式タンクの方が応力が低い結果となったが、同調周期が一致していないことに加えて、スロッシングによる荷重特性は、液位に依存すること、また図-4 から分かるよう規則動揺試験であってもピーク圧力が大きく変動し最大水圧は偶然性を伴うことから、今後さらに詳細な検証が必要になる。

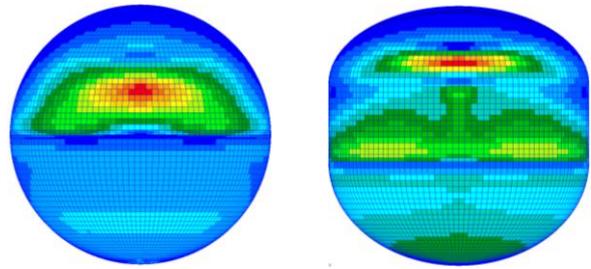


図-5 FE 静解析の結果 (ミーゼス応力の分布図)

左: 真球タンク, H/D=65%, A=60mm, T=1.2s

右: 新形式タンク, H/D=65%, A=60mm, T=1.3s

表-3 FE 解析による最大応力

(真球タンクの静解析を 1 とした表記)

	静解析	動解析
真球タンク	1	1.39
新形式タンク	0.787	1.08

5. まとめ

新形式 LNG タンクのスロッシングに対する安全性を、模型実験及び FE 解析を用いて定量評価した。その結果、全体荷重に有意な差は現れず、局部応力については、対象とした試験条件下では、新形式タンクの方が低いことを確認した。

参考文献

- 1) 佐野敦司他、初期不整を有する楕円球殻の座屈強度の数値解析による推定方法に関する研究、日本船舶海洋工学学会講演会論文集 第 21 号、2015
- 2) 岡正義他、LNG 船の安全評価のためのタンク強制動揺実験、第 15 回海上技術安全研究所研究発表会、2015