

スロッシング荷重作用時のタンクの動的応答に関する研究

岐阜工業高等専門学校 正会員 ○渡邊 尚彦
(独) 海上技術安全研究所 田中義照, 安藤孝弘, 穴井陽祐

1. はじめに

近年, 地震時スロッシングによる貯槽被害が多数報告されている. 一方, 造船・容器構造分野では強度評価ガイドライン策定に向けたタンク構造の動的応答を考慮したスロッシング荷重選定法が確立されつつあり, そこでは, 容器天板の受ける流体力は衝撃圧と腰掛圧とで扱われ, 衝撃圧に対する動的応答を三角波パルス応答により検討することが提案されている.

本研究は, 独立行政法人海上技術安全研究所において実施された, 天板の一区画の板厚及び材料特性を可変とした二次元タンクスロッシング試験計測データを用い¹⁾, 弾性パネル応答波形から衝撃圧力作用時の付加水質量がパネルの周波数特性に与える影響を考慮し, 動的応答倍率を検討する際のより妥当な衝撃荷重モデルを考察するものである.

2. 試験概要

実施された実験は, 天板一区画に嵌め込み可能な弾

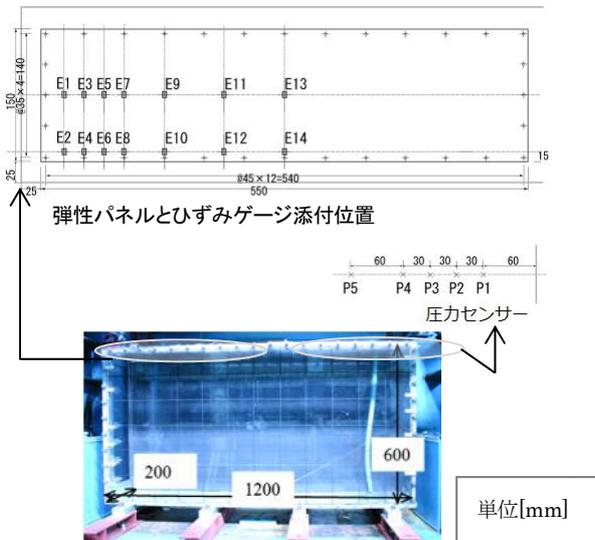


図1 タンク寸法及びゲージ貼付位置

性パネル条件を変化させて行った矩形タンク(サイズ600×1200×200[mm])の動揺試験であり, スロッシング衝撃作用時における弾性パネル上の動ひずみ及び天板各部位の圧力(共和電業製 PS-05KD 使用)を計測したものである(図1). 基本計測時間はピーク値400回計測可能な12分間とした. 加振条件は並進・回転方向へのサイン波加振とし, 各液位の同調時近傍の周期とした(表1). また, 弾性パネルのケースを表2に

示す.

表1 加振条件

W.L.	加振条件	T[s]
95%	Roll±6.0deg	1.44
	Sway±30mm	1.36
70%	Roll±6.0deg	1.38
	Sway±30mm	1.38
60%	Roll±6.0deg	1.46
	Sway±30mm	1.40

W.L. 液位
Roll 回転加振
Sway 並進加振

表2 弾性パネルケース

	密度ρ [×10 ³ kg/m ³]	ヤング率E [GPa]	板厚h [mm]	曲げ剛性D [N·m]	計測時間 [min]
CASE-1 SU S430			0.5	2.29	12
CASE-2	8	200	1.0	18.32	12
CASE-3			2.0	146.52	3
CASE-4 リン青銅			0.5	1.26	12
CASE-5	8.8	110	1.0	10.07	12
CASE-6			2.0	80.59	12
CASE-7 ポリカ	1.35	2.4	2.0	1.76	12

3. 結果と考察

各加振条件における400回ひずみピークの最頻値をh/D(h:板厚, D:曲げ剛性)で除して整理した結果, 特に液位70%において各パネルケース間で値の差が見られたことから動的応答倍率の影響を考慮する必要があることが示された. 一方, 動的応答倍率を考慮する際に必要となるパネルの周波数特性について衝撃圧作用時の周波数特性は空タンクにおけるハンマリング試験時の周波数特性とも異なっていることが観察でき(一例を図2に示す), 衝撃時の付加水質量による影響を考慮する必要があることが示唆された. そこで各ケースひずみ時刻歴データについてFFTにより周波数特性の整理を行い, まず空中振動数との差を付加水質量の観点から考察した.

<付加水質量について>

各パネルケースの空中振動, 全面接水振動(以上ハンマリング応答結果), スロッシング衝撃圧作用時振動について各周波数を $\sqrt{Dg/\rho h}$ (ρ:密度, h:板厚, D:剛性)との関係で整理したものが図2である. 接水時には空中振動数に対して周波数が低下しており, 付加水質量Mの影響が考えられる. 接水時の周波数 f_{sl} と空中周波数 f_{air} との関係 $\sqrt{1 + \frac{M}{m}} f_{sl} = f_{air}$ を利用し(m:板質量), スロッシング時の実測周波数を説明可能な付加水質量を推定したものが表3である. WL70%Rollで付加水質量を仮定してフィッティングした例を図3に示す.

キーワード スロッシング, 矩形タンク, 接水振動, 付加水質量, 動的応答倍率

連絡先 〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2 岐阜工業高等専門学校 TEL 058-320-1402

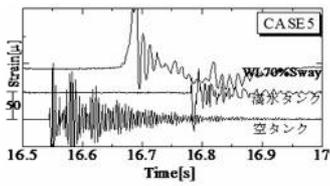


図2 ハンマリング応答

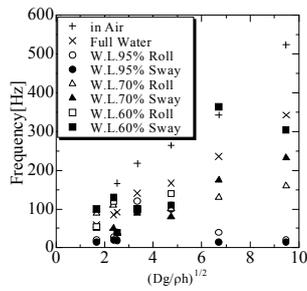


図3 接水時の周波数特性

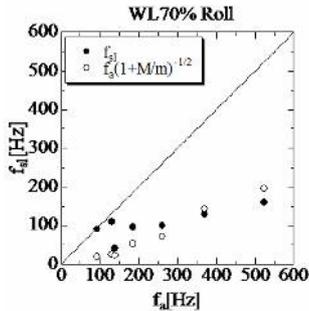


図4 フィッティング例

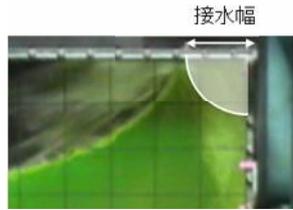


図5 四分円モデル

表3 付加水質量と接水長さ

加振条件	仮定したM [kg]	四分円半径r [mm]	実際の接水長さ[mm]
WL70%Roll	8.2	228.48	174.16
WL70%Sway	4.9	176.62	197.37
WL60%Roll	1.2	87.40	120.31
WL60%Sway	1.4	94.41	153.63

ここで、W.L.95%のケースにおいては $\sqrt{Dg/ph}$ に対して周波数が単調増加傾向を示さなかったため算出対象から除外したが、これは衝撃時はば一定の長さで接水する他のケースと異なり、このケースでは内部流体が天板を滑るように移動するパターンを取ったためと考えられる。次に、付加水質量Mと接水長の関連を考える。付加水質量を天板接水長rを半径とする四分円でモデル化すると(図5)、付加水質量から推定される接水長は表3の様になる。これと画像データから得られた天板への衝突時の接水長と比較した。表3より完全には一致しないがオーダーとして近いことが分かる。このことは、接水長さから付加水質量を概算できる可能性を示唆している。

<動的応答倍率について>

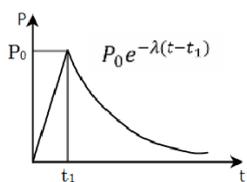


図6 指数減衰波モデル

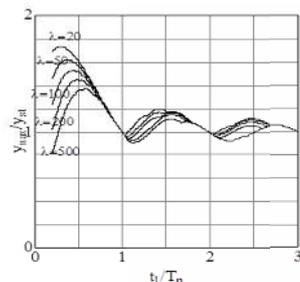


図7 最大動的応答倍率

ここでは、図6のような指数減衰波を入力波としたときの非減衰1自由度振動系を例に挙げ、その応答倍率特性と比較した。Duhamel 積分により求めた最大

動的応答倍率特性を図7に示す。これと、実測値の圧力最頻値とひずみ最頻値を使って動的応答倍率特性を整理し比較した。動的応答倍率としてE9, P2の実測波形のピーク最頻値を使って整理したものを図8に示す。横軸に相当する値は、圧力センサー計測値から得られた各衝撃時圧力波形パラメータ(表4)と弾性パネル接水時応答周波数特性から算出した(ひずみは $\epsilon^* = h/D$ で規準化した)。 $t_1/T_n=1.0$ 周辺でほぼ全データが極小値をもつこと、 $t_1/T_n < 1.0$ の範囲で高い応答倍率特性を示し、その中でも λ の小さいWL95%Rollが顕著であることなどは図7の指数減衰波の動的応答倍率特性をよく模擬しているといえるが、他の圧力センサー位置のデータを使用して整理されたデータはばらつきが大きく、明確な傾向を確認するには至らなかった。今後、各液位加振条件によって異なる内部溶液衝撃パターンや板の荷重作用範囲を考慮した、より詳細な整理が必要といえる。

表4 衝撃パラメータ

	t_1 [s]	λ
WL95%Roll	0.01	23.4
WL95%Sway	0.01	37.6
WL70%Roll	0.01	173.3
WL70%Sway	0.01	161.7
WL60%Roll	0.01	40.1
WL60%Sway	0.01	32.2

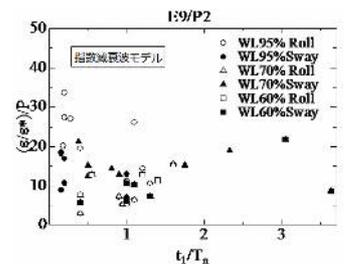


図8 実測値の動的応答倍率

4. まとめ

天板の一区画を弾性パネルとしたスロッシング実験の、ひずみ周波数データ整理により以下の知見が得られた。

<付加水質量について>

衝撃作用時壁面接水長さから、周波数特性に影響を及ぼす付加水質量を算出できる可能性を示した。

<動的応答倍率について>

実測データは指数減衰波入力時の非減衰1自由度系の応答倍率特性に近い傾向が一部見られたが、より精度良い考察のためには荷重作用範囲、作用荷重のばらつきを考慮した整理が必要である。

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究A(課題番号 21246131「タンク内スロッシング荷重による流力弾性応答とその低減手法に関する研究」、研究代表者:田中義照)によって実施されたものであり、関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会:容器構造設計指針・同解説, 2010, pp. 181-185.
- 2) 渡辺, 安藤ら:スロッシング衝撃荷重を受けるパネル弾性応答に関する実験研究, 日本船舶海洋工学会講演会東部支部, 2010