

実機貯水槽におけるスロッシング発生時の動液圧について

○中央大学 学生員 小野 泰介 (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

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)において、ステンレス製や FRP 製の矩形貯水槽の破損被害が多数見つかった。東日本大震災ではこのような貯水タンクの被害により病院で水が使えず大きな影響が出た。また、避難所となる公立の小中学校では、ライフラインである水が十分に配給されず避難者に甚大な影響を与えた。このような種の貯水槽被害は、やや長周期地震動によるスロッシング現象(液面揺動の励起)の発生によるものと推定されている¹⁾。近い将来必ず発生する南海トラフでの巨大地震や首都圏直下地震等で生じる「やや長周期地震動」による地震災害に対応することが重要である。

これを受けて本論では、実機の正方形ステンレス製パネルタンク(以下、タンク)を用いて、加振方向の変化によるスロッシングと振幅、設定加振時間の変化によるスロッシングについて加振実験を行う。そして、加振実験より内容液の動液圧について把握を行ない、タンクのスロッシング挙動に関して検討を行ったので、ここで報告する。

2. 実験概要

図-1 に示す各辺 3000mm のタンクに 2700mm まで水を満たし、加振実験を行う。図-1 のように、圧力計を高さ 500mm, 1500mm, 2500mm, 天井の 3000mm の位置の容器壁面に隅角部から 500mm 離れた A(以下、隅角部 A) と 1500mm 離れた B(以下、壁面部 B) に計 8 箇所設置し、動液圧を計測する。

写真-1 に用いたタンク、写真-2 に実験の全体状況を示す。このタンクは、実際に上水の貯水のものと同じの仕様である。加振実験には、愛知工業大学が所有している大型振動装置を用いる。

正方形断面容器は、各辺の長さが等しいため各辺のスロッシング固有振動数が等しくなることが特徴である。そのために加振方向角を変化させて行った場合に、スロッシング挙動に影響してくると確認されている²⁾。そこで本研究では、正方形断面容器を加振する方向角 θ を図-2 のように定義して、 $\theta=0^\circ \sim 45^\circ$ の間で 15° 間隔で設定する。

事前の加振実験より、タンクの固有振動数はいずれの加振方向角においても 1 次モードは 0.49Hz, 2 次モードは 0.87Hz で最大波高が卓越した。また、1 次モード 0.49Hz 加振、加振方向角 45° において波高は最大となることがわかった³⁾。

以上より、入力振動数は 1 次モードでは 0.49Hz, 2 次モードでは 0.87Hz とする。加振方向の変化による動液圧の変化を把握のために、振幅 $\pm 3\text{mm}$ 、設定加振時間 10 秒に統一し、加振方向角を変化させ加振実験を行う。また、振幅と設定加振時間の変化による動液圧の変化を把握のために、波高が最大となる 1

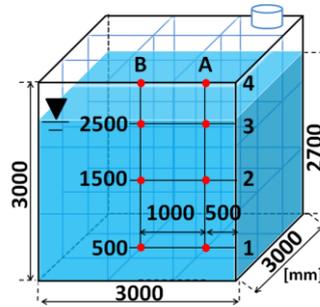


図-1 正方形断面容器

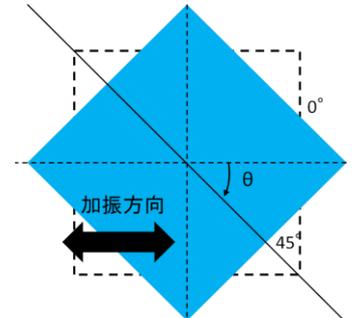


図-2 加振方向角 θ の設定方法



写真-1 用いたタンク



写真-2 実験の全体状況

表-1 実験条件

	1次モード	2次モード
容器内壁間の幅 L [mm]	3000	
水深 H [mm]	2700	
固有振動数理論値 [Hz]	0.50	0.88
入力振動数 [Hz]	0.49	0.87
加振方向角 $^\circ$	0, 15, 30, 45	
振幅 [mm]	1~8(1mm刻み)	
設定加振時間 [s]	10, 20, 30	

次モード 0.49Hz, 加振方向角 45° に統一し、振幅、設定加振時間を変化させ加振実験を行う。実験条件を表-1 に示す。

3. 実験結果

3.1 加振方向の変化による検討

図-3, 図-4 それぞれ 1 次, 2 次モードの振幅 $\pm 3\text{mm}$ 、設定加振時間 10 秒における各加振方向角の動液圧分布を示す。ここで、(a)は隅角部 A, (b)は壁面部 B における結果である。図-3 の加振方向角 0° に着目すると、隅角部 A では 1.3kPa を示し、壁面部 B では 1.2kPa を示しほぼ同等の値となった。一方、加振方向角が増加することで、いずれの加振方向角においても隅角部 A の方が壁面部 B より大きな値を示した。天井を除くほぼ全ての高さの圧力計設置位置において、隅角部 A では加振方向角が変化することで動液圧の変化に影響していることが確認できる。しかし、壁面部 B では加振方向角が変化することで動液圧の変化は顕著に見られなかった。これより隅角部 A と壁面部 B の比較から、隅角部に近いほど内容液の及ぼす力が大きいことがわかる。これは加振方向角を変化させることで、隅角部に内容液が集中したた

めと考えられる。また、内容液の水面の高さに近い 2500mm の位置で、いずれの加振方向角においても、動液圧は 1.5~2.1kPa と大きな値を示している。これよりスロッシング現象による力の作用が内容液の水面の高さ 2700mm 付近で大きく影響していることが考えられる。また、タンクの壁面全体に力を及ぼすバルジング現象ではなく、内容液水面付近で局所的に力を及ぼすスロッシング現象が発生したことがわかる。

図-4 より、2 次モードでは設置位置に関わらず、ほぼ同等の値を示した。このことから 2 次モードでは 1 次モードに比べ設置位置の違いと加振方向角の変化による影響が見られなかった。

以上より、1 次モードの方がいずれの加振方向角においても動液圧の値が大きくなる。このことからスロッシング現象は 1 次モードの方がタンクに及ぼす力が大きいことがわかる。

3. 2 振幅と設定加振時間の変化による検討

図-5 に隅角部 A で計測した 1 次モード、加振方向角 45°における振幅と動液圧の関係を示す。天井に設置した A-4 に着目すると、内容液が天井に到達し始める振幅±4mm から動液圧が大きな値を示している。また、この圧力計において振幅±4mm から振幅の増加に伴い動液圧が増加傾向であることが確認できる。このことから振幅の増加に伴い内容液が天井に到達することで、壁面に及ぼした 2~4 倍の大きな力を天井に及ぼしていると考えられる。

また、A-4 以外の設置位置では振幅±6mm に到達するまで、振幅の増加に伴い動液圧は増加している。これらの圧力計設置位置において、計測した動液圧は線形に増加を示した。これから動液圧は振幅と比例関係があり、振幅依存性を有していることが考えられる。

しかし、振幅±6mm 以降では動液圧の増加は見られなかった。これは振幅が増加することで内容液がタンク天井に到達し、砕波したために力が及ぼさなかったと推測される。図-6 に隅角部 A で計測した 1 次モード、加振方向角 45°、振幅±3mm における設定加振時間と動液圧の関係を示す。

図-6 より、いずれの圧力計設置位置においても設定加振時間の増加に伴う動液圧の増加は顕著にみられない。このことから動液圧は設定加振時間に依存しないことが考えられる。

4. おわりに

本論では、実機の正方形ステンレス製パネルタンクを用いて、加振方向の変化と振幅、設定加振時間の変化による加振実験を行い、内容液の動液圧の把握を行なうことでスロッシング挙動の検討を行った。

1 次モード、加振方向角 0°において、隅角部 A と壁面部 B でほぼ同等の値となった。一方、加振方向角が増加することで、動液圧はいずれの加振方向角においても隅角部 A の方が壁面部 B より 1.5~2.1kPa と大きな値を示し、タンクに及ぼす力が大きかった。さらに、内容液の水面 2700mm 付近において動液圧の値は大きく、スロッシング現象によりタンクに及ぼす力が大きくなった。

また、動液圧は設定加振時間に依存しないが、振幅

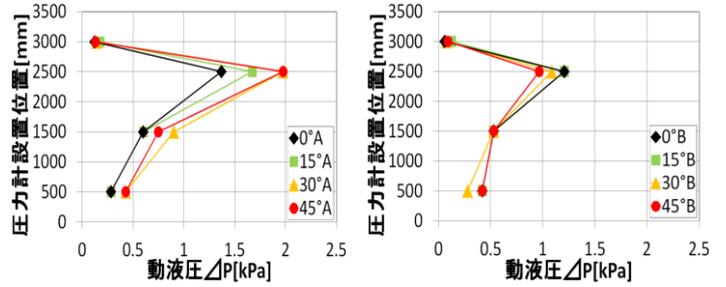


図-3 1 次モードの加振方向角の動液圧分布
(a) 隅角部 A (b) 壁面部 B

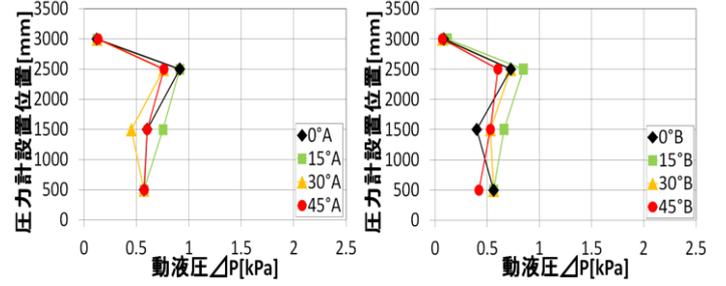


図-4 2 次モードの加振方向角の動液圧分布
(a) 隅角部 A (b) 壁面部 B

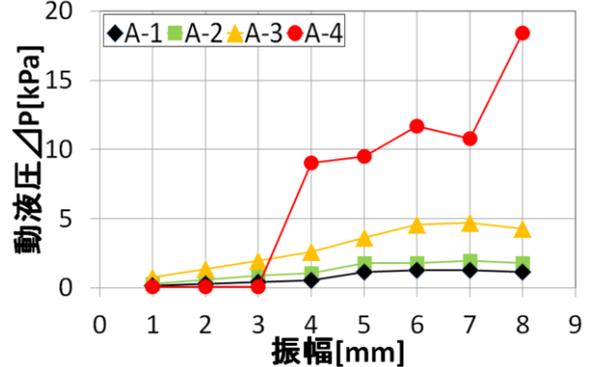


図-5 振幅と動液圧の関係

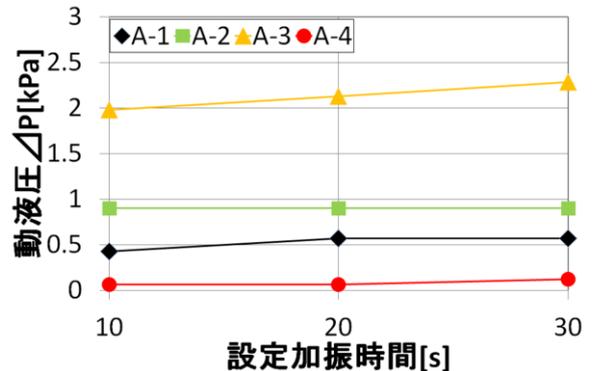


図-6 設定加振時間と動液圧の関係

の増加に伴い動液圧は線形に増加した。このことから動液圧は振幅依存性を有していることを確認した。振幅の増加により内容液が天井に到達し始めると、動液圧は壁面部の 2~4 倍大きな値を示したことから、内容液は実機タンクの天井に大きな力を及ぼした。

参考文献

- 1) 東日本大地震調査支援本部調査部会調査団: 東北地方太平洋沖地震 建設設備に関する 調査報告
- 2) 遠田豊, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 応用力学論文集, Vol15, 2012. 8
- 3) 遠田豊, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 実機貯水槽におけるスロッシング挙動, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会 (投稿中), 2013, 3