

実機貯水槽のスロッシング発生時における動液圧変化の検討

○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。写真-1に名取市の雑用水貯水槽の被害を示す。この被害はスロッシング現象により内容液が貯水槽の天井や側壁等に衝突したことで大きく変形し破損したと推定される。また、仙台医療センターでは、貯水タンクの破損により緊急外来の受け入れを制限する事態に陥った。更に、我々研究グループの調査で仙台市内の公立小中学校では、196校中62校で破損被害が生じ、11校で完全に破壊し避難所で水が配給されず、手洗い、洗面等の生活用水が使用できずに衛生面に甚大な被害をもたらした。

この種の被害は、数秒から数十秒の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)の発生が一つの原因であると推定される¹⁾。ところで従来の貯水槽の設計方法は、給水貯水槽タンク耐震仕様法令変遷において、1980年以降2回の改定が行われた²⁾。しかし、いずれの改定においても「やや長周期地震動」による動的なスロッシング挙動に関して、具体的な対処規定がないのが現状である。

このような背景から東日本大震災において貯水槽の被害は、地震が大規模であったこと、貯水槽の劣化や疲労の進行が原因であるとされ、根本的な原因究明がなされていない。近い将来発生が予想される南海トラフでの巨大地震や首都圏直下型地震等で生じるやや長周期地震動により、貯水槽の中で発生するスロッシングによるタンクの破壊を防ぐ必要がある。そのために、スロッシング挙動の把握が必要である。

これを受けて本報では、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の変化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の検討を報告する。

2. 実験概要

図-1に示す各辺3,000mmのタンクに2,700mm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, 1,500mm, 2,500mm, 天井の3,000mm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1,500mm離れたB(以下、壁面部B)に計8箇所設置し、動液圧変化を計測する。

写真-2に実験に用いたタンクを示す。このタンクは、実際に上水の貯水に用いられたものである。加振実験には、愛知工業大学が所有している大型振動実験装置を用いる。

タンクの形状は正方形断面であるので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³⁾。そこで本研究では、タンクを

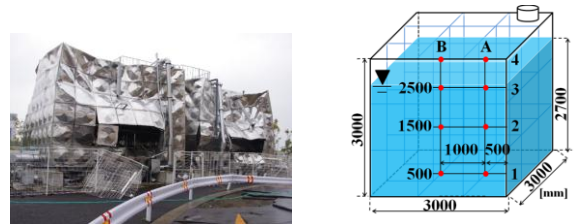


図-1 正方形断面容器

写真-1 名取市 雑用水貯水槽被害



写真-2 実験に用いたタンク

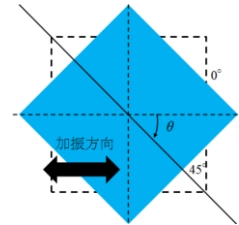


図-2 加振方向角 θ の設定方法

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]	3,000	
水深H[mm]	2,700	
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[°]	0, 15, 30, 45	
振幅[mm]	1~8(1mm刻み)	
設定加振時間[s]	10	

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ている⁴⁾。

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するために、振幅 ± 3 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。この設定条件における加振時の加速度は、1次モードでは3Gal、2次モードでは9Gal相当となり、小さな加速度で加振実験を行うこととなる。また、振幅の変化による動液圧の変化を把握するため、波高が最大となる1次モード0.49Hz、加振方向角 45° に統一し、振幅を変化させて加振実験を行う。この設定条件では最大で8Gal相当となる。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にそれぞれ1次、2次モードの振幅 ± 3 mm、設定加振時間10秒、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の結果である。

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、加振方向角を増加させた場合、加振方向角 45° において隅角部Aが2.0kPaとなり、壁面部Bで示した1.0kPaと2倍の大きな値を示した。隅角

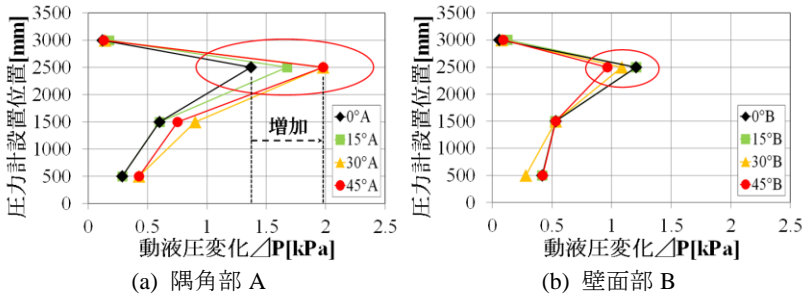


図-3 1次モードの加振方向角の動液圧分布

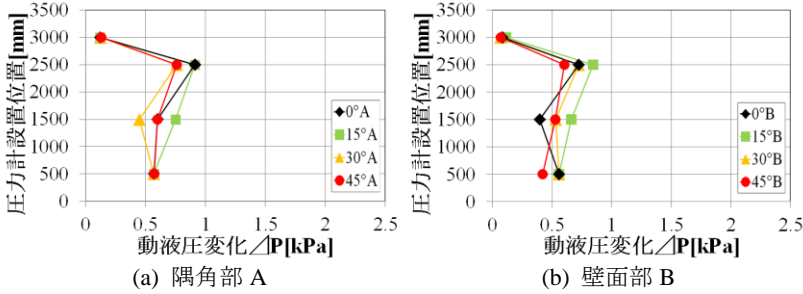


図-4 2次モードの加振方向角の動液圧分布

部 A では加振方向角が増加することで動液圧の変化は増加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い。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 45° に近づけることで、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 2,500mm の位置で、いずれの加振方向角においても、動液圧変化は 1.0~2.0kPa 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 2,700mm 付近で大きく影響していることが考えられる。つまり、これは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部的に力を及ぼすスロッシング現象（液面揺動の励起）が発生したことによる。

図-4 より、2 次モードでは設置位置に関わらず、動液圧変化は 0.6~0.9kPa と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小さいとわかる。

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変化の値が大きくなり、スロッシング現象がタンクに及ぼす力が大きいことがわかる。

3. 2 振幅の変化による検討

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変化の関係を示す。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変化は増加している。これらの圧力計設置位置において、計測した動液圧変化は線形に増加を示した。これから動液圧変化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 以降では動液圧変化の増加は見られない。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、砕波したためパネル側面に力が及ぼさなかったと推測される。

一方、天井に設置した圧力計 A-4 に着目すると、内容液が天井に到達し始める振幅±4mm から動液圧変化が 9.0kPa と大きな値を示している。更に、振幅±4mm から振幅の増加に伴い動液圧の変化は増加傾向を示し

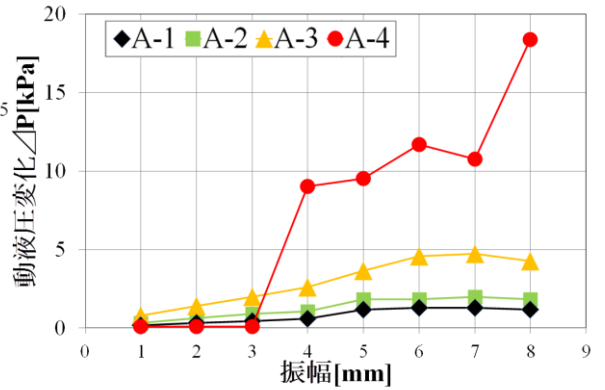


図-5 振幅と動液圧変化の関係

ている。また、設定した最大の振幅±8mm において、動液圧変化の値は最大の 18kPa (約 1.8tf/m²) を示し、大きな力を及ぼしている。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 2~9 倍の非常に大きな力が天井に作用している。よって、ここが破壊箇所となる可能性が高い。今回の実験では大型振動実験装置の安全の限界上、最大振幅が±8mm であったが、より大きな振幅を与えることで、天井により大きな動液圧変化を及ぼすと推測できる。実際に天井に内容液が衝突し、天井が吹き飛んだ被害例も報告されている。

4. おわりに

本報では、実機タンクを用いて加振方向の変化と振幅の変化による加振実験を行い、内容液の動液圧変化の把握を行ない、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 で動液圧の変化は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、隅角部 A の動液圧の変化は増加し、壁面部 B より大きな値を示し、タンクに大きな力を及ぼしていた。更に、水面 2,700mm 付近で動液圧変化の値は大きく、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、動液圧変化は振幅の増加に伴い動液圧は増加傾向であり、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、最大の振幅±8mm において、隅角部 A では動液圧変化の値は最大の 18kPa と大きな値を示し、タンクの天井に大きな力を及ぼしており、ここが破壊箇所となる可能性が高いと考えられる。

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) 一般社団法人リビングアメニティ協会 HP
- 3) 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
- 4) 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, I-20, 2013, 3