実機貯水槽における正弦波加振時の動液圧変化について

○中央大学　学生員　小野　泰介　㈱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

東日本大震災では，震源に近い東北地方のみならず，遠く離れた関東地方においてもステンレス製やFRP製の貯水槽被害が報告されている．これらの被害により被災地の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充分に配給されず避難者に甚大な影響を与えた．また，貯水槽と受水槽が屋上に設置されている病院で水が使用できず，病床を閉鎖に追い込まれるという大きな影響が出た．本大震災での貯水槽被害は，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．

今後，高い確率で発生が予想される大地震による災害へ向け，本大震災を教訓として，いつ発生するかもわからない地震災害への対策を講ずる必要がある．

これを受けて本論文では，貯水槽の破壊被害の原因の一つとして考えられるスロッシング現象について，内溶液が貯水槽壁面に及ぼす影響を検討する．ここでは，実機貯水槽を用い，加振方向の変化と加振振幅の変化について正弦波加振実験を行う．そして，内容液の動液圧変化について計測を行う．また，著者らの研究実績[1)]を踏まえて，動液圧変化について正圧のみならず負圧に関しても検討を行ったのでここに報告する．

2. 実験概要

図-1 に示す各辺3000mmの貯水槽に通常の設定水位である水深2700mmまで水を満たし，加振実験を行う．この時の総重量は約26tonである．この貯水槽は，実際の上水貯水のものと同一の仕様である．**図-1** のように，圧力計を高さ500mm，1500mm，2500mm，天井の3000mmの位置に隅角から200mm離れたAと1500mm離れたBに計8箇所設置し，動液圧変化を計測する．

本貯水槽は正方形断面容器であるため，各辺の長さが等しく，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た場合に，スロッシング挙動に影響すると確認されている．そこで，貯水槽を加振する方向角 θ を**図-2** のように定義して，θ=0°，45°で設定する．

著者らの加振実験より，本貯水槽の固有振動数は1次モードでは0.49Hz，2次モードでは0.87Hzであり，いずれの加振方向角においても本固有振動数において共振し，最大波高が確認できた[2)]．

以上より，入力振動数は1次モードで0.49Hz，2次モードで0.87Hzとする．加振振幅は3mm, 5mm, 10mmと変化させる．入力波数は正弦波10波と統一して実験を行う．本実験における最大加速度は，加振振幅10mmにおいて，0.49Hzでは9.5Gal（震度3），0.87Hzでは30.0Gal（震度4）である．なお，最大加速度に対する地震震度階級は気象庁公式サイト内の「震度の算出方法」を目安にしたものである．以上の実験条件をまとめて**表-1** に示す．**写真-1** に加振方向角0°時，**写真-2** に加振方向角45°時の貯水槽全体状況を示す．加振実験には，愛知工業大学と中央大学が2013年12月に協同で製作した大型振動装置を用いる．

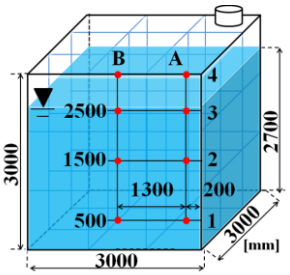


図-1 正方形断面容器

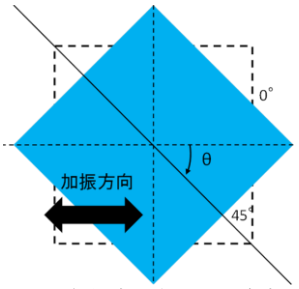


図-2 加振方向角 θ の設定方法

表-1 実験条件

		1次モード	2次モード
容器内壁幅 L		3000mm	
水深 H		2700mm	
入力振動数		0.49Hz	0.87Hz
加振方向角 θ		0°,45°	
入力波数		10波	
加振振幅における最大加速度	3mm	2.8Gal	9.0Gal
	5mm	4.7Gal	14.9Gal
	10mm	9.5Gal	30.0Gal

写真-1 加振方向角 0°

写真-2 加振方向角 45°

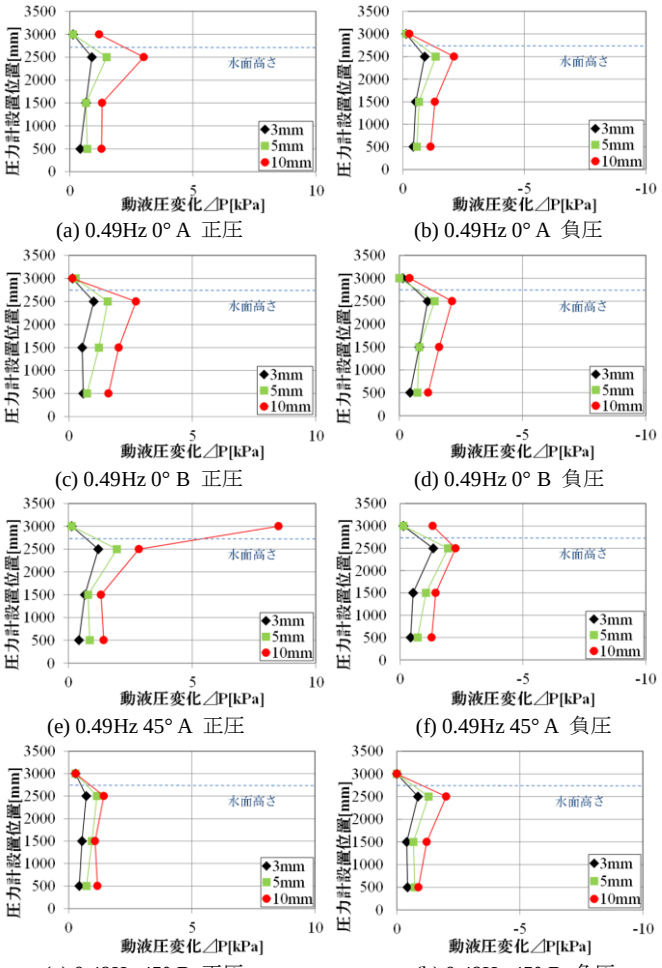
3. 実験結果

図-3，**図-4** に各実験の動液圧分布を示す．それぞれ図の左側が正圧，右側が負圧の最大値を示している．いずれも加振振幅が増加することで，正圧・負圧の動液圧変化の値が増加していることがわかる．

図-3(a)~(d) の1次モード0.49Hz加振方向角0°に着目する．圧力計設置位置2500mmにおいてA正圧は3.0kPa, B正圧は2.7kPaを示した．一方，負圧はAとB共に−2.1kPaを示した．このことから加振方向角0°時において，圧力計設置位置A・Bにかかわらず同等の動液圧変化を及ぼしていることがわかる．また，圧力計設置位置2500mmにおいて，他の圧力計設置位置と比較して局所的に動液圧変化の値が増大している．これは内溶液の水深が2700mmであり，スロッシング現象が水面高さ付近で大きく影響を及ぼしていると考えられる．よって，1次モードの固有振動数により共振することで，水面付近において局所的に影響を及ぼすスロッシング現象が発生したと推測される．

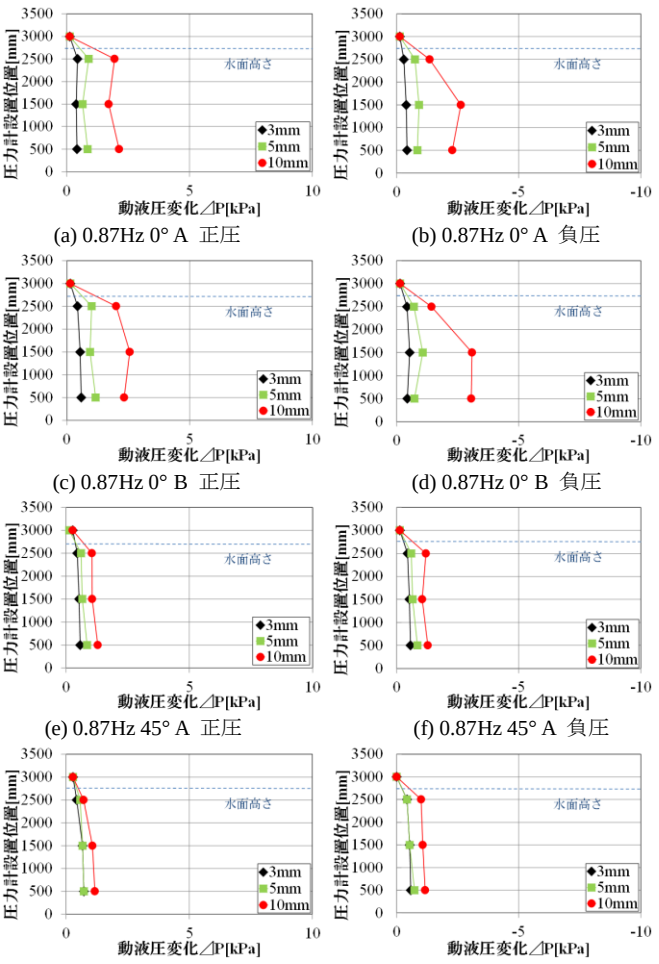
図-3(e)~(h) の1次モード0.49Hz加振方向角45°に着目する．圧力計設置位置2500mmにおいてA正圧は2.9kPa, B正圧は1.4kPaを示した．一方, A負圧は−2.3kPa, B負圧は−2.0kPaを示した．このことから圧力計設置位置A・Bの違いにより，動液圧変化の値に違いが生じた．これは，加振方向角45°で加振実験を行うことで，貯水槽の内溶液が隅角部分に集中する．よって，隅角部分に近い圧力計設置位置Aにおいて圧力計設置位置

キーワード：スロッシング，貯水槽，動液圧変化，加振方向角
連絡先：〒112-8551　東京都文京区春日　1-13-27　tel. 03-3817-1816　fax. 03-3817-1803



(a) 0.49Hz 0° A 正圧　(b) 0.49Hz 0° A 負圧
(c) 0.49Hz 0° B 正圧　(d) 0.49Hz 0° B 負圧
(e) 0.49Hz 45° A 正圧　(f) 0.49Hz 45° A 負圧
(g) 0.49Hz 45° B 正圧　(h) 0.49Hz 45° B 負圧

図-3 1 次モードにおける動液圧分布



(a) 0.87Hz 0° A 正圧　(b) 0.87Hz 0° A 負圧
(c) 0.87Hz 0° B 正圧　(d) 0.87Hz 0° B 負圧
(e) 0.87Hz 45° A 正圧　(f) 0.87Hz 45° A 負圧
(g) 0.87Hz 45° B 正圧　(h) 0.87Hz 45° B 負圧

図-4 2 次モードにおける動液圧分布

B より大きな動液圧変化を及ぼしたと考えられる．また，**図-3**(e)では加振振幅 10mm において，内溶液が貯水槽天井に衝突し 8.5kPa の衝撃圧力を及ぼしている．本実験以上の地震動に見舞われた際には，このような隅角部分や天井が破壊箇所となる可能性がある．本実験において 1 次モードでは最大加速度は 9.5Gal 加振であるが，兵庫県南部地震は 848Gal，東北地方太平洋沖地震は 2933Gal の最大水平加速度が観測されている．このため各種貯水槽の被害事例が生じたと考えられる．

次に**図-4**(a)~(d)の 2 次モード 0.87Hz 加振方向角 0°に着目する．圧力計設置位置 500mm, 1500mm, 2500mm において A 正圧は 1.7~2.1kPa，B 正圧は 2.0~2.5kPa を示した．一方，負圧は圧力計設置位置 1500mm において最大値を示しており，A 負圧は−2.6kPa，B 負圧は−3.1kPa を示した．このように，正圧は貯水槽の壁面全体的に，負圧は内溶液の中腹に動液圧変化が作用している．2 次モードでは，水面付近で局所的に動液圧変化が作用している 1 次モードとは異なり，壁面へ全体的に動液圧変化が作用している．これは入力振動数がより高次である 2 次モードでの加振が要因であると考えられる．この挙動は貯水槽壁面全体に影響を及ぼすバルジング現象であると推測される．

最後に**図-4**(e)~(h)の 2 次モード 0.87Hz 加振方向角 45°に着目する．圧力計設置位置 500mm，1500mm，2500mm において A 正圧は 1.0~1.3kPa，B 正圧は 0.7~1.2kPa を示した．一方，同圧力計設置位置において A 負圧は−1.1~−1.3kPa，B 負圧は−1.0~−1.2kPa を示した．加振方向角 0°時と比較すると，正圧・負圧ともに動液圧変化の値は小さくなった．これは貯水層の壁面が振動しにくくなったことが要因であると推測される．

4. おわりに

本論文では，貯水槽のスロッシング現象について，加振方向の変化と加振振幅の変化の正弦波加振実験から，内容液の正圧・負圧の動液圧変化の計測を行った．

1 次モード加振時では水面付近において局所的に影響を及ぼすスロッシング現象の発生が考えられた．また，加振方向角 45°加振振幅 10mm 加振時において，内容液が隅角部分に集中し，天井に衝突していた．このように，貯水槽の隅角部分・天井で破壊の可能性が考えられる．また，2 次モード加振時では，動液圧変化は貯水槽壁面全体に作用しており，バルジング現象の発生を推測した．

今後の展望として，汎用解析ソフトを用いた数値解析を行う予定である．そして，動液圧変化，液面挙動を実験値と比較を行う．また，貯水槽の内部構造は梁・柱部材があるため複雑である．このため構造解析を行い，破壊過程の把握の必要性が挙げられる．

謝辞: 本研究の一部は科学研究費及び (独)科学技術振興機構 A-STEP の給付を受けたことを付記する．

参考文献

1) 小野泰介，曽根龍太，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：実機貯水槽を用いてのスロッシング発生時の壁面に及ぼす動液圧変化に関して，地震工学論文集, Vol.33（査読投稿中）
2) 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