

実機貯水槽において加振方向角を変化させた場合のスロッシング挙動

○東日本高速道路(株) 正会員 遠田 豊*) (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、被害地域内の上水道配水施設での矩形タンクの破損被害や、震源から遠く離れた地方においても正方形タンクの破壊被害が多数報告された。仙台市内の公立小中学校における調査では、196校中の32%にあたる62校で貯水槽タンクの破損被害が発生し、その内11校では貯水槽タンクが完全に破壊されていることがわかった。

このようなタンク被害の原因の一つとして、やや長周期地震動によりスロッシング現象(液面揺動の励起)の発生したことが挙げられる。近い将来必ず発生する東海地震、東南海地震、南海地震等の海溝型地震、一部の直下型活断層型地震などは、2~10秒のやや長周期の地震を強く励起する可能性が高いので、貯水槽の動的な挙動を把握することは、社会的に大きなニーズがあると考えられる。

これを受けて本報では、貯水槽タンク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着目し、加振方向角の変化がスロッシング挙動に与える影響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に示す正方形断面の各辺3000mmのステンレス製パネル式タンク(以下、タンク)に2700mmまで水道水を満たし、加振実験を行う。このタンクは、実際に上水の貯水に用いられるものと同一の仕様である。加振実験には、愛知工業大学所有の振動装置を用いる。

応答波高の計測には、レーザー変位計(以下、変位計)を1~4の4台用い、図-2に示す様にタンクの上面に設置する。変位計の設置位置の狙いは、変位計1は隅角部での波高、変位計3は壁面付近での波高、変位計2、4は2次モードでの腹(山と谷)になる部分の波高を把握するために設置した。また、タンク内部のスロッシング挙動を把握するために、図-2に示す様にタンクの中から壁面方向と隅角部方向をwebカメラで撮影する。写真-1に実験全体の状況を示す。

一般に、スロッシング発生時に応答波高が最も大きくなるのは、入力振動数とスロッシング固有振動数が一致して共振した場合である。そのため、矩形水槽のスロッシング n 次モード振動数を式(1)の理論式²⁾で表すことが出来る。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right)} \quad (1)$$

ここで、 f はスロッシング固有振動数、 g は重力加速度、 L は容器の幅、 H は水深である。式(1)より、実験で用いるタンクのスロッシング1次、2次モード振動数の理論値は、表-1に示すようにそれぞれ0.50Hz、0.88Hzとなる。

そこで本研究では、1次モードは0.47~0.52Hz、2次モード0.86~0.88Hzの範囲において、入力振動数を0.01Hz刻みで変化させながら加振実験を行うことで、

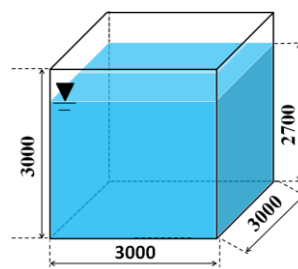


図-1 タンクの寸法

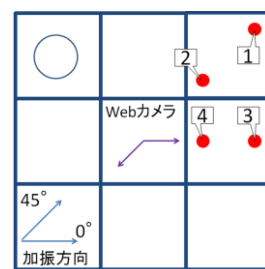


図-2 計測機器の設置位置

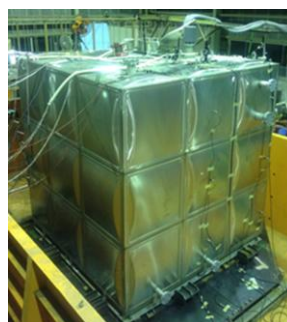


写真-1 実験全体の状況

表-1 スロッシング n 次モード振動数の理論値

水深 [mm]	2700
容器の幅 [mm]	3000
1次モード [Hz]	0.50
2次モード [Hz]	0.88

表-2 振動装置の設定条件

	加振条件	入力振動数 [Hz]	振幅 [mm]	設定加振時間 [s]
1次モード	正弦波	0.47~0.52	±3.0	10
2次モード		0.86~0.88		

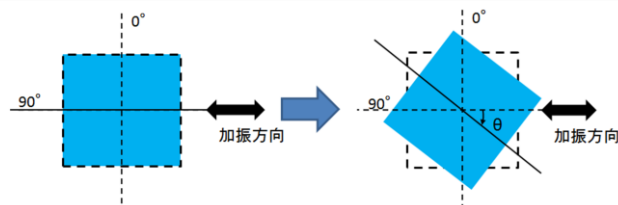


図-3 加振方向角の設定方法

実験に用いるタンクのスロッシング固有振動数の把握を行う。また、スロッシング挙動により内容液がタンクの天井に当たることによって減衰が付加されてしまうことを防ぐために、いずれ振動数においても振幅は±3.0mm、設定加振時間は10sと統一する。加振装置の設定条件の緒元を表-2に示す。

また、正方形断面容器は、加振方向角が変化することで、応答波高が著しく増大する特徴がある³⁾。そこで本実験においてもタンクを加振する方向角 θ を図-3の様に定義し、 $\theta=0^\circ \sim 45^\circ$ の間で設定する。そして、加振方向角を15°間隔で設定し、加振方向角を変化させながら加振実験を行い、最大波高等を計測してスロッシング挙動の違いを調べる。

3. 実験結果

3.1 スロッシング固有振動数の確認

図-4の(a)に1次モード、(b)に2次モードの各加振方向角における入力振動数と最大波高の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の

値を示した変位計の値を用いた。

図-4 より、いずれの加振方向角においても 1 次モードでは 0.49Hz、2 次モードでは 0.87Hz において最大波高が卓越している。タンクの 1 次、2 次モードの理論値はそれぞれ 0.50Hz、0.88Hz であるので、タンクのスロッシング固有振動数は理論値とほぼ一致している。

3.2 1 次モードの検討 (0.49Hz 加振)

図-5 に 1 次モード 0.49Hz 加振の各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の変位を示した変位計の値を用いた。

図-5 より、1 次モードでは、加振方向角を増加させていくと徐々に最大波高が増大し、加振方向角 45°の場合に最大波高が 247mm となり、加振方向角 0°の場合の最大波高 169mm と比べて、最大波高が約 45%増加している。これは加振方向角の変化により実タンクの隅角部に内容液が集中した結果、最大波高が大きくなったと考えられる。また、著者らのこれまでの実験の結果から、加振方向角が 45°を超えると最大波高が徐々に減少していき、加振方向角が 90°の場合には加振方向角 0°の場合と同等の値になると考えられる³⁾。

一方、減衰定数に関しては、加振方向角に依存せず 0.0045~0.0055 とほぼ一定の値を示した。

写真-2 の(a)に加振方向角が 0°の場合、(b)に加振方向角が 45°の場合の隅角部の設定加振時の静止面を示す。写真-2 から加振方向角が増加することで、タンクの対角線上で揺動し、加振軸上の隅角部で集中的に波高が大きくなっていることがわかる。

3.3 2 次モードの検討 (0.87Hz 加振)

図-6 に 2 次モード 0.87Hz 加振の各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の変位を示した変位計の値を用いた。

図-6 より、2 次モードの場合には、1 次モードの様に加振方向角の変化が加振方向角の増加に顕著に繋がらなかったが、加振方向角 45°の場合に最大波高が 194mm と最大の値をとっている。

減衰定数に関しては、1 次モードと同様に加振方向角に依存せず、0.001~0.002 とほぼ一定の値を示した。加振実験より、一度共振するとなかなか減衰せず、約 20 分間スロッシング挙動が継続することを確認した。

また、web カメラのタンク内部の映像より、いずれの加振方向角においても碎波が生じ、内容液が回転している挙動を確認することをした。以上から、加振方向角が変化しても最大波高が 200mm 以上にならない原因には、いずれの加振方向角においても碎波が生じることが挙げられる。

4. おわりに

本報では、実際に上水の貯水に用いられている正方形の 3000mm 角のステンレス製パネル式タンクを用いて、加振方向角を変化させながら加振実験を行った。

タンクのスロッシング固有振動数は、理論値とほぼ一致することを確認した。

1 次モードでは、加振方向角 45°の場合に隅角部で集中的に波高が大きくなり、最大波高が 0°と比較し 45%程度大きな値となった。2 次モードでは、加振方向角の変

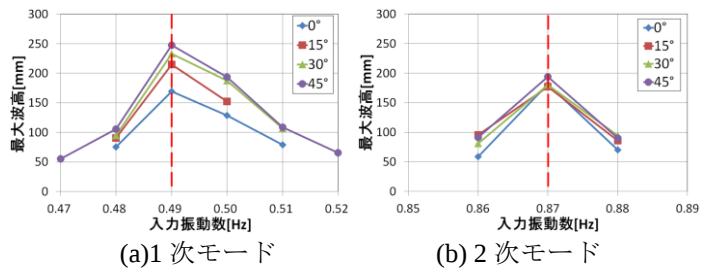


図-4 入力振動数と最大波高の関係

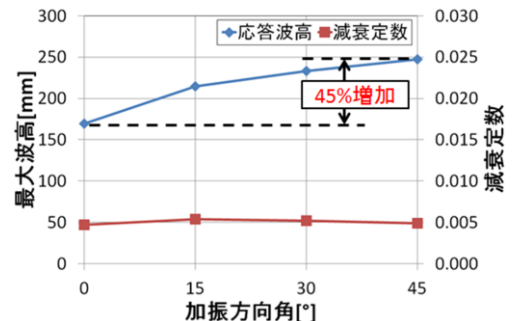
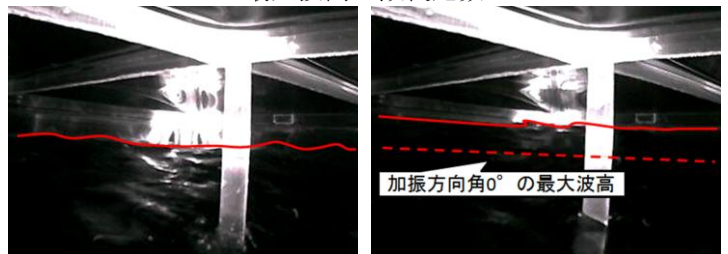


図-5 1 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角 0° (b)加振方向角 45°

写真-2 1 次モードの隅角部の液面挙動

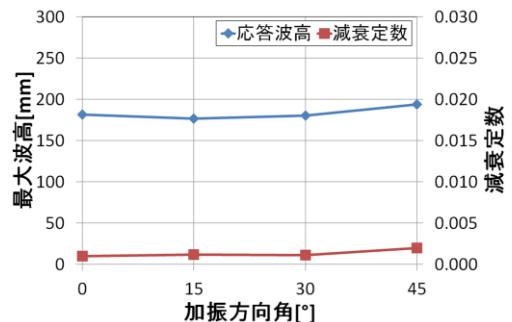


図-6 2 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数

化が応答波高の増大に顕著に繋がらなかったが、いずれの加振方向角においても碎波が生じ、内容液が回転している挙動を示した。

また、減衰定数は、モード形状や加振方向角に関わらずほぼ一定の小さい値となった。特に 2 次モードでは、一度共振するとなかなか減衰せず、約 20 分間スロッシング挙動が継続した。

今後は、スロッシング挙動による動的な作用におけるタンクの性能限界を把握するために、破壊実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 酒井理哉, 東貞成, 佐藤清隆, 田中伸和: 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価, 構造工学論文集 vol. 53, 2007. 3.
- 2) 葉山眞治, 有賀敬治, 渡辺辰郎: 長方形容器におけるスロッシングの非線形応答, 日本機械学会論文集, 49 巻 437 号, 1983. 1.
- 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, vol. 15, 2012. 8.