

貯水槽実機のスロッシング制振対策に関する実験的検討

○中央大学 学生員 曾根龍太 中央大学 正会員 平野廣和
 (株)十川ゴム 正会員 井田剛史 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)で、スロッシング現象と思われる液面揺動により、水道施設等にあるステンレス製やFRP製の正方形貯水槽において側面と天井に亀裂や破損が多数発生した。これらの被害は震源に近い宮城県栗原市、仙台市周辺のみならず、200km以上離れたつくば市でも被害が生じている。一例として病院の貯水槽被害で水が使えなくなったことから、救急搬送を中止せざるを得なかったとのことである。この種の正方形貯水槽の被害は、阪神淡路大震災を初めとして能登半島沖地震、新潟県中越沖地震でも発生しており、直下型地震、海溝型地震に問わずに発生する事例である。よって、貯水槽のスロッシング制振対策の検討が必要である。

矩形断面容器のスロッシング制振対策の方法としては、池田ら¹⁾が金網を容器内に設置することで制振効果を発揮することを提案している。また則竹ら²⁾は、側壁にプラスチック繊維を貼り付ける方法を提案している。しかし加振方向角が変化すると、正方形容器の場合はスロッシング挙動そのものが矩形容器と異なることが報告^{3), 4)}されているので、加振方向角をパラメータとした検討が必要となる。

以上のことから、本報では写真-1の貯水槽実機内に制振装置を設置し、加振方向角を変化させながら振動実験を行い、スロッシング制振対策を検討する。

2. 制振方法の検討

各種容器におけるスロッシング対策は、これまで様々な検討が行われており、この中で自由表面を有する矩形断面では、抵抗板を利用する方法が代表的な方法である。この方法は、流れ場を直接コントロールする方法であり、機械的な要素が無く単純かつ安定した制振効果が期待できる。例えば自由表面付近に側壁から水平に抵抗板を設置したもの、鉛直方向に抵抗板を配置してここで生じる渦により減衰効果を得るものなどがある。しかし、これらは新設の貯水槽には設置し易いが、既存の貯水槽に設置する場合は、法的に義務付けられている内部の定期清掃の方法など十分検討しなくてはならない課題が残っている。

これに対し本研究で提案する方法は、網目状の板やパネルを制振装置とし、貯水槽内を横断する様に垂直に設置する方法である。これは、やや長周期の固有振動数を有する構造物の制振装置として開発されたスロッシングダンパーの考え方を応用したものである。この方法により期待できる効果は、スロッシングにより液体揺動が生じた場合、液体が網目を通過するときに抵抗力が生じ、水の粘性が見掛け上大きくなることである。これにより減衰が付加され、流速を抑えて波高を低減することができる。

本研究では、写真-2に示す様に伸縮性と耐塩素性を有する樹脂チューブ(架橋ポリエチレン製)をL字アングルで組んだ1,000mm四方のフレームに網目状に取



写真-1 実験状況



写真-2 設置した制振装置

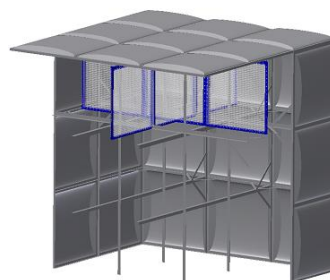


図-1 制振装置設置状況

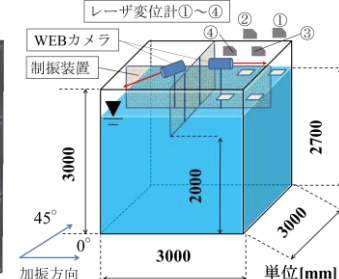


図-2 機器設置図

表-1 スロッシング n 次モード振動数理論値

水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
2,700	3,000	0.50	0.88

表-2 振動装置の設定条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	定常加振時間[s]
0.49, 0.87	±3	10

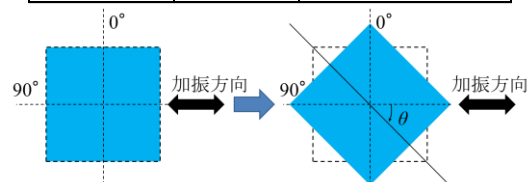


図-3 正方形容器の加振方向角の設定方法

表-3 制振装置の開口率

	線径	ピッチ	開口率
制振1	12.2mm	20mm	15.4%
制振2	12.2mm	40mm	46.8%

り付けて制振装置とする。このフレームを図-1のように水槽上部1/3の場所に十字型に6つ設置する³⁾。また、チューブ同士の間隔は表-3に示す様に2パターンとし、樹脂チューブを20mmピッチで格子状に取り付けた場合を制振1、40mmピッチで取り付けた場合を制振2とする。各々の網目の開口率は、制振1は15.4%、制振2は46.8%である。

3. 実験概要

本研究は、写真-1に示す貯水槽として一般的に使用されている3,000×3,000×3,000mmのステンレス製パネル式タンクを用い、水深2,700mmまで水を入れ、愛知工業大学所有の振動装置に設置して加振実験を行う。

応答波高は、図-2に示すように天井に設置した変位計のレーザーを貯水槽内に浮かべた発泡スチロール板

に照射させて計測し、WEB カメラで内部映像を録画する。ところで、スロッシング発生時に応答波高が最大となるのは、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。具体的には、矩形水槽のスロッシング n 次モード振動数を式(1)の Housner の理論式¹⁾で表すことができるため、これを用いて条件の設定を行う。

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

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、実験で用いる貯水槽のスロッシング 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 である。この理論値付近において 0.1Hz 刻みで共振点を探し、入力振動数を決定する。

加振実験の設定条件を表-2 に示す。加振振動数は 1 次モードで 0.49Hz、2 次モードで 0.87Hz であり、加振振幅は $\pm 3\text{mm}$ 、定常加振時間は 10 秒とする。また、貯水槽を加振する方向角 θ を図-3 の様に定義して、 $\theta=0^\circ \sim 45^\circ$ の間で 15° 間隔で設定する。本研究では、加振方向角を変化させながら加振実験を行う⁴⁾。

4. 実験結果

変位計より取得したデータから最大波高と減衰定数を算出し、非制振の場合と制振対策後について比較を行う。波高は波が集中する容器隅角部が最も高くなり、その最大値を最大波高とする。

(1) 1 次モードの検討

1 次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を図-4 に示す。隅角部の最大波高は加振方向角が 45° に近づくにつれて増大する。これは、加振方向角の増大に伴い隅角部に波が集中するためである。制振装置設置後は、非制振と比較して加振方向角の有無に依存せず、制振 1 では 60% 程度、制振 2 では 30% 程度の低減率で波高が抑制されている。

1 次モードの各加振方向角における減衰定数を図-5 に示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほぼ一定の値となる。非制振時で約 0.005 であるが、制振 1 では 0.010~0.012 と非制振時の約 2 倍、制振 2 では 0.007~0.008 と非制振時の約 1.6 倍に増加させることができる。

(2) 2 次モードの検討

2 次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を図-6 に示す。隅角部の最大波高は、加振方向角の違いによる影響はわずかであった。対策後は、いずれの加振方向角に対しても効果があり、制振 1 では非制振時の 60~80%、制振 2 では 40~60% 程度の低減率で波高が抑制されている。

2 次モードの各加振方向角における減衰定数を図-7 に示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほとんど一定の値となる。非制振時では減衰定数が 0.001~0.002 程度であるが、制振 1 では 0.007~0.008、制振 2 では 0.005~0.006 程度に減衰定数を増加させることができる。

5. おわりに

本研究で貯水槽実機を使用した実験を行い、制振装置を実機タンクに十字型でかつ天井部から 1/3 の所までに配置してスロッシング制振対策の検討を行った。この結果、どの実験状態においても非制振時と比較して最大波高の低減ならびに減衰定数の増加を得ること

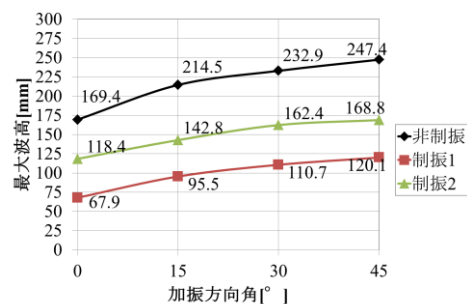


図-4 1 次モードの各加振方向角における最大波高

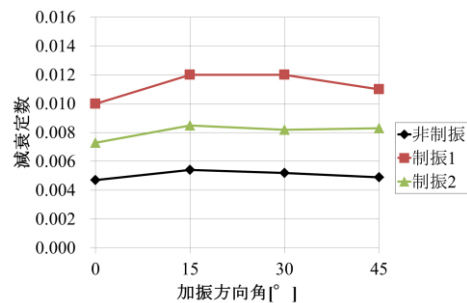


図-5 1 次モードの各加振方向角における減衰定数

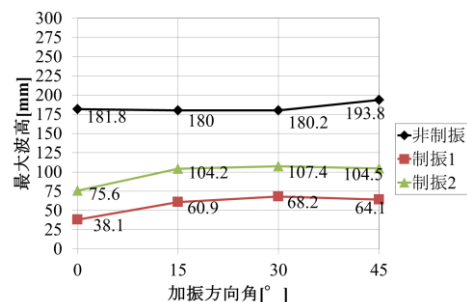


図-6 2 次モードの各加振方向角における最大波高

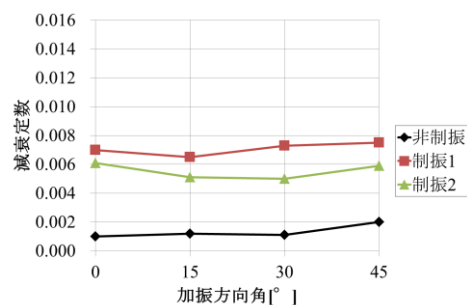


図-7 2 次モードの各加振方向角における減衰定数

ができた。さらにスロッシングの制振制振装置を設置することでどの加振方向においても 1 次、2 次モードともに最大波高を低減させることができることを定量的に確認した。今後は経済性を考慮した設計の最適化、貯水槽への施工性を検討し実用化を目指す。

参考文献

- 1) 池田, 井田, 平野, 佐藤: 矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討, 応用力学論文集, Vol. 11, pp549~ 556, 2008. 8.
- 2) 則竹, 鈴木, 奥野, 奥村: 矩形貯層のスロッシング現象抑制方法に関する実験的研究, 土木学会中部支部研究発表会, I-6, 2012. 3.
- 3) 井田, 勝井, 平野, 連: 受水槽のスロッシング被害を想定した制振装置検討のための基礎的実験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I-437, 2012. 9.
- 4) 遠田, 井田, 平野, 佐藤: 加振方向角を変化させた正方形断面容器のスロッシング挙動, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012. 9.