

## 受水槽実機のスロッシング制振対策に関する一考察

○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 日に発生した東日本大震災(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 製の正方形受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。一例として病院の受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。この種の正方形受水槽の被害は、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、受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、著者ら<sup>1)</sup>の研究 Gr.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。また鈴木ら<sup>2)</sup>の研究 Gr.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<sup>3),4)</sup>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、本報では受水槽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。写真-1 に実験状況を示す。制振装置は、写真-1 に示す様に、樹脂チューブを縦横に網のように組んだものである。制振装置の開口率は、網目が細かいものと粗いもの、2 パターンについて検討した。

### 2. 実験概要

本研究は、図-1 に示す受水槽として一般的に使用されている 3m×3m×3m のステンレスタンク実機を用い、水深 2.7m 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、天井に設置した変位計のレーザーを受水槽内に浮かべたスチロール板に照射させて計測する。ところで、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<sup>2)</sup>で算出することが出来る。

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

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、実験で用いる受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：0.51Hz、2 次モード：0.87Hz であり、加振振幅は±3mm、設定加振時間は 10 秒とする。また、受水



写真-1 実験状況

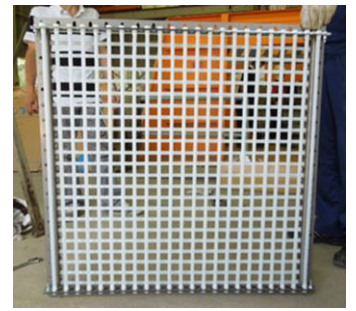


写真-2 設置した制振装置

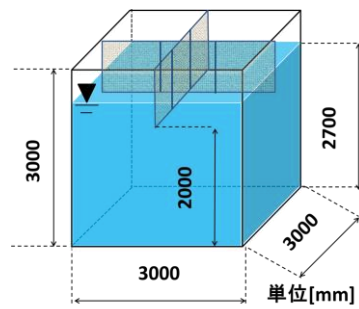


図-1 制振装置設置位置[単位 mm] 写真-3 制振装置設置状況



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] |
|---------|-----------|------------|------------|
| 2700    | 3000      | 0.50       | 0.88       |

表-2 振動装置の設定条件

| 振動数 [Hz]   | 振幅 [mm] | 設定加振時間 [s] |
|------------|---------|------------|
| 0.51, 0.87 | ±3      | 10         |

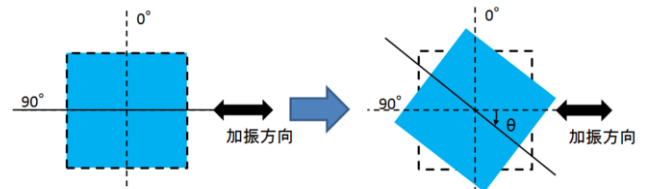


図-2 正方形容器の加振方向角の設定方法

表-3 制振装置の開口率

|     | 制振1   | 制振2   |
|-----|-------|-------|
| 開口率 | 15.4% | 46.8% |

槽を加振する方向角  $\theta$  を図-2 の様に定義して、 $\theta=0^\circ \sim 45^\circ$  の間で  $15^\circ$  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い、最大波高を計測してスロッシング挙動の違いを調べることにする。

### 3. 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、これらは新設の受水槽には設置し易いが、既存の受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、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。

本研究で用いたチューブは、伸縮性を有する耐塩素性の樹脂製であり、広く一般に入手可能なものである。これを L 字アングルで組んだ 1m 四方のフレームに網目状に取り付ける。このフレームを水槽上部に 6 つ設置する。また、チューブ同士の間隔は 2 パターンとし、各々について検証する。各々の網目の開口率は、表-3 に示す様に 15.4%、46.8%となり、それぞれ制振 1、制振 2 と定義する。写真-3 に制振装置を設置した状態を示す。

4. 実験結果

波高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。減衰定数は設定加振終了後に波が自由減衰振動となつてからのデータを使用して算出する。

(1) 1 次モードの検討

図-4 に 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とが確認できる。これは、加振軸上に近づくほど隅角部に波が集中するからと考えられる。対策後は、加振方向角、測定位置に関わらず、制振 1 では非制振時の 40%、制振 2 では 70%程度におおよそ一定の割合で抑制されている。

図-5 に 1 次モードの各加振方向角における減衰定数を示す。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 0.5%程度であるが制振 1 では 1.1%、制振 2 では 0.8%程度に増加させることができる。

(2) 2 次モードの検討

図-6 に 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、加振方向角、測定位置に関わらず、制振 1 では非制振時の 20~40%、制振 2 では 40~60%程度におおよそ一定の割合で抑制されていることがわかる。

図-7 に 2 次モードの各加振方向角における減衰定数を示す。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 0.1~0.2%程度であるが制振 1 では 0.7~0.8%、制振 2 では 0.5~0.6%程度に増加させることができる。

5. おわりに

本研究で受水槽実機を使用した実験を行い、本研究で提案する制振装置の効果を検証した。本装置を使用することにより、以下の効果が確認できた。①最大波高は、非制振時と比較すると、制振 1 で 1 次モード 40%、2 次モード 20~40%程度、制振 2 で 1 次モード 70%、2

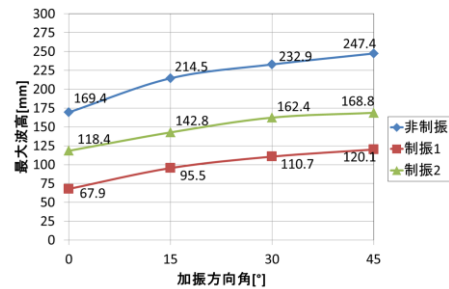


図-4 1 次モードの各加振方向角における最大波高

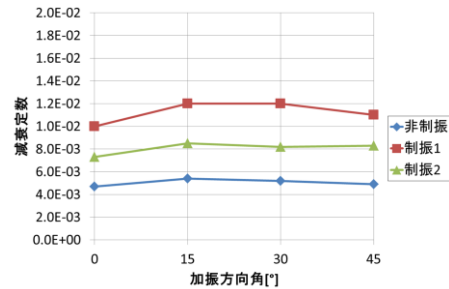


図-5 1 次モードの各加振方向角における減衰定数

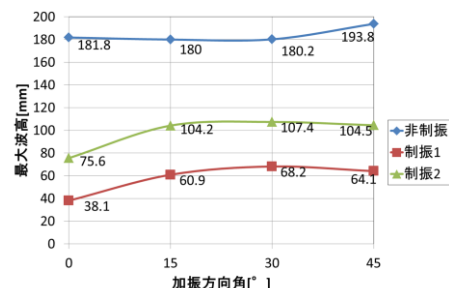


図-6 2 次モードの各加振方向角における最大波高

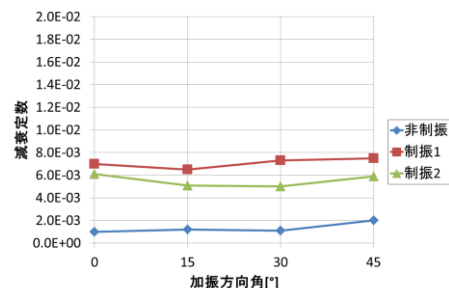


図-7 2 次モードの各加振方向角における減衰定数

次モード 40~60%程度まで抑制できる。②減衰定数は、非制振時で 0.1~0.2%程度であるが、制振 1 で 1 次モード 1.1%、2 次モード 0.7~0.8%程度、制振 2 で 1 次モード 0.8%、2 次モード 0.5~0.6%程度まで増加する。今後は経済性を考慮した設計の最適化、受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) 鈴木, 奥村: 加振方向角を変えた矩形貯層のスロッシング現象に関する基礎的実験, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-646, 2010. 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.