

正方形断面容器において加振方向角を変化させた時のスロッシング挙動

○中央大学 学生員 遠田 豊 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

やや長周期地震動と石油タンクなどの大型容器が共振することでスロッシング現象が発生し、内容液の溢流や容器の破損といった被害が起きる可能性が指摘されている¹⁾。

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、東北電力女川原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールにおいて溢流事故が発生した。また、宮城県内の上水道の配水池では、ステンレス製やPFRP製の矩形受水槽が破損する被害も報告されている。どちらもスロッシング現象が原因の一つと考えられている。以上のような被害が実際に発生しており、各種大型矩形容器におけるスロッシング現象の把握、さらにはスロッシング対策の必要性が指摘されている。

ここで、正方形断面容器の特徴は、矩形断面容器とは異なり断面の辺長比が等しく、各辺のスロッシング固有振動数の値が等しくなることである。このため、正方形断面容器の加振方向角を変えて加振させた場合、液面揺動がどのような変化をするか検討が必要となる²⁾。そこで本研究の目的は、正方形断面容器のスロッシング1次、2次モード固有振動数の理論値付近の入力振動数において、加振方向角を変化させて加振実験を行い、最大波高を計測しスロッシング挙動の違いを調べることである。

2. 実験概要

図-1に示す正方形断面容器(438mm×438mm×394mm)を本学所有の振動装置に設置して加振実験を行う。

応答波高の計測はデジタルビデオカメラ(以下.DVC)を用いた非接触計測で行い、撮影したデジタル画像を元に画像処理を行うことで水面の応答波高を算出する。容器の左端部から2cm内側を計測ポイントとする。容器から90cm離れたところにDVCを設置する。その状況を写真-1に示す。また、全体の水面形を把握できるように、容器から240cm離れたところにも別のDVCを設置する。さらに、入力振動数の確認と容器と振動台が同調しているか確認するために、振動台と容器側面にそれぞれ一軸加速度計を設置する。加速度計設置状況、ならびに起振方向を写真-2に示し、実験の全体の様子を写真-3に示す。

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³⁾で表すことが出来る。

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

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、実験で用いる正方形断面容器のスロッシング1次、2次モード振動数

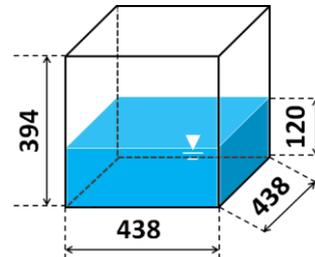


図-1 容器の寸法

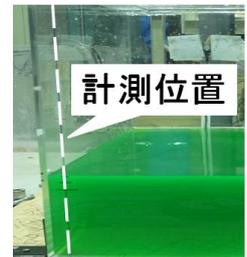


写真-1 波高計測位置

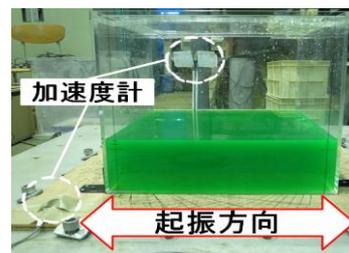


写真-2 加速度計設置状況

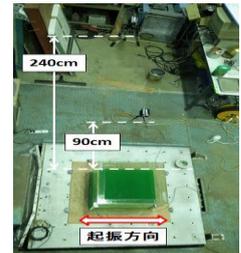


写真-3 実験状況

表-1 スロッシングn次モード振動数理論値

水深 [m]	容器の幅 [m]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
0.12	0.438	1.11	2.30

表-2 振動装置の設定条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	起振時間[s]
1.1、2.3	±3.0	5

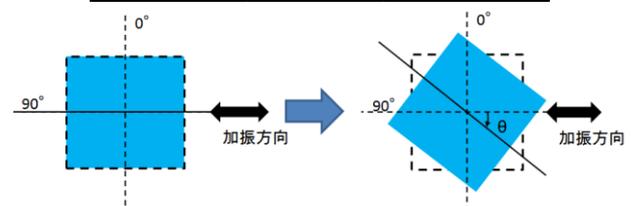


図-2 加振方向角の設定方法

の理論値は、表-1に示すようにそれぞれ1.11Hz、2.30Hzとである。

ところで、振動装置で設定できるパラメータは、振動数[Hz]、振幅[mm]、Wave count[回]の3つとなっている。加振実験の設定条件を表-2に示す。応答波高が大きくなるスロッシング1、2次モードの液面挙動に着目しているため、入力振動数は1.1Hz、2.3Hzで加振実験を行なう。どちらの入力振動数においても起振時間は5秒に統一し、振幅も片振幅3mmに統一する。また、正方形断面容器を加振する方向角 θ を図-2の様に定義して、 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ の間で15°間隔で設定する。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。

3. 実験結果

DVCで撮影した映像データをパソコンに取り込み、1コマ1/30秒のコマ送り機能を用いて、実寸法の比率で割り出して実単位での応答変位を算出する。この時使用した撮影データは、起振終了後に水が自由振動となつてからのデータを用いる。

キーワード : スロッシング、正方形断面容器、加振方向角、非接触

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

(1) 1次モードの検討

図-3 に 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の関係を示す。図-3 より、1 次モードでは、加振方向角を変化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 10.1cm となり、加振方向角が 0°の場合に比べて、最大波高が 60%程大きくなっている。加振方向角 45°以降は、最大波高が徐々に減少していき、加振方向角 90°の場合には最大波高が 6.8cm となり、加振方向角が 0°もしくは 5°の場合の最大波高と同等の値をとっている。

図-4 に加振方向角が 0°と 45°の場合の起振から 50 秒間の応答波形を示す。加振方向角が 45°の場合には、最大波高を観測した後に約 10 秒間に亘って応答波高がほとんど減衰していないことが分かる。この様に、加振方向角が変化することで、スロッシング挙動に影響を与える事がわかる。一方、減衰定数に関しては、加振方向角に依存せず 0.25~0.35%と比較的小さい一定の値となっている。

(2) 2次モードの検討

図-5 に 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の関係を示す。2 次モードでは、加振方向角が 30°~75°の場合に最大波高の値が 40%程度増加している。加振方向角が 65°の場合に最大波高が 8.8cm と最も大きい値となっている。

図-6 に加振方向角 0°と 65°場合の起振から 50 秒間の応答波形を示す。図-6 より、加振方向角が 0°と 65°の場合を比較すると、加振方向角が 65°の場合の方が起振中に応答波高が大きくなっている。また、起振開始から約 5 秒後と約 10 秒後の 2 回にわたって応答波高が卓越していることがわかる。また、写真-4 (a)に加振方向角が 0°の場合、(b)に加振方向角が 45°の場合の起振から約 5 秒後の静止面を示す。写真-4 より、加振方向角が変化することで、容器のそれぞれの辺に沿って挙動が起きていることが確認できる。以上のように、加振方向角が変化し液面形状、スロッシング挙動に影響を及ぼすことで、応答波高が増大することが考えられる。さらに、加振方向角が変化したことにより、回転する挙動が促されることも応答波高が増大した原因の一つと考えられる。これに対して、減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず 0.30~0.50%とほぼ一定の値をとることがわかる。

4. おわりに

正方形断面容器を用いて加振方向角を変化させながら加振実験を行うことにより、1, 2 次モードそれぞれのモード形状において、加振方向角が変化することにより応答波高が増大することが見られた。そこで 1, 2 次モードの応答波形に着目したところ、加振方向角が変化したことにより、応答波形に影響を与える事を確認した。また、2 次モードでは、加振方向角により液面形状が変化することがわかった。以上のようなことが原因で、加振方向角が変化することで応答波高が増大したと考えられる。ここで、式(1)よりスロッシング固有振動数は、容器の幅と水深に依存していることがわかる。加振方向角が変化することで、起振軸上の容器の幅は変化するが、スロッシング固有振動数は起振軸上の容器の幅に依存しないと考えられる。また、減衰定数に関

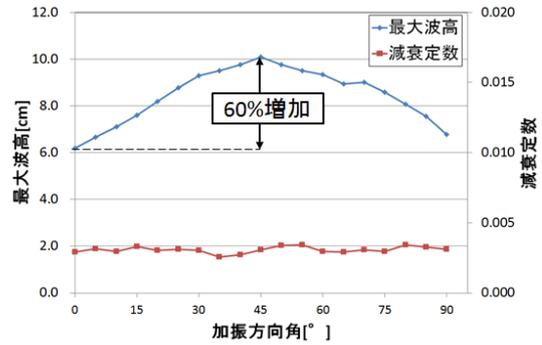
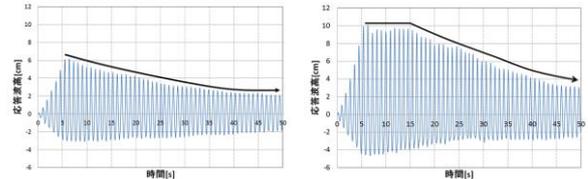


図-3 1 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a) 加振方向角 0° (b) 加振方向角 45°

図-4 1 次モードの起振から 50 秒間の応答波形

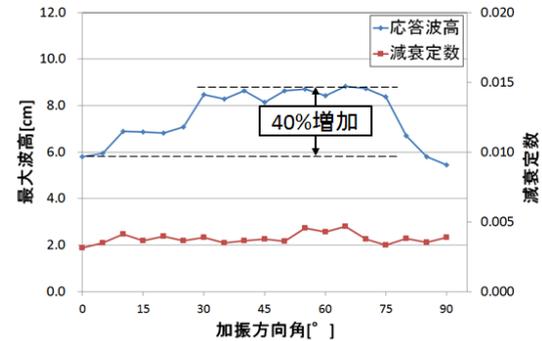
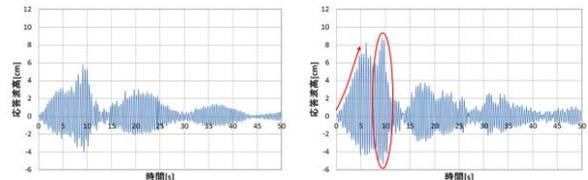


図-5 2 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a) 加振方向角 0° (b) 加振方向角 65°

図-6 2 次モードの起振から 50 秒間の応答波形



(a) 加振方向角 0° (b) 加振方向角 45°

写真-4 2 次モードの液面挙動

しては、モード形状と加振方向角に依存せず 0.25~0.50%と小さい値をとり、一度共振するとなかなか減衰しないことが確認された。

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) 鈴木森晶, 奥村哲夫: 加振方向角を変えた矩形貯槽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, 平成 22 年 9 月.
- 3) 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.