

矩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

2007 年新潟県中越沖地震(M6.8)において、東京電力柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料プールで溢流事故が発生し、甚大な被害が発生した。これは、やや長周期地震動によってスロッシング現象が引き起こされたことが原因と考えられている¹⁾。このため、矩形水槽におけるスロッシング現象の把握、さらにスロッシング対策を考える必要性が挙げられる。

そこで本研究では、手作りで自ら製作した振動台を用いて矩形水槽における加振実験により、スロッシング 1 次、2 次モードの液面挙動の把握を試みる。ところで、矩形断面容器には長辺方向と短辺方向の 2 つの固有振動数が存在する。このため、矩形断面容器の加振方向角を変えて加振させた場合、この 2 つの固有振動数により液面揺動がどのような変化をするかという検討が必要となる。そこで、加振方向角を変化させた場合の加振実験を行い、スロッシング挙動の違いを検討する。

2. 加振実験

(1) 実験概要

図-1 に示す矩形水槽(580mm×280mm)の長辺方向を加振方向として実験を行う。矩形水槽は、溢流した原発プールの起振方向の幅に対して約1/20の縮尺である。

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。そのため、90cm 離れたところに DVC を設置する。また、全体の水面形を把握できるように、水槽から 240cm 離れたところにも DVC を設置する。そして、入力振動数の確認と水槽と振動台が同調しているか確認するために、振動台と水槽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-1 に示し、実験の様子を写真-2 に示す。

波高が最も大きくなるのは、入力振動数とスロッシングの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。

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

ここで、 f はスロッシングの固有振動数、 g は重力加速度、 L は水槽の幅、 H は水深である。式(1)より、実験で用いる容器の加振方向、短辺方向におけるスロッシング 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 0.88Hz、1.97Hz と 1.56Hz、2.89Hz である。

振動装置の設定条件として振動数は 0.68Hz から 2.25Hz までを約 0.1Hz 刻みで計測を行なう。また、どの振動数においても、水深は 120mm、振幅は片振幅 3mm、起振時間は 10 秒と統一して加振実験を行う。

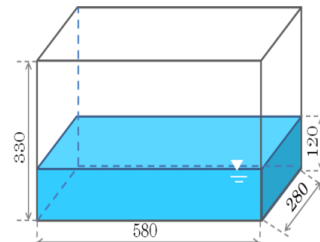


図-1 矩形水槽の寸法

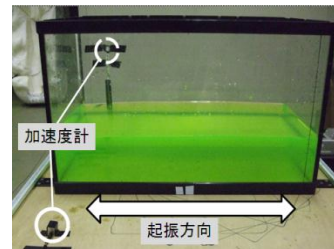


写真-1 加速度計設置状況



写真-2 実験の様子

表-1 スロッシング n 次モード振動数理論値

	水深 [m]	水槽の幅 [m]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
長辺方向	0.12	0.58	0.88	1.97
短辺方向	0.12	0.28	1.56	2.89

(2) 実験結果

図-2 に入力振動数と最大応答波高、減衰定数の関係を示す。応答波高は、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ることにより算出した。また、減衰定数は、液体が自由振動となつてからのデータを使用して、式(2)より Simplex 法を用いた非線形最適化により算出した。

$$\eta(t) = Ae^{-\omega_0 t} \cos(\omega_q t - \theta_0) \quad (2)$$

ここで、 ω_q は減衰角固有振動数、 A は振幅、 θ_0 は位相差、 ω_0 は固有角振動数である。

スロッシング 1 次モード振動数の理論値付近である 0.88Hz では、波高が 7.1cm と他の入力振動数と比較して大幅に増大している。また、スロッシング 2 次モード振動数の理論値付近である 1.95Hz においても、波高が 6.7cm と大幅に増大していることが確認できる。

以上より、応答波高は、1 次モード、2 次モードともに入力振動数がスロッシング n 次モード固有振動数の理論値に最も近づいた時に最も波高が大きくなったことが確認された。また、減衰定数に関しては、入力振動数、モード形状に関わらず約 0.3~0.6% という小さい値となったため、一度共振するとなかなか減衰しないことが確認された。

3. 加振方向角を変化させた加振実験

(1) 実験概要

実験には、図-1 に示す矩形水槽(580mm×280mm)を用

いる。矩形断面容器には、長辺と短辺で異なる2つの固有振動数が存在する。その固有振動数の理論値を表-1に示す。加振方向角を変化させていった場合に、これら2つの固有振動数が液面挙動に影響してくると思われる³⁾。そこで、水槽を加振する方向角 θ を図-3のように、 $\theta=0^\circ\sim90^\circ$ の間で15°間隔で設定する。加振方向角を変化させながら実験を行い、最大波高を観測しスロッシング挙動の違いを調べる。入力振動数は、加振実験の際に応答波高が著しく増大したスロッシング1次、2次モード振動数の理論値付近である、0.88Hz、1.95Hzの2つの場合で計測を行う。また、どちらの振動数においても、水深は120mm、振幅は片振3mm、起振時間は10秒と統一して加振実験を行う。計測には、加振実験と同様にDVCを用いた非接触計測を用いる。

(2) 実験結果

図-4に入力振動数が0.88Hzにおける加振方向角と最大応答波高、減衰定数の関係を示す。同様に、図-5に入力振動数が1.95Hzにおける加振方向角と最大応答波高、減衰定数の関係を示す。

1次モード理論値付近の0.88Hzの場合、加振方向角が増加するにつれてほぼ線形に応答波高が小さくなっているのが分かる。減衰定数については、加振方向角に依存せず0.3~0.4%と低い値になることが確認できる。

2次モード理論値付近の1.95Hzの場合、加振方向角が30°と45°の場合に応答波高が大きくなっている。加振方向角が45°の時は、入力振動数1.95Hzの正弦成分が1.38Hzとなる。この値は表-1に示すように短辺方向の1次モード固有振動数の理論値である1.56Hzと近い値になる。このために応答波高が大きくなったと考えられる。減衰定数については、加振方向角に依存せず0.2~0.6%と小さい値となり、なかなか減衰しないことが確認できる。

4. おわりに

加振実験においてスロッシングn次モードの理論値付近である入力振動数の時に、応答波高が大幅に増大することを確認した。また、減衰定数については、入力振動数に関わらず小さい値となった。

加振方向角を変化させた加振実験においては、入力振動数が0.88Hzの時は、加振方向角が増加するにつれて、応答波高がほぼ線形に小さくなったことが確認された。これは加振方向角が変化したために、固有振動数の理論値がずれたためと考えられる。しかし、入力振動数が1.95Hzの時は、加振方向角が30°、45°の時に応答波高が大きくなった。これは、矩形型容器には長辺方向と短辺方向で2つの異なる固有振動数が存在する。このため、角度を徐々に変えて加振していった場合、この2つの固有振動数が液面揺動に影響したことが原因と推測される。これに関しては、更なる検討が必要である。減衰定数については、入力振動数、加振方向角に関わらず小さい値となることが確認された。

今後は、加振方向角と矩形断面の辺長比に着目する。そのために、縦横比が等しく長辺と短辺の固有振動数の値が等しくなる正方形断面容器を用いて加振実験を行い、振動特性の把握を行う。

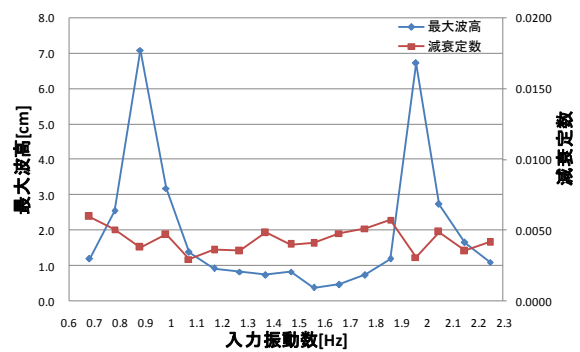


図-2 最大応答波高と減衰定数

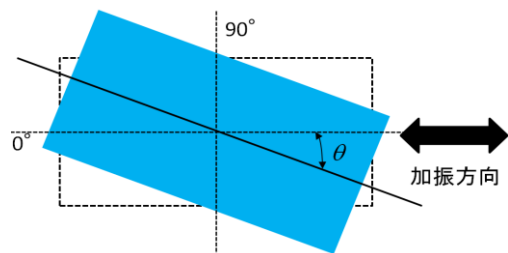


図-3 加振方向角 θ の設定方法

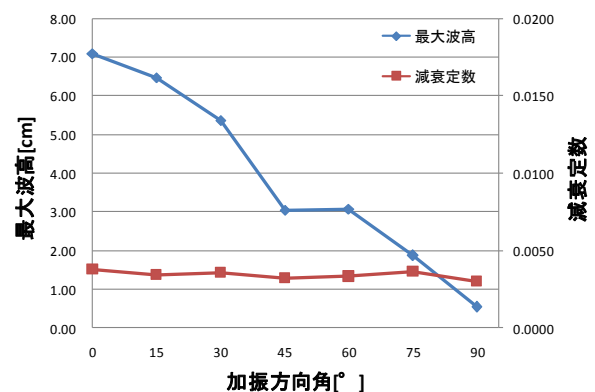


図-4 入力振動数0.88Hzにおける加振方向角と最大波高、減衰定数

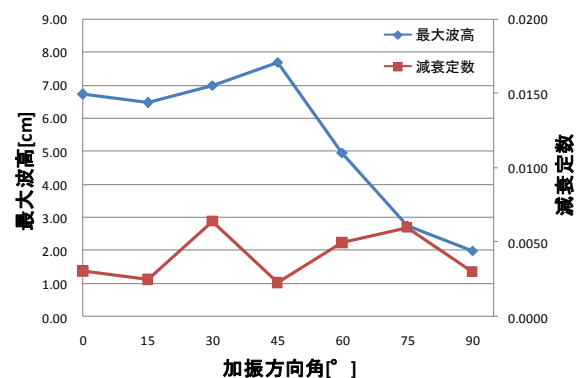


図-5 入力振動数1.95Hzにおける加振方向角と最大波高、減衰定数

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) 鈴木 森晶, 奥村 哲夫: 加振方向角を変えた矩形型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.