

加振方向角を変化させた矩形断面容器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年に新潟県中越沖地震(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において溢流事故が発生した。これは周期2～20秒の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⁾。その際、大型容器の内溶液が放射性物質や汚染物質であれば、溢流した場合には甚大な被害が生じる可能性が高い。そのため、円筒形である石油タンク、核燃料貯蔵プールなどの矩形水槽をはじめとして、各種大型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。

矩形断面容器の特徴は、長辺方向と短辺方向の2つの固有振動数が存在することである。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検討が必要となる。そこで本研究の目的は、矩形断面容器の長辺方向、短辺方向のスロッシング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

(1)実験の方法

加振実験は、図-1に示す断面の縦横比が1:2の矩形断面水槽(580mm×280mm×330mm)を用いる。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。それら実験の様子を写真-1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。そこで矩形水槽のスロッシングn次モード振動数 f を式(1)の理論式²⁾より求める。

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

ここで、 g は重力加速度、 L は水槽の加振方向の幅、 H は水深である。式(1)より、実験で用いる水槽の長辺方向、短辺方向におけるスロッシング1次、2次モード固有振動数の理論値は、表-1に示すように0.88Hz、1.97Hzと1.56Hz、2.89Hzである。そこで本研究では、手作りの振動台の都合から長辺方向における入力振動数は、0.88Hz、1.95Hzとし、短辺方向における加振実験の入力振動数は、1.56Hz、2.93Hzとする。

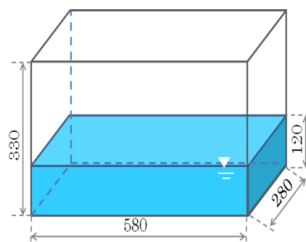


図-1 矩形水槽の寸法



写真-1 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

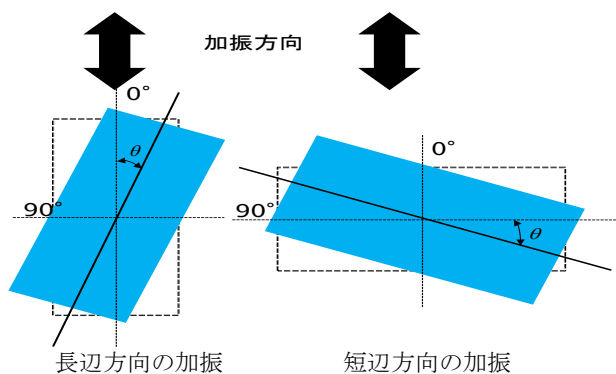


図-2 加振方向角θの設定方法

(2)加振条件

矩形断面水槽には、表-1に示すように長辺と短辺で異なる2つの固有振動数が存在する。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、本研究では、矩形断面水槽を加振する方向角 θ を図-2の様に定義して、 $\theta=0^\circ\sim90^\circ$ 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

(1)加振方向角と最大波高の関係

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する。矩形断面水槽において長辺方向と短辺方向では寸法が異なるため、最大波高 ΔH を貯槽の幅 L で無次元化することにより、加振方向角を変化させた場合の最大波高の違いに関して検討する。図-3に長辺方向における加振方向角と最大波高 ΔH を貯槽の幅 L で無次元化し、加振方向角が0°の時に1になるように正規化した $\Delta H/L$ 、減衰定数の関係を示す。同様に、図-4に短辺方向における加振方向角と正規化した $\Delta H/L$ 、減衰定数の関係を示す。これらの図より、長辺方向の2

キーワード：スロッシング、矩形断面、加振方向、非接触計測

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

fax.03-3817-1803

次モードで加振方向角が 45° の時に応答波高が増大していることが確認できる。また、短辺方向の 1 次モードで加振方向角が 15° の時に応答波高が増大していることが確認できる。これは表-1 に示すように、矩形断面水槽には長辺方向と短辺方向の 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。一方、長辺方向の 1 次モードと短辺方向の 2 次モードに関しては、加振方向角が変化することにより、応答波高が減少していることが確認できる。これは水槽の幅方向の液面揺動と加振の方向は同じ方向ではないため、加振方向角が変化することによって、応答波高が小さくなると考えられる。また、減衰定数に関しては、モード形状と加振方向角に依存せず $0.2 \sim 0.6\%$ と小さい値となり、一度共振するとなかなか減衰しないことが確認された。

写真-2 に起振開始から約 9 秒後の 2 つの液面挙動の状況を示す。加振方向角が 45° の挙動の方は、回転していることが確認できる。このよう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。

(2) パワースペクトルによる検討

最大波高と加振方向角の関係より、長辺方向の 2 次モードで応答波高が増大することが確認された。そこで長辺方向の 2 次モードの加振方向角が 0° と 45° のパワースペクトルに着目する。図-5 に長辺方向 2 次モードの加振方向角が 0° のパワースペクトルと加振方向角が 45° の場合のパワースペクトルを示す。加振方向角が 0° では、 1.89Hz が卓越していることが確認できる。これに対し、加振方向角が 45° では、 1.54Hz も卓越していることが確認され、複数の振動モードが混在することが示されている。このように加振方向角を変化させることにより、短辺 1 次モードと長辺 2 次モードの混在モードを示すことにより、液面挙動が碎波しやすくなることが応答波高の増大に繋がったと推測される。

3. おわりに

断面の縦横比が約 1:2 の矩形断面水槽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、長辺方向の 2 次モードと短辺方向の 1 次モードにおいて、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確認された。そこで長辺方向の 2 次モードにおけるパワースペクトルに着目したところ、短辺 1 次モードと長辺 2 次モードが混在していることが確認された。これは矩形断面水槽には、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。加振方向角が変化することにより、この 2 つの異なる固有振動数が液面挙動に影響を与えたと推測される。また、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たことも応答波高が増大した原因の一つと考えられる。また、減衰定数に関しては、モード形状と加振方向角に依存せず $0.2 \sim 0.6\%$ と小さい値をとることが確認された。

今後の展開としては、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加

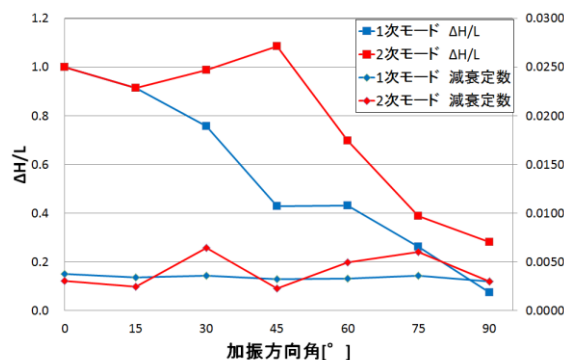


図-3 長辺方向における加振方向角と正規化した $\Delta H/L$ 、減衰定数

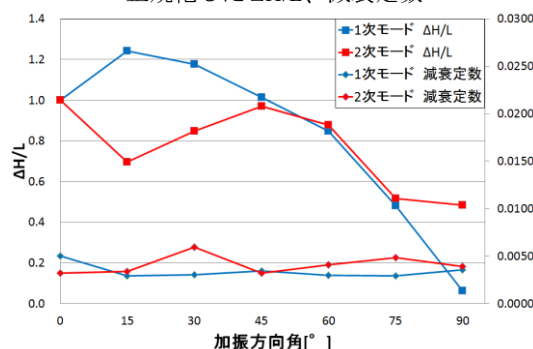
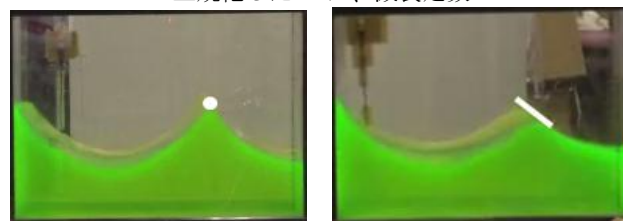
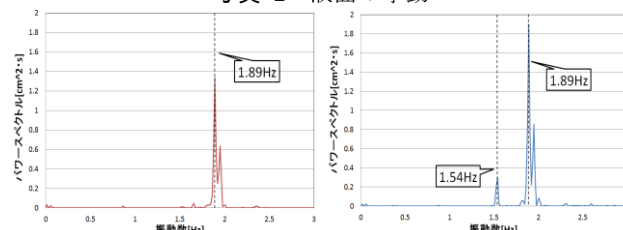


図-4 長辺方向における加振方向角と正規化した $\Delta H/L$ 、減衰定数



加振方向角 0° 加振方向角 45°

写真-2 液面の挙動



(a) 加振方向角 0° (b) 加振方向角 45°

図-5 長辺方向 2 次モードパワースペクトル

振実験に用いる。そして、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検討する。

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) 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.