

矩形断面容器における自由表面でのスロッシング現象把握と対策案の検討

○中央大学 学生員 池田達哉 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

やや長周期地震動の影響で容器にスロッシング現象(液面揺動の励起)が発生し、貯蔵液体が溢流する場合がある¹⁾。スロッシングが原因の一つとして考えられる最近の事例は、2007年7月に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)であり、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が確認された。このことから、矩形水槽におけるスロッシング現象の把握、それに対する対策を考える必要性が挙げられる。

そこで本研究では、基礎的な実験として小型矩形断面容器を小型振動台に設置し、自由表面で加振実験を行なう。さらに自由表面を有するスロッシング減衰対策の一対策案として、水槽内部に金網を設置²⁾することを提案する。また、液体挙動把握の一つの方法としてデジタルビデオカメラ(以下、DVC とする)を用いた非接触計測を採用し、容器内の水の応答波高、減衰定数などの振動特性把握を行なうものである。

2. 実験概要

図-1 に示す内側部 580×280mm の矩形水槽を小型振動台に設置して加振実験を行なう。実験全体の状況を写真-1 に示す。矩形水槽は、起振方向の幅において溢流した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の約 1/20 の縮尺である。

DVC 設置位置は、水槽から 90cm 離れた所とする。これは、非接触計測からコマ送り機能を用いて応答波高を算出する際、ズーム機能を用いて水槽の一部が詳細に把握できるようにするためである。なお、水槽の内側端部が樹脂でコーティングされ、液面の挙動を把握しにくいいため、水槽の内側端部から 2cm 内側を計測ポイントとする。その状況を写真-2 に示す。その場所で液面挙動に対して応答波高等の振動特性を算出する。また、全体の水面形を把握できるように、水槽から 240cm 離れた所にも DVC を設置する。ビデオ撮影は、起振開始から液面挙動が停止するまで行なうものとする。

一般に最も波高が大きくなるのは、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³⁾より算出する。

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

ここで、 f はスロッシングの振動数、 L は水槽内壁間の幅、 H は水深である。実験で用いた容器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、それぞれが 1.06Hz、2.01Hz である。振動装置の設定条件を表-2 に示し、振動数は 0.8Hz から 2.2Hz までを 0.1Hz 刻みで行なう。振幅は片振幅 3mm に統一し、振動装置で設定できる Wave count は振動数に応じて変化させ、どの振動数においても起振時間は

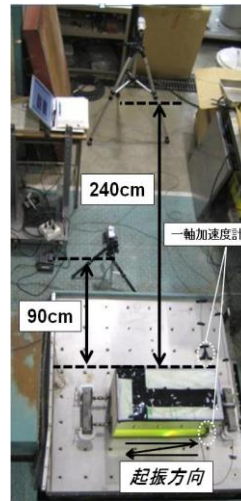


写真-1 実験状況

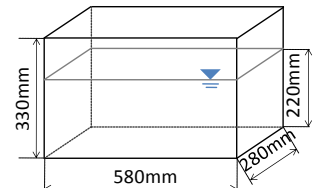


図-1 矩形水槽の寸法

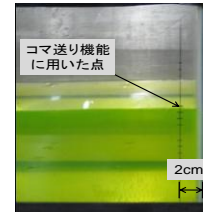


写真-2 応答波高算出ポイント

表-1 スロッシング n 次モード振動数理論値

水深 [m]	起振方向の幅 [m]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
0.22	0.58	1.06	2.01

表-2 振動装置の設定条件

振動数 [Hz]	振幅 [mm]	振動時間 [s]
0.8~2.2	3.0	10

表-3 使用した金網の緒元

亜鉛引織網	
線径 [mm]	0.63
目合 [mm]	3.0
開口率 [%]	68.3
幅 [mm]	280
高さ [mm]	330

10 秒間に統一する。

実験は対策有無による 2 ケースを行なうものとし、それぞれのケースにおいて小型振動台を用いた加振実験により、液体の挙動と振動特性を把握する。なお、本報では比較項目として、減衰率、波高に着目し行なう。対策案としては金網を設置することであり、液体が金網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を期待している。これにより、減衰が付加され、流速を抑え波高を低減できるとし、本報では亜鉛引織網を水槽内部起振方向に対して垂直に設置する。設置場所は、水槽中心部に金網を設置しての加振実験を行なう。表-3 に本実験に用いた金網の緒元を示す。なお、金網の開口率は 69.6% である。

3. 実験結果

(1) 実験映像の比較

DVC で撮影した映像データをコンピュータに取り込み、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波高を算出する。解析に使用した撮影データは、起振開始から液面挙動停

止までのデータを用いている。

また、写真-3に入力振動数 1.0Hz における起振開始から 9 秒後の対策有無による水槽端部での静止画を示す。対策無における水槽端部の波高は溢流する限界の高さとなっているが、金網を設置したことによって端部での波高は大きく低減されていることが確認できる。

(2) 最大応答波高の比較

図-2 に最大波高と入力振動数との関係を示す。起振中において最も波高が大きい 1 次モードの共振域である 1.0Hz では対策無の場合、片振幅 3mm で 10 秒間の起振で 7.2cm の最大波高を示す。また、算出した最大波高は水槽端部から 2cm 内側での値であるので、水槽端部ではこの値よりも若干大きな値とる。なお、この端部での波高は、溢流する限界の高さとなっていることが先に示した写真-3 から確認できる。これに対して金網を設置することにより、最大波高が 4.6cm と大きく低減されている。この時の低減率は 38% である。次に 2 次モード共振付近である 2.0Hz では、若干ではあるが最大波高は 3.9cm から 3.2cm と低減されている。

(3) 減衰定数の比較

図-3 に非接触計測より算出した応答波高のデータを用いて、式(2)よりシンプレックス法を用いた非線形最適化により、対策有無における減衰定数を算出した結果を示す。

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

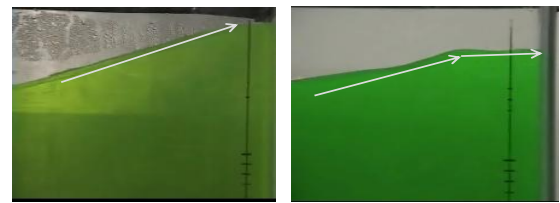
ここで、 ω_q は減衰各固有振動数、 A は振幅、 θ_0 は位相差、 ω_0 は固有角振動数である。なお、2 次モード付近の減衰定数を算出する際には、バンドパスフィルタをかけて時系列データの波形から減衰定数を算出する。

対策無における減衰定数は振動装置の入力振動数、波高や振動モード形状に依存せず、0.2~0.4% となっている。この値は、従来から論じられている自由表面でのスロッシングの減衰定数として妥当な値である。減衰定数が 0.2~0.4% との値は小さな値であるので、液体は一度揺動してしまえば自由振動となってから液面揺動の停止まで相当な時間を必要とする。

一方、対策有において 1 次モード付近である入力振動数 1.0Hz の場合、減衰定数は 0.94% と対策無の 0.30% の 3 倍程度に増加している。しかし、共振域以外での減衰定数は 1~2 倍程度増加しているだけである。次に 2 次モード付近である入力振動数 2.0Hz の場合は、0.95% であり対策無の 0.33% と比較して 3 倍程度の増加が得られている。これらから、金網を設置することによって、自由振動へ移行してからの減衰は増加していることが確認できる。これは、共振時付近で金網を水が多く通過することで、水の抵抗力が付加され、減衰定数が増加されたと考えられる。これより、揺動が大きいほどその流体運動を利用し、減衰も増加していることである。

4. おわりに

DVC を用いた非接触計測より、矩形断面容器におけるスロッシング発生時の液体の応答波高、減衰定数など振動特性を把握することができた。対策無の場合では、共振時においては 10 秒間程度の微小振幅加振で、溢流する限界の最大波高が確認された。また、入力振



対策無 対策有
写真-3 水槽端部での応答波高
(入力振動数 1.0Hz における静止画)

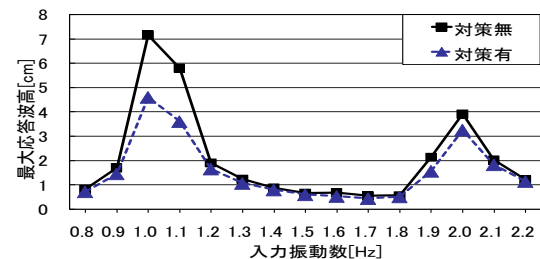


図-2 最大応答波高の比較

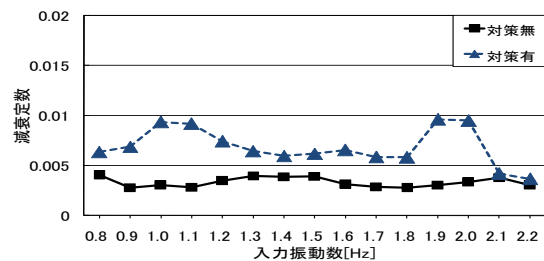


図-3 減衰定数の比較

動数における最大波高、振動モード形状に依存せずに、減衰定数は 0.2~0.4% と一定の値を取り、一度揺動し始めると容易には減衰しないことが確認できた。

本研究で提案した対策方法は、起振中の波高を抑制、かつ減衰が増加することを目的として、金網を水槽中心部に設置し、対策の有無で加振実験を行なった。この結果、最大波高はスロッシング 1 次モードにおいては最大 4 割程度の低減が確認できた。さらに減衰定数はスロッシング 1 次、2 次モードにおいて 3 倍程度の増加が見られた。特に、流体運動が大きくなる共振時に顕著である。金網を水槽中心部に設置することで、起振中の波高を抑制することができ、かつ減衰も高くなったことが確認できた。

さらに、小型矩形水槽で実験を行ってきたが、水槽の角の影響を多く受けるなど、制約もあった。このため新たにスケールを大きくして、極力制約を無くした状態での実験を試みる必要がある。

以上の今後の課題を踏まえて、矩形断面容器に対して金網の設置方法、設置場所、金網目の選択方法等の詳細な基準が必要となってくるため、定性的・定量的に評価、検討していきたいと考える。

参考文献

- 1) 酒井理哉 他: 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) 野路利幸 他: 水のスロッシングを利用した制振装置の研究 (その 1) 装置の流体力特性と制振効果の特性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.411, 1990.5.
- 3) 葉山真治 他: 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.