

# 矩形断面容器のスロッシング減衰対策に関する一考察

○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

やや長周期地震動により、大型矩形断面容器でスロッシング現象が発生し、内容液の溢流や水槽天井板が破損する可能性が指摘されている。その際に内容液が放射性物質や汚染物質であれば、甚大な被害が生じることになる。事例として、2007年7月に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)では、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ている。その中の1基のプールは、水面と床の高さが40cmあったが、この高さを越える勢いでプールの水が放射線管理区域外へ溢流したと報告されている。この原因の一つとして、地震動によりスロッシング現象が生じたのではないかと推定されている。そのため矩形断面容器におけるスロッシング現象の把握ならびに、その対策を検討する必要性が希求されている。

これを受けて著者らは、矩形断面容器における一つのスロッシング対策案として、容器内に金網を設置する方法<sup>1,2)</sup>を縮尺モデルで提案してきた。本報は、縮尺の影響を把握するために、今までの研究<sup>2)</sup>の縮尺を約2倍とした水槽での加振実験を行い、縮尺による振動特性の影響が無いことを確認し、さらに本報で提案する対策案の有効性に関して検討を行うものである。

## 2. 実験概要

内側部 1100×1000、厚み 10mm の PVC 製矩形水槽を振動台に設置して加振実験を行なう。写真-1 に実験全体の状況を示す。水槽は溢流した使用済み核燃料プールの約 1/10 の縮尺である。非接触計測からコマ送り機能を用いて水槽端部における応答波高を算出するために、デジタルビデオカメラ(以下.DVC)を設置する。設置位置は水槽から 120cm 離れた所とする。また、全体の水面形を把握するために、水槽から 230cm、側壁から 160cm 離れた所にも DVC を設置する。

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する場合である。一般に、矩形水槽のスロッシング n 次モード振動数 f は水深 H と水槽の内側部における幅 L の関係から算出することができ、式(1)の理論式<sup>3)</sup>で表すことができる。

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

式(1)より、実験で用いた容器のスロッシング 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 0.76Hz、1.52Hz である。理論値より、表-2 に振動装置の起振条件を示す。1 次モード振動数は 0.74~0.78Hz、2 次モードは 1.50Hz~1.54Hz までを 0.01Hz 刻みで計測を行なう。振幅は片振幅 3.0mm、波の繰り返し回数は 20 回に統一して行うものとする。

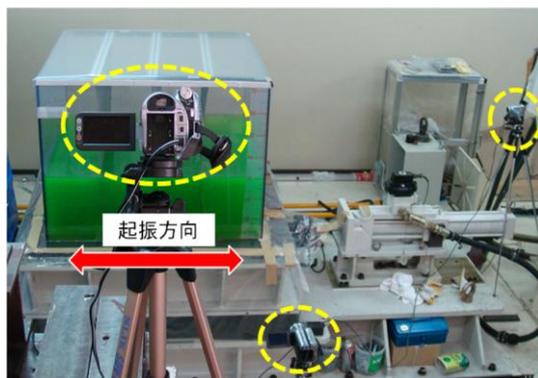


写真-1 実験状況

表-1 スロッシング n 次モード振動数理論値

水深(m)	起振方向の幅(m)	1次モード(Hz)	2次モード(Hz)
0.3	1.1	0.76	1.52

表-2 振動装置の設定条件

振動数(Hz)	0.74~0.78、1.50~1.54(0.01Hz刻み)
振幅(mm)	±3.0
繰り返し回数(回)	20

表-3 使用した金網の諸元

	type1	type2	type3
線径(mm)	2.0	1.6	1.4
目合い(mm)	4.4	4.8	5.0
開口率(%)	46.9	56.0	60.8

ここで、本研究におけるスロッシング対策案は、水槽内に金網を設置することである。ここで提案する方法は、簡単な構造を有しており機械制御もなく、かつ設置方法も天井クレーン等を用いて枠組みした網を設置するだけの簡単な施工が可能となることが特徴として挙げられる。また、表-3 に示すように 46.9%、56.0%、60.8%と開口率の異なる 3 種類の亜鉛引織金網を L 角度で固定し、起振方向に対して垂直に設置する。金網の設置位置、枚数は水槽を 4 等分する形で 3 枚設置して、各々表-2 に示す設定条件で行う。また、実験のインターバルは設定振動数ごとに静止した状態から始めるとする。

## 3. 実験結果

振動台での加振実験を 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、実単位での応答波高を算出した。

### (1) 最大応答波高の比較

図-1 に各入力振動数における最大応答波高を示す。対策無ではスロッシング 1 次モード共振域である 0.76Hz において、最大応答波高は 28.1cm である。これに対して開口率の大きい順に 4.4cm、4.0cm、3.6cm となり、開口率 46.9% において波高低減率は 87% である。また、2 次モード共振域である 1.52Hz では、13.7cm から

4.8cm(開口率 46.9%時)となり、波高低減率は 65%である。また、座間らの研究<sup>4)</sup>によれば、スロッシング発生時の溢流現象は 23%程度の波高減少でも大きな効果が期待されている。そのため、1 次モードだけでなく、2 次モードに対しても実用上十分な波高低減効果があると判断できる。

## (2) 減衰定数の比較

図-2 に非接触計測から算出した応答波高データを採用して算出した各入力振動数における減衰定数を示す。横軸は最大応答波高を示した入力振動数  $f_0$  で各入力振動数を除して無次元化している。減衰定数の算出方法は応答波高に固有振動数の $\pm 20\%$ でバンドパスをかけて算出した減衰波形を用いて、式(2)からシムプレックス法による非線形最適化により算出した。

$$\eta(t) = Ae^{-\sigma_0 t} \cos(\omega_q t - \theta_0) \dots (2)$$

ただし、 $\omega_q$ は減衰各固有振動数、 $h$ は減衰定数、 $A$ は振幅、 $\theta_0$ は位相差、 $\omega_0$ は固有角振動数である。図-2において、使用済み核燃料プールの1/20縮尺時でかつ振幅3mmの減衰定数を比較のために示す。ここで金網の開口率は、type1、type3と同様の46.9%、60.8%を用いている<sup>2)</sup>。

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、0.1~0.4%と一定の値を示している。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り、一度揺動すると液面挙動停止まで相当な時間を要することとなる。一方、金網設置時においては、1 次モード共振域である入力振動数 0.76Hz の場合、開口率46.9%のとき減衰定数は2.86%であり、対策無の0.26%と比較すると約 10 倍程度増加している。

次に、2 次モード共振域である入力振動数 1.52Hz の場合は、開口率 46.9%では減衰定数が 1.75%であり、対策無の 0.4%と比較すると 4 倍以上の減衰が得られている。これより金網を設置することで、自由振動へ移行してからの減衰はどの領域においても増加しており、かつ開口率が低いほど減衰定数が増加している。

ここで、図-2に示す1/20と1/10のスケールで減衰定数を比較すると、減衰定数と縮尺の依存性はきわめて小さいと考えられる。これより減衰定数に大きく寄与するのは、開口率であることが判る。さらに実構造物を考えるとこの減衰定数は妥当な値であると考えられる。

## 4. おわりに

本報で提案したスロッシング現象の減衰対策方法は、起振中から波高を抑制し、かつ減衰定数が増加することを目的としている。一方本研究の提案は、水槽内に金網を3枚設置したことである。振動台での加振実験結果より最大波高は、スロッシング 1 次モード共振域において開口率46.9%で最大87%程度の低減が確認できた。ここでの減衰定数では、従来の方法と比較して約 10 倍程度の増加が見られている。この現象は、共振時には流体運動が大きくなり、金網を通過するときの抵抗も大きいため、顕著な効果が確認できる。さらに開口率が小さいほど低減効果も大きく、減衰定数も増加したことが結果から推定することができる。

これに対して本報では、柏崎原子力発電所内の使用済み核燃料プールの 1/10 スケールの矩形水槽を採用し、

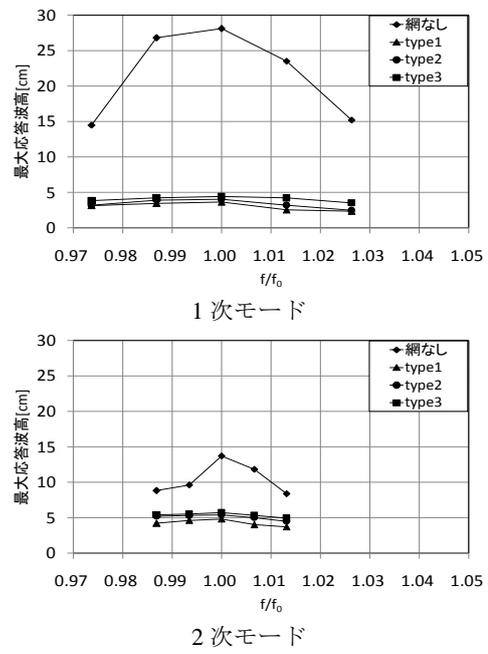


図-1 最大応答波高の比較

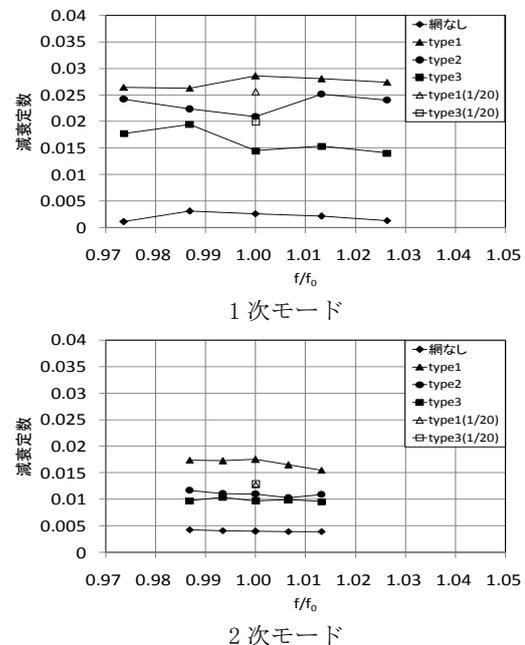


図-2 減衰定数の比較

実構造物に適用するため、金網が受ける流体力を計測して適用可能か検討する必要がある。また、コストパフォーマンスを考慮した場合、金網を水面から底面まで挿入するのではなく、金網のサイズについても検討する必要があり、定量的な評価、検討を試みる必要がある。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 池田達哉 他: 矩形断面容器におけるスロッシング対策に関する提案, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.537-538, 2009.9.
- 3) 葉山眞治 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.
- 4) 座間信作 他: 石油タンクのスロッシングによる内容液の溢流の算定, 消防研究所報告, 第 101 号, pp.14-20, 2006.9.