

矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討

○中央大学 学生員 池田 達哉 中央大学 正会員 平野 廣和
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

石油タンクや汚水処理施設、核燃料貯蔵施設をはじめとする大型容器は、地震動によって容器にスロッシング現象(液面揺動の励起)が発生して内容液が溢流する¹⁾恐れがある。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。²⁾

最近の事例としては、2007年7月に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)における地震動の影響により、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ている。その中の1基のプールで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。原因の一つとして、スロッシング現象を引き起こしたため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、それに対する対策を検討する必要性が希求されている。

これを受けて本研究では、基礎的実験として小型矩形断面容器を振動台に設置して加振実験を行なう。さらに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行う。そして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い、スロッシング減衰対策に関して検討を行うものである。

2. 実験概要

図-1 に示す内側部 580×280 の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。水槽は起振方向の幅において溢流した原発プールの約 1/20 の縮尺である矩形水槽を採用する。DVC 設置位置は、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ために、水槽から 90cm 離れた所とする。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くなっている。そのため、水槽の内側端部から 2cm 内側を計測ポイントとして、その場所における液面の振動特性を算出する。また、全体の水面形を把握するために、水槽から 240cm 離れた所にも DVC を設置する。

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。式(1)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る。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 1.06Hz、2.01Hz である。また、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。表-2 に振動装置の設定条件を示す。振動数は 0.8Hz から 2.2Hz までも 0.1Hz 刻みで計測を行なう。振幅は片振幅 3mm に統一し、

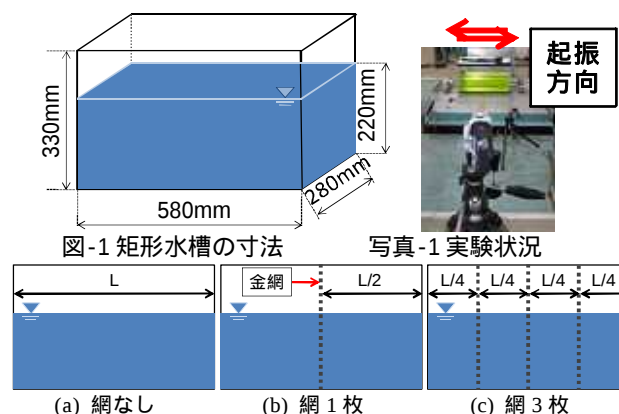


図-1 矩形水槽の寸法

写真-1 実験状況

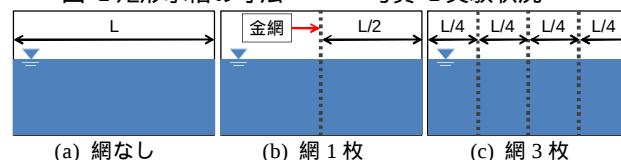


図-2 金網の設置位置

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

L[m]: 水槽内側部の幅

H[m]: 水深

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]	起振時間 [s]
0.8 ~ 2.2	± 3.0	10.0

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

Wave count は振動数に応じて変化させて、どの振動数においても起振時間を 10 秒間に統一する。

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。既存の研究において、自由表面を有する矩形断面では抵抗板を利用する方法が代表的な方法である。この方法は新設の構造物には設置しやすいが、既設の構造物に設置する場合はプールの水を抜くなどの施工上検討しなくてはならない項目が残る。これに対して、本研究で提案する方法は簡単な構造を有しており、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。

液体が金網を通過するときに抵抗力が生じて、水の粘性が見か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、流速を抑制し、波高を低減できるものである。

そこで本報では表-3 に示す亜鉛引織金網を起振方向に対して垂直に設置する。図-2 に網の設置位置を示す。(a)は対策無で、(b)は水槽を 2 等分する形で金網を 1 枚設置している。(c)は 4 等分する形で 3 枚設置して、各々

キーワード : スロッシング、非接触計測、矩形断面、振動応答

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

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

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波高を算出した。この時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。

(1) 最大応答波高の比較

図-3 に最大応答波高と入力振動数の関係を示す。各振動数によって加振力が異なるため、縦軸は、最大波高(H)を各入力振動数における加振力(F)で除した値をとっている。

対策無の場合、スロッシング 1 次モードの共振域である入力振動数 1.0Hz の時では、片振幅 3mm、10 秒間の加振で 0.12cm/N であり、最大応答波高は 7.2cm であった。7.2cm は本研究で使用している水槽では溢流する限界の高さとなっている。これに対して、金網 1 枚を水槽中心部に設置することで最大波高は 0.078cm/N となり、36%の波高低減となった。さらに網を 3 枚設置したときは 0.061cm/N で、対策無と比較すると、50%の波高低減が見られた。この値は、座間らの研究⁵⁾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、網 1 枚時の 36%、3 枚時の 50%は実用上十分効果があると判断できる。次に 2 次モード共振付近である 2.0Hz では、最大波高は 0.016cm/N から網 1 枚時は 0.014cm/N、3 枚時は 0.011cm/N であり、波高低減率はそれぞれ 17%、35%であった。この値から 2 次モードにおいて 3 枚設置時に効果が期待できる。

(2) 減衰定数

図-4に非接触計測から算出した応答波高データを採用して、シンプレックス法を用いた非線形最適化により、各ケースにおける減衰定数を算出した結果と振動数の関係を示す。なお、2次モード付近の減衰定数を算出する際に、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した。

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、0.3～0.4%と一定した値をとっている。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。

一方、対策有では網 1 枚設置時において、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%と比較すると 3 倍程度増加している。さらに 3 枚設置時は 1.7%となり、6 倍近い値となった。しかし、共振域以外での減衰定数は網の設置枚数が 1 枚、3 枚ともに 1～3 倍程度増加であった。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。3 枚時では 1.3%と 4 倍程度の増加であった。これらから、金網を設置することにより、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。特に共振付近では水が多く金網を通過するため、水の抵抗力がさらに付加され、減衰定数が増加されたと考えられる。つまり、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が考えられる。

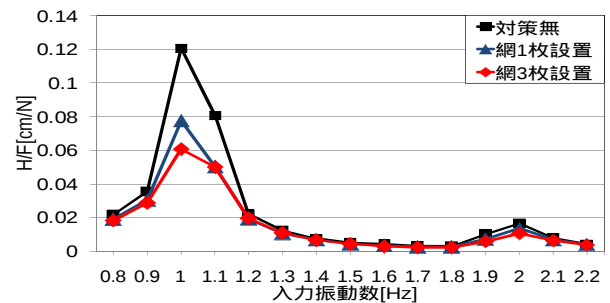


図-3 最大応答波高の比較

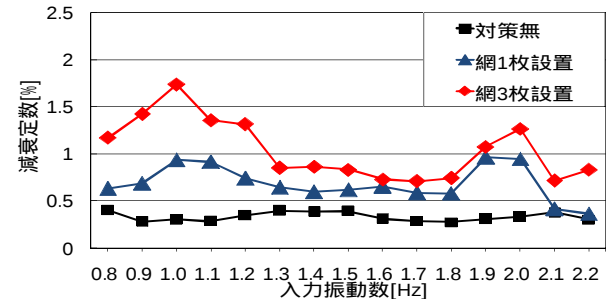


図-4 減衰定数の比較

4. おわりに

対策無の場合の減衰定数は、入力振動数における最大波高、振動モード形状に依存せず、0.3～0.4%と一定の値をとり、一度揺動し始めると容易には減衰しないことが減衰定数からも確認できた。

本研究で提案した対策方法は、起振中の波高を抑制、かつ減衰率が増加することを目的として、金網を水槽中心部に 1 枚設置するケースと 4 等分する形で 3 枚設置した 2 ケースにおいて対策の有無による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、網 3 枚時で最大 50%程度の低減が確認できた。さらに減衰定数は全体的に増加し、特に共振域においては網 1 枚設置で最大 3 倍程度、網 3 枚設置で最大 6 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ことがわかった。これが非線形性を有する問題点でもある。

今後の展開として、基礎的な実験として小型矩形水槽を用いたが、水槽の角の影響を多く受けるなど制約があるため、スケールを大きくした実験を行う必要がある。その際に、金網が流体から受ける力を計測して実寸法に適用できるか検討する。また、矩形断面容器に対して開口率をはじめとする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、検討を試みる必要がある。

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) 小野祐輔 他：傾斜側壁を持つ貯水池におけるスロッシングの固有周期、応用力学論文集, Vol.11, pp557-563, 2008.8
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 座間信作, 山田實, 西晴樹, 廣川幹浩, 平野廣和, 鈴木森晶：石油タンクのスロッシングによる内溶液の溢流の算定、消防研究所報告, 第 101 号, pp.14-20, 2006.9.