

矩形断面容器における自由表面でのスロッシング現象の把握

○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

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¹⁾する場合がある。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)の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た。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。1つの原因として核燃料プールの水が地震動と共振して、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。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溢流したプールの約1/20のサイズである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。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により容器内の水の応答変位、固有振動数、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580×280の矩形水槽を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原発プールの約1/20の縮尺である。DVC設置位置は、水槽から90cm離れたところとする。これは、非接触計測からコマ送り機能を用いて応答変位を算出する際、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変位、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離れたところにも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。

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つである。そのため入力波形を詳細に把握することを目的として、一軸加速度計を振動台に設置する。また、水槽と振動台が同調しているかを確認するために、一軸加速度計を水槽側壁にも設置する。サンプリング周波数は100Hz、計測方向は起振方向、計測時間は起振開始から起振終了後までとする。加速度計設置状況、ならびに起振方向を写真-3に示す。

最も波高が大きくなるのは入力振動数とスロッシン

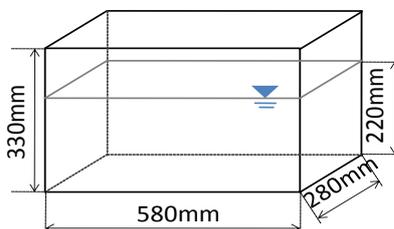


図-1 矩形水槽の寸法



写真-1 実験状況

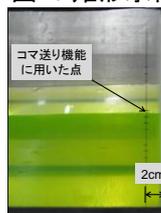


写真-2 応答変位算出時に用いた点

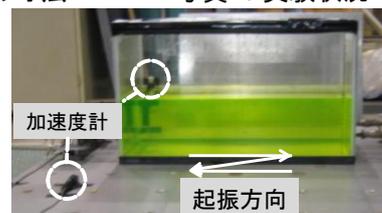


写真-3 加速度計設置状況

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

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]	振動時間[s]
0.8~2.0	3.0	10

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⁾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2.0Hzまでを0.1Hz刻みで計測を行なう。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10秒間に統一する。

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変位を算出した。この時使用した撮影データは、起振終了後に水が自由振動となったからのデータを用いた。

(1) 最大応答変位

最大応答変位(波高)と入力振動数の関係を図-2 に示す。0.8Hz から最大波高は増大し、スロッシング 1 次モード振動数の理論値付近である 1.0Hz、1.1Hz では波高が他の入力振動数と比較して急激に増大し、1.0Hz では 9.35cm、1.1Hz では 6.43cm を示している。さらにスロッシング 1 次モード振動数付近を過ぎると減少する。スロッシング 2 次モード振動数の理論値に近づくにつれ 1 次モードほどではないが、最大波高は大きくなっていることがわかり、2.0Hz では 4.55cm を示している。非接触計測より算出した応答変位データは得られた理論値付近で共振し、最大波高が得られていることが確認できた。

(2) 液面の挙動

全体の水面形を把握できるように設置した DVC から矩形断面容器におけるスロッシング 1 次、2 次モードの液面挙動を求めると図-3 に示す形状となる。1 次モードでは、水槽中心を対称として液面が揺動している。さらに端部では非線形性の挙動を確認できた。2 次モードでは、水槽中心を境に凹凸挙動が確認できた。これらより、モードによって挙動が大きく異なってくることを確認できた。

ところで、井田の研究³⁾よりスロッシング 1 次モード振動数で振動させた後、2 倍波成分(1 次モードの 2 倍の振動数)が存在しているという報告がなされているが、本研究では 2 倍波成分と 2 次モードが大変近いので、2 倍波成分は確認できなかった。

(3) パワースペクトルの比較

非接触計測から算出した応答変位データを高速フーリエ変換することでパワースペクトルを算出する。入力振動数におけるパワースペクトルの 1 次、2 次成分を図-4 に示す。パワースペクトルの 1 次成分においては、1.0Hz では $1.39\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 、1.1Hz では $1.79\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ を示している。しかし、最大波高が得られた入力振動数は 1.0Hz である。これは理論値が 1.06Hz であり、その差が生じたためであると考えられる。1.9Hz からパワースペクトルの 2 次成分が大きくなり、2.0Hz では $1.47\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ を示している。DVC からも 2 次モードの液面挙動を示したのが 2.0Hz であることから、1.9Hz、2.0Hz 間でモードが変化したと考えられる。

(4) 減衰定数

非接触計測より算出した応答変位のデータからシンプレックス法を用いた非線形最適化より減衰定数を算出した結果を図-5 に示す。なお、2 次モード付近の減衰定数はバンドパスフィルタをかけて時系列データから算出した。減衰定数は波高やモード形状に依存せず、0.2~0.4% になっていることが確認できた。この値は従来からいわれているスロッシングの減衰定数に対して妥当な値である。

4. おわりに

自由振動になってからのデータを用いて、非接触計測より応答変位、固有振動数、減衰定数を算出することができた。さらにスロッシング 1 次モード振動数と 2 次モード振動数の変化点を把握することができた。入力振動数によって波高は大きく異なってくるが、減衰定数にはほとんど変化が見られない。

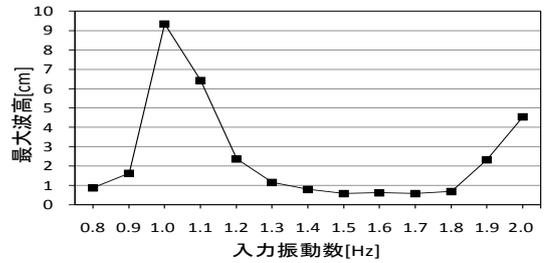
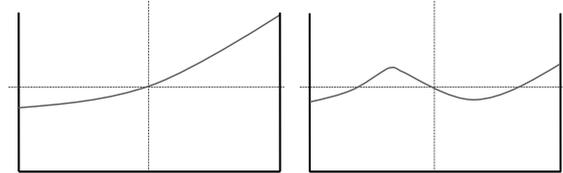


図-2 入力振動数における最大波高



(a) 1 次モード (b) 2 次モード

図-3 液面の挙動

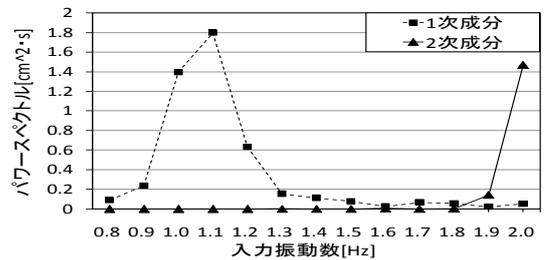


図-4 入力振動数におけるパワースペクトル

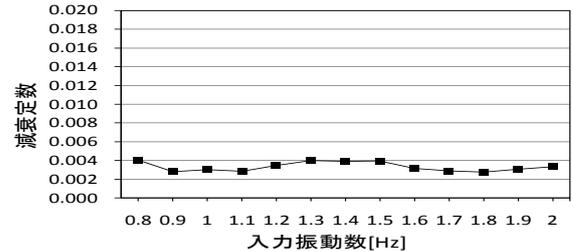


図-5 減衰定数

しかし、減衰定数は 0.2 から 0.4% と小さいため、1 度共振してしまうとなかなか減衰しない。そのため、起振後の減衰対策とともに起振中に発現する最大波高を抑えることが重要であると考えられる。起振中(10 秒間)における応答変位を算出したところ、理論値付近である入力振動数のときのみ、応答変位が起振中に増大していくことが確認できた。

そのため今後の展開としては、起振中の結果も考慮に入れ、応答変位や振動特性に応じたスロッシング対策方法を検討、提案する。

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) 井田剛史、平野廣和、有田新平、佐藤尚次、奥村哲夫: スロッシング発生時の貯槽浮屋根挙動の一考察-φ4000 タンクモデルでの振動実験, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 3, pp444-453, 2007.