

## 貯水槽におけるスロッシング制振装置を設置することで得られる効果

(株)エヌ・ワイ・ケイ 正会員 ○小野 泰介 中央大学 正会員 平野 廣和

## 1. はじめに

熊本地震ならびに東日本大震災において、病院等の公共施設の他、集合住宅などの貯水槽がやや長周期地震動に起因するスロッシング現象より損傷される被害が多数発生し、市民生活に甚大な影響を及ぼした。近い将来発生する巨大地震や直下型地震等に備え、貯水槽の動的な挙動を把握してスロッシング現象を低減することは、地震災害発生時のライフライン確保に必要である。そこで、写真-1に示すようなパネルを8の字形に組み立てる方式のスロッシング制振装置を考案した。そして、この制振装置の効果の検証を行った<sup>1)</sup>。その結果、制振装置を設置することで得られる効果は『スロッシング応答による波高の半減』であることがわかった。よって、本論文ではこの制振装置の効果を実験的に報告するものである。

## 2. 効果から導出されるタンク耐震設計の式

まず、『スロッシング応答による波高の半減』から導出される式(1)を以下に記す。

$$\rho'_{ro} < \frac{\rho_{ro}}{2}, \quad \rho'_{rw} = \frac{\rho_{rw}}{2} \quad (1)$$

$\rho_{ro}$  : タンク天板に働く基準変動水圧

$\rho'_{ro}$  : 制振装置設置時にタンク天板に働く基準変動水圧

$\rho_{rw}$  : タンク側板に働く変動水圧

$\rho'_{rw}$  : 制振装置設置時にタンク側板に働く変動水圧

これらの式は制振装置を設置することにより、設置しない場合と比べ、スロッシング応答で働く基準変動水圧をタンク天板では半減以下に、タンク側板では半減させることを意味する。

## 3. 実験結果から導かれる計算式

制振装置を設置することで得られる効果としてはスロッシング応答による波高の半減が挙げられる。

この結果から制振装置を設置した場合におけるタンク耐震設計を以下のように定める。また、以下で使用する計算式については FRP 水槽構造設計計算法 1996 年版(社団法人強化プラスチック協会発行)より、引用している。

## (1) 水槽天板に作用する変動水圧

角形水槽で与えられる一次スロッシング固有周期の式(2)を示す。

$$T_s = \frac{2\pi}{\sqrt{1.58g \tanh(1.58\frac{h}{l})}} \quad (2)$$

$T_s$  : 一次スロッシング固有周期 (sec)

$\pi$  : 円周率 (-)

$g$  : 重力加速度 (cm/sec<sup>2</sup>)

$l$  : 水槽長さの 1/2 (cm)

$h$  : 水位 (cm)

次にスロッシング応答による波高及び天板に作用する基準変動水圧を以下に示す。

$$p_r = D_s \cdot p_{ro} \quad (3)$$

キーワード : 貯水槽, スロッシング, 制振装置

連絡先 : 〒349-0131 埼玉県蓮田市根金 1689-1 tel. 048-766-1215 fax. 048-766-4790



写真-1 スロッシング制振装置

$$\dot{W} = \omega_s \cdot W \quad (4)$$

$$\dot{W} = \omega_s \cdot \dot{W} \quad (5)$$

$$W = 0.84 \frac{l \cdot \omega_s \cdot S_V}{g} \quad (6)$$

$0 < \frac{h}{2l} < 0.62$  の場合

$$P_{ro} = \left( \frac{1.6l}{\pi} + h_a \right) \rho \dot{W} + \rho \dot{W}^2 \quad (7)$$

$\frac{h}{2l} \geq 0.62$  の場合

$$P_{ro} = \left( \frac{2l}{\pi} + h_a \right) \rho \dot{W} + \rho \dot{W}^2 \quad (8)$$

$p_{ro}$  : 水槽天板に働く基準変動水圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$p_r$  : 水槽天板に働く設計用変動水圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$D_s$  : 構造特性係数に当る係数 0.5 (-)

$W$  : 波高 (cm)  $\dot{W}$  : 波高速度 (cm/sec)

$\dot{W}$  : 波高加速度 (cm/sec<sup>2</sup>)

$\omega_s$  : 一次スロッシング固有円振動数 (rad/sec)

$$\omega_s = 2\pi/T_s$$

$l$  : 水槽長さ 1/2 (cm)  $h$  : 水位 (cm)

$h_a$  : 水槽上部空隙 (cm)

$\rho$  : 水の単位体積質量 (kgf · sec<sup>2</sup> / cm<sup>4</sup>)

$S_V$  : 速度応答スペクトル値 (cm/sec)

ここで、(7)式及び、(8)式で示される水槽天板に働く基準変動水圧に注目すると、地震発生時にこの式に影響を及ぼす変数は波高のみであり、その他は定数であることがわかる。更に(6)式から波高に影響を与える変数は速度応答スペクトル値のみであり、波高と比例関係にあることがわかる。つまり、制振装置によって波高を半減させるということは速度応答スペクトル値を半減させていることと同義である。よって制振装置を設置した際の速度応答スペクトル値 $S'_V$ は、設置していない場合の速度応答スペクトル値 $S_V$ を使い、

$$S'_V = \frac{S_V}{2} \quad (9)$$

と定義する。

この定義に伴い、制振装置を設置した際の波高 $W'$ は、

$$W' = 0.84 \frac{l \cdot \omega_s \cdot S'_V}{g} = 0.84 \frac{l \cdot \omega_s \cdot S_V}{2g} = \frac{W}{2} \quad (10)$$

と表される。

すると、制振装置を設置した際の水槽天板に働く基準変動水圧 $\rho'_{ro}$ は

$0 < \frac{h}{2l} < 0.62$  の場合

$$\rho'_{ro} = \left(\frac{1.6l}{\pi} + h_a\right) \rho \ddot{W}' + \rho \dot{W}'^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1.6l}{\pi} + h_a\right) \rho \ddot{W} + \frac{\rho \dot{W}^2}{2} = \frac{\rho_{ro}}{2} - \frac{\rho \dot{W}^2}{4} \quad (11)$$

$\frac{h}{2l} \geq 0.62$  の場合

$$\rho'_{ro} = \left(\frac{2l}{\pi} + h_a\right) \rho \ddot{W}' + \rho \dot{W}'^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2l}{\pi} + h_a\right) \rho \ddot{W} + \frac{\rho \dot{W}^2}{4} = \frac{\rho_{ro}}{2} - \frac{\rho \dot{W}^2}{4} \quad (12)$$

と表される。

(11)式及び(12)式から以下の関係式が成り立つ。

$$\rho'_{ro} < \frac{\rho_{ro}}{2} \quad (13)$$

この式は制振装置を設置することにより、設置しない場合と比べ、水槽天板に働く基準変動水圧を半減以下にすることを意味する。

(2) 側板に働く変動水圧

制振装置設置前のタンク側板に働く変動水圧は次式で表される。

$$\rho_{rw} = \frac{5}{6} \rho l \frac{\cosh \frac{\sqrt{5}y}{\sqrt{2l}}}{\cosh \left(\frac{\sqrt{5}h}{\sqrt{2l}}\right)} \cdot \omega_s \cdot S_V \quad (14)$$

$\rho_{rw}$  : スロッシングにより側板に働く変動水圧 (kgf・sec<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>)

y : 底板からの距離(cm)

ここで、天板と同様に(9)式を使うと、制振装置設置後にタンク側板に働く変動水圧は

$$\rho'_{rw} = \frac{5}{6} \rho l \frac{\cosh \frac{\sqrt{5}y}{\sqrt{2l}}}{\cosh \left(\frac{\sqrt{5}h}{\sqrt{2l}}\right)} \cdot \omega_s \cdot S'_V = \frac{5}{6} \rho l \frac{\cosh \frac{\sqrt{5}y}{\sqrt{2l}}}{\cosh \left(\frac{\sqrt{5}h}{\sqrt{2l}}\right)} \cdot \omega_s \cdot \frac{S_V}{2} = \frac{\rho_{rw}}{2} \quad (15)$$

と表される。

つまり、制振装置を設置することでタンク側板に働く変動水圧は半減される。

4. 耐震効果の例～受水槽（地上設置）の場合～

制振装置を設置した受水槽の耐震設計の例を次に示す。ここでは3000mmの角タンク（水深2700mm）を想定し、この時のスロッシング応答に対する耐震効果の設計例を表-1に示す。表-1より、結果的に変動水圧の値を低減させている。

5. おわりに

本論文では制振装置の効果を定式的に示した。結果的に制振装置を設置することで変動水圧の値を低減させており、貯水槽の耐震化向上に繋がると言える。

参考文献

- 1) 小野泰介, 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 石川友樹: 貯水槽の耐震化向上のための8の字型浮体式制振装置の開発, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.74, No.4, (地震工学論文集第37巻), pp.641-648, 2018.

表-1 スロッシング応答に対する耐震効果の設計例

設計用水平震度 $K_h$	0.6		1.0		1.5	
	制振装置なし	制振装置あり	制振装置なし	制振装置あり	制振装置なし	制振装置あり
水深 h [mm]	2700	2700	2700	2700	2700	2700
水槽長さ (1/2) l [mm]	1500	1500	1500	1500	1500	1500
水槽長さ比 $K_T = h/(2 \cdot l)$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
重力加速度 g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
1次スロッシング固有円振動数 $\omega_s = \sqrt{\{1.58 \cdot g \times 103/1 \cdot \tanh(1.58 \cdot h/l)\}}$ [rad/s]	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21
速度応答スペクトル値 $S_V$ [cm/s]	105	105	150	150	225	225
速度応答低減係数 $\delta$	1 (低減なし)	1/2 (低減あり)	1 (低減なし)	1/2 (低減あり)	1 (低減なし)	1/2 (低減あり)
水の密度 $\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
側板に働く変動水圧 $p_{rw}$ [kPa]						
(水面) $p_{rw,h} = 0.84 \rho \cdot l \cdot \omega_s \cdot S_V \cdot \delta \times 10^{-2}$	4.3	2.2	6.1	3.1	9.2	4.6
(下端) $p_{rw,0} = 0.84 \rho \cdot l \cdot \omega_s \cdot S_V \cdot \delta \cdot \cosh(1.58h/l) \times 10^{-2}$	0.5	0.3	0.8	0.4	1.1	0.6
波高 $W = 0.84 \cdot l \cdot \omega_s \cdot S_V \cdot \delta \times 10^{-2}/g$ [mm]	433	217	619	310	928	464
水槽上部空隙 $h_a$ [mm]	300	300	300	300	300	300
スロッシング応答波の屋根板への衝突判定	衝突あり	衝突なし	衝突あり	衝突あり	衝突あり	衝突あり
屋根板に働く基準変動水圧						
$p_{ro} = (1.6 \cdot h/\pi + h_a) \cdot \rho \cdot \omega_s^2 \cdot W$ + $\rho \cdot \omega_s^2 \cdot W^2$ (0 < $K_T$ < 0.62 の場合)	7.6		12	5	20.9	8.3
$p_{ro} = (2 \cdot l/\pi + h_a) \cdot \rho \cdot \omega_s^2 \cdot W$ + $\rho \cdot \omega_s^2 \cdot W^2$ ( $K_T \geq 0.62$ の場合)						
$p_{ro} \times 10^{-3}$ [kPa]						
構造特性係数 $D_s$ -	0.55		0.55	0.55	0.55	0.55
屋根板に働く設計用変動水圧 $p_r = D_s \cdot p_{ro}$ [kPa]	4.2	0	6.6	2.8	11.5	4.6