

スロッシング現象に対する浮体式制振装置

小野 泰介¹・塩野谷 遼²・井田 剛史³・平野 廣和⁴・佐藤 尚次⁵

¹学生会員 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:ono@civil.chuo-u.ac.jp

²学生会員 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 榊十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516)

⁴正会員 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野742-1)

⁵正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

東日本大震災では、病院等の公共施設の他、集合住宅などの貯水槽がスロッシング現象などにより破壊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制振することは、地震災害発生時のライフライン確保に必要である。著者らの既往の研究において、パネル式ダンパーが貯水槽に対してスロッシング低減効果があることを実証した。しかし、ダンパーの施工性が悪く、施工に手間がかかった。そこで本研究では施工性を向上させ、ダンパーを8の字形で組み立てる方式を考案した。実機貯水槽にて加振実験を行い、このダンパーの施工性とスロッシング低減効果の検証を行った。その結果、従来のダンパーよりも格段に施工性が良く、また従来同様に波高低減率と同等レベルの波高低減効果を発揮することがわかった。

Key Words : floating damping device, sloshing, real scale tank, experimental excitation

1. はじめに

スロッシング現象の特徴は、地震動の強弱ではなく地震の周期と貯水槽の大きさと水深で決まるスロッシングの固有周期とが一致することにより生じる動的な応答問題である。そのために震度3程度での小規模な地震の揺れであっても、地震の揺れている時間が長ければ発生するものである。そのため、スロッシングによる貯水槽の被害例は、東日本大震災で初めて被害が報告された訳ではなく、1978年の伊豆大島近海地震や同年の宮城県沖地震でも相当数の貯水槽に被害が報告¹⁾されている。さらに1995年の阪神淡路大震災²⁾、2007年の能登半島地震³⁾においても多くの被害が確認されており、これがFRP製の貯水槽の耐震基準の見直しを行うきっかけとなっている。しかしながら、この見直しも壁を支えている柱の強度を増すなどの静的な荷重の割り増しを行うことに主眼が置かれ、動的な問題であるスロッシング現象その物を減衰させる等の制振対策は、実機の貯水槽では施されていない。

一方、スロッシング制振対策に関して実験室の段階では、これまで様々な検討が行われて来ている。この中で自由表面を有する矩形断面では、貯水槽内部に抵抗板を利用する方法⁴⁾が代表的な研究である。その他の制振対策の方法としては、池田ら⁵⁾が金網を容器内に設置することで制振効果を発揮することを提案している。また則竹ら⁶⁾は、側壁にプラスチック繊維を貼り付ける方法を提案している。しかし、これらの研究は新設の貯水槽には設置し易いが、既存の貯水



(a) 2段制振装置 (b) 3段制振装置
写真-1 8の字型浮体式制振装置

槽に設置する場合は制振装置の固定方法などの施工上の問題、さらには法的に義務付けられている衛生面の確保のための内部定期清掃の方法等を検討しなくてはならない課題が残っている。

以上の背景から著者らの既往の研究⁷⁾において、パネルを組み合わせた制振装置をさらに発展させ、できる限り簡単にかつ誰でも組み立てられ、かつ経済性と衛生面を追求して、8の字形パネルを組み立てる方式での浮体式波動抑制装置を考案したので、この装置の効果を報告する。

2. 8の字型浮体式制振装置

写真-1に示す8の字形パネルを組み立てる方式の浮体式制振装置（以下、制振装置）を考案した。これを貯水槽（以下、タンク）内部に浮かせ、加振実験により制振装置の検討を行う。

この制振装置のメカニズムは、液体が抑制装置のスリット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利用したものである。これにより減衰が付加され、流速を抑えて波高を低減することができる。

この抑制装置は、柔軟性のある耐塩素性を有

する特殊ポリエチレン樹脂で成型した板状部材とそれを8の字状に組むための接続部材で構成されている。この板を8の字状に曲げてステンレスボルトで接合し、現地で設置するものである。

従来の研究成果⁷⁾で得られている板状部材の間隔を開け、タンクの水深にあわせて縦に2～3個段積み上げて組み立てている。この抑制装置に使用する板状部材の材料は、**図-1**に示す柔軟性のある特殊ポリエチレン樹脂製のパネルであり、物性は硬さA94、貯蔵弾性率117MPa、引張強さ32.3MPa、切断時伸び810%、比重0.9である。これらを**写真-1**に示すようにタンク外部で組み立てた後、直径φ600程度の点検用のマンホールからタンク内部へ直接入れるものである。この材料の一つの特性である柔軟性があるからこそ可能であり、タンク内部での作業を極力無くす工夫がなされている。最後にタンク内に水を入れてダンパーを浮遊させて施工完了となる。

この施工方法の場合、ダンパーパネルをタンク内寸に応じて自在に曲げ、連結部位をボルトで固定するだけであるため、施工時間が約20分程度で済み、当初の考案した制振装置⁷⁾の施工に3～5時間要し、寸法調整が難しかったことと比べ、施工性が大幅に改善された。

ところで、この材料の比重は前述の通り0.9であるので、水を入れると水面付近に浮揚する。著者らの研究⁷⁾で、スロッシング現象は水面付近の流体運動が支配的となることが判っているので、スロッシングを効果的に抑制し、かつタンクの水深変化にも対応可能となる。ここでのスリット開口率は9.1%であり、水深は通常の設定水位と同じである内容量90%の水深2,700mmまで注水した場合である。なお、水中にこの抑制装置が浸かる深さは、20%以上あれば十分な制振効果が得られる⁷⁾ことも判っている。

3. 制振効果確認実験

3.1 実験条件

制振効果確認実験は、**写真-2**に示す内寸3,000×3,000×3,000mmの鋼板製一体形タンクを使用する。このタンク内に通常の設定水位である水深2,700mm（内容量90%）まで水を満たす。

加振実験は、正弦波入力加振実験と地震波入力加振実験を行う。波入力加振実験には、式(1)に示すHousnerの式より算出した1次、2次モードスロッシング固有振動数の理論値を用いる。

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

ここで、 H は水深(m)、 L は水槽の幅(m)である。これより算出したスロッシング固有振動数は、**表-1**に示すように1次モードが0.50Hz、2次モードが0.88Hzであり、これを入力振動数とし、振

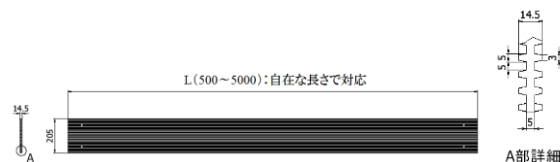


図-1 特殊ポリエチレン樹脂製のパネルの概要



(a) タンクの外観 (b) タンク内部

写真-2 鋼板製一体形タンク

表-1 実験条件

	1 次モード	2 次モード
容器内壁幅 L	3,000mm	
水深 H	2,700mm	
固有振動数	0.50Hz	0.88Hz
加振振幅	±5mm	
入力波数	20 波	
最大加速度	4.9Gal	15.3Gal
神戸 NS 波 50%	410Gal（震度 6 強）	

幅は±5mm、波数は20波の正弦波とする。

地震波入力加振実験では、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸NS方向（以下、神戸NS波）を使用する。ただし、振動台の能力の関係から、変位での入力波形を50%に縮小した入力波としている。この変位を入力し、非制振時と対策後の効果を検証する。

ここでの設定条件での加振時の最大加速度と地震震度階級は、加振振幅±5mmにおいて、0.50Hzでは4.9Gal（震度2）、0.88Hzでは15.3Gal（震度3）、神戸NS波変位50%において410Gal相当で震度6強程度である。以上の実験条件をまとめて**表-1**に示す。

3.2 実験結果

(1) 応答波高について

変位計より取得したデータから最大波高とその減衰定数を算出し、非制振の場合と制振装置付加後について比較を行う。減衰定数は変位計の計測より、加振停止後の自由減衰となった波形と式(2)より得られる減衰曲線を照らし合わせることで算出を行う。

$$\eta_d(t) = A \exp(-\omega_0 h t) \quad (2)$$

ここで η_d は減衰曲線、 A は加振直後の振幅、 ω_0 は固有角振動数、 h は減衰定数、 t は時間である。

図-2、**図-3**、**図-4**にそれぞれ1次モード、2次モード、神戸NS波50%加振時における応答波高の比較を示す。さらに、**表-2**にケース加振時の最大波高と低減率を示す。また、**表-3**に減衰定数についてまとめて示す。

図-2と表-2の1次モードの結果に着目すると、非制振時の最大波高は278mmを示している。この結果と比較し、制振装置を付加することで、制振2段では161mmを示し、42%低減している。さらに、制振3段では100mmを示し、64%最大波高を低減させている。このように、制振装置のダンパーパネルの段数を増やすことで波高低減効果が得られた。これは、1次モード加振により水面付近で局所的に作用するスロッシング挙動を制振装置の付加により、流体揺動を制御した結果といえる。

また、表-3の1次モードの減衰定数について、非制振時に0.0057と減衰定数が小さかったものが、制振装置を付加することで、制振2段では0.0207（3.6倍）、制振3段では0.0223（3.9倍）と増加している。図-2の応答波高の形状からもわかるように、制振装置を付加することで、初期の段階から波高を抑制し、加振停止後のスロッシング挙動がすぐに収束している。

次に図-3と表-2の2次モードの結果に着目すると、非制振時の最大波高は125mmを示している。この結果と比較し、制振装置を付加することで、制振2段では20mmを示し、84%低減している。さらに、制振3段では21mmを示し、83%最大波高を低減させている。2次モード加振において、制振2段と制振3段の波高低減効果はほぼ同等で違いが見られなかった。これは2次モード加振におけるスロッシング挙動が液面の碎波を起こしやすいため、いずれの制振装置であっても、これを付加することで同等の低減効果があらわれたと考えられる。

また、表-3の2次モードの減衰定数について、非制振時に0.0022と減衰定数が小さかったものが、制振装置を付加することで制振2段では0.0069（3.2倍）、制振3段では0.0065（3.0倍）と増加している。ここで、2次モードの特徴は、減衰が非常に小さいことが挙げられる。図-3の応答波高の形状からは、1次モードのような加振停止後の急激な包絡曲線は見受けられないものの、加振開始から波高を低減させ、スロッシング挙動を抑制していることが見受けられる。

次に図-4と表-2の神戸NS波50%加振時の結果に着目すると、非制振時の最大波高は261mmを示している。この結果と比較し、制振装置を付加することで、制振2段では226mmを示し、13%低減している。さらに制振3段では179mmを示し、31%最大波高を低減させている。神戸NS波50%加振時においても、制振装置のダンパーパネルの段数を増やすことで波高低減効果が得られた。

また、表-3の神戸NS波50%加振時について、非制振時に0.0032と減衰定数が小さかったものが、制振装置を付加することで、制振2段では0.0286（9.0倍）、制振3段では0.0255（8.0倍）と増加している。図-4の応答波高の形状からも

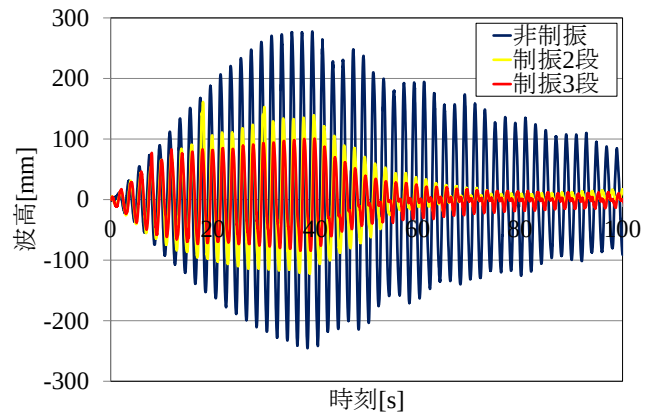


図-2 1次モード加振時における応答波高の比較

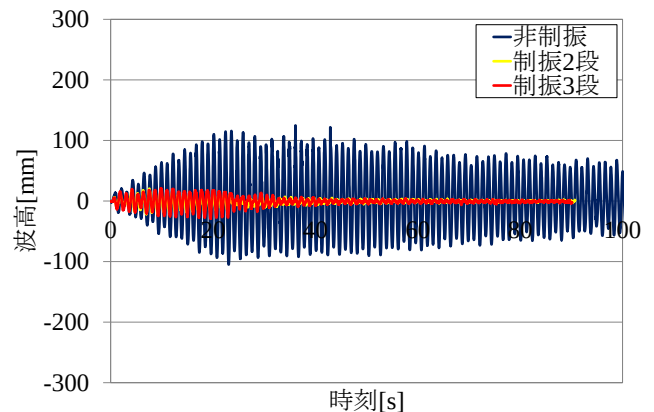


図-3 2次モード加振時における応答波高の比較

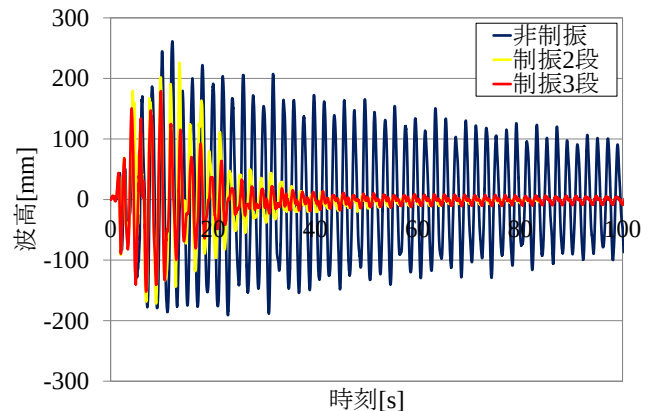


図-4 神戸 NS 波 50%加振時における応答波高の比較

表-2 最大波高・低減率

	非制振	制振 2 段		制振 3 段	
	最大波高 [mm]	最大波高 [mm]	低減率	最大波高 [mm]	低減率
1 次モード	278	161	42%	100	64%
2 次モード	125	20	84%	21	83%
神戸 50%	261	226	13%	179	31%

表-3 減衰定数

	非制振	制振 2 段		制振 3 段	
	減衰定数	減衰定数	倍率	減衰定数	倍率
1 次モード	0.0057	0.0207	3.6	0.0223	3.9
2 次モード	0.0022	0.0069	3.2	0.0065	3.0
神戸 50%	0.0032	0.0286	9.0	0.0255	8.0

わかるように、神戸NS波50%加振では内容液は激しく不規則に揺動するが、制振装置を付加することで、加振途中の波高の増大を抑制している。さらに、加振停止後においてスロッシング挙動がすぐに収束していることが見受けられる。また、タンク内部に設置したカメラによる映像比較での結果を写真-3に示す。抑制装置を設置しない場合は、地震波の入力によって液面が大きく揺動し、タンクの隅角部を中心に天井に内容液が衝突していることが確認できる。一方、抑制装置を設置した場合は、タンク内の液面揺動が抑制されており、内容液が天井部に衝突することはなく加振終了後に速やかに液面揺動が減衰する様子が確認できた。このことから制振装置の効果が得られていることが分かる。

以上のことから、制振装置の効果が実証できる。この結果より、制振装置を用いることで地震時の貯水槽の破損を防ぐことができる。

4. おわりに

本研究では従来のダンパーの施工性を改良した8の字型ダンパーの施工性及び2段型と3段型ダンパーでの制振効果の比較確認を行い、以下の知見を得ることができた。

- (1) 8の字型ダンパーは従来のダンパーよりも格段に施工性が良く、また従来のダンパーの波高低減率(51~67%)と同等レベルの波高低減効果を発揮した。
- (2) 8の字型ダンパーを差込長の異なる3段型と2段型で比較すると、既往の研究と同様の波高低減率変化の傾向を示し、最適なダンパー設計を行う上での有効なデータ採取ができた。

今後の課題として、貯水槽(FPR, SUSパネル等)は様々な部材や構造物がタンク内部に配設されているため、それらに影響なく設置するためのダンパー施工方法の検討を行い、実用化を目指すことである。

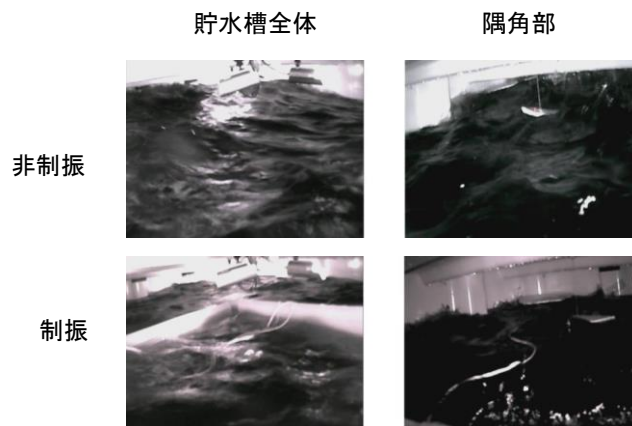


写真-3 地震波入力時の貯水槽の内部

謝辞：本研究の一部は(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 吉原醇一, 角田智彦, 安井謙, 中村獄：可撓性矩形水槽の振動特性について, 大林組技術研究所報, No.20, pp17-24, 1980.
- 2) 多田直美：阪神大震災による FRP 製給水タンクの被害状況と今後の対応, 強化プラスチック, 強化プラスチック技術協会, 第 41 巻, 第 10 号, pp.358-365, 1995.10.
- 3) 厚生労働省健康局水道課：平成 19 年能登半島地震水道施設被害等調査報告書, 2007.8.
- 4) 辺昌宏, 小林信之, 本多智一, 大野克徳, 本井久之：隔壁挿入による矩形容器内液体スロッシングの制振特性, 日本機械学会論文集(C編), 67巻657号, pp.1422-1429, 2001.5.
- 5) 池田達哉, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次：矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討, 応用力学論文集, Vol.11, pp549-556, 2008.8.
- 6) 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥村哲夫, 佐口浩一郎, 倉橋奨：矩形貯槽におけるスロッシング挙動とその抑制方法に対する検討, 応用力学論文集, Vol.15, pp785-794, 2012.8.
- 7) 曾根龍太, 小野泰介, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次：矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討, 土木学会論文集 A2 分冊(応用力学)特集号, Vol.16, pp.833-843, 2013.8.

THE FLOATING DAMPING DEVICE AGAINST SLOSHING PHENOMENON

Taisuke ONO, Ryo SHIONOYA, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

The Great East Japan Earthquake caused damage of water tank, at public facilities such as hospitals and collective housing. It had an enormous influence on civil life by such a disaster encounter. Against the impending earthquake disasters such as a the epicentral earthquake and giant earthquake, There is necessary to ensure lifeline, we understand the dynamic behavior of the water tank and also control the sloshing phenomenon. In previous studies of the authors, it has been proven that there is a decrease effect of damping panels device against water tank. However, construction of the dampers is poor, spent a lot of time for construction. So, in the present study, we devise a method that is possible to improve the workability due to assemble the damping device in the 8 shape. We carry out vibration experiment with the actual water tank, and investigate the decrease effect against the sloshing phenomenon and the workability of this damping device. As a result, workability of damping device is much better than conventional damping device, we found that this damping device is also possible to exert the same decrease effect as conventional damping device about the wave height level and the wave height reduction rate.