

貯水槽用浮体式スロッシング制振装置の開発

○中央大学 学生員 曾根龍太 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

東北地方太平洋沖地震(M9.0)において、スロッシング現象と思われる液面揺動により、水道施設等にあるステンレス製やFRP製の貯水槽において側面と天井に亀裂や破損が多数発生した。これらの被害は震源付近のみならず、200km以上離れたつくば市でも発生した。この種の貯水槽の被害は、阪神淡路大震災を初めとして能登半島沖地震、新潟県中越沖地震でも発生しており、直下型地震、海溝型地震に問わず発生する事例である。よって、貯水槽のスロッシング制振対策の検討が希求されている。

スロッシング対策のための制振装置は、則竹ら¹⁾による側壁にプラスチック繊維を貼り付ける方法や、固定式の網を一枚または十字型に組んで水槽内に設置する研究^{2),3)}がなされてきた。しかし実機水槽を調査する過程で、前者は法令で定められた年一回の内部清掃の煩雑さ、後者は貯水槽内部での固定の施工性、またFRP製貯水槽では固定方法に難があることが判明した。

そこで、本研究では貯水槽におけるスロッシング現象への対策として図-1に示す浮体式の制振装置を提案する。浮体式の利点は、水深の変化に対応できること、装置の固定作業が無くなるので施工時の簡易化が計れること等である。この制振装置を実機の貯水槽に設置し、正弦波と実際の地震波で振動実験を行うことで浮体式制振装置のスロッシング制振効果を検証する。

2. 制振方法の検討

本研究で提案する方法は、液体が制振装置のスリットを通過するとき抵抗が生じ、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。

本研究で用いた制振装置は、耐塩素性を有した樹脂で成型した板状の部材とそれを十字に組むための棒状の部材、接続部材で構成される。これら板状の部材を間隔をあけて縦に3個積み上げ、棒状の部材と接続部材を使用して十字型に組み立てる。比重は0.9程度であり、水を入れると水面付近に浮揚する。これにより、水面付近の流体運動が支配的となるスロッシングを効果的に抑制し、貯水槽の水深変化にも対応可能となる。開口率は、9.1%となる。

3. 実験概要

本研究は、図-2に示す貯水槽として一般的に使用されている3m×3m×3mのステンレスパネルタンク実機を用い、水深2.7mまで水を入れ、中央大学と愛知工業大学が共同で新たに製作した振動装置に設置して加振実験を行う。Housnerの理論式⁴⁾より算出した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

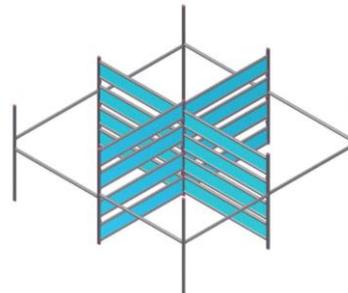


図-1 制振装置概要



写真-1 実験状況

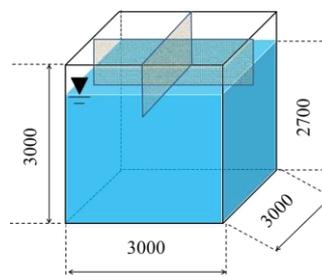


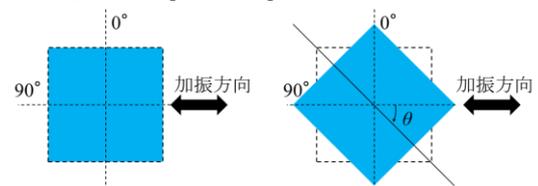
図-2 制振装置設置位置[単位 mm]

表-1 スロッシング振動数理論値

水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
2700	3000	0.50	0.88

表-2 正弦波加振実験の条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	波数
0.49, 0.87	±5	10



(a)加振方向角 0° (b)加振方向角 45°

図-3 加振方向角の設定方法

れ 0.50Hz, 0.88Hz である。この理論値付近において 0.1Hz 刻みで共振点を探し、入力振動数を決定する。加振実験の条件は表-2に示す様に、振動数が1次モード: 0.49Hz, 2次モード: 0.87Hz, 振幅が±5mm, 波数が10である正弦波とする。また、正弦波のみならず地震波に対する効果を検証するため、兵庫県南部地震におけるJMA神戸NS方向(以下、神戸NS)の地震波を入力し、非制振時と対策後の効果を検証する。さらに、貯水槽を加振する角度を変化させた場合、異なるスロッシング挙動が発現するため、 θ を加振方向角として図-3の様に定義する。本研究では、 $\theta=0^\circ$ および 45° において加振実験を行う。

4. 正弦波入力での実験

波高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対策後について比較を行う。波高は波が集中する容器対角線上が最も高くなり、その最大値を最大波高とする。減衰定数は加振終了後に波が自由減衰振動となつてからのデータを使用して算出する。

キーワード: スロッシング, 正方形断面, 加振方向, 制振対策

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816

fax.03-3817-1803

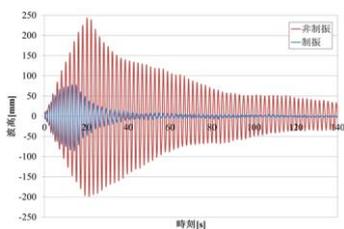


図-4 1次モード 45° 波高時刻歴

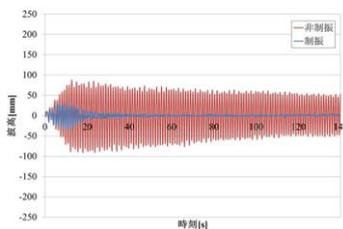


図-5 2次モード 45° 波高時刻歴

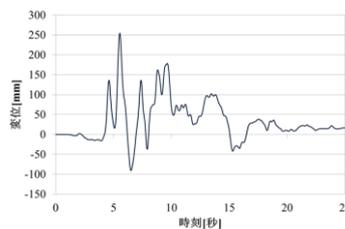


図-6 神戸 NS の変位時刻歴

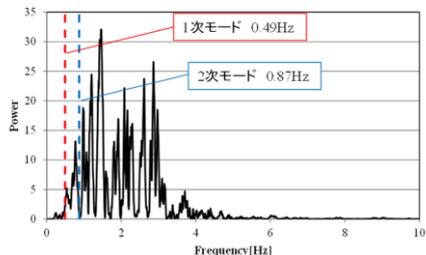


図-7 神戸 NS スペクトル解析結果

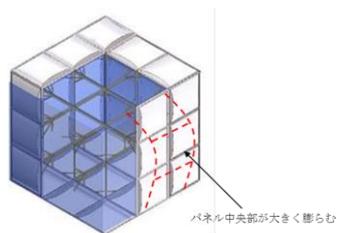


図-8 貯水槽パネルの変形



(a) 隅角部



(b) 貯水槽内全体

写真-2 非制振時の貯水槽内部



(a) 隅角部



(b) 貯水槽内全体

写真-3 制振対策後の貯水槽内部

(1) 1次モードの検討

一例として図-4に1次モードの加振方向角45°における波高の時刻歴を示す。最大波高は加振方向角が45°に近づくにつれて増大する。この要因は、振動方向が容器の対角線上に近づくほど隅角部に波が集中するためと考えられる。波高の時刻歴から、初期の段階から波高を抑制し、加振停止後は早く減衰するといった制振装置の効果を確認できる。対策後は、非制振時と比較して51~67%の波高を低減することができる。減衰定数は加振方向角に関わらずほとんど一定の値となる。非制振時で0.5%程度であるが対策後では1.8~2.1%程度に増加できる。

(2) 2次モードの検討

1次モードと同様に、図-5に2次モードの実験結果を示す。2次モードの特徴はビート挙動が発現し、かつ減衰が非常に小さいことが挙げられる。対策後は、このビート挙動を抑制し、最大波高は、非制振時の44~65%低減できる。減衰定数は加振方向角に関わらずほとんど一定の値となる。非制振時で0.1%程度であるが対策後では0.8~1.0%程度に増加できる。

5. 地震波入力での実験

入力波は図-6に示す神戸NSの地震波を入力する。ここで、振動台の性能上、変位を50%に調整した地震波を入力する。水面が貯水槽天面まで到達するため、波高での定量的な比較はできないが、内・外部に設置したビデオカメラで撮影した動画により効果を定性的に比較する。図-7は神戸NSのスペクトル解析結果である。スペクトルピークとスロッシング固有振動数は

完全な一致をしていないが、内容液は1次モードに似た挙動で大きく波打ち、写真-2のように貯水槽天井に衝突した。一方、パネルの変形に着目すると図-8に示すようにパネル中央が大きく変形するモードが表れる。これは箕輪⁵⁾らが指摘している貯水槽パネルと内容液が連成するバルジング振動であると推定される。

写真-3は制振対策を施した状態であり、水面が穏やかに波立つのみで波高を抑制し、かつパネルの変形も抑えることができています。

6. おわりに

本研究で貯水槽実機を使用した実験を行い、提案する制振装置の効果を検証した。①最大波高は、非制振時より1次モード51~67%、2次モード44~65%の割合で低減する。②減衰定数は、非制振時で1次モード0.5%、2次モード0.1%程度であるが、対策後は1次モード1.8~2.1%、2次モード0.8~1.0%程度まで増加する。③地震波を入力した場合でも十分な制振効果が得られた。謝辞：本研究の一部は、(独)科学技術振興機構 A-STEPの給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 則竹 他：矩形貯槽のスロッシング現象抑制方法に関する実験的研究，土木学会中部支部研究発表会，I-6，2012.3.
- 2) 池田 他：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.
- 3) 曾根他：矩形貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討，応用力学論文集 Vol16，20138
- 4) G.W.Housner：The Dynamic Behavior of Water Tank，Bulletin of The Seismological Society of America. Vol.53，1963.
- 5) 箕輪 他：ステンレス長方形水槽の耐震実験，日本機械学会，Dynamics and Design Conference 2000，2000.