

円筒型タンクにおける浮体式制振装置を用いたスロッシング対策の検討

塩野谷 遼¹・藤井智大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:shionoya@civil.chuo-u.ac.jp

²学生会員 中央大学理工学部都市環境学科(〒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)

東北地方太平洋沖地震において、石油タンク等の円筒型タンクの破損被害が報告されている。このようなタンクの被害は、やや長周期地震動により励起されたスロッシング現象（液面揺動の励起）が原因の一つとされている。そこで本論文では、小型円筒型タンクに浮体式の制振装置を付加することで、スロッシングへの制振効果を確認するものである。制振装置としては4種類の形状を考案し、形状と水の中への差し込み長をパラメータとして比較を行い、最も波高低減効果の高い制振装置を見出すことである。

Key Words : sloshing, circle tank, vibration control device, long-period ground motion

1. はじめに

十勝沖地震(2003)、新潟県中越沖地震(2007)、東北地方太平洋沖地震(2011)などの大型地震が発生し、その際貯水槽タンクの破損、石油タンクから内容液が溢流しての火災、原子力発電所での使用済み核燃料プール内の水の漏洩などの大きな事故が発生している。これは、タンクの内容液が、2秒から5秒のやや長周期成分を含む地震動を受け共振することにより、タンク内でスロッシング現象が発生したことが一つの原因である。このように、タンク内でのスロッシング現象（液面揺動）の発生で生じる災害が大きな問題となっている。そこで、スロッシング現象による被害を低減するために、制振装置を考案することが必要であると考えた。

著者らの研究グループ¹⁾では矩形タンクのスロッシング現象への対策として浮体式制振装置を提案し、この検証を行い有用性を確認してきた。しかし、石油タンク等に代表される円筒型タンクは、浮屋根^{2),3)}があることから浮体式制振装置の研究が少ないのが現状である。そこで、本論では円筒型タンクを対象として、浮体式制振装置の有効性を小型円筒モデルを用いて、振動実験を行い、制振装置の有効性を確認する。

2. 実験概要

2.1 計測方法

加振実験は、中央大学所有の小型振動台を用い、この振動台に図-1に示す内径600mm×高さ490mmの亚克力製円筒形タンクを設置し、水

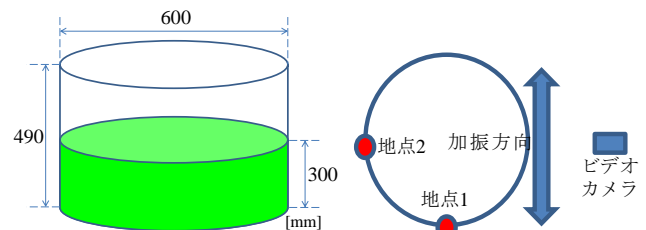


図-1 円筒型タンク

図-2 観測機器設置位置

深300mmになるまで注水する。ここで、1次モード及び2次モードの正弦波で加振実験を行い、応答波高を計測する。

応答波高の計測は、(株)KEYENCE社製のIL-600レーザー変位計（以下、変位計）を使用する。この変位計は、図-2のように加振方向（以下、地点1）と加振方向に対して直交方向（以下、地点2）に2つ設置する。また、変位計を2つ使用することで、計測された応答波高の位相差から、円筒型タンク内溶液でスワーリングの発生を確認することができる。さらに、円筒型タンク内溶液の挙動を確認するため、図-2に示すように、ビデオカメラを加振方向に対して直交方向に設置して撮影を行う。

2.2 制振装置

本論での制振装置は、ホームセンター等で市販されている段ボールパネルを素材としている。使用する段ボールパネルの比重は0.9程度であるので、制振装置を従来の固定式⁴⁾ではなく浮体式とすることができる。ここでは、写真-1を井型、写真-2を三菱型、写真-3を雪印型、写真-4を○型と呼ぶ4種類の制振装置を用いる。また表-1に示す様に、井型の加振方向に対して0°で設置す

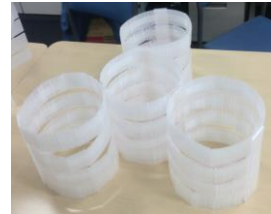
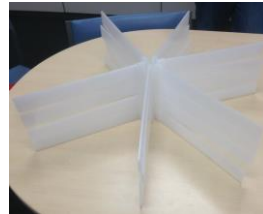


写真-1 井型(Case1, Case2) 写真-2 三菱型(Case3) 写真-3 雪印(Case4) 写真-4 〇型(Case5)

るパターンをCase1, 同加振方向45°で設置するパターンをCase2, 三菱型をCase3, 雪印型をCase4, 〇型をCase5とする. ここでCase1とCase2についての井型制振装置の詳細図を図-3に示し, 両Caseともに同じ井型の制振装置を用いる. また, これらの制振装置の段数を40mm毎かつ5mm間隔で4段, 3段, 2段, 1段と変化させ制振装置の挿し込み長を変え, 円筒型タンク内容液で発生するスロッシング現象での応答波高を計測する. 制振装置の縦断面図を図-4に示す.

2.3 加振条件

一般的に, 入力振動数と円筒型タンクのスロッシング固有振動数が一致して共振した場合, 応答波高が最も大きくなる. 円筒形タンクの n 次モード振動数は以下の式(1)を用いる.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1)g}{R} \cdot 1.814 \cdot \tanh\left(\frac{1.814 \cdot H}{R}\right)} \quad (1)$$

ここで R は円筒型タンク内の半径, H は円筒型タンクの水深を表している.

本研究において, 水深は300mmという同一条件のもと加振実験を行うので, 式(1)より円筒型タンクのスロッシング固有振動数の理論値は, 1次モードで1.19Hz, 2次モードで2.12Hzと算出される. 以上より, 本研究で使用する入力振動数は1次モードを1.2Hz, 2次モードを2.1Hzとする. また, 振幅 ± 3 mmとし, 入力波数は1次モード, 2次モード共に10波の正弦波加振を行う. 以上の加振条件をまとめて表-2に示す.

3. 実験結果

3.1 非制振時

円筒型タンク非制振時において加振実験を行った場合の地点1, 地点2でのそれぞれの応答波高を図-5に示す. また, 最大波高は表-3に示すように, 1次モードで加振実験を行った場合, 地点1で145mm, 地点2で100mmであり, 2次モードで加振実験を行った場合, 地点1では28mm, 地点2では18mmであった.

図-5に着目すると, 地点1と地点2はそれぞれビート挙動が発生し, 地点1から地点2, 地点2から地点1と順にビート挙動が移動していることがわかる. このことから地点1と地点2間での位相差を確認することができる. また, 実験映像か

表-1 制振装置

Case0	非制振
Case1	井型 (加振方向に対して) 0°
Case2	井型 (加振方向に対して) 45°
Case3	三菱型
Case4	雪印型
Case5	〇型

表-2 加振条件

	1次モード	2次モード
入力振動数[Hz]	1.2	2.1
水深[mm]	300	
円筒型タンクの径[mm]	490	
振幅[mm]	3	
入力波数	10	

表-3 非制振時の最大波高

1次モード	最大波高[mm]	2次モード	最大波高[mm]
地点1	145	地点1	28
地点2	100	地点2	18

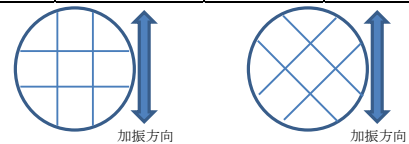


図-3 井型制振装置の詳細図

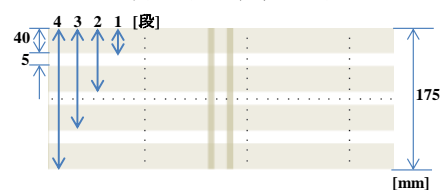
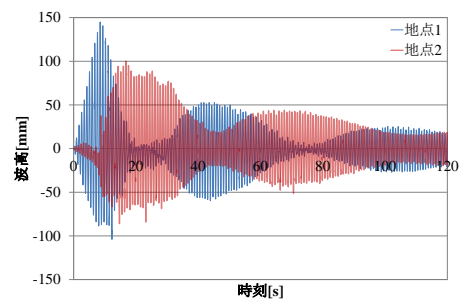
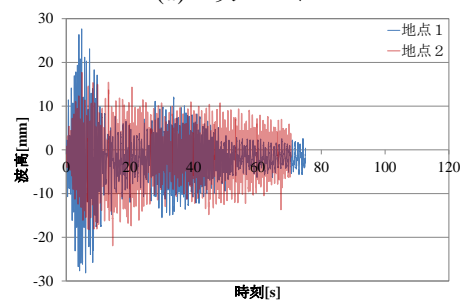


図-4 制振装置の縦断面図



(a) 1次モード



(b) 2次モード

図-5 非制振時の応答波高

ら、円筒型タンクに1次モードで加振実験を行った場合、タンク中心軸の反時計回りにスローリングが発生していることが確認できる。

3.2 制振時

(1) 1次モード

1次モードで加振実験を行った際に、実験条件としてCase0, Case1, Case2, Case3, Case4, Case5に加え、制振装置の挿し込み長を変化させた。加振時の最大波高の低減効果を確認するために、地点1, 地点2それぞれでの最大波高を図-6に示す。この図-6(a)から、波高低減効果が最も大きい段数は4段である。ただし、Case3を除いて3段と4段での波高低減効果の大きな差はみられない。ここで非制振Case0とCase4(4段)を比較するために、両者の応答波高を重ね合わせたものを図-7(a)に示す。これより最大波高は、非制振Case0に比べて、Case4(4段)では82%低減され、かつ減衰時間も大幅に低減されている。

これに対して最も波高低減効果が小さかったのはCase3(1段)である。ここでも非制振Case0とCase3(1段)を比較するために、それぞれの応答波高を重ね合わせ図-7(b)に示す。これより最大波高は、非制振Case0に比べてCase3(1段)では24%の低減であり、減衰時間はCase4(4段)と同様に大幅に低減されたことが確認できる。

また、図-6(b)からは、地点2におけるCase1, Case2, Case3, Case4, Case5での差はほとんどない。加振時の最大波高の低減は、いずれの場合も非制振Case0に比べて、約75%低減している。図-6(a)ではばらつきが見られるのに対して、図-6(b)ではばらつきがほとんど無いことがわかる。

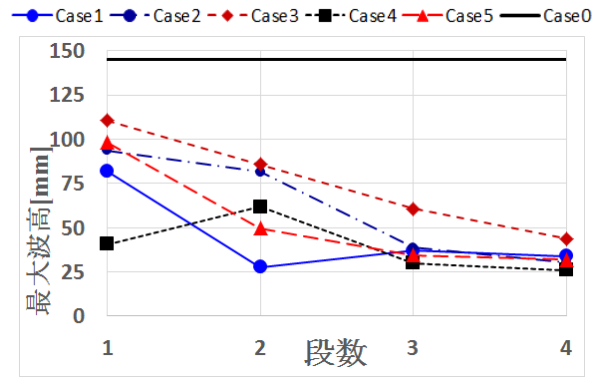
以上のことから、1次モードの場合は、地点1(加振方向)の最大波高を考慮することで制振効果の高い制振装置を選択することができる。よって、制振効果の高い制振装置はCase4となる。

(2) 2次モード

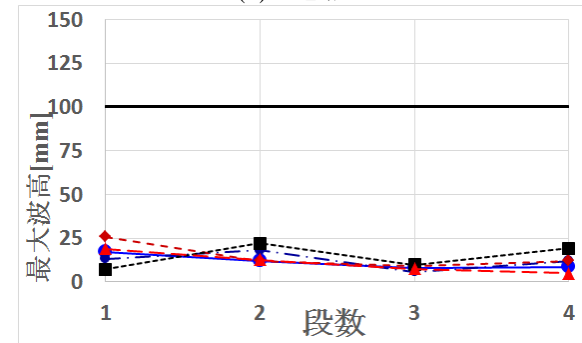
2次モードは、1次モードと同様の実験条件で加振実験を行う。加振時の地点1での最大波高を図-8(a)、地点2での最大波高を図-8(b)に示す。

図-8(a)から、最大波高はCase1以外のCase2, Case3, Case4, Case5はそれほど大きな差は見られない。加振時の最大波高の低減効果は約40%である。図-8(b)から、地点2についても最大波高はすべてのCaseにおいて地点1と同様に大きな差は見られない。また、段数の違いによる差も明白ではない。ここでの加振時の最大波高の低減効果は40%である。

制振効果の高い制振装置を選択するにあたって、図-8(b)から地点2において最大波高に大きな差がないことが確認できたので、図-8(a)を考慮すると、最も波高が低い値であったCase5(3段)を制振効果の高い制振装置として選択する。

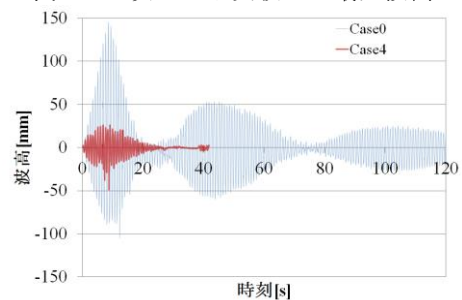


(a) 地点 1

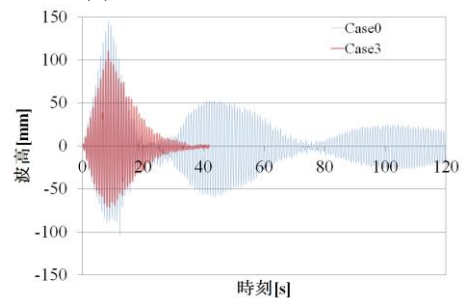


(b) 地点 2

図-6 1次モード実験での最大波高



(a) Case0 と Case4 (4段)



(b) Case0 と Case3 (1段)

図-7 応答波高の比較

3.3 入力振動数の違い

入力振動数の違いによつての制振効果の高い制振装置の選択は1次モードではCase4(4段)、2次モードではCase5(3段)である。ここで2次モードに比べて、1次モードと円筒型タンクの固有振動数が一致したときに共振し、最大波高が高くなる。このことから、1次モードの地点1の波高低減効果について重視することで、制振効果の高い制振装置を選択することができる。

以上のことから制振効果の高い制振装置はCase4であり、このときの段数は4段である。

Case4 (4段)において1次モードで加振実験を行った際、最大波高時の円筒型タンク内溶液の様子を写真-5に示す。また、非制振 Case0についても同様に、写真-6に示す。これより非制振で加振実験を行った場合は、円筒型タンク内でスロッシング現象が発生し、タンク内溶液の最大波高が頭頂部に到達した。これに対して、写真-5のように制振装置を付加することで波高が大幅に低減していることがわかる。

以上から、円筒型タンクに加振実験を行った際に、制振装置を用いることにより1次モードにおいて最大84%、最大波高が低減されスロッシング現象を抑えることができた。

4.おわりに

本研究では、円筒型タンクに4種類の制振装置を使用して、非制振時と制振時のそれぞれに対して、入力振動数を1次モード、2次モードで加振実験を行った。その結果、以下の制振効果を得ることができた。

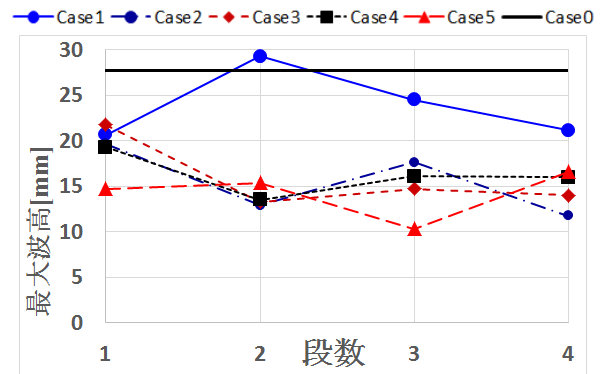
Case4 (4段)を使用し、入力振動数を1次モードで加振実験を行った場合、地点1では最大波高が145mmから26mm、低減率81%となった。また、地点2では最大波高が100mmから19mm、低減率が81%となった。同様に、入力振動数を2次モードで加振実験を行った場合、地点1では最大波高が28mmから16mm、低減率が43%となった。また、地点2では最大波高18mmが3mm、低減率83%でとなった。このように非制振Case0と比較すると、加振時に制振装置がタンク内溶液の流体運動を妨げることによりスロッシング現象を低減することができている。

次の段階として、円筒形タンクの直径を4m程度とし、制振装置付加して加振実験を行うことで、制振装置の実用化について検討する。

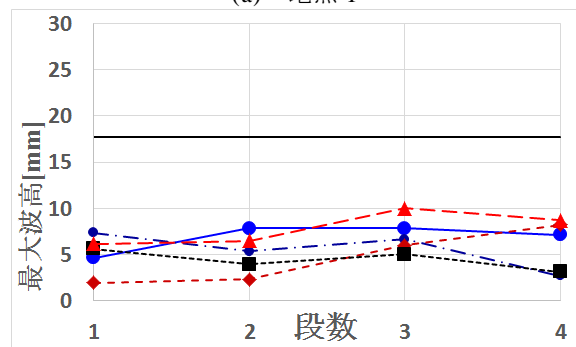
謝辞：本研究は(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

1) 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 小野泰介: 8の字形制振装置による矩形貯水槽のスロッシング低減



(a) 地点 1



(b) 地点 2

図-8 2次モード実験での最大波高

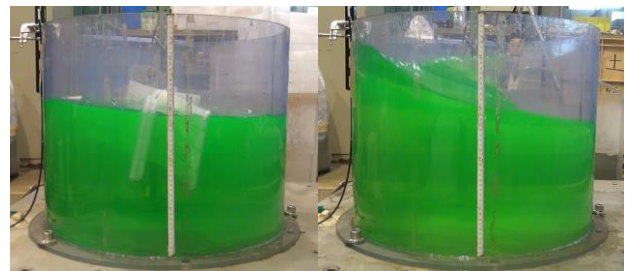


写真-5 Case4 (4段)

写真-6 Case0

効果の検証実験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-162, 2014.9.

- 2) 鈴木亨, 中山昭彦, 野田博: 浮遊式ネットを用いた石油タンク液面揺動制御装置の減衰機構, 応用力学論文集 Vol.12, pp.563~570, 土木学会, 2009.8.
- 3) 井田剛史, 坂東謙, 平野廣和, 佐藤尚次: 浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策-φ4000 タンクモデルの振動実験-, 第 29 回地震工学研究発表会論文集 8-0003, 2007.8.
- 4) 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.

STUDY OF SLOSHING MEASURES USING A FLOATING VIBRATION CONTROL DEVICE TO THE CYLINDRICAL TANK.

Ryo SHIONOYA, Tomohiro FUJI, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

In the Tohoku region Pacific Ocean earthquake, damage damage of cylindrical tank of oil tanks, etc. have been reported. Damage of the tank such, is one of the causes is sloshing phenomenon excited by long-period ground motion slightly. In this paper, by adding the vibration damping device of the floating cylindrical tank, it is intended to confirm the vibration damping effect to the sloshing. It is to devise a shape of four, we compare the parameter length insertion into the water shaped as a vibration damping device, to find a damping device with high peak reduction effect most.