

正方形断面貯水槽における 浮体式スロッシング制振対策案の検討

曾根 龍太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土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:sone@civil.chuo-u.ac.jp

²学生会員 中央大学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)

本研究の目的は、正方形貯水槽で生じるスロッシング現象への対策案を実用化することである。ここでは、小型の正方形断面容器に新たに提案する浮体式制振装置を設置し、振動実験を行うことでのこの有用性を検証する。また、制振装置は受水槽内の空間を仕切りで区切るように設置するが、制振装置設置前後で異なる振動モードが出現して共振することが考えられる。そのため、異なる振動モードが出現するのかわるか、その場合にどのような制振装置の形状と配置が適するかについても併せて検証する。実験結果から、浮体式制振装置は、既往の研究で使用した固定式制振装置と同様の波高低減効果が得られることがわかった。さらに、その最適な形状と配置についても把握することができた。

Key Words : sloshing, water tank, square, rectangular, direction angle

1. はじめに

地震大国である我国は、地震による被害が多数報告されている。その一例として水道水などを貯蔵している矩形タンクの破損^{1)~3)}が挙げられる。この被害は、やや長周期地震動によるスロッシング現象が一つの原因とされている。近い将来、高い確率で発生し得る南海、東南海、東海などの海溝型大地震や都市直下型地震に対して、矩形タンクのスロッシング現象への対策が必要である。

スロッシング対策のための制振装置は、則竹ら⁴⁾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に組んで水槽内に設置したもの^{5),6)}が研究されてきた。これら制振装置の実用化に際しては貯蔵する液体の容量量に関係なく一定の制振効果を発揮し、かつ既存の水道水用の矩形タンクにも容易に取り付けられることが必要である。しかしながら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水槽内部の定期清掃の煩雑さ、後者の固定式においては水槽内部への装置固定時の施工性、またFRP式貯水槽では固定すること自体に難があることが判明した。そこで、制振装置を固定式から浮体式に変更することを新たに提案する。浮体式にする利点は、水深の変化に対応にできること、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が挙げられる。

以上のことから本研究の目的は、実機矩形タンクにおけるスロッシング現象への対策案を実用化することである。ところで矩形断面容器の中でも、正方形断面容器は、広く一般的に受水槽に使用されている形状であり、各辺の長さが等しいため各辺におけるスロッシング固有振動数が等しくなることが特徴である⁶⁾。そこで、実機実験の前段階として小型の正方形断面容器に制振装置を設置し、振動実験を行うことで浮体式制振装置の有用性を検証する。また、制振装置は受水槽内の空間を仕切りで区切るように設置するが、制振装置設置前後で異なる振動モードが出現して共振することが考えられる。そのため、異なる振動モードが出現するのかわるか、その場合にどのような制振装置の形状が対策として適するかについても併せて検証する。

2. 実験概要

(1) 計測項目

本加振実験は、図-1に示す438mm×438mm×394mmの亚克力製正方形断面容器（以下、容器）を用いる。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）を使用し、変位計は、容器の角から40mmずつ離れたところにレーザーが当たるように設置する。測定ターゲットとして正方形に切った発泡スチロール板に穴を開け上下方向にのみ移動し、水平方向に移動しないように容器

底面と天井部に渡した針金を穴に通し浮かせる。また、加振時の液体挙動把握のために容器全体をデジタルビデオカメラで撮影する。写真-1に実験の状況を示す。矩形断面容器は、加振方向角を変化させた場合に異なるスロッシング挙動が現れるため⁶⁾、加振方向角 θ を図-2に示すように定義し、 $0^\circ \sim 45^\circ$ の間を 15° 間隔毎に変化させて加振実験を行う。

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応答波形と式(1)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。

$$\eta_d(t) = A \exp(-\omega_0 h t) \quad (1)$$

ここで、 η_d は減衰曲線、 A は最大振幅、 ω_0 は固有角振動数、 h は減衰定数、 t は時間である。

(2) 制振装置

本研究で使用使用する制振装置は、写真-2に示すように、樹脂製の板をつなぎ合わせて十字型にしたものである。樹脂製の板には等間隔に穴が開いており、棒状のはめ込み式のジョイント部品でつなぎあわせる。図-3に制振装置の種類を示す。また、既往の研究⁸⁾よりスロッシング現象は水面付近の流体運動が支配的であると考えられている。水面付近の流体運動を抑制するため、制振装置は比重0.98の浮体式とし、水深が変化しても効果が充分発揮されるように実用化に向けて考案した。図-4に制振装置の設置位置、写真-3に、実際に水槽に設置した状況を示す。

表-1に制振装置の種類毎による穴の開き方の違いを示す。ここではCase0を非制振とし、図-3(a)に示すようにCase1は板の全面に穴が開いたものである。ここでの開口率は、15%である。(b) Case2は板の上面1/2に、(c) Case3は板の下面1/2に穴が開いたものである。(d) Case4は、穴がない板を使用する。これら4種類の制振装置を実験に使用した目的は、主として以下の二点ある。一点目は容器内の空間が板で1/4に仕切られているために、容器の1/4区画におけるスロッシング固有振動数で共振して波高が高くなるのか否かを確認するためである。二点目はスロッシング現象が水面付近の流体運動が支配的であると考えられていることから、スロッシングを抑制するために効果的な穴位置を把握するためである。

(3) 入力振動数の設定

一般に最も波高が大きくなるのは振動台の入力振動数と容器のスロッシング固有振動数が一致して共振した場合である。そのため、矩形断面容器のスロッシング n 次モード振動数を式(2)のHousnerの理論式より算出する。

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

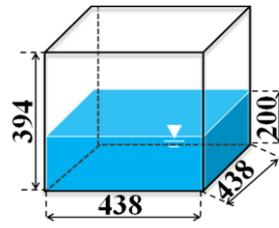


図-1 正方形断面容器

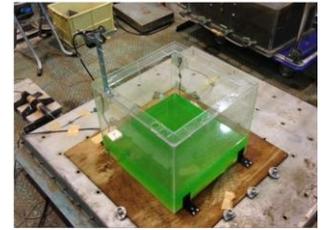


写真-1 実験の状況

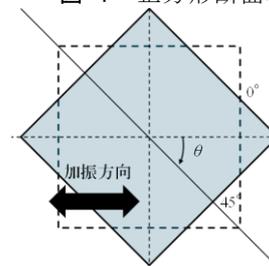


図-2 加振方向角 θ の定義

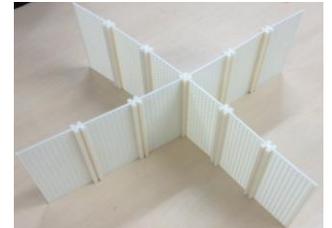
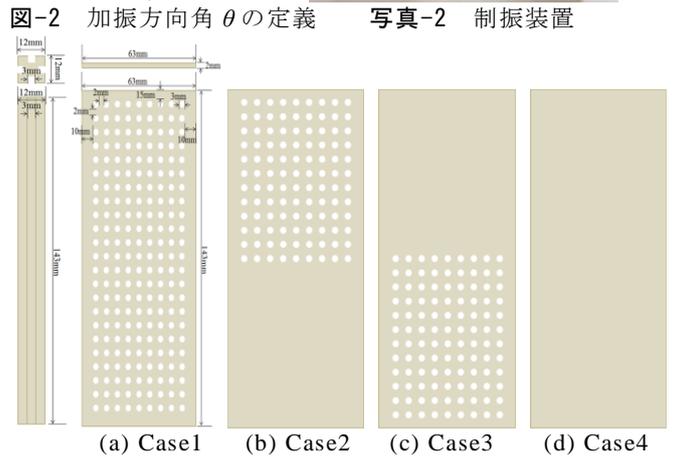


写真-2 制振装置



(a) Case1 (b) Case2 (c) Case3 (d) Case4

図-3 制振装置の種類

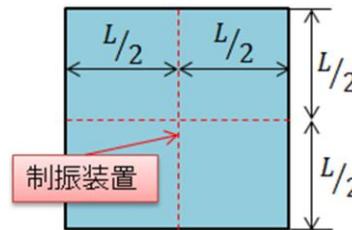


図-4 制振装置設置位置 (上から見た場合)



写真-3 設置状況

表-1 制振装置の穴の開き方

実験ケース	穴の開き方
Case0 (非制振)	-
Case1	全面
Case2	上面
Case3	下面
Case4	穴なし

表-2 加振条件

	1次	2次
容器内壁の幅 L [mm]	438	
水深 H [mm]	200	
入力① [Hz]	1.3	2.3
入力② [Hz]	1.9	3.3
加振方向角 [°]	0,15,30,45	
振幅 [mm]	3	
入力波数	5	11

ここで、 f_n はスロッシング振動数、 L は容器内壁間の幅、 H は水深である。内容液は水道水を用いる。本実験では、水深は200mmと統一し実験を行うため、式(2)より、スロッシング固有振動数1次、2次モードの理論値は、それぞれ1.26Hz、2.31Hzである。そこで入力①を容器模型が有する固有振動数とし、1次モードは1.3Hz、2次モード2.3Hzとして加振実験を行う。一方、制振装置を設置することで、容器内の空間が4つに仕切られ、図-4のように容器の幅を $L/2$ とした1/4区画においてのスロッシング固有振動数が一致して共振することが考えられる。この場合のスロッシング固有振動数1次、2次モードの理論値は、それぞれ1.88Hz、3.26Hzである。そこで入力②を1/4区画においての固有振動数とし、1次モード1.9Hz、2次モード3.3Hzとして加振実験を行う。これより、タンクの1/4区画において共振するかを把握する。いずれの場合も既往の研究^{5)~8)}と同様に振幅は3mmとし、入力波数は1次モードで5波、2次モードで11波の正弦波加振とし、加振停止後、自由減衰させる手順で行う。以上の加振条件を表-2に示す。

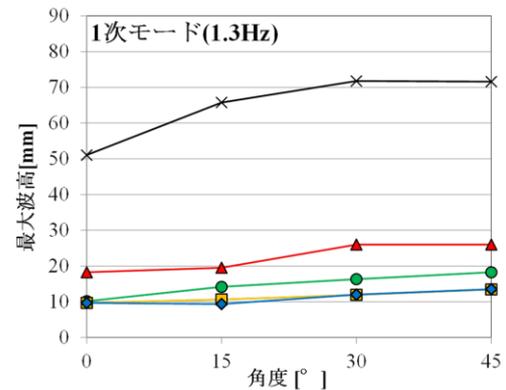
3. 実験結果

(1) 入力①(1.3Hz, 2.3Hz加振の場合)

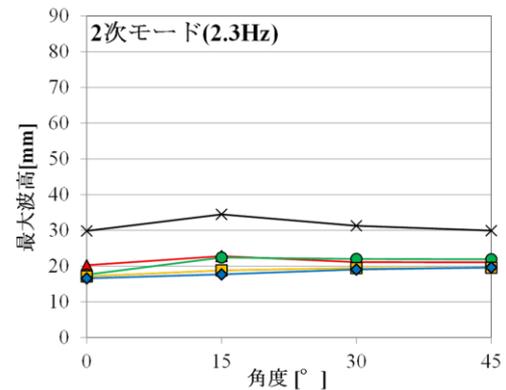
図-5(a)に1次モード、図-5(b)に2次モードの各加振方向角における最大波高を示す。図-5において、1次モード、2次モードのいずれの条件においても、Case0の非制振の場合に比べ最大波高は低減していることがわかる。その中でもCase4の制振装置が最も波高の低減効果があることがわかる。1次モード、加振方向角45°におけるCase0に比べてCase4の値は、約80%最大波高が低減されている。2次モードにおいて、制振装置を設置したCase1~4は、Case0と比較して30%以上の波高低減効果がある。またCase1~4それぞれの顕著な効果の差は見られない。これら1次・2次モードの結果から、水面付近に穴が開いていないCase3、Case4の制振装置を用いることが、波高の抑制に効果的であることがわかる。

次に、図-6(a)に1次モード、図-6(b)に2次モードの減衰定数を示す。図-5と図-6を比べると最大波高が低い制振装置ほど、減衰定数が大きい傾向を示している。このことから、波高を低減させる効果があるものほど、減衰するまでに要する時間も短くなると考えられる。また、1次モード、2次モードいずれの場合においても、Case0では減衰定数が0.02を下回るが、制振装置を設置したCase1~4ではいずれも0.02を超えていることがわかる。また、図-6(a)ではCase3が0.05~0.08と、比較的大きい値をとっているが、図-6(b)では、Case1が0.06~0.1の間の値をとっており、いずれの加振方向角においても大きい値と

※Case0 ▲Case1 ●Case2 ■Case3 ◆Case4

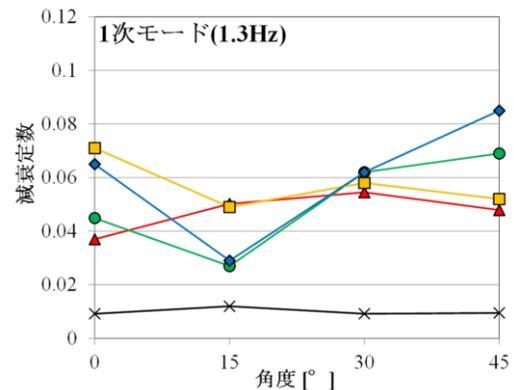


(a) 入力①1次モード(1.3Hz)

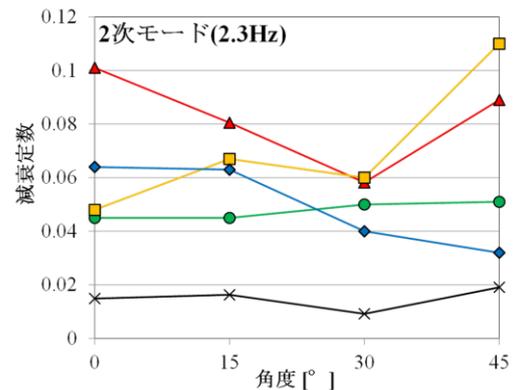


(b) 入力①2次モード(2.3Hz)

図-5 加振方向角と最大波高の関係

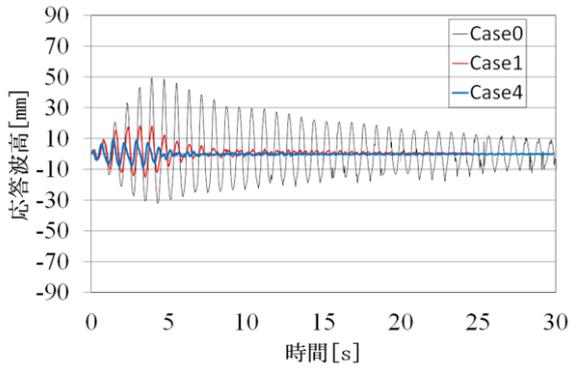


(a) 入力①1次モード(1.3Hz)

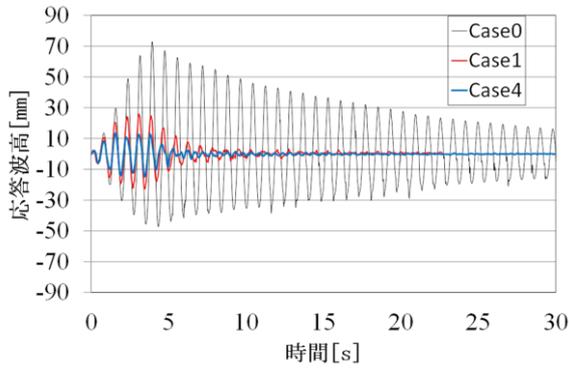


(b) 入力①2次モード(2.3Hz)

図-6 加振方向角と減衰定数の関係



(a) 加振方向角 0°



(b) 加振方向角 45°

図-7 1次モード入力①の応答波高

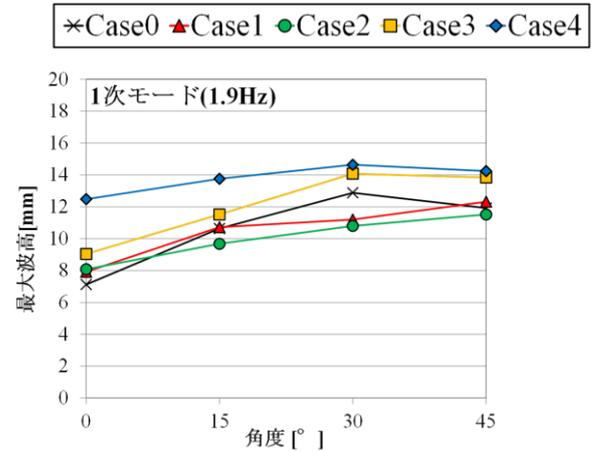
なっている。

非制振Case0の場合と、波高低減効果が最も大きいCase4の比較をするために、図-7(a)にCase0, Case1とCase4における加振方向角0°の応答波形を、図-7(b)に加振方向角45°の応答波形をそれぞれ示す。(a), (b)の結果から、制振装置を設置することで、最大波高が低減し、波高が減衰するまでに要する時間が早くなっていることがわかる。Case1は、Case4と比較して最大波高は2倍程度となるが、制振装置としての十分な機能を有していると考えられる。

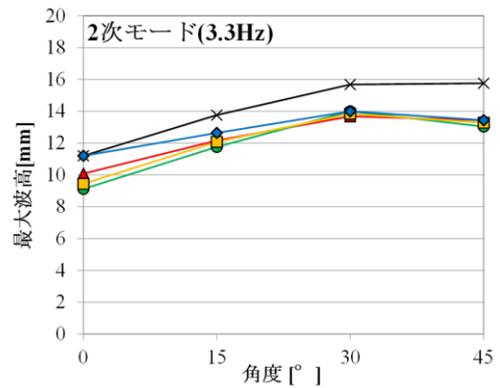
以上より、1, 2次モードともに水面付近に穴が開いていないCase3, Case4の場合が、最も波高の低減に有効であることがわかる。ただし、Case1においても制振装置としての機能を十分に有していることがわかる。

(2) 入力②(1.9Hz, 3.3Hzの場合)

前節の入力①の条件のもとでは、Case3, Case4 が大きい波高低減効果を有していたが、Case3, Case4 は、どちらも制振装置の上面 1/2 に穴が開いていないために水面付近での水の往来がない。そのため、入力①ではなく、容器の1/4 区画におけるスロッシング固有振動数で共振して波高が高くなることが予想される。このことから 1/4 区画でのスロッシング固有振動数に同調させた入力②の 1次モード 1.9Hz, 2次モード 3.3Hz で再度加振実験を行う。

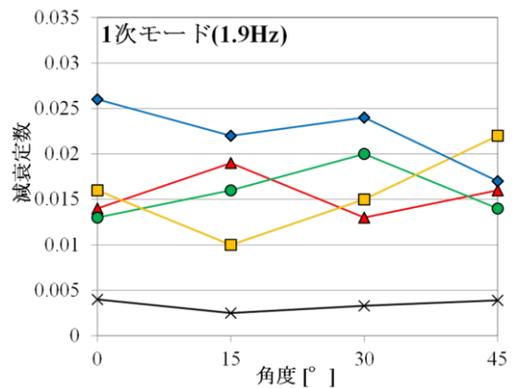


(a) 入力②1次モード(1.9Hz)

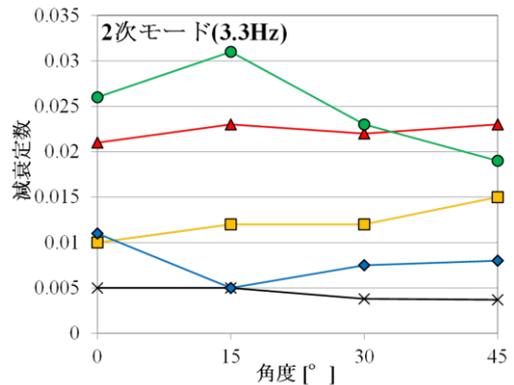


(b) 入力②2次モード(3.3Hz)

図-8 加振方向角と最大波高の関係



(a) 入力②1次モード(1.9Hz)



(b) 入力②2次モード(3.3Hz)

図-9 加振方向角と減衰定数の関係

加振方向角毎と最大波高の結果をそれぞれ図-8に示す。図-8(a)では前節の条件で波高低減効果が最も得られた Case3, Case4 が、非制振の Case0 よりも最大波高が高くなる結果を示している。これは予測されていた 1/4 区画でのスロッシング固有振動数で共振したためと思われる。ここで Case0 と Case4 を比較すると、加振方向角 0°において最大波高は約 86%増加している。また、同様に加振方向角 45°において Case3, Case4 でともに約 17%波高が増加した。この結果から Case3, Case4 の制振装置では入力①の場合は制振効果を有するが、一方で 1/4 区画を代表長さとした場合の入力②において加振した場合は、共振して波高が高くなり制振装置としての機能を有していないことがわかる。

図-8(b)の 2 次モードでは、Case0 がどの角度においても最も高い波高となっている。制振装置を設置した場合は、どの制振装置においても波高の差は殆ど見られない。この要因として考えられることは、2 次モードにおいては 1/4 区画を代表長さとしての入力振動数の影響が表れないことによる。

次に図-9 に加振方向角と減衰定数の関係を示す。図-9 (a)に示す 1 次モードの場合は、どの制振装置も減衰が大きくなる効果を有することがわかる。ただし、図-9 (b)に示す 2 次モードの場合、Case4 は非制振の Case0 と減衰の差は顕著に見られない。なお、Case4 に次いで Case3 についても 2 次モードにおける減衰効果は小さく、入力①で効果が高かった Case3, Case4 が入力②では制振効果を有していないことがわかった。

4. おわりに

本研究では、正方形断面容器に浮体式の4種類の制振装置を設置して加振実験を行った。実験結果から、浮体式制振装置は、既往の研究⁶⁾で使用した固定式制振装置と同等の波高低減効果が得られることがわかった。

次に、制振装置の板の穴の位置を変えた状態で制振効果の比較を行った。板に穴が無く水の流れを全てさえぎる Case4 では、容器模型が有する固有振動では制振効果が最も高い。しかし、容器の 1/4 区画におけるスロッシング固有振動数では、この空間で新たなスロッシング固有振動数と共振し、Case0 の時よりも波高が増大した。それに対して、全面に穴のあいた Case1 を用いることで、いずれの振動帯域においてもスロッシング現象を抑えることが可能となった。

ところでここで扱った加振方法は、正弦波加振のみを扱ったが、実際の地震波は広い振動数帯域をもつ現象であるので、これに対応しなくてはならない。そのような実現象での振動を考

慮すると、Case3, Case4 は特定周期での弱点があるので、Case1 の様な水面付近を含めて板に穴の開いている制振装置の方が様々な地震動に対応出来ると考えられる。また製造面、施工面を考慮すると、パネルが一様なものが生産しやすく、浮体式制振装置は、貯水槽内に浮かせるだけであるために施工が簡単であるので、Case2 よりも優れている。

このようなことから、制振装置としては板全面に穴を開ける Case1 の形状を用いることが最適であると判断する。

今後は、Case1 の制振装置を実機タンクに設置し実験を行い、実機タンクにおける再現性の確認を経て、実用化に向けて検討を行う。

謝 辞

本研究を行うに際し、(株)ムラジ 連重俊博士から貴重な助言を得た。実験を行うに際しては、中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻の学生諸君から協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、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) 及び (独)科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査報告書（平成 23 年度災害査定資料整理）, 2012.12.
- 2) 水上邦夫：東日本大震災によせて一水槽の被害一、(社)埼玉建築設計監理協会会報, pp.10-15, No.110, 2012.3.
- 3) (社)リビングアメニティ協会給水タンク委員会：東日本大震災における給水タンク調査, ALIA NEWS No.128, pp.4-9, 2012.5.
- 4) 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥村哲夫：矩形貯槽のスロッシング現象とプラスチックフィルターを用いた抑制方法, 愛知工業大学研究報告 第 47 号, pp.291-300, 2012.3.
- 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, pp.549-556, 2008. 8.
- 6) 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, 応用力学論文集, Vol16, 2013.8
- 7) 遠田豊, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次：矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 応用力学論文集, Vol15, 2012.8
- 8) 小野泰介, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次：実機貯水槽におけるスロッシング発生時の動液圧について, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表, I-19, 2013.3.

(2013. 9. 12 受付)

COUNTERMEASURES SQUARE WATER TANK AGAINST SLOSHING PHENOMENON

Ryuta SONE, Ryo SHIONOYA, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

The purpose of this research is to practicalize countermeasure for square water tank against sloshing. In this paper, proposes a new floating-style countermeasure device against sloshing, installs it in a model, and proves its performance through experiments. But if this device is installed, it may be worried about appearance of the different mode of vibration. Thus, we verified that, and, in that case, which form of device is the best. As a result of a series of experience, we find out that this new floating-style device as same as fixed -style device at control of sloshing, and optimal form of device.