

矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討

Countermeasures for Rectangular-Section Water Tank against Sloshing Phenomenon

曾根 龍太*・小野 泰介*・井田 剛史**・平野 廣和***・佐藤 尚次****

Ryuta SONE, Taisuke ONO, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

*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)

**博士 (工学) (株)十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之 516)

***工博 中央大学総合政策学部 教授 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

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

In the 2011 Tohoku earthquake, many water tanks were destroyed in the Tohoku region. In addition, similar damages in the Kanto region are reported, that is far from the epicenter. It is considered that the damage was caused by the sloshing phenomenon occurred by long-period ground motion. Damages by sloshing occurred a lot in the past, but will also arise in near future. This research proposes a countermeasure device against sloshing, installs it in a small model and a real water tank, and proves its performance through experiments.

Key Words : *sloshing, real scale tank, rectangular section, direction angle*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、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製の矩形断面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¹⁾。これらの被害は、震源に近い宮城県栗原市や仙台市周辺のみならず、200km以上離れた茨城県つくば市でも被害が生じた。著者らの研究グループの調査²⁾では、一次避難場所として指定されていた仙台市太白区の市立富沢中学校では、地上に設置されたFRP製の矩形断面貯水槽の破壊により生活用水を使うことができなくなった。このため手洗い、洗面、歯磨き等の日常の衛生面での水の使用ができなくなり、感染症の発生が懸念されるに至った。そのため1,200名余りの避難者の生活に甚大な影響を与えた。

ところで、この種の矩形断面貯水槽の被害は、兵庫県南部地震を初めとして能登半島沖地震、新潟県中越地震、同中越沖地震でも発生しており^{3),4)}、直下型地震、海溝型地震に問わずに発生する事例である。よって、矩形断面貯水槽のスロッシング制振対策の検討が必要である。

各種容器におけるスロッシング対策は、これまで様々な検討が行われており、この中で自由表面

を有する矩形断面では抵抗板を利用する方法^{5)~7)}が代表的な方法である。この方法は流れ場を直接コントロールする方法であり、機械的な要素が無く単純かつ安定した制振効果が期待できる。例えば自由表面付近に側壁から水平に抵抗板を設置したもの、鉛直方向に抵抗板を配置してここで生じる渦により減衰効果を得るものなどがある。しかし、これらは新設の貯水槽には設置し易いが、既存の貯水槽に設置する場合は、法的に義務付けられている内部の定期清掃の方法など十分に検討しなくてはならない課題が残っている。さらにスロッシング対策として制振装置を貯水槽に適用する場合、上水を扱う場合が多いため衛生面から適用できる材料が限定されること、また既設の水槽内への設置では狭空間での現地施工の課題等がある。

これらの矩形断面貯水槽のスロッシング制振対策の課題を解決するために、著者ら⁸⁾の研究グループは、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⁹⁾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。ここで、矩形断面貯水槽の特徴は、加振方向角を変化させてもスロッシングの固有振動数は変化しないが、加振方向角によっては隅角部に波が集中し、スロッシング挙動そのものが異なることが報告されている^{10),11)}。そのため、加振方

向角をパラメータとした検討が必要となる。

以上のことから本論の目的は、矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策であり、それを実現するために、まず加振方向角とそれに対する最適な制振装置配置等の条件を基礎的に把握する必要がある。そのため、予め小型モデル実験で確認し、実機実験で検証するのが妥当と判断した。具体的には、まずアクリル製の小型容器を使用した実験によりスロッシング制振対策の方法を検討し、併せて制振装置の最適な設置位置を掴む。これらの結果をもとに実際に貯水槽として使われているステンレス製パネル式タンクに制振装置を設置し、この貯水槽を大型振動台に設置して振動実験を行い、制振装置の性能を検証・確認するものである。さらに、制振装置を既存の貯水槽に設置することを前提とし、ここでの施工性、衛生面、経済性等の諸条件を加味して検討を行うこととする。

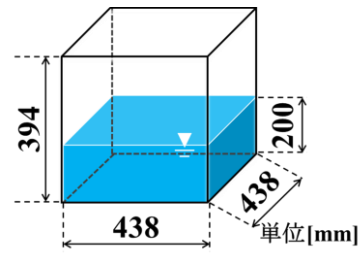


図-1 小型モデルの概略

表-1 スロッシング n 次モード振動数理論値¹²⁾

水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
200	438	1.26	2.31

表-2 振動実験装置の設定条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	加振時間[s]
1.3, 2.3	±3	5

表-3 金網の諸元 (JIS G3555)

開口率[%]	56.0	60.8	71.0	76.4
線径[mm]	1.60	1.40	1.00	0.80
目合い[mm]	4.75	4.95	5.35	5.55

2. 小型容器モデルでの検討

2.1 実験パラメータの設定

アクリル製の正方形断面小型容器モデル(以下、小型モデル)に金網で製作した制振装置を設置し、スロッシング発生時における波高の減衰挙動の把握を行う。実験に使用する小型モデルの寸法は、図-1 に示す様に内側部 438×438×394mm であり、この小型モデルに水深 200mm まで水を入れ、本学所有の小型振動台に設置して加振実験を行う。小型振動台の諸元は、テーブルサイズ 1,050×1,130mm、搭載荷重 5.39kN、最大変位±51mm、振動数範囲 0.5~100Hz である。

加振条件は、スロッシング発生時に波高が最も大きくなることから、入力振動数とスロッシング固有振動数が一致して共振した場合とする。具体的には、矩形水槽のスロッシング n 次モード振動数を式(1)の Housner の式¹²⁾で表すことができるため、これを用いて条件の設定を行う。

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

ここで、 f_n はスロッシング n 次固有振動数(以下、理論値とする)、 g は重力加速度、 L は容器の幅、 H は水深である。式(1)より、実験で用いる正方形断面容器のスロッシング 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 1.26Hz、2.31Hz となる。

次に振動実験装置の設定条件を表-2 に示す。加

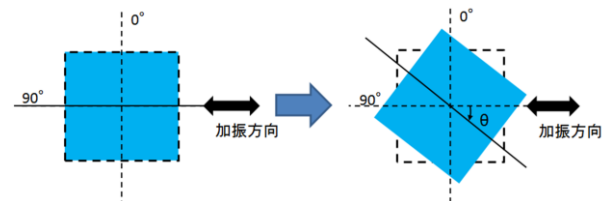


図-2 小型モデルの加振方向角の設定方法

振振動数は 1 次モードで 1.3Hz、2 次モードで 2.3Hz の正弦波加振とし、加振振幅は±3mm、加振時間は 5 秒とする。これは、小型振動台の設定振動数の最小間隔が 0.1Hz であること、また非制振時に液体が容器から溢流しないように著者らの既往の実験で検討した値⁸⁾である。

本研究では、加振方向角を変化させながら正弦波加振実験を行い、最大波高を計測して制振効果の違いを調べることにする。そのために、正方形容器を加振する方向角 θ は図-2 の様に定義し、 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ の間で 15° 間隔で設定している。

2.2 制振装置

小型モデル実験で用いる金網は、十分な剛性を有する亜鉛引織金網であり、JIS G3555 で規定されたものを使用する。表-3 に金網の諸元を示す。ここでの金網の開口率は、各々 56.0%、60.8%、71.0%、76.4% の 4 種類であり、既往の実験結果⁸⁾を踏まえて採用した。

金網の配置は、図-3(b)に示すように水槽を 2 等分する位置に一枚配置する場合、図-3(c)に示すよ

うに十字型に配置する場合の2種類の配置方法とする。この配置方法をそれぞれ一枚型、十字型と定義し、この金網をL字アングルで水槽に固定し設置する。写真-1に十字型の金網を設置した状態の実験状況を示す。

2.3 計測項目

波高の計測は、(株)キーエンス社製のレーザ式非接触変位計 IL600 (以下、変位計)を用いる。測定位置は、波高が最も高くなる隅角部に近いこと、かつ測定対象物が壁面に干渉することを防ぐ必要があることから、写真-2に示す隅角部壁面から10mmの地点とした。ここに測定対象物として発泡スチロール板を設置する。この板の中心に穴を開け、底面と容器天井部に渡したワイヤーを通すことで測定対象物が上下のみ動くようにし、測定地点から離れることを防止している。変位計は容器上部に固定用の金属板を介して設置する。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。

本実験では、開口率の異なる4種類の金網を図-3(b), (c)に示すように一枚型と十字型2つの配置とし、これを組み合わせた全8状態の制振対策を検証する。そこで図-3(a)に示す非制振の場合と、その最大波高および減衰定数の比較を行うこととする。この時使用したデータは、加振終了後に波が自由減衰振動となってからのデータとする。

2.4 実験結果

(1) 1次モードの検討

図-4の無次元最大波高は、各モードの非制振時に加振方向角を 0° に設定して加振した場合の最大波高を1.0として無次元化したものである。また、加振実験は加振方向角毎に2回ずつ行い、その平均を求めることとする。図-4(a), (b)に1次モードの各加振方向角における最大波高、図-5(a), (b)に1次モードの各加振方向角における減衰定数を示す。1次モードの波高は、加振終了直後に最も高くなるためこれを最大波高とする。

図-4(a)に示す一枚型の場合は、金網の開口率が小さいほど最大波高が減少し、より高い制振効果が得られることがわかる。図-5(a)に示す一枚型の減衰定数に関しては、非制振の場合0.003でほぼ

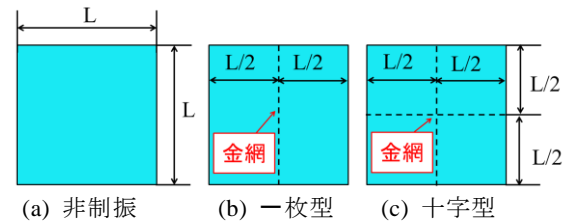


図-3 金網設置位置 (容器上部から見た場合)

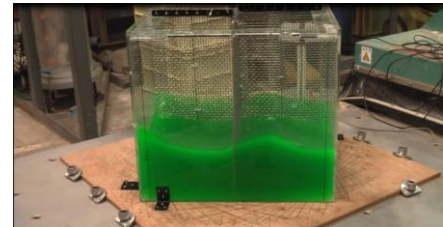


写真-1 実験の状況 (十字型の金網を設置)

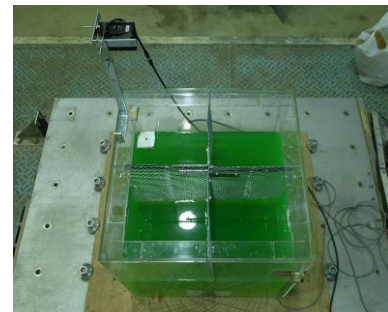


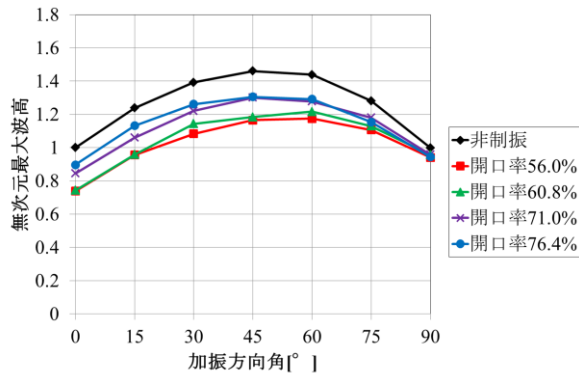
写真-2 変位センサと測定対象物設置状況

一定であるが、開口率が最小の56.0%の金網を使用した場合に0.004~0.011に増加している。ただし、加振方向角が 90° に近づくにつれて減衰定数は小さくなる傾向にある。このように一枚型の場合、加振方向角 90° の場合において顕著な制振効果が認められなくなり、限られた条件の下でしか制振効果を得られていない。よって、一枚型の場合、開口率を小さくすることで波高が抑えられるが、加振方向角 90° の場合において制振効果が認められない。

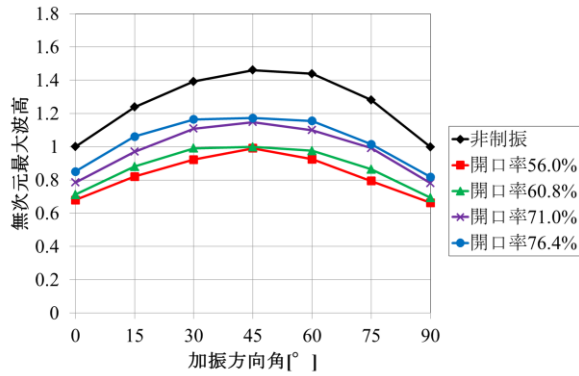
これに対して図-4(b)に示す十字型は、開口率が最も大きい76.4%の金網を使用した場合でも、非制振の場合と比較して最大波高が10~40%低減されている。開口率56.0%ではさらに制振効果が大きくなり、波高が35~50%低減されている。図-5(b)に示す減衰定数に関しては、開口率が最小である56.0%の金網を使用した場合に0.011~0.012となり、非制振時と比較しておおよそ4倍に増加させることができ、いずれの加振方向角においても制振効果が得られることがわかる。

(2) 2次モードの検討

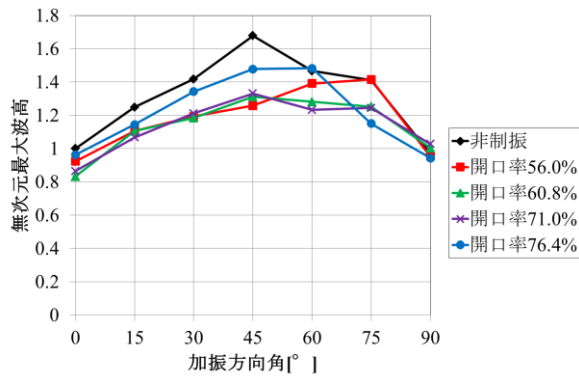
図-4(c), (d)に2次モードの各加振方向角におけ



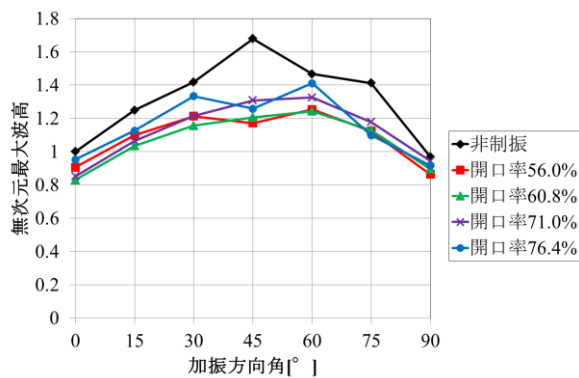
(a) 1次モード 一枚型配置



(b) 1次モード 十字型配置

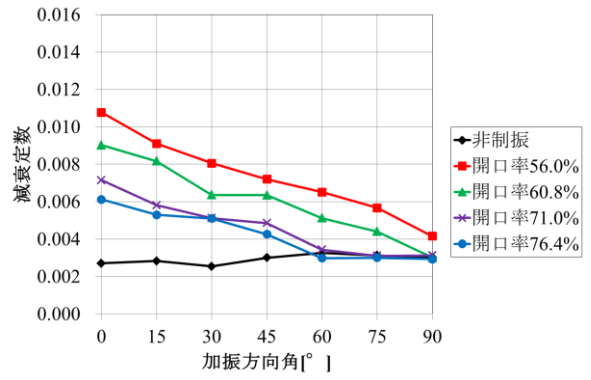


(c) 2次モード 一枚型配置

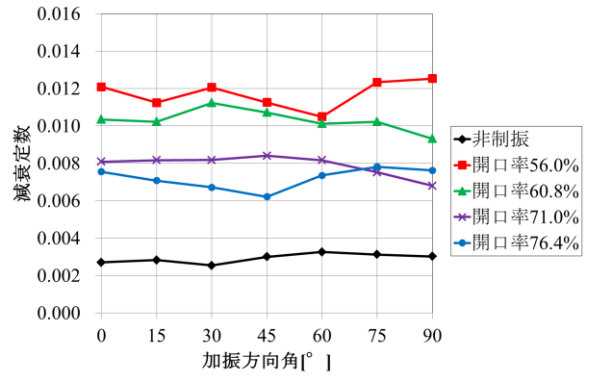


(d) 2次モード 十字型配置

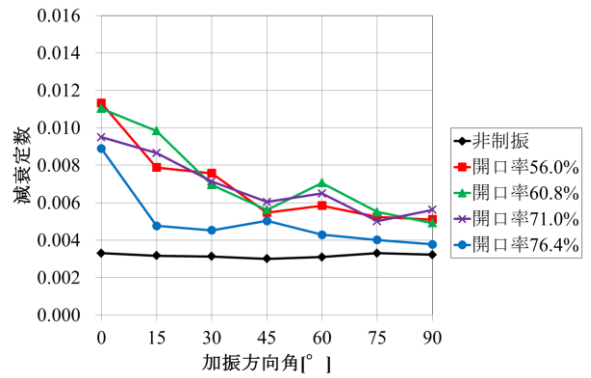
図-4 加振方向角毎の無次元最大波高



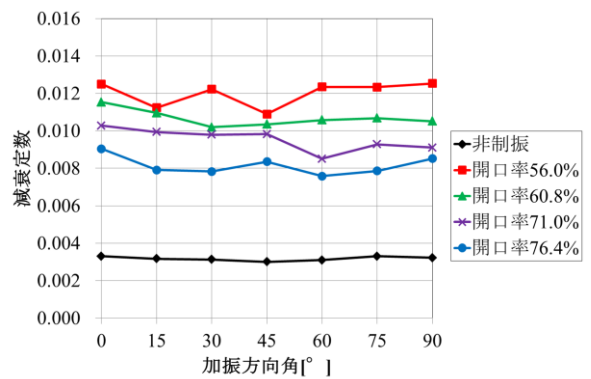
(a) 1次モード 一枚型配置



(b) 1次モード 十字型配置



(c) 2次モード 一枚型配置



(d) 2次モード 十字型配置

図-5 加振方向角毎の減衰定数

る無次元最大波高，**図-5(c), (d)**に 2 次モードの各加振方向角における減衰定数を示す．2 次モードの波高は，加振終了時から平面方向に回転運動するスロッシング現象¹³⁾が生じて，ビート状態となり複数回の最大値を示す．また，その値は 1 次モードより大きな値となっている．

次に加振方向角を変化させた場合は，加振方向角 45° において波高の値は最大となる．遠田ら¹¹⁾によれば，加振方向角が変化すると液面形状，スロッシング挙動に影響を及ぼし，さらに回転する挙動が促されて波高が増大すると指摘している．

図-4(c), (d)に示す制振効果は，1 次モード同様に十字型，開口率 56.0%の場合が最大となり，非制振の場合と比較すると波高が 40～65%低減されている．**図-5(c), (d)**に示す減衰定数に関しては，非制振時に減衰定数 0.003 程度であるが，十字型で 56.0%の金網を使用した場合に 0.011～0.012 に増加させることができる．ただし，一枚型に関しては 1 次モード同様に加振方向角が大きくなるにつれて，制振効果が小さくなっていく．

以上の様に 2 次モードに対する制振効果は 1 次モードと同様に，一枚型の効果は限定的なものであるのに対し，十字型はいずれの加振方向角においても効果が得られることがわかる．

2.5 まとめ

小型モデルでの実験結果から，開口率が小さくなるほど，流速を抑制して波高を低減する効果が大きくなることがわかった．また形状については，金網を一枚配置する場合，加振方向角 45° 以降では波高を低減する効果が小さく，加振方向角 90° においてはその効果が最小となることを確認した．その原因としては，加振方向角が変化すると，金網を通過する水の量が変化し，加振方向角 90° においては，加振方向と平行に金網が配置された状態になるので，水が金網を通過せず，抵抗力が得られないためと考えられる．それに対して十字型に配置した場合は，いずれの加振方向角においても水が金網を通過することになるため，波高を低減することができる．開口率が最小の網を十字型に配置することで，最大波高は 1 次モード 35～50%，2 次モード 40～65%低減されることが確認でき，減衰定数も 1 次モードおよび 2 次モードにおいて 0.011～0.012 に増加させることができる．以上の結果から，制振装置の配置は十字型配置とし，実機の制振対策に適用することとする．

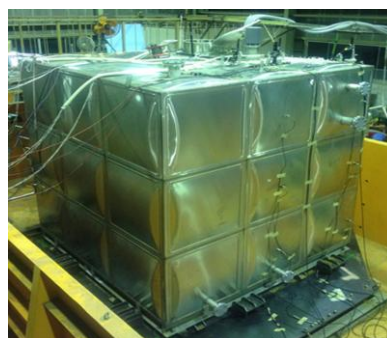


写真-3 実機貯水槽（ステンレス製パネル式）

3. 実機貯水槽での検討

3.1 ステンレス製パネル式タンク

実機貯水槽での検討は，**写真-3**に示す様な，一般的に広く使用されている $3,000 \times 3,000 \times 3,000$ mm のステンレス製パネル式タンク（以下，実機タンク）を用いる．実機タンクの板厚は天板と側板上段が 1.5mm，側板中段が 1.5mm，側板下段と底板が 2.0mm である．これに通常使用されている時の水位である水深 2,700mm まで水道水を入れる．

3.2 実験パラメータの設定

振動台は，愛知工業大学所有の大型振動実験装置を使用する．大型振動台の諸元は，テーブルサイズ $6,000 \times 10,000$ mm，搭載荷重 1,500kN，最大変位 ± 20 mm，振動数範囲 DC～50Hz である．この振動台で設定できるパラメータは，振動数と振幅の 2 つであり，振幅を設定するアナログ式のダイヤルを手動で調節することで，振幅と加振時間とを設定する．ここで加振時間は，加振立上，定常加振，加振収束までの時間とする．加振は大型油圧ジャッキを用いて，実機タンクを設置した振動台を水平方向から正弦波を外力として変位制御することで行う．そこで振動台に入力された波形を詳細に把握することを目的として，接触式の変位計を設置している．

実験で用いる実機タンクにおけるスロッシング 1 次，2 次モード固有振動数の理論値は，式(1)より **表-4**に示すように 0.50Hz，0.88Hz となる．ここでは，後述するスロッシング固有振動数の確認結果から，実際の加振振動数は**表-5**に示すように 1 次モードでは 0.49Hz，2 次モードでは 0.87Hz とする．加振の手順は，**図-6**に示すようにまず加振立上として徐々に振幅を大きくしていき，定常加振振幅 ± 3.0 mm に到達してからの定常加振を 10 秒間に統一して行い，その後加振収束を行う．これは，波が大きくなり実機タンクの天井等に当た

ること減衰が加味されるので、それを避けるためにこの値とする。この設定条件における加振時の加速度は、1次モードでは3Gal相当、2次モードでは9Gal相当となり、小さな加速度で加振実験を行うこととなる。

実機タンクを加振する方向角 θ は、小型モデルと同様に図-2のように定義し、 $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ の間で 15° 間隔で設定する。本実験では、加振方向角を変化させながら加振実験を行い、最大波高を計測してスロッシング制振効果の違いを調べることとする。

3.3 計測項目

波高計測には、図-7に示すように変位計を①～④の4台用い、実機タンクの上面に設置する。変位計の設置の狙いは、変位計①は隅角部での波高、変位計③は壁面付近での波高、変位計②、④は2次モードでの腹（山と谷）になる部分の波高を把握するために設置する。変位計のターゲットは、実機タンクの天井から床面まで張ったワイヤーに発泡スチロール板を通したものをを用いる。さらに、実機タンク内部のスロッシング挙動を把握するために、図-7に示すように実機タンクの中心から壁面方向と隅角部方向を撮影するためのWebカメラを2台設置する。

減衰定数は前章と同様に式(2)より得られる減衰曲線を参照することにより算出する。

3.4 制振方法の検討

小型モデルで適用した制振対策を実機タンクに適用することを検討する。まず、実機タンクに適用するに際し考慮すべきことは、上水（飲料水）を対象とするため、耐塩素性と使用する材料の成分が水に溶け出さない非抽出性が必須である。また、既存の実機タンクにも取り付けられることを考慮すると、直径600mm程度のマンホールからの制振装置の出し入れ、法律で定められた年1回の定期清掃を容易に行えること等の条件がある。そのため、小型モデルで使用してきた金網は利用できない。これらの条件を加味した上でさらに経済性、施工性を有する材料の選定が必要となる。

そこで、本実験では、伸縮性と耐塩素性等を有し、広く一般に入手可能な床暖房等の配管に用いられる樹脂製チューブ（架橋ポリエチレン製、硬さA90、引張強さ22MPa、破断時伸び430%、直径12.2mm）を採用する。これを写真-4に示すようにL字アングルで組んだ1,000mm四方のフレームに網目状に固定し1つのユニットとする。なお、

表-4 スロッシング n 次モード振動数理論値

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-5 振動装置の設定条件

振動数[Hz]	振幅[mm]	定常加振時間[s]
0.49, 0.87	± 3	10

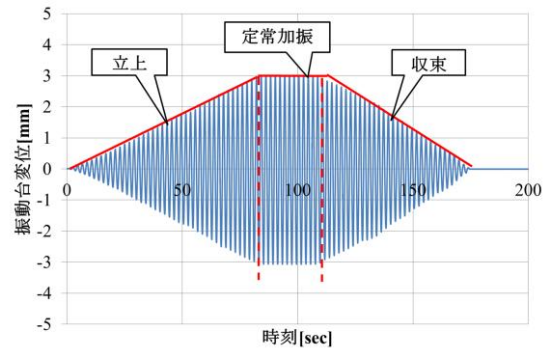


図-6 変位制御の方法

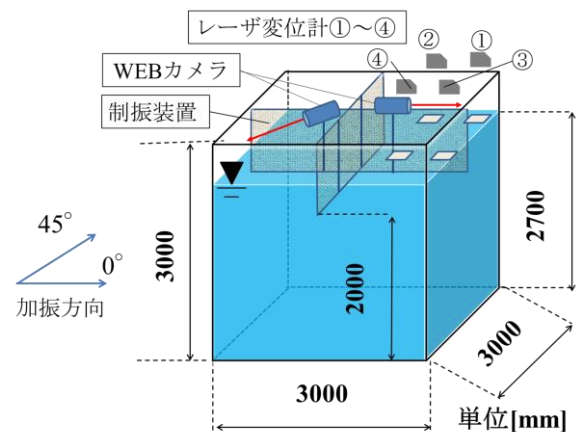


図-7 レーザ変位計とwebカメラの設置位置

今回は実験段階であるので、鉄製のアングル材をフレームに使用したが、製品化するためにはこれも樹脂製に置き換える予定である。

本実験ではこのユニット一方向あたり3枚を十字に合計6枚を図-8の鳥瞰図に示すように実機タンク上部に設置し、制振装置とする。これを実機タンク内部にある補剛材に取り付け、天井部から1/3の地点の所までとし、一方向あたり幅3,000mm、高さ1,000mmとする。なお、制振装置を実機タンク上部に設置する理由は、既往の研究¹⁴⁾から、材料の費用と制振効果のバランスを考慮した場合、実機タンク底部まで制振装置を設置することが必ずしも得策とは言えず、実機タンクの水面付近に設置することで必要とされる制振効果が十分に得られるためである。これは、スロッシング挙動は水面近くの流体の運動が支配的であることによる。

表-6 制振装置の開口率

	線径	ピッチ	開口率
制振1	12.2mm	20mm	15.4%
制振2	12.2mm	40mm	46.8%



写真-4 制振装置 (1 パネル分 1,000×1,000mm)

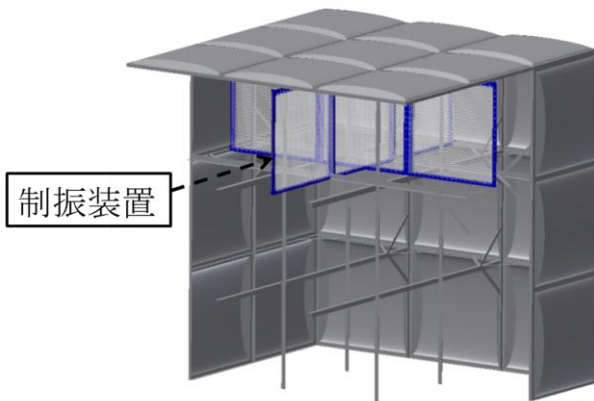


図-8 実機タンク制振装置配置図(天井部から 1/3)

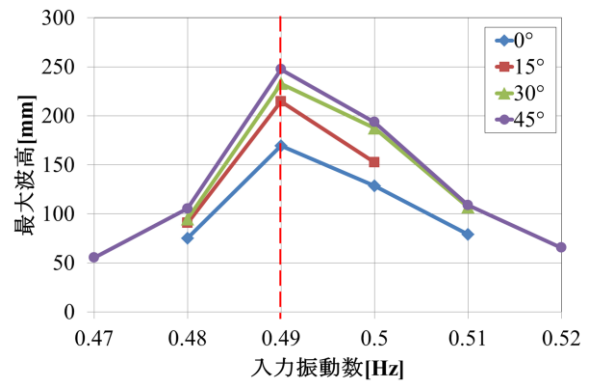
制振材料のチューブ同士の間隔は表-6 に示す様に2つの状態とし、各々について検証する。樹脂チューブを20mmピッチで格子状に取り付けた場合を制振1、40mmピッチで取り付けた場合を制振2とする。各々の網目の開口率は、制振1は15.4%、制振2は46.8%である。

3.5 実験結果

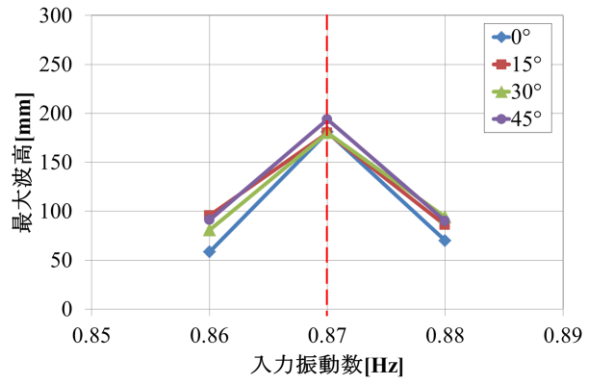
変位計より取得したデータから最大波高と減衰定数を算出し、非制振の場合と制振対策後について比較を行う。波高は波が集中する容器隅角部が最も高くなり、その最大値を最大波高とする。

(1)スロッシング固有振動数の確認

図-9の(a)に1次モード、(b)に2次モードの各加振方向角における入力振動数と最大波高の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の値を示した変位計の値を用いる。



(a)1次モード



(b)2次モード

図-9 入力振動数と最大波高の関係

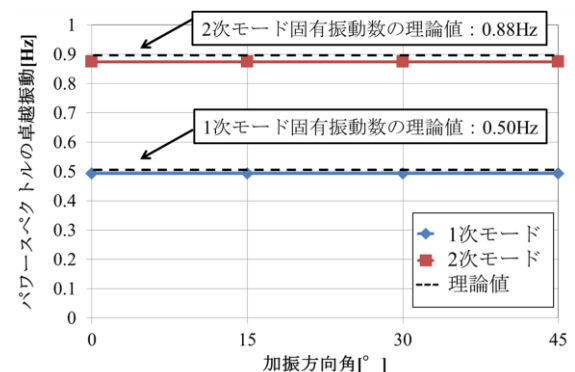


図-10 1次、2次モードの卓越振動数

図-9より、いずれの加振方向角においても1次モードでは0.49Hz、2次モードでは0.87Hzにおいて最大波高が卓越している。タンクの1次、2次モードの理論値はそれぞれ0.50Hz、0.88Hzであるので、タンクのスロッシング固有振動数は理論値とほぼ一致している。

また、図-10に1次、2次モードの各加振方向角におけるパワースペクトルの卓越振動数を示す。パワースペクトルの卓越振動数は、内容液が加振終了後に自由減衰振動になってからの応答波形より算出した。ここで、式(1)よりスロッシング固有振動数は、容器の幅と水深に依存している。図-10より、加振方向角が変化することで、加振軸上の

容器の幅は変化するが、タンクのスロッシング固有振動数は加振軸上の容器の幅に依存せず、ほぼ一定の値を取っていることが確認できる。

(2) 1次モードの検討

図-11に1次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を示す。隅角部の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とが確認できる。これは、加振方向角の増大に伴い隅角部に波が集中するためである。波高が最大となる非制振、加振方向角45°の場合は最大波高が247.4mmであるが、制振1では120.1mm、制振2では168.8mmに最大波高が低減されている。制振装置設置後は、非制振と比較して加振方向角の有無に依存せず、制振1では60%程度、制振2では30%程度の低減率で波高が抑制されていることが確認できる。

図-12に1次モードの各加振方向角における減衰定数を示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほぼ一定の値となる。非制振時でおおむね0.005であるが、制振1では0.010~0.012と非制振時の約2倍、制振2では0.007~0.008と非制振時の約1.6倍に増加させることができる。

(3) 2次モードの検討

図-13に2次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を示す。隅角部の最大波高は、加振方向角の違いによる影響は1次モードの様に顕著には表れず、わずかであった。対策後は、いずれの加振方向角に対しても効果があり、制振1では非制振時の60~80%、制振2では40~60%の低減率で波高が抑制されていることがわかる。

図-14に2次モードの各加振方向角における減衰定数を示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほぼ一定の値となる。非制振時では減衰定数が0.001~0.002である。制振1では0.007~0.008、制振2では0.005~0.006に減衰定数を増加させることができる。

3.6 制振効果の比較

図-15に1次モード0.49Hz加振、図-16に2次モード0.87Hz加振における非制振、制振1、制振2の場合の加振開始か減衰に至るまでの300秒間の波形を示す。ここで、(a)は加振方向角0°、(b)は加振方向角15°、(c)は加振方向角30°、(d)は加振方向角45°の波形である。

振動台の振動制御は、前述の様に手動で連続的に行っているために、それぞれの加振条件を同一

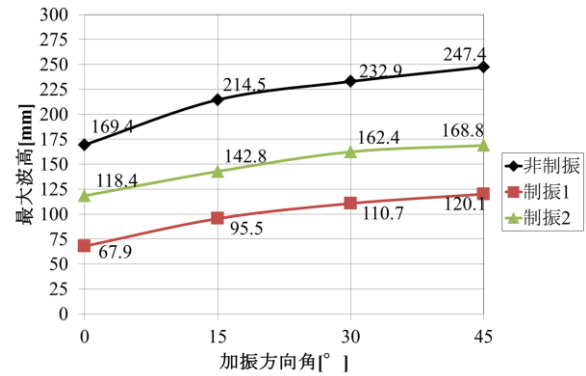


図-11 最大波高 (1次モード, 隅角部)

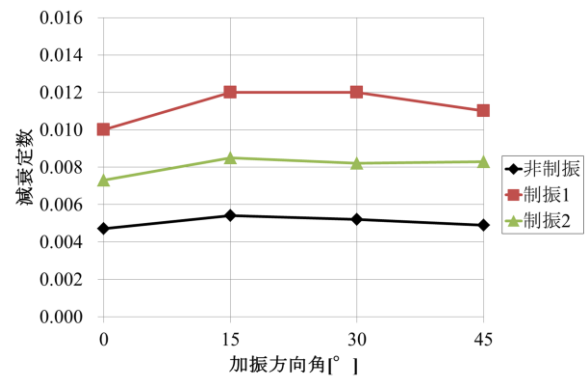


図-12 減衰定数 (1次モード, 隅角部)

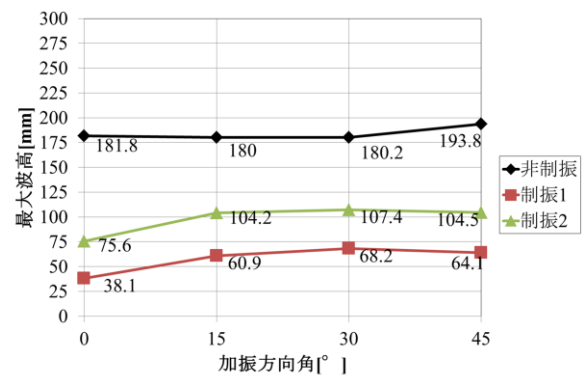


図-13 最大波高 (2次モード, 隅角部)

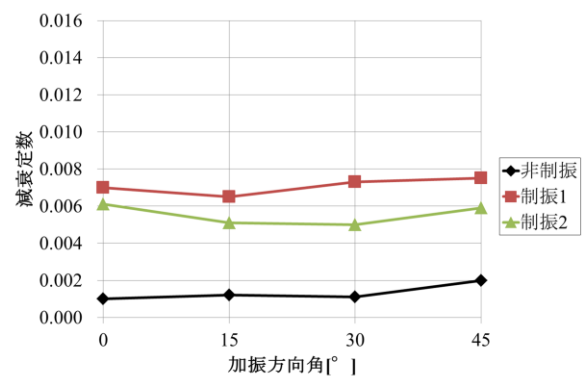
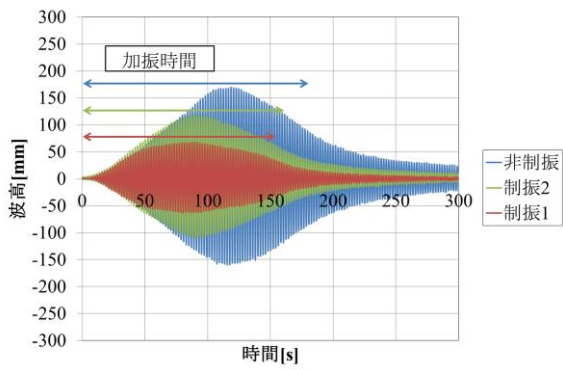
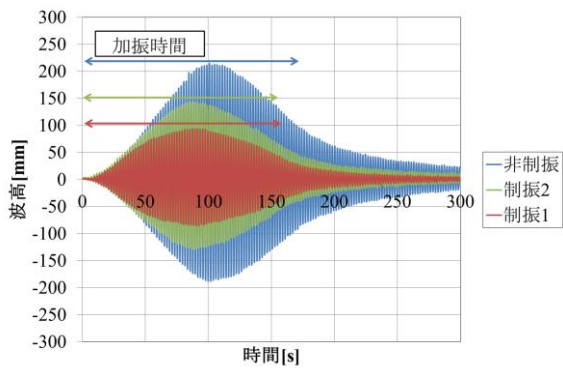


図-14 減衰定数 (2次モード, 隅角部)

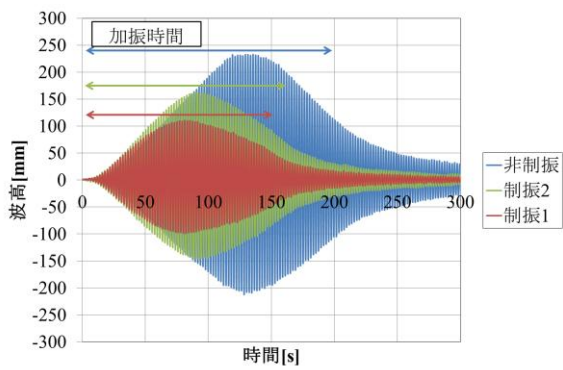
にすることができない。そのため定量的な比較は難しいが、制振効果を定性的に確認するために一



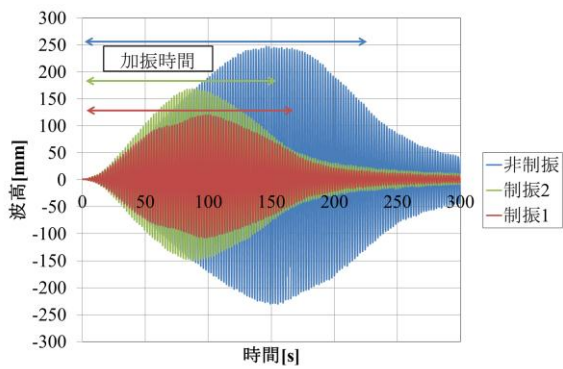
(a) 加振方向角 0°



(b) 加振方向角 15°

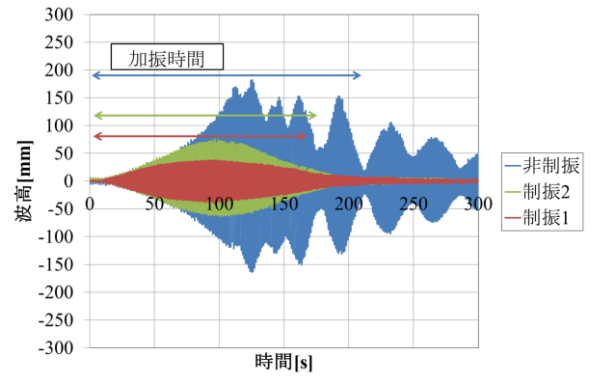


(c) 加振方向角 30°

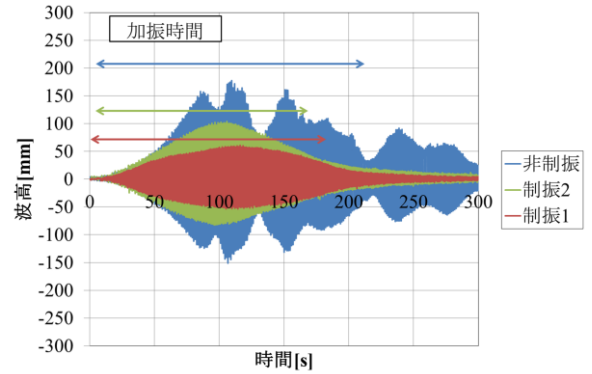


(d) 加振方向角 45°

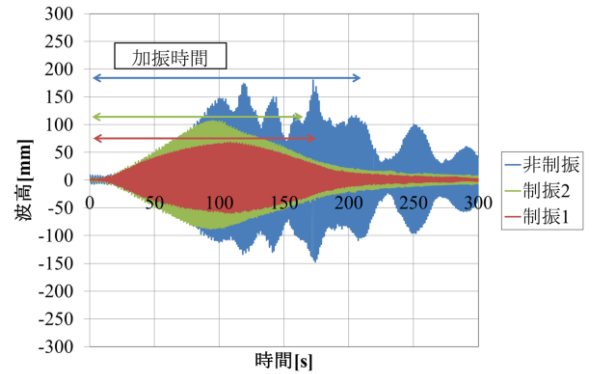
図-15 加振開始から減衰までの波高
(1次モード, 隅角部)



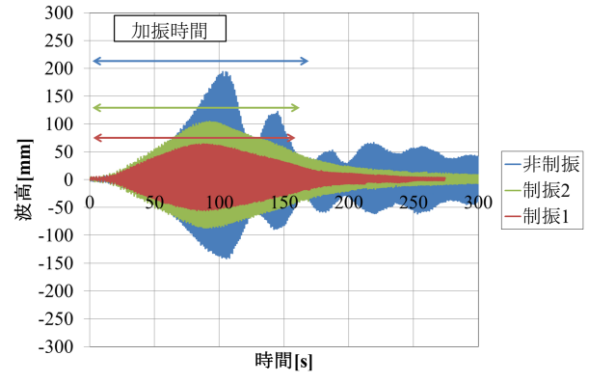
(a) 加振方向角 0°



(b) 加振方向角 15°



(c) 加振方向角 30°



(d) 加振方向角 45°

図-16 加振開始から減衰までの波高
(2次モード, 隅角部)

つの図面上に表現する。これより、制振装置を設置することでどの加振振幅においても1次、2次モードともに最大波高を低減させることができる。さらに、開口率が小さいほど最大波高が低減されている。

ところで、2次モードの非制振時は、いずれの加振方向角においても加振中に波高が徐々に増加し、自由振動となってからは平面方向に回転運動するスロッシング現象¹³⁾が生じるので、ビートを打ちながら減衰している。これに対して、制振装置を設置した場合は、いずれの加振方向角においても波高が低減され、回転挙動が抑制されることによって、波形はビートを打つことなく収束している。これは、制振装置を付けることで、加振開始時から制振効果を発揮し、波高が大きくなる前から制振効果を得られているためと考える。スロッシング現象は、小さな加振エネルギーでもこれが繰り返して生じることにより大きな波高となっていく。そのために加振時から制振することが、スロッシングの波高を抑えるために効果的であると考えられる。

4. おわりに

本論文は、まず小型モデルを使用して、この中に金網で製作した制振装置を設置し、加振方向角を変化させながら振動実験を行い、スロッシング制振対策を検討した。

この結果より、制振装置として使用する金網の開口率は、小さい方が波高の減少と減衰定数の増加がみられ、スロッシング制振対策としてより大きな効果が得られることがわかった。さらに、金網の配置方法は、一枚型を使用した場合には限定的な加振方向角においてのみスロッシング制振効果があるのに対して、十字型を使用した場合は、いずれの加振方向角に対しても波高の減少と減衰定数の増加により、スロッシング制振効果があることがわかった。開口率が最小の網を十字型に配置することで、最大波高は1次モード35~50%、2次モード40~65%低減された。また、減衰定数は1次モードおよび2次モードで3.7~4.0倍に増加させることができた。以上の結果から、制振装置の配置は十字型配置とし、実機の制振対策に適用することとした。

上記の結果を基にして実機タンクを用いて同様の加振実験を行った。ここでは制振装置を実機タンクに十字型でかつ天井部から1/3の所までに配

置してスロッシング制振対策の検討を行った。

この結果より、どの実験状態においても非制振時と比較して最大波高の低減ならびに減衰定数の増加を得ることができた。最大波高は、1次モードでは非制振と比較して制振1では60%程度、制振2では30%程度低減し、2次モードでは、同じく制振1では60~80%、制振2では40~60%低減した。減衰定数は、1次モードでは非制振と比較して制振1では2.0倍程度、制振2では1.6倍程度となり、2次モードでは、同じく制振1では3.5倍以上、制振2では2.5倍以上となった。これにより、本論で提案したスロッシングの制振装置を設置することで、どの加振方向においても1次、2次モードともに最大波高の低減と減衰率の増加を得ることができた。

以上より、本論では小型モデルと実機タンクを用いた加振実験を行うことで、正方形断面容器におけるスロッシング制振対策の検討を行うことができた。小型モデル実験と実機タンクを用いた加振実験ともに制振装置の配置を十字型とすることで、加振方向角の変化に関わらず制振効果があることを確認した。また、制振装置を付けたことで、加振開始時から制振効果を発揮し、波高が大きくなる前から制振効果を得られている。特にこれは2次モードの時に顕著である。

今後の課題としては、実機タンクへの施工性の向上と、経済性を考慮した設計の最適化を行うことである。特に法律で義務付けられた年1回の定期清掃を行う場合への対応である。さらに、本研究では、矩形断面貯水槽としてステンレス製パネル式タンクを用いたが、同様な貯水槽はFRP製パネル式タンクや鋼製一体型タンク等がある。これら各種タンクに対応した設置方法や施工方法等を経済性の面からも併せて検討した上で、本研究で提案した制振装置を実用化することである。

謝 辞

本研究を行うに際し、愛知工業大学都市環境学科、奥村哲夫教授及び鈴木森晶教授の協力を得た。また、(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、中央大学理工学部都市環境学科及び同大学院理工学研究科土木工学専攻と愛知工業大学都市環境学科及び同大学院工学研究科建設システム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 (C) 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) (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.
- 2) 遠田豊, 曾根龍太, 小野泰介, 井田剛史, 平野廣和：実機貯水槽を用いたスロッシング挙動の把握, 防衛施設学会年次フォーラム 2013, B-3, 2013.2.
- 3) 能島暢呂: 脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価～上水道配水管網への適用～, 地域安全学会論文集 Vol.10, pp.137-146, 2008.1.
- 4) 村田幸一, 水崎洋佑, 宮島昌克: 上水道配水システムの地震時異常挙動解明のための受水槽のスロッシング解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1752-1757, 2010.8.
- 5) 渡辺昌宏, 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.204-211, 2001.5.
- 6) 小林信之, 小山祐輔: 隔壁を用いた容器内液スロッシングのセミアクティブ制振制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 74 巻 737 号, pp.52-59,2008.1.
- 7) 浦田喜彦:水平抑制板を用いたスロッシングの抑制法(長方形タンクにおける基本的検討), 日本機械学会論文集 (C 編) 67 巻 657 号, pp.50-57, 2009.1.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥村哲夫, 佐口浩一郎: 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, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号 Vol.15, pp.785-794, 2012.8.
- 11) 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, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, Vol.15, pp637-644, 2012.8.
- 12) G.W.Housner: The Dynamic Behavior of Water Tank, Bulletin of The Seismological Society of America. Vol.53, 1963.
- 13) 荒井誠, Liang-Yee CHENG, 井上義行: 立方体および円筒タンクのスロッシングとスワーリングの数値解析, 関西造船学会誌 第 219 号, pp.97-101, 1993.3.
- 14) 井田剛史, 勝井達也, 平野廣和, 連重俊: 受水槽のスロッシング被害を想定した制振装置検討のための基礎的実験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I -437, 2012.9.

(2013 年 3 月 18 日受付)