

# 矩形型貯水槽の耐震性能向上を目的とした手法に関する実験的研究

An experimental study on the technique aimed at upgrading seismic performance of rectangular tank

黒田 亮<sup>†</sup>, 青木 大祐<sup>††</sup>, 鈴木 森晶<sup>†††</sup>  
Ryo Kuroda, Daisuke Aoki, Moriaki Suzuki

**Abstract** It has been reported that many cases of damages at the rectangular water tanks in the water supply facilities, under Tohoku earthquake. These kinds of damages are reported to be caused by sloshing which is risen by long period earthquake. To prevent these damages of the rectangular water tank, an experiment at study of the damping filter which can decrease the sloshing wave, have been installed inside the real scale water tank have performed. But some water tanks could not install the filter in proper position. In this study, the relationship between the filter position and effect of the damping of sloshing wave have examined. And the most effective filter position has investigated in a small rectangular water tank model then confirm the effect of damping of sloshing wave in the real scale water tank.

## 1. はじめに

我が国では2011年に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)において、水道施設や病院、学校などにあるSUS製やFRP製の矩形型貯水槽(以下、貯水槽)に破損が多く発生したことが報告されている<sup>1)</sup>。例えば、日本給水タンク工業会の調査においては、1034基のFRP製貯水槽の被害調査依頼があり、そのうち136基(全体の13%)がパネルなどの破損により貯水機能を確保できない状態であった。また、破損した136基の内114基が旧耐震設計基準の貯水槽であることから、十分な耐震性能を有していない貯水槽が数多く存在していることもわかった<sup>2)</sup>。将来、巨大地震である東海地震、南海地震および南海地震の発生が予想されており、旧耐震設計基準の貯水槽の耐震性能を向上させる手法の検討は急務である<sup>3,4)</sup>。

矩形型貯水槽の破損メカニズムは未だに明らかにされてはいないが、平野らが指摘している地震動により貯水槽の内容液が共振してその表面が激しく上下動するスロッシング現象および箕輪らが指摘している地震動により貯水槽のパネルと内容液が連成振動し、パネル中央が大きく変形するバルジング現象が要因であると考えられている<sup>5,6)</sup>。また、1996年版のFRP水槽構造設計法(現行の耐震設計基準)に

スロッシング現象による動液圧を考慮した設計計算が含まれ、スロッシング現象を抑制する手法に対し、様々な検討が行われてきた<sup>7)</sup>。例えば、自由表面を有する矩形型貯水槽は、抵抗板(隔壁)を設置する方法が代表的である<sup>8,9)</sup>。また、平野らは樹脂製チューブを網目状に固定した装置や浮体式波動抑制装置を採用し、スロッシング現象を抑制する方法を提案している<sup>5,10)</sup>。その中で筆者らの研究グループはこれらの抑制装置の設置に際して、内容液の抜き取りが不可能な場合や、一部の内壁面にしか設置できない場合など、制約条件がある環境下を想定し、貯水槽に対するスロッシング現象を抑制する方法を検討してきた<sup>11,12)</sup>。

具体的には、フィルターを貯水槽の内壁面に設置し、最適なフィルターの設置箇所および設置厚さについての研究を行った。その結果、フィルターの設置箇所については、貯水槽の内壁面の全面に設置せず、水面付近四隅のみに設置することでも波高を効果的に抑えられることを示した。また、フィルターの厚さを増すことでもより高い波高抑制効果を得られることを明らかにした<sup>11,12)</sup>。しかし、既往の研究において検討されているスロッシング波高抑制手法は、貯水槽の内壁面に水面に対して鉛直にフィルターを設置する手法であり、既設の貯水槽においては、貯水槽の形状および内部の補強材の有無により、任意の位置や形態の設置が困難な場合が想定される。また、フィルターの設置位置および設置形態を変更させたことによる所定のスロッシング波高抑制効果が得られるかどうかは明らかにされていない。

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻  
†† 株式会社森松総合研究所  
††† 愛知工業大学 都市環境学科 土木工学専攻

そこで本研究では、簡易な方法で貯水槽の耐震性能を向上させる手法の提示をすることを目的としている。具体的には、フィルターを用いたスロッシング波高抑制手法の検討を行った。貯水槽内部の構造により、フィルター設置の制約条件が生じ、任意の位置に設置できない場合を想定し、設置位置や形態を種々変化させ、それらの効果を明らかにする。また、模型実験で得られた簡易かつ効果的にスロッシング波高を抑制できた手法が実物大の貯水槽においても同様な手法で発揮することができるのか検証する。

## 2. 貯水槽模型での検討

### 2・1 実験パラメータの設定

本研究では、フィルターの設置位置および設置形態を変更させたことにより効果的なスロッシング波高抑制効果が得られるかを明らかにする。そのため、始めに図-1に示すような模型を使用し、内壁面から中間位置まで様々な位置にフィルターを設置した場合、スロッシング波高抑制効果にどのような変化が見られるのか把握する。本研究では設置形態は水面に対して鉛直に設置する鉛直型と水平に設置する水平型を採用し、フィルターの設置位置  $d$  をパラメータとし、実験を行う。この  $d$  は図-2に示すように、加振軸方向の両側の内壁面からフィルターの厚さ(水平型の場合は幅)を含めた距離と定義する。なお、 $d=0\text{mm}$ とはフィルターを設置していない状態(非制振)であることを表す。

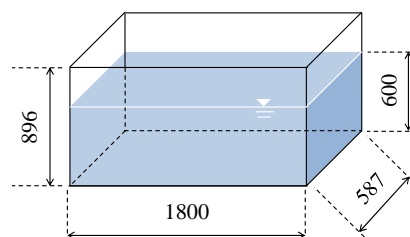
### 2・2 実験条件の設定

本実験では、図-1に示す模型に水深: $H=500\text{mm}$ または $600\text{mm}$ まで注水し、本学の耐震実験センター内の振動台に載せて加振実験を行う。

加振条件は、波高が最も大きくなるように、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、式(1)の理論式で算出したスロッシング  $n$  次モード固有振動数(以下、理論値とする)を参考にしてスイープ試験を行い、その結果を基に固有振動数を見つけ出す<sup>13)</sup>。

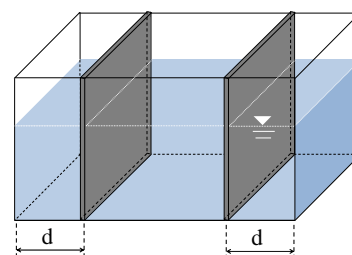
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right)} \quad (1)$$

ここで、 $f_n$ はスロッシング $n$ 次固有振動数(Hz)、 $g$ は重力加速度( $\text{m/s}^2$ )、 $L$ は模型の幅(m)、 $H$ は水深(m)である。式(1)より、実験で用いる模型のスロッシング1次・2次モード固有振動数の理論値は、 $H=600\text{mm}$ の場合、 $f_1=0.582\text{Hz}$ 、 $f_2=1.138\text{Hz}$ 、 $H=500\text{mm}$ の場合、 $f_1=0.552\text{Hz}$ 、 $f_2=1.134\text{Hz}$ となった。これらの数値を基に行ったスイープ試験により $H=600\text{mm}$ の場合、1次モード:0.580Hz、2次モード:1.130Hz、 $H=500\text{mm}$ の場合、1次モード:0.547Hz、2次モード:1.116Hz

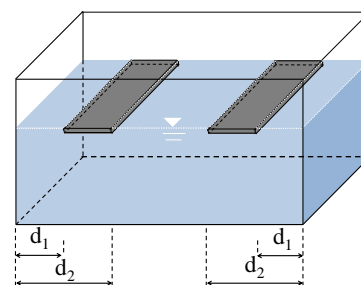


単位 [mm]

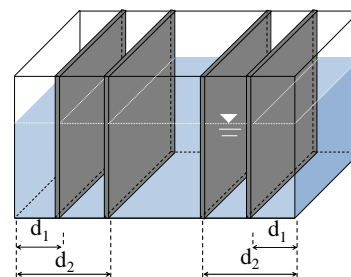
図-1 貯水槽模型の概要



(a) 鉛直型 (片面 1 枚)



(b) 水平型 (片面 1 枚)



(c) 鉛直型 (片面 2 枚)

図-2 フィルターの設置位置  $d$  の定義

となった。また、理論値と比較して、大きく差が生じていないことがわかった。よって、本実験ではスイープ試験から得られた固有振動数を入力して実験を行う。加振波形は正弦波加振とし、加振振幅  $s$  は非制振時に内容液が模型から溢流しないように設定した。本実験では、 $s = \pm 1, 2$  および  $3\text{mm}$  より選択した。加振時間は波高の最大値が更新されなくなるまでとし、本実験では40秒とした。

### 2・3 フィルターの概要

模型で用いるフィルターは、既存の貯水槽への設置を考慮し、低コストで簡単に入手することができ、設置および交換が簡便かつ衛生面に問題のない(株)吉原化工社製の「もやいドレーンマット」を採用した(写真-1参照)。

「もやいドレーンマット」は一般的にドレーン材として使用されているポリプロピレン素材の既製品である。フィルターの厚さは30mm(幅L=1800mmに対するフィルターの長さ3.3%)、フィルター長さ587mm(奥行きDに対する装置長<sup>1)</sup>100%)、空隙率は88%である。特徴はフィルター面内にランダムな筒状空洞部があることで、立体網状体の透水材である。そのため、水を狭部から広部、広部から狭部に内容液を透過し、流体運動エネルギーを低下させ、スロッシング波高抑制効果が期待できる。

### 2・4 計測項目

波高の計測は、則竹らが行った目視による波高計測方法を採用した<sup>1)</sup>。静水面から加振時の最大波高までの高さ $\Delta H$ (以下、最大波高 $\Delta H$ )を計測する。また、加振振幅 $s$ と入力振動数の計測は、(株)東京測器研究所社製の変位計 CDP-50 を使用した。

### 2・5 実験結果

#### 2・5・1 設置位置による比較(鉛直型:片面1枚)

ここでは、加振軸直行面に対してフィルターを1枚、計2枚を用意し、設置形態を鉛直型にした場合の最適な設置位置を検討する。本実験は水深 $H=600\text{mm}$ 、加振振幅 $s=\pm 1\text{mm}$ を設定し、表-1に示すパラメータを基に行った。図-3に1次および2次モードにおいて、フィルターの設置位置を変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸はフィルターの設置位置 $d(\text{mm})$ を、縦軸は最大波高 $\Delta H$ を表す。

図-3より、1次モードではフィルターの設置位置を内壁面に設置した場合( $d=30\text{mm}$ )、非制振と比べて最大波高を約50%抑制できることがわかる。フィルターの設置位置を内壁面から中間位置( $d=900\text{mm}$ )に向かって近づけていくと、内壁面にフィルターを設置した場合と比較して波高抑制効果はより高くなった。非制振の場合と比べて最大波高を約60~95%抑制できることがわかった。スロッシング現象は中間位置では加振軸の動きが卓越する。そのため、フィルターを中間位置に加振軸方向に対して直行するように設置することで効果的に波高を抑制できた。2次モードでは1次モードのフィルターの設置位置を変化させることによる波高抑制効果の線形的な変化は見られなかった。また、フィルターの設置位置に関係なく、非制振と比べ平均して約80%波高を抑制できることがわかった。

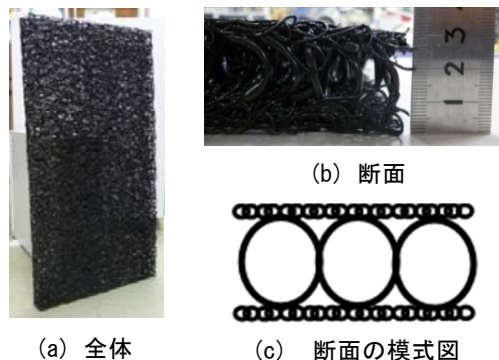


写真-1 もやいドレーンマットの概要

表-1 模型実験パラメータ(鉛直型:片面1枚)

フィルターの設置形態	鉛直型
入力波形	正弦波(1次モード: 0.580Hz) 正弦波(2次モード: 1.130Hz)
Lに対するフィルターの長さ [%]	3.3 (厚さ30mm: 片面1枚)
Hに対するフィルターの長さ [%]	100
フィルターの設置位置 $d$ [mm]	0,30,60,90,120,210,300,330,360,390,420, 450,480,510,600,720,810,900
ケース数	36ケース

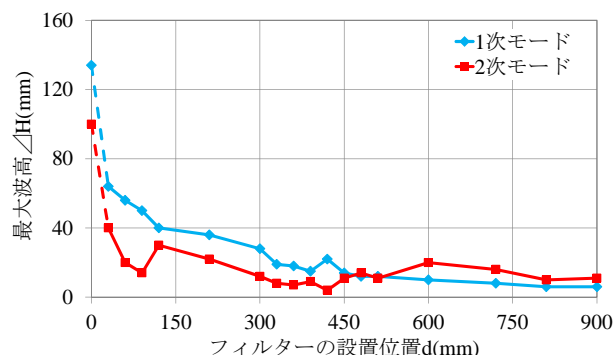


図-3 最大波高-設置位置関係(鉛直型:片面1枚)

#### 2・5・2 設置位置による比較(水平型:片面1枚)

ここでは、加振軸直行面に対してフィルターを1枚、計2枚を用意し、設置形態を水平型にした場合の最適な設置位置を検討する。本実験は水深 $H=500\text{mm}$ 、加振振幅 $s=\pm 2\text{mm}$ を設定し、表-2に示すパラメータを基に行った。図-4に1次および2次モードにおいて、フィルターの設置位置を変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸はフィルターの設置位置 $d(\text{mm})$ を、縦軸は最大波高 $\Delta H$ を表す。図-4より、設置形態が水平型の場合、前節の鉛直型とは異なり、フィルターの設置位置を中間位置( $d=600\text{--}900\text{mm}$ )から内壁面( $d=0\text{--}300\text{mm}$ )に向かって変化させていくにつれて、波高抑制効果はより高くなった。非制振の場合と比べて最大波高を約80~90%抑制できることが確認できた。スロッシング現象は内壁面付近では加振軸直角方向の動きが卓越する。フィルターを内壁面にその方向に対して直行するように設置する

ことで効果的に波高を抑制できた。また、2次モードでは1次モードのフィルターの設置位置を変化させることによる波高抑制効果の線形的な変化は見られなかった。フィルターの設置位置に関係なく、非制振と比べ、平均して約95%波高を抑制できることがわかった。特に、2次モードにおいては設置形態が鉛直型の場合と比べてより高い波高抑制効果を発揮することができた。

### 2・5・3 設置位置による比較(鉛直型: 片面2枚)

ここでは、加振軸直行面に対してフィルターを2枚、計4枚を用意し、フィルターの設置形態を鉛直型にした際、フィルターの間隙に隙間を設けたことによる波高抑制効果を検討し、その効果を確認する。そして、最適なフィルターの設置位置や隙間の割合を検討する。なお、1枚目のフィルターは中間位置に設置する。そして、残りの1枚のフィルターの設置位置を変化させる。そして、本実験で使用するパラメータを表-3に示す。図-5には1次および2次モードにおいて、フィルターの設置位置を変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸はフィルターの設置位置 $d$ (mm)を、縦軸は最大波高 $\Delta H$ を表す。図-5より、1次および2次モードにおいて、フィルターを加振軸直行面に対して2枚設置することで設置位置に関わらず、非制振と比べて90%抑制できた。また、フィルターの設置位置が $d=870,900$ mm(中間2枚重ね)の場合において、最も波高抑制効果が低くなったことから、フィルターを2枚設置する際は隙間を設けることが望ましいと考える。1次モードでは、 $d=750,900$ mmの場合、2次モードでは、 $d=300,900$ mmの場合が最も高い波高抑制効果を記録した。

## 3. 実物大貯水槽での検討

### 3・1 実物大矩形型貯水槽

写真-2に示す $3000 \times 3000 \times 3000$ mmのFRP製の矩形型貯水槽(以下、 $L=3000$ mm貯水槽)、 $2000 \times 2000 \times 2000$ mmのFRP製矩形型貯水槽(以下、 $L=2000$ mm貯水槽)を用いて実験を行った。水深 $H$ は常用水深とし、それぞれ $2000$ mmおよび $1400$ mmとする。

### 3・2 貯水槽の耐震性能向上方法の検討

貯水槽の耐震性能向上方法は、模型実験の結果およびフィルター設置の制約条件を考慮して、 $L=3000$ mm貯水槽の場合は、図-6のような加振軸直行面に1枚、計2枚を使用した4つの設置パターンを設定した。1つ目は図-6(a)に示すようにフィルターの設置形態を水平型にし、貯水槽の内壁面に取り付けた内壁水平型( $d=90-590$ mm)。2つ目は図-6(b)に示すように水平型を中間位置に取り付けた中間水平型( $d=940-1440$ mm)。3

表-2 模型実験パラメータ(水平型: 片面1枚)

フィルターの設置形態	水平型
入力波形	正弦波(1次モード: 0.547Hz) 正弦波(2次モード: 1.116Hz)
Lに対するフィルターの長さ [%]	33.3(幅300mm)
Hに対するフィルターの長さ [%]	6.0 (厚さ30mm: 片面1枚)
フィルターの設置位置 $d$ [mm]	0,0-300,300-600,600-900
ケース数	8ケース

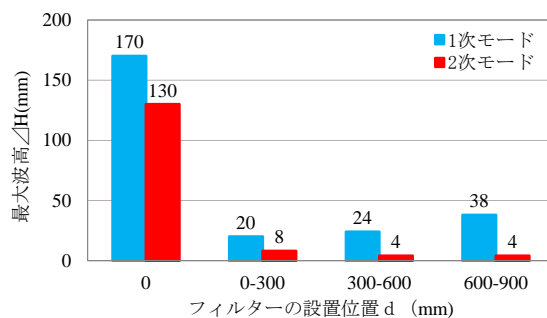


図-4 最大波高-設置位置関係(水平型: 片面1枚)

表-3 模型実験パラメータ(鉛直型: 片面2枚)

フィルターの設置形態	鉛直型	
入力波形	1次モード(0.547Hz) 2次モード(1.116Hz)	
Lに対するフィルターの長さ [%]	6.7 (厚さ30mm: 片面2枚)	
Hに対するフィルターの長さ [%]	100	
フィルターの設置位置 $d$ [mm]	0 150,900 450,900 750,900	30,900 300,900 600,900 870,900
ケース数	16ケース	

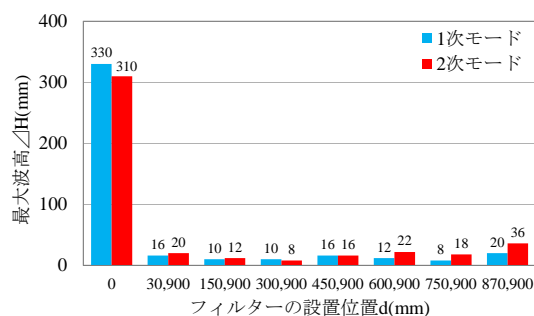


図-5 最大波高-設置位置関係(鉛直型: 片面2枚)



(a)  $L=3000$ mm貯水槽

(b)  $L=2000$ mm貯水槽

写真-2 実物大貯水槽(FRP製矩形型貯水槽)



## 矩形型貯水槽の耐震性能向上を目的とした手法に関する実験的研究

つ目は図-6(c)に示すようにフィルターの設置形態を鉛直型にし、貯水槽の内壁面に取り付けた内壁鉛直型( $d=110\text{mm}$ )。4つ目は図-6(d)に示すように鉛直型を中間位置に取り付けた中間鉛直型( $d=1500\text{mm}$ )である。

$L=2000\text{mm}$ 貯水槽の場合は、図-7のように加振軸直行面に2枚、計4枚を使用した。模型実験と同様、鉛直型を採用し、1枚目は中間位置に設置した状態で、2枚目のフィルターの設置位置を変化させて実験を行う。これらの各パターンにおいて正弦波および地震波を入力した加振実験を行い、スロッシング波高抑制効果の変化を調べ、模型実験と同様な手法で貯水槽の耐震性能を向上させられるかを検証する。

また、本実験では模型実験と同一の吉原化工製の「もやいドレーンマット(フィルター)」を矩形型貯水槽実験にも採用する。これを写真-3に示すようにチャンネル材で上下を固定し、アングル材で作製した加振軸方向に引いてあるレールに載せる。これにより、フィルターの設置位置を内壁面から中間位置まで変化させることができる。レールとチャンネル材の接触部分は万力で固定した。本実験では、貯水槽の直径 $600\text{mm}$ 程度のマンホールからフィルターの出し入れが可能なサイズである幅 $300\text{mm}$ 、厚さ $30\text{mm}$ 、高さ $500\text{mm}$ のフィルターを設置する。

### 3・3 実験条件の設定

本実験に使用する振動台は、本学が開発した屋外大型振動台を使用する。実験で用いる矩形型貯水槽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を式(1)より算出し、スイープ試験を行った。その結果、 $L=3000\text{mm}$ の場合は1次モード $f_1=0.475\text{Hz}$ 、 $f_2=0.855\text{Hz}$ となり、 $L=2000\text{mm}$ の場合は $f_1=0.600\text{Hz}$ 、 $f_2=1.040\text{Hz}$ となった。よって、この値を固有振動数として実験を進めていく。加振波形は正弦波および地震波を採用し、加振振幅は正弦波の場合、変位計の計測範囲を超えない程度の $\pm 4\text{mm}$ または $\pm 7\text{mm}$ を設定した。入力波数は波高の最大値が更新されなくなると予想される1次モード20波、2次モード35波(加振時間約40秒)で行う。また、実際の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いて神戸海洋気象台で観測されたNS方向(以下、神戸NS)の変位を50%にした地震波を採用する。図-8に神戸NSの入力加速度時刻歴を、図-9に入力変位時刻歴を示す。

### 3・4 計測項目

波高計測は、図-10(a)に示すようにレーザー変位計を1および2の位置に2台用い、貯水槽の上面に設置した。変位計1は1次モードで最大波高の観測が予想される隅角部の波高を、変位計2は2次モードで最大波高の観測が予想される $L/4$ 地点付近の波高を計測

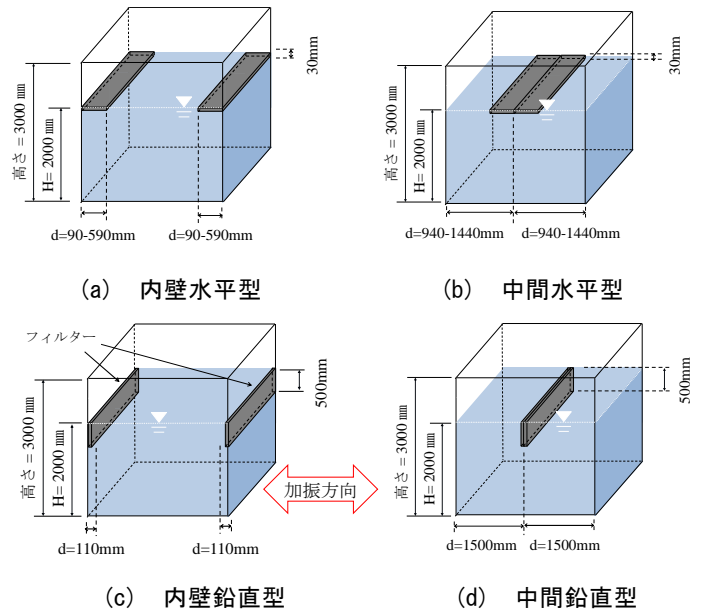


図-6  $L=3000\text{mm}$ 貯水槽の設置位置・形態の概要

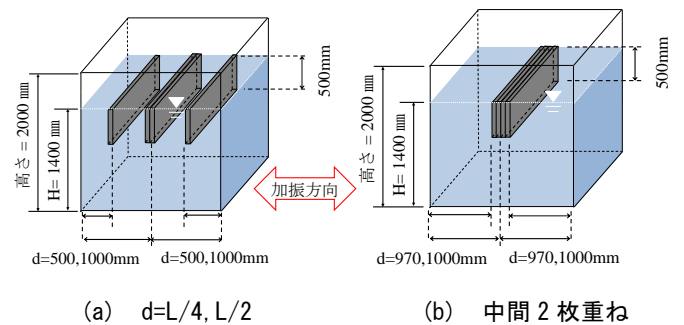


図-7  $L=2000\text{mm}$ 貯水槽の設置位置・形態の概要

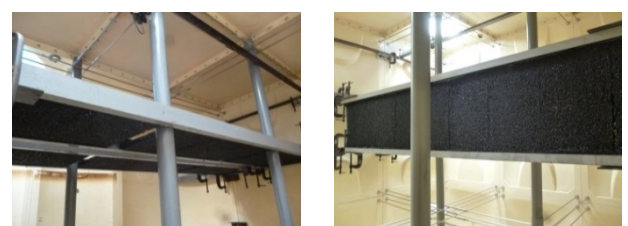


写真-3 各設置形態におけるフィルターの設置様子

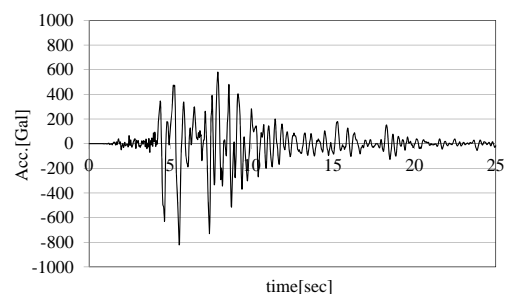


図-8 入力加速度時刻歴

するために設置する. 変位計のターゲットは, 貯水槽の天井から床面まで張ったワイヤーに発砲スチロール板を通したものをを用いる. さらに, 貯水槽内部のスロッシング挙動を観察するためにビデオカメラを2台設置する. 加振振幅 $s$ と入力振動数の計測には, 東京測器研究所社製 DP-1000Eおよび(株)キーエンス社製のレーザー変位計 IL-600を使用した. また,  $L=3000\text{mm}$ 貯水槽には内容液による動液圧を計測するために図-10(b)に示すように圧力計を下部から 500,1500,2000,2500mm の位置に隅角から 500mm( $L/6$ )離れた地点(A~D地点)と1500mm( $L/2$ )離れた地点(E~H地点) の計8箇所に設置する. 加速度計は振動台に2箇所設置している.

4. 実験結果

4・1 L=3000mm 貯水槽での検討

4・1・1 L=3000mm貯水槽と模型の実験結果の比較

ここでは,  $L=3000\text{mm}$ 貯水槽を用いた実験を通じて, 模型(以下,  $L=1800\text{mm}$ 貯水槽)を用いた実験と比較し, 貯水槽でも模型と同様な波高抑制手法で効果を得られているのかを検証する. なお, 本実験は表-4に示すパラメータを基に行った.

図-11に1次モードにおける $L=1800\text{mm}$ 貯水槽と $L=3000\text{mm}$ 貯水槽を用いた場合の波高抑制効果を示す. 縦軸は, 最大波高 $\Delta H$ を横軸は各フィルターの設置パターンを示す. 図-11より, 1次モードにおいて, 水平型を採用する場合, 両者ともフィルターの設置位置を貯水槽の中間位置ではなく, 内壁に設置することで波高抑制効果は大きくなることが確認できた. 鉛直型を採用する場合は, 両者ともフィルターの設置位置を貯水槽の内壁ではなく, 中間位置に設置することで波高抑制効果はより大きくなることが確認できた.

次に, 図-12に示す2次モードでは1次モードとは異なり, 両者とも各設置形態において設置位置を変更させたことによる波高抑制効果に違いがほとんど見られなかった. また, 水平型の場合, 両者の波高抑制効果に大きな差が生じた結果となった. この原因としては $L=1800\text{mm}$ 貯水槽の場合, 水深 $H$ に対するフィルターの長さが $L=3000\text{mm}$ 貯水槽と比べて4倍大きいためであると考えられる.

以上のことから, 1次モードおよび2次モードにおいて模型実験で得られた各波高抑制手法の傾向は矩形型貯水槽を使用した実験においても同様な傾向を示し, 高い波高抑制効果を発揮できることがわかった.

4・1・2 各設置パターンでの比較(正弦波)

図-13には, 加振軸直行面に対してフィルターを1枚, 計2枚を用意した際の設定パターンを変化させた場合の最大波高の変化を示す. 横軸にはフィルターの設置位置を, 縦軸には最大波高 $\Delta H/\Delta H_0$ を表す. なお, 縦

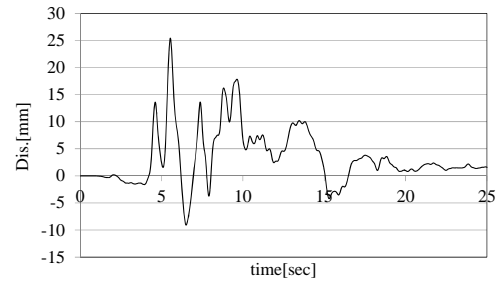
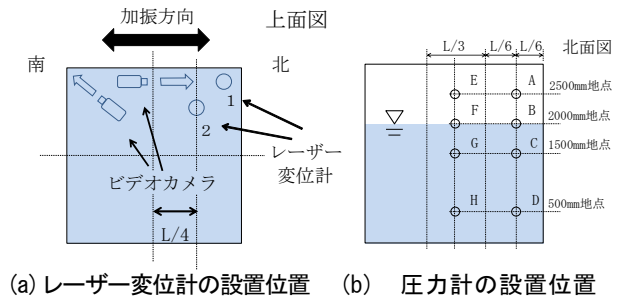


図-9 入力変位時刻歴



(a) レーザー変位計の設置位置 (b) 圧力計の設置位置

図-10 計測機器の設置位置

表-4 L=3000mm 貯水槽の実験パラメータ

入力波形	正弦波(1次モード: 0.475Hz) 正弦波(2次モード: 0.855Hz) 地震波(JMA神戸NS50%)
Lに対するフィルターの長さ [%]	鉛直型: 2.0(片面1枚) 水平型: 33.3(長さ500mm)
Hに対するフィルターの長さ [%]	鉛直型: 25.0(長さ500mm) 水平型: 1.5(片面1枚)
フィルターの設置パターン	非制振 内壁水平型(d=90-590mm) 中間水平型(d=940-1440mm) 内壁鉛直型(d=110mm) 中間鉛直型(d=1500mm)
ケース数	15ケース

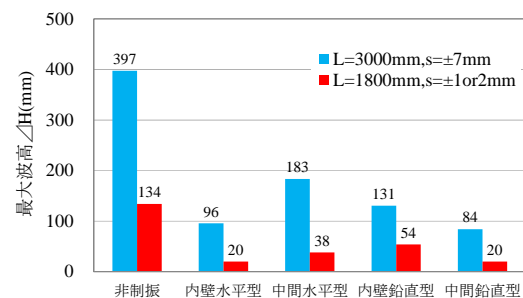


図-11 L=3000mm 貯水槽と模型の比較(1次モード)

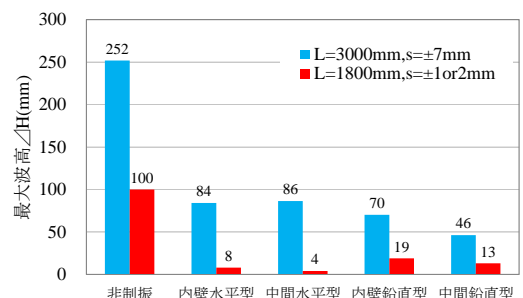


図-12 L=3000mm 貯水槽と模型の比較(2次モード)

軸は各フィルターの設置位置における最大波高 $\Delta H$ を $d=0\text{mm}$ (非制振)時の最大波高 $\Delta H_0$ で無次元化したものである。本実験では水深 $H=2000\text{mm}$ ,加振振幅 $s=\pm 7\text{mm}$ を設定した。

図-13より, 1次モードにおいては, 4つのうちどの設置パターンを採用しても非制振の場合と比較して, 最大波高を半分以下まで抑えられることがわかる。特に, 内壁水平型および中間鉛直型を採用した場合は非制振と比べて約80%波高を抑制することができた。また, 1次モードと同様, 2次モードにおいてもどの設置パターンを採用しても非制振の場合と比較して最大波高を半分以下まで抑えられることがわかる。特に, 中間鉛直型を採用した場合は, 最も高い波高抑制効果が得られ, 非制振と比べて約80%波高を抑制することができた。

次に, 図-14には非制振および各フィルターの設置パターンを採用した場合の内壁面に作用する動液圧の変化を示す。縦軸には図-10(b)で示した圧力計の設置箇所を表し, 横軸には動液圧 $\Delta P$ を表す。図-14(a)は1次モードにおける図-10(b)で示すE~Hの地点の動液圧を表し, 図-14(b)は2次モードにおけるE~Hの地点の動液圧を表している。図-14より, 1次および2次モードにおいて, どの設置パターンを採用しても, 非制振と比べて小野らが指摘しているスロッシング現象による水面付近(2500~1500mm地点)の局所的な動液圧を抑制することができた<sup>14)</sup>。特に, 中間鉛直型を採用した場合, 非制振と比べて, スロッシング現象による動液圧の抑制効果が顕著に表れた。

以上のことから, フィルターを設置することで矩形型貯水槽に作用する動液圧も効果的に抑えることができると考えられる。そのため, 効果的に高い波高抑制効果を得られる手法を検討することは貯水槽の耐震性能向上において重要であると考えられる。

4・1・3 各設置パターンでの比較(地震波)

図-15に神戸NS50%相当の地震波を入力した場合において, フィルターの設置パターンを変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸には設置パターンを, 縦軸には最大波高 $\Delta H/\Delta H_0$ を表す。

図-15より, 地震波においては, 4つのうちどの設置パターンを採用しても波高抑制効果の差はほとんど見られず, 非制振の場合と比較して最大波高を80%程度まで抑える結果となった。これらの4つ波高抑制手法が地震波において高い波高抑制効果を発揮しなかった原因としては, 高い波高抑制効果を十分に発揮するためのフィルターの厚さ(量)が足りなかったためではないかと考える。

次に, 図-16には神戸NS50%相当の地震波を入力した場合における非制振および各設置パターンを採用した場合の内壁面に作用する動液圧の変化を示す。図-16(a)は地震波における図-10(b)で示すA~Dの地点の動液圧を表し, 図-16(b)はE~Hの地点の動液圧を表している。ここで, A~D地点のD

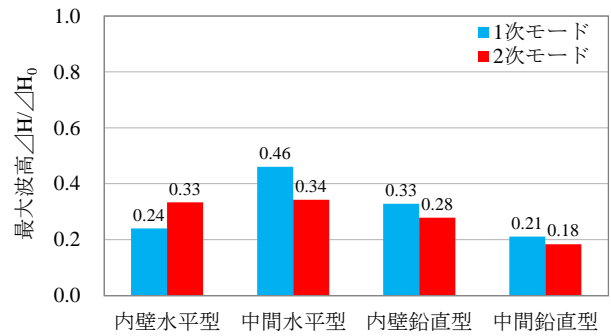
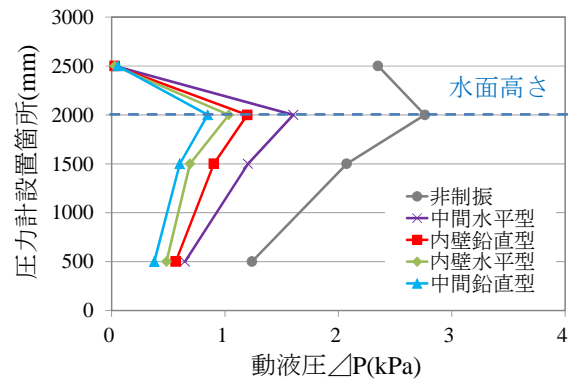
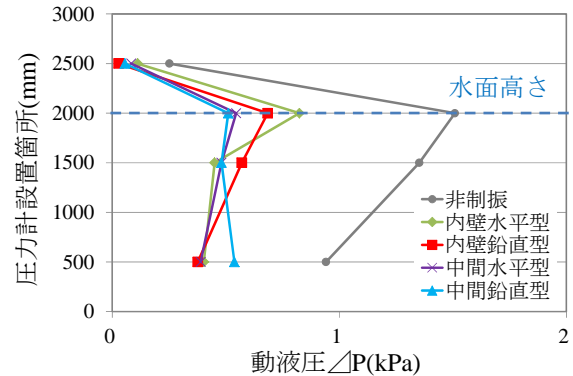


図-13 各設置パターンにおける波高抑制効果(正弦波)



(a) 1次モード



(b) 2次モード

図-14 内壁面に作用する動液圧(正弦波)

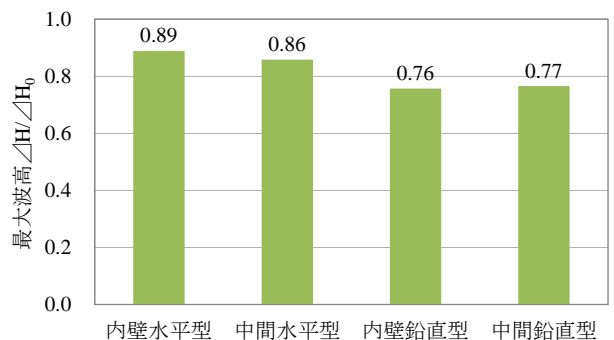


図-15 各設置パターンにおける波高抑制効果(地震波)

地点(下部から500mm地点)の圧力計は実験中に破損したため, データが欠落していることを付記する. 図-16(a)より, どの設置パターンを採用しても水面付近(2000mm地点)の動液圧を抑制できることがわかる. また, 設置パターンの違いによる動液圧の違いはほとんど見られなかった.

図-16(b)より, 地震波を入力した場合, 正弦波を入力した際とは違い, 水深が深い位置の動液圧が大きくなっている. この理由として, 箕輪らが指摘している貯水槽の壁面と内容液が連成して振動するバルジング現象が発生したためと考えられる<sup>9)</sup>. また, 貯水槽の内部の映像を見る限り, バルジング現象を発生させるような内容液全体の液面揺動に加えて, スロッシングによる内容液の表面が上下動する液面揺動も確認できた. よって, 地震動を入力した際, 貯水槽にはスロッシング現象とバルジング現象が連成していることが考えられる.

以上のことから, 本研究で提示した4つのフィルターの設置パターンではバルジングに対する動液圧を抑制する効果は発揮できなかったと考える. そのため, スロッシングおよびバルジングによる動液圧を効果的に抑制し, 貯水槽の耐震性能をさらに向上させるような手法の検討が今後の課題であると考えられる.

4・2 L=2000mm 貯水槽での検討

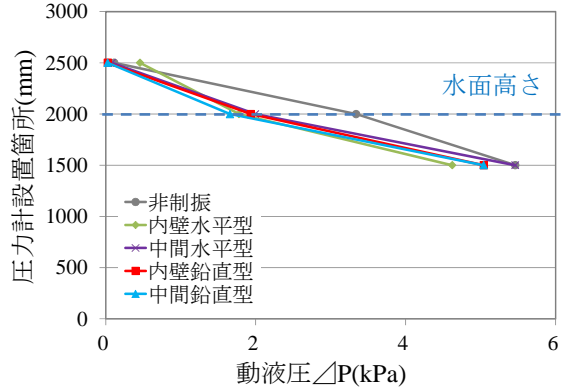
4・2・1 L=2000mm貯水槽と模型の実験結果の比較

ここでは, L=2000mm貯水槽を用いた実験を通じて, L=1800mm貯水槽を用いた実験と比較し, 貯水槽でも模型と同様な波高抑制手法でその効果を発揮できているのかを検証する. なお, 本実験は表-5に示すパラメータを基に行った.

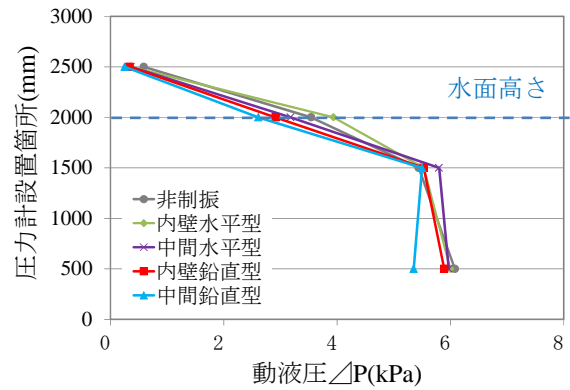
図-17に1次モードにおけるL=1800mm貯水槽とL=2000mm貯水槽を用いた場合の波高抑制効果を示す. 縦軸は, 最大波高 $\Delta H$ を横軸は各波高抑制手法を示す. 図-17より, 1次モードにおいて, 両者ともフィルターの設置位置に関わらず非制振と比較して, 高い波高抑制効果が得られていることがわかり, 設置位置による大きな波高抑制効果の違いは見られなかった.

図-18に2次モードにおけるL=1800mm貯水槽とL=2000mm貯水槽を用いた場合の波高抑制効果を示す. 図-17より2次モードについては1次モードとは異なり, 非制振において, 両者の結果に大きな差が生じた. この原因としては, L=2000mm貯水槽の内部の構造が2次モードの波形を打ち消しているのではないかと考える. また, 両者とも各設置形態において設置位置を変更させたことによる波高抑制効果の違いがほとんど見られず, 高い波高抑制効果が得られた. 特に, L=2000mm貯水槽は模型と幅Lの差が小さいため, 模型との波高抑制効果にほとんど違いが見られなかった.

以上のことから, 1次モードおよび2次モードにおいて模型実験で得られた各波高抑制手法の傾向は矩形型



(a) A~C 地点



(b) D~H 地点

図-16 内壁面に作用する動液圧(地震波)

表-5 L=2000mm 貯水槽の実験パラメータ

フィルターの設置形態	鉛直型
入力波形	正弦波(1次モード: 0.600Hz) 正弦波(2次モード: 1.040Hz) 地震波(JMA神戸NS30%)
Lに対するフィルターの長さ [%]	6.0(片面2枚)
Hに対するフィルターの長さ [%]	35.7(長さ500mm)
フィルターの設置位置 $d=d_1, d_2$ [mm] ( $d_2=1000$ mm固定)	0(非制振) 30,1000(内壁L/2) 310,1000(L/6,L/2) 500,1000(L/4,L/2) 750,1000(L/3,L/2) 970,1000(中間2枚重ね)
ケース数	18ケース

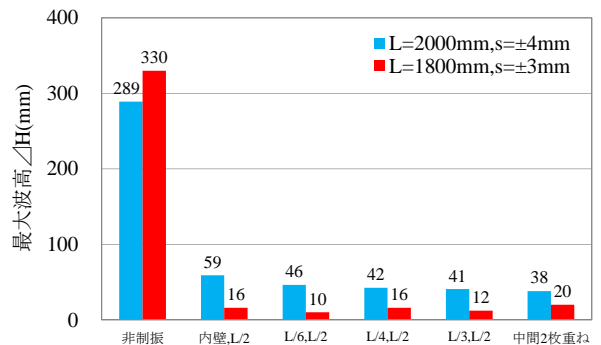


図-17 L=2000mm 貯水槽と模型の比較(1次モード)



貯水槽を使用した実験においても同様な傾向を示し、高い波高抑制効果を発揮することがわかった。

#### 4・2・2 各設置位置での比較(正弦波)

図-19に加振軸直角面に対してフィルターを2枚、計4枚を用意した際の設置位置を変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸にはフィルターの設置位置を、縦軸には最大波高 $\Delta H/\Delta H_0$ を表す。本実験は水深 $H=1400\text{mm}$ 、加振振幅 $s=\pm 4\text{mm}$ を設定した。

図-19より、1次モードにおいてどの設置位置を採用しても非制振の場合と比較して最大波高を20%以下に抑えられることがわかる。特に、2枚目の設置位置を中間位置に近づけていくにつれて、高い波高抑制効果が得られている。

2次モードにおいてはどの設置位置でも40%以下まで波高を抑制することができる。また、フィルターを等間隔に設置した $d=500,1000\text{mm}$ ( $L/4,L/2$ 地点)の場合に最も高い波高抑制効果が得られた。

#### 4・2・3 各設置位置での比較(地震波)

図-20に神戸NS30%相当の地震波を入力した場合において、波高抑制手法を変化させた場合の最大波高の変化を示す。横軸には波高抑制手法を、縦軸には最大波高 $\Delta H/\Delta H_0$ を表す。

図-20より、地震波においては、どの設置位置を採用しても60%以下まで波高を抑制できた。また、地震波においては、2次モードの波高抑制効果と同様な傾向がみられた。 $d=500,1000\text{mm}$ ( $L/4,L/2$ 地点)に設置した場合に最も高い波高抑制効果が得られ、非制振と比べて約70%以下まで波高を抑制できた。これらの結果から、本実験に設置したフィルターの厚さ(量)や水深 $H$ に対するフィルターの長さは、地震波による高い波高抑制効果を発揮するために適切であったと考える。しかし、前節でも指摘したバルジング現象による動液圧を抑制できていない可能性があるため、バルジング現象に着目した実験を行うこと今後の課題であると考えている。

## 5. 結論

本研究では矩形型貯水槽を対象として簡易な方法で耐震性能を向上させる手法の検討を行った。具体的にはフィルターを用いたスロッシング波高抑制手法の検討を行った。貯水槽の内部の制約条件により、任意の位置にフィルターを設置できない場合を想定し、設置条件を種々変化させ、それらの効果を明らかにした。また、模型実験で得られた簡易かつ効果的にスロッシング波高を低減できた手法は貯水槽においても同様な手法で発揮することができた。それらの結果を以下に示す。

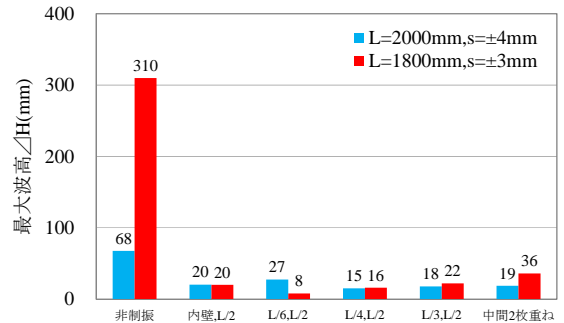


図-18 L=2000mm 貯水槽と模型の比較(2次モード)

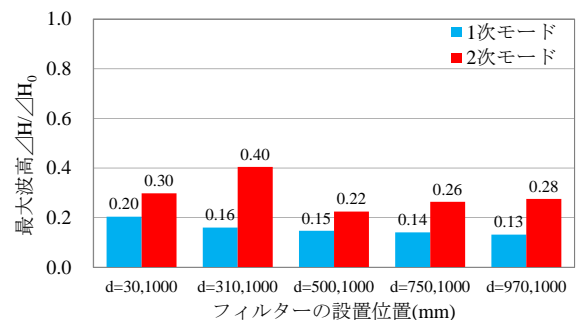


図-19 各設置位置における波高抑制効果(正弦波)

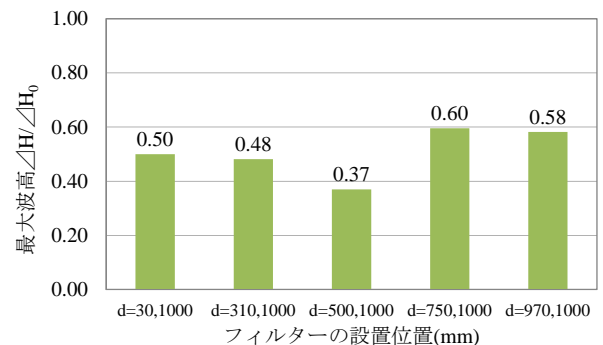


図-20 各設置位置における波高抑制効果(地震波)

- (1) 模型実験で得られた簡易かつ効果的にスロッシング波高を低減できた手法は矩形型貯水槽においても発揮することができ、簡易に貯水槽の耐震性能を向上する手法であると考えている。
- (2) 加振軸直行面に対してフィルターを1枚設置する際、貯水槽の内壁付近に設置が可能な場合は設置形態を水面に対して水平方向に、中間位置に設置が可能な場合は鉛直方向にすることが望ましい。
- (3) 加振軸直行面に対してフィルターを鉛直方向に2枚設置する際、フィルター設置の制約条件がなければ、 $L/4$ および $L/2$ 地点への設置が望ましいが、できない場合はフィルターの間に隙間を設けて設置することが望ましい。

- (4) 地震波を入力した場合, どの波高抑制手法を採用してもバルジング現象による動液圧は抑制できないと考える. よって, バルジング現象に対する動液圧も抑制できる手法の検討が今後の課題である.

#### 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 NEWSNo.128, pp.4-9, 2012.5.
- 2) 日本給水タンク工業会ホームページ: <http://www.kyuusui-tank.jp/index2.html>, 2014.1.25
- 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影響～, 地域安全学会論文集Vol.10, pp.137-146, 2008.11.
- 4) 村田幸一, 水崎洋祐, 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) 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(応用力学), Vol.69, No.2(応用力学論文集 Vol.16), I\_833-I\_843, 2013.9.
- 6) 箕輪親宏, 清水信行, 鈴木純人: 長方形ステンレスパネル水槽の振動台実験, 日本機械学会論文集(C編)68巻668号, pp.1056-1063, 2002.4
- 7) 社)強化プラスチック協会: FRP水槽構造設計計算法(1996年版), 1996.12
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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型貯水槽のスロッシング低減効果の検証実験, 土木学会第69回年次学術講演会I-162, pp.323-333, 2014.9.
- 11) 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, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), I\_785-I\_794, 2012.8.
- 12) 日比野広之, 鈴木森晶, 奥村哲夫: 実物大貯水槽のスロッシング現象と波高抑制効果手法に関する研究, 土木学会第68回年次学術講演会, I-025, pp.49-50, 2013.9.
- 13) G.W.Housner: The Dynamic Behavior of Water Tank, Bulletin of The Seismological Society of America. Vol.53, 1963.
- 14) 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正弦波加振時の動液圧変化について, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会, I-18, 2014.3

(受理 平成27年3月19日)