

令和元年6月13日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06473

研究課題名(和文)バルジング現象で被害を受けた貯水槽の原因究明とその耐震設計に関する研究

研究課題名(英文) Research on the cause investigation of the reservoir damaged by bulging phenomenon and its vibration control measures

研究代表者

平野 廣和 (HIRANO, Hirokazu)

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号：80256023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災では、矩形貯水槽が破壊される被害が多数発生した。現地調査の結果から貯水槽の下部側板や隅角部で損傷被害が発生している事例が多数あることを確認した。これらは、スロッシング現象ではなく、貯水槽構造体の振動が主体となるバルジング現象に起因すると考えられる。本研究では、十分な減衰効果を有し、かつ施工が簡単で経済的なバルジング現象へ対応する最適な制振装置の開発を行った。スロッシング現象とバルジング現象それぞれに対応した制振装置を組み合わせることで、矩形貯水槽の耐震性の向上を計ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災では、病院等の公共施設や集合住宅などの矩形貯水槽が破壊される被害が多数発生し、市民生活に甚大な影響を及ぼした。これを受け、スロッシング現象に対応した制振装置「8字型浮体式制振装置」と本研究で開発したバルジング現象用の制振装置を組み合わせることで、既存の貯水槽の耐震性を向上させることが可能となった。近い将来発生する巨大地震や直下型地震等に備えることになり、災害時の「命の水」を守ることができるようになった。

研究成果の概要(英文)：In the Great East Japan Earthquake, a large number of damage to rectangular reservoirs occurred. From the results of the field survey, it was confirmed that there were many cases in which damage was caused at the lower side plate and the corner of the water tank. These are considered not to be sloshing phenomena, but to bulging phenomena in which the vibration of the water tank structure is the main factor. In this research, we have developed an optimal damping device that has sufficient damping effect and is easy to install and that copes with economical bulging phenomena. By combining the damping devices corresponding to the sloshing phenomenon and the bulging phenomenon, it was possible to improve the earthquake resistance of the rectangular water tank.

研究分野：工学

キーワード：バルジング スロッシング 制振装置 耐震設計 貯水槽 振動実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、上水道の大型配水池の被害や貯水槽の被害により病院、学校等の避難所でライフラインである水が十分に配給されず甚大な被害をもたらした。これを受け、現地調査を行うと共に被害の原因究明のために小型の矩形水槽を用いた振動実験から実機の貯水槽を用いた振動実験まで各種の実験ならびに数値流体解析を行ってきた。この一連の研究により、やや長周期地震動により励起されたスロッシングなどの表面波動の液面揺動に起因した現象による損傷被害の発生の再現を行った。この研究でスロッシング現象は、主に天井板部分や上部側板部分で損傷被害を発生させることがわかった。

一方、現地調査の結果から貯水槽の下部側板や隅角部で損傷被害が発生している事例が多数あることを確認した。これらは、スロッシング現象の発生だけで損傷被害発生の説明が出来ない事例である。現地調査によると貯水槽に発生する被害は、大きく分けて2種類ある。天井や上部の側板が破損した事例、もう一つは下部を中心としての側板や隅角部が破損した事例である。前者は、スロッシング現象に起因し、後者は貯水槽の構造体振動が主体となるバルジング現象に起因すると考えられる。

このように東日本の広範な地域でバルジング現象の被害が顕著であるので、今後貯水槽を初めとする給水タンクの耐震安全性を向上させるためには、スロッシング現象のみならず、バルジング現象により生じる問題の解明が重要である。近い将来発生が確実視されている南海、東南海、東海地震等に備え、バルジング現象の対策をどのように貯水槽の耐震設計基準に新たに取り入れていくかが必要である。なお、本研究実施中に熊本地震が発生したが、スロッシング現象やバルジング現象による貯水槽の被害が多数発生したことを追記する。

2. 研究の目的

(1). バルジング現象の把握

スロッシング現象は貯水槽を完全剛体と仮定しているのに対し、バルジング現象は側板が液体と接して振動することから、流体と構造の連成振動となる。そのため貯水槽の側板は、弾性体として変形しながら振動することになる。よって、両者には明らかにその性状に違いがあることがわかる。

このような背景から、本研究では一般に広く使われているFRPパネル式貯水槽を使い、大型振動台を用い、実際の地震動での振動実験を行い、バルジング現象での応答特性の違いを明らかにするものである。具体的には、一般に使われることの多いサイズである3,000×3,000×3,000mmの立方体の貯水槽を用いることとする。また入力波形は、バルジング発生範囲の振動数域（1.0～4.0Hz）程度の地震波として、例えば、兵庫県南部地震神戸海洋気象台で観測された加速度成分の内、NS波成分などを用いることとする。これらの検討から、側板のパネル形式の地震時の振動特性の違いを把握して、バルジング現象発生メカニズムを実験面から把握するものである。

また、貯水槽の構造解析を実施し、水の有無による違い、さらに構造と流体の連成解析等も併せて実施するものである。

(2). バルジング現象の設計基準の現状

現状の貯水槽の設計基準には、スロッシングに関する設計基準はあるが、バルジングに関する基準が無いのが現状である。この背景にあるのは、スロッシング問題がHousnerの式に代表されるように、貯水槽を剛体と仮定し、貯水槽の流体運動を簡単な物理モデルで近似することで、矩形や円筒形に対する地震時動液圧を求めるための設計近似式が導けるためである。

一方、バルジング問題は、側板のパネルが液体と接して振動することから、側板が弾性体として変形しながら振動することである。そのため明らかにスロッシング問題とはその性状が異なり複雑な挙動を示すので、この問題が設計に反映されてこなかったと考えられる。

図2-1に示す模式図の様にバルジング発生時には、側板のパネルに水深方向へ大きくなる水平方向の圧力（動液圧）が作用する。これが地震発生には、衝撃力となって側板を加振することになると予想される。そのため下部側板のパネルに損傷被害が生ずることとなるので、実機貯水槽を用いての振動実験結果から、貯水槽毎の設計基準を作成するための基礎作りを行う。

(3). バルジング現象に効果のある制振装置の開発

従来の研究において写真2-1に示す矩形貯水槽用の制振装置である「8字型浮体式制振装置」を開発し、スロッシング現象に波高低減効果と制振効果があることを実証した。この制振装置は、2014年8月に横須賀市立市民病院に地震発災時の診療用水を確保するための一環として採用され、その後数多くの導入実績を有している。十分な減衰効果を有し、かつ施工が簡単な制振装置は、世界初である。

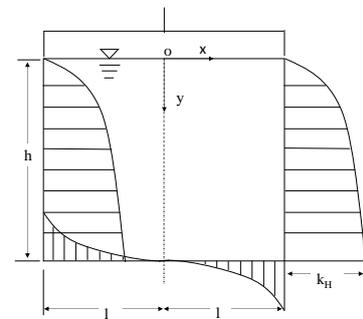


図2-1 バルジング発生時の側板に生ずる圧力の模式図



(a) 2段制振装置

(b) 3段制振装置

写真2-1 矩形貯水用「8字型浮体式制振装置」

(2014年8月横須賀市立市民病院貯水槽へ試験施工実施)

本制振装置が、バルジング現象の制振効果を有するか否かの確認を実施する。また、最適な制振効果を得るためには、制振材の形状、制振材と制振材の間隔などの調整等が必要になると考えられるので、これらの確認を行い、最適な制振装置として貯水槽の新たな耐震設計へ寄与することである。具体的には、スロッシング用に開発した浮体式波動抑制装置とバルジング用に新たに開発した制振装置を組み合わせ、既存貯水槽の耐震性能を向上することを試みるものである。この結果、既存貯水槽の耐震性能の向上を計ることとする。

以上、本研究は、近い将来必ず発生する南海トラフでの巨大地震や首都圏直下等で発生する地震で生じる「やや長周期地震動」により、矩形貯水槽の中で発生するスロッシング現象のみならずバルジング現象による内容液の揺動、さらには貯水槽自体の破壊などの被害を未然に防ぐことである。これにより、災害時に最も必要である「命の水」を守るための貯水槽の耐震設計基準の大幅な見直しに貢献できる。

3. 研究の方法

(1). バルジング現象の把握

バルジング発生時の貯水槽の応答を確認するために、写真 3-1 に示す FRP 製タンク (3m×3m×3m) を用いて水深 2700mm (常用水深) で正弦波加振実験を行う。加速度は 0.35m/s と統一して行う。あらかじめ把握しておいたこの貯水槽のバルジング振動数域と考えられる 1.9~2.5Hz において加振する。貯水槽下部での膨らみが大きいため、レーザー変位計により貯水槽底から 500mm, 1000mm, 1500mm の壁面 3ヶ所の壁面変位と圧力計により貯水槽底から 500mm, 1500mm の壁面 2ヶ所に作用する圧力変化を計測し、バルジング発生時の応答を明らかにする。計測機器の配置は、図 3-1 に示す。本研究においてタンクの膨らむ方向を正(+)、凹む方向を負(-)とする。また、タンクに水を満たした状態をゼロとして計測し、それぞれの圧力計の設置位置における圧力変化を計測する。

加振実験には、2013年に中央大学と愛知工業大学が共同で設置した大型振動装置を用いる。入力地震波には、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸 NS 方向観測波ならびに熊本地震における宇土 NS 方向観測波も使用する。これらの地震波は振動装置の能力の都合上、JMA 神戸観測波は変位 30% で加振、熊本地震観測波は変位 50% で加振する。また振動台に設置した加速度計より得たこれらのパワースペクトルを図 3-2、図 3-3 に示す。なお、加振方向は計測面に直交に加振する。

(2). バルジング制振装置の開発 (特許出願中)

本研究で考案するバルジング用制振装置を図 3-3 に示す。この制振装置は、特殊ポリエチレンでシリコンである減衰材を挟んだサンドイッチ構造であり、ポリエチレンとシリコン間で生じる摩擦抵抗により減衰を得るものである。これを貯水槽隅角部の 4 隅、貯水槽底から 1000mm と 1500mm 位置の 8 カ所に取り付けるものとする。これにより制振装置の有無による貯水槽側壁変位と波高の低減効果についての比較を行う。

(3). スロッシングとバルジング制振装置の併用

スロッシング現象に十分な効果が確認されている制振装置を FRP タンク内に浮かせた状態を写真 3-2 に示す。これとバルジング現象用に開発した制振装置との両者を設置した状態で地震動下での制振効果を確認する。ここで用いた地震波は、熊本地震宇土 NS 方向観測波である。ただし、振動台の能力制限から変位の 50% で加振するものとする。

4. 研究成果

(1). バルジング現象の把握

図 4-1 に壁面の変位を示す。(a)の神戸 NS30%では設置位置 1000mm において膨らむ方向に 24.3mm 変位している。この設置位置 1000mm において一番変位が現れたのは、3mFRP 製タンク

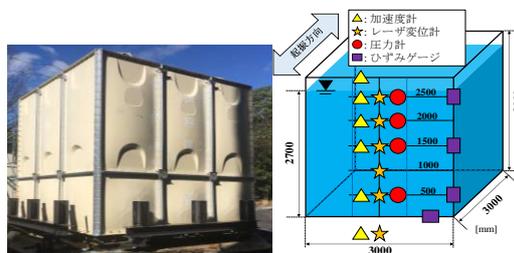


写真 3-1 3mFRP 製タンク 図 3-1 計測機器設置位置

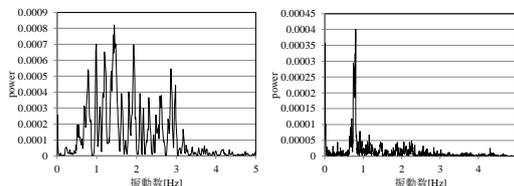


図 3-2 神戸スペクトル 図 3-3 熊本宇土スペクトル



図 3-3 ルジング用制振装置

(特殊ポリエチレン材に減衰材を挟む構造)



写真 3-2 スロッシング用制振装置の浮体状況

クが写真 3-1 のように 1×1m パネルと 2×1m パネルから成り立ち、その継ぎ目であることから最も変位したと考えられる。熊本宇土 NS50%では神戸 NS30%より加振力が大きいため変位分布が+に移行している。設置位置 1000mm において 43.2mm の最大変位を示している。(b)に注目すると、神戸 NS30%と熊本宇土 NS50%も設置位置 1500mm において一番凹んでおり、それぞれ-31.2mm, -71.8mm である。

図 4-2 に壁面の加速度を示す。(c)の神戸 NS30%では設置位置 2500mm において最大 9.3m/s² を示している。熊本宇土 NS50%では設置位置 2000mm において最大 12.2m/s² の加速度を示している。このように地震波によって最大加速度を示す位置が異なった。(d)に着目すると、神戸 NS30%では設置位置 2000mm において最大-14.7m/s² を示している。熊本宇土 NS50%では設置位置 1500mm において最大-14.3m/s² の加速度を示している。このように膨らむ方向と凹む方向でも異なった設置位置で最大加速度が現れることがわかる。

図 4-3 に壁面の圧力を示す。(e)に着目すると、神戸 NS30%と熊本宇土 NS50%のどちらも圧力分布は設置位置が低くなるにつれて大きくなるのがわかる。これは短周期地震波特有の圧力分布であり、バルジング発生時に見られる。圧力の値は設置位置 500mm において神戸 NS30%では最大 4.2kPa、熊本宇土 NS50%では最大 8.8kPa を示している。このようにタンクの側面底部に圧力を及ぼしており、実際の地震動においてもこの個所が破壊されることが多いと推察される。(f)に着目すると、圧力の値は設置位置 1500mm において、神戸 NS30%では最大 -7.2kPa、熊本宇土 NS50%では最大-12.6kPa を示している。これは(d)の壁面の加速度と同様に一番凹んだ位置において負の圧力も発生したと考えられる。

図 4-4 に壁面のひずみを示す。(g)に着目すると設置位置 0mm において大きなひずみが生じていることがわかる。ひずみの値は設置位置 0mm において神戸 NS30%では最大 286.2 $\mu\epsilon$ 、熊本宇土 NS50%では最大 957.1 $\mu\epsilon$ と大きな値を示している。(h)に着目すると、設置位置 0mm において神戸 NS30%では最大-138.5 $\mu\epsilon$ 、熊本宇土 NS50%では-215.7 $\mu\epsilon$ を示している。設置位置 0mm の他に設置位置 1500mm においても神戸 NS30%では-114.2 $\mu\epsilon$ 、熊本宇土 NS50%では最大-226.3 $\mu\epsilon$ と示している。このようにタンクの最下部で大きな負担が掛かっていることがわかる。実際の給水タンクや配水タンクにおいても最下部の破損による水漏れ等が確認されていることがこのことから説明できると思われる。実際の地震力を考えると本実験では神戸 NS30%、熊本宇土 NS50%で加振しているため、実地震動の 1/3, 1/2 程度の加振力である。これが 2 倍、3 倍である地震が発生すれば、タンクに大きな損傷を与えることが想像される。

(2).制振効果の確認

スロッシング用の制振装置と本研究で開発した図 3-3 に示すバルジング用制振装置とを FRP 製タンクに設置して、振動実験を行う。

図 4-5 に液面の応答波高を示す。本研究では熊本地震宇土 NS50%変位で加振しているため、スペクトルピークである 0.80Hz に

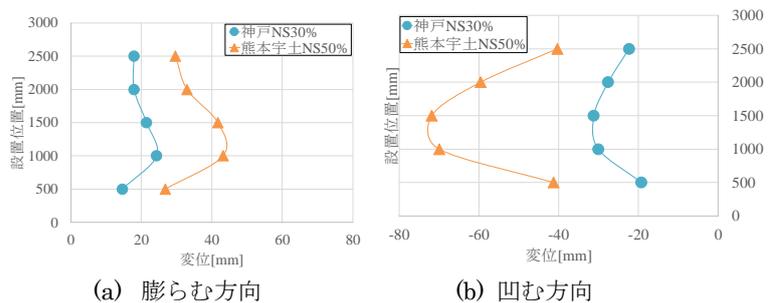


図 4-1 壁面の変位

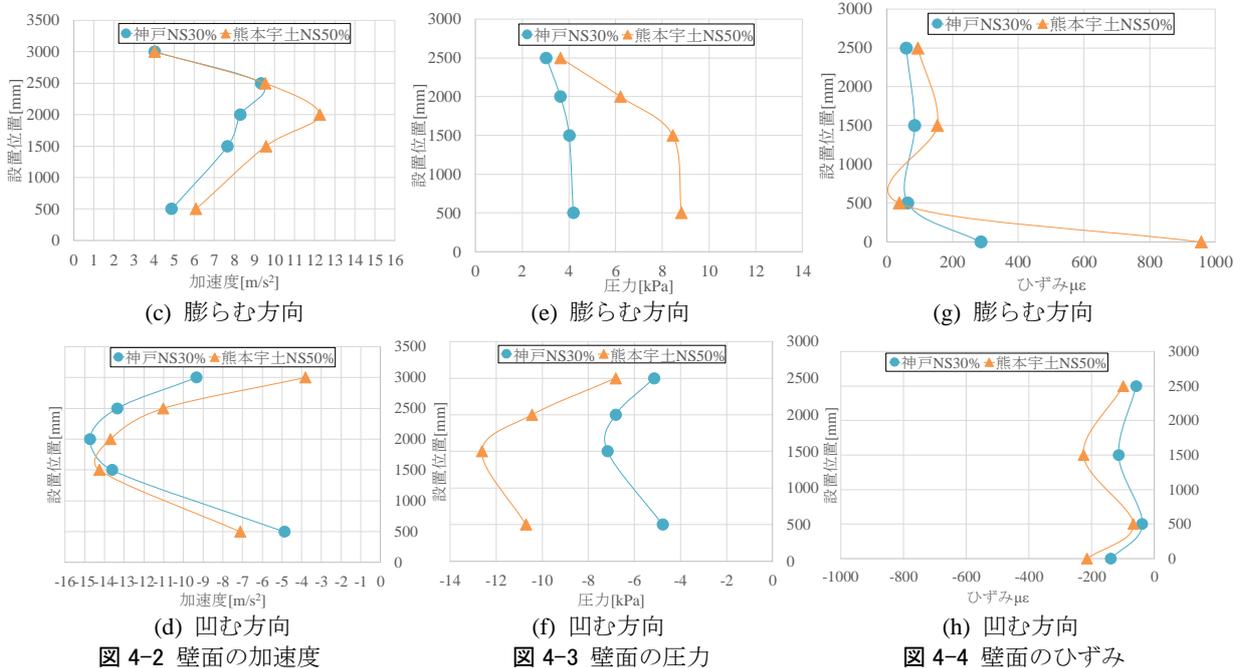


図 4-2 壁面の加速度

図 4-3 壁面の圧力

図 4-4 壁面のひずみ

よる強制振動が強い傾向となる。また、本実験の貯水槽と水深におけるスロッシング固有振動数は 0.50Hz であることから、内容液の共振によるスロッシング応答波高の増大は見られなかった。しかし、非制振時に対し制振装置を付加することで減衰が付与され、応答波高は最大波高に達すると加振停止後すぐに収束している。この結果から減衰定数は、加振停止直後の自由減衰となった最大波高から 20 波目までの波形と式(1)より得られる減衰曲線を照らし合わせることで算出する。

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

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。波形から算出した減衰定数は、0.0048 から制振装置ありの時の 0.0064 に増加している。

図 4-6 に壁面の変位を示す。(a)の最大変位(+)では制振装置なしの場合、設置位置 1000mm において膨らむ方向に 47.9mm 変位している。この設置位置 1000mm において一番変位が現れたのは、3mFRP 製タンクが写真 3-1 のように 1×1m パネルと 2×1m パネルから成り立ち、その継ぎ目であることから一番変位したと考えられる。それに対して制振装置ありの場合、設置位置 1000mm において 36.8mm の最大変位を示している。

一方、制振装置ありなしを比較すると、11.1mm の 23%低減している。変位分布も制振装置を付加することで全体的に 4.5mm 以上低減している。また、(b)の最大変位(-)に着目すると、設置位置 1500mm で一番凹んでおり、制振装置なしでは-62.6mm、制振装置ありでは-53.4mm である。制振装置ありなしを比較すると、9.2mm の 15%低減している。

図 4-7 に壁面の高さ 1000mm における変位波形を示す。高さ 1000mm の壁面変位の減衰定数を比較すると、0.019 であったものが制振装置を付加することで 0.021 に増加している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 平野廣和, 水谷国男: 最近の貯水槽地震被害の特徴とスロッシング・バルジングの影響—巨大自然災害に備えた貯水槽の耐震設計のあり方—, 空気調和衛生工学会誌, 査読無, Vol.93, No.1, pp.3-12, 2019.
- ② 小野泰介, 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 石川友樹: 貯水槽の耐震化向上のための 8 の字型浮体式制振装置の開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.74, No.4, pp.641-648, 2018.
- ③ 平野廣和: 巨大自然災害に備えての駐屯地・基地での給水タンクのあり方, 防衛施設学会誌, 査読無, Vol.20, pp.34-42, 2018.
- ④ 志賀典親, 小野泰介, 因和樹, 井田剛史, 平野廣和: 振動実験と数値流体解析を用いたバルジングの特徴の把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.74, No.2, pp.285-294, 2018.
- ⑤ 塩野谷遼, 平野廣和, 井田剛史, 河田彰: 実機貯水槽を用いたバルジング振動に関する振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.73, No.4, pp.404-411, 2017.
- ⑥ 平野廣和: 貯水槽用浮体式波動抑制装置の開発, 配管技術, 査読無, Vol.59, No.2, pp.37-42, 2017.
- ⑦ 平野廣和: 地震の揺れから貯水槽を守る浮体式波動抑制装置『タンクセイバー・波平さん』, 産学連携ジャーナル, 査読無, Vol.12, No.9, pp20-23, 2016.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 小野泰介, 井田剛史, 石川友樹, 平野廣和: 貯水槽におけるバルジング現象の対策案についての検討, 土木学会関東支部第 46 回技術研究発表会, 2019.
- ② 遠田豊, 平野廣和, 佐藤尚次: ステンレスパネルタンクの耐震上の問題点に関して, 土木学会関東支部第 46 回技術研究発表会, 2019.
- ③ 青木大祐, 坂東芳行, 行田聡, 佐久間真輝, 鈴木森晶: 短周期振動を受ける矩形大型水槽の水圧低減装置に関する実験的検討, 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要

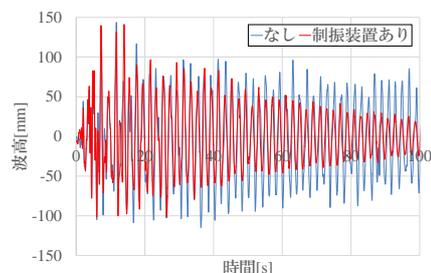
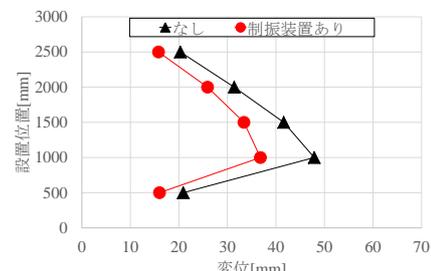
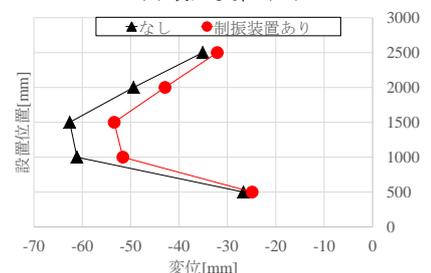


図 4-5 応答波高



(a)最大変位(+)



(b)最大変位(-)

図 4-6 壁面の変位分布

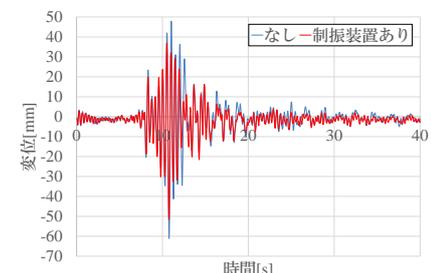


図 4-7 壁面の高 1000mm 位置変位波形

集, 2019.

- ④ 因和樹, 河田彰, 平野廣和, 佐藤尚次: アクリル製矩形水槽を用いての実験と解析でのバルジング現象の検討, 土木学会関東支部第 45 回技術研究発表会, 2018.
- ⑤ 小野泰介, 平野廣和, 井田剛史: 矩形アクリル水槽におけるバルジング現象の対策案についての検討, 土木学会関東支部第 45 回技術研究発表会, 2018.
- ⑥ 志賀典親, 小野泰介, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形水槽へのハンマリング試験とバルジング現象の関連性の検証, 土木学会関東支部第 45 回技術研究発表会, 2018.
- ⑦ 青木大祐, 行田聡, 坂東芳行, 鈴木森晶: 短周期振動を受けるステンレス鋼製矩形水槽に対する制震装置の実証, 平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会, 2018.
- ⑧ 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 石川友樹: 貯水槽のバルジング振動を抑制するためのダンパーの提案, 土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会, 2018.
- ⑨ 小野泰介, 井田剛史, 平野廣和, 河田彰: 地震時における FRP 製タンク側壁の応答に関して, 土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会, 2018.
- ⑩ 青木大祐, 坂東芳行, 行田聡, 佐久間真輝, 鈴木森晶: 短周期振動を受ける矩形大型水槽の水圧低減装置に関する実験的検討, 土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会, 2018.
- ⑪ 因和樹, 河田彰, 平野廣和, 佐藤尚次: 液体輸送車両における内容液の液面揺動による運転性能の把握, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.
- ⑫ 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 石川友樹: 液体輸送車両の安全性向上と燃費向上のための制振装置の開発, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.
- ⑬ 青木大祐, 坂東芳行, 加藤健太, 鈴木森晶: バルジング振動域におけるステンレス鋼製矩形貯水槽の動水圧の抑制, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 減衰装置

発明者: 平野廣和, 石川友樹, 小野泰介, 井田剛史, 松本拓也

権利者: 平野廣和, 石川友樹, 小野泰介, 井田剛史, 松本拓也

種類: 特許

番号: 2019-009603

出願年: 2019

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

貯水タンクを地震から守れ-貯水タンクの地震被害調査と対策-

<http://www.fps.chuo-u.ac.jp/~hrsk/sloshing/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 佐藤 尚次

ローマ字氏名: (SATO, naotsugu)

所属研究機関名: 中央大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30162457

研究分担者氏名: 鈴木 森晶

ローマ字氏名: (SUZUKI, moriaki)

所属研究機関名: 愛知工業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90273276

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 井田 剛史

ローマ字氏名: (IDA, tsuyosshi)

研究協力者氏名: 石川 友樹

ローマ字氏名: (ISHIKAWA, tomoki)

研究協力者氏名: 瀬戸 大輔

ローマ字氏名: (SETO, aaisuke)

研究協力者氏名: 因 和樹

ローマ字氏名: (IN, kazuki)

研究協力者氏名: 小野 泰介

ローマ字氏名: (ONO, taishke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。