

# 非耐震仕様のFRP製貯水槽を用いての バルジング特性の把握とその制振対策の検討

大野 紗希<sup>1</sup>・小野 泰介<sup>2</sup>・竹本 純平<sup>3</sup>・宮本 裕太<sup>4</sup>・平野 廣和<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)十川ゴム (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516)

E-mail:saki-oono@togawa.co.jp

<sup>2</sup> 学生員 中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: a19.grk4@g.chuo-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 日本航空(株) (研究当時：中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻)

E-mail: k8430.b787.tk@gmail.com

<sup>4</sup>正会員 積水アクアシステム(株) (〒639-1031 奈良県大和郡山市今国府町411-7)

E-mail:miyamoto-yu@sekisui.com

<sup>5</sup>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)

E-mail:hirano@tamacc.chuo-u.ac.jp

本論文は、1980年に水槽耐震設計基準が制定される前の非耐震仕様のFRP製貯水槽を用いて、この貯水槽のバルジング振動特性を把握すると共に、既存貯水槽における耐震性向上のためバルジング対策案の一つとして制振装置の検討を行った。貯水槽隅角部が問題となることから、ここに制振装置を設置することで、壁面応答を低減させることができた。さらにレインフロー解析を実施することで、大きな変位ならびに大きな加速度の繰り返し発生回数を抑制する減衰効果を明確にすることができた。

**Key Words :** *development of damper, bulging vibration, earthquake resistant, FRP water tank*

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災）での著者らの現地調査の結果や関連の報告書<sup>1)2)</sup>によると、貯水槽に発生する被害には、大きく分けて2種類あることがわかってきた。一つは天井や上部の側板が破損した事例である。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（内容液の固有振動数と地震波の卓越振動数の共振による液面揺動）が原因であるのに対し、後者はタンク構造体の振動が主体となるバルジング（内容液と構造体の連成振動）が原因と考えられる。

この結果を裏付ける被害調査研究として、井上ら<sup>3)</sup>は東日本大震災被害域である岩手県、宮城県、福島県、栃木県、茨城県での公立学校や病院を中心とした調査で、146機の貯水槽に被害が生じたことを明らかにした。この内125機余りの貯水槽が、高さ方向で真ん中より下側のパネルを主として破損が生じていると指摘している。このことから井上ら<sup>3)</sup>は、バルジングが破損の主要因で

あると指摘している。

一方、熊本県を中心として2016年4月14日～16日に震度7の地震が2回、震度6強の地震が2回発生し、余震は半年で4000回を越える。この地震は、活断層による直下型の地震であり、震源が浅いことから地表面に大きな揺れを生じさせて甚大な被害をもたらした。さらに、複数の活断層が同時に動いた可能性があり、前震・本震・余震の区別が難しい地震とも言われている。特に熊本地震では、著者らの現地調査<sup>4)</sup>においてスロッシングのみならずバルジングによる被害を多数確認できた。

このように地震被害が発生する度に、スロッシングの被害のみならずバルジングの被害が発生していることに鑑み、今後貯水槽をはじめとする給水タンクの耐震性と安全性を向上させるためには、現行設計基準で規定されているスロッシングのみならず、設計基準に規定が示されていないバルジング問題の解明が急務である。バルジングに関する研究は、大型の石油タンク等では坂井<sup>5)6)</sup>らが中心となって行ってきたが、ここで取り上げる貯水槽に関する研究は、箕輪ら<sup>7)8)</sup>の研究や著者ら<sup>9)</sup>の研究グル

ープがある他にあまり行われていないのが現状である。そのため、バルジング対策をどのように貯水槽の耐震設計に取り入れていくかが、今後貯水槽の耐震性と安全性向上のためには必要であり、バルジングに関する設計基準の策定が一つの重要な課題になるものと思われる。

そこで本論では、まず 1980 年に水槽耐震設計基準（案）が制定される前の非耐震仕様の FRP 製貯水槽（以下、FRP タンク）を用いて、この FRP タンクのバルジング振動特性を把握する。続いてこの耐震性の低い FRP タンクに新たにバルジング用に開発した制振装置を組み込み、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が確認出来たのでここで報告する。

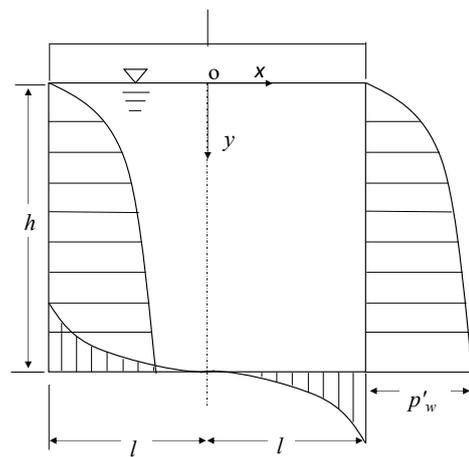


図-1 バルジング発生時の側板に生ずる圧力の模式図

## 2. 貯水槽の耐震設計基準の現状

現状の貯水槽の耐震設計基準<sup>10)</sup>においてスロッシングは、貯水槽壁板を完全剛体と仮定し、Housnerの式<sup>11)</sup>に代表されるように、貯水槽の流体運動を簡単な物理モデルで近似している。これを基に、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ことを前提にしている。そのため、ここで示されている地震時の動液圧は、貯水槽の剛体運動に伴って生じるものであり、その結果入力加速度に比例する形となっている。

一方、本論で扱うバルジングは、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り、流体と構造の連成振動（Fluid-Structure Interaction）の問題として扱われている。そのために明らかにスロッシングとはその性状が異なり、複雑な挙動を示すことになる。

よって、このバルジングが、設計に全く反映されてこなかったと考えられる。図-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  $P_w$ （動液圧）が増幅して繰り返し作用する。ここで  $l$  は加振断面方向の長さの  $1/2$ 、 $h$  は水深である。これが地震発生に衝撃力となり側板を加振することから、下部側板のパネルに損傷被害が生ずることとなる。さらに振動方向に方向角がある場合には、波が隅角部に集中することから、この部分に損傷が集中することが既にわかっている<sup>12)</sup>。

## 3. バルジング特性の把握実験

### (1) 使用する水槽

写真-1 に示す 3,000mm×3,000mm×3,000mm の FRP タンクを用い、加振実験を行う。この FRP タンクは 1980



写真-1 非耐震 FRP 製貯水槽（FRP タンク）

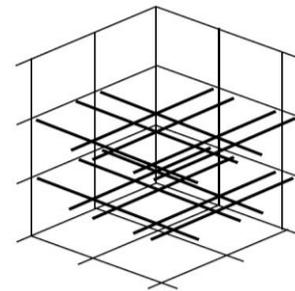


図-2 内部補強構造（ステーボルト方式）

年に水槽耐震設計基準が制定されるより前の非耐震仕様であり、外補強がなされていない構造である。当時 FRP タンク設計の明確な基準がなかったこともあり、図-2 に示すステーボルト方式の耐震性能を考慮していない非耐震仕様のタンクである。ここでの水平震度は 0.3G である。さらに、加振方向面には、20 年余り使われ劣化が一部進んでいる可能性が高いパネルを用いている。ここでの設定は、現在においても 40 年以上前に設置された非耐震仕様の FRP タンクが存在していることに鑑み、地震時にこれらのタンクが被害を受ける危険性がある状況をできる限り再現することとしている。

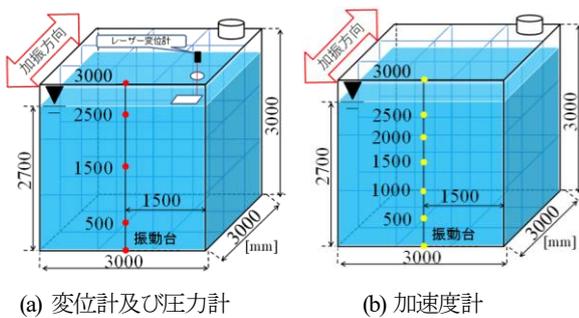


図-3 計器の設置位置

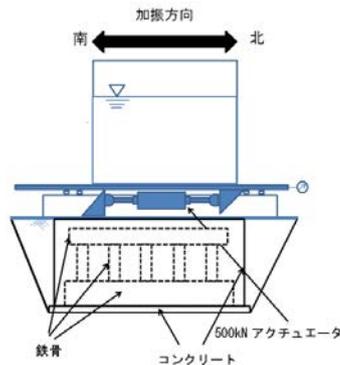


図-4 振動台の模式図

この FRP タンクに通常設定水位と同じである内容量 90%の水位 2,700mm まで注水する。これにより制振装置の有無による貯水槽側壁応答加速度の低減効果に関して正弦波を用いて比較を行う。

## (2) 計測項目

本論文では、各実験ケースにて、波高・壁面応答変位及び壁面応答加速度・動液圧を計測する。計器の設置位置を図-3(a)に示す。波高・変位は、(株)KEYENCE 製レーザー変位計 IL-600 を対象に照射することで計測する。波高はタンク内にワイヤーを介して浮かべた発泡スチロール板をターゲットとする。壁面変位は、レーザー変位計を壁面に照射することで計測し、振動台と FRP タンク壁面の高さ 500mm, 1,500mm, 2,500mm において設置し、それぞれの変位を算出する。データのサンプリング周波数は 10Hz にて計測を行う。

圧力計は(株)共和電業社製の PGM-G を用いる。これらを、高さ 500mm, 1,500mm, 2,500mm, 天井 3,000mm のパネル中央の計 4 箇所に設置する。圧力計は各設置位置における動液圧変化を計測する。動液圧変化は、式(1)に示すように定義する。

$$\Delta P = P - P_0 \quad (1)$$

ここで、 $\Delta P$  は動液圧変化、 $P$  は全圧力、 $P_0$  は静水圧で

ある。これにより、水を満たした静水圧の状態をゼロとして計測することで、各圧力計の設置位置における動液圧変化を計測する。この方法によって、バルジ発生時の壁面に及ぼす動液圧変化に関して検討を行う。

加速度計の設置位置を図-3(b)に示す。加速度計は、(株)共和電業社製の小型低容量加速度変換器 AS-GB を用い、壁面の加速度を計測する。本実験で計測する加速度は、壁面の中心に底面からの高さ 500mm, 1,000mm, 1,500mm, 2,000mm, 2,500mm, 天井の 3,000mm の 6 箇所にそれぞれ加振方向に加速度計を設置し計測する。データのサンプリング周波数は 100Hz にて計測を行う。

振動実験には、図-4 に示す中央大学と愛知工業大学が共同で愛知工業大学実験センターに設置した大型振動装置にて実験を行う。振動台は東西方向 4,500mm, 南北方向 4,500mm の正八角形である。加振装置は、MTS 社製の 500kN アクチュエータを 2 基、制御装置は(株)島津製作所社製の 4830 形制御装置、レールおよびローラーには日本トムソン(株)のリニアローラーウェイスーパー X を使用する。

## (3) 加振条件

バルジ加振実験は、現行の耐震基準では短周期地震動による側板への動液圧が、絶対応答加速度 SA に基づき算定されていることから、入力加速度を一定の  $35\text{cm/s}^2$  として 20 波で加振する。この時の地震震度階級は震度 4 程度である。この加速度において、既存の我々研究グループの研究<sup>9</sup>から加振周波数範囲を 1.0~2.0Hz とし、この間で 0.1Hz 刻みで加振して壁面変位や動液圧が最大となる場所を探すとす。

さらに、制振装置の制振効果を確認する場合は、地震波での加振を行う。本実験で用いる地震波は 2 種類とし、振動台の加振能力より、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 SN 方向観測波の 30% 変位相当と熊本地震宇土 NS 方向観測波変位 50% 相当とし、加振方向は計測面に直交とする。なお、本実験において貯水槽の膨らむ方向を正(+)凹む方向を負(-)とする。

## 4. バルジ制振装置

バルジ制振装置として、新たに提案するバルジダンパーを用いる。この制振装置は、熱可塑性オレフィン製の中空弾性部材を主体とする弾性変形ダンパーである。ただし、中空弾性部材の材質は熱可塑性オレフィンに限らず、他の熱硬化性エラストマーや熱可塑性エラストマーも用いることができる。この制振装置は FRP タンクの内壁の第 1 側面に固定される第 1 固定部、タンク内壁の第 2 側面に固定される第 2 固定部、2 つの固定部

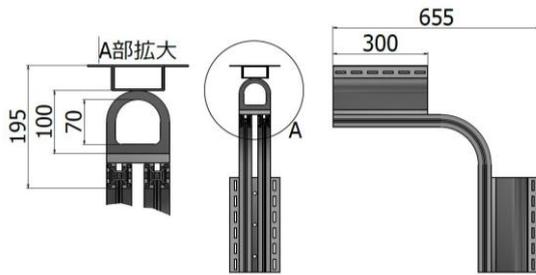


図-5 バルジング用制振装置の概要



写真-2 バルジング用制振装置



写真-3 制振装置取り付け時



写真-4 8の字型浮体式制振装置の設置状況

を繋げる連結部材から構成され、組立後の様子を図-5 ならびに写真-2 に示す。この構造により、タンク内壁の第1側面及び第2側面の両面に対して地震動による運動エネルギーが加えられた場合は、第1固定部の中空弾性部材と第2固定部の中空弾性部材の両方が弾性変形して、地震動等による振動を減衰させることになる。ここでは中空弾性部材がより柔軟に弾性変形し易くなり、地震動等による振動をより効率良く減衰させてバルジ

ング現象を弱めることができる。

本制振装置を、バルジングの影響が大きい貯水槽隅角部の4隅、貯水槽底から1,000mmと2,000mm位置の8ヶ所に取り付ける。写真-3 は実際に内部に設置した様子である。

ところで制振装置を配した振動実験では、ここで示したバルジング制振装置の他、スロッシング用に既に開発した写真-4 に示す8の字型浮体式制振装置<sup>13)</sup>も併用することとする。これにより異なった現象であるスロッシングとバルジングに対応した制振措置を配置したことになる。

## 5. 正弦波によるバルジング加振実験

正弦波加振により、FRP タンクのバルジング固有振動数の把握を行う。さらに制振装置有無の違いも比較する。

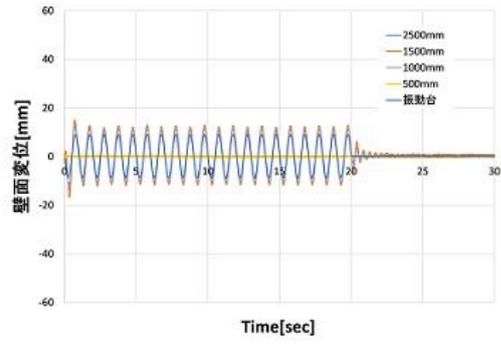
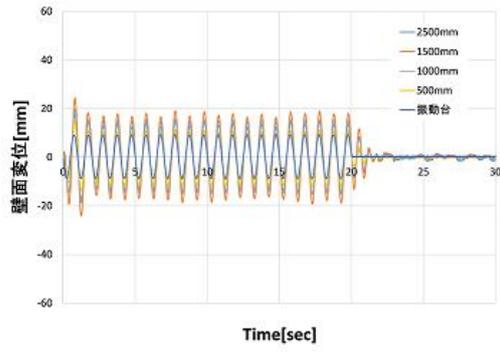
### (1) 壁面応答変位

図-6 に正弦波加振時の FRP タンク壁面の時刻歴応答変位を示す。ここで、左側は制振装置無であり、右側は制振装置を付加している制振時の壁面変位である。加振終了後自由減衰に移行してからは、壁面の振動が直ぐに収まるバルジング振動独特の現象<sup>9)</sup>を表していることがわかる。

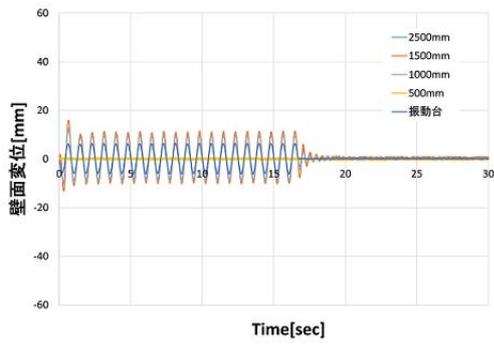
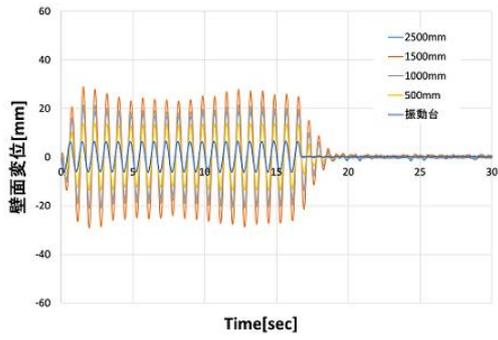
図-6 の制振装置無に着目すると、1.0Hz から振動数を上げるに従って、壁面の振幅が徐々に大きくなっており、1.4Hz において、1,500mm 位置で壁面変位の最大値は58.5mm となり、これ以降徐々に振幅が小さくなっている。したがって本FRPタンクのバルジング固有振動数は1.4Hz 付近にあると考える。

次に図-6 の制振装置有に着目すると、非制振時と同様に1.0Hz から振動数を上げるに従って、振幅が大きくなっている。制振装置無のピークは1.4Hz であるのに対し、制振時は振幅のピークが1.6Hz~1.7Hz 付近にあり、これ以降振幅が小さくなっている。これは、FRP タンクの隅角部に制振装置を設置したことで、壁面全体の剛性が上がったことから、非制振時は1.4Hz であったバルジングの固有振動数が1.7Hz 付近に移行したと考える。

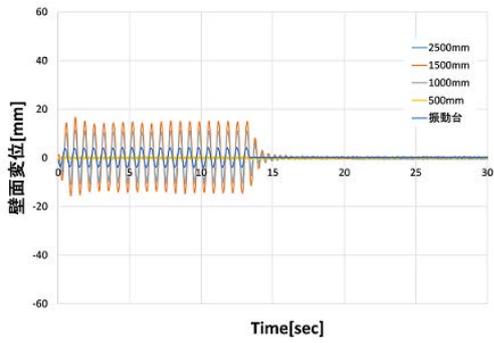
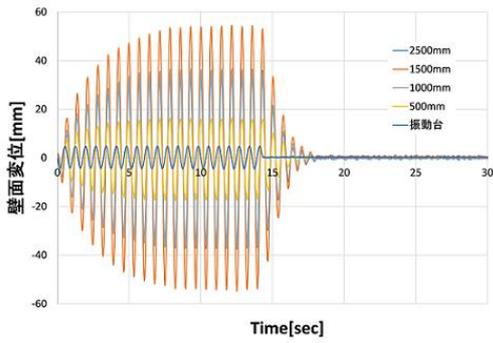
以上より、バルジングの固有振動数域で制振装置無の1.4Hz で壁面の変位が最大振幅 58.5mm、制振措置有の1.7Hz で同最大振幅 25.8mm であるので、制振装置を付加することで振幅は40%程度に抑制されていることがわかる。



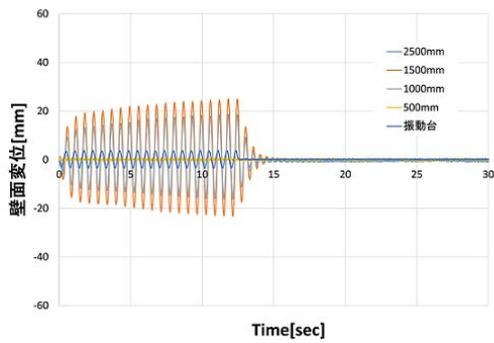
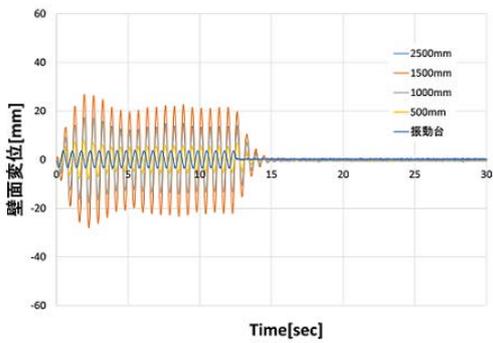
(a) 1.0Hz



(b) 1.2Hz



(c) 1.4Hz

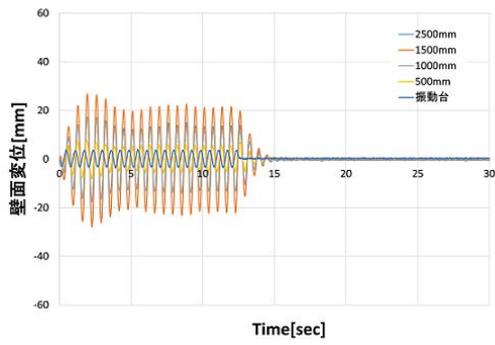


(d) 1.6Hz

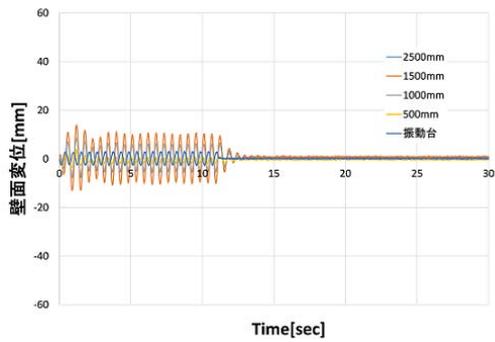
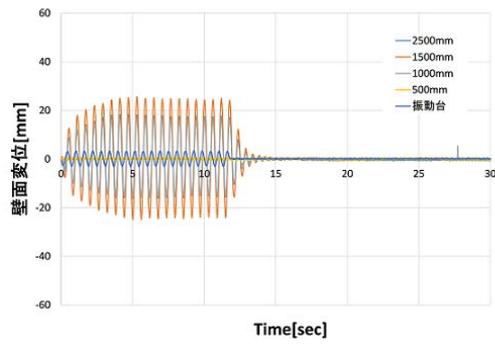
制振装置無

制振措置有

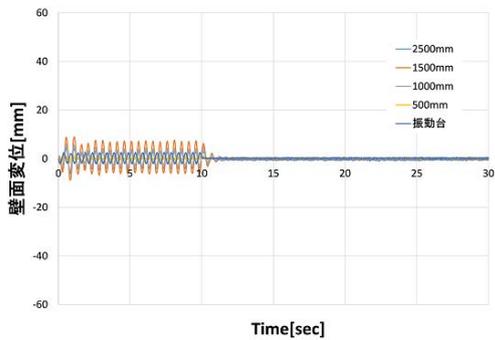
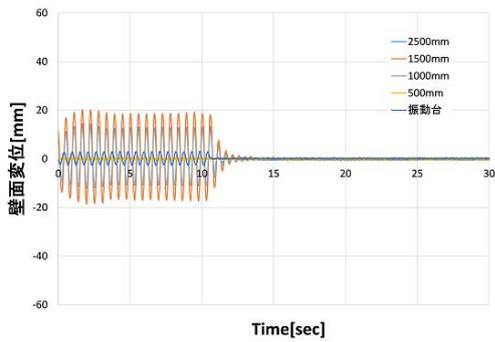
図-6 時刻歴応答壁面変位



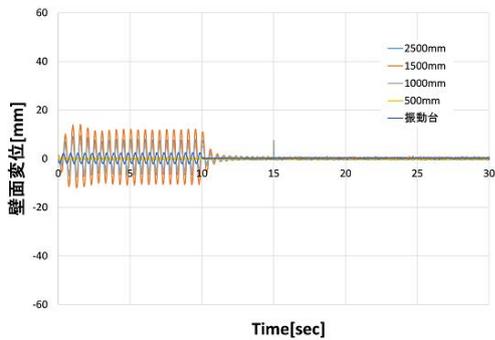
(c) 1.7Hz



(f) 1.8Hz



(g) 2.0Hz



制振装置無

制振措置有

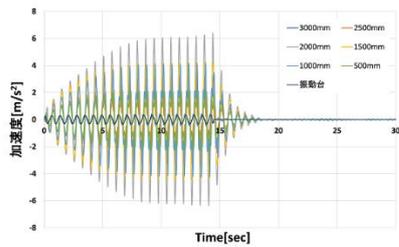
図-6 時刻歴応答壁面変位 (続き)

## (2) 壁面応答加速度

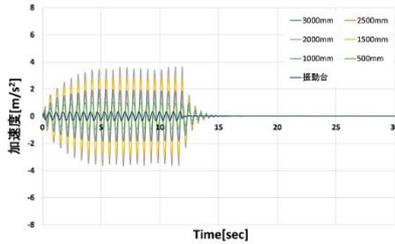
図-7 に前節で確認した制振装置無のバルジング共振点である 1.4Hz 加振時と制振装置有のバルジング共振点である 1.7Hz 加振時の壁面応答加速度の比較を行う。これより最大加速度は、非制振時で  $6.0\text{m/s}^2$  程度であるのに対し、制振装置を設置することで、 $4.0\text{m/s}^2$  程度と約 60% に低減されていることがわかる。

## (3) 壁面動液圧

図-8 に正弦波加振において共振点付近の動液圧の比較を示す。ここで(a)は非制振時のバルジング共振点である、1.4Hz 加振時、(b)は制振時のバルジング共振点である、1.7Hz 加振時である。圧力は制振装置無において  $3\text{kPa}$  程度であるのに対し、制振装置を設置することで、 $2\text{kPa}$  程度と約 60% に低減されていることがわかる。

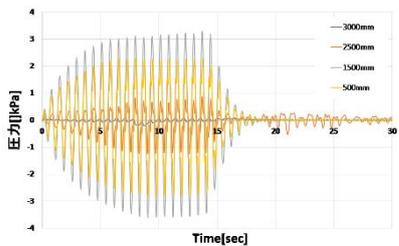


(a) 1.4Hz (制振装置無)

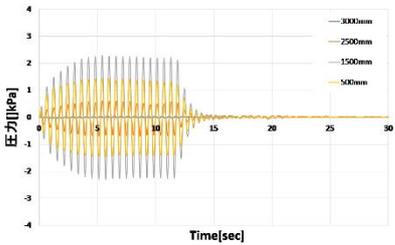


(b) 1.7Hz (制振装置有)

図-7 共振点付近での壁面応答加速度の比較



(a) 1.4Hz (制振装置無)



(b) 1.7Hz (制振装置有)

図-8 共振点付近での動液圧の比較

## 6. 地震波加振

本論で用いる地震波は2種類とし、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SN方向観測波の30%変位相当(以下、神戸波)と熊本地震宇土NS方向観測波変位50%相当(以下、熊本波)とし、加振方向は計測面に直交とする。なお、本実験において貯水槽の膨らむ方向を正(+)/凹む方向を負(-)とする。

### (1) 神戸波

図-9に神戸波加振時の制振装置の有無による時刻歴応答の比較を示す。(a)は壁面変位、(b)は壁面加速度、(c)は壁面動液圧である。

図-9(a)の壁面変位に着目すると、制振装置の有無に関わらず、1,500mmの位置において最大となっている。最大変位に関して、非制振時+側で82.64mmでに対し、制振装置を付加した場合は、53.12mmと36%程度低減されている。一側は非制振時、-75.76mmに対し、制振装置付加時、60.72mmと20%程度低減することができた。

次に図-9(b)の壁面加速度に着目すると、非制振の場合の最大加速度は+側7.56m/s<sup>2</sup>、一側-7.60m/s<sup>2</sup>である。また制振装置を付加した場合、+側7.14m/s<sup>2</sup>であり、一側では-6.67m/s<sup>2</sup>と最大加速度での比較では顕著な変化は見られない。しかしながら、非制振時に対し、制振装置を付加することで、繰り返しの加速度が抑制できており、減衰が促されていることが分かる。

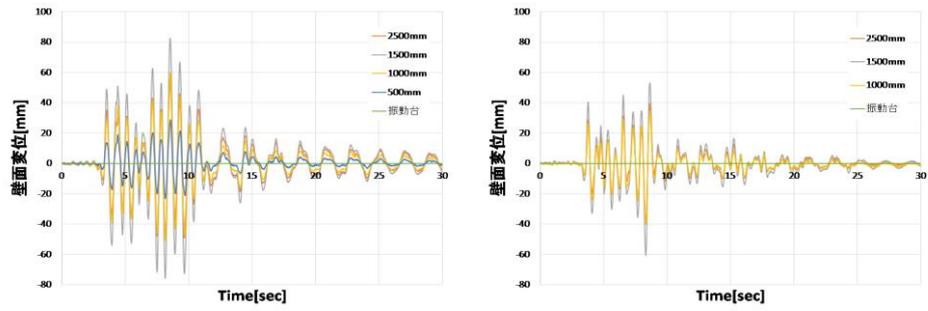
図-9(c)壁面動液圧に着目すると、制振装置の有無に関わらず、1,500mmの位置において圧力が最大となっている。1,500mmにおける最大圧力は、非制振時には、5.17kPaであるのに対し、制振装置を付加した場合は、4.26kPaと17%程度低減されている。

### (2) 熊本波

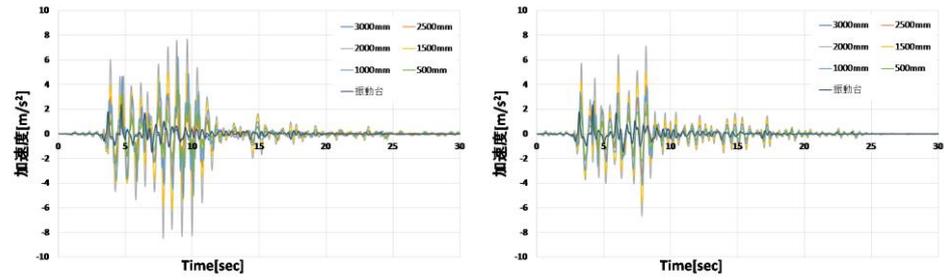
図-10に熊本波で加振時の制振装置有無による時刻歴応答の比較を示す。(a)は壁面変位、(b)は壁面加速度、(c)は壁面動液圧である。

図-10(a)の壁面変位に着目すると、1,500mmの位置において変位が最大となっている。最大変位に関して、非制振の場合は59.44mmであるのに対し、制振装置を付加した場合は、30.88mmであり、48%程度低減することができた。一側では、非制振時は-69.36mmであり、制振装置付加時は-43.20mmと38%程度低減できている。

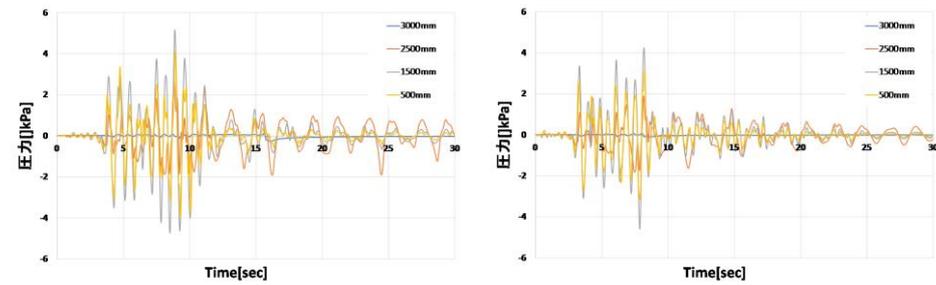
次に、図-10(b)の壁面応答加速度に着目すると、制振装置の有無に関わらず、2,000mmの位置において最大となっている。最大値に関して、+側は非制振の場合6.46m/s<sup>2</sup>であり、制振装置を付加した場合は、4.45m/s<sup>2</sup>となった。制振装置の有無で比較すると1.92m/s<sup>2</sup>の29%程度低減されている。また-側では、非制振の場合-7.25m/s<sup>2</sup>であり、制振装置を付加した場合は、-6.91m/s<sup>2</sup>であり、0.35m/s<sup>2</sup>の5%程度の低減に留まっている。しかしながら、非制振時に対し、制振装置を付加することで、繰り返しの加速度が抑制できており、減衰が促されていることがわかる。図-10(c)壁面動液圧は制振装置有では1,500mmの位置、制振装置無では500mmの圧力が最大となっている。最大圧力は、非制振時には、4.08kPaであるのに対し、制振装置を付加した場合は、3.63kPaと11%程度低減されている。



(a) 壁面変位



(b) 壁面加速度

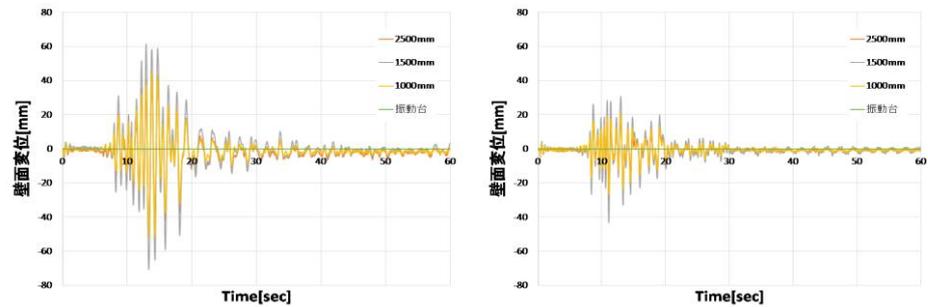


(c) 壁面動液圧

制振装置無

制振装置有

図-9 神戸波加振時の時刻歴応答

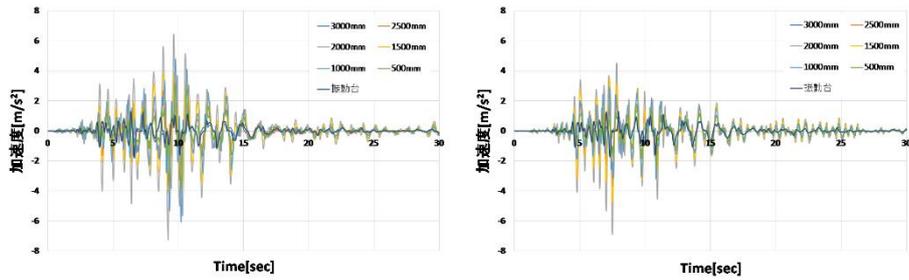


(a) 壁面応答変位

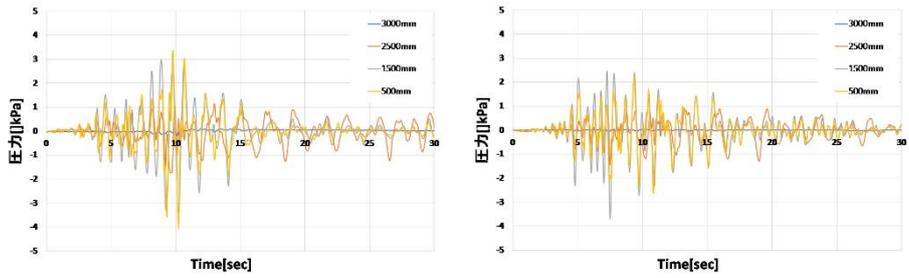
制振装置無

制振装置有

図-10 熊本波加振時の時刻歴応答



(b) 壁面加速度



(c) 壁面動液圧

制振装置無

制振装置有

図-10 熊本波加振時の時刻歴応答 (続き)

## 7. レインフロー解析

### (1) レインフロー解析の概要

制振装置を付加することによる壁面応答変位と壁面応答加速度の減衰効果をより明確なものとするために、レインフロー解析を実施する。レインフロー解析は通常、不規則な繰り返し変動荷重を受ける機械や構造物などにおいて、疲労寿命予測する手法として用いられる。解析においては、対象とするひずみ等の時系列波形を建物の屋根に見立て、この屋根を流れる雨だれの経路から、疲労寿命に寄与するひずみの大きさ（全振幅）とその発生回数を決定するものである。

この手法を地震波加振実験における壁面応答変位及び、壁面応答加速度に当てはめて、制振装置付加に伴う低減効果を分析する。解析の対象は神戸波加振時及び熊本波加振時における、応答変位及び加速度とする。制振装置の有無に関わらず、変位は1,500mm位置において、加速度は2,000mm位置において最大となっている。そのため本論においても、変位は1,500mm、加速度は2,000mmを対象とする。ここで、レインフロー解析に用いる、1,500mm位置における時刻歴応答変位を図-11に、2,000mm位置における時刻歴応答加速度を図-12にそれぞれ示す。(a)は神戸波加振時、(b)は熊本波加振時である。

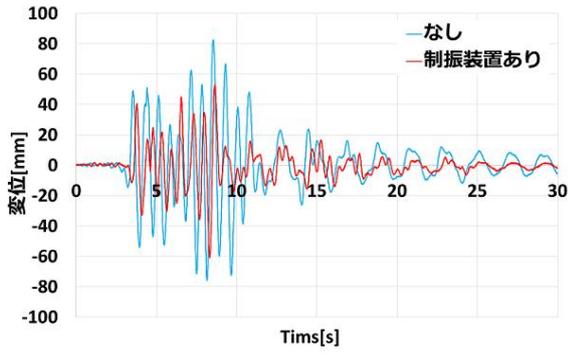
### (2) 解析結果

図-13に壁面変位のレインフロー解析結果を示す。神戸波加振時の全振幅100mm～150mmの発生回数を比較すると非制振6回に対し、制振装置あり1回と大幅に低減されている。熊本波においても全振幅90mm～130mmの発生回数が非制振時5.5回に対し制振装置付あり0回と大幅な低減ができています。この結果から、大振幅に制振装置の効果が発揮されたと考えられる。

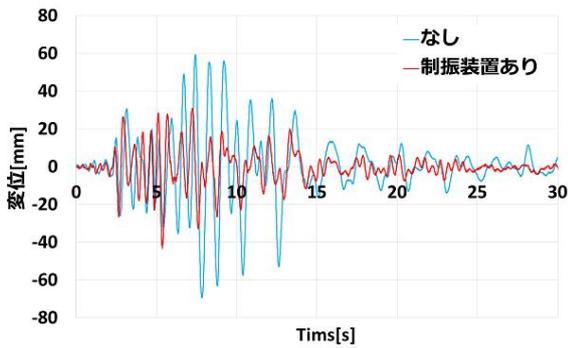
図-14に壁面応答加速度のレインフロー解析結果を示す。神戸波において、11～16m/s<sup>2</sup>の発生回数が非制振4回に対し、制振装置ありは1回である。また熊本波加振時、9～13m/s<sup>2</sup>の発生回数は非制振の3回に対し、制振装置ありは2回である。

また、図-13ならびに図-14中において、ある全振幅までに含まれる割合を表す累積相対発生頻度からも、振幅がより小さい範囲に集中しており、制振装置付加により、応答変位と加速度の両方で大きな値の全振幅が抑えられているとわかる。

これらの解析結果から、今回開発したバルジング用制振装置を貯水槽へ付加することにより、貯水槽壁面の大きな応答の繰り返しを抑制し、減衰を促す効果が得られると考えられる。

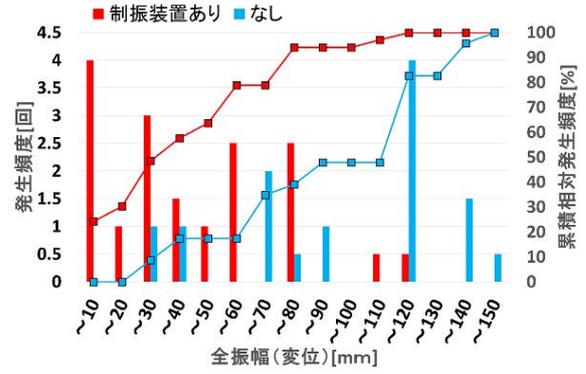


(a) 神戸波

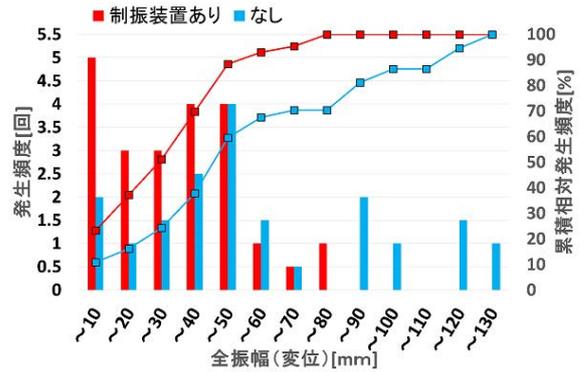


(b) 熊本波

図-11 1,500mmの位置における時刻歴応答変位

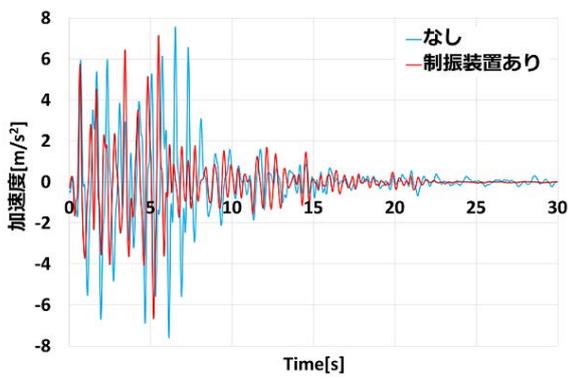


(a) 神戸波

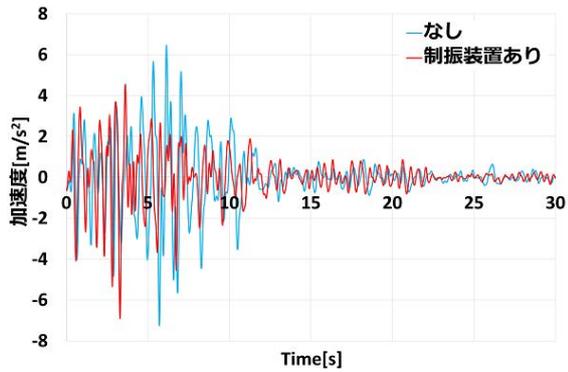


(b) 熊本波

図-13 応答変位のレインフロー解析

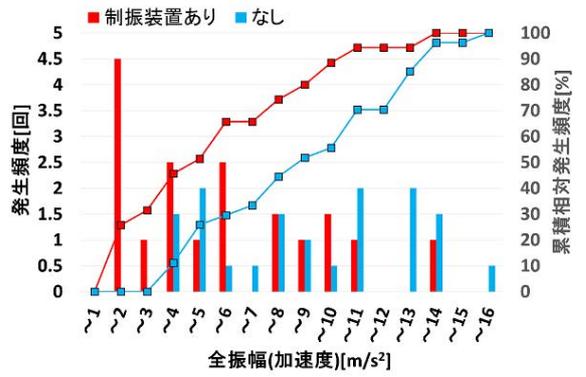


(a) 神戸波

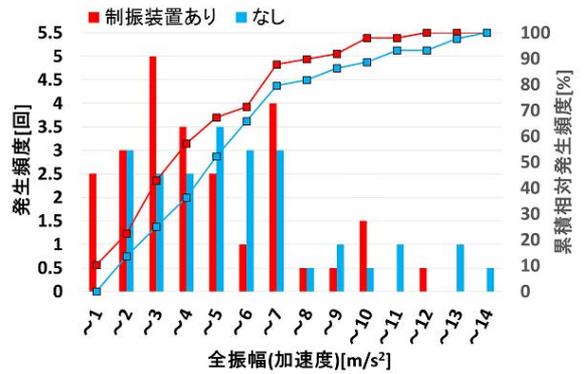


(b) 熊本波

図-12 2,000mmの位置における時刻歴応答加速度



(a) 神戸波



(b) 熊本波

図-14 応答加速度のレインフロー解析

## 8. おわりに

実機の非耐震性FRPタンクを用いて、正弦波、地震波一軸加振実験を行い、バルジング用に開発した制振装置の効果について検証を行った。

正弦波においては、制振装置をFRPタンクの隅角部に設置することで、タンク壁面の剛性が大きくなり、バルジングの固有振動数が1.4Hzから1.7Hzへ移行することが確認できた。また、壁面変位は40%程度、壁面加速度は60%程度低減できることを確認した。

地震波加振実験でも同様に、制振装置を付加させることで水槽壁面の大きな応答の繰り返しを抑制し、減衰を促す効果があることがわかった。さらにレインフロー解析による比較の結果、制振装置により、大きな変位ならびに大きな加速度の繰り返し発生回数が抑制されており、減衰効果を明確にすることができた。ところで、本研究で用いた貯水槽は、非耐震設計仕様であるので、それに該当するFRPタンクの耐震化向上に効果があるものと考ええる。

一方、前述のように貯水槽全体において、最新の設計基準においてもバルジングによる設計基準が定められていないのが現状である。そのため各タンク形式毎に独自に耐震性の向上が検討されている。例えば、耐震性を考慮したFRPタンクでは、パネルを形鋼鋼材により外側から補強する対応を取っている。このような背景から、早急にバルジングに関する統一的新たな設計基準を規定する必要があると考える。

さらに動的な検討から判って来たことは、側壁の応答加速度のスペクトルのピークが、バルジング発生周波数域に入る可能性のあることが懸念されることである。そのため新耐震設計基準とされている1997年以降製造された貯水槽であっても、バルジングにより破損被害が生じていることに鑑み、現状の震度法による静的解析ではなく、動的な設計手法を取り入れたバルジングに対応する新たな耐震設計基準を追加することが必要と考える。

**謝辞**：振動実験を行うに際し、中央大学理工学部都市環境学科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)(研究代表者：平野廣和)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版)」, 3.1 拠点施設の被害状況とその要因・課題, 2012.12.
- 2) (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.
- 3) 井上涼介, 坂井藤一, 大峯秀一：2011年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析, 第34回土木学会地震工学研究発表会, A13-639, 2014.10.
- 4) 小野泰介, 遠田豊, 竹本純平, 平野廣和：熊本地震におけるステンレスパネルタンクの被害調査とスロッシング発生時の損傷の検証, 土木学会構造工学論文集Vol.66A, 2020.3.
- 5) 坂井藤一, 迫田治行：大型液体タンクの地震応答に関する研究, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, 1975.11.
- 6) 岡田統夫, 坂井藤一, 迫田治行：有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析, 川崎重工技報, No. 59 & 61, 1975.12. & 1976.6.
- 7) 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, Vol. 68, No. 668, pp. 1056-1063, 2002.4.
- 8) 箕輪親宏：スロッシングインパクトを考慮した長方形水槽の耐震性に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, 2004.11.
- 9) 塩野谷遼, 平野廣和, 井田剛史, 河田彰：実機貯水槽を用いての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), Vol.73, No.4, 2017.8.
- 10) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説(2009年版), 2009.
- 11) Housner, G. W. : The dynamic behavior of water tank, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol. 53, 1963.
- 12) 竹本純平, 小野泰介, 平野廣和, 佐藤尚次：ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての時刻歴応答解析, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.76, No.2, pp.153-162, 2020.
- 13) 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), Vol.74, No.4, pp.641-648, 2018.9.

# UNDERSTANDING OF BULGING VIBRATION USING NON-EARTHQUAKE RESISTANT FRP WATER TANK AND EXAMINATION OF COUNTERMEASURES

Saki OHNO, Taisuke ONO, Jumpei TAKEMOTO,  
Yuta MIYAMOTO and Hirokazu HIRANO

In this paper, we investigated the bulging vibration characteristics of non-earthquake resistant FRP water tanks that were manufactured before the seismic design standard for tanks was established in 1980 and developed damping device against bulging vibration. We carried out vibration experiment using a non-earthquake resistant tank. The damping device was attached to corner of the tank, because bulging vibration cause damage particularly to there. As a result, it was found that by damping device, deformation of the tank's panel was decreased. In addition, we confirmed damping effect, reducing repeated occurrence of large displacements and large accelerations to the tank by performing rainflow analysis.