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

塩野谷 遼[1]・平野 廣和[2]・井田 剛史[3]

[1]正会員 東京都水道局西部建設事務所（〒168-0063東京都杉並区和泉3-8-10，研究当時 中央大学大学院）

[2]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

[3]正会員　㈱十川ゴム 研究開発部 （〒599-8244 大阪府堺市中区上之516）

東日本大震災や熊本地震での貯水槽の被害調査により，天井や上部の側板が破損した事例，中心より下側の側板や隅角部が破損した事例の二種類が顕著であった．前者はスロッシングによる液面揺動に起因し，後者はタンク構造体の振動が主体となるバルジングに起因すると考えられる．そこで本研究では，3m×3m×3mのFRP製パネル実機貯水槽を用い，バルジングについて検証を行った．その結果，壁面変位と動液圧の変化より発生する周波数がある幅で存在すること，さらに加振終了後は速やかに振動が収束することを確認した．また，バルジングが発生するとタンク下部に大きな負荷が掛かることから，バルジングがタンク下部付近の破損の要因の一つであることを確認した．

Key Words : *real scale tank, bulging vibration, sloshing vibration, vibration experiment*

1.　はじめに

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，学校等の避難所で重要なライフラインの一つである水が充分に配給されず甚大な被害をもたらした．著者らの研究グループでは，現地調査を行うと伴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[1),2)]により，やや長周期地震動で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り，貯水槽に損傷被害が発生することの再現を行ってきた．この研究でスロッシングは，主に貯水槽の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下部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．現地調査や関連の報告書[3)]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**写真-1**に示すFRP製パネルタンク（以下，FRPタンク）の例で，天井や上部の側板が破損した事例である．もう一つは**写真-2**に示すステンレス製パネルタンク（以下，SUSタンク）の例で，下部を中心としての側板や隅角部が破損した事

写真-1　天井や側板が破損した事例（FRPタンク）
（宮城県名取市）

写真-2　下部隅角部付近の破損事例（SUSタンク）
（福島県郡山市）

例[3]である．前者は，前述のスロッシングに起因したものであるのに対し，後者は，タンク構造体の振動が主体となるバルジングに起因すると考えられる．

さらに，この結果を裏付ける被害調査研究として，井上ら[4]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で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[4]は，バルジングが破損の主要因であると指摘している．

また 2016 年 4 月に発生した熊本地震においても，熊本市を中心として広範囲でスロッシングとバルジングに起因したと思われる同様な被害が発生していることを，著者らの独自の調査で掴んでいる．**写真-3** の FRP タンクは，熊本市南区の事例であり上部の隅角部付近の側壁が損傷していることから，スロッシングが主要因と考えられる．**写真-4** の SUS タンクは，同じく熊本市南区の事例であり，隅角部下部が割れていることから，バルジングが主要因と考えられる．**写真-5** の FRP タンクは，熊本県阿蘇市の事例であり，貯水槽が完全に破壊されるに至っている．これは，バルジングが主として発生した事例と考えられる．

このように東日本の広範な地域でバルジングの被害が顕著であったこと，熊本地震においても同様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から，今後貯水槽を初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，スロッシングのみならずバルジング問題の解明が急務である．しかし，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[5,6]らが中心となって行って来たが，ここで取り上げる貯水槽に関する研究は，箕輪ら[7,8]の研究がある他に余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，一つの重要な課題になるものと思われる．

以上のことから本論文では，全国で比較的設置数の多い FRP 製の実機貯水槽を用い，壁面変位，壁面加速度，動液圧を計測することにより，バルジングに関する検証を行うものである．その結果，バルジングの特徴を掴むことができたので，ここで報告する．

写真-3　隅角部上部側板が破損した事例（FRP タンク）
（熊本市南区）

写真-4　隅角部下部の破損事例（SUS タンク）
（熊本市南区）

写真-5　完全に破壊された事例（FRP タンク）
（熊本県阿蘇市）

2.　貯水槽の耐震設計基準の現状

2.1　耐震設計基準の現状

貯水槽の耐震設計基準は，形状が単純であることから震度法による静的解析を採用しており，動的な設計手法は現状では取り入れられていない．具体的には，側板のパネルの素材の種類に応じてタンクを製造している関連業界毎に設置された協会[9,10,11]において，自主的に作成されているのが現状である．ただし，これらの耐震設計基準は，FRP 貯水槽耐震設計基準[9]が基本となっており，これを基にして側板パネルの素材毎に特徴を加味して加筆され，各水槽形式毎の耐震設計基準とされている．

ここで規定されている FRP 貯水槽の耐震設計基準は，1950 年に建築基準法が制定され，1978 年の宮城県沖地震を受けての一部が改正を受けて（社）強化プラスチック協会により 1980 年に「FRP 水槽耐震設計基準」，1981 年に「FRP 水槽構造設計計算法」が定められたものである．その後，1995 年の阪神・淡路大震災発生を受けて見直し

が行われ，1996 年に改訂版 [9]が発行された．改訂内容としては，水の揺動（スロッシング）による天井部外力での破壊被害が多く見られたこと，また建物や水槽の用途・重要度に応じて，設計者やユーザーの選択によってより耐震性を高めることが出来ることが必要であるという認識のもと見直しがなされた．この設計基準では，地震による水槽の応答には，以下の 2 つがあるとしている．

① 地震の加速度に対して応答する加速度応答
② 変位のやや長周期成分に対して共振的に応答する変位応答

①は，1996 年版の最新の FRP 水槽耐震設計基準 [9]によると，貯水槽の設計地震力の標準値として設計用水平震度 k_H を最大 2.0 とし，角形水槽の側壁に働く変動水圧（P_W）を式(1)に示す Housner の式 [12]により計算している．ここで**図-1** に示すように，l は角形水槽の一辺長の 1/2，h は水深，h_s は上部の空隙，Wは仮想の水面上昇，Z は地域係数，γは水の比重をそれぞれ表す．

$$P_w = \sqrt{3}\gamma k_H h\left\{\frac{Z}{h}-\frac{1}{2}\left(\frac{Z}{h}\right)^2\right\}\tanh\left(\sqrt{3}\frac{l}{h}\right) \quad (h \le 1.5l \text{の場合})$$

$$P_w = \gamma k_H l \quad (h > 1.5l \text{の場合}) \qquad (1)$$

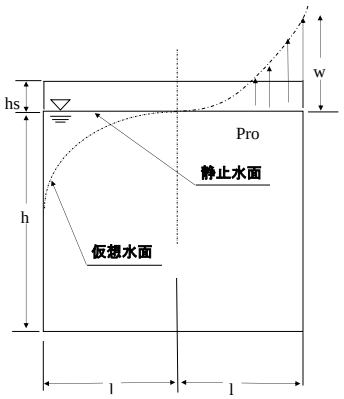


図-1 スロッシング発生時の水面の模式図

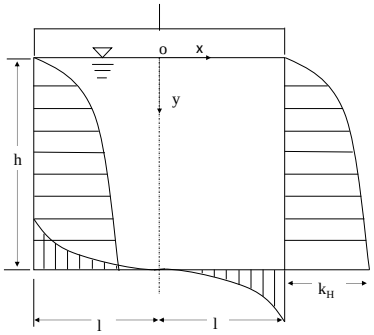


図-2 バルジング発生時の側板に生ずる圧力の模式図

②はスロッシングであり，地震の加速度が小さくても，やや長周期成分と水槽固有のスロッシング周期が接近して共振状態になる．**図-1** のスロッシング発生時の水面の模式図に示すように，天井部等に高い水圧が発生する．また上部の側板付近では，負圧が生じることで，これらの部分を破損させる危険性があると考えられる [2]．

また，スロッシング波高・波動圧に対しても，上述の①と同様に設計基準が設けられており，式(2)～(4)で求めることとしている．この時の速度応答スペクトル値 S_V は，耐震性を特に重視して上層階の屋上及び塔屋に設置する場合，最大で 375 *cm/s* で設計するとしている．

$$W = 0.84\frac{l\cdot\omega_s\cdot S_V}{g} \qquad (2)$$

$$p_{ro} = \left(\frac{1.6h}{\pi}+h_s\right)\rho\ddot{W}+\rho\dot{W}^2 \quad (0<h/2l<0.62) \qquad (3)$$

$$p_{ro} = \left(\frac{2l}{\pi}+h_s\right)\rho\ddot{W}+\rho\dot{W}^2 \quad (h/2l \ge 0.62) \qquad (4)$$

ここで，p_{ro}は水槽天井部に働く基準変動水圧，W は波高，ω_sは 1 次スロッシング固有円振動数，ρ は内容液の密度，lは角形水槽の一辺長の 1/2，hは水深，h_sは上部の空隙をそれぞれ表す．

ところで FRP 水槽耐震設計基準 [9]は，波が側板に直角に作用することを前提として考えられている．しかしながら，著者らの研究 [1]によると振動方向に方向角がある場合には，隅角部に波が集中し対角線方向の加振方向角で最大波高が得られることを示している．そのため振動方向の角度が設計基準に考慮されていないので，上記の式が過小評価されている可能性も考えられる．なお FRP タンクでは，壁面外側に形鋼で補強されるのが耐震性向上の一般的な手法である．しかし隅角部は，構造上の関係から特別な補強が施されていない．なお，SUS タンクは壁面内側を補強しているが，同様に隅角部は補強が十分に施されているとは言えない．さらに，被害調査の結果を加味すると，隅角部が FRP ならびに SUS パネルタンクの弱点となっている可能性が高いことを付記する．

2.2 スロッシングとバルジングに関する考え方の違い

スロッシングは，貯水槽壁板を完全剛体と仮定し，Housner の式 [12]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，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，設計に反映されてこなかったと考えられる．**図-2** 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 K_H（動液圧）が作用する．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判っている[1),2)]．

このように東日本大震災や熊本地震で広範な地域で貯水槽にバルジングの被害が多数発生したことを鑑み，貯水槽の耐震安全性を向上させるためには，バルジングの現象としての解明が緊急の課題である．さらに，この成果を貯水槽の耐震設計に反映させ，バルジングに対する対策をどの様にこの耐震設計基準に取り入れるかが，大きな課題である．

3. 実験概要

3.1 計測器機の配置

加振実験は，3m×3m×3m の FRP 製パネル実機貯水槽を用いる．この水槽は，静水圧を考慮して，1m×1m のパネル（側壁下側，底部，屋根部）と 2m×1m のパネル（側壁上側）から構成されており，それぞれのパネルがボルトで結合されている構造である．**写真-6** に側板部付近とタンク内部の状況をそれぞれ示す．ここでの FRP パネルは，全て板厚 10mm である．さらに側板のパネルの剛性を上げることを目的として，外壁部に鋼製形鋼で補強を施している．また貯水槽内部には，パネルの接合部である底部から 1,000mm の位置に補強のために側板のパネル接合部分同士を引っ張る鋼棒材が井桁状に入っている．さらに，屋根を支える塩ビ製の柱が 4 本立ててある構造である．この貯水槽には，通常使用する水深である 2,700mm まで水を注水し，実機タンクが設置可能な大型振動台にこれを設置して加振実験を行う．

振動台は，**図-3** に示す中央大学と愛知工業大学が 2013 年度に共同で愛知工業大学耐震実験センター内に新設した大型振動装置を用いて加振実験を行う．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．

壁面変位の計測は非接触方式とし，レーザー変位計（(株)KEYENCE 社製　IL-600）を用いる．計測点は，**図-4** に示すように中央のパネルの中心付近とし，底部から高さ 500mm,，1,000mm，1,500mm，2,000mm，2,500mm の 5 箇所の位置の壁面にレーザーを照射して計測する．圧力計（(株)共和電業社製 PGM-G）は，同様に底部から面の中心に高さ 500mm，1,500mm，2.000mm，2,500mm，3,000mm の 5 箇所に設置する．加速度計（(株)共和電業社製小型低容量加速度変換器 AS-1GB）は，同様に底部から面の中心に高さ 500mm，1,500mm，2,500mm の 3 箇所に設置する．なお，各データのサンプリング周波数は，50Hz とする．

写真-6　FRP 貯水槽（側板部付近と貯水槽内部）

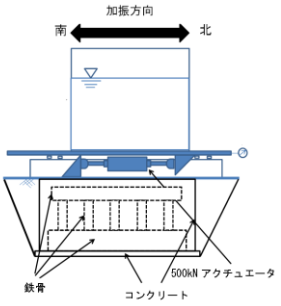


図-3　振動台模式図

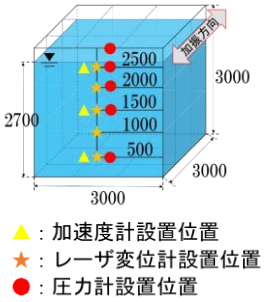


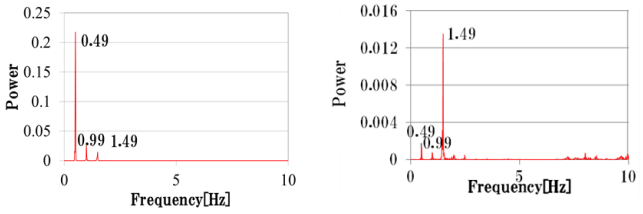
図-4　計測器設置位置

3.2 加振条件

加振条件は箕輪らの SUS タンクでの研究[8)]より，バルジングの固有振動が，加速度と動液圧計測から得られた壁面のスペクトルピーク周波数であるとする．そこで，本研究ではまず比較のためにスロッシング 1 次固有振動数で加振を行う．ここでの振動数は，Housner の式[12)]と事前実験[13)]より 0.5Hz とする．

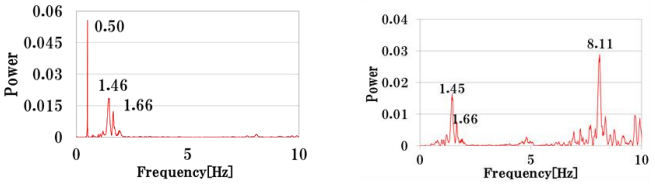
次に不規則波として兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸 NS 方向観測波（以下神戸波）の変位 50%を使用して加振実験を行い，これらの結果からバルジング固有振動数を推定する．

最後に振幅を片振幅 5mm，20 波加振を基本とし，バルジング固有振動数と推定された付近前後を含めての正弦波での加振実験を行う．



(a) 動液圧応答スペクトル　(b) パネルの加速度応答スペクトル

図-5 1 次の固有振動数（0.5Hz）正弦波加振（1,500mm 位置）



(a) 動液圧応答スペクトル　(b) パネルの加速度応答スペクトル

図-6 神戸波 50%加振（1,500mm 位置）

4. 実験結果

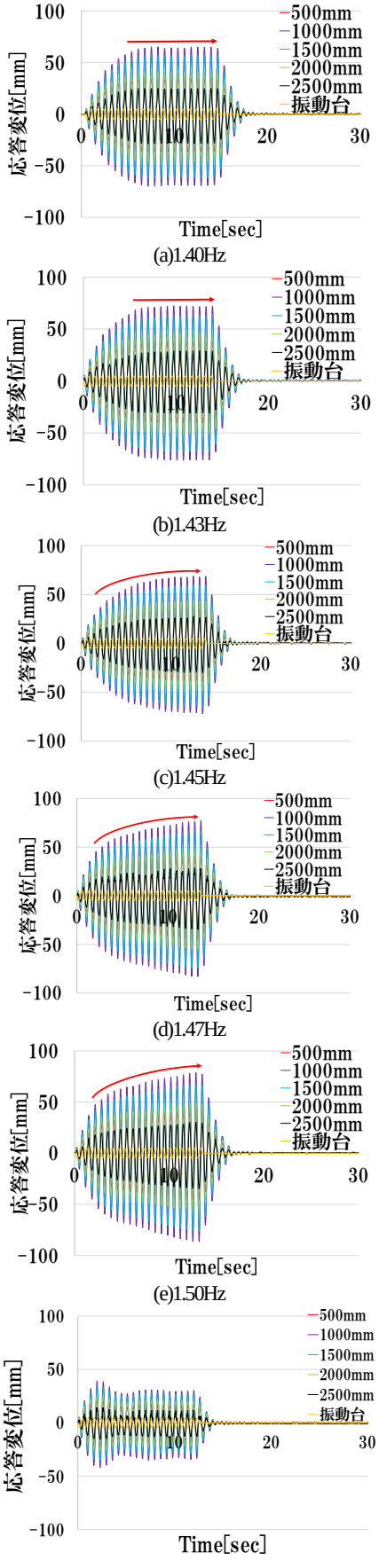
4.1 バルジング固有振動数の導出

スロッシングの 1 次の固有振動数である 0.5Hz での正弦波加振時の動液圧応答と加速度応答のスペクトルを**図-5** に示す．ここで(a)は動液圧，(b)はパネルの加速度の計測を行った 1,500mm 位置での結果である．(a)の動液圧は，スロッシング 1 次の固有振動数である 0.49Hz が卓越し，0.99Hz，1.49Hz に小さなピークが存在している．これに対して(b)パネルの加速度は，1.49Hz が卓越し 0.49Hz，0.99Hz に小さなピークが存在している．ここで 0.99Hz はスロッシングの 1 次固有振動数の 2 倍であると考えられる．1.49Hz に関しては，後述する．

次に神戸波 50%加振時の動液圧応答とパネルの加速度応答のスペクトルを**図-6** に示し，これらも同様に 1,500mm 位置である．(a)の動液圧は，スロッシングの 1 次固有振動数である 0.50Hz が卓越し，1.46Hz，1.66Hz に小さなピークが存在している．これに対して(b)のパネルの加速度は，1.45Hz，1.66Hz にピークが存在している．なお，ここで(b)に 8.11Hz の高周波成分が存在するが，実際の地震では発生することが少ないのでここでは検討外とする．

これらの結果から，動液圧に関しては 0.5Hz 付近のスロッシングの 1 次固有振動が顕著に表れるのに対し，パネルの加速度は，1.45Hz，1.49Hz 付近や 1.66Hz の異なったピークを示している．ここでこれらは，スロッシングに起因する液体揺動による振動のみならず，バルジングに起因する液体が質量となって壁面パネルを振動させた時の壁面パネル本体の振動数と考えられる．

以上のことから，本論文で扱う FRP 製パネル実機貯水



(a)1.40Hz
(b)1.43Hz
(c)1.45Hz
(d)1.47Hz
(e)1.50Hz
(f)1.60Hz

図-7 壁面変位の時刻暦応答

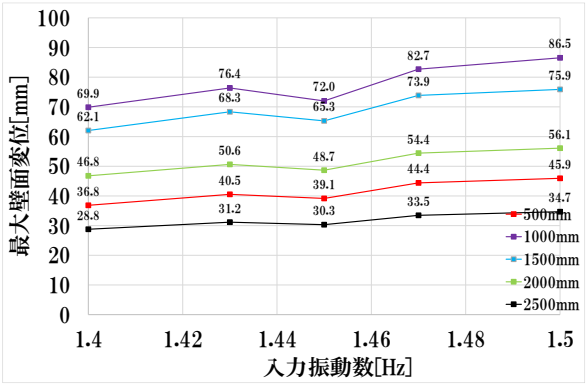


図-8　壁面の最大変位

槽のバルジング固有振動数は，1.40Hz 付近から 1.60Hz 付近の間に存在すると推定する．よって加振振動数は，1.40Hz，1.43Hz，1.45Hz，1.47Hz，1.50Hz，1.60Hz の正弦波片振幅 5mm，20 波で加振実験を行い，バルジング振動についての検証を行うこととする．但し，振動台の性能の関係上から 1.60Hz は，正弦波片振幅 4.5mm，20 波での加振実験とする．

4.2　バルジング振動時の壁面挙動

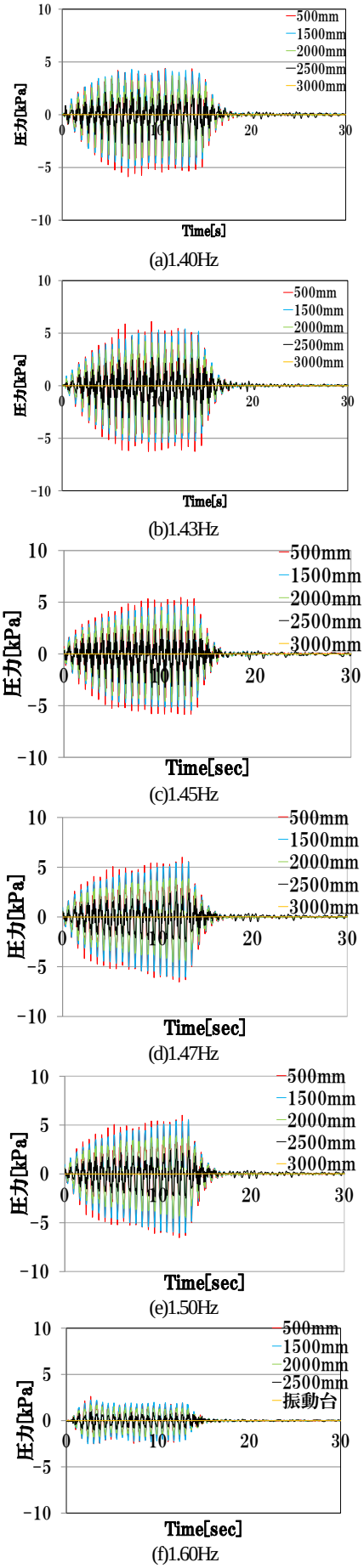
(1) 壁面の変位

図-7　(a)～(f)に壁面の各計測点で非接触で計測した変位の時刻暦応答を示す．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っていることが判る．各加振振動数での結果を比較すると，(a) 1.40Hz，(b) 1.43Hz では壁面パネル変位が最大値を示してから加振終了までの間，図中の矢印で示す様にほぼ一定を示している．これに対して(c) 1.45Hz，(d) 1.47Hz，(e) 1.50Hz では，変位が加振中増加傾向を示し，加振を続けることで壁面の変位がさらに大きくなる可能性が考えられる．なお，ここでこれ以上の加振を行わなかったのは，加振途中でタンクの破損が懸念されたためである．(f) 1.60Hz では加振中に変位が減少し，そこからほぼ一定の値となっていることが確認できる．

図-8 に 1.40Hz～1.50Hz の壁面の最大変位を示す．ここで，1,000mm 地点では，約 70～87mm の最大の変位を示している．但し，1.45Hz 以降は，加振中に振幅は増加傾向にあるので，最大変位がさらに大きくなる可能性が高い．ここで 1,000mm 位置の変位が大きいのは，このタンクの構造上の特徴が考えられる．タンクのパネル上下方向がこの位置で連結されていることから，この位置が節となることで，全ての周波数加振で 1,000mm 地点の変位が最も大きく生じることとなった．

(2) 動液圧の変化

図-9　(a)～(f)に動液圧変化の結果を示す．壁面パネル変位同様に，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っていることが判る．各加振振動



(a)1.40Hz
(b)1.43Hz
(c)1.45Hz
(d)1.47Hz
(e)1.50Hz
(f)1.60Hz

図-9　動液圧変化の時刻暦応答

数での結果を比較すると，(a) 1.40Hz，(b) 1.43Hz では加振開始 10 波程度で一定となるに対し，(c)1.45Hz，(d)1.47Hz で(e)1,5Hz では加振中は圧力の増加の傾向を示している．これに対して 1.60Hz は，増加をしない．また，図−10 に 1.40Hz～1.50Hz の動液圧の最大値を示す．ここで動液圧の最大値は，壁面パネルの変位が最大値を示した点とは異なり，全ての周波数において 500mm 地点，次に 1,500mm 地点となり，タンク下部程動液圧が大きいことがわかる．また，バルジングが生じていると思われる振動数範囲では，動液圧は，各計測点においてほぼ一定になる傾向がある．なお，1,000mm 地点は，パネル接合部なので圧力計の設置ができず，計測は行っていない．

(3) バルジングの特徴

ここまでの検討から，FRP 製貯水槽におけるバルジング固有振動数は，1.40Hz～1.50Hz 範囲にあると考えられる．ここで，バルジングの固有振動数の特徴は，スロッシングの固有振動数のように明らかなピーク値を持つのではなく，発生する周波数がある幅で存在することである．もう一つの特徴は，バルジングは加振終了後に速やかに振動が収まるということである．

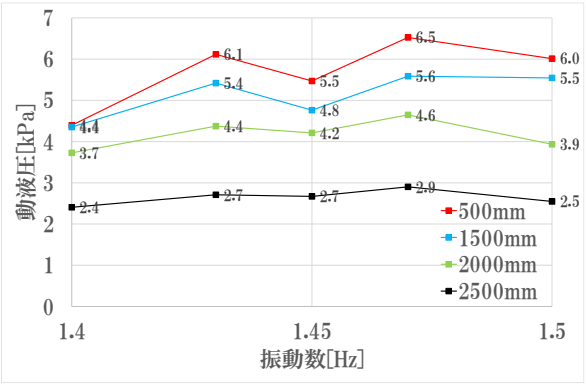
ところで，FRP 設計指針 [9]の式(1)より側壁に働く変動圧力（動液圧）を計算すると，3.0kgf/cm^2(294kPa)となる．ここで図−10 に示す様にバルジング共振域では底部から 500mm 位置で最大 6.5kPa であることから，設計上は 1/50 程度であるので十分な余裕がある．また，底部から 1500mm 位置でも 5kPa であり，ここでも同様である．しかし，バルジング共振域と考えらる範囲でのパネルの変位は，50mm 位置で 37～46mm，1500mm 位置では 62～76mm と大きな変位を生じている．このことから，パネル接合部で水漏れや損傷が生じると推察する．ここでの現象が，震度法による静的解析で設計していることの問題点であり，動的な設計手法が必要なことを示している．

一方，動液圧変化では，500mm 地点で最も圧力が大きくなり，上部へ行くほど圧力は小さくなることがわかる．このことから，バルジングが発生するとタンク下部に大きな力が作用することから，タンク側壁下部で破損が発生することになる．

よって，既往の研究 [2]ならびに本論文での検討から，貯水槽上部の破損はスロッシングが引き起こし，下部の破損はバルジングが引き起こしていると考えられる．

5. おわりに

本論文では 3m×3m×3m の FRP 製パネル実機貯水槽を用い，バルジング振動について検証を行った．その結果，壁面変位と動液圧の変化より 1.47Hz～1.50Hz 付近にバルジングの固有振動数があることが推測される．



図−10 最大動液圧分布

ここでスロッシングは，固有振動数の明らかなピーク値が存在し，かつスロッシングが発生すると減衰が小さいことから収束までに時間がかかることがわかっている．また，タンクの上部に大きな力が加わるため，上部破損の原因であると考えられている．これに対し壁面変位の結果よりバルジング現象は，発生する周波数がある幅で存在することである．さらに加振終了後は速やかに振動が収束するという特徴を有していることを確認した．また，動液圧変化では，500mm 地点で最も圧力が大きくなり，上部へ行くほど圧力は小さくなることがわかった．このことから，バルジングが発生するとタンク下部に大きな負荷が掛かることから，タンク下部付近の破損の要因の一つであると考えられる．

ところで，前述のように FRP タンクは，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状況下であるので，早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定する必要があると考える．特に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があるからである．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 [3]ことに鑑み，バルジングに対応した新たな耐震設計基準を追加することが必要と考える．最終的には，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ることが望ましい．

ところで，FRP タンクの耐震性向上の一つの提案として，例えば壁面上下方向に現状以上の剛性の高い鋼材等で補強することで充分な剛性を確保すること，また隅角部に被害が集中することから，特にこの部分に関しての新たな補強対策などが挙げられる．さらに屋根部分の補強は，現状ではトラス構造であるが，これをラーメン構造として貯水槽全体の剛性を確保すること等，新たな耐震補強策を考えることが必要である．

今後検討すべきことは，ここで提案した耐震性向上策が，バルジングに効果があるか否かを確認することである．一方，既存の貯水槽の耐震性向上に関しても検討を行う必

要がある．具体的には，既存の貯水槽に装着可能で，スロッシングで効果が確認されている著者らが提案している浮体式制振装置 [13)~15)]のバルジング発生時の制振効果の確認も行うことである．

謝 辞

FRP 製パネル貯水槽を提供してくれた「貯水槽リユース工法会」に謝意を表す．本研究を行なうに際し，中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻及び同理工学部都市環境学科の学生の協力を得た．また，土木学会地震工学委員会 水循環施設の合理的な災害軽減対策研究小委員会 WG4 主査 坂井藤一先生及び茨城大学 井上涼介先生からは，貴重な調査データの提供を受けた．ここに記して謝意を述べる．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）ならびに中央大学特定課題研究費の給付を受けたことを付記する．

参考文献

1) 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（応用力学），Vol.68, No.2, pp.637-644,，2012.8.
2) 小野泰介，曽根龍太，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：スロッシング発生時に貯水槽壁面が受ける動液圧に関する実物実験，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.70, No.4, pp.169-174，2014.7.
3) 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.
4) 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.
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：長方形水槽のスロッシングインパクト（阪神大震災の水槽被害に関して），日本機械学会論文集，C編, 63(612)，pp.2643-2649, 1997. 8.
8) 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.
9) 強化プラスチックス協会：FRP 水槽構造設計計算法（1996 年版）,1996.12.
10) 日本ステンレスタンク工業会：ステンレス鋼板製パネルタンク（溶接組立形）設計指針 建築設備編，2013.2.
11) 鋼板製一体形タンク工業会：鋼板製一体形タンク設計指針（KIT-D001-16）,2016.2.
12) G.W.Housner：The Dynamic Behavior of Water Tank, Bulletin of The Seismological Society of America. Vol.53，1963.
13) 曽根龍太，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分冊（応用力学）特集号，Vol.16，pp.833-843，2013.8.
14) 小野泰介，曽根龍太，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：受水槽のスロッシング対策のための浮体式制振装置の開発，土木学会論文集A2（応用力学）,Vol.70, No.2, pp 621-629, 2015.2.
15) 平野廣和：巨大地震に備えての貯水槽の耐震性向上の必要性－既存貯水槽用の施工簡単かつ安価な制振装置の開発－，給排水設備研究，Vol.31，No.3，pp.4-9，2014.10.

（2016. 9. 2 受付）

Vibration experiments on the bulging vibration of real scale water tank

Ryo SHIONOYA，Hirokazu HIRANO and Tsuyoshi IDA,

The damage investigation of the water tank of the Great East Japan Earthquake and the Kumamoto earthquake, cases of the side plates and the corner portion of the lower side is damaged from the case and the center where the ceiling and the upper part of the side plate was damaged was observed. The former is caused by the sloshing vibration, the latter is caused by bulging vibration. In this study, using the FRP panel water tank of 3m × 3m × 3m, it was verified for the bulging vibration. As a result, than the change of displacement and pressure of the wall, to confirm the range of the generated frequency of bulging. Bulging is quickly vibrate vibration is completed it was confirmed that convergence. Bulging is to generate a large pressure at the bottom of the tank, this is the cause of the damage to the tank.