実機 FRP 製貯水槽を用いてのバルジング振動に関する振動実験

○東京都　正会員　塩野谷　遼*　　中央大学　正会員　平野 廣和
(株)十川ゴム 正会員　井田　剛史

1. はじめに

東日本大震災では，上水道の大型配水池や貯水槽に甚大な被害が発生した．現地調査の結果から，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主としてスロッシングが原因となる被害の他，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．さらに井上ら[1]は，被害域である岩手，宮城，福島，栃木，茨城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[1]は，バルジング振動が破損の主要因であると指摘している．しかし，貯水槽のバルジング振動に関する研究は，箕輪ら[2]の研究があるが，他に余り行われていないのが現状である．

そこで本報では，比較的被害の多かった 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，バルジング振動に関する検証を行う．

2. 実験概要

加振実験は，**写真-1** に示す 3m×3m×3m の FRP 製パネル実機貯水槽を用い，水深は通常使用時の水位である 2.7m として実験を行う．壁面変位の計測には**図-1** に示すようにレーザー変位計を壁面に照射して計測する．さらに加速度と動液圧の計測には，それぞれ加速度計，圧力計を**図-1** に示すように配置して計測を行う．

加振実験は，愛知工業大学に設置している大型振動台を使用する．既往の研究[2]よりバルジング固有振動は，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されている．そのため本報では，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 式と事前実験より 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導く．最後に振幅を片振幅5mm，20 波加振でバルジング固有振動数付近での加振実験を行う．

3. 実験結果

(1) バルジング固有振動数の導出

スロッシング固有振動数である 0.5Hz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-2**(a)(b)に示す．ここでは 3 種類の計測を行った 1,500mm での結果を示す．動液圧はスロッシング固有振動数である 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 はスロッシング固有振動数の 2 倍であるが，1.49Hz は別の要因と考えられる．

写真-1 FRP 製パネル貯水槽

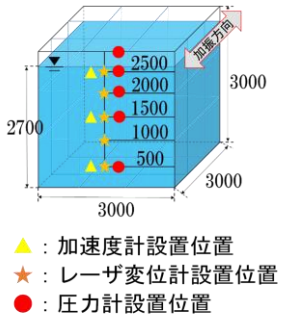
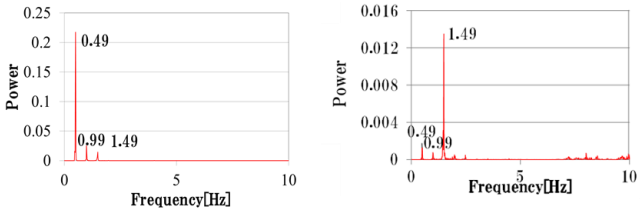
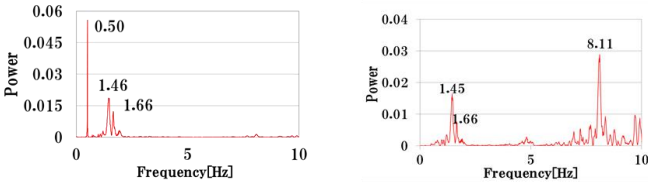


図-1　計測器設置箇所



(a) 動液圧応答スペクトル　　(b) 加速度応答スペクトル

図-2 FRP パネルの 0.5Hz 正弦波加振（1,500mm 位置）



(a) 動液圧応答スペクトル　　(b) 加速度応答スペクトル

図-3　FRP パネルの神戸波 50%加振（1,500mm 位置）

次に神戸波 50%加振時の動液圧応答と加速度応答のスペクトルを**図-3**(a)(b)に示し，これらも同様に 1,500mm 位置である．動液圧はスロッシングの固有振動数である 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 8.11Hz の高周波が存在するが，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 や 1.66Hz の異なったピークを示している．後者は液体揺動による振動だけでなく，液体が質量となってパネルを振動させた時のパネル本体の振動数と考えられる．

以上のことから，本報で扱う FRP 製パネル実機貯水槽のバルジング固有振動数は，1.46Hz～1.49Hz 付近に存在すると推定される．

よって 1.40Hz, 1.43Hz, 1.45Hz, 1.47Hz, 1.50Hz, 1.60Hz

キーワード　：バルジング，貯水槽，耐震設計基準　　*研究当時：中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻
連絡先：112-8551　東京都文京区春日　1-13-27　TEL 03-3817-1816　FAX 03-3817-1803

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．但し，振動台の性能の関係上 1.60Hz は片振幅 4.5mm とする．

(2) バルジング振動時の挙動

図-4(a)～(f)に壁面変位の時刻暦応答を示す．タンクのパネルが連結されている構造上，全ての周波数加振で 1,000mm 地点の変位が最も大きく生じている．そして，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．各加振振動数での結果を比較すると，1.40Hz，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，一定を示す．これに対して 1.45Hz～1.50Hz では，変位が増加傾向を示し，加振を続けることでさらに大きく壁面が変位する可能性がある．なお，これ以上加振を行わなかったのは，加振途中で貯水槽の破損が懸念されたためである．1.60Hz では加振中に変位が減少し，そこからほぼ一定の値をとっていることが確認できる．

図-5(a)～(f)に動液圧変化の結果を示す．壁面パネル変位同様に，1.43Hz～1.50Hz では加振中は圧力の増加の傾向を示している．但し，最大値を計測した地点は，壁面パネル変位とは異なり，全ての周波数において 500mm 地点，次に 1,500mm 地点となった．なお、1,000mm 地点は，パネル接合部なので計測を行っていない．以上のことから，本貯水槽におけるバルジング固有振動数は，1.47Hz～1.50Hz 範囲にあると考えられる．また，バルジング振動が発生すると，貯水槽下部に大きな力が作用することが認められる．

4. おわりに

本報では 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結果，壁面変位より 1.47Hz～1.50Hz 付近にバルジング固有振動数があることが推測される．ここで，バルジング振動は，スロッシング振動とは異なり発生する周波数帯が広く，かつ加振終了後は速やかに振動が収まるという特徴があることが確認できる．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，バルジング振動が発生するとタンク下部に大きな負荷がかかることから，タンク破損が発生することになる．既往の研究[2]ならびに本報での検討から，貯水槽上部の破損はスロッシング振動が引き起こし，下部の破損はバルジング振動が引き起こしていると考えられる．

FRP 製貯水槽は，強化プラスチック協会が FRP 水槽耐震設計基準[3]を作成し，構造設計の指針を提示している．しかし，1997 年以降製造された貯水槽であってもバルジング振動により破損被害がある[1]ことに鑑み，バルジング振動に対応した耐震性能を向上することが必要と考える．例えば，壁面上下方向に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，隅角部の補強も必要である．さらに屋根部分は，現状ではトラス構造であるが，ラーメン構造として貯水槽全体の剛性を確保することなどが必要と考えられる．

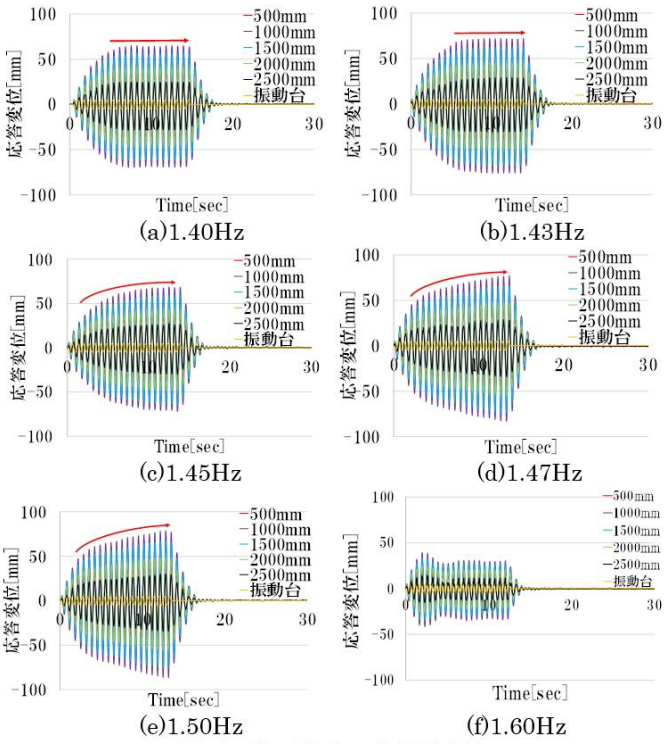


図-4 壁面変位の時刻暦応答

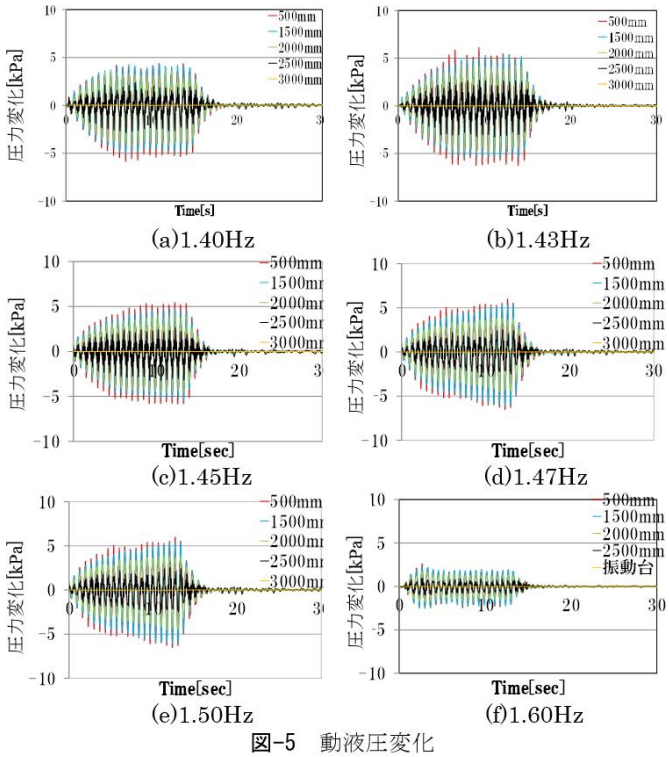


図-5 動液圧変化

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．また，本研究の一部は，(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (B) （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) 井上凉介 他：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），71(4), pp.764-773, 2015

2) 箕輪親宏：長方形水槽の振動解析，日本建築学会構造系論文集第 285 号，pp23-32，1979.

3) (社)強化プラスチック協会：FRP 水槽耐震設計基準,1996.