

構造形式の異なる三種類の実タンクにおけるバルジング挙動の比較

○中央大学大学院 学生員 塩野谷 遼 (株)十川ゴム 正会員 井田 剛史
 中央大学 正会員 平野 廣和 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

東日本大震災では、受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。この被害は大きく分けて二種類あり、天井や上部の側壁が破損した事例、真ん中より下側の側壁や隅角部が破損した事例である。前者は、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。一方、井上ら¹⁾の東日本大震災域での146機の被害受水槽の調査によると、125機余りがバルジングによる破損が主要因であると指摘している。

ところで一般に広く使われている受水槽は、側壁の素材によりFRPタンク(以下、FRP)、ステンレスパネルタンク(以下、SUS)、鋼板一体形タンク(以下、鋼板)に分けられる。また、壁面が液体と接して振動する場合、壁面が剛体として振動するか、弾性体として変形しながら振動するかによって、その性状に違いが出てくると考えられている²⁾。そこで本研究では、同一寸法の三種類の実機受水槽を大型振動台に設置して振動実験を行い、タンク構造形式の違いによるタンク構造体の振動が主体となるバルジング挙動の違いを明らかにする。ここでは、タンク壁面に加速度計を設置し、加振時にタンク壁面の応答加速度を計測することで、タンク構造形式による挙動の比較・検討を行う。

2. 実験概要

写真-1~3に示す各辺3,000mmの各受水槽に水深2,700mmまで水を注し、加振実験を行う。各受水槽の特徴として、SUSは天井と上段パネルの板厚1.5mm、材質はSUS329J4L、底板、中・下段パネルの板厚2.0mm、材質はSUS444Lである。内部構造は補強材などが入り組んでいる。鋼板は板厚4.5mm、材質はSS400を使用し、内外面溶接一体のコルゲート構造になっており、内部に補強材などは無い。FRPは板厚10mmであり、外部に補強材と内部に屋根を支える棒が立ててある。

本実験で計測する応答加速度は、図-1に示すように面の中心に底面からの高さ500mm、1,500mm、2,500mmの3箇所に加速度計を設置し計測する。入力波形は坂井³⁾が指摘しているバルジングの発生周波数域(1~4Hz程度)を有する地震波であり、図-2に示す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うち、NS波成分を用いる(以下、神戸波)。

本実験では水深を2,700mmに統一して実験を行うため、水槽の固有振動数は、1次モードで0.49Hz、2次モードでは0.87Hzである。図-3に図-2で示した神戸波の加速度についてスペクトル解析を行なった結果を示す。ここに、今回使用する受水槽のスロッシング固有振動数1,2次モードを破線で示す。

3. 実験結果

(1) 加速度応答

図-4に各受水槽において計測された壁面の応答加速度を示す。ここでSUSでは、最大加速度が約44m/s²であるのに



写真-1 SUSタンク



写真-2 鋼板タンク



写真-3 FRPタンク

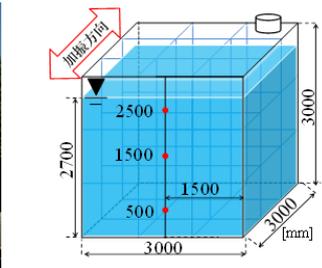


図-1 圧力計及び加速度計配置位置

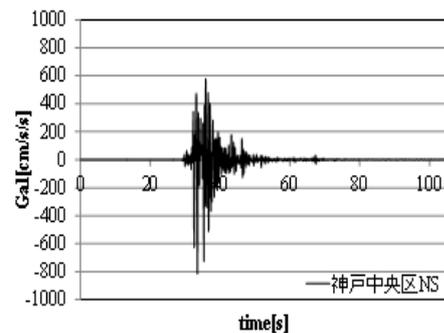


図-2 神戸波 NS 成分加速度波形

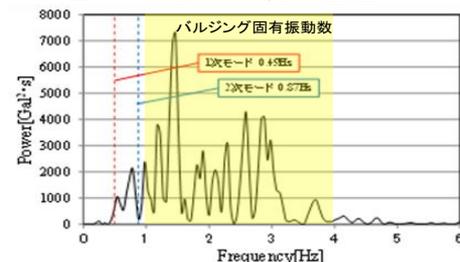


図-3 スペクトル解析結果

対して、鋼板は約9m/s²程度となっており、鋼板の最大加速度はSUSの約1/5である。FRPでは最大加速度が約17m/s²程度でSUSと鋼板の間に位置する結果となった。

これは、SUSが板厚1.5~2mm程度のステンレスパネルの組合せで構成されていることから、元々パネルの剛性が低いので揺れやすい構造であることに起因している。さらにパネル間接合部分に補強材が多数入っているため、高さ方向に対して剛性の低い部分と剛性の高い部分とが入り組んだ構造となっている。そのためSUSは、加速度計の設置位置によって計測値に違いがある結果になった。また、内溶液の移動が起振元となってパネルが振動して加速度が高くなったと考えられる。このことから、SUSでは壁面と内溶液が連成して振動するバルジング現象³⁾が発生したと推定される。一方、鋼板は、

計測位置による違いは見られず、ほぼ同等の値を示している。これは、鋼板は板厚 4.5mm かつコルゲート構造であるので側壁の剛性が高く、強度が均一になっていることによるものと思われる。また、剛性が高いことで側壁が振動せず、最大加速度が約 9 m/s^2 程度になったと考えられる。FRP では、パネルの剛性が低いため内溶液の運動が支配的になり、そのためパネル自体の振動ではなく、内溶液の振動によって大きくパネルが変形するため SUS 製の最大加速度ほど大きくならなかったと考えられる。

(2) 加速度のスペクトル解析結果

壁面で計測された応答加速度をスペクトル解析した結果を図-5 に示す。各受水槽を比較すると、スペクトルピークが異なっていることがわかる。SUS は、3.6Hz 付近にスペクトルピークがあるのに対して、鋼板は 4.7Hz 及び 9.7Hz 付近にスペクトルピークが存在し、FRP では 2.1Hz 付近にスペクトルピークを示している。この構造形式の違いによるスペクトルピークの差は、各受水槽の剛性が異なるためと考えられる。鋼板は剛性が最も高いことから高周波数側にスペクトルピークを示し、鋼板に比べ SUS は剛性が低いため低周波数側にスペクトルピークが存在する結果になった。さらに FRP は剛性が低いことから最も低周波数側にスペクトルピークを示す結果となった。

次に図-3 に示した神戸波のスペクトルと比較すると、SUS や FRP のスペクトルピークは、神戸波のスペクトルピークに近い値となっているため、SUS では 3.6Hz、FRP では 2.1Hz でバルジング現象が生じ、パネルの振動につながったと考えられる。これに対して鋼板は、内溶液のみのスロッシング現象が生じたことが考えられる。また、10Hz 付近の高周波数帯をスペクトルピークに含む地震は起きにくいことから、高周波数側にスペクトルピークを有することで共振し、受水槽が破損する危険を防ぐことができる。

4. おわりに

タンクの構造別に比較すると、鋼板は剛性が高いのでスペクトルのピークが高周波側に、SUS と FRP は剛性が鋼板より低いことから、ピークが低周波側に存在する。また、発生する加速度は SUS、FRP、鋼板の順で大きくなっている。これより剛性の低い構造ではバルジング現象の発生が考えられる。このため、タンク壁面の剛性がバルジング振動の発生に寄与していると考えられる。ところで FRP の場合、鋼材で外部補強を行い全体の剛性を高めることが行われているが、これはバルジング振動への対策の一つになると思われる。今後は外部補強による違いを検討し、さらに動液圧の計測等を行いパネルに作用する圧力の挙動の確認を行う予定である。

謝辞：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) 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 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，第 34 回地震工学研究発表会。A13-639, 2014.
- 2) 坂井 他：土木学会地震工学委員会水循環 NW 災害軽減対策研究小委員会 TF 報告書，2015.3.
- 3) 箕輪親宏，清水信行，鈴木純人：ステンレス長方形水槽の耐震実験 (その 1)，(その 2)，日本機械学会，Dynamics and Design Conference 2000, 2000.

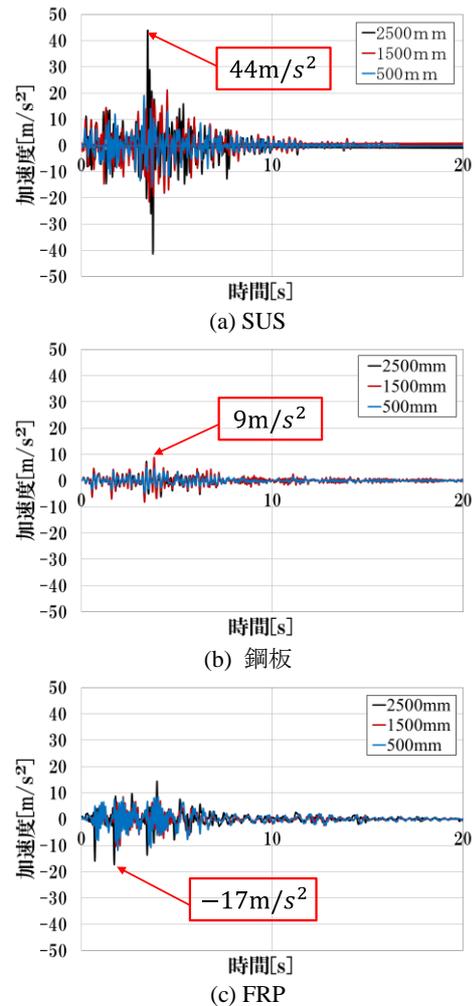


図-4 受水槽側壁の応答加速度

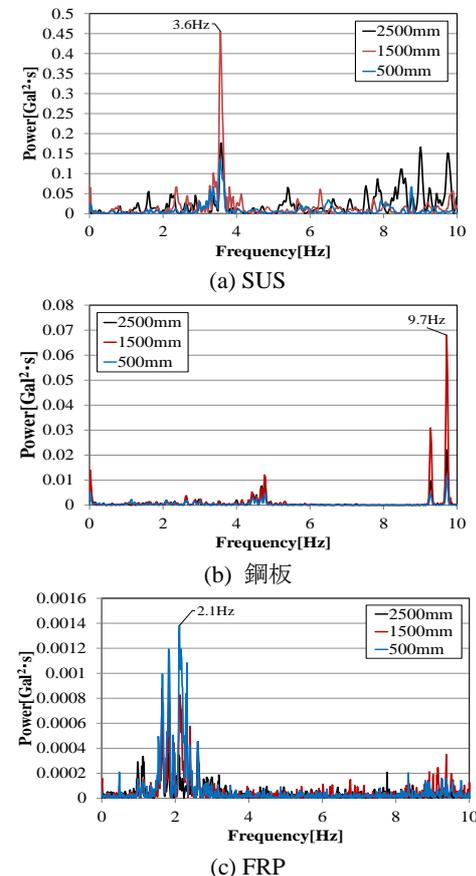


図-5 受水槽側壁のスペクトル解析結果