

構造形式の異なる貯水槽の地震時における振動応答特性の比較

○中央大学 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、貯水槽の破損被害により病院、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、やや長周期地震動により励起されたスロッシング現象などの液面揺動の励起が一つの原因になっていると考えられている。

一般に広く使われている貯水槽の構造形式は、側壁の素材によって大きく三種類に分類することができ、FRP製タンク（以下、FRP製）、ステンレス製パネル式タンク（以下、SUS製）、鋼板製一体形タンク（以下、鋼板製）の三種類である。既往の研究では、箕輪¹⁾や著者らの研究グループ²⁾のSUS製タンクの実験など、タンク形式毎の振動実験が主であり、同一条件下でのタンク構造形式の違いによる比較・検討の研究は少ないのが現状である。

そこで本研究の目的は、この三種類の構造形式の内、SUS製で行われた実験²⁾と同一の加振条件で鋼板製の貯水槽を振動台に設置して振動実験を実施し、両者のタンク構造形式の違いにより内溶液や実機貯水槽の応答特性の違いによる特徴を明らかにすることである。具体的には、タンク壁面に圧力計ならびに加速度計を設置し、これによって加振時に内溶液によってタンク壁面に作用する動液圧やタンク壁面の加速度応答を計測し、この挙動の構造形式による比較・検討を行う。

2. 実験概要

2.1 計測項目

加振実験は、中央大学と愛知工業大学が2013年12月に共同で新たに新設した振動台を使用する。貯水槽は両形式共に内側3,000×3,000×3,000mmであり、図-1にSUS製、図-2に鋼板製を示す。ここでは、通常使われる設定水位である水深を2,700mmまで注水し実験を行う。タンクの内溶液による動液圧を計測するために、図-3に示すように圧力計をタンク底面から高さ500mm、1,500mm、2,500mm、天井の3,000mmの位置に隅角から200mm離れたAと1,500mm離れたBの計8箇所に設置する。加速度計は圧力計設置位置と同様の壁面部のB-1、B-2、B-3と振動台の4箇所に設置する。加振方向は図-3に示す計測機器を設置した壁面部に直交方向とする。

2.2 入力地震波

地震時入力波形としては、SUS製の実験²⁾と同一の兵庫県南部地震神戸海洋気象台で計測された波形の内、NS波成分を用いる（以下、神戸波）。ただし、振動台の能力の関係から、変位を50%に縮小した入力波としている。この入力地震波である神戸波にスペクトル解析を行った結果を図-4に示す。ここで図中に示す点線は、既往の実験³⁾で確認した本実験で使用する貯水槽の持つ1, 2次スロッシングモードの固有振動数であり、1, 2次モードそれぞれ0.49Hz、0.87Hzである。



図-1 ステンレス製パネル式タンク 図-2 鋼板製一体形タンク

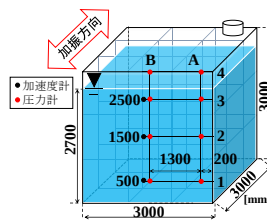


図-3 圧力計及び加速度計配置位置

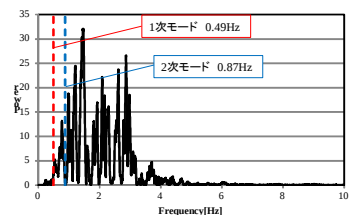


図-4 入力加速度パワースペクトル (神戸海洋気象台 NS 成分波形)

3. 実験結果

3.1 動液圧分布

図-5にそれぞれのタンク8箇所に設置した圧力計より計測された動液圧分布を示す。ここでは、隅角部A、壁面部Bの設置位置による顕著な差はみられない。それに対して構造形式による差は明確にあらわれている。SUS製の動液圧分布は、圧力計の設置する高さにかかわらず水面下からはほぼ一定の値を示す傾向がある。これに対し、鋼板製の動液圧分布は、圧力計の設置する高さが底部から水面付近に近づくにつれて線形的に増加していることが確認できる。これは、SUS製の実験で箕輪¹⁾らが指摘している貯水槽の壁面と内溶液が連成して振動するバルジング現象が発生したと推定される。鋼板製では、水面付近で顕著に影響するスロッシング現象²⁾が発生したと考えられる。

3.2 加速度応答

図-6にそれぞれの貯水槽における壁面での加速度応答を示す。ここでSUS製では、最大加速度が約65 m/s²であるのに対し、鋼板製は約10 m/s²程度となっており約1/6である。これは、SUS製が板厚1.5mmと2mm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、元々剛性が小さいため壁面が揺れやすい構造のためである。さらに、パネル間接合部分に補強材が多数入っていることから、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製は、加速度計の設置位置によって計測結果に違いがあることになった。また、内溶液の移動が起振元となって板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製の貯水槽ではバルジング現象が発生したと推定される。

キーワード：スロッシング、地震波加振、加速度応答、動液圧、実機貯水槽

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816 fax. 03-3817-1803

これに対して鋼板製は、計測位置による違いはみられず、ほぼ同等の値を示している。これは、鋼板製は板厚が4.5mmであり、かつコルゲート構造となっているため剛性が高く、壁面の強度が均一になっていることによる。

3.3 加速度応答のスペクトル解析結果

壁面で計測された加速度応答をスペクトル解析した結果を図-7に示す。SUS製と鋼板製ではスペクトルピークが異なる。SUS製は3.6Hz付近にピークがあるのに対して、鋼板製は4.7Hzおよび9.7Hz付近にピークが存在する。この構造形式によるスペクトルピークの違いは二つの貯水槽の剛性が異なるためであり、鋼板製の方が剛性が高いことから高周波数側になったと考えられる。さらに、図-4に示した入力地震波のスペクトルと比較すると、SUS製が応答し易く、鋼板製が応答しにくいこととなり、図-6の結果となったことを裏付けられるものと言える。

4. おわりに

本研究では、地震時に内容液によって貯水槽が破損する被害が発生していることから、タンクの構造形式による応答特性の比較を行うため、異なる二種類の構造形式の実機貯水槽を用い地震波による加振実験において比較を行った。この結果から、タンクの構造形式の違いにより内容液の挙動が異なることが確認できた。その結果を以下に示す。

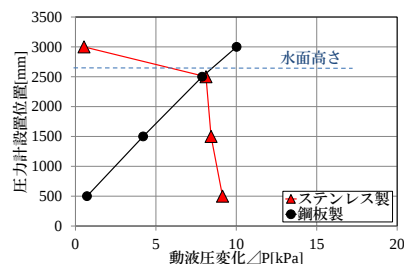
- (1) SUS製の動液圧は高さによらずほぼ一定であるが、鋼板製の動液圧は水面に近づくにつれて線形的に増加する。これらのことから、SUS製ではバルジング現象、鋼板製ではスロッシング現象の発生が考えられる。
- (2) 各貯水槽の加速度応答スペクトルと入力地震波のスペクトルの関係から、鋼板製は剛性が高いので高い固有振動数を有している。一方、SUS製の方が鋼板製より壁面が振動しやすく加速度が大きいことがわかる。これより加速度応答スペクトルのピークが、SUS製が3.6Hz、鋼板製が4.7Hzおよび9.7Hzであり、前者はここで用いた神戸波のスペクトルピークに近い値となっているために、バルジング現象が発生し、後者は表面付近の内容液のみのスロッシング現象が生じたことを示唆するものとする。ところでSUS製は、加振実験時に溶接部分の割れにより漏水が確認されているので、今後このスペクトルピークに近い地震が発生する可能性の高い平野部等において、SUS製貯水槽の破損に至ることが懸念される。

今後は、FRP製も含めて構造形式の違いによる詳細なる挙動を確認する所存である。さらに本研究で明らかになった貯水槽を構成するパネルの固有値解析を行い、このパネルの振動する原因を解明していく予定である。

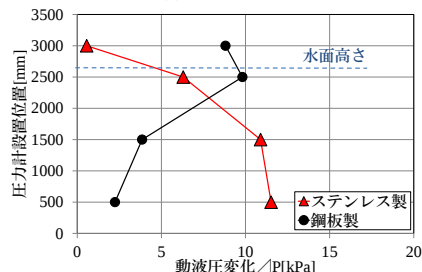
謝辞：本研究の一部は(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)(研究代表者：平野廣和)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 箕輪 他：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.
- 2) 小野 他：地震時にステンレス製パネル式貯水槽に生ずる流体揺動，土木学会第69回年次学術講演会(投稿中)，2014.
- 3) 曾根他：矩形断面受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, 2013.8

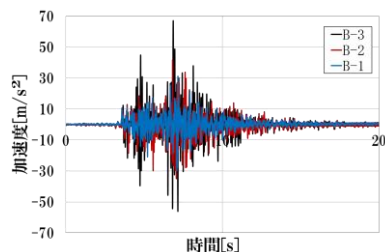


(a) 隅角部 A

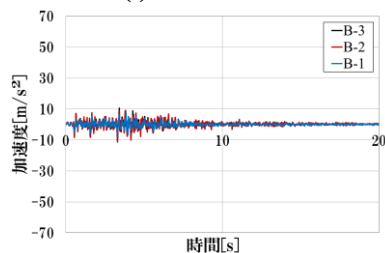


(b) 壁面部 B

図-5 タンク側壁の動液圧分布

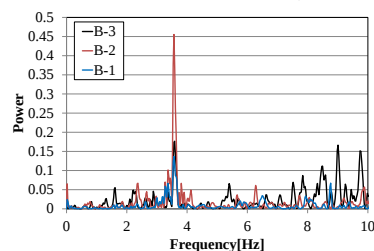


(a) SUS製タンク

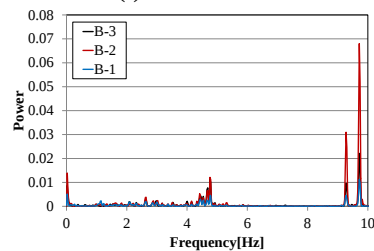


(b) 鋼板製タンク

図-6 側壁の加速度応答



(a) SUS製タンク



(b) 鋼板製タンク

図-7 スペクトル解析結果