

鋼板製一体形タンクと他形式タンクのバルジング振動応答特性の比較

○中央大学大学院 学生会員 小野 泰介 (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

東北地方太平洋沖地震¹⁾や熊本地震で広範な地域で著者らの現地調査²⁾や関連の報告書³⁾によると、貯水タンクに発生する被害には、大きく分けてスロッシングとバルジングの異なった二種類の現象が原因と考えられる。貯水タンクの被害が多数発生したことを鑑み、貯水タンクの耐震安全性を向上させることが緊急の課題である。今後耐震安全性を向上させるためには、従来のスロッシング対策のみならずバルジング対策が重要であり、かつこの対策をどのように耐震設計に新たに取り入れていくかが課題になるものと思われる。

本研究では地震被害報告が無かった鋼板製一体形タンク（以下、鋼板製タンク）を取り上げ、一般に広く使われている側板のパネル形式が異なる他二種類の同一寸法のタンクを使い、大型振動台を用いて実際の地震動での振動実験を行うものである。これにより、バルジング振動応答特性の違いを明らかにするものである。比較の対象には、ステンレス製パネルタンク（以下、SUS製タンク）、FRP製パネルタンク（以下、FRP製タンク）を用いる。ここでは、タンク壁面に加速度計と圧力計を設置し、加振時にタンク壁面の応答加速度と内溶液による動液圧を計測することで、タンク構造形式による挙動の比較・検討を行う。この結果、側板のパネル形式の違いで地震時の振動応答特性が異なることがわかったので、ここで報告するものである。

2. 貯水タンクの諸元

本研究では、3,000×3,000×3,000mmの同一寸法で、側板のパネル形式が異なるタンクを使用する。写真-1に示す鋼板製タンクは、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であり、剛性を十分に有する構造である。そのため内部には補強材などは無い構造となっている。次に写真-2に示すSUS製タンクは、天井と上段パネルの板厚は1.5mm、材質はSUS329J4L、底板、中・下段パネルの板厚は2.0mm、材質はSUS444Lである。内部構造は、タンク内部にSUS製の形鋼で補強材が構成された、ジャングルジムのように入り組んだ構造となっている。壁面の板厚が薄いので補強材部分との剛性差が極端に大きいこと、さらに全溶接構造なので溶接長が長いなどの特徴を有している。また写真-3に示すFRP製タンクは、全てのパネルにおいて板厚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、外壁部に鋼製の形鋼で補強をしている。また内部には、側板のパネルを引っ張る棒材、屋根を支える棒が立ててある構造である。以上、これら各タンクの諸元を表-1に示す。

3. 実験概要

3.1 計測項目

三種類の実機貯水タンクを検証するために、加速度計と圧力計を同一の位置に設置する。設置位置は、壁面の中心に底面からの高さ1,500mmの箇所である。ここで加速度計としては、(株)共和電業社製の小型低容量加速度変換器AS-GBを用いる。圧力計としては、(株)



写真-1 鋼板製タンク 写真-2 SUS製タンク 写真-3 FRP製タンク

表-1 各貯水タンクの諸元

種類	鋼板製タンク	SUS製タンク		FRP製タンク
材質	SS400	天井、上段	底、中・下段	FRP
		SUS329J4L	SUS444L	
板厚	4.5mm	1.5mm	2.0mm	10mm
特徴	補強材なし コルゲート	内部補強構造 (ジャングルジム)		外部補強 内部引張材、 支柱
引張強さ	450MPa	620MPa	410MPa	103MPa
曲げ強さ	235MPa	450MPa	245MPa	204MPa
ボアゾン比	0.3	0.3	0.3	0.33
重量	約2,800kg	約1,400kg		約1,500kg

共和電業社製の低容量圧力変換器PGM-Gを用いる。

本報では、設置位置1,500mmにおいて計測されたデータを比較することで、加振時の壁面に及ぼす加速度と動液圧に関して検討を行うものである。

3.2 加振実験

水深はこれらの各タンクに常用水深である2,700mmまで水道水を満たし、振動台に固定された架台にボルトで固定した上で加振実験を行う。入力地震波には、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方向観測波を使用する。この観測波の入力を試みたが、大型振動装置の能力の関係から、出力振動台変位最大56%相当で加振する。加振方向は加速度計と圧力計のある壁面に直交に加振する。

4. 実験結果

図-1に各タンクにおける加速度波形を示す。最大加速度は鋼板製タンクにおいて加速度計設置位置1,500mmで約7m/s²を示した。これに対して、SUS製タンクは41.9m/s²程度となっており、鋼板製タンクの最大加速度はSUS製タンクの約1/6である。

図-2に各タンクにおける加速度のパワースペクトルを示す。鋼板製タンクでは9.7Hz付近が卓越している。箕輪ら⁴⁾によるとタンク壁面のバルジング固有周期は0.15s~0.4sと推定している。つまり、バルジング固有振動数は2.5Hz~6.5Hz程度と言える。鋼板製タンクにおいて、壁面の剛性が高く、内溶液と壁面が連成して振動せず、バルジング振動が発生しなかったと考える。鋼板製タンクでの加速度の値は、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、鋼板製タンクは板厚4.5mmかつコルゲート構造であるので壁面の剛性が高く、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、剛性が高いことで壁面が振動しなかったと考えられる。地震動は、

キーワード：貯水タンク、実機実験、地震波振動実験、バルジング

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

数Hzまでの成分が卓越することが多いことから、鋼板製タンクは高周波数側にスペクトルピークを有するので、共振してタンクが破損する危険がないと推察する。

図-3に各タンクにおける動液圧波形を示す。各タンクの最大動液圧の値はいずれも $\pm 10\text{kPa}$ 未満である。ここで鋼板製タンクに着目すると、動液圧の波形がすぐに抑えられているのがわかる。これは鋼板製タンクが壁面の剛性が高いため振動しにくいことから、波形の収まりも早いと考えられる。

壁面で計測された動液圧をスペクトル解析した結果を図-4に示す。これらのスペクトル結果は、図-3の動液圧時刻歴(継続時間 20 秒間)のスペクトルであり、振動実験の加振中の成分を含んだスペクトルである。各タンクのスペクトルピークを比較すると、0.5Hz 付近の所で全てのタンクがスペクトルピークを示している。これは、スロッシング 1 次モード固有振動数であることから、波高がピークに達した後にスロッシング 1 次モードで揺動していたことが考えられる。

鋼板製タンクにおいて、圧力のスペクトルピークはほぼ 0.5Hz に集中しているが、わずかに 9.72Hz にもスペクトルピークが存在している。これは加速度のスペクトル解析した結果と一致していることから壁面での振動が微小ながらも内容液に影響を与えていたことが考えられる。しかし、0.5Hz でのスペクトルピークの卓越ほどではないことから、鋼板製タンクではほぼタンクの 1 次モード固有振動数で内容液が揺動していることがわかる。加速度計による計測結果や最大動液圧の推移から推測した通り、壁面の剛性が高いことから壁面が振動せず、タンク上部で顕著に揺動するスロッシング現象が表れた結果になったと考えられる。

5. おわりに

鋼板製タンクと構造形式が異なる他の二種類のタンクの動的な挙動の比較・検討を行った。その結果、側板のパネル形式の違いで地震時の振動応答特性が異なることがわかった。特に、鋼板製タンクは全体の剛性が高いこと、剛性がタンク全体でほぼ均一であることが特徴として挙げられる。壁面の固有振動数が地震波の領域外に位置するので、バルジング振動を生じる可能性が少ない。これは、東北地方太平洋沖地震や熊本地震においても被害が無かったという調査結果³⁾からも裏付けられる。病院や避難所に指定される学校等の重要施設においては、貯水タンクを設置する場合に望ましい構造であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、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.
- 2) 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, 構造工学論文集Vol.66A, 2020.3
- 3) 厚生労働省: 平成28年(2016年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書, 2016.6.
- 4) 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.

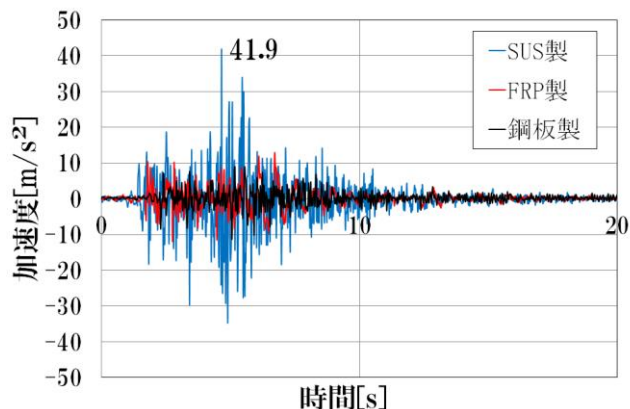


図-1 加速度波形 (設置位置 1,500mm)

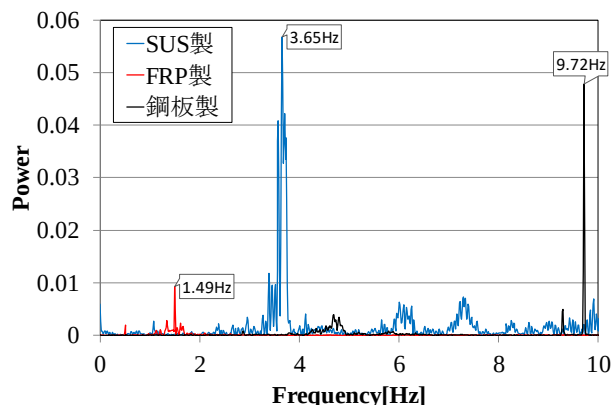


図-2 加速度のパワースペクトル (設置位置 1,500mm)

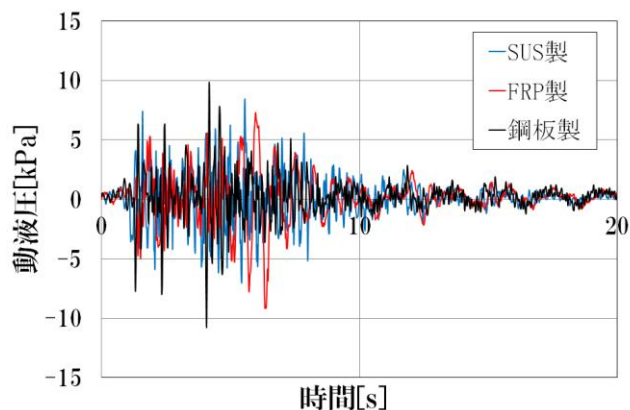


図-3 動液圧波形 (設置位置 1,500mm)

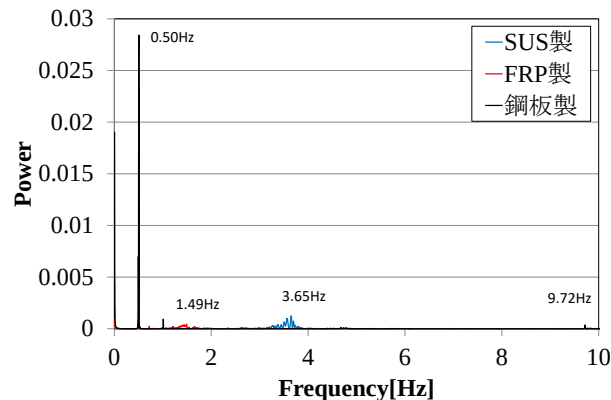


図-4 動液圧のパワースペクトル (設置位置 1,500mm)