

外補強構造を有する FRP 製タンクの振動実験

中央大学大学院 学生会員 ○小野 泰介 中央大学 正会員 平野 廣和
積水アクアシステム(株) 正会員 宮本 裕太 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

東日本大震災や熊本地震において、広範囲で貯水槽（以下、タンク）の被害が多数発生している。現在、日本各地で設置されているFRP製タンクは、古いものは40年以上前に設置されたものから最新のもののまで様々な年式のタンクが存在している。近年のFRP製タンクは、FRP水槽構造設計計算法¹⁾に基づいて設計されているが、1980年の水槽耐震設計基準（案）が制定されるより前に設置されたタンクについては当時FRP水槽設計の明確な基準がなかったこともあり、ステートルト方式の耐震性能を考慮していない非耐震仕様であるタンクが多い。以降は耐震性が考慮され、同じ内部補強構造であるトライバー方式のタンクが登場したが、スロッシングおよびバルジングには非対応である。そして1995年に発生した兵庫県南部地震ではタンクにも一定の被害が発生し、災害時における水の確保の重要性を再認識させられた。これにより設計基準の見直しが行われ、1996年にFRP水槽設計耐震基準が制定されたことにより、地震動に対して高い剛性を持った外補強構造のタンクが登場した。

そこで本論では、この外補強構造のFRP製タンクの耐震性の確認を目的として振動実験を試みた。その結果、ロッキングという地震時のタンクの据付部が検討すべき箇所となる挙動を確認出来たので報告する。

2. 実験概要

実機タンクを用いて耐震性を検証するために、写真-1に示す各辺3000mmのFRP製タンクを使用する。ここで、このタンクは外補強方式のボックスフレーム構造で、1996年に水槽耐震設計基準が制定後の耐震仕様で水平震度は1.0Gである。これに通常使用時の水深である2700mmまで水を満たし、加振実験を行う。検証方法として、タンク壁面変位計測のためのレーザー変位計、動液圧測定のための圧力計、並びにタンク壁面の加速度を計測する加速度計を設置する。変位計は、(株)KEYENCE社製のIL-600を用い、壁面変位を計測するために振動台とタンク壁面の高さ500mm、1000mm、1500mm、2000mmにおいて設置し、それぞれの変位を算出する。圧力計は(株)共和電業社製のPGM-Gを用いる。これらをタンク高さ500mm、1500mm、2000mm、2500mmのパネル中央の計4箇所に設置する。圧力計は各設置位置における動液圧変化を計測し、動液圧変化は、式(1)に示すように定義する。

$$\Delta P = P - P_0 \quad (1)$$

ここで、 ΔP は動液圧変化、 P は全圧力、 P_0 は静水圧である。これにより、水を満たした静水圧の状態をゼロとして計測することで、各圧力計の設置位置における動液圧変化を計測する。この方法によって、壁面に及ぼす動液圧変化に関して検討を行う。加速度計は(株)共和電業製の小型低容量加速度センサ変換器AS-5GB



写真-1 FRP製タンク

を用い、これらをタンク高さ0mm、500mm、1000mm、1500mm、2000mm、2500mm、3000mmの計7箇所に設置する。本実験においてタンクの膨らむ方向を正(+), 凹む方向を負(-)とする。また、タンクに水を満たした状態をゼロとして計測することで、それぞれの圧力計の設置位置における圧力変化を計測する。データのサンプリング周波数は100Hzにて計測を行う。

振動台には、中央大学と愛知工業大学が共同で設置した大型振動装置にタンクを設置して加振実験を行う。

本実験での壁面の固有振動数の確認を行う。現行の耐震基準では短周期地震動による側板への動液圧が、絶対応答加速度SAに基づき算定されていることから、入力加速度を一定の0.7m/s²とし、入力波数は20波で加振する。この時の地震震度階級は震度5弱程度ある。この加速度において、4.2～5.3Hzの範囲を0.1Hz刻みで加振して壁面変位、動液圧変化や壁面加速度が最大となるところを探した。加振振幅は±0.63～1.01程度である。

3. 実験結果

(1) 壁面変位

図-1に変位計設置位置と最大変位の関係を示す。いずれの振動数においても、変位計設置位置が高くなるほど、最大変位も増大している。最も大きくなった変位は、変位計設置位置2000mmにおいて、4.4Hzで9.68mmである。この傾向は壁面の中央部が膨らむ、バルジング挙動とは異なると思われる。このタンクが外補強方式のボックスフレーム構造であることから、外補強の柱の変形モードに近く、また、剛性が高いため、壁面の振動数も5Hz程度と高くなっている。

図-2に最大変位と振動数の関係を示す。壁面の最大変位は明確なピークはなく、4.4～4.9Hzの間で推移している。

(2) 動液圧変化

図-3に圧力計設置位置と動液圧変化の関係を示す。動液圧変化は圧力計設置位置1500mmにおいて、4.9Hzで7.6kPaである。動液圧変化の全体的な分布を見ると、加速度応答時に壁面に作用する、壁面中央部が大きくなる分布となっている。図-4に動液圧変化と振動数の関係を示す。水面付近の圧力計設置位置2500mmでは、

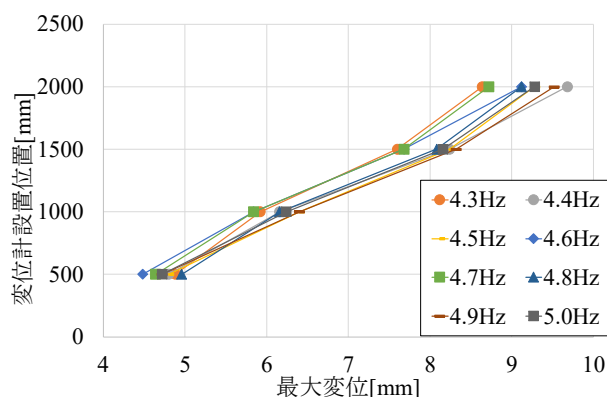


図-1 変位計設置位置と最大変位の関係

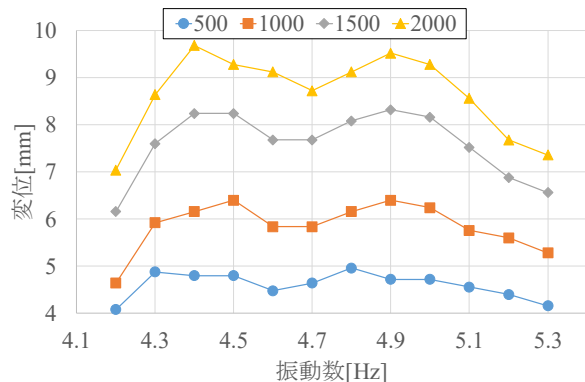


図-2 最大変位と振動数の関係

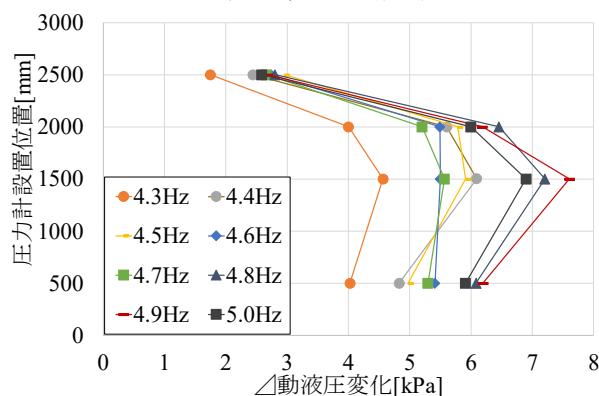


図-3 圧力計設置位置と動液圧変化の関係

動液圧変化の変動は3kPa以下で小さい。4.9Hzにおいて動液圧変化のピークが見受けられ、内容液と壁面の連成振動で動液圧変化が増大した。

(3) 壁面加速度

図-5に加速度計設置位置と最大加速度の関係を示す。最大加速度は加速度計設置位置2000mmにおいて、4.8Hzで12.7m/s²である。加速度計設置位置2000mmにおいて、加速度が最大になっているのは、タンクが上段の2m×1mパネルと下段の1m×1mパネルで構成されており、加速度計設置位置2000mmは上段パネルの中央であるため振動数し易く加速度が最大となったと考える。

図-6に加速度と振動数の関係を示す。加速度計設置位置0mmでは、いずれの振動数においても、2m/s²以下でほぼ一定である。このことから、据付部の加速度が小さくても、タンク壁面のパネルや補強材が共振して、加速度が増大することがわかった。

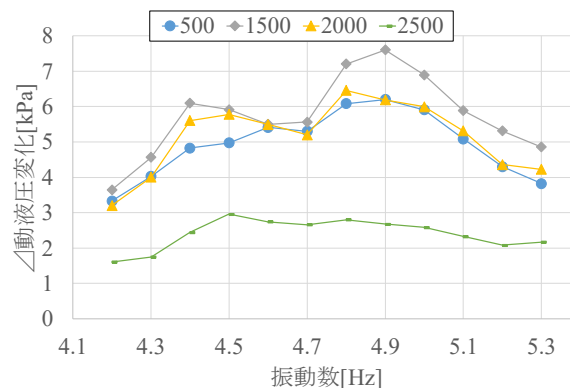


図-4 動液圧変化と振動数の関係

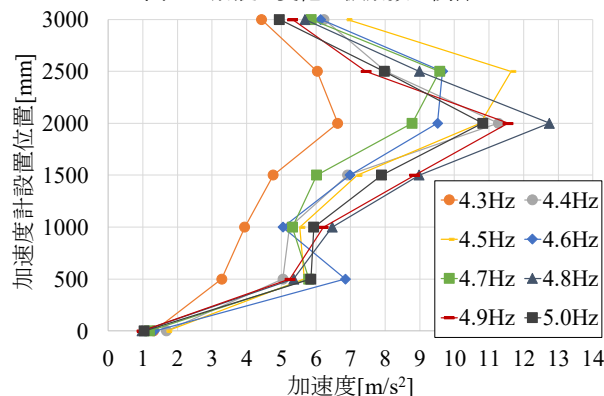


図-5 加速度計設置位置と最大加速度の関係

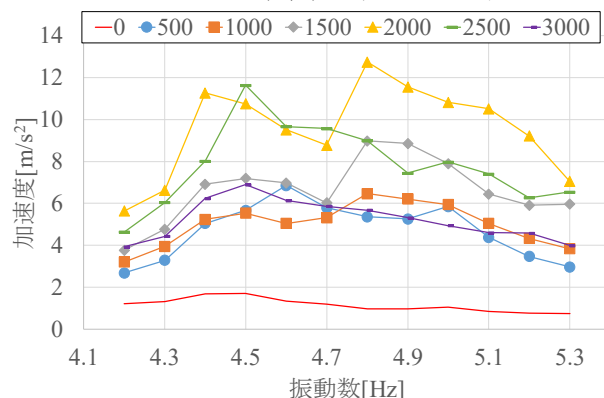


図-6 加速度と振動数の関係

4. おわりに

本論では、外補強構造のFRP製タンクの耐震性の確認を目的として振動実験を試みた。その結果、本タンクにおいてバルジング挙動は、外補強構造で剛性が高いため見受けられなかった。しかし、実験時の変位計設置位置が高くなるほど、最大変位も増大していることからタンクのロッキング挙動が懸念され、タンク据付部のアンカーボルト・固定ボルトが浮き上がりそこに大きな負荷が掛かる可能性が高いと考えられる。本実験では据付部のボルトの損傷等は無く設計上問題はなかったが、ロッキング挙動に関しても十分な配慮が必要であり、今後の課題として、ロッキングの検証が挙げられる。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP 水槽構造設計計算法 (1996 年版), 1996.