

鋼板製一体形タンクのバルジング解析

○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
中央大学大学院 学生会員 竹本 純平 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、広範囲で貯水槽の被害が多数発生している。これらは、スロッシング（内容液の固有振動数と地震波の卓越振動数の共振による液面揺動）とバルジング（内容液と構造体の連成振動）によるものとされている。スロッシングについては、現行設計基準で規定されているが、バルジングについては、設計基準に規定が示されていない。そのため、バルジング問題の解明が急務であり、貯水槽の耐震安全性を向上させるのが緊急の課題である。

一方、貯水槽の中でも鋼板製一体形タンク（以下、鋼板製タンク）は被害事例がなく破壊されていないと言うことが大きな特徴である。しかし、他の貯水槽では被害が出ているのにもかかわらず、鋼板製タンクは何故に被害が出ていないのかは不明瞭である。

本論は、貯水槽である鋼板製タンクに着目し、有限要素解析を行い、バルジング固有振動数解析の結果を示すとともに、時刻歴応答解析と加振実験の動液圧変化の比較を行う。これにより、鋼板製タンクのバルジング時の耐震性と本解析の有用性について報告する。



写真-1 鋼板製タンク

表-1 鋼板製タンクの諸元

材質	SS400（エポキシ樹脂ライニング）
幅 W[mm]	3000
長さ L[mm]	3000
高さ H[mm]	3000
水位 h[mm]	2700
天板厚[mm]	4.5
側板厚[mm]	4.5
底板厚[mm]	6.0

2. 概要

2.1 鋼板製タンクの特徴

写真-1 に示す鋼板製タンクは、側板厚 4.5mm、材質は SS400（エポキシ樹脂ライニング）を使用し、内外面溶接一体のコルゲート構造になっているので、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。ここで鋼板製タンクの諸元を表-1 に示す。

2.2 解析のモデル化

表-2 に解析条件を示す。解析手法は、著者らの既往の研究¹⁾と同様であり、汎用有限要素解析ソフトである ADINA を用いる。このソフトの特徴は、流体部のみの解析と流体問題と構造問題を一つのマトリックスで解く構造-流体連成解析が可能なことである。水槽部は shell 要素、流体水面は自由水面とし、基礎方程式はポテンシャルベース 3 次元流体方程式を用いることで解析を実行する。また拘束条件は底面部 4 辺固定する。

表-2 解析条件

ヤング率[GPa]	205
ポアソン比 ν	0.3
密度[kg/m ³]	7850
水槽部	shell 要素
流体部	ポテンシャルベース 3D 流体要素
拘束条件	底面 4 辺固定
流体水面	自由表面
入力加速度	JMA 神戸 NS50%

3. 結果

3.1 バルジング固有振動数解析

図-1 にバルジング固有振動数解析結果のモード図を示す。本解析においてバルジング固有振動数は 10.53Hz となった。鋼板製タンクの実機加振実験²⁾の壁面加速度のパワースペクトル結果では 9.7Hz 付近が卓越していた。解析モデルにおいて、天板と底板の形状を簡略化していることなどから多少の固有振動数の誤差はあるが、概ね一致しているといえる。

また、一般的に発生する地震動に着目すると、10Hz 以上の振動成分が含まれる可能性は低く、発生したとしても振動のエネルギーが小さい。このため、タンクの固有振動数を 10Hz 近傍に保つことは、地震動とタンク壁面の共振におけるバルジング振動によるタンクの破壊を防ぐことができると言える。

さらに図-2 に板厚 2.3mm 5.45Hz のモード図と図-3 に板厚とバルジング固有振動数解析の関係を示す。この結果を見ると、板厚を薄くしていくと、当然のことながら壁面の剛性が下がるため固有振動数も下がった

値を示す。ここで、箕輪ら³⁾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~6.7Hz 程度と言える。正規の板厚 4.5mm の鋼板製タンクにおいて、壁面の剛性が高く、内容液と壁面が連成して振動したとしても小さく、バルジング振動が発生しないと考える。しかし、この解析結果から鋼板製タンクでも、板厚を薄くした場合 (2.8mm の時, 6.95Hz), 地震動と壁面が共振し、バルジング振動が発生すると考えられる。このため、鋼板製タンクを設計する際、ある程度の板厚を担保することが必要になると言える。

3.2 解析と実験の動液圧変化の比較

図-4 に設置位置 500mm における動液圧変化の時刻歴の比較を示す。また、図-5 に最大動液圧の分布の比較を示す。ただし、解析値は解析ソフトの制約上、時刻歴応答値算出時には平滑化された値である。ここでの入力地震波は JMA 神戸 NS 観測波 50%変位とする。解析の圧力最大値は設置位置 500mm において 6.96kPa を示している。一方、実験の圧力最大値は 8.35kPa を示している。この差は解析値が平滑化されているため生じていると考えられるが、図-4 の時刻歴波形を見ると解析と実験は同様の挙動を示していると見受けられる。また、図-5 の最大動液圧の分布の比較においても、バルジング特有のタンク下部が膨らむ分布形状になっている。よって、本解析は鋼板製タンクのバルジング挙動を把握する際に、有用であると推察する。

4. おわりに

本論では、貯水槽である鋼板製タンクに着目し、有限要素解析を行い、固有振動数解析の結果を示すとともに、時刻歴応答解析と加振実験の動液圧変化の比較を行った。

固有振動数は鋼板製タンクの実機加振実験の結果と概ね一致し、板厚を薄くすると固有振動数は低下した。このため、バルジングを考慮し、ある程度の板厚を担保することが必要になると言える。

また、動液圧変化の時刻歴波形を見ると解析と実験は同様の挙動を示していると見受けられ、本解析は有用であると推察する。

今後の研究課題としては、バルジングの解析と実験の対応を検証することで、さらに有用性を確立する。また、バルジング時の応力解析を行うことでタンクの弱点を見出し、構造側の条件の体系化を目指すことである。

参考文献

- 1) 竹本純平, 小野泰介, 平野廣和, 佐藤尚次: ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての時刻歴応答解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 2021.2. 掲載予定。
- 2) 小野泰介, 竹本純平, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 構造形式の異なる矩形タンクのバルジング振動応答特性の比較, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, pp.66-74, 2020.9.
- 3) 箕輪親宏: スロッシングインパクトを考慮した長方形水槽の耐震性に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, 2004.11.

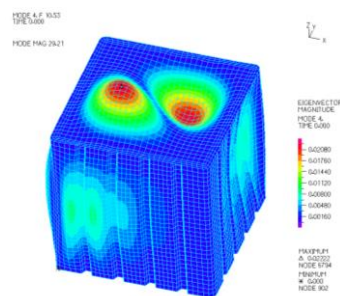


図-1 板厚 4.5mm 10.53Hz のモード図

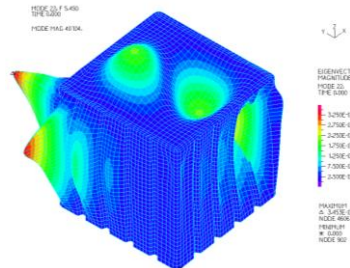


図-2 板厚 2.3mm 5.45Hz のモード図

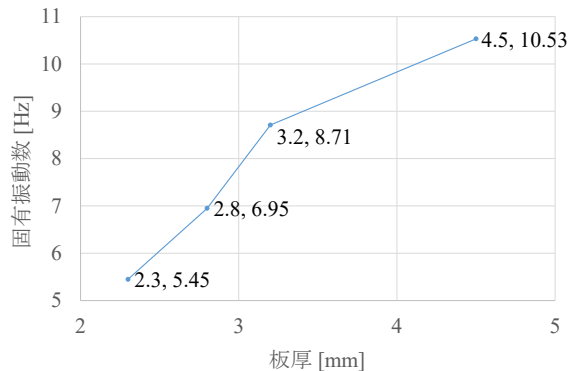


図-3 板厚とバルジング固有振動数解析の関係

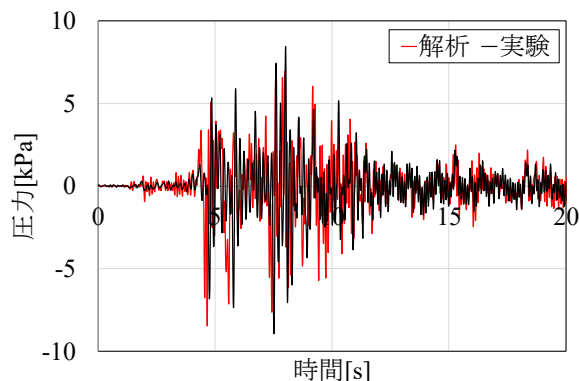


図-4 動液圧変化の時刻歴の比較 (設置位置 500mm)

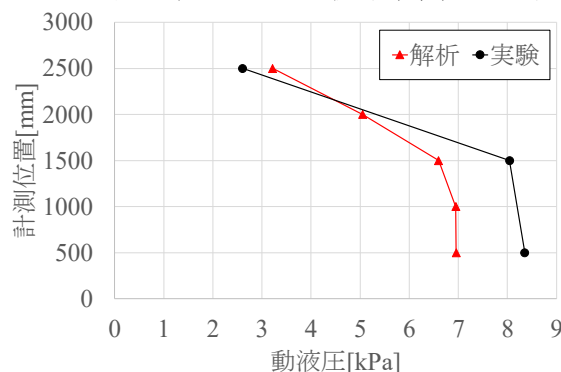


図-5 最大動液圧の分布の比較