

鋼板製一体形タンクの容量別のバルジング固有振動数解析

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 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貯水槽の被害が多数発生している。

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ことが大きな特徴である。そのため、他の形式の貯水槽では被害が出ているのにもかかわらず、鋼板製タンクは被害が出ていないのかを検証する。ところで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。この背景には既往の矩形貯水槽に関する研究が、箕輪¹⁾による実験的研究を行っている他にあまり例がないことによる。

我々の研究²⁾では、実機加振実験より3000mm角の鋼板製タンク、SUS製パネルタンク、FRP製パネルタンクの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により、それぞれの違いを明らかにしてきた。ここでは、それぞれのタンクのバルジング固有振動数を実機加振実験の実験的検証により掴んできた。

本研究は、貯水槽である鋼板製タンクに着目し、実機加振実験では扱っていない容量別の有限要素解析により、バルジング固有振動数解析の結果を示す。これにより、鋼板製タンクのバルジング時の耐震性について検討したので報告する。

2. 解析概要

2. 1. 鋼板製タンクの特徴

写真-1 に示す鋼板製タンクは、材質は SS400（エポキシ樹脂ライニング）を使用し、側板厚 4.5mm、プレス溝で補強をする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。よって、槽内の点検・清掃も容易に、かつ短時間で行うことが可能という利点がある。ここで固有振動数解析を行う鋼板製タンクの諸元を表-1 に示す。設計震度は 1.5G 相当であり、大きいものから容量が 80m³、30m³、12m³ について固有振動数解析を行う。側板厚やプレス溝の本数やピッチについては設計震度・タンクの高さに応じて変化するが、設計時に強度計算を行い、製作可能なものとする。この強度計算を行い、側板厚は 4.5mm で統一できるようにし、溝ピッチはこの側板厚で耐えうるものである。寸法については、80m³ はメーカーの製作できる比較的大きな寸法のものであり、30m³ と 12m³ は国土交通省大臣官房官庁営繕部監修、公共建築設備工事標準図（機械設備工事編）平成 31 年版に掲載されている基準寸法の値を採用する。

キーワード：鋼板製一体形タンク、バルジング、固有振動数解析

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



写真-1 鋼板製タンク

表-1 鋼板製タンクの諸元

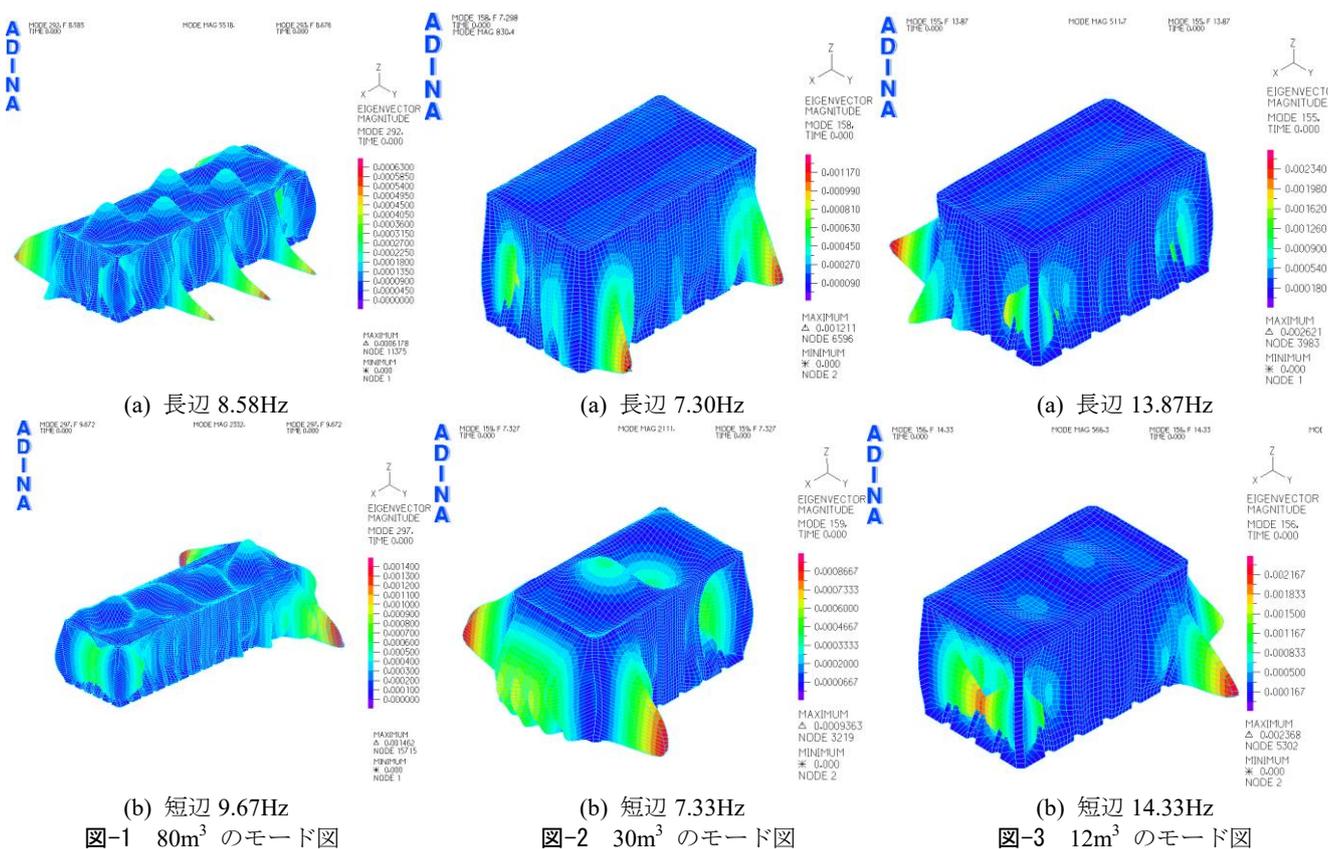
容量 V[m ³]	80	30	12
材質	SS400 (エポキシ樹脂ライニング)		
幅 W[mm]	3500	2800	2300
長さ L[mm]	10500	5000	3800
高さ H[mm]	2970	3020	2180
水位 h[mm]	2230	2250	1450
天板厚[mm]	4.5		
側板厚[mm]	4.5		
底板厚[mm]	4.5		
長辺[mm]×溝ピッチ	700×15	725×2, 710×5	640×2, 630×4
短辺[mm]×溝ピッチ	590×2, 580×4	560×5	575×4

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

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³⁾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。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。



3. バルジング固有振動数解析結果

図-1 に 80m³ の固有振動数解析結果のモード図を示す。固有振動数は長辺 8.58Hz, 短辺 9.67Hz となった。長辺の溝ピッチは 700mm であるのに対し, 短辺の溝ピッチは広い所で 590mm であるため, 長辺の方が相対的に側板の剛性が低く, 短辺の 9.67Hz と比べ 8.58Hz と低くなったと考えられる。

図-2 に 30m³ の固有振動数解析結果のモード図を示す。固有振動数は長辺 7.30Hz, 短辺 7.33Hz となった。80m³ と比べ 30 m³ の固有振動数が長辺, 短辺共に低くなったのには, 鋼板製タンクの高さ水位が関係していると考えられる。高さ水位が高い 30m³ の方が固有振動数の低くなる結果となった。

図-3 に 12m³ の固有振動数解析結果のモード図を示す。固有振動数は長辺 13.87Hz, 短辺 14.33Hz となった。12 m³ の固有振動数は長辺, 短辺共に大幅に高くなった。これはタンクの高さ水位が低くなったので, 高さ水位が低い 12m³ が固有振動数の高くなる結果となった。

ここで, 箕輪ら¹⁾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。本研究の鋼板製タンクにおいて, 側板の剛性が高く, 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。

これらの結果から, よりタンクの高さ水位が低く, 溝ピッチが狭いほど, 固有振動数は高くなるので, 地震動と共振するバルジングが発生しにくいと推察する。一般的に固有振動数 f は式(1)により求められる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/k}} \quad (1)$$

ここで, m は質量, k は剛性である。式(1)からも剛性が増加すれば, 固有振動数は増加することがわかる。このことから側板の剛性を高めることが, バルジングと共振させないような対策の手段であると考えられる。

4. おわりに

本研究では, 貯水槽である鋼板製タンクに着目し, 容量別の有限要素解析により, 固有振動数解析を行った。

固有振動数はタンクの高さ水位や溝ピッチと関係しており, 側板の剛性が深く関係していると考えられる。よって, 側板の剛性を増加させることで懸念される地震動の共振によるバルジングを防ぐことができると考える。

今後の研究課題としては剛性とバルジングの関係を追究していくことが挙げられる。最終的には, バルジングに対する設計基準を取り入れられるよう提案していく。

参考文献

- 1) 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.
- 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) 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.