

汎用解析ソフトを用いた貯水タンクの時刻歴応答解析

○中央大学 学生員 後藤 大輔

中央大学 正会員 平野 廣和

ニュートンワークス(株) 非会員 長沼 寛樹

中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

地震時において、貯水タンクの内容液と地震動の振動数が一致することで起こるスロッシング現象により、貯水タンクの破壊が問題となっている。我国は地震大国であり、今後発生が予想される巨大地震災害に対して備えていかなければならない。

そこで、貯水タンク内容液の揺動がタンクに与える影響の解析を行う。解析を行う利点としては、実験を実施することに比べて費用と時間が大幅に削減できることにある。そのため本研究では、貯水タンクの固有振動数解析と時刻歴応答解析を行い、その結果を実験結果と比較することで再現性の確認を行い、スロッシング現象の把握を行う。さらに、異なる構造形式の解析結果を比較することで、剛性の違いを検討する。

2. 解析方法

本研究では、汎用解析ソフト ADINA を用いて解析を行う。ADINA は有限要素法による非線形の汎用解析プログラムであり、複雑な構造の非線形力学現象の解析が可能である。写真-1 に実機加振実験¹⁾に使用した鋼板製コルゲート構造タンク（以下、コルゲートタンク）を示す。また、解析に用いるモデルとして、図-1(a)にコルゲートタンクのモデル、図-1(b)に側壁が平らな鋼板で構成された立方体タンクのモデルを示す。モデリングの際には、両者とも表-1 に示す諸条件をもとに、水をポテンシャルベース 3-D 流体要素²⁾とし、タンク部をシェル要素としてモデリングを行う。

2.1 固有振動数解析

本解析では、スロッシング固有振動数及び液面モードの算出が可能である。

流体部のみの解析とタンク-流体連成解析（以下、連成解析）の 2 通りの解析を行い比較する。流体部のみの解析は側面部と底部が剛体条件となっているのに対し、連成解析ではタンク全体の剛性を忠実に再現する。この両者の結果の比較を行うこととする。

内容液のスロッシング固有振動数の理論値は Housner の式から、矩形タンクでは式(1)より算出し、解析値と比較する。

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2i-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh \left[\frac{(2i-1) \cdot \pi \cdot H}{L} \right]} \quad (1)$$

ここで、 f_i は i 次固有振動数、 H は水位、 L は幅である。

2.2 時刻歴応答解析

本解析では、外力として加速度を入力することで波高や圧力などの応答算出が可能である。境界条件は、タンク底部を完全固定し、流体の水面を自由水面とする。加振条件は、実機加振実験にも用いた正弦波入力加速度として、スロッシング 1 次固有振動数である 0.5Hz、振幅 5mm、20 波を条件に水平 1 軸方向を作成し、コルゲートタンクに入力する。



写真-1 コルゲートタンク

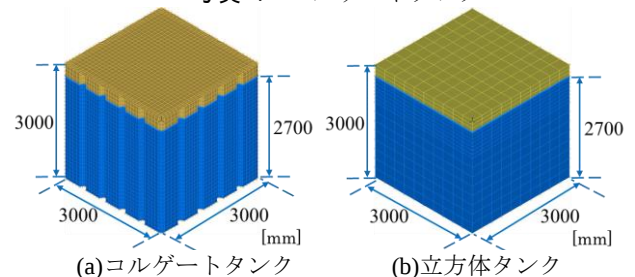


図-1 解析モデル

表-1 タンクの諸条件

材質	SS400
高さ[mm]	3000
幅[mm]	3000
奥行き[mm]	3000
水位[mm]	2700
底板厚[mm]	6
側板厚[mm]	4.5
蓋板厚[mm]	4.5
ヤング率[N/m ²]	2.06×10 ¹¹
ポアソン比	0.3
密度[kg/m ³]	7900

表-2 タンク別スロッシング固有振動数

固有振動数	解析対象	要素数	f_1 [Hz]		f_2 [Hz]	
			解析値	理論値	解析値	理論値
立方体タンク	流体部のみ	24300	0.508	0.508	0.876	0.883
	タンク流体連成	29700	0.463	0.508	0.854 or 0.925	0.883
コルゲートタンク	流体部のみ	28107	0.580	0.508	0.802	0.883
	タンク流体連成	35621	0.508	0.508	0.886	0.883

また、立方体タンクとコルゲートタンクにおいて静的解析を行い、その結果を比較することで構造形式の違いによる剛性の確認を行う。

3. 解析結果

3.1 スロッシング固有振動数及び液面モード

表-2 にスロッシング固有振動数の理論値と解析結果の比較を示す。

立方体タンクにおいて、流体部解析の結果と連成解析の結果を比較すると、前者では理論値との一致を示しているのに対し、後者では理論値との乖離が見られる。ここで、図-2 に立方体タンク-内容液の連成 1 次モードを示し、(a)は流体部を抽出した結果、(b)はタンク部を抽出した結果である。図-2(b)に着目すると、タン

ク部全体に変形が生じていることが分かる。その結果、タンク部の変形が図-2(a)に示す流体部に影響を及ぼし、このことが理論値との乖離要因であると考えられる。さらに、図-3に立方体タンク内容液の連成2次モードの流体部を抽出した結果を示す。ここでは、0.854Hz及び0.925Hzともに2次モード挙動が見受けられた。

これに対してコルゲートタンクは、連成解析の結果の方が理論値との一致を示した。これは、連成解析の場合、コルゲートタンクは側面に凹凸構造を有していることから、立方体タンクより剛性が高いために変形があまり生じないことによる。

以上のことから、固有振動数解析を行う際、連成解析を用いることでタンクの剛性が影響することがわかる。

3.2 時刻暦応答解析

(1) コルゲートタンク結果

図-4に時刻暦応答波高の比較を示す。両者は同様な分布形状を示すが、解析結果が実験値より大きくなっている。これは、解析において減衰の表現ができていないことが原因であると考えられる。次に図-5に最大動液圧の比較を示す。最大動液圧においても、解析結果が実験値より大きくなっている。ここで、グラフ形状に注目すると、底部付近に比べ液面付近の動液圧が2次曲線的に増加しており、1次モードスロッシング現象の特徴が確認できている。

(2) 異なる構造形式の静的解析結果

図-6(a)に立方体タンク、図-6(b)にコルゲートタンクの静的解析結果から算出したX軸変位コンター図を示す。コルゲートタンクの最大変位は2.7mmであり、ほぼ変形が見られない。これに対し、立方体タンクの最大変位は441.7mmであり、水を入れた状態でタンクが膨らむことがわかる。また、図-7(a)に立方体タンク、図-7(b)にコルゲートタンクの静的解析結果から算出した圧力コンター図を示す。立方体タンクにおいて、タンク壁面中心にかかる最大圧力は 3.36×10^8 [Pa]であり、コルゲートタンクでは壁面下部にかかる最大圧力は 3.64×10^7 [Pa]となり、最大圧力が1/10になっていることがわかる。立方体タンクの物性値や板厚はコルゲートタンクと同じ値を用いていることから、コルゲート構造を施すことで側板の断面力が増し、剛性が高くなっていることが起因している。

4. おわりに

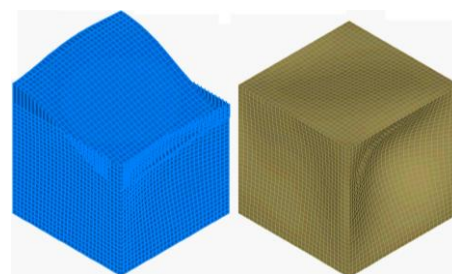
本研究において、貯水タンクにおける固有振動数解析及び時刻暦応答解析を行った。

流体部のみでの解析において、スロッシング固有振動数の算出結果は理論値と一致を示した。一方、連成解析は、タンクの剛性により算出する結果が異なることがわかった。次に時刻暦応答解析では、応答波高の増大、動液圧の比較による1次モードスロッシング現象の特徴が掴めた。

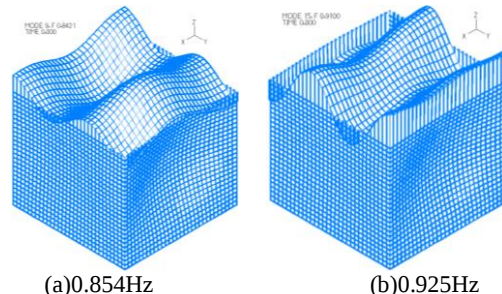
今後は、解析において減衰の表現を検討し、実現象との再現性の向上を課題とする。

参考文献

- 1) 塩野谷 他：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，土木学会第69回年次学術講演会，I-160，2014.9.
- 2) 平野 他：浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析，構造工学論文集，2007.4.



(a)流体部 (b)タンク部
図-2 立方体タンク内容液連成1次モード



(a)0.854Hz (b)0.925Hz
図-3 立方体タンク内容液連成2次モード挙動 流体部

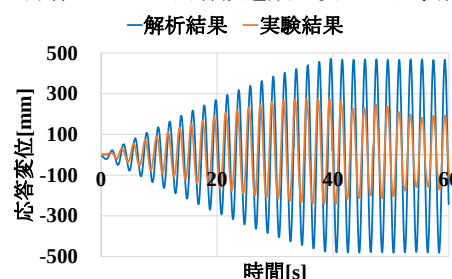


図-4 時刻暦応答波高比較

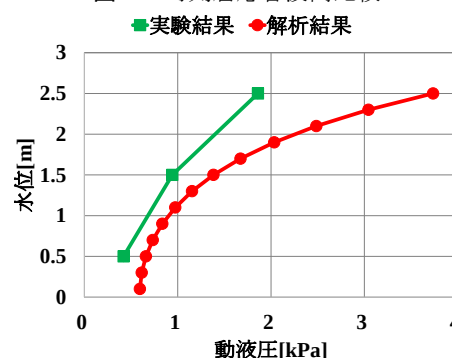
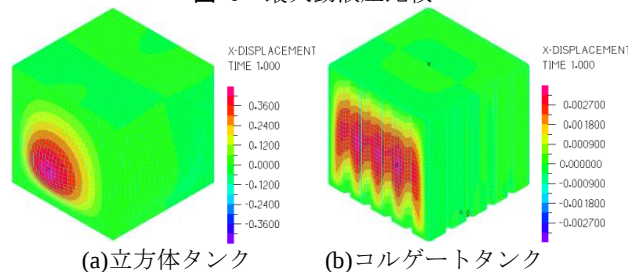
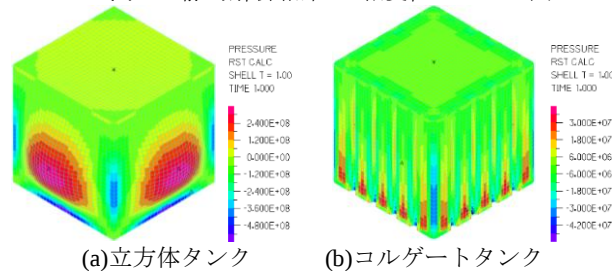


図-5 最大動液圧比較



(a)立方体タンク (b)コルゲートタンク
図-6 静的解析結果 X軸変位コンター図



(a)立方体タンク (b)コルゲートタンク
図-7 静的解析結果 圧力コンター図