

数値流体解析による FRP 製貯水タンクのスロッシング解析

○中央大学 学生員 因 和樹

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

貯水タンクの固有振動数が、やや長周期地震動の周波数域に入ると、内容液が大きく揺動するスロッシング現象が生じ、貯水タンクに損傷被害が発生することが報告されている。¹⁾とて貯水タンクは、静的な荷重の組み合わせによる設計がなされているだけで、現状では振動を考慮した動的な設計は加味されていない。そのため災害時に最も重要なライフラインの一つである水を守るために、動的な設計を考えることは必要である。そこで本報では、FRP 製貯水タンクにおいて、やや長周期振動を与えた場合のスロッシング現象を、数値流体解析の面から検討する。

具体的には、汎用有限要素法プログラム ADINA を用い、スロッシング固有振動数と液面モードの算出を行う。算出したスロッシング固有振動数の解析値と Housner の式から算出した理論値、塩野谷ら¹⁾の実験で測定した計測値との比較を行う。また、液面モードの算出を行い、可視化することにより、実験結果との挙動の把握を行う。同様に時刻歴応答解析を行い、解析結果と実験値との比較を行う。これらにより、液面応答変位や圧力変動応答などの算出が可能であること、実験の再現性があることを確認、把握することを目的とする。

2. 解析方法

ADINA を用いることにより、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タンク-流体連成解析²⁾が可能となる。解析対象タンクは、写真-1のFRP製タンクとする。ここで、表-1にタンクの諸条件を示す。また、解析に用いるモデルは、図-1(a)の平らな側板で構成された立方体タンクモデル、(b)のFRP製タンクモデルとする。ここで、(a)の立方体タンクモデルは実在するものではなく、(b)の表面凹凸構造の有無の場合を比較するために作成したものである。また、これらのモデルは、流体部と構造部の両方を考慮する連成解析に用いる。そして、流体部のみの解析にはタンク部のないモデルを新たに作成し、それを用いて解析する。

2.1 固有振動数解析

流体部のみの解析と連成解析の2通りの解析を行う。流体部のみの解析は、底部を剛体条件として解析する。連成解析は、流体とタンクの相互作用の物理現象を同時に解析する。ここで、内容液のスロッシング固有振動数の理論値は、Housnerの式から算出し、FRP製タンクを矩形として近似して式(1)から算出し、解析値と比較する。

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

f_i :スロッシング*i*次固有振動数、 H :水位、 L :幅

2.2 時刻歴応答解析

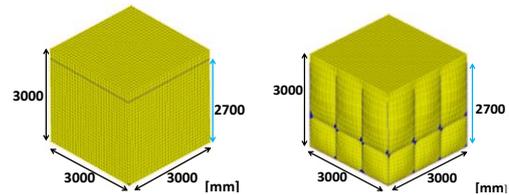
タンク-流体の連成体において、静的解析と動的解析の2つの解析を行う。まず静的解析を行うのは、ADINA 上

表-1 タンクの諸条件

タンク種類	立方体タンク/FRP製タンク
材質	不飽和ポリエステル樹脂
高さ[mm]	3000
幅[mm]	3000
奥行き[mm]	3000
板厚[mm]	25
水位[mm]	2700
水の密度[kg/m ³]	1000
ヤング率[N/mm ²]	4.10E+12
ポアソン比	0.3
タンクの密度[kg/m ³]	2000
タンク部	Shell要素
流体部	ポテンシャルベース3-D流体要素
拘束条件	タンク底面(X,Y,Z方向)
流体水面	自由水面



写真-1 FRP製タンク



(a) 立方体タンクモデル

(b) FRP製タンクモデル

図-1 解析タンクモデル概要

表-2 スロッシング固有振動数

固有値解析	解析対象	要素数	1次[Hz]	2次[Hz]
立方体タンクモデル	流体部のみ	24300	0.5082	0.8832
	連成	28440	0.5632	0.8320
FRP製タンクモデル	流体部のみ	26320	0.5285	0.9112
	連成(減衰考慮なし)	31704	0.5238	0.9032
	連成(減衰考慮あり)	34220	0.5420	0.9278
Housner式の値			0.5081	0.8831

で動的解析を実行する際の初期条件のためである。これにより自重釣り合いを計算し、その後に加速度を入力して実行するからである。また、壁面構造形式の違いがあるために剛性の違いの確認と比較を行う。ところで構造部には Reyleigh 減衰を考慮するが、タンク部のみしか減衰は付加することができない。そこで自由水面としていた液面に無視できる程度の薄い Shell 要素を仮定する。このような特殊なモデル化を行うことによって、減衰の作用を促すことにする。本報での加振条件は、塩野谷ら¹⁾の実験で測定した水平方向 0.5Hz、振幅 3mm、20 波とする。以上の条件より、動的解析を実行し、溢流の有無を把握し、解析結果に再現性があるか否かを考察する。

3. 解析結果

3.1 固有値解析

立方体タンクモデルと FRP 製タンクモデルの流体部のみの解析結果及び Housner の式から導いたスロッシング振動数の値を表-2に示す。流体部のみの解析の結果に着目すると、解析結果は2つのタンクモデルとも Housner 式の値と概ね一致している。これは、解析にお

キーワード : 数値流体解析, 貯水タンク, スロッシング現象, 時刻歴応答解析

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

いて流体の底部と側面部を剛体条件と考慮しているため、Housner 式で仮定されている条件と同じであることによる。次に連成解析の結果に着目すると、こちらの解析結果は、両タンクとも Housner 式の値と概ね一致している。若干の差が生じた理由としては、立方体タンクモデルの場合、壁面の剛性が低いことでタンクが変形し、それが内容液に影響を及ぼすことによる。そのため Housner の式の値との差が生じ、理論値とは完全には一致しなかったと推測される。また、FRP 製タンクは壁面に凹凸構造を有するので、タンク平面の剛性が高くなり、剛体に近づくことによって流体部のみ解析値と比較的一致したことがわかる。

次に、FRP 製タンクモデルにおける 1 次及び 2 次液面モードの連成解析結果を図-2(a), (b)に示す。また、このときのタンク部のみを抽出した解析結果を図-3(a), (b)に示す。これらの図より、加振実験で測定した 1 次モード(0.5Hz のとき)、2 次モード(0.8Hz のとき)の実験値と解析結果が比較的一致しているといえる。また、これらの図から FRP 製タンクの壁面の剛性が低いため、タンク部に大きな変形が生じている可能性があることを固有値解析の結果からも読み取れる。以上より、FRP 製タンクにおいても、解析によってスロッシング現象による 1 次及び 2 次液面モードの確認、把握を行うことができた。また、実験では算出していない 3 次、4 次モードの解析結果を図-4(a), (b)に示す。これらにより、実験では算出していないモードの再現性と予測も可能であることがわかる。

3.2 時刻歴応答解析

3.2.1 減衰の再現の検証

通常生成した連成モデルと仮想自由水面を定義した膜ありのモデルの解析結果、スロッシング固有振動数の理論値を各々表-2 に示す。解析結果に着目すると、固有周波数と液面モードにおいて概ね一致していることがわかる。このことから、ADINA において自由水面で定義したモデルでの減衰が可能であることが確認できた。

3.2.2 動的解析

図-5 に FRP 製タンクモデルの 1 次モードにおける、最大波高時の解析結果を示す。解析における最大波高は加振開始約 22 秒後に 193.6mm を示した。実験結果では、最大波高 210.7mm に達したため概ね一致しているといえる。また、図-6 に実験値及び解析値の時刻歴応答波高をそれぞれ示す。これらの図より比較を行うと、時間の経過とともに応答波高が増加し、最大波高に到着後、時間と共に振動が収まって行くことが確認できる。減衰率は、実験結果においては 0.15%、解析結果においては 0.12% となり、ほぼ一致した。さらに、図-7(a), (b)に 1 次モードにおける静水圧分布、最大波高時の全水圧をそれぞれ示す。これらにより、タンク底部とタンク側面部の接する部分が最大圧力となっていることが確認できる。このことから、内容液がタンクに与える全水圧の影響を把握することができた。

4. おわりに

本報では、立方体タンクと FRP 製タンクにおいて固有値解析を行った。固有値解析では FRP 製タンクにおいて実験の再現が可能であることがわかった。ただし、解析精度と計算時間の最適化を行い、適切な解析を行うことが重要である。さらに、解析結果から 3-D アニ

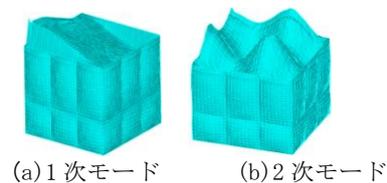


図-2 液面モード

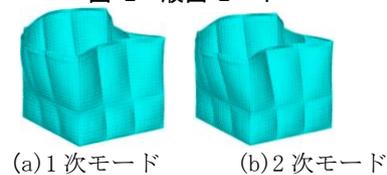


図-3 タンク部変位

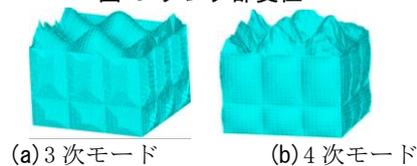


図-4 液面モード

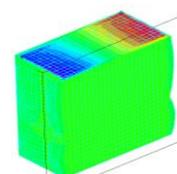


図-5 1次モード最大波高時の液面モード

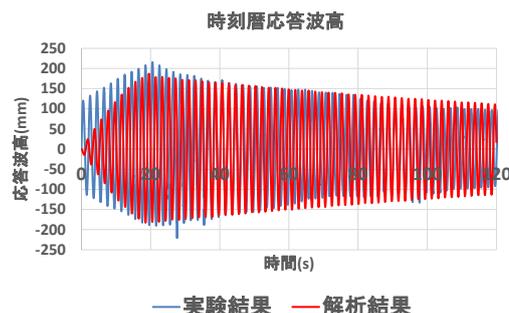


図-6 時刻歴応答波高

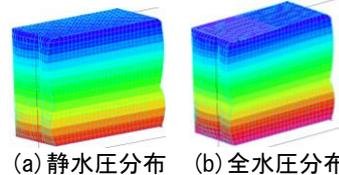


図-7 1次モードのときの圧力分布

メーションを用いることで、液面モードをビジュアル的に可視化し、挙動の把握及び予測することができた。また、時刻歴応答解析では減衰を考慮して 1 次モードでの解析を行い、最大波高及び応答波高の増大、内容液の挙動把握及び全水圧の影響の確認を行った。

今後の課題としては、メッシュをより細かくし、多くの実験データを収集し、減衰データを考慮することで実現象との再現をさらに目指す。また、減衰を付加させて解析することによってバルジング現象の確認、把握を行うことが今後の課題となる。

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.