

ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての固有値解析と時刻歴応答解析

○中央大学大学院 学生会員 竹本純平 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

近年、水道施設の貯水槽として維持管理の容易さと建設時間の短縮を目的として、数多くのステンレス製パネルタンク（以下、SUSタンクとする）が設置されるに至っている。それらのSUSタンクにおいて、東北地方太平洋沖地震や熊本地震等の地震で、最新の設計基準において設計、施工されたにも関わらず、SUSタンクの被害が数多く報告<sup>1)</sup>されている。

そこで、本報では土木学会地震工学委員会水循環NW災害軽減対策研究小委員会TFの活動の一環として検討された3000×3000×3000mmのSUSタンクを対象とし、流体と構造を連成したタンクの固有値解析と熊本地震益城（前震）NS波での時刻歴応答解析を行う。これにより地震動によりSUSタンクが局所的にどのような応力を受ける可能性があるのかを確認し、今後の設計条件の設定で必要となる事項を検討するものである。

2. 解析概要

2.1 SUSタンクの特徴

本報で扱うSUSタンクの内部構造は、タンク内部にSUS製の形鋼で補強材が構成された、ジャングルジムのような入り組んだ構造となっている。壁面の板厚が薄いのでこの部分の剛性が低いこと、さらに全溶接構造なので溶接長が長いなどの特徴を有している。ここでタンクの諸元を表-1に示す。

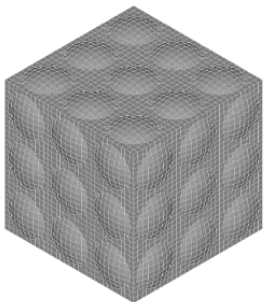
2.2 解析のモデル化

本解析に用いるSUSタンクの解析モデルを図-1に示す。ここで図-1(a)はタンク本体、図-1(b)はタンク内部の補強材を示す。また表-2に解析の諸元を示す。ここで解析は、汎用有限要素解析ソフトウェアである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一流体連成解析が可能なことである。水槽部はShell要素、補強材部はBeam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。なお、要素数は30,813である。

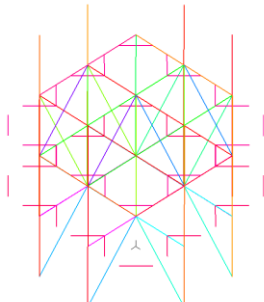
解析の手順として以下の通りを行う。①固有振動数解析を行い、対象のSUSタンクの固有振動数を推定する。②水を入れた状態における静的解析を実施する。ここでは構造一流体の連成解析を行う場合、自重の釣り合い計算を行い、この結果を時刻歴応答解析の初期条件とする。③時刻歴応答解析を実施し、本解析では熊本地震（前震）益城NS波を加速度の入力条件とする。

2.3 固有振動数解析

本解析では、特定方向からの励振力に対する振れやすさを示す刺激係数を算出し、バルジング固有値を推定する。その際、解析の適合度を判定するためにスロッシング固有値の算出も同時に実施する。



(a) タンク部



(b) 内部補強材

図-1 解析モデル

表-1 タンク諸元

| 材質          | SUS304 |
|-------------|--------|
| 高さH[mm]     | 3000   |
| 幅L[mm]      | 3000   |
| 奥行きD[mm]    | 3000   |
| 水位[mm]      | 2700   |
| 側板1段目板厚[mm] | 2.5    |
| 側板2段目板厚[mm] | 2.0    |
| 側板3段目板厚[mm] | 1.5    |
| 天井板板厚[mm]   | 1.5    |
| 底板板厚[mm]    | 3      |

表-2 解析諸元

| ヤング率[N/mm <sup>2</sup> ]             | 1.95E+11            |
|--------------------------------------|---------------------|
| ポアソン比 $\nu$                          | 0.3                 |
| 単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 78                  |
| 水槽部                                  | shell要素             |
| 補強材部                                 | Beam要素              |
| 流体部                                  | ポテンシャルベース<br>3D流体要素 |
| 境界条件                                 | 底面4辺固定              |
| 流体水面                                 | 自由水面                |
| 入力加速度                                | 熊本地震益城前震            |

表-3 固有振動数と刺激係数

| Modal Participation Factor |            |            |              | 備考       | Modal Participation Factor |            |            |              | 備考      |
|----------------------------|------------|------------|--------------|----------|----------------------------|------------|------------|--------------|---------|
| Frequency                  | X          | Y          | Z            |          | Frequency                  | X          | Y          | Z            |         |
| 0.202598                   | 0.00058905 | 0.00060907 | 144.882      |          | 5.16872                    | -0.0068751 | -0.0098963 | 11.9059      |         |
| 0.499699                   | 63.1111    | -60.8525   | -5.42804E-06 | スロッシング1次 | 5.69695                    | 0.0224155  | 0.0316936  | 0.00217168   |         |
| 0.4997                     | -60.8544   | -63.113    | 0.000941896  |          | 6.0315                     | -0.0051735 | 0.00989666 | -7.34959E-05 |         |
| 0.598226                   | 0.00092133 | 0.00040516 | -0.000205148 |          | .                          | .          | .          | .            |         |
| 0.714487                   | -0.0003223 | -0.0001462 | 0.000119353  |          | 7.68169                    | -10.7816   | -10.8781   | 0.111368     |         |
| 0.714823                   | -0.0004942 | 0.00015666 | -0.837418    |          | 7.68258                    | 10.7366    | -10.643    | 0.0182546    |         |
| 0.75639                    | -0.304991  | -0.292013  | -0.000577338 |          | 7.80873                    | -0.0050778 | 0.00752191 | 24.4803      |         |
| 0.756396                   | 0.291826   | -0.304736  | -0.000113507 |          | 8.19293                    | 0.00471094 | 0.00543399 | 0.000400569  |         |
| 0.852214                   | -0.0008143 | 0.0006357  | 0.0250106    |          | 9.21813                    | 12.4108    | 10.9038    | 0.0026022    |         |
| 0.883472                   | -11.8401   | -11.9651   | -1.23195E-05 |          | 9.2192                     | -10.698    | 12.2258    | 0.00337005   |         |
| 0.883479                   | -11.9635   | 11.8385    | 9.71026E-06  | スロッシング2次 | 10.3532                    | 0.113254   | 0.19276    | -0.0118255   |         |
| .                          | .          | .          | .            |          | 10.959                     | 0.228457   | 0.341136   | -7.82578     |         |
| 4.55912                    | -6.873E-06 | -0.0122442 | 1.12661E-06  |          | 11.4065                    | 0.070685   | -0.0744065 | 0.000830229  |         |
| 4.55913                    | 0.0122417  | 8.8799E-06 | -1.94664E-06 |          | 11.9422                    | 55.6637    | 64.5419    | -0.00203015  | 補強材固有値? |
| 4.574                      | -7.114E-07 | -1.145E-06 | 0.00103349   |          | 11.9937                    | -53.5649   | 54.4337    | 0.00273264   |         |
| 4.77123                    | 22.4668    | -21.8748   | 0.00529994   | 固有値      | 12.4349                    | -4.09423   | -3.42745   | -0.0123581   |         |
| 4.77159                    | -21.8153   | 22.4077    | 0.000455561  |          | 12.6146                    | -22.9177   | 20.8802    | -0.0242251   |         |

ところで箕輪らの研究<sup>2)</sup>によるとタンク壁面のバルジング固有振動数は2.5Hz～6.5Hzと推定される。本解析では、刺激係数の算出不足を防ぐため、一度に解析を実行するのではなく、0.1Hz毎1000modeで算出する。

2.4 時刻歴応答解析

本解析では、熊本地震（前震）益城NS波を加速度として入力し動的解析を実施することでミーゼス応力を算出し、地震波がタンクに与える影響を分析する。

3. 解析結果

3.1 固有振動数算出及びモード図

表-3に算出した各振動数の刺激係数を示す。刺激係数の最大値は、0.499Hzのときであり、この振動数はHousnerの式より求めたスロッシング1次の理論値であ

る 0.50Hz に一致している。一方 4.77Hz においても周辺の振動数領域と比較し、刺激係数が大きくなっている。したがって 4.77Hz が本解析に用いた SUS タンクのバルジング固有振動数であると推定する。一方 11Hz～12Hz においても刺激係数が大きくなっているが、これは補強材の固有値が算出されたものと推定する。

ここで、図-2 と図-3 にスロッシング 1 次の固有振動数である 0.49Hz とバルジング固有振動数と推定される 4.77Hz のモード図を示し、(a) はタンク部、(b) は流体部のモードである。タンク部に着目すると、0.49Hz ではタンクの壁面上部が大きく変形するモードとなっており、スロッシング現象を再現できている。これに対して、4.77Hz ではタンク下部の壁面が大きく変形するモードとなっており、東日本大震災や熊本地震におけるバルジング損傷位置と一致している。一方、流体部に着目すると、0.49Hz においてはスロッシング 1 次モードの波形を再現できている。これらの結果よりバルジングの固有値は 4.77Hz である。なおこの値は、同タンクの振動実験を行った佐久間ら<sup>3)</sup>の結果とほぼ同様である。

### 3.2 時刻歴応答解析

図-4 に時刻歴応答解析により算出したミーゼス応力の分布図を示す。ここで (a) は壁面、(b) は可視化用にタンクの底面部を取り外して、隅角部を下から覗き込んだ様子を示している。

ここで壁面に着目すると、中央部より下部方向の応力が大きくなっていることがわかる。また応力が大きく、赤で表示されている所は、斜め方向の補強材が入っている位置であり、隅角部内側を図-4 (b) に示す。この隅角部に斜め補強材が溶接されており、ここで応力集中が生じている。また応力値は最大値で 414MPa を示しており、ステンレスの曲げ耐力が 245MPa であるので破断強度を超えており、この部分に応力集中が生じて破損に到ることが推定される。ところで東日本大震災や熊本地震においてバルジング現象が原因となり、多くの SUS タンクが破損したが、その多くは隅角部やタンク中央部より下部で損傷が生じている<sup>1)</sup>。よって本解析ではバルジング現象を再現しており、補強材部での応力集中により隅角部を損傷する可能性が考えられる。

次にこの位置における時刻歴応答ミーゼス応力を図-5 に示す。解析ソフトの関係上、時刻歴応答応力値算出時には平滑化された値である。ここで、応力最大値は約 160.0MPa を示している。ここではステンレスの曲げ耐力である 245MPa を下回っているが、繰り返しの応答により破壊に到る可能性も考えられる。

### 4. おわりに

本解析は、前述の TF の活動で日本ステンレスタンク工業会から提示された図面に基づいて解析を実施した。本解析によりタンクの隅角部に降伏点を超える応力集中が生じているので、下部隅角部が耐震上の弱点になっている可能性が高い。ところで熊本地震の被害でもこの部分に損傷が集中していることに鑑み、SUS タンクのバルジング対策として下部隅角部の構造上のあり方、パネルと補強材の剛性のバランス、さらにはバルジング制振装置の付加等を検討する必要があると考える。

ところで通常設置されている同規模のタンクは、概ね天井・上段パネルの板厚は 1.5mm、材質は SUS329J4L、中・下段・底板パネルの板厚は 2.0mm、材質は SUS444L

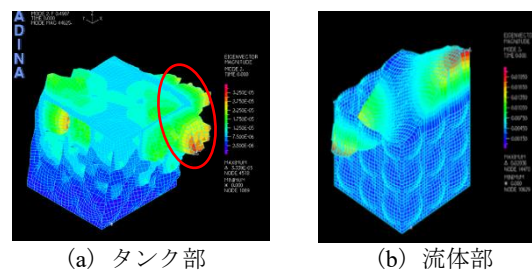


図-2 0.49Hz モード図

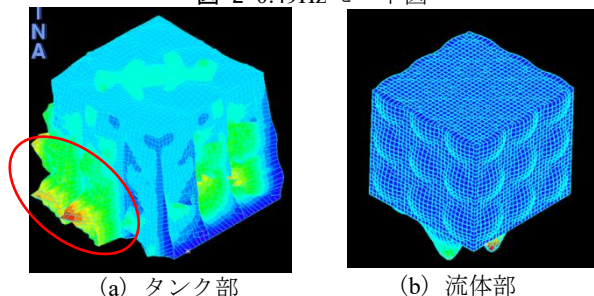


図-3 4.77Hz モード図

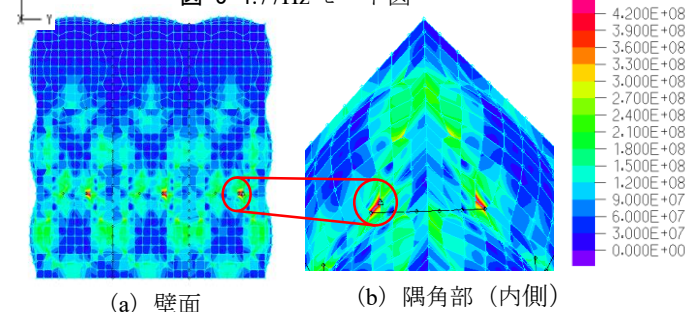


図-4 ミーゼス応力 (分布図)

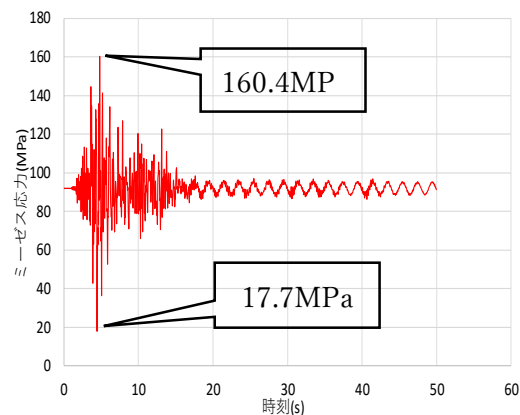


図-5 補強材接続部時刻歴応答ミーゼス応力

程度である。よって本解析で扱ったタンクは通常設置のタンクに比べ全体的に剛性が高い状況にあるので、この点を注意する必要がある。

謝辞：本研究の一部は中央大学特定課題研究費の給付を受けたことを付記する。

### 参考文献

- 1) 小野泰介, 遠田豊, 竹本純平, 平野廣和: 熊本地震におけるステンレスタンクの被害調査とスロッシング発生時の損傷の検証, 構造工学論文集 Vol.66A, 2020.3
- 2) 箕輪親宏: スロッシングインパクトを考慮した長方形の耐震性に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, 2004.11.
- 3) 佐久間真輝, 鈴木森晶, 青木大祐, 坂東芳行, 行田聡: パネル接合部の損傷に着目したステンレス鋼製パネルタンクの強度の検討, 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会, 2019.3