

ステンレス製パネルタンクの時刻歴応答解析

日本航空(株) 正会員 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¹⁾されている。

著者らは、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、流体と構造を連成させた時刻歴応答解析²⁾を実施し、SUSタンクが地震動により受ける局所的影響を分析してきた。ここで、上記のSUSタンクは実験用に製造されたものであり、かつ通常設置されているSUSタンクに比べ板厚が一規格厚いことから、全体的に剛性が高い状況にある。そのため結果が安全側になり、SUSタンクの耐震設計上の問題を導出できないでいる。

そこで本報では、通常設置されているSUSタンクと同等に材質と板厚を設定し、時刻歴応答解析を実施することで、より現実的な検討を行うものである。

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に示し、(a)がTF仕様であり、(b)が通常設置のものである。

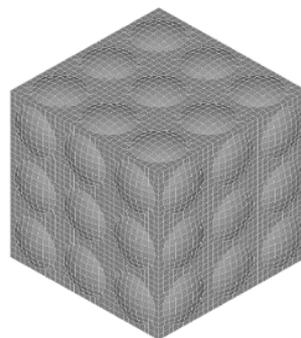
2.2 解析のモデル化

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。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、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。

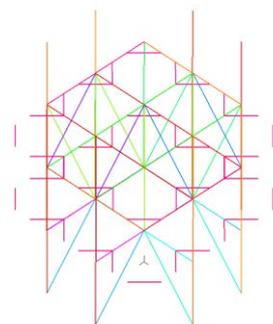
解析の手順として以下の通りを行う。①固有振動数解析を行い、本解析対象のSUSタンクの固有振動数を把握する。②水を入れた状態における静的解析を実施する。ここでは構造—流体の連成解析を行う場合、自重の釣り合い計算を行い、この結果を時刻歴応答解析の初期条件とする。③固有振動数解析により算出した固有振動数での正弦波加振を行う。④時刻歴応答解析を実施し、本解析では熊本地震（前震）益城NS波を加速

表-1 タンク諸元

		(a) 土木学会 TF	(b) 通常設置	
高さ H[mm]	3000			
幅 L[mm]	3000			
奥行き[mm]	3000			
水位[mm]	2700			
天井[mm]	1.5	SUS304	1.5	SUS329J4L
側板3段目[mm]			2.0	SUS444
側板2段目[mm]			2.5	
側板1段目[mm]			3.0	
底板[mm]	3.0			

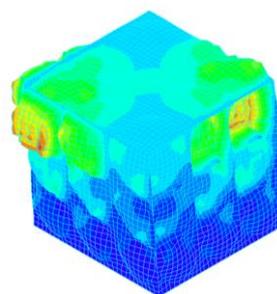


(a) タンク部

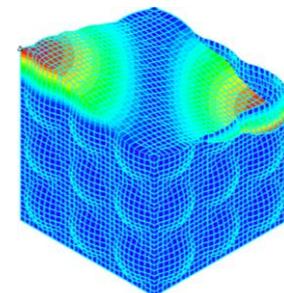


(b) 内部補強材

図-1 解析モデル



(a) タンク部



(b) 流体部

図-2 0.50Hz 振動モード図

度の入力条件とする。

3. 解析結果

3.1 固有振動数算出及びモード図

解析の手順①に従い固有振動数解析を行い、図-2に0.50Hz付近のモード図を示す。ここで(a)はタンク部、(b)は流体部である。図-2(a)のタンク部に着目すると、タンク壁面上部が大きく変形するモードとなっており、スロッシングの特徴である液面揺動による影響を再現できている。図-2(b)の流体部に着目すると、スロッシング1次モードの波形である液面揺動現象の再現ができています。そのため0.50Hzが本解析で算出したスロッシング1次モードの固有振動数であり、これはHousunerの式より求めたスロッシング1次の理論値である

0.50Hz に完全に一致している。

次に図-3に本 SUS タンクのバルジングの固有振動数付近と推測される 4.23Hz 付近のモード図を示し、図-3(a)のタンク部に着目すると、バルジング固有振動数付近である 4.23Hz でタンク下部の壁面変形が大きく変形するモードとなっている。これは、東日本大震災や熊本地震におけるバルジングが主原因と思われる損傷位置と一致している。図-3(b)の流体部に着目するとバルジングの固有振動数 4.23Hz で流体部がほとんど動いていない。これは流体が動液圧として構造体に作用するバルジングの特徴を再現できている。

ところで、著者らの解析²⁾による TF 仕様の SUS タンクの固有振動数は 4.77Hz 付近にあると推測される。本解析対象である通常設置の SUS タンクはこれよりも剛性が低いため、固有振動数が下がったと推測できる。

3.2 時刻歴応答解析

解析の手順④に従い時刻歴応答解析を実施し、図-4に時刻歴応答変位を示す。ここで A 点・B 点は、隅角部における斜め方向の補強材が溶接されている両端であり、A 点は加振方向、B 点は加振方向と垂直な方向の変位である。A 点の最大変位は -1.73mm、B 点の最大変位は 1.1mm となっている。また A 点が加振方向+側(凸側)変位すると B 点は一側(凹側)へ変位しており、補強材の両端において位相差が発生している。この特徴は、著者らが実施した TF 仕様の SUS タンクの解析²⁾の特徴と一致している。

図-5に本解析により算出したミーゼス応力の分布図を示す。壁面において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。特に応力が高い赤色で表示されている所は、斜め補強材が溶接されている部分であり、応力集中が生じていることがわかる。この部分の応力の最大値は 458MPa 程度であり、ステンレスの曲げ耐力 245MPa を大きく越している。なお、TF 仕様の SUS タンクでも同様な傾向がみられたが、応力値は 414MPa 程度であり、通常設置のタンクは板厚が薄くなっているため応力値の増大がみられた。

図-6に斜め補強材溶接部分における時刻歴応答ミーゼス応力を TF 仕様と通常設置時と比較を示す。解析ソフトの性能上、時刻歴応答応力値算出時には平滑化された値である。TF 仕様では応力値の最大値は約 160MPa であり、通常設置は約 188MPa である。ここでも、剛性が低い通常設置の SUS タンクに作用する応力が高くなっていることがわかる。なお両 SUS タンクにおいてステンレスの曲げ耐力 245MPa を下回っているが、繰り返しの応答により破壊に至る可能性が考えられる。

4. おわりに

本解析は、著者らが実施した TF の活動における SUS タンクの解析を踏まえ、通常設置されている SUS タンクと同等の材質と板厚に設定し解析を実施した。本解析により、バルジング現象が発生することで、剛性差の大きい斜め補強材溶接部分において応力が増大する事を明らかにした。そのため、形鋼等による内部補強材により SUS タンクの剛性を著しく上げることに耐震設計上の問題があると考えられる。

そこで現状設置されている SUS タンクに関してはバルジング対策として後付けで取り付け可能な制振装置を付加させることを提案する。

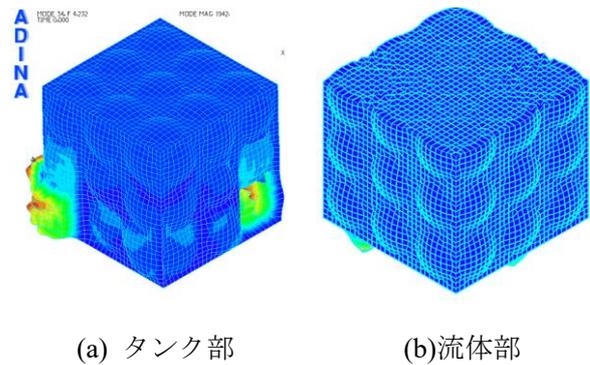


図-3 4.23Hz 振動モード図

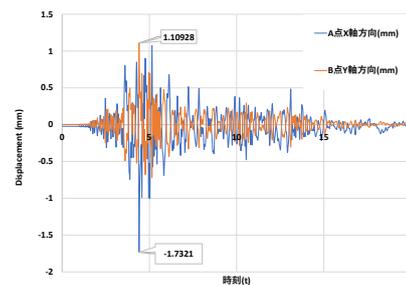


図-4 補強材両端における時刻歴応答変位

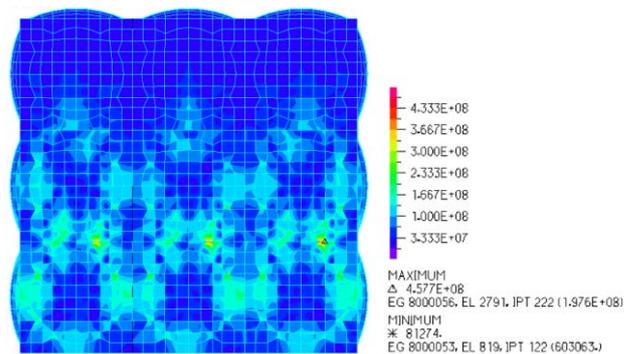


図-5 ミーゼス応力のコンター図

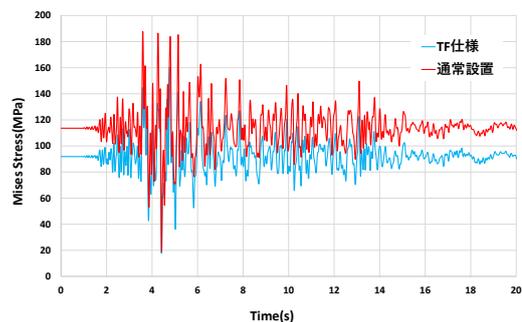


図-6 時刻歴ミーゼス応力の比較

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パネルタンクの被害調査とスロッシング発生時の損傷の検証, 土木学会構造工学論文集 Vol.66, pp.137-146, 2020.3.
- 2) 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), Vol176, No2, 2021.2