

正弦波による加振方向角の違いがステンレス製パネルタンクのバルジング現象に及ぼす影響

中央大学大学院 学生会員 ○白井 航太 (株) エヌ・ワイ・ケイ 正会員 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

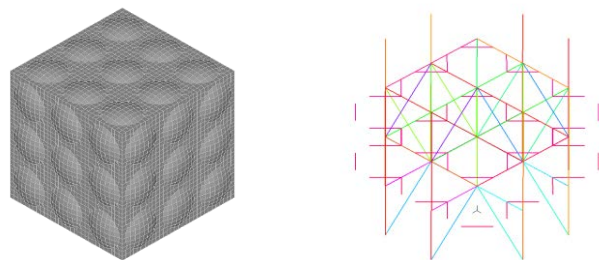
近年広く使われているステンレス製パネルタンク(以下, SUS タンクとする)は, 東日本大震災や熊本地震等でスロッシングのみならずバルジングが発生し, 様々な被害が報告されている. 今後貯水槽を始めとする給水タンクの耐震性と安全性を向上させるためには, 現行耐震設計基準で規定されているスロッシングのみならず, 耐震設計基準に明確な規定が示されていないバルジング問題を解明し, かつ基準を設定することが急務である.

竹本ら¹⁾の SUS タンクにおける正弦波加振による時刻歴応答解析の研究では, 加振方向角を加振軸とタンク壁面が直角となる場合, バルジングによる最も厳しい条件であるとして論じている. 一方, 渡邊ら²⁾の縮小モデルによる振動実験と数値解析の研究では, モデルを対角方向加振した時にバルジングにとって最も厳しい条件となると論じている. しかし, このモデルは壁面内部の中央に縦補強材を設置して変位を抑える等, 通常とは異なる構造となっていることから, 対角方向加振が厳しい条件となった可能性が高いと推定する.

そこで本報では, 竹本ら¹⁾と同じモデルを用いて, バルジング固有振動数の正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析を行う. ここでの解析は, 加振方向角を加振軸とタンク壁面が直角である場合の 0°を基本加振とし, 加振方向角を対角方向の 45°まで 15°毎に変化させる. これにより壁面に生ずる変位や von Mises 応力の影響を検討し, バルジングによる加振方向角の最も厳しい条件を導出するものである.

2. 解析対象 SUS タンク概要

本報で扱う解析対象の SUS タンクは, 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 (以下, TF とする) の活動において, 日本ステンレスタンク工業会から図面が提示された, 一面が 3 枚×3 枚の奇数枚パネルで構成された 3000×3000×3000mm の寸法を有する SUS タンクを対象とする. このタンクは TF で検討されると共に, 佐久間ら³⁾が振動実験を行ったものである. このタンクの特徴は, 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に入り組んだ構造となっていることである. これに剛性の低い薄板で構成された壁パネルが取り付けられていること, さらに全溶接構造なので溶接長が長いなどがある. そのため内部補強材である形鋼と壁面との間で大きな剛性差を有している. ここで本解析に用いる解析対象の SUS タンクモデルを図-1 に示す. ここで, 図-1(a) はタンクモデル, 図-1(b) はタンク内部補強材モデルを示す. また, 表-1 に SUS タンクの諸元を示す. このタンクは通常設置されているものと比べ, 上部を除き板厚がほぼ一段階厚くなっている. そのため通常設置の同程度の SUS タンクは, 耐震性に劣る可能性もある.



(a) タンクモデル (b) タンク内部補強材モデル
図-1 解析対象 SUS タンクモデル

表-1 SUS タンクの諸元

材質	SUS304		
高さH(mm)	3000		
幅L(mm)	3000		
奥行きD(mm)	3000		
水位(mm)	2700		
板厚(mm)	底板	3.0	
	側板	1段目	2.5
		2段目	2.0
		3段目	1.5
	天井版	1.5	

表-2 解析条件

ヤング率(N/mm ²)	1.95E+11
ポアソン比	0.3
単位体積重量(kN/m ³)	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3D流体要素
境界条件	底面4辺固定
流体水面	自由水面
加振方向角	0°, 15°, 30°, 45°の4方向

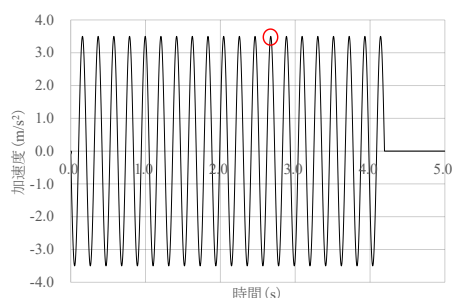
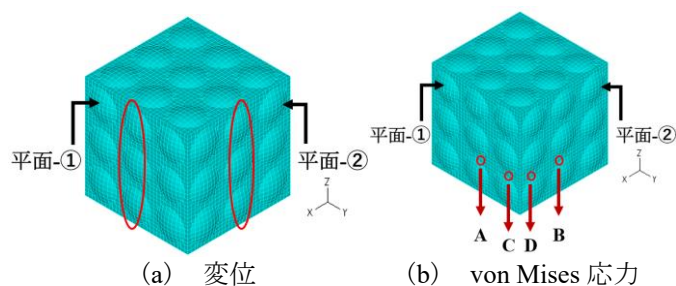


図-2 正弦波 (4.77Hz) の加速度波形



(a) 変位 (b) von Mises 応力
図-3 各項目の測定位置

3. 解析概要

本解析では, 汎用有限要素法プログラム ADINA を用いて時刻歴応答解析を行う. 解析手順は, 竹本ら¹⁾の研究を基に次の様に行う.

- ① 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.
- ② 正弦波を入力加速度とする動的解析を実施する.

時刻歴応答解析では、外力として加速度を入力することにより、解析を行う。本解析では竹本ら¹⁾の研究で得られた本 SUS タンクのバルジング固有振動数である、4.77Hz の正弦波を振幅 3.9mm、波数 20 波を入力加速度として図-2 に示す波形で加振する。なおこの加速度は 350Gal 程度であり、震度 6 弱相当である。この時の解析条件を表-2 に示す。

加振方向角は、図-3 に示す座標系で x 軸正方向を 0° を基本加振とし 15°、30°、45° の 4 方向に分けて解析を行う。また、タンク部に非線形問題に適用しやすいとされる Rayleigh 減衰 C を付加することで、減衰を付与している。

4. 解析結果

時刻歴応答解析結果から変位、応力を算出する。各項目の測定位置を図-3 に示す。ここで図-3 に示す x 軸方向に対して垂直な平面を平面-①、y 軸方向に対して垂直な平面を平面-②とする。変位は、図-3 (a) の図中に示した範囲において、メッシュ作成時に作成された節点ごとに取得する。なお各節点の間隔は 100mm である。応力については von Mises 応力とする。竹本らの研究¹⁾より、平面-①で応力が最大値となる A 点で、平面-②で最大となる B 点で比較を行う。また隅角部において平板で構成されている斜め補強材の溶接部分である C 点と D 点においても比較する。なお A 点と B 点、C 点と D 点は隅角部を挟んで対称の位置関係である。von Mises 応力の取得位置を図-3 (b) の図中に示す。

4.77Hz 正弦波加振時の各平面において、一定時間加振させた後、変位が定常状態となったと考えられる図-2 に示す加振時刻 $t=2.675s$ 時の加振方向角別の壁面最大応答変位を図-4 に示す。ここで平面-①の高さ 900mm の位置で最大値となり、変位は 2.87mm である。平面-②に関しては、加振方向角の増加につれて変位が徐々に大きくなっている。また加振方向角 45° 時で各平面の最大変位は、ほぼ同じ値をとっており、高さ 900mm の位置において、平面-①では 2.64mm、平面-②では 2.59mm である。よって加振方向角 0° 時にバルジングの影響を最も受けていることがわかる。

次に、図-3 (b) に示す各測定点における壁面最大応力を図-5 に示す。これより応力は、各平面において壁面の中心部の A、B 点より斜め補強材の溶接部分である C、D 点においての応力の方がそれぞれ大きい値を示している。A、B 点の応力は、加振方向角 0° においては A 点の方が B 点より 30% 程度大きいものに対して、加振方向角 45° においてはほぼ同一の値であり、A 点では 117.0MPa、B 点では 117.1MPa を示している。これに対して C、D 点については加振方向角が増えるにつれて応力が徐々に大きくなり、C 点では 0° で 131.2MPa、45° で 138.7MPa である。ここで、加振方向角 45° 時の応力はわずかではあるが最大値を示している。このように C、D 点については、加振方向角を変化させても応力の値にほとんど差がない。よって加振方向角に関わらず、隅角部では大きい応力が生じ、かつ繰り返し振動することで引張と圧縮が交互に作用し、平板で構成される斜め補強材の座屈ならびに溶接部での剥離の可能性が考えられる。図-6 に加振時刻 $t=2.675s$ 時の von Mises 応力分布を加振方向角 0°、45° のそれぞれを示す。これより、それぞれの図中に示した隅角部において分布の中で最

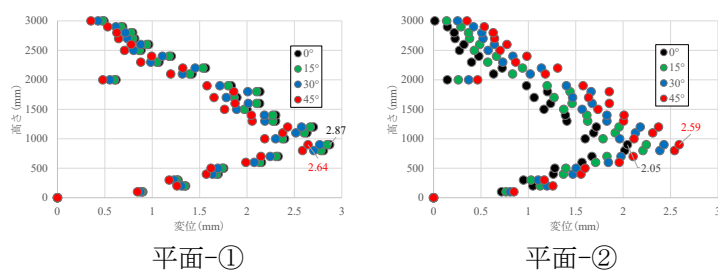
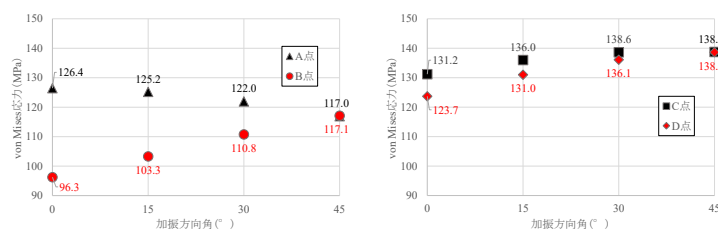
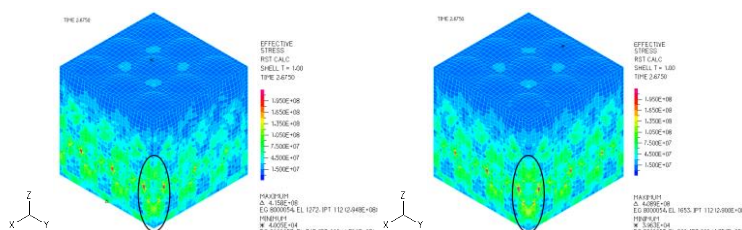


図-4 加振方向角別の壁面最大応答変位 ($t=2.675s$)



(a) A,B 点 (b) C,D 点

図-5 正弦波加振時の壁面最大応力



(a) 加振方向角 0° (b) 加振方向角 45°

図-6 von Mises 応力分布図 ($t=2.675s$)

も応力が大きい赤色を示しており、隅角部での応力集中が予想される。

5. おわりに

本報では SUS タンクについて加振方向角を変えて時刻歴応答解析を行い各平面における変位と von Mises 応力を確認した。変位に関しては加振方向角 0° の時に加振方向に直角な面である平面-①の高さ 900mm において最も変位が大きくなり、バルジングの影響を最も受けることがわかった。次に von Mises 応力に関しては、加振方向角を変化させた時、平板で構成される斜め補強材溶接部分である隅角部の von Mises 応力の方が大きくなっている。このことから加振方向角に関わらず、隅角部は繰り返し振動することで引張と圧縮が交互に作用し、平板補強材の座屈、パネル同士の溶接部の剥離等の発生の可能性が考えられる。

以上より、SUS タンクのバルジングに関する検討は、加振方向角を考慮する必要はなく、加振方向角 0° で検討を行うことで傾向を掴むことができると考える。

参考文献

- 1) 竹本純平他: 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), Vol.76, No.2, pp.153-162, 2020.
- 2) 渡邊尚彦他: 加振方向角が矩形タンクバルジング応答に及ぼす影響に関する実験的研究, 令和 3 年度第 76 回土木学会年次学術講演会, I-271, 2021.
- 3) 佐久間真輝他: 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, I-010, 2019.3.