

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振動に及ぼす影響

The effects of the difference in the attack angles on the bulging vibration for SUS panel tanks

白井航太 (中央大院・理工) 小野泰介 ((株)エヌ・ワイ・ケイ) 平野廣和 (中央大・総合政策) 佐藤尚次 (中央大・理工)

Kouta SHIRAI, Chuo University
Taisuke ONO, NYK Co.Ltd.
Hirokazu HIRANO, Chuo University
Naotugu SATO, Chuo University
FAX:03-3817-1803, E-mail: a18.45tf@g.chuo-u.ac.jp

Various damages to SUS panel tanks have been reported due to the earthquake. These causes are due to the bulging vibration. The bulging vibration is a coupled vibration interacted the wall structure and fluid by short-period seismic motion. However, there are no design standards for bulging vibration, and it is necessary to establish those standards. In this paper, we carried out the time history response analysis of the fluid structure interaction with changing attack angles. This analysis clarifies the weak points of SUS panel tanks when the bulging vibration occurs. As a result, it was found to be maximum of the displacement at the attack angle 0°. As for the stress, corner members are the weak points regardless of the attack angles.

1. はじめに

ステンレス製パネルタンク (以下, SUS タンクとする) は, 短周期地震動によりタンク壁面構造体と内部の流体との連成振動であるバルジング振動が発生し, 様々な被害が報告されている. このような被害を防ぐために, 現在規定の無いバルジングに対する設計基準の確立が求められている. しかし振動台を用いての振動実験は, 準備や計測に多くの時間と費用が必要である. そこで, できる限り短時間かつ低費用で行える構造と流体の連成解析が希求される.

竹本ら¹⁾は, 加振方向角を加振軸とタンク壁面が直角となる場合に, 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. それに対して渡邊ら²⁾は, 2×2×2 枚の偶数枚のパネルで作成された縮小モデルを用いて振動実験と数値解析を行い, 対角方向に加振した時にバルジングによる最も厳しい条件となると論じている. ただしこのモデルは, 壁面内部の中央に縦補強材を設置して変位を抑える通常とは異なる構造となっている.

以上のことから本論では, 竹本ら¹⁾と同一のモデルを用い, 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°を基本加振する. これより対角方向 45° まで 15° 毎にバルジング固有振動数の正弦波変位を振幅一定で入力する時刻歴応答解析を行う. これにより壁面に生ずる変位やミーゼス応力を算出し, 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. 解析概要

2.1 SUS タンクの特徴

本論で扱う 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工業会から図面が提示された 3000×3000×3000mm の 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. なお, このタンクは通常設置されているものと比べ壁面の板厚が全て一段階厚くなっている.

このタンクの特徴は内部構造と壁面にあり, 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である. 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. ここでのタンクの諸元を Table1 に示す.

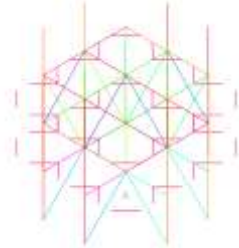
Table1 Tank Specifications Table2 Analysis Specifications

Material			SUS304
Height [mm]			3000
Width [mm]			3000
Depth [mm]			3000
Water level [mm]			2700
Thickness [mm]	Side panel	1st stage	2.5
		2nd stage	2.0
		3rd stage	1.5
	Ceiling panel		1.5
	Bottom panel		3.0

Young's modulus[N/mm ²]	1.95E+11
Poisson's ratio	0.3
Unit volume weight[kN/m ³]	78
Water tank	Shell element
Reinforcement material	Beam element
Fluid	Potential basis 3D fluid element
Boundary conditions	Bottom 4 sides fixed
Water's surface	Free surface
Input acceleration	4.77Hz sine wave
Attack angle	0°, 15°, 30°, 45°



(a) Tank Model



(b) Reinforcement Model

Fig. 1 SUS panel tank

2.2 解析のモデル化

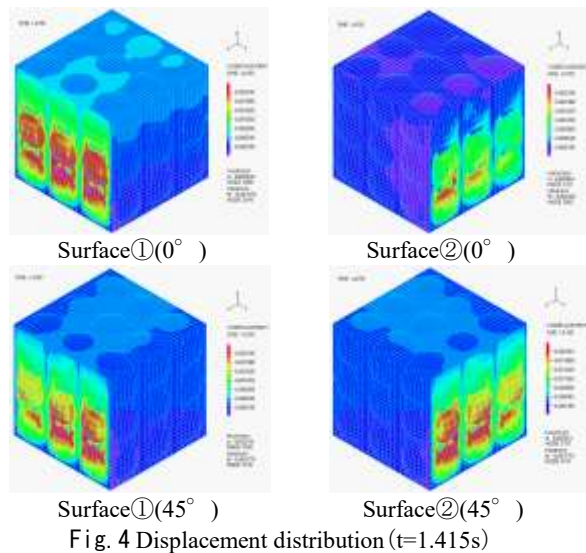
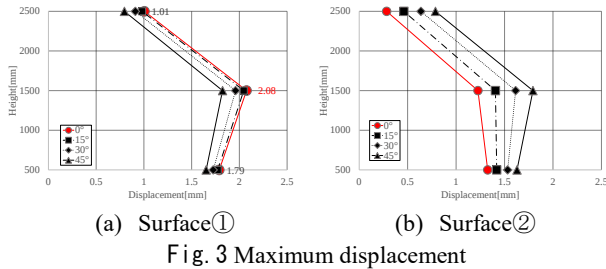
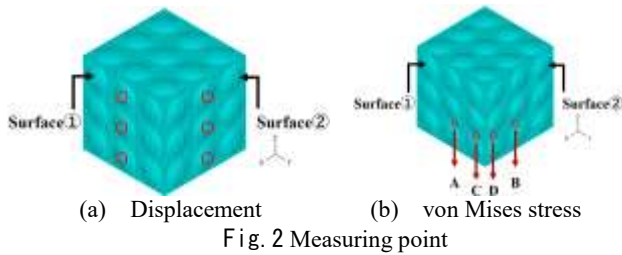
本解析に用いる SUS タンクの解析モデルを Fig.1 に示す. ここで Fig.1(a)はタンク本体, Fig.1(b)はタンク内部の補強材を示す. また Table2 に解析の諸元を示す. ここでの解析は, 汎用有限要素解析ソフトウェアである ADINA を用いる. 水槽部は Shell 要素, 補強材部は Beam 要素, 流体水面は自由水面とし, 基礎方程式はポテンシャルベース 3 次元流体方程式を用いることで解析を実施する. また拘束条件は底面 4 辺固定する. なお, 要素数は 30,813 である.

2.3 加振条件

解析手順は, 次の順で行う.

- 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 動的解析を実施する.

時刻歴応答解析の入力振幅に関しては, 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 波を入力条件として加振する. なお, この時の加速度は 350gal 程度であり,



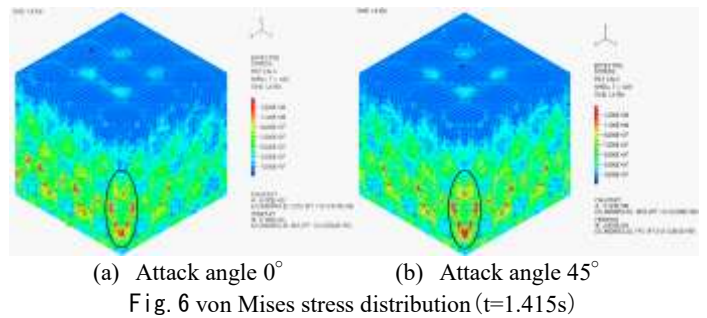
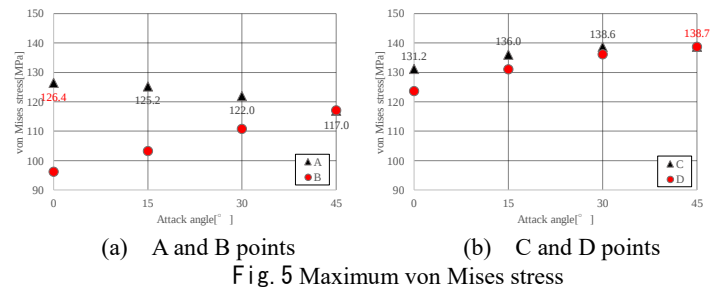
震度 6 弱相当である。加振方向角は、 x 軸正方向を 0° とし 15° , 30° , 45° の 4 方向に分けてそれぞれ解析を行う。

得られた解析結果は、Fig. 2 に示す測定位置から変位、応力を算出する。ここで Fig. 2 に示す x 軸方向に対して垂直な平面を Surface①、 y 軸方向に対して垂直な平面を Surface②とする。変位は、Fig. 2(a)の図中に示した範囲において高さ 500mm, 1500mm, 2500mm の 3 点で求める。応力についてはミーゼス応力とする。Surface①で応力が最大値となる A 点で、Surface②で最大となる B 点で比較を行う。また隅角部において斜め補強材溶接部分である 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。

3. 解析結果

各平面における最大応答変位を Fig. 3 に示す。これより変位が最大となったのは加振方向角 0° 時の Surface①、高さ 1500mm の位置であり 2.08mm 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ることがわかる。

最大変位 2.08mm を生じる加振時間 $t=1.415s$ 、加振方向角 0° 時の各平面での変位分布を、加振方向角 0° , 45° 時において Fig. 4 に示す。これより加振方向角を増やすにつれて Surface①では変位が小さくなるのに対し、Surface②では変位が大きくなっている。これは加振方向角が増えるに



つて Surface①の変位が Surface②に移行していると考えられる。

次に各測定点における壁面での最大応力を Fig. 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くなっている。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っており、C 点では 131.2MPa から 138.7MPa である。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は大きく変化していない。加振方向に関わらず、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、平板で構成される斜め補強材の座屈の可能性が考えられる。

Fig. 6 に加振時間 $t=1.415s$ 時の応力分布を加振方向角 0° , 45° のそれぞれを示す。これから、それぞれ図中に示した隅角部において分布の中で最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。

4. おわりに

本論では、 $3 \times 3 \times 3$ 枚の奇数枚パネルで構成される 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ミーゼス応力を導出した。変位に関しては、加振方向角 0° 時において加振方向に直角な面である Surface①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となった。これは、渡邊ら²⁾の研究と異なる結果となっているが、この検討が特殊な条件下で行っていることによると考えられる。次にミーゼス応力に関しては、壁面の中心部よりも斜め補強材を内部に有する溶接部分である隅角部の方が大きくなっている。これより加振方向に関わらず隅角部において平板補強材の座屈、パネル同士の溶接部の剥離等の可能性が考えられる。

謝辞：本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (C) の給付を受けたことを付記する。

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)，pp.153-162, 76巻2号, 2020.
- 2) 渡邊尚彦他：内構材をもつ実矩形貯水槽の簡易バルジング応答推定，構造工学論文集，Vol.65A, pp.305-316, 2019.
- 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，土木学会中部支部研究発表会, 2019.