

## 地震波加振での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

○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

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。

著者ら<sup>1)</sup>は正弦波加振において、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<sup>2)</sup>は、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等、通常とは異なる構造となっている。

以上のことから本報では、熊本地震前震益城 NS 波を入力波とし、正弦波で実施した解析<sup>1)</sup>と同一のモデルを用いる。ここで、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°毎に地震波を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。また地震波による解析を行うことで、正弦波による解析<sup>1)</sup>との比較をする。

## 2. 解析概要

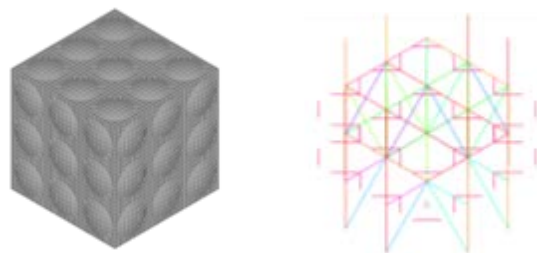
## 2.1 SUS タンクの特徴

本報で扱う 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 3×3×3 枚の奇数枚パネルで構成されている 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<sup>3)</sup>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 SUS 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



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

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]	側板 1段目	2.5
	側板 2段目	2.0
	側板 3段目	1.5
	天井版	1.5
	底板	3.0

表-2 解析条件

ヤング率[N/mm <sup>2</sup> ]	1.95E+11
ポアソン比	0.3
単位体積重量[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	熊本地震前震益城NS波
加振方向角	0°, 15°, 30°, 45°の4方向

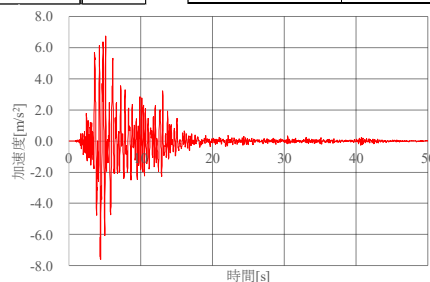


図-2 熊本地震前震益城 NS 波の入力加速度

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-2 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部 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加速度に関しては、2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に発生した、熊本地震前震における益城での NS 波を入力加速度として加振する。加速度は国立研究開発法人、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET より取得し、これを図-2 に示す。

キーワード：SUS タンク バルジング 加振方向角

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

加振方向角は、 $x$  軸正方向を  $0^\circ$  を基本加振とし  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  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、図-3 に示す測定位置から変位、応力を算出する。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、メッシュ分割時に作成された節点ごとを取得する。なお各節点の間隔は  $100\text{mm}$  である。応力についてはミーゼス応力とする。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

各平面において加振時間  $t=4.77\text{s}$  時の加振方向角別の壁面最大応答変位を図-4 に示す。なお加振時間  $t=4.77\text{s}$  は加振方向角  $0^\circ$  時に変位が最大値をとった時間であり、平面-①、高さ  $900\text{mm}$  の位置で最大変位は  $3.94\text{mm}$  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大きくなっている。よって加振方向角  $0^\circ$  時にバルジングの影響を最も受けることがわかる。測定位置の違いはあるが、各平面についての傾向は正弦波加振時の解析<sup>1)</sup>と同じく、加振方向角  $0^\circ$  時に平面-①の変位が最大値となる結果が得られた。ところで、各平面において高さ  $2000\text{mm}$  の位置で変位が他の節点に比べてかなり小さくなっている。この部分は 2 段目と 3 段目のパネル溶接部であり、変位を抑えるよう設計されている。

次に各測定点における壁面での最大応力を図-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  $166.5\text{MPa}$  から  $179.2\text{MPa}$  であり、加振方向角  $30^\circ$  時の値がわずかではあるが最大となった。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。図-6 に加振時間  $t=4.77\text{s}$  時のミーゼス応力分布を加振方向角  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  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。これも正弦波加振<sup>1)</sup>と同様な傾向を示している。

### 4. おわりに

本報では、 $3 \times 3 \times 3$  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地震波を用いた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  $0^\circ$  時に加振方向に直角な面である平面-①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。正弦波による解析<sup>1)</sup>、地震波による解析ともに加振方向角  $0^\circ$  時に平面-①の変位が最大値となり、バルジングの影響を最も受ける結果となった。

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

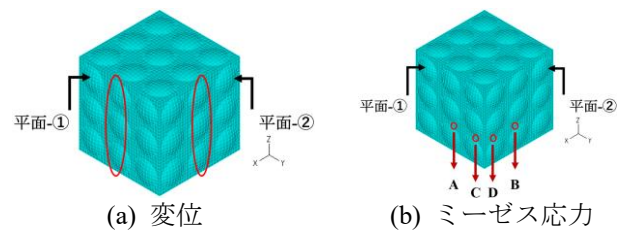


図-3 各項目の測定位置

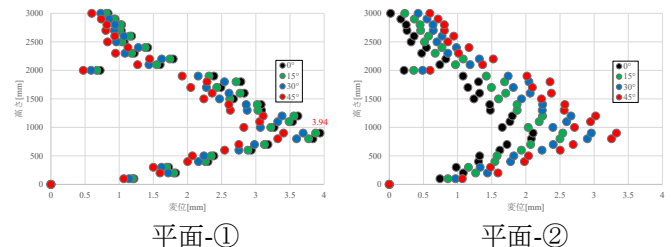


図-4 加振方向角別の壁面最大応答変位( $t=4.77\text{s}$ )

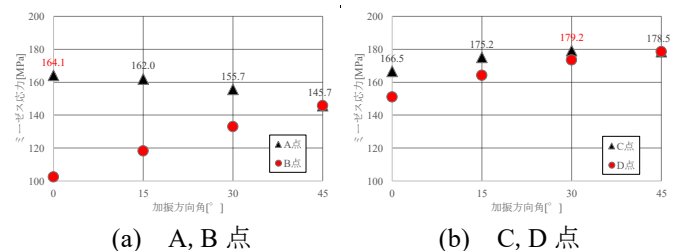


図-5 壁面最大応力発生点

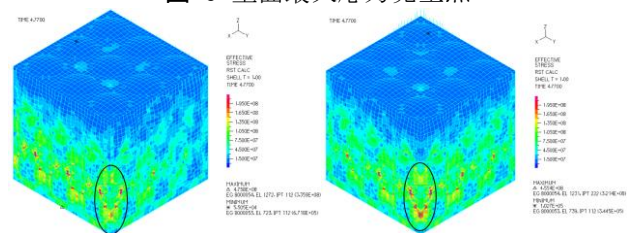


図-6 ミーゼス応力分布図( $t=4.77\text{s}$ )

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。隅角部の C 点については加振方向角  $30^\circ$  時の値が大きく、圧縮、引張の方向性を見るためにも、主応力での考察も必要である。

本報での検討から、加振方向角がバルジング振動に及ぼす影響は、加振方向角  $0^\circ$  が変位、ミーゼス応力ともに最大となるが、他の加振方向と大きな差はないと考えられる。よって SUS タンクのバルジング振動に関する検討は、加振方向角  $0^\circ$  で検討を行えば網羅できると考える。

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) 白井航太他：加振方向角の違いが貯水槽のバルジング振動に及ぼす影響について、第 49 回土木学会関東支部技術研究発表会 I-31
- 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.