

# 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

白井航太<sup>1</sup>・小野泰介<sup>2</sup>・平野廣和<sup>3</sup>・佐藤尚次<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a18.45tf@g.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 (株)エヌ・ワイ・ケイ (〒349-0131 埼玉県蓮田市根金 1689-1)

E-mail: t.ono@nyk-tank.co.jp

<sup>3</sup>正会員 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

E-mail: hirano@tamacc.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>4</sup>正会員 中央大学教授 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: nsato.57n@g.chuo-u.ac.jp

ステンレス製パネルタンクは、地震動による様々な種類の被害が報告されている。これらの原因の一つとして、タンク構造体の振動が主体となるバルジング振動に起因する被害が挙げられる。バルジング振動は、短周期の地震動によって構造と流体が相互作用する連成振動である。しかし、バルジング振動に関する設計基準は無く、これらの基準を確立する必要がある。本論文では、基準作りの基礎となる加振方向角を変化させながら流体と構造とを連成させた時刻歴応答解析を実施する。この結果、バルジング振動が発生した場合のステンレス製パネルタンクの弱点を明らかにする。具体的には、変位に関しては加振方向角  $0^\circ$  で最大であること、さらに von Mises 応力に関しては加振方向角に関係なく隅角部が弱点となることを明らかにする。

**Key Words:** stainless steel panel tank, bulging vibration, sloping vibration, time history response analysis, stress concentration, attack angle

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災）での著者らの現地調査の結果や関連の報告書<sup>1)2)</sup>によると、貯水槽に発生する被害には、大きく分けて2種類あることがわかってきた。一つは天井や上部の側板が破損した事例、もう一つは下部を中心としての側板や隅角部が破損した事例である。前者は、やや長周期地震動により内容液の固有振動数と地震波の卓越振動数の共振による液面揺動が原因となるスロッシング振動である。後者は、短周期からやや短周期の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が原因であるバルジング振動である。特に近年広く使われるようになって来ているステンレス製パネルタンク（以下、SUSタンクとする）においてバルジング振動が発生し、様々な被害が報告されている。また熊本地震においても、著者らの現地調査<sup>3)</sup>においてスロッシングのみならずバルジングによるSUSタンクの被害を多数確認できている。

このように地震被害が発生する度に、スロッシングの被害のみならずバルジングの被害が発生していることに鑑み、今後貯水槽をはじ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。

ところで従来のバルジングに関する研究は、円筒形の大型の石油タンク等では坂井<sup>4)5)</sup>らが中心となって行ってきたが、ここで取り上げる矩形の貯水槽に関する研究は、箕輪ら<sup>6)7)</sup>の研究や著者ら<sup>8)9)10)</sup>の研究グループによる、大型振動台を用いての実験以外に余り行われていないのが現状である。

一方、大型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こと、相似則の設定に難しさがあるなどの制約を有している。そこで、できる限り短時間かつ低費用で行うことができる構造と流体の数値解析による連成解析が希求される。

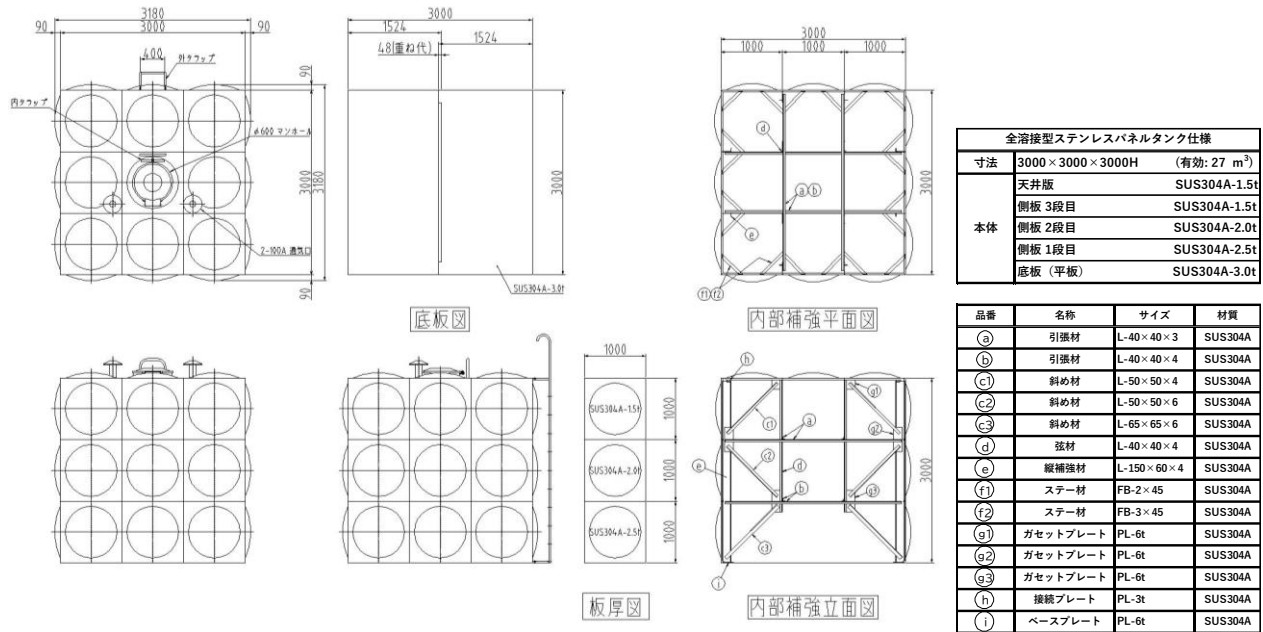


図-1 解析に用いた SUS タンクの図面

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
		2段目	2.0
		3段目	1.5
	天井版		1.5
	底板		3.0

ここで竹本ら<sup>1)</sup>は正弦波加振における時刻歴応答解析を実施し、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。それに対して渡邊ら<sup>2)</sup>は、一面が2枚×2枚の偶数枚パネルで構成されて、2000×2000×2000mmの寸法を有し、かつ内側に補強材を有する縮小モデルを用いて振動実験と数値解析を行っている。この結果、モデルの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。

以上のことから本論では、まず竹本ら<sup>1)</sup>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。ここでの解析では、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。

次に熊本地震前震益城 NS 波を入力波とし、正弦波で実施した解析と同一のモデルを用いる。ここでも同様に、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 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. 解析概要

### 2.1 SUS タンクの概要

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。本 SUS タンクの図面を図-1 に示す。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、通常設置されている同規模のタンクでは、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 SUS444 程度である。このタンクは、天井・上段パネルの板厚は1.5mm、中段パネルは2.0mm、下段パネルは2.5mm、底板は3.0mm、材質は SUS304 であり、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。そのため通常設置されている同程度の SUS タンクは、本研究で使用している SUS

タンクより耐震性に劣る可能性もある。ここでのSUSタンクの諸元を表-1に示す。

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。

## 2.2 解析手法

解析手法は著者らの既往の研究結果<sup>14)</sup>から、流体はポテンシャル理論を適用し、構造である壁面と流体面で圧力が同一となる境界条件を用いて流体と構造の連成問題としてモデル化している。定量的な現象を把握するならば、3次元モデルにより忠実に流体-構造をモデル化し、流体の解析には Navier-Stokes の方程式を用いることが必要である。しかし、この解析には多大な計算時間を要することから、ここでは実用的な計算時間で解析可能で、実験結果から得られた減衰を適切に表現するために Rayleigh 減衰を仮定し、導入したポテンシャル理論を用いることで、定性的な現象を掴むこととする。特にバルジング振動を扱うことから、流体運動が活発とならないので、現象を説明するのに十分な手法を考えている。但し、本解析手法は粒子法等を用いていないため、流体が天井面に接すると解析不可能となるので、流体が天井に接する所で解析を終了する。

## 2.3 支配方程式

流体運動を非回転、波面の変形は微小であると仮定したとき、流体の運動は速度ポテンシャル $\phi$ として式(1)の連続の方程式で表される。ここで $\rho$ は密度であり、本解析では非圧縮を仮定するので密度を一定の値とする。

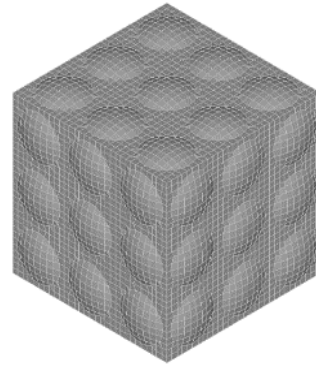
$$\dot{\rho} = \nabla \cdot (\rho \nabla \phi) \quad (1)$$

流体と構造の連成には、式(2)で示す運動方程式及び式(3)に示す構造と流体との境界条件式を用いる。

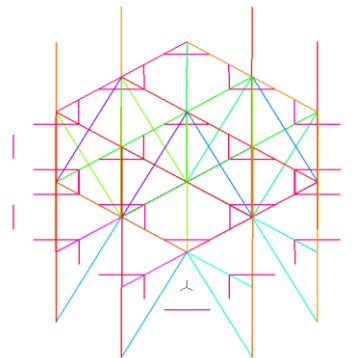
$$h = \Omega(x) - \dot{\phi} - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (2)$$

$$-\delta F_u = - \int_S p n \delta u dS \quad (3)$$

ここで  $h$  は比エンタルピー、 $p$  は圧力、 $x$  は位置、 $\Omega(x)$  は位置  $x$  の物体力加速度、 $S$  は境界、 $\delta F_u$  は、境界  $S$  上の流体圧を構造上に与える力、 $n$ 、 $u$  は方向ベクトルをそれぞれ表す。



(a) タンクモデル



(b) タンク内部補強材モデル

図-2 解析対象の SUS タンクモデル

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
加振方向角	0°, 15°, 30°, 45°の4方向

## 2.4 解析のモデル化

本解析に用いる解析対象の SUS タンクモデルを図-2に示す。ここで図-2(a)はタンクモデル、図-2(b)はタンク内部補強材モデルを示す。また表-2に解析条件を示す。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、メッシュを作成する際にはタンクと流体との節点の結合を行わないことにより、滑らかに液面挙動が起きるよう配慮している。なお、要素数は30813である。

## 2.5 解析の手順

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。

### ② 動的解析を実施する。

本解析では以下に示す2種類を入力加速度として加振し、時刻歴応答解析を実施する。

#### (1) 正弦波加振

竹本らの研究<sup>11)</sup>によって得られた本SUSタンクのパ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-3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。

#### (2) 熊本地震(前震)益城NS波

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観測されたNS波を入力加速度として図-4に示す波形で加振する。この加速度は、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より取得した。

加振方向角に関しては、図-5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方向に分けて加振させ、それぞれ解析を行う。

## 2.6 減衰の設定

構造物の振動エネルギーは、材料内部の分子摩擦による減衰、接合部等における摩擦減衰、空気や水、油などの中での振動により生ずる粘性減衰、構造物の振動エネルギーが地盤等の外部へ逸散する減衰、非線形材料の履歴エネルギー吸収による履歴減衰等によって消散される。これらの減衰を個々に厳密に評価することは困難であるため、直接積分法による非線形時刻歴応答解析を行う場合は、一般に減衰は速度に比例する粘性減衰により近似し、材料や部材ごとに減衰定数としてモデル化するのが通常である。減衰の評価方法には種々のものが提案されており、本解析では多用されている式(4)に示すRayleigh減衰Cを用いて、自由表面部分の要素に減衰を与えることにする。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

ここで、Mは質量行列、Kは剛性行列をそれぞれ表す。このとき、構造の固有円振動数 $\omega_i$ における減衰比 $\xi_i$ は式(5)のように表すことができる。

$$\xi_i = \alpha / (2\omega_i) + (\beta\omega_i) / 2 \quad (5)$$

よって、 $\alpha$ と $\beta$ は2つの次数の固有振動数と減衰定数から定めることになる。本解析では、スロッシング1次及

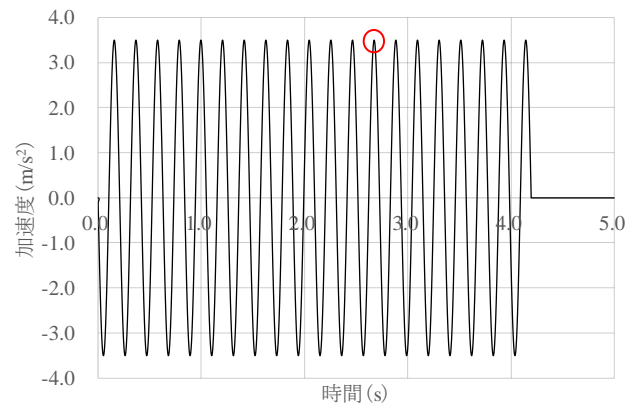


図-3 正弦波(4.77Hz)の加速度波形

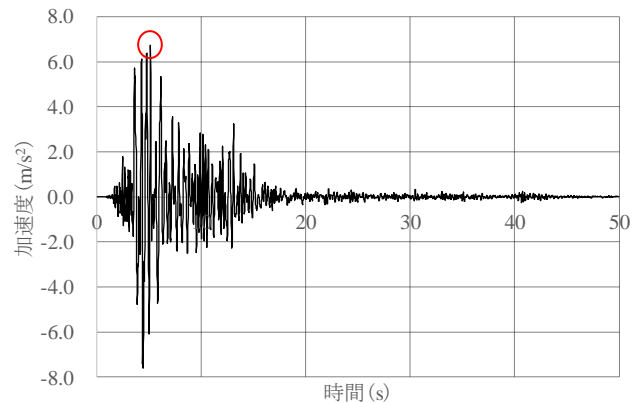


図-4 熊本地震(前震)益城NS波の加速度波形

びパルジング1次の固有円振動数を用いることとする。実際の入力に際しては、本論では吉原<sup>15)</sup>の実験式(6)から壁面の減衰定数を算出しRayleigh減衰の形で与える。

$$h_i = 0.312f_i \quad (6)$$

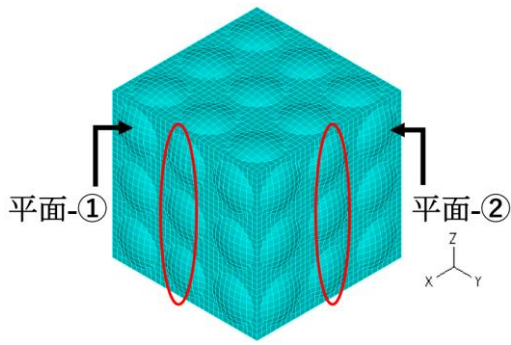
ここで $h_i$ は減衰定数(%),  $f_i$ は $i$ 次固有振動数(Hz)であり、具体的にはパルジングの1次モードとして固有値解析結果から得られた値を使用する。式(6)で求めた減衰定数より式(5)における $\alpha$ ,  $\beta$ を算出する。本解析では、 $\alpha=0.084737$ ,  $\beta=0.0009$ とする。

## 3. 解析結果

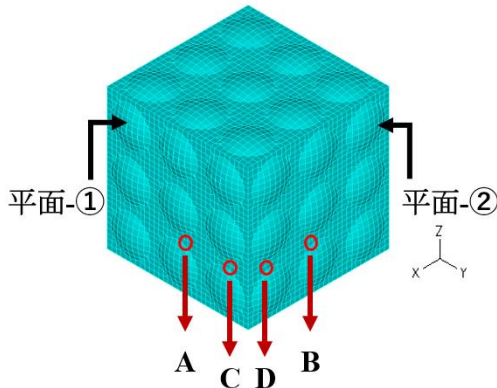
### 3.1 データ取得点

正弦波ならびに地震波の2種類の解析結果より、図-5に示す測定位置から変位、応力をそれぞれ算出する。ここで図-5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-5(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。

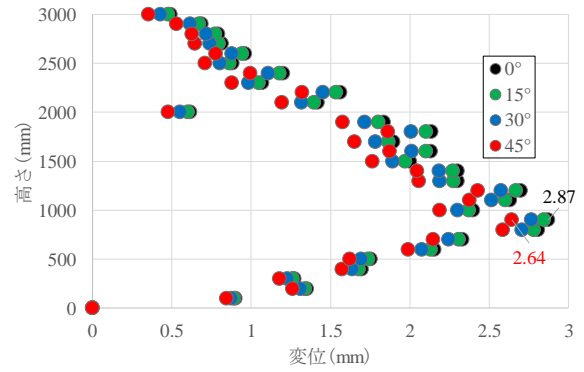


(a) 変位

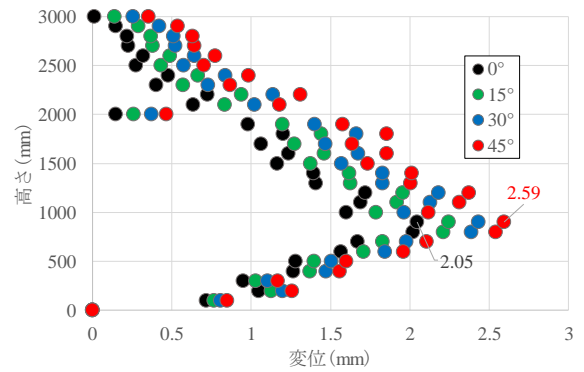


(b) von Mises 応力

図-5 座標系と各項目の測定位置



平面-①



平面-②

図-6 加振方向角別の壁面最大応答変位 (正弦波  $t=2.675s$ )

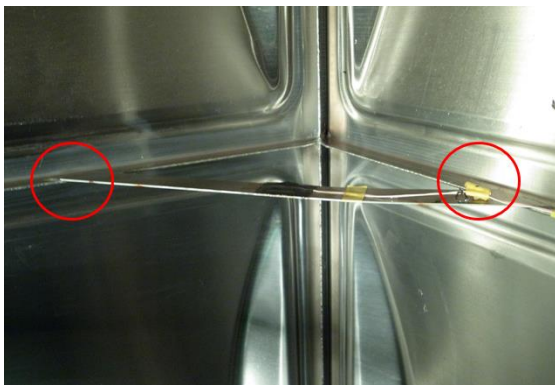
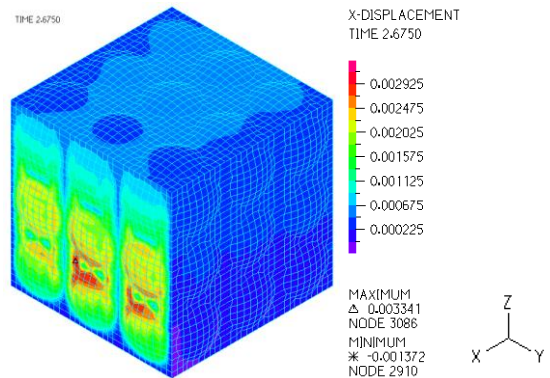
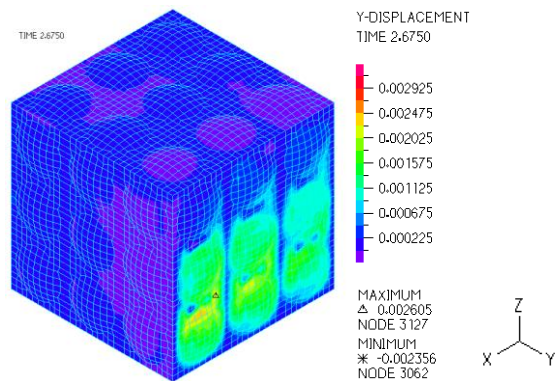


写真-1 同規模 SUS タンクにおける隅角部補強材の溶接部分

応力については von Mises 応力とする。竹本らの研究<sup>1)</sup>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。ここで写真-1 は本解析で扱う SUS タンクと同規模なタンクにおける隅角部の斜め補強材の溶接部分を参考のために示す。写真-1 に示した範囲においては、斜め補強材がパネルの継ぎ目に溶接されていること、さらに平板で構成されていることがわかる。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。

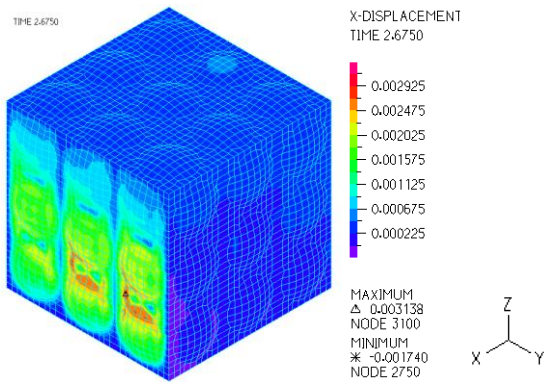


平面-①(x軸方向)

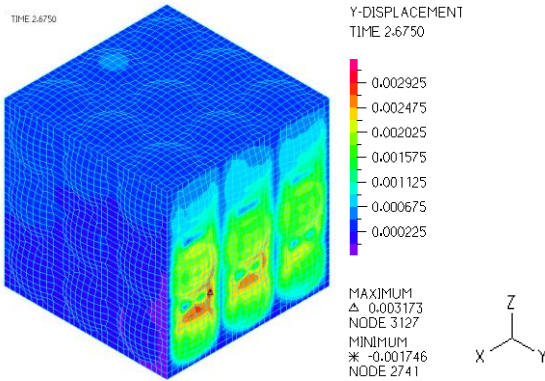


平面-②(y軸方向)

図-7 正弦波加振時の変位分布(加振方向角  $0^\circ$   $t=2.675s$ )



平面-①(x軸方向)



平面-②(y軸方向)

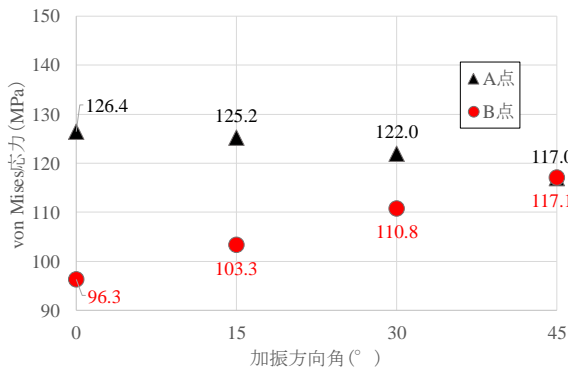
図-8 正弦波加振時の変位分布(加振方向角 45° t=2.675s)

### 3.2 正弦波(4.77Hz)

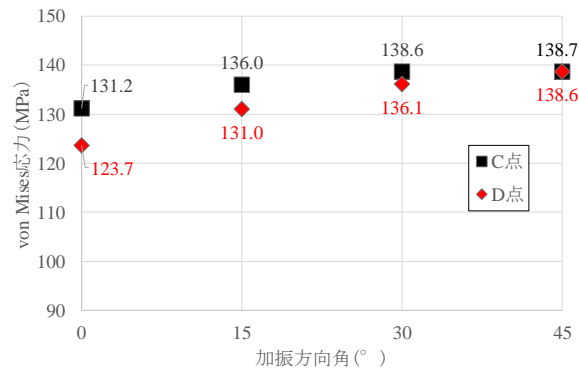
4.77Hz 正弦波加振時の各平面において、一定時間加振させた後、変位が定常状態となったと考えられる図-3に示す加振時間  $t=2.675s$  時の加振方向角別の壁面最大応答変位を図-6に示す。ここで平面-①の高さ 900mm の位置で最大値となり変位は 2.87mm である。平面-②に関しては、加振方向角の増加につれて変位が徐々に大きくなっている。また加振方向角 45°時で各平面の最大変位は、ほぼ同じ値をとっており、高さ 900mm の位置において、平面-①では 2.64mm、平面-②では 2.59mm である。よって加振方向角 0°時にバルジング振動の影響を最も受けていることがわかる。

ところで、各平面において高さ 1000mm、2000mm の位置で変位が他の周辺の節点に比べて小さくなっている。この部分は高さ 1000mm の位置が 1 段目と 2 段目、高さ 2000mm の位置が 2 段目と 3 段目のパネル溶接部分であることから、ここでは内側にフランジがあるので変位を抑えるような構造となっていることが理由として考えられる。

加振時間  $t=2.675s$  時の平面-①及び平面-②で x 軸方向、y 軸方向それぞれに関する変位分布を加振方向角 0°、45°に分けて図-7、8 に示す。これらより加振方向角の増加につれて平面-①の変位が小さくなるのに対し、平面-

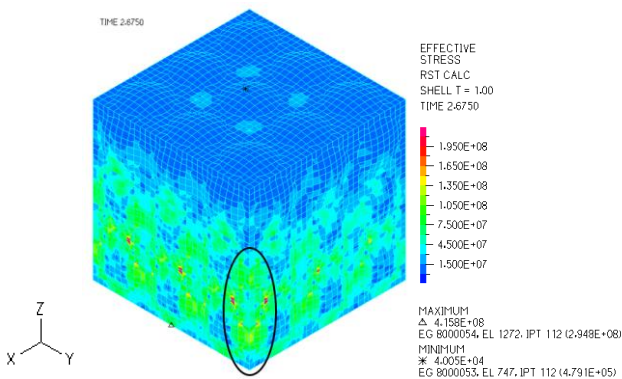


(a) A, B 点

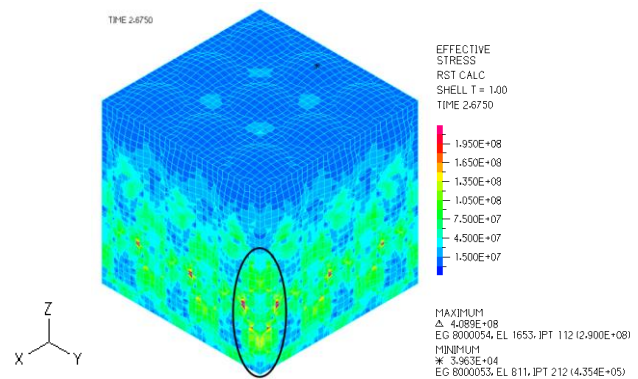


(b) C, D 点

図-9 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-10 von Mises 応力分布図(正弦波 t=2.675s)

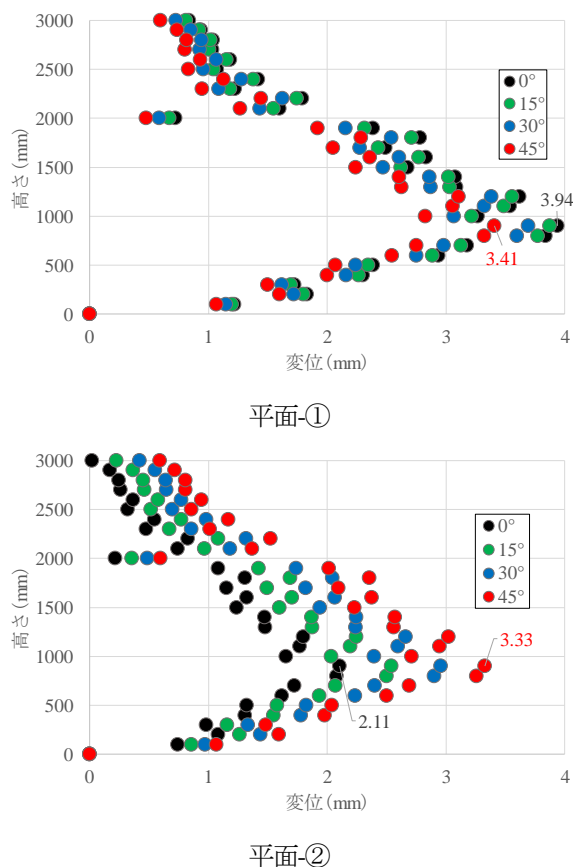


図-11 加振方向角別の壁面最大応答変位  
(熊本地震  $t=4.77s$ )

②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れて平面-①の変位が平面-②に移行していると考えられる。

次に図-5(b)に示す各測定点における壁面での最大応力を図-9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点における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  $0^\circ$  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  $45^\circ$  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  $0^\circ$  で131.2MPa,  $45^\circ$  で138.7MPaである。ここで、加振方向角  $45^\circ$  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-10に加振時間  $t=2.675s$  時の von Mises 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、それぞれの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。

### 3.3 熊本地震(前震)益城 NS 波

熊本地震加振時の各平面において、加振時間  $t=4.77s$  時の加振方向角別の壁面最大応答変位を図-11に示す。これは、図-4に示す熊本地震(前震)益城 NS 波の加速度の最大値を示している時間である。ここで、正弦波加振時と同様に平面-①の高さ900mmの位置で加振方向角  $0^\circ$  で変位が最大となり3.94mmである。変位に関しては加振方向角の増加につれて、平面-①は変位が小さくなり、平面-②は変位が大きくなっている。これは、図-6に示す正弦波加振時の壁面最大応答変位と同様の傾向である。

次に図-5(b)に示す各測定点における壁面での最大応力を図-12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点における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  $0^\circ$  においてはA点の方がB点より60%程度大きいものに対して、加振方向角  $45^\circ$  においてはほぼ同一の値であり、A点では145.7MPa, B点では145.8MPaを示している。

また、C, D点の応力の差は、加振方向角の増加につれて10%程度の応力増加が見られ、この差はA, B点の応力の差よりも小さいことがわかる。この時のC点は、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、166.5MPaから179.2MPaである。ここでは加振方向角  $30^\circ$  時の値がわずかではあるが最大となっていることに対して、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おらず、応力に関しては正弦波加振時と同様の傾向が見られる。

図-13に加振時間  $t=4.77s$  時の von Mises 応力分布を加振方向角  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  のそれぞれを示す。これらも正弦波加振と同様に、図中に示した隅角部において応力が最も大きいレベルである赤色を示している。図-7に示す正弦波加振時の von Mises 応力分布と比較し、赤色を表示する範囲が広がっていることがわかる。

よって地震波加振においても正弦波加振同様に加振方向角に関わらず、隅角部では大きい応力が生じている。さらに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。

## 4. おわりに

本論文では、一面が3枚×3枚の奇数枚パネルで構成された3000×3000×3000mmのSUSタンクについて加振方向角を変えて正弦波、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 von Mises 応力を導出した。変

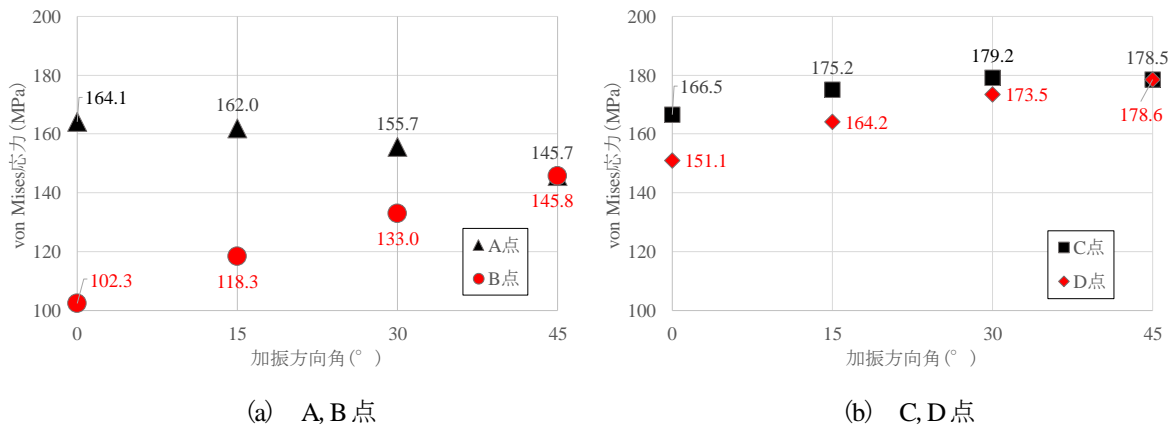


図-12 熊本地震加振時の壁面最大応力

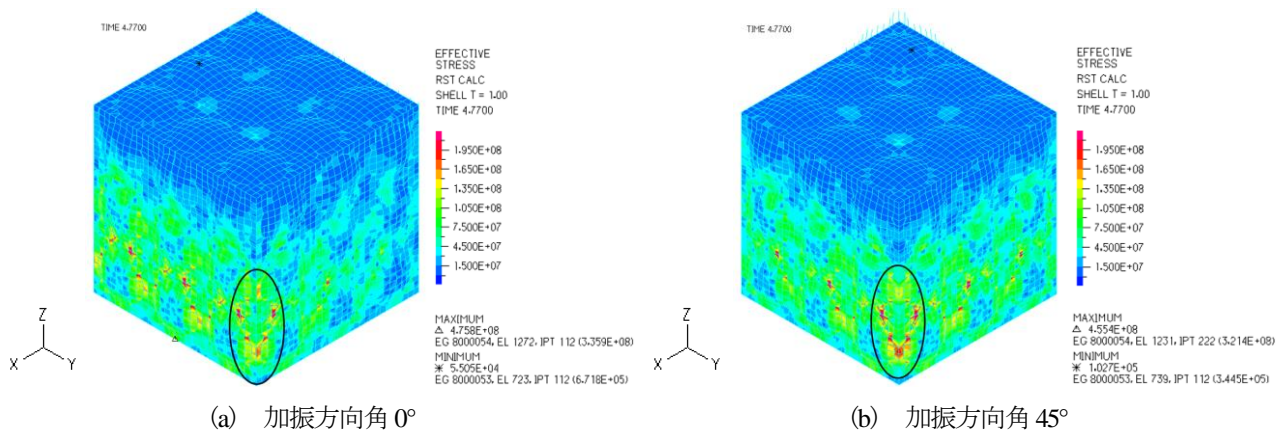


図-13 vonMises 応力分布図(熊本地震 t=4.77s)

位に関しては、正弦波、地震波加振時ともに、加振方向角 0°時において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、正弦波加振時には 2.87mm、地震波加振時には 3.94mm を示した。さらに正弦波、地震波加振時の両者の解析結果から、加振方向角の増加につれて平面①の変位は小さくなり、それに伴って平面②では変位が大きくなる傾向である。これより、変位に関しては、加振方向角 0°の時、平面①で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、正弦波、地震波加振時の両者の解析結果で各平面の壁面中心部と隅角部を比較した時に、加振方向角を変化させても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。隅角部の C 点において、正弦波加振時では 131.2MPa から 138.7MPa であり、地震波加振時では 166.5MPa から 179.2MPa である。加振方向角の増加により、von Mises 応力の値は大きくなっているがその差はわずかである。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、隅角部の C、D 点に関しては加振方向角を変化させても大きな差はない。また加振方向角 0°が変位、von Mises 応力ともにほぼ最大となるが、他の加振方向角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。

**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) (研究代表者：平野廣和) の給付を受けたことを付記する。

**REFERENCES**

- 1) 厚生労働省健康局水道課：「東日本大震災水道施設被害状況調査報告書(平成 23 年度災害査定資料整理版)」, 3.1 拠点施設の被害状況とその要因・課題, 2012.
- 2) (社)リビングアメニティ協会給水タンク委員会：東日本大震災における給水タンク調査, ALIA NEWS No.128, pp.4-9, 2012.
- 3) 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.66A, pp.137-146, 2020.[Ono, T., Enda, Y., Takemoto, J. and Hirano, H.: Damage investigation of stainless steel panel tanks in the Kumamoto earthquake and verification of damage during sloshing occurrence, *Journal of Structural Engineering of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.66A, pp.137-146, 2020.]
- 4) 坂井藤一, 迫田治行: 大型液体タンクの地震応答に関する研究, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.623-650, 1975.[Sakai, F. and Sakoda, H.: A study on earthquake response of large-sized liquid-filled tanks, *Proceedings of Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.4, pp.623-630, 1975.]
  - 5) 岡田統夫, 坂井藤一, 迫田治行: 有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析, 川崎重工技報, No.59 & 61, 1975. & 1976.[Okada, M., Sakai, F. and Sakoda, H.: Earthquake response analysis of large-sized liquid-filled tanks by finite element method, *K.H.I. technical review*, No. 59 & 61, 1975. & 1976.]
  - 6) 箕輪親宏, 清水信行, 鈴木純人: 長方形ステンレスパネル水槽の振動台実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.668, pp.1056-1063, 2002.[Minowa, C., Shimizu, N. and Suzuki, S.: Shaking table tests of rectangular stainless steel panel water tanks, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers. C.*, Vol.68, No.668, pp.1056-1063, 2002.]
  - 7) 箕輪親宏: スロッシングインパクトを考慮した長方形水槽の耐震性に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, 2004.[Minowa, C.: Research on seismic resistance of rectangular water tank considering sloshing impact, *Tokyo Institute of Technology dissertation*, 2004.]
  - 8) 塩野谷遼, 平野廣和, 井田剛史, 河田彰: 実機貯水槽を用いたバルジング振動に関する振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.404-411, 2017.[Shionoya, R., Hirano, H., Ida, T. and Kawata, A.: Vibration experiments on the bulging vibration of real scale water tank, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structural and Earthquake Engineering)*, Vol.73, No.4, pp.404-411, 2017.]
  - 9) 志賀典親, 小野泰介, 因和樹, 井田剛史, 平野廣和: 振動実験と数値流体解析を用いたバルジングの特徴の把握, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp.285-294, 2018.[Shiga, N., Ono, T., In, K., Ida, T. and Hirano, H.: Understanding the characteristics of bulging by using vibration test and numerical fluid flow analysis, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A2 (Applied Mechanics)*, Vol.74, No.2, pp.285-294, 2018.]
  - 10) 小野泰介, 竹本純平, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 構造形式の異なる矩形タンクのバルジング振動応答特性の比較, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp.66-74, 2020.[Ono, T., Takemoto, J., Ida, T., Hirano, H. and Sato, N.: Comparison of bulging vibration response characteristics of real scale tanks with different structural foam, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structural and Earthquake Engineering)*, Vol.76, No.4, pp.66-74, 2020.]
  - 11) 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), Vol.76, No.2, pp.153-162, 2020.[Takemoto, J., Ono, T., Hirano, H. and Sato, N.: Time history response analysis of fluid and structure for stainless steel panel tank, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A2 (Applied Mechanics)*, Vol.76, No.2, pp.153-162, 2020.]
  - 12) 渡邊尚彦, 清水咲菜, 行田聡, 青木大祐, 増井龍: 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, 第76回土木学会年次学術講演会, I-271, 2021.[Watanabe, N., Shimizu, S., Nameda, S., Aoki, D. and Masui, T.: Experimental study on the effect of the excitation direction on the bulging response of rectangular tanks, *Proceedings of the 76th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, I-271, 2021.]
  - 13) 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, 土木学会中部支部研究発表会, 2019.[Sakuma, M., Suzuki, M., Aoki, D., Bando, Y. and Nameda, S.: A study on strength of stainless steel panel tank focused on the damages of panel joint, *Annual Meeting of the Chubu branch of the Japan Society of Civil Engineers*, 2019.]
  - 14) 平野廣和, 松田宏, 長沼寛樹, 井田剛史, 樽川智一: 浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp605-613, 2007.[Hirano, H., Matsuda, H., Naganuma, H., Ida, T. and Tarukawa, T.: Study of numerical analysis FSI method for sloshing vibration of floating-roof-tank, *Journal of Structural Engineering of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.53A, pp605-613, 2007.]
  - 15) 吉原醇一, 安井讓, 角田智彦, 中村嶽: 可撓性矩形水槽の振動特性について, 大林組技術研究所報, No.20, pp17-24, 1980.[Yoshihara, J., Yasui, Y., Tsunoda, T. and Nakamura, T.: Vibration characteristics of flexible rectangular water tank, *Report of Obayashi Corporation Technology Research Institute*, No.20, pp17-24, 1980.]

(Received June 24, 2022)  
(Accepted November 30, 2022)

# THE EFFECTS OF THE DIFFERENCE IN THE ATTACK ANGLES ON THE BULGING VIBRATION FOR SUS PANEL TANKS

Kouta SHIRAI , Taisuke ONO , Hirokazu HIRANO and Naotugu SATO

Various damages to SUS panel tanks have been reported due to the earthquakes. 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  $0^\circ$ . As for the von Mises stress, the corner members are the weak points regardless of the attack angles.