

# 既存 SUS タンクによるバルジング固有振動数での時刻歴応答解析

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 設計部 (〒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、既存 SUS タンクにおけるバルジング固有振動数での正弦波による時刻歴応答解析を行う。この解析結果により von Mises 応力に関しては、長辺壁面の中央部や平板で構成される斜め補強材溶接部の隅角部で大きく応力集中が予想され、溶接部の剥離や斜め補強材の座屈の可能性があると考えられる。

**Key Words:** *stainless steel panel tank, bulging, natural frequency, time history response analysis, von Mises stress, stress concentration*

## 1. はじめに

貯水槽に発生する地震被害には、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、大きく分けて2種類あることがわかっている。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。前者の被害は、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で発生する液面揺動のスロッシングが原因である。後者の被害は、短周期 (0.5s~1s) からやや短周期 (1s~2s) 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であるバルジングが原因である。ところで近年広く使われるようになってきている複数枚のパネルで構成され、内部に補強材を有す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が発生し、様々な被害が報告されている。SUS タンクに関しては、熊本地震での著者らの現地調査<sup>3)</sup>の結果ならびに2022年福島県沖地震での現地調査<sup>4)</sup>により、同様の被害を多数確認

できている。

このように地震被害が発生するたびに、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。この背景には、スロッシングについては Housner の理論式<sup>5)</sup>を用いて設計基準が規定されているのに対し、バルジングには設計基準が無かったことが挙げられる。このため、バルジングについては、2022年4月に改訂された水道施設耐震工法指針・解説 2022年版（日本水道協会）<sup>6)</sup>で新たに規定が追加されたばかりではあるが、ここでも明確な基準は存在していない。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。

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に関しては坂井ら<sup>7,8)</sup>が、矩形の貯水槽に関する研究は、箕輪ら<sup>9,10)</sup>や著者ら<sup>11,12,13)</sup>の研究グループによる大型振動台を用いての実験が行われている。しか

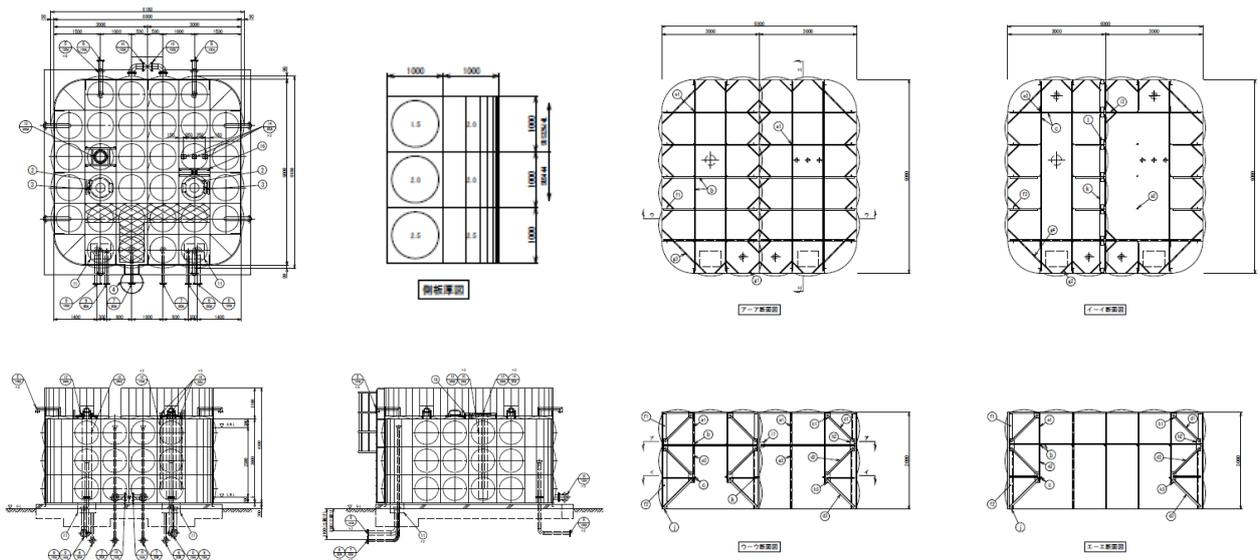


図-1 解析に用いた SUS タンクの図面

表-1 SUS タンクの諸元

材質	天井板	SUS329J4L
	側板3段目	SUS329J4L
	側板2段目	SUS444
	側板1段目	SUS444
	アニュラプレート	SUS304A
	底板	SUS304A
幅 (mm)		6000
長さ (mm)		6000
高さ (mm)		3000
有効容量 (m <sup>3</sup> )		83
水位 (mm)		2700
厚さ (mm)	側板3段目	1.5
	側板2段目	2.0
	側板1段目	2.5

し、バルジングに関する研究はこれら以外に余り行われておらず、その原因として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からであると考えられる。そこで、貯水槽をモデル化することにより、短時間かつ低費用で行うことができる構造と流体の連成解析による数値解析が希求される。

一方、齊藤らの研究<sup>14)</sup>により、室内実験段階で微動計観測装置（以下、微動計とする）を用い、簡易的に貯水槽のバルジング固有振動数を計測する方法が示されている。具体的には貯水槽の天井に微動計を設置し、壁面部分を軽く叩くことで振動を計測するものである。さらに微動計測から得られた結果と有限要素法による固有振動数解析から得られた結果と比較すると、貯水槽の壁面のバルジング固有振動数が一致し、微動計測の有用性が示されている。

そこで本論文では、既存の実機 SUS タンクにおいて齊

藤らの研究<sup>14)</sup>と同様の計測方法で得られた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、著者らの研究<sup>15)</sup>によりバルジングによる最も厳しい条件とされる、加振軸とタンク壁面が直角になる方向に加振する。これにより解析結果から得られた壁面に生ずる von Mises 応力の影響を比較し、ここで取り上げる SUS タンクのバルジングによる耐震上の問題点を明らかにするものである。

## 2. 解析概要

### (1) SUS タンクの概要

本論で扱う SUS タンクは、配水池として設置されている有効容量 83m<sup>3</sup> の二槽式の既存の実機タンクである。本 SUS タンクの図面を図-1 に示す。底板、アニュラプレートの材質は SUS304A で厚さは 2.5mm、パネル 1 段目の材質は SUS444 で厚さは 2.5mm、パネル 2 段目の材質は SUS444 で厚さは 2mm、パネル 3 段目と天板の材質は SUS329J4L で厚さは 1.5mm で構成されている。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、一槽あたり 6000×3000×3000mm の寸法のタンクが二槽あることである。配水池などで使われる一般的な SUS タンクは、年に一度の内部清掃が法令で義務付けられていることから、清掃時の給水を途切れなく確保することを目的として、内部が中仕切りのパネル（以下、仕切り板とする）で二つに分けられた二槽式構造となっている。そのため、タンク全体で見ると、槽の境目に仕切り板を有している構造となって

いる。また、このタンク内部には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おり、内部の補強材は仕切り板を境に、異なる構造となっている。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。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することになっている。

## (2) 解析手法

解析手法は著者らの既往の研究結果<sup>10</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構造と流体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構造-流体をモデル化し、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。特にバルジングを扱うことから、流体運動が活発とならないので、本解析では粒子法等を用いず、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までの範囲で解析を行うものとする。

## (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。

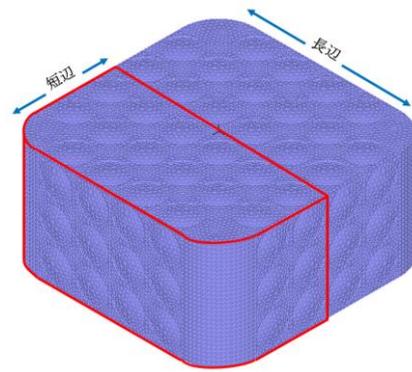
$$\dot{\rho} = \nabla \cdot (\rho \nabla \phi) \quad (1)$$

構造と流体の連成には、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。

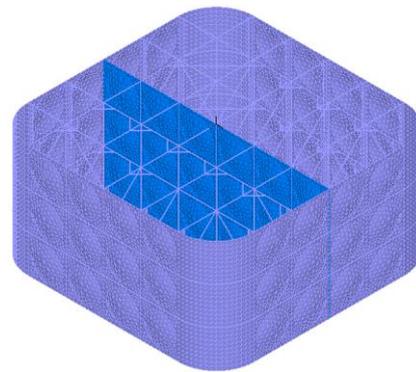
$$h = \Omega(x) - \dot{\phi} - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (2)$$

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

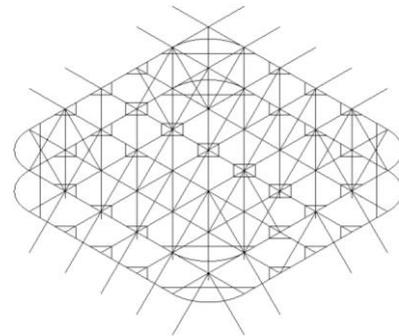
ここで  $h$  は比エンタルピー、 $p$  は圧力、 $x$  は位置、 $\Omega(x)$  は位置  $x$  の物体力加速度、 $S$  は境界、 $\delta F_u$  は、境界  $S$  上の流体圧を構造上に与える力、 $n$ 、 $u$  は方向ベクトルをそれぞれ表す。



(a) タンクモデル



(b) タンク仕切り板モデル



(c) 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

	SUS304A	SUS444	SUS329J4L
ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	1.93E+05	2.00E+05	1.96E+05
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	79.3	77.5	78.0
ポアソン比	0.3		
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	底面周りの辺、変位・回転固定		
流体水面	自由水面		
入力加速度	正弦波 (4.91Hz)		

#### (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)はタンク仕切り板モデル、図-2(c)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周りの辺の変位と回転を固定，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，要素数は著者らの研究<sup>15)</sup>の実績に基づき，水槽部は 37264，補強材部は 2627，流体部は 68344 であり，合計で 108235 である。

#### (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-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。

齊藤らの研究<sup>14)</sup>と同様の計測方法で微動計から得られた加速度をスペクトル解析した結果と，図-2 に示す SUS タンクモデルと同様の解析モデルでの固有振動数解析の結果より，本 SUS タンクの長辺壁面のバルジング固有振動数は 4.91Hz であることが得られている。そこで本解析の入力加速度については，4.91Hz の正弦波を波数 20 波の入力加速度として図-3 に示す加速度で加振する。なお，この加速度は 350Gal 程度，震度 6 弱相当である。

本 SUS タンクモデルの加振方向に関しては図-4 に示す長辺壁面と仕切り板と直角になる方向に加振する。これは著者らの研究<sup>15)</sup>より，バルジングによる最も厳しい条件とされている，加振軸とタンク壁面が直角になる方向である。

#### (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

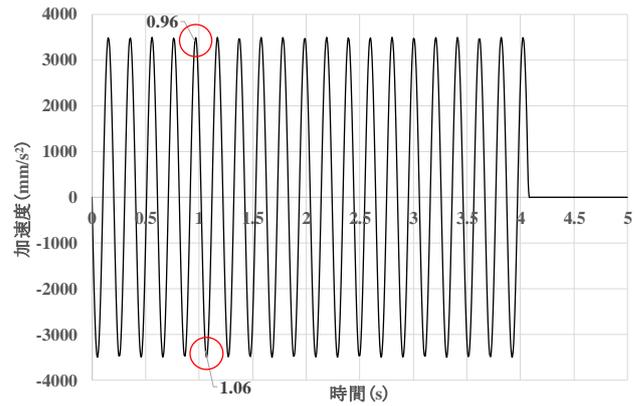


図-3 正弦波 (4.91Hz) の加速度の時刻歴

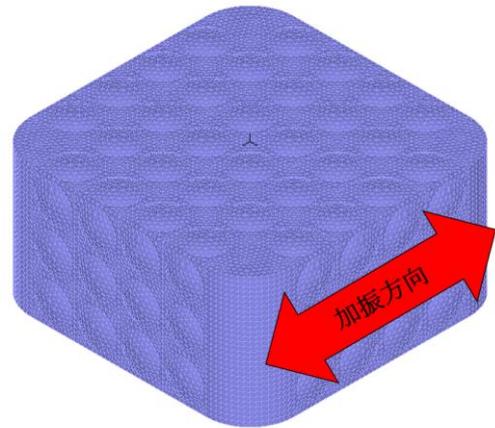


図-4 タンクモデルの加振方向

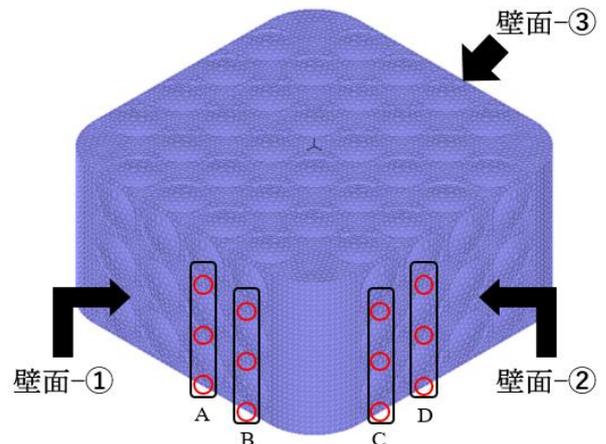


図-5 応力の取得位置

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，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 次及びバルジング 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、本論では吉原ら<sup>17)</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、具体的にはバルジングの 1 次モードとして固有振動数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、 $\alpha=0.0646$ ,  $\beta=0.0009$  とする。

### 3. 解析結果

#### (1) データ取得点

正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析結果から応力を算出し、応力については von Mises 応力とする。解析結果より、**図-5** に示す取得位置から応力をそれぞれ算出する。ここで**図-5** に示す長辺壁面の中央部の A 群、隅角部の B 群、また長辺壁面と直角にある短辺壁面でも隅角部の C 群、中央部の D 群で、それぞれ高さ 0mm, 1000mm, 2000mm の 3 点ごとに計 12 点で応力を取得する。ここでは、加振方向と直角となる A, B 群を含む壁面を壁面-①、加振方向と平行で壁面-①と直角となる C, D 群を含む壁面を壁面-②、また、仕切り板を挟んで壁面-①の反対側にある壁面を壁面-③とする。なお、A 群と D 群、B 群と C 群は隅角部を挟んで対称の位置関係である。また高さ 0mm は壁面の最下部の要素であり、高さ 1000mm はパネル 1 段目と 2 段目の接合部、高さ 2000mm はパネル 2 段目と 3 段目の接合部である。さらに、B, C 群の高さ 1000mm, 2000mm の点は平板で構成されている斜め補強材の溶接部分であり、著者らの研究<sup>15)</sup>で隅角部は、繰り返し振動することで引張と圧縮が交互に作用し、補強材の座屈やパネル同士の溶接部の剥離等の発生可能性があることがわかっている。ここで既往の研究<sup>15)</sup>より、**写真-1** に SUS タンクにおける隅角部の斜め補強材の溶接部分を参考までに示す。**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、さらに引張のみを考慮しているので平板で構成されている。

#### (2) 正弦波(4.91Hz)加振時の解析結果

4.91Hz 正弦波加振時において、各取得点における壁面最大応力をそれぞれの群ごとに**図-6** に示す。**図-6** より、

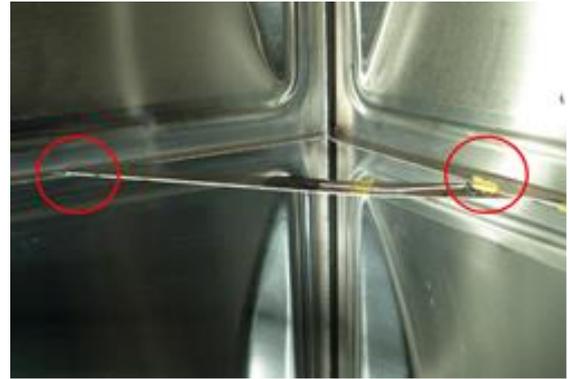


写真-1 SUSタンクにおける隅角部  
斜め補強材の溶接部分<sup>15)</sup>

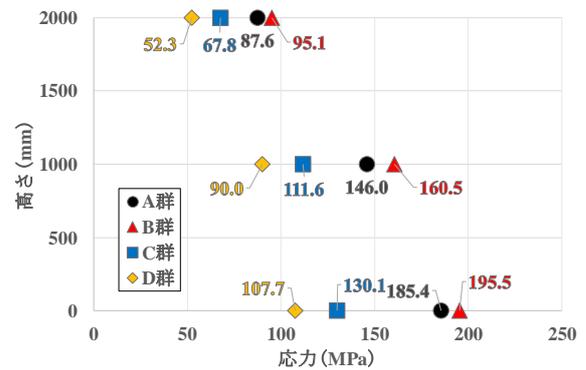


図-6 各取得点における壁面最大応力

壁面-②の C, D 群よりも壁面-①の A, B 群の方が応力は大きく、壁面-①に関して中央部の A 群よりも隅角部近傍の B 群の応力の方が、それぞれの高さの点で大きくなっていることがわかる。それぞれの群において、高さ 0mm で応力が最も大きくなっており、壁面-①の中央部の A 群では 185.4MPa、隅角部の B 群では 195.5MPa を示している。また各壁面で中央部よりも隅角部の方が応力の値は大きくなっており、B, C 群それぞれ高さ 1000mm の点では、160.5MPa, 111.6MPa を示している。なお壁面-①の A, B 群で得られた最大応力発生時の加振時刻は**図-3** に示す  $t=0.96s$  である。

次に、**図-6** で得られた壁面-①の A, B 群の最大応力発生時の加振時刻  $t=0.96s$  における応力分布図を**図-7(a)** に、また  $t=0.96s$  から 0.02s 毎にとった、 $t=0.98s, 1.00s, 1.02s, 1.04s, 1.06s$  における応力分布図を、**図-7(a)** と同様に**図-7(b)~(f)** に示す。なお、 $t=0.96s\sim 1.06s$  は**図-3** に示す通り半周期分の時間に相当する。

**図-7(a)** から、**図中** に示した壁面-①のパネル接合部や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、これらの箇所では応力集中が予想される。

**図-7(b)** についても同様に、**図中** に示した壁面-①のパネル接合部や隅角部において、分布の中で最も応力が大きい赤色を示している。

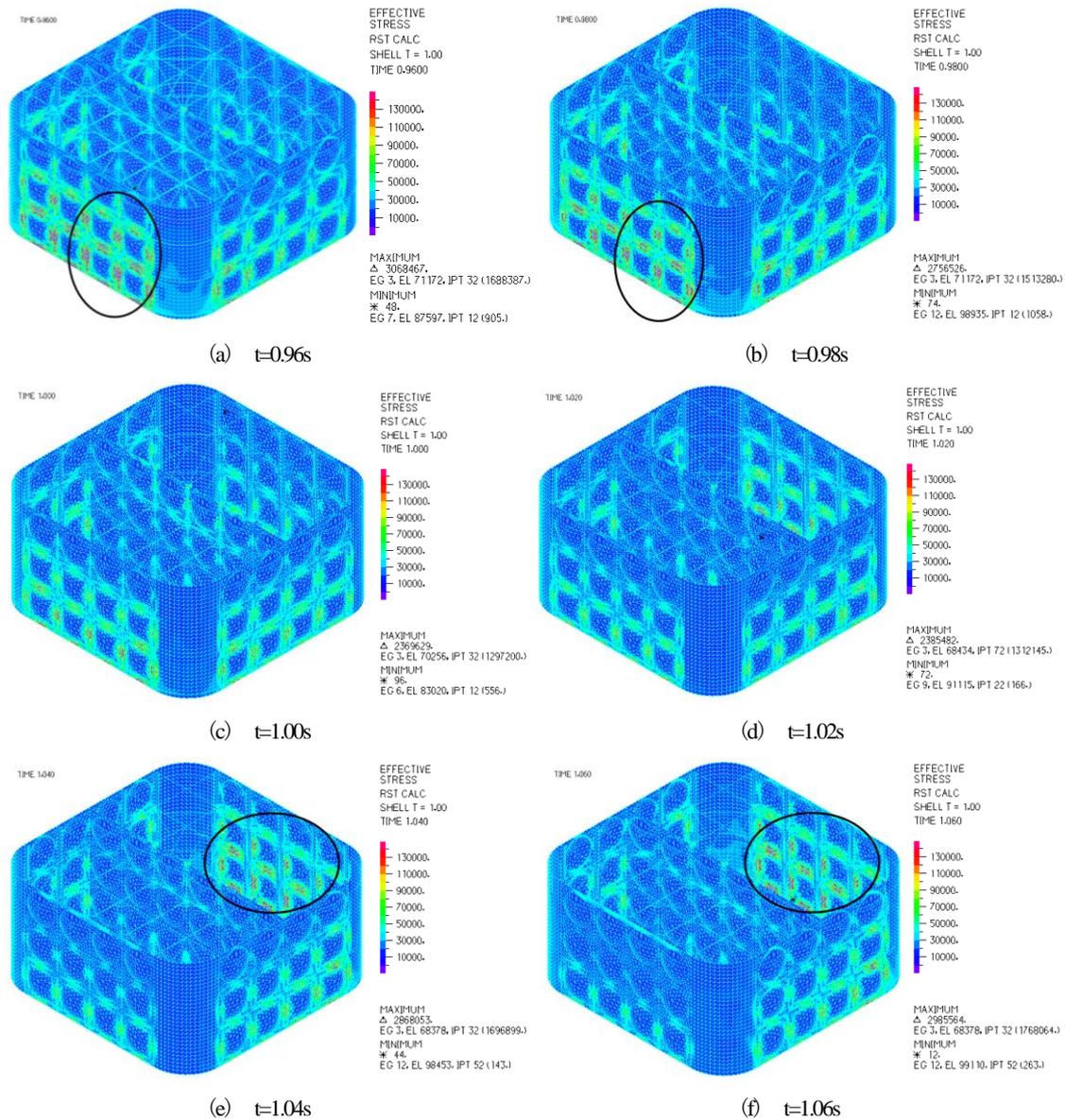


図-7 各時刻における応力分布図

図-7(c), (d)から壁面①の応力分布については図-7(a), (b)の分布と比べて、赤色を示す範囲は少なくなっている。それに対し、壁面③の応力分布に関しては分布の中で応力が低い青色から、最も応力が大きい赤色の分布を示す範囲が多くなっている。

図-7(e), (f)に関しては、壁面①の応力分布は応力が低い青色を示す範囲が多くなっており、壁面③の応力分布は応力が大きい赤色が、図中に示すパネル接合部や隅角部において示されるようになっていく。

これらのことから、加振を続けることで壁面の応力の分布で応力が大きい赤色の分布が壁面①から壁面③に変化していくことがわかる。図-7(a)~(f)の応力分布の変化と図-3の加速度時刻歴を比較すると、加速度の値が正から負になると赤色の分布が壁面①から壁面③に変化していき、加速度の値が負から正に変化していくと赤色の分布が壁面③から壁面①に変化していくことがわ

かる。この応力分布の変化が  $t=0.96s\sim 1.06s$  以外の時間においても、同様の応力分布の変化が繰り返し発生している。

また、図-8に各群における応力時刻歴をそれぞれの高さ毎に示す。図-8より、パネル2段目と3段目の接合部である高さ2000mmよりも、タンク下部の高さ0mmとパネル1段目と2段目の接合部である高さ1000mmの応力の方が100MPaを超えて推移している時間が長く、壁面①のA, B群は壁面②のC, D群と比べて、どの高さにおいても応力が大きいことがわかる。またA, B群においては、図-6で示した応力の最大値に近い大きな応力が繰り返し発生していることから、壁面①の下部では溶接部の剥離、隅角部では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が考えられる。これは壁面③においても同様のことが考えられる。

## 4. おわりに

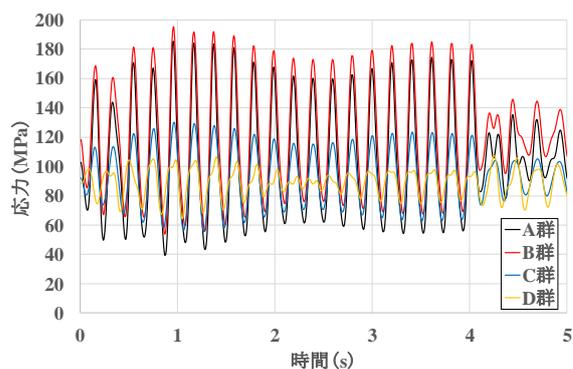
本論文では、一槽当たり 6000×3000×3000mm 寸法のタンクを二槽持つ、既存の実機二槽式SUSタンクについて微動計から得られた加速度をスペクトル解析した結果と、固有振動数解析の結果より得られた、本SUSタンクの長辺壁面のバルジング固有振動数である 4.91Hzの正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析を実施した。解析結果の von Mises 応力を長辺壁面と短辺壁面のそれぞれ中央部、隅角部の計 12点で取得した。

それぞれの壁面から得られた壁面最大応力より、短辺壁面の壁面②よりも長辺壁面の壁面①の応力の方が大きく、壁面①に関してはそれぞれの高さにおいて、中央部よりも隅角部の方が応力の値は大きくなっている。それぞれの群において、高さ 0mm で応力が最も大きくなっており、壁面①の中央部の A 群では 185.4MPa、隅角部の B 群では 195.5MPa を示している。応力分布図より、加振を繰り返すことで壁面①と壁面③の間で応力の分布の中で、最も応力の大きい赤色の分布が繰り返し変化している。さらに、各群における応力時刻歴においては、高さ 2000mm の点よりも、タンク下部の高さ 0mm とパネル 1 段目と 2 段目の接合部である高さ 1000mm の応力の方が 100MPa を超えて推移している時間が長く、A、B 群に関しては壁面最大応力に近い応力が繰り返し発生している。これらの結果から、長辺壁面の下部では溶接部の剥離、隅角部では圧縮力が作用し、平板で構成される斜め補強材の座屈が考えられる。

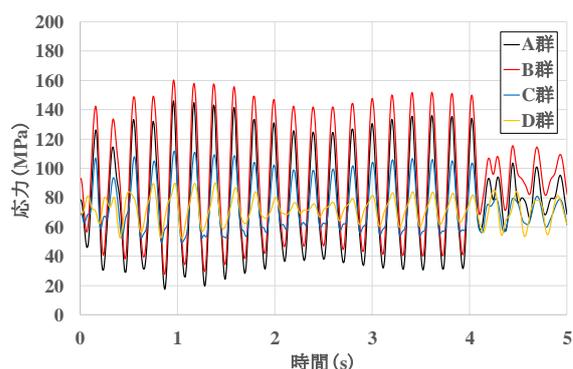
以上の検討から、本論文で取り上げた実機SUSタンクは、長辺壁面での中央部や隅角部において、共振現象によりパネル接合部での剥離や斜め補強材溶接部分における座屈の可能性があり、本SUSタンクではバルジングによる被害の発生の可能性が考えられる。その背景には大地震が発生する度に、タンクの損傷が確認されており、静的解析のみならず動的解析を含めての検討が必要であると考える。そのため、制振装置<sup>18)</sup>を取り付ける等のバルジングに関する対策が必要である。

今後の研究では、地震波を入力加速度とする時刻歴応答解析を同様に行い、正弦波加振時の解析結果との比較を行う。また、地震波加振時の解析結果から得られた von Mises 応力の結果とステンレス材の許容応力との差を比較、また応力時刻歴から応力の発生頻度を確かめることでバルジングから受ける本SUSタンクへの影響を詳細に検討することである。

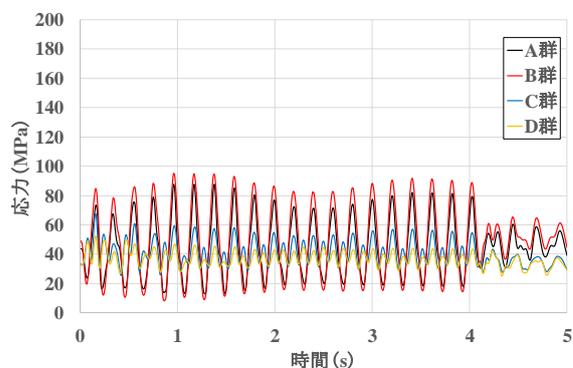
**謝辞**：本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C) (研究代表者：平野廣和) ならびに中央大学特定課題研究費の給付を受けたことを付記する。



(a) 高さ 0mm



(b) 高さ 1000mm



(c) 高さ 2000mm

図-8 各群における応力時刻歴

## 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., Take-moto, 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) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人 建築研究所, 公益社団法人 空気調和・衛生工学会 : 2022 (令和4) 年 3 月 16 日 23 時 36 分頃の福島県沖を震源とする地震による鉄筋コンクリート造等建築物および建築設備の被害調査報告, 2023.
  - 5) Housner,G.W. : The dynamic behavior of water tank, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol.53, No.2, pp.381-387, 1963.
  - 6) 日本水道協会 : 水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版, 2022.
  - 7) 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.]
  - 8) 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.]
  - 9) 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.]
  - 10) 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, *To-kyo Institute of Technology dissertation*, 2004.]
  - 11) 塩野谷遼, 平野廣和, 井田剛史, 河田彰 : 実機貯水槽を用いての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.]
  - 12) 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ての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.]
  - 13) 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.]
  - 14) 齊藤崇, 小野泰介, 池田直生, 平野廣和, 佐藤尚次 : 微動計測装置を用いた貯水槽のバルジング固有振動数の推定, 構造工学論文集, Vol.69A, pp253-261, 2023.[Saito, S., Ono, T., Ikeda, N., Hirano, H. and Sato, N.: Estimation the natural frequency of the bulging in water tank using the micro-tremor measurement device, *Journal of Structural Engineering of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.69A, pp253-261, 2023.]
  - 15) 白井航太, 小野泰介, 平野廣和, 佐藤尚次 : 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, 土木学会論文集 A2 (応用力学) 特集号, Vol.79, No.15, 22-15031, 2023.[Shirai, S., Ono, T., Hirano, H. and Sato, N.: The effects of the difference in the attack angles on the bulging vibration for SUS panel tanks, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A2 (Applied Mechanics)*, Vol.79, No.15, 22-15031, 2023.]
  - 16) 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.]
  - 17) 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.]
  - 18) 大野紗希, 小野泰介, 竹本純平, 宮本裕太, 平野廣和 : 非耐震仕様の FRP 製貯水槽を用いてのバルジング特性の把握とその制振対策の検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.4, pp.511-522, 2022.[Ohno, S., Ono, T., Takemoto, J., Miyamoto, Y. and Hirano, H.: Understanding of bulging vibration using non-earthquake resistant FRP water tank and examination of countermeasures, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structural and Earthquake Engineering)*, Vol.78, No.4, pp.511-522, 2022.]

(Received June 23, 2023)

(Accepted November 30, 2023)

# TIME HISTORY RESPONSE ANALYSIS USING THE NATURAL FREQUENCY OF THE BULGING FOR THE REAL SUS PANEL TANK

Kouta SHIRAI , Taisuke ONO , Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

Various damages to SUS panel tanks have been reported due to the earthquakes. These causes are due to the bulging. The bulging is a coupled vibration interacted the wall structure and fluid by short-period seismic motion. However, there are no design standards for bulging, and it is necessary to establish those standards. In this paper, we carried out the time history response analysis using the natural frequency of the bulging for the real SUS panel tank. This analysis clarifies the center part of the tank wall and the corner members is the weak points of the real SUS panel tank. As for the stress, peeling off occur at the welded parts and buckling occur at the corner members.