

# 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(シンポジウム講演概要) Time history response analysis using the natural frequency of the bulging for the real SUS panel tank (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

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

Naotsugu SATO, Chuo University

FAX:03-3817-1803, E-mail: a18.45tf@g.chuo-u.ac.jp

Various damages to the SUS panel tanks have been reported due to the earthquake. 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 corner members is the weak points of the real SUS panel tank. As for the stress, stress concentration and buckling occur at the corner members.

## 1. はじめに

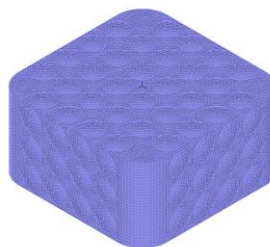
近年広く使われるようになってきているステンレス製パネルタンク(以下 SUS タンクとする)は、2011 年の東日本大震災や 2016 年の熊本地震等で短周期からやや短周期の地震動により、タンク壁面構造体と内部の流体との連成振動が原因であるバルジング現象が発生し、様々な被害が報告されている。今後貯水槽をはじめとする給水タンクの耐震性と安全性を向上させるためには、耐震設計基準が明確に規定されていないバルジング現象を解明し、基準を設定することが急務である。

齊藤らの研究<sup>1)</sup>では、ステンレス製一体型水槽における壁面のバルジング固有振動数について、微動計測装置を用いた簡易的な測定が行われた。この計測から得られたバルジング固有振動数は、有限要素解析から得られた固有振動数と一致し、微動計測の有用性が示された。

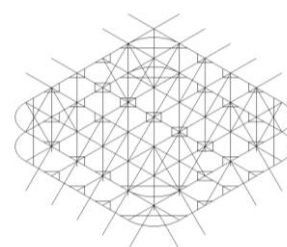
そこで本研究では既存の実機 SUS タンクに着目し、齊藤ら<sup>1)</sup>と同様の計測方法で得られたバルジング固有振動数の正弦波を入力加速度とし、時刻歴応答解析を行う。ここでの解析は、著者らの研究<sup>2)</sup>よりバルジングによる最も厳しい条件とされる、加振軸とタンク壁面が直角になる方向に加振する。これにより壁面に生ずる von Mises 応力の影響を検討することで、ここで取り上げる SUS タンクのバルジング現象による耐震上の問題点を明らかにするものである。

## 2. 解析対象 SUS タンク概要

本論で扱う SUS タンクは、配水池に設置されている有効容量 83m<sup>3</sup> の二槽一体型の実機 SUS タンクである。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り、一体となっていることである。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 SUS タンクモデルを Fig. 1 に示す。ここで、Fig. 1(a)はタンクモデル、Fig. 1(b)はタンク内部補強材モデルを示す。また Table1 に SUS タンクの諸元を示す。



(a) SUS Tank Model



(b) Reinforcement Model

Fig. 1 SUS panel tank

Table1 Tank Specifications

|                        |          |           |
|------------------------|----------|-----------|
| 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       |

Table2 Analysis Specifications

|                             | 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          |          |           |
| 流体水面                        | 自由水面            |          |           |
| 入力加速度                       | 正弦波 (4.91Hz)    |          |           |

## 3. 解析概要

本解析では、汎用有限要素解析ソフトウェアである ADINA を用いて時刻歴応答解析を行う。解析手順は、著者らの研究<sup>2)</sup>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、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時刻歴応答解析を実施する。

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。本解析では微動計測装置での計測と有限要素解析から得られた、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 の正弦波を波数 20 波の入力加速度として加振する。なおこの加速度は 350Gal 程度であり、震度 6 弱相当である。入力加速度の加振方向を

Fig. 2 に示す。これは加振軸とタンク長辺壁面が直角になる方向である。

本解析の解析条件を Table2 に示す。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している。メッシュを作成するに際し、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。ここで減衰は、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応力を算出する。応力については von Mises 応力とする。von Mises 応力の取得位置を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の図中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。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 1000mm はパネル 1 段目と 2 段目の接合部であり、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>2)</sup>で隅角部は、繰り返しの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の可能性があることがわかっている。

各取得点における壁面最大応力をそれぞれの群ごとに Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、短辺壁面の C、D 群よりも長辺壁面の A、B 群の方が応力は大きく、長辺壁面に関して中心部の A 群よりも隅角部の 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。長辺壁面の隅角部の B 群の高さ 0mm の点で応力が最も大きくなっており、値は 195.5MPa を示している。また各壁面で中心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 群それぞれ斜め補強材溶接部分である高さ 1000mm の点では、160.5MPa, 111.6MPa を示している。

次に、Fig. 4 で得られた 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 Fig. 5 に示す。これから、図中に示した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。

また、Fig. 6 に各群における時刻歴応答変位をそれぞれの高さごとに示す。Fig. 6 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、長辺壁面の A、B 群は短辺壁面の 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

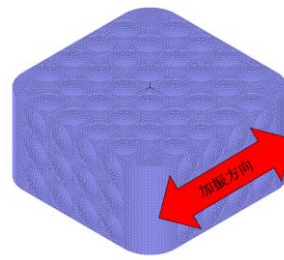


Fig. 2 Attack direction

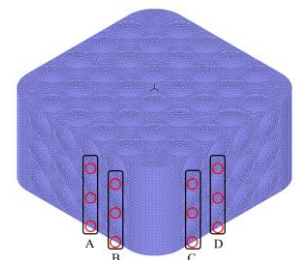


Fig. 3 Measuring point

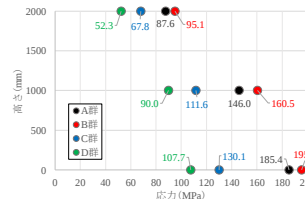


Fig. 4 Maximum von Mises stress

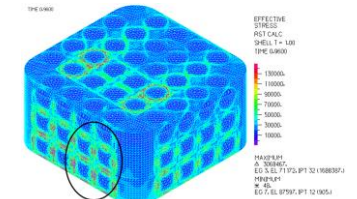


Fig. 5 Stress distribution ( $t=0.96s$ )

いては、Fig. 4 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、長辺壁面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。

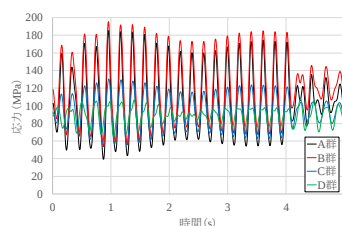
#### 5. おわりに

本論では既存の実機 SUS タンクに着目し、微動計測から得られた、長辺壁面のバルジング固有振動数の正弦波を入力する時刻歴応答解析を行い、von Mises 応力による検討を行った。解析結果から短辺壁面よりも長辺壁面に発生する応力の方が大きく、特に長辺壁面の von Mises 応力に関しては、中心部の A 群よりも隅角部の B 群の応力の方が大きくなっている。また長辺壁面の高さ 0mm, 1000mm においては、最大値に近い応力が繰り返し発生していることから、長辺壁面の下部では溶接部の剥離、隅角部では平板で構成される斜め補強材の座屈が考えられる。

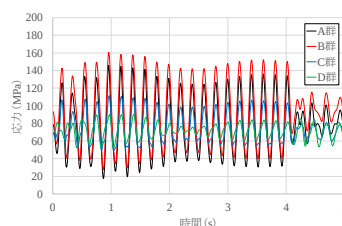
以上の検討から、バルジングに関する耐震性の検討がなされていないことで取り上げる SUS タンクは、長辺壁面の中心部や隅角部での損傷の発生が予想される。そのため何らかのバルジングに関する対策が必要であると考える。

#### 参考文献

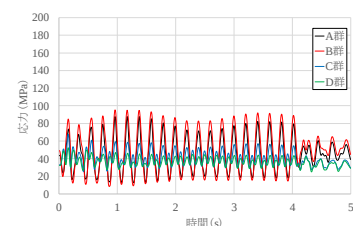
- 1) 齊藤崇他：微動計測装置を用いた貯水槽のバルジング固有振動数の推定，土木学会 構造工学論文 Vol. 69A 2023. (掲載予定)
- 2) 白井航太他：加振方向角の違いがステンレス製パネルタンクのバルジング振動に及ぼす影響，土木学会論文 文集 A2 (応用力学) 特集号 (Vol. 78, No2) ,2022.



(a) Height of 0mm



(b) Height of 1000mm



(c) Height of 2000mm

Fig. 6 Time history response displacement