

実機ステンレス製パネルタンクのバルジング発生時における時刻歴応答解析

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

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¹⁾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概ね一致し、この計測の有用性が示された。

そこで本報では既存の実機 SUS タンクに着目し、齊藤ら¹⁾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²⁾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

本報で扱う SUS タンクは、配水池に設置されている有効容量 83m³ の二槽一体型の実機タンクである。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 タンクモデルを図-1 に示す。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-1 に SUS タンクの諸元を示す。

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²⁾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行う。

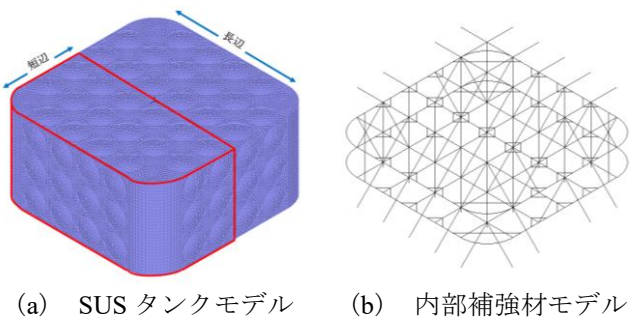


図-1 解析対象 SUS タンク

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 ³)		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

表-2 解析条件

	SUS304A	SUS444	SUS329J4L
ヤング率 (N/mm ²)	1.93E+05	2.00E+05	1.96E+05
単位体積重量 (kN/m ³)	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)		

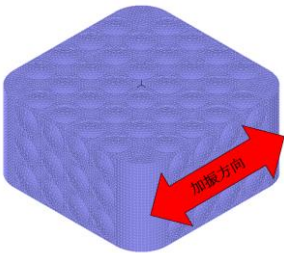


図-2 加振方向

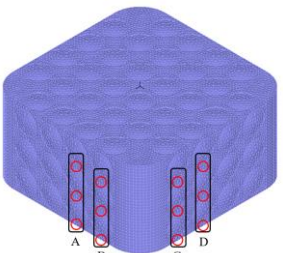


図-3 応力の取得位置

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。また、入力加速度の加振方向を図-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表-2 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し、応力については von Mises 応力とする。応力の取得位置を図-3 に示す。図-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²⁾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図-4 に示す。図-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 群それぞれ高さ 1000mm の点では、160.5MPa, 111.6MPa を示している。

次に、図-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図-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、図-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。図-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 群においては、図-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

本報では、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

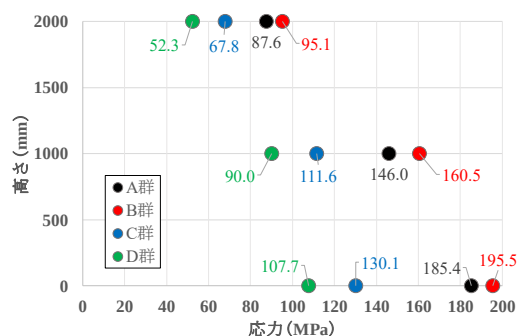


図-4 壁面最大応力

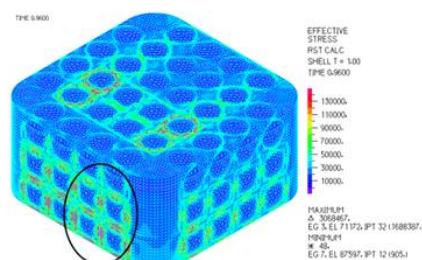


図-5 von Mises 応力分布図 ($t=0.96s$)

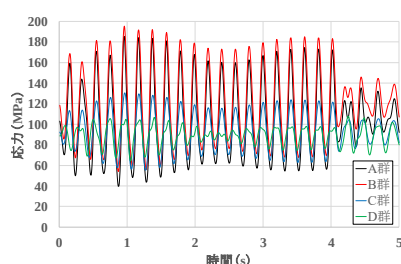
正弦波を入力する時刻歴応答解析を行い、von Mises 応力による検討を行った。解析結果から短辺壁面よりも長辺壁面に発生する応力の方が大きく、特に長辺壁面の von Mises 応力に関しては、中心部の A 群よりも隅角部の B 群の応力の方が大きくなっている。また長辺壁面の高さ 0mm, 1000mm においては、最大値に近い応力が繰り返し発生していることから、長辺壁面の下部では溶接部の剥離、隅角部では平板で構成される斜め補強材の座屈が考えられる。

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こで取り上げる 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。

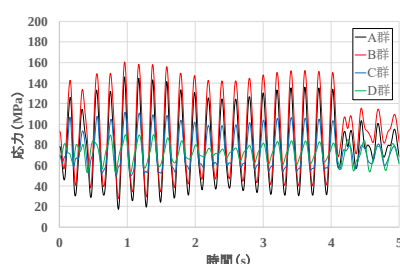
謝辞：本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

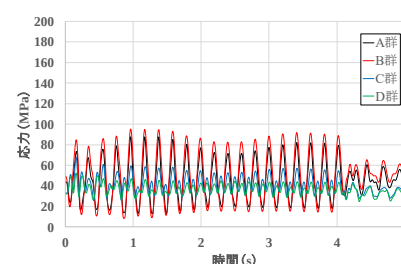
- 1) 齊藤崇他：微動計測装置を用いた貯水槽のバルジング固有振動数の推定，土木学会構造工学論文集 Vol. 69A, 2023.
- 2) 白井航太他：加振方向角の違いがステンレス製パネルタンクのバルジング振動に及ぼす影響，土木学会論文集 A2 (応用力学) 特集号, Vol. 79, No15, 2023.



(a) 0mm



(b) 1000mm



(c) 2000mm

図-6 各群における時刻歴応答変位