

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 Time History Response Analysis of Fluid and Structure for Stainless Steel Panel Tank

都市人間環境学専攻 竹本 純平

Civil, Human and Environmental Science and Engineering Course / Jumpei TAKEMOTO

Key Words : stainless steel panel tank, bulging, time history analysis, stress concentration

1. はじめに.

近年、水道施設の貯水槽として維持管理の容易さと建設時間の短縮を目的として、数多くのステンレス製パネルタンク（以下、SUSタンクとする）が設置されるに至っている。それらのSUSタンクにおいて、東北地方太平洋沖地震や熊本地震等で、最新の設計基準において、施工されたにも関わらず、SUSタンクの被害が数多く報告されている。

そこで、本論では、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 の活動の一環として検討された 3000mm×3000mm×3000mm の SUS タンクを対象とし、流体と構造を連成したタンクの時刻歴応答解析を行う。これにより地震動により SUS タンクが局所的にどのような応力を受ける可能性があるかを確認し、今後の耐震設計条件の設定で必要となる事項を検討するものである。

2. SUS タンクの被害事例と設計条件の課題

2.1 熊本地震の被害事例

バルジングの代表的な被害事例として写真-1 に示す熊本県上益城郡山都町の SUS タンク被害である。写真 2-(a)に示すようにタンク下部の被害であるので、主としてバルジングが発生したと考えられる。これを裏付けるように、写真-1(b),(c)から、パネルと流体が連成して振動を生じたことでタンク内部の補強材に生じた座屈、溶接部のクラック発生による水漏れが生じたことが確認できる。なお、これらの被害事例は、熊本地震発生前に行った実機貯水槽を用いた振動実験¹⁾²⁾、ならびに、流体と構造の連成問題であるバルジング振動応答特性を検討し振動実験と数値流体解析で再現しており、SUS タンクの典型的な被害事例である。ところで、写真-1(d)からわかるようにSUSタンクは、一度水漏れが生じると修理を行っても完全に止水することが難しいことがわかる。これはヘアークラックの様な微細な溶接部のクラックを完全把握して修理することが難しいことによると考えられる。

2.2 設計上の課題

著者らの限られた調査結果¹⁾ではあるが、熊本地震による SUS タンクの被害状況によると、少なくとも 15 箇



(a) タンク下部での被害

(b) 内部補強材の座屈



(c) 溶接部のクラック



(d) 修復後も続く水漏れ

写真-1 SUS 製貯水槽（熊本県上益城郡山都町）

所のSUSタンクで損傷等が発生し、上水道の配水池から病院施設の貯水槽まで被害が及んでいる。これは、損傷被害にあったSUSタンクが、水道施設耐震工法指針・解説に示されている最も低い「耐震性能 3」を有していなかった可能性が高いことが推定される。

このような事実関係を鑑み、日本ステンレスタンク工業会の設計指針と現状を踏まえると以下の疑問点が挙げられる。

- (1) 地震時の設計水平震度を設定する際に、必要となる角形 SUS タンクの 1 次の固有周期を円筒形タンクの算定式を用いて算出している。
- (2) レベル 2 地震時の設計震度を「水道施設耐震工法指針」方法 4 を用いて、地盤の応答解析を行わず、一義に設定している。
- (3) レベル 2 地震時の部材検討を許容応力度で検証している。
- (4) 補強部材をパネル溶接部に沿って全溶接部材で設置しているが、これを全てトラス構造として扱って設計をしている。

これらの疑問点を含めた上で、現行のSUSタンクの耐震設計基準が妥当であったか否かを再検討することが必要であると考える。

3. 解析条件

3.1 SUSタンクの特徴

SUSタンクの内部構造は、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。SUSタンク壁面パネルの板厚が他の材料のタンクと比較して薄いのでこの部分の剛性が低いこと、さらに全溶接構造なので溶接長が長いなどの特徴を有している。ここでタンクの諸元を表-1に示す。またタンクの水位は、通常使用されている水位(通常設定水位)と同じである内容量90%の水位2,700mmまで注入する。

3.2 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に示す。ここで図-2(a)はタンク本体、図-2(b)はタンク内部の補強材を示す。また表-2に解析の諸元を示す。ここで解析は、汎用有限要素解析ソフトウェアであるADINAを用いる。このソフトの特徴は、流体部のみの解析と流体問題と構造問題を一つのマトリックスで解く構造-流体連成解析が可能なことである。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行する。また拘束条件は底面4辺固定する。なお、要素数は30813である。

4. 解析結果

4.1 時刻歴応答解析

(1) 4.77Hz 正弦波加振

固有振動数解析より得られたバルジング固有振動数である4.77Hz³⁾での正弦波加振を行う。

図-2に本解析で得られた壁面の変位方向の関係を示す。ここで(a)はX軸に垂直な壁面がX軸に対して正方向に変位している時のモード図であり、(b)はX軸に垂直な壁面がX軸に対して負の方向に変位している時のモード図である。図-8(a)より加振方向に対して垂直な壁面は膨らむ方向(以下凸側)に変位すると、加振方向に対して平行な壁面は凹む方向(以下凹側)に変位する。また(b)より加振方向に対して垂直な壁面が凹側へ変位すると、加振方向に平行な壁面は凸側に変位する。

図-3には、本解析で着目する変位量及び応力値を取得する節点を示す。

図-4にバルジング応答解析によって得られたタンクの変形モード図を時刻歴毎に示す。

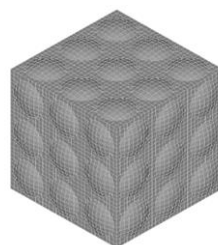
図-4(a)は初期状態を示している。図-4(b)~(f)は壁面の変位が最も大きくなったT=3.40sから0.5s間隔の変形モー

表-1 タンク諸元

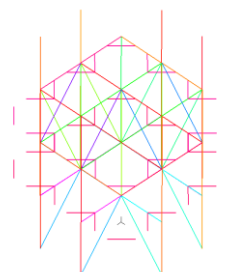
材質	SUS304
高さH[mm]	3000
幅L[mm]	3000
奥行きD[mm]	3000
水位[mm]	2700
側板1段目板厚[mm]	2.5
側板2段目板厚[mm]	2.0
側板3段目板厚[mm]	1.5
天井板板厚[mm]	1.5
底板板厚[mm]	3

表-2 解析諸元

ヤング率[N/m ²]	1.95E+11
ポアソン比 ν	0.3
単位体積重量 γ [kN/m ³]	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

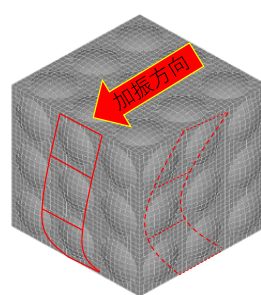


(a) タンク部

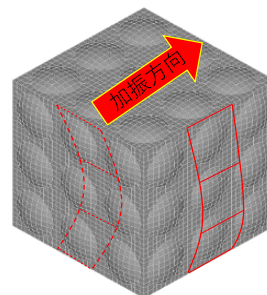


(b) 補強材部

図-1 解析モデル

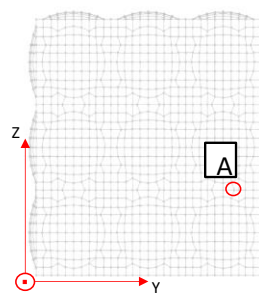


(a) 変位が正の場合

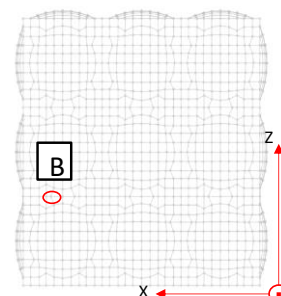


(b) 変位が負の場合

図-2 壁面変位方向の関係



(a) A点の位置



(b) B点の位置

図-3 時刻歴応答解析データ取得点

ド図である。A点、B点周辺に着目すると、T=3.40s~3.50sにかけてA点は+側(凸側)へ変位し、B点は-側(凹側)へ変位している。

図-5にA点の加振方向の変位及びB点の加振方向に対して垂直方向の変位を示す。A点の最大変位は-0.49mm、B点の最大変位は+0.35mmとなっていることがわかる。なお、加振直後の変位は、衝撃によるものと考えられるため、第1波を除いたものを参考としている。

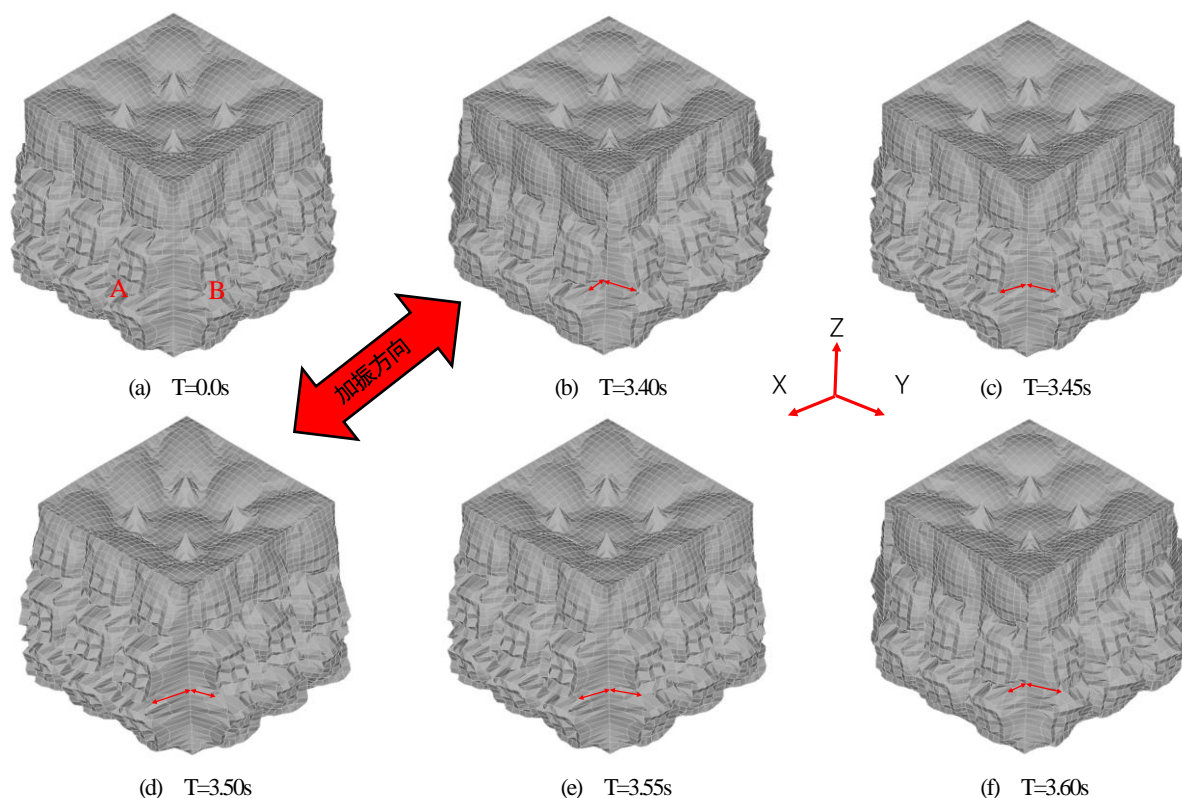


図-4 時刻歴応答変形 (4.77Hz, バルジング固有振動数)

ここで A 点と B 点に着目すると、加振方向垂直の壁面が、+側（凸側）へ変位すると、加振方向に平行な壁面は、-側（凹側）へ変位しており、位相差が生じている。この部分は、斜め方向に平板の補強材が溶接されている部分であり、設計上は静的な荷重しか考慮していないので、圧縮力は作用せず引張力のみ作用することになっている。これは、写真-1(b)の内部補強材の座屈が示唆する圧縮応力の発生を裏付ける結果となっている。この結果より、本来引張力のみ考慮しての設計で、かつパネル内側面のみ溶接されている隅角部に繰り返し引張と圧縮が作用することで、タンク隅角部の溶接部分が裂けることになった可能性が高いと考えられる。ここでの事例は、東日本大震災や熊本地震において被災した SUS タンクの被害状況と一致している。

(2) 熊本地震（前震）益城 NS 波

入力波を熊本地震（前震）益城での NS 波として時刻歴応答解析を実施する。図-6 に時刻歴応答解析により算出した A 点の加振方向の変位及び B 点の加振方向に対して垂直方向の変位を示す。A 点の最大変位量は -1.41mm, B 点の変位は +0.94mm となっている。また A 点に加振方向+側に（凸側）に変位すると、B 点は一側（凹側）に変位しており、ここでも位相差が生じていることがわかる。

次に図-7 に水平補強材取り付け位置付近のミーゼス

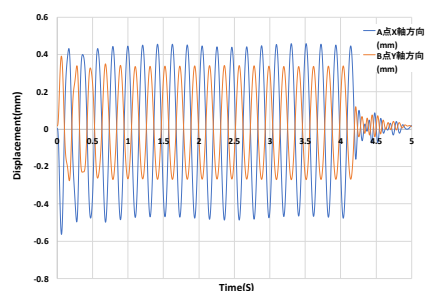


図-5 A 点・B 点の時刻歴変位 (4.77Hz)

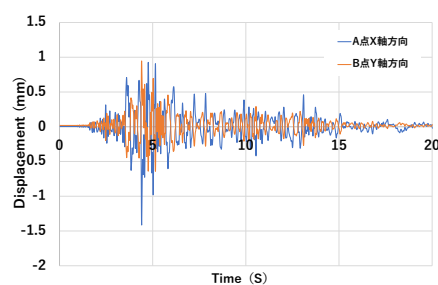


図-6 A 点・B 点の時刻歴変位量（熊本地震）

応力の分布図を示す。ここで(a)は壁面、(b)はタンク内部を可視化出来るように、タンク底面を一時的に取り外して表示し、隅角部をタンク下から覗きこんだものを示している。ここで壁面に着目すると、中央部より下部方向の応力が大きくなっていることがわかる。隅角部内側を図-7(b)において特に応力が高い赤で表示さ

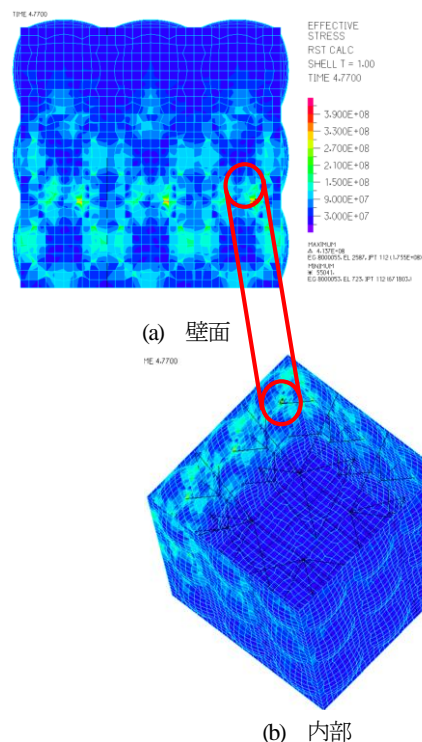
れている所は、水平な斜め方向の補強材が溶接されており、ここで応力集中が生じている。この位置は、パネル部分と補強材の接合部であり、大きな剛性差を有する部分でもある。応力値は最大で 414MPa を示しており、ステンレスの曲げ耐力が 245MPa であるので降伏強度を超えており、この部分に応力集中が生じて大きく変形が生じていると推定される。一方、東日本大震災や熊本地震においてバルジング現象が原因となり、多くの SUS タンクが破損したが、その多くは隅角部やタンク中央部より下部で損傷が生じている。このことから、本解析の結果はバルジング現象を再現できており、補強材部分での応力集中により隅角部に損傷が発生するメカニズムの説明となっていると考えてよいと思われる。

5. おわりに

本論では、SUS タンクを対象に、時刻歴応答解析を実施した。SUS タンクでは、溶接部等の部材間の剛性が異なる箇所では応力集中が発生し、溶接部分にクラック発生等の弱点となることを明らかにした。また、設計上は引張力しか考慮されていない隅角部の平板補強材において、SUS タンクの加振時の特徴の一つである加振方向とその直角方向の位相差を生じる変形モードにより、圧縮力が生じており、これが座屈の発生に繋がっていることを明らかにした。

さらに型鋼等による内部補強材により、SUS タンクの剛性を著しく上げることで、結果的にパネル部と補強材部の接合部分で大きな剛性差を生じることになるので、これが耐震補強とならない可能性があることを示した。このような現象が生じているのは、設計上静的な荷重の割増のみの照査を行っているためである。動的な繰り返し荷重を考慮する必要があると考える。

ところで、最新の SUS タンクの耐震設計基準は、FRP 水槽構造設計計算法が基本となっており、これを基にして 1995 年の阪神・淡路大震災を受けて見直しが行われ、1996年に改定版が発行された。改定内容としては、水の揺動（スロッシング）による天井部にさようする外力での破壊被害が多く見られたこと、また建物や水槽の用途・重要度に応じて、設計者やユーザーの選択によってより耐震性を高めることが出来る必要があるという認識のもと見直しがなされている。しかし、実機設計において、梁モデルでの簡易的な解析だけで設計が進められている点に問題点があると考えられる。本論の解析結果や実際の被害状況を鑑みると、動的な設計を取り入れることが必要であり、現状の SUS タンクの耐震設計基準が適正ではない可能性があると考えられる。そのため、今後の耐震設計条件に必要となる事項とし



て以下の点の検討が必要であると考えられる。

- ① スロッシング現象による液面揺動が SUS タンクの補強材に影響を与えることや、バルジング現象によるタンク主体の動きが及ぼす影響を考慮するため、動的な繰り返し荷重による照査が必要である。
- ② パネルと補強材の接合部において大きな剛性差があること、さらにこの溶接位置からクラックが生じていることから、SUS タンクにおいて補強材等で剛性を上げることが耐震補強に繋がらない可能性が高い。
- ③ バルジングにおける具体的な設計基準の明記が必要である。

今後の研究課題としては、バルジングを生じやすい構造側の条件の体系化を目指すことである。一方、既存のタンクのバルジングに対応した耐震性向上に関しても検討をする必要がある。具体的には、後付で装着可能な制振装置等を検討することである。

参考文献

- 1) 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討, 構造工学論文集 Vol.66A, 2020
- 2) 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.75, No.4, 2020
- 3) 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, 2021