

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

小野 泰介¹・竹本 純平²・井田 剛史³・平野 廣和⁴・佐藤 尚次⁵

¹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: a19.grk4@g.chuo-u.ac.jp

²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: a15.gh3f@g.chuo-u.ac.jp

³正会員 (株)十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516)
E-mail: tsuyoshi-ida@togawa.co.jp

⁴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

⁵正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail: nsato.57n@g.chuo-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震や熊本地震での矩形タンクの被害調査が行われた。天井や上部の側板が破損した事例と中心より下側の側板や隅角部が破損した事例があった。前者はスロッシングによる液面揺動に起因し、後者はタンク構造体の振動が主体となるバルジングに起因すると考えられる。そこで本研究では、同一寸法のステンレス製パネル、鋼板製一体形、FRP製パネルの三種類の矩形タンクを大型振動台に設置して振動実験を行い、構造形式の違いによるバルジング振動の違いを明らかにした。この結果、側板剛性の低い構造ではバルジングの発生が顕著であり、この剛性がバルジング振動の発生に寄与していることを明らかにした。

Key Words : *real scale tank, bulging vibration, structural form, vibration response characteristics*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震での著者らの現地調査の結果や関連の報告書^{1), 2), 3)}によると、矩形タンク(以下、タンク)に発生する被害には、大きく分けて二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であり、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る液面揺動の励起であるスロッシングが原因であるのに対し、後者はタンク構造体の振動が主体となるバルジングが原因と考えられる。同様の被害は、2016年熊本地震^{4), 5)}においても多数生じており、熊本県内においては市民生活に直結する学校、病院、集合住宅等の給水タンク及び水道局施設の配水タンクにも多くの被害が発生していることが報告されている。

井上ら³⁾の研究によれば、東北地方太平洋沖地震での給水タンクに関する広域アンケートを実施し、岩手県、宮城県、福島県、栃木県、茨城県での公立学校や病院を中心とした調査で、合計163基の顕著な被害を分析した。この内125機余りのタンクが、

高さ方向で真ん中より下側のパネルで主として破損が生じていると指摘している。このことから、井上ら³⁾はバルジングが破損の主要因であると考えられると指摘している。その結果、バルジングによる側板等の破壊がスロッシングによる天端破壊よりも4:1の比率で多いことを指摘している。同様に井上ら⁵⁾は、熊本地震における被害調査において給水タンクで21基、配水タンクで9基の被害報を入手したとしている。ここで、バルジングとスロッシングの被害比率は2:1であり、1995年兵庫県南部地震と同程度であったと論じている。このようにバルジングの被害が顕著であるので、今後タンクを初めとする給水タンクの耐震安全性を向上させるためには、スロッシングのみならずバルジング問題の解明が重要であり、かつバルジング対策をどのようにタンクの耐震設計に取り入れていくかが、一つのポイントになるものと思われる。

ところでバルジングに関する研究は、大型の石油タンク等では坂井^{6), 7)}らが中心となって行ってきたが、ここで取り上げるタンクに関する研究は、箕輪ら^{8), 9), 10)}の研究や著者ら¹¹⁾の研究グループがある他

にあまり行われていないのが現状である。そのため、バルジング対策をどのようにタンクの耐震設計に取り入れていくかが、今後タンクの耐震性と安全性向上のためには、一つの重要な課題になるものと思われる。

以上のような背景から、本論文では一般に広く使われている側板のパネル形式が異なる三種類の同一寸法のタンクを使い、大型振動台を用いて実際の地震動での振動実験を行い、バルジング振動応答特性の違いを明らかにするものである。具体的には、側板の素材によりステンレス製パネルタンク（以下、SUS タンク）、鋼板製一体形タンク（以下、鋼板タンク）、FRP 製パネルタンク（以下、FRP タンク）を用いる。入力波形は、地震波として兵庫県南部地震神戸海洋気象台で観測された加速度成分の内、NS 波成分を用いることとする。この結果、側板のパネル形式の違いで地震時の振動応答特性が異なることがわかったので、ここで論ずるものである。

2. タンクの耐震設計基準の現状

現状の各タンクの耐震設計基準は、「FRP 水槽構造設計計算法」¹²⁾に準じて作成されている。ここでスロッシングに関する項目は、タンク壁板を完全剛体と仮定し、Housner¹³⁾の式に代表されるように、タンクの流体運動を簡単な物理モデルで近似している。これを基に、矩形や円筒形に対する地震時動液圧を求めるための設計近似式が導けることを前提にしている。そのため、ここで示されている地震時の動液圧は、タンクの剛体運動に伴って生じるものであり、その結果入力加速度に比例する形となっている。

一方、本論で扱うバルジングは、側板のパネルが液体と接して振動することから、側板が弾性体として変形しながら振動することであり、流体と構造の連成振動（Fluid-Structure Interaction, 以下FSIとする）の問題として扱われている。そのために明らかにスロッシングとはその性状が異なり、複雑な挙動を示すことになる。よってこのバルジングが、設計に十分に反映されてこなかったと考えられる。

図-1 の模式図に示す様にバルジング発生時には、側板のパネルに水深方向へ大きくなる P'_w （動液圧）が水平方向に作用する。これが地震発生に衝撃力となり側板を加振することから、下部側板のパネルに損傷被害が生ずることとなる。さらに振動方向に方向角がある場合には、波が隅角部に集中することから、この部分に損傷が集中することが既にわかっている^{14), 15)}。

ところでバルジング問題は、鬼頭¹⁶⁾により接水振動などとも呼ばれたが、現在では流体と構造の連成振動である FSI の問題として扱われている。タンクの問題では、坂井ら^{6), 7), 17)}が円筒タンクの耐震の問題を FSI の観点から実験ならびに有限要素法による構造解析により詳細に検討し、初めて耐震設計用に簡明な設計式を与えた。なお、ここでの現象をバル

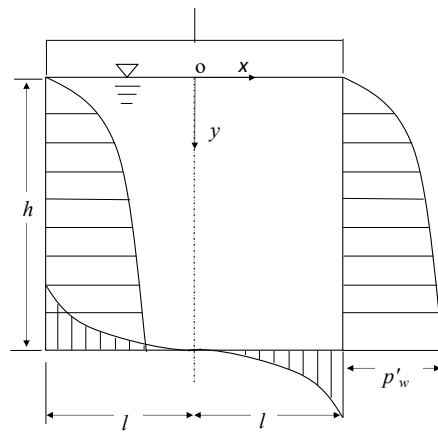


図-1 バルジング発生時の側板に生ずる圧力の模式図

ジングモードと命名したのは、坂井¹⁷⁾の研究が最初である。

このように、タンクにバルジングの被害が最近の地震でも多数発生したことから、タンクの耐震安全性を向上させるために、改めてバルジング問題の解明が緊急の課題となっている。さらにこの成果をタンクの耐震設計に反映させ、バルジング対策をどのように取り入れていくかが重要である。

3. 実験概要

(1) 使用するタンク

本研究では、一般に広く使われている側板のパネル形式が異なる三種類の同一寸法のタンクを使用する。これらを大型振動台を用いて実際の地震動での振動実験を行う。その上でバルジング振動応答特性の違いを明らかにするものである。具体的には 3,000×3,000×3,000mm の辺長タンクで、側板の素材により写真-1 に SUS タンク、写真-2 に鋼板タンク、写真-3 に FRP タンクの側板部付近とタンク内部の状況をそれぞれ示す。これらの各タンクに常用水深である 2,700mm まで水道水を満たし、振動台に固定された架台にボルトで固定した上で振動実験を行う。

ここで扱うタンクの特徴は、次の通りである。写真-1 に示す SUS タンクは、天井、上段パネルの板厚は 1.5mm、材質は SUS329J4L、底板、中・下段パネルの板厚は 2.0mm、材質は SUS444L である。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。壁面の板厚が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。

写真-2 に示す鋼板タンクは、板厚 4.5mm、材質は SS400 を使用し、内外面溶接一体のコルゲート構造になっているので、剛性を十分に有する構造である。そのため内部には補強材は無い構造となっている。



写真-1 ステンレス製パネルタンク (SUSタンク)



写真-2 鋼板製一体形タンク (鋼板タンク)



写真-3 FRP製パネルタンク (FRPタンク)

表-1 各タンクの諸元

種類	SUSタンク		鋼板タンク	FRPタンク
	天井, 上段	底, 中・下段		
材質	SUS329J4L	SUS444L	SS400	FRP
板厚	1.5mm	2.0mm	4.5mm	10mm
特徴	内部補強構造 (ジャングルジム)		補強材なし コルゲート	外部補強 内部引張材, 支柱
引張強さ	450MPa	245MPa	235MPa	103MPa
曲げ強さ	450MPa	245MPa	235MPa	204MPa
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.33
重量	約 1400kg		約 2800kg	約 1500kg

写真-3に示すFRPタンクは、全てのパネルにおいて板厚 10mm である。さらに側板のパネルの剛性を上げることを目的として、外壁部に鋼製の形鋼で補強をしている。また内部には、側板のパネルを引っ張る棒材、屋根を支える棒が立ててある構造である。以上、これらの諸元を表-1に示す。

(2) 振動装置

振動実験は、図-2に示す中央大学と愛知工業大学が共同で設置した大型振動装置にて加振実験を行う。振動台は、東西方向 4,500mm, 南北方向 4,500mm の正八角形である。加振装置は、MTS社製の 500kN アクチュエータを 2 基、制御装置は(株)島津製作所社製の 4830 形制御装置、レールおよびローラーには日本トムソン(株)のリニアローラーウェイスーパーXを使用する。

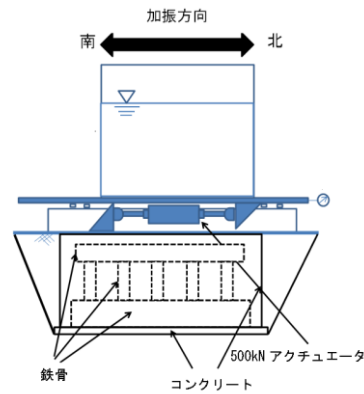
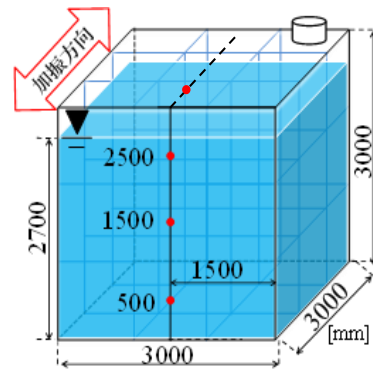


図-2 振動台模式図



● 計測機器位置

図-3 計測機器の配置位置

(3) 計測機器

三種類のタンクを検証するために、壁面の応答加速度と内容液が壁面に作用する動液圧変化を計測する。本実験で計測する応答加速度は、図-3に示すようにパネル壁面の中心に底面から高さ 500mm, 1,500mm, 2,500mm の 3 箇所で計測する。加速度計は(株)共和電業社製の小形低容量加速度変換器 AS-1GB を用いる。

動液圧変化は、加速度計と同様の 3 箇所ならびに

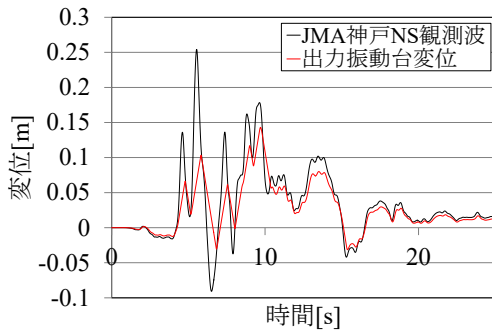


図-4 出力振動台変位

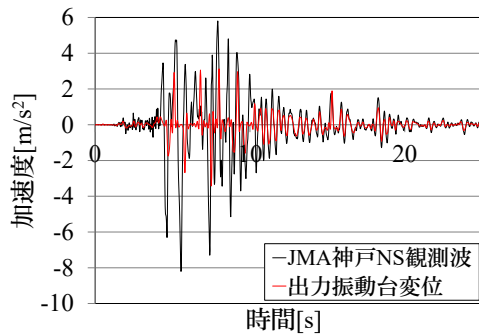


図-5 出力振動台加速度

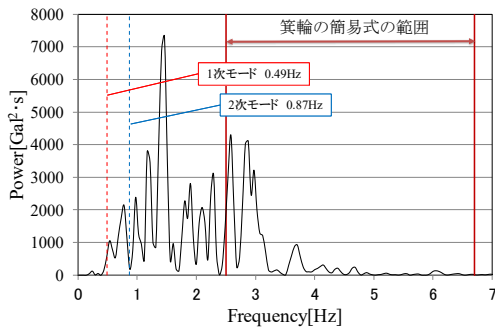


図-6 神戸波のパワースペクトル

スロッシングによる衝撃圧計測のため天井部である3,000mmの位置にも圧力計を設置する。圧力計には、(株)共和電業社製の低容量圧力変換器 PGM-G を用いる。本実験における動液圧変化とは式(1)にて示す。

$$\Delta P = P - P_0 \quad (1)$$

ここで、 ΔP は動液圧変化、 P は全圧力、 P_0 は静水圧である。すなわち、タンクに水を満たした状態をゼロとして計測することで、それぞれの圧力計の設置位置における動液圧変化を計測することができる。この方法によって、タンクの壁面に及ぼす動液圧変化に関して検討を行う。

また、データのサンプリング周波数は50Hzである。データ整理の仕方として、10Hz以上ではノイズが多く含まれ、かつタンクの応答への影響は小さいと考えられるので、フィルタリング処理を行う。

(4) 入力地震動

入力地震波には、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸 NS 方向観測波（以下、神戸波）を使用する。しかし、この観測波の入力を試みたが振動装置の能力の関係から、図-4 に示す出力振動台変位となり、最大 56%相当で加振する。また、このときの出力振動台加速度を図-5 に示す。加振方向は加速度計・圧力計のある壁面に直交に加振する。

ここで用いる神戸波の入力波形は、矩形タンク全般についてのおおよそのバルジング固有周期を把握するために、箕輪¹⁰⁾が提案した簡易式から求めたバルジングの発生周波数域（2.5～6.7Hz 程度）を有する地震波である。また、気象庁の震度算出手順¹⁸⁾に基づき算定した震度は6強程度である。

本実験では水深を2,700mmに統一して実験を行うため、水槽のスロッシング固有振動数は、1次モードで0.49Hz、2次モードでは0.87Hzである。図-6 に図-5 で示した神戸波の加速度パワースペクトルを示す。ここに、今回使用するタンクのスロッシング固有振動数1、2次モードを破線で示す。図-6 から明らかのように、スロッシング固有振動数1、2次モードと箕輪¹⁰⁾が提案している簡易式から求めたバルジングの発生周波数域（2.5～6.7Hz 程度）は異なっていることがわかる。

4. 実験結果

(1) 壁面の加速度

a) 応答加速度

図-7 に各タンクにおいて計測された壁面の応答加速度を示す。ここで SUS タンクでは、最大加速度が約 44m/s²であるのに対して、鋼板タンクは約 9m/s²程度となっており、鋼板タンクの最大加速度は SUS タンクの約 1/5 である。FRP タンクでは最大加速度が約17m/s²程度で SUS タンクと鋼板タンクの間位置する結果となっている。これは、SUS タンクの板厚は 1.5～2mm 程度のステンレスパネルの組合せで構成されていることから、元々パネルの剛性が低いので揺れやすい構造であることに起因している。さらにパネル間の接合部分に補強材が多数入っているので、高さ方向に対して剛性の低い部分と剛性の高い部分とが入り組んだ構造となっている。また、天井、上段のパネルの板厚は 1.5mm であるのに対して、底板、中・下段パネルの板厚は 2.0mm になっている。これらの上下方向に対して不均一な構造であることから、SUS タンクは、加速度計の設置位置によって計測値に違いがある結果になっている。また、内容液の移動が起振源となってパネルが振動し、加速度が高くなっていると考えられる。このことから、SUS タンクでは壁面と内容液が連成して振動するバ

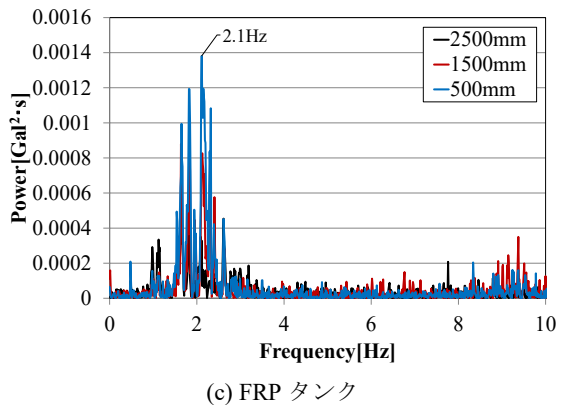
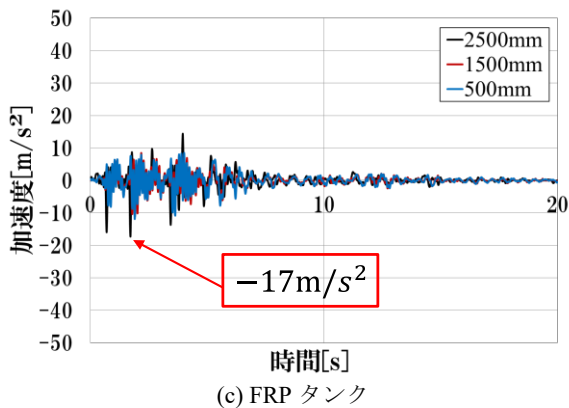
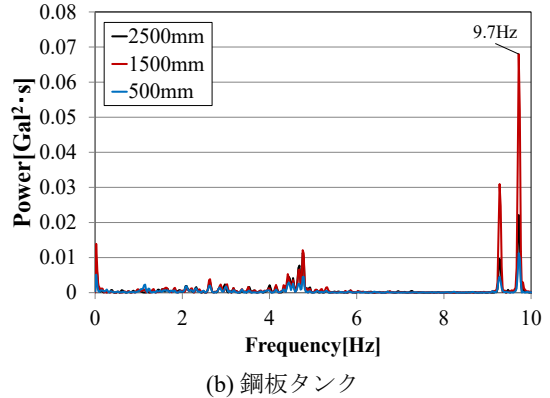
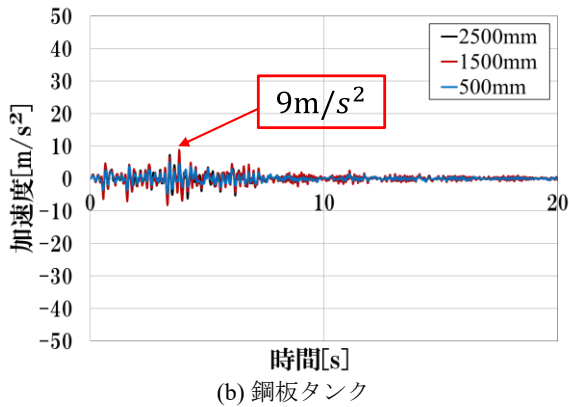
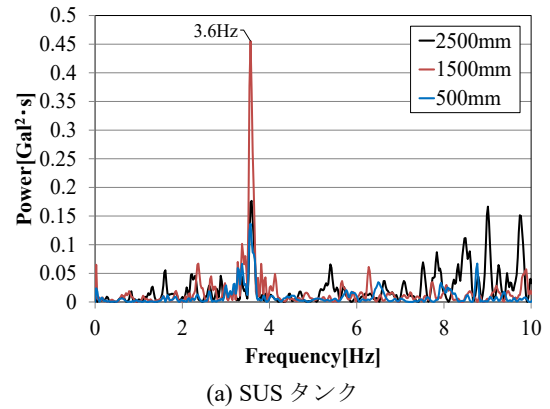
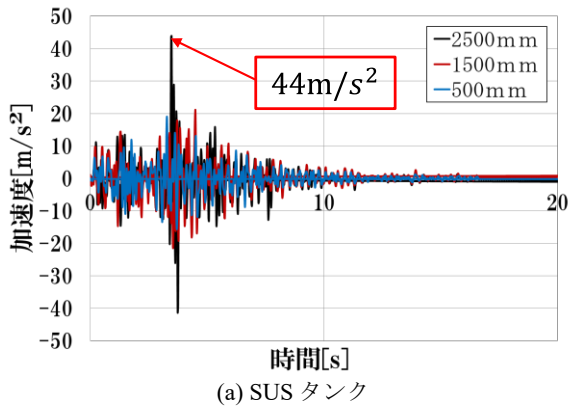


図-7 壁面の応答加速度

図-9 壁面加速度のパワースペクトル

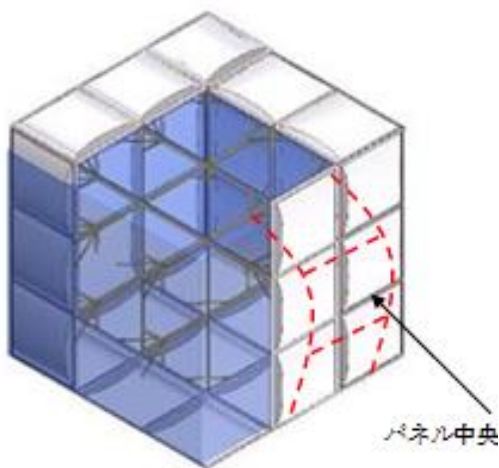


図-8 バルジング発生時のタンクの変形モード

ルジングが発生したと推定される。また、パネルの変形に着目し実験の映像より模式化すると、図-8に示すようにパネル中央が大きく変形するモードとなる。なおこの変形モードは、新井ら¹⁹⁾が行なった配水池を対象としたバルジング振動応答解析と同様なものである。

一方、鋼板タンクは、計測位置による違いは見られず、ほぼ同等の値を示している。これは、鋼板タンクは板厚 4.5mm で、かつコルゲート構造であるので側板の剛性が高く、強度が均一になっていることによるものと思われる。また、剛性が高いことで側板が振動せず、最大加速度が約 9m/s² 程度になったと考えられる。このことから鋼板タンクは、側板が振動せずバルジングが起こりにくいことがわかる。

FRP タンクでは、パネルの剛性が低いために内容

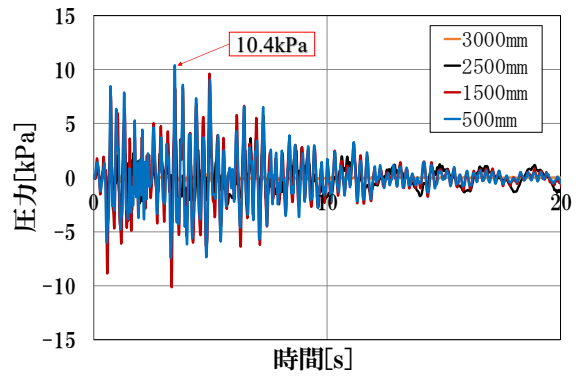
液の運動が支配的となっている。そのためパネル自体の振動のみならず内溶液の揺動によってパネルが弾性的に伸縮し、大きく変形する。一方、SUSタンクは、内溶液がパネルへ直接ぶつかる衝撃によるパネル自体の振動であるため、最大加速度が大きくなっている。そのため、FRPタンクは、SUSタンクほどに加速度が大きくならなかったと考えられる。また、図-8に示す変形モードに示す様に、縦方向に大きな変形をしているので、FRPタンクはこの部分に形鋼の外補強が入っていることから、これが変形に対して効果を示していると推察される。これらによって、同じパネルの振動によるバルジングの発生であるが、FRPタンクとSUSタンクには計測結果に違いが生じたと考えられる。

b) 加速度のスペクトル解析結果

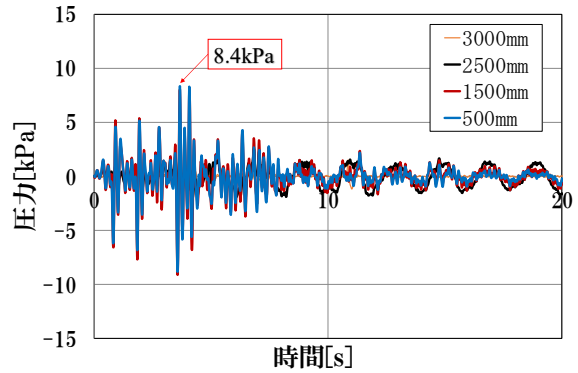
バルジング固有振動数は、箕輪ら^{9), 10)}の研究により加速度と動液圧計測から得られた壁面のスペクトル周波数であるとする。これより、壁面で計測された応答加速度をスペクトル解析した結果を図-9に示す。各タンクを比較すると、スペクトルピークがそれぞれ異なっていることがわかる。SUSタンクは、3.6Hz付近に強いスペクトルピークがあるのに対して、鋼板タンクは9.7Hz付近にスペクトルピークが存在している。またFRPタンクは、2.1Hz付近を中心としていくつかのスペクトルピークを示している。この構造形式の違いによるスペクトルピークの違いは、各タンクの側板の剛性が異なるためと考えられる。鋼板タンクは、剛性が最も高いことから高周波側にスペクトルピークを示し、SUSタンクは鋼板タンクに比べ剛性が低いために低周波側にスペクトルピークが存在する結果になった。さらにFRPタンクは剛性が低いこと、写真-3からもわかる通り上段パネルが2m×1mとSUSパネルと比較して大きいことから、最も低周波側にスペクトルピークを示す結果となった。このスペクトルピーク値の違いからも、SUSタンクとFRPタンクでは異なったパネルの振動によるバルジングが生じていることがわかる。

次に図-6に示した神戸波のスペクトルと比較すると、SUSタンクやFRPタンクのスペクトルピークは、神戸波のスペクトルピークに近い値となっているため、SUSタンクでは3.6Hz、FRPタンクでは2.1Hzでバルジングが生じ、パネルの振動につながったと考えられる。なお、著者らの研究¹¹⁾によるとFRPタンクにおいて、1.5~2.5Hz付近でバルジング振動が生じたことを掴んでいるので、本論文においてもこれを用いている。

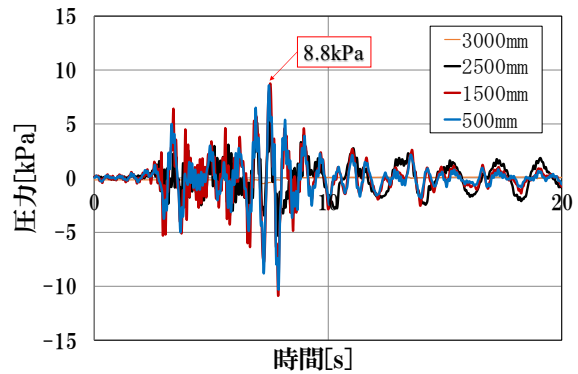
また、箕輪¹⁰⁾の簡易式で求められたバルジング固有振動数が2.5~6.7Hz程度であるため、他の地震波などが発生した場合、SUSタンクとFRPタンクの持つスペクトルピーク値では共振する危険性がある。これに対して鋼板タンクは、側板の剛性が高いことから側板が剛体に近い挙動を示す。また、数Hzの成分が卓越する地震動が多いことから、鋼板タンクは高周波側にスペクトルピークを有するので、共振



(a) SUS タンク



(b) 鋼板タンク



(c) FRP タンク

図-10 タンク壁面の動液圧変化

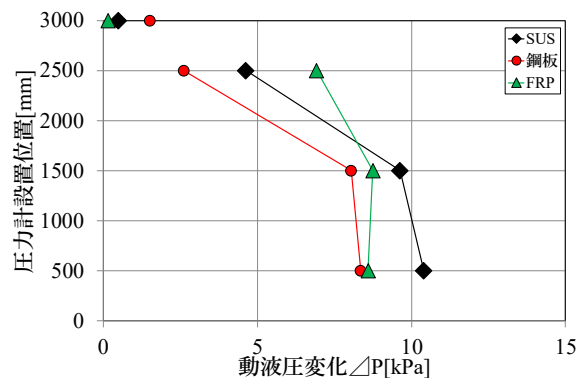


図-11 壁面の最大動液圧分布比較

してタンクが破損する危険がないと推察できる

(2) 動液圧変化

a) 内溶液による動液圧変化

図-10 は各タンクにおいて計測された壁面の動液圧変化の時刻歴波形を示す。また、図-11 に壁面の最大動液圧分布比較を示す。これらの結果から全てのタンクにおいて、最大圧力が 8.0~10.4kPa 前後の値を示していることがわかる。ここで最大圧力を計測した位置が、タンクの高さ方向の半分である 1,500mm 以下の位置で計測されている。この結果は、内溶液が起振によって水平に揺動する際に、壁面に直接作用してタンクの壁面が膨らむように変形したことによると考えられる。それぞれを 1,500mm 以下の位置で比較すると、SUS タンクの動液圧が高く、次いで FRP タンク、鋼板タンクの順となっている。また、加速度の結果からも判断すると、壁面の加速度が大きいほど動液圧も大きな結果になっている。これは、壁面の剛性が低いほど起振によって内溶液が揺動した際に大きな圧力がかかったと考えられる。これらのことから、壁面の剛性の差により、内溶液の挙動とそれに伴う壁面への内溶液の荷重としての作用する状態が異なることによると思われる。

しかし、2,500mm の位置で比較すると、FRP タンクの動液圧の値が SUS タンクの値より高くなっている。これは、FRP タンクの上段パネルが 2m×1m と SUS パネルと比較して大きいこと、また鋼板タンク、FRP タンクは材質が均一であるのに対し、SUS タンクのみ天井、上段パネルの材質は SUS329J4L、底板、中・下段パネルの材質は SUS444L と異なる材質を用いている。よって、これらの強度の違いにより FRP タンクと SUS タンクの動液圧の値が逆転したのではないかと推測する。

b) 動液圧のスペクトル解析結果

壁面で計測された動液圧をスペクトル解析した結果を図-12 に示す。これらのスペクトル結果は、図-10 の動液圧時刻歴（継続時間 20 秒間）のスペクトルであり、振動実験の加振中の成分を含んだスペクトルである。各タンクのスペクトルピークを比較すると、0.5Hz 付近のところで全てのタンクがスペクトルピークを示している。これは、タンク全体のスロッシング 1 次モード固有振動数であることから、波高がピークに達した後にスロッシング 1 次モードで揺動していたことが考えられる。

構造別に検討すると、SUS タンクでは 0.5Hz の他に 3.6Hz 付近にもスペクトルピークを示していることがわかる。この振動数は、加速度をスペクトル解析した際のスペクトルピークとほぼ一致していることから、内溶液の移動によって壁面の振動が生じていると考えられる。さらに、3.6Hz 付近で卓越しているスペクトルピークは、1,500mm と 500mm 地点での圧力計が主であることから、タンク下部では内溶液の移動により壁面の振動が生じたことがわかる。このことから SUS タンクは、バルジングが発生した

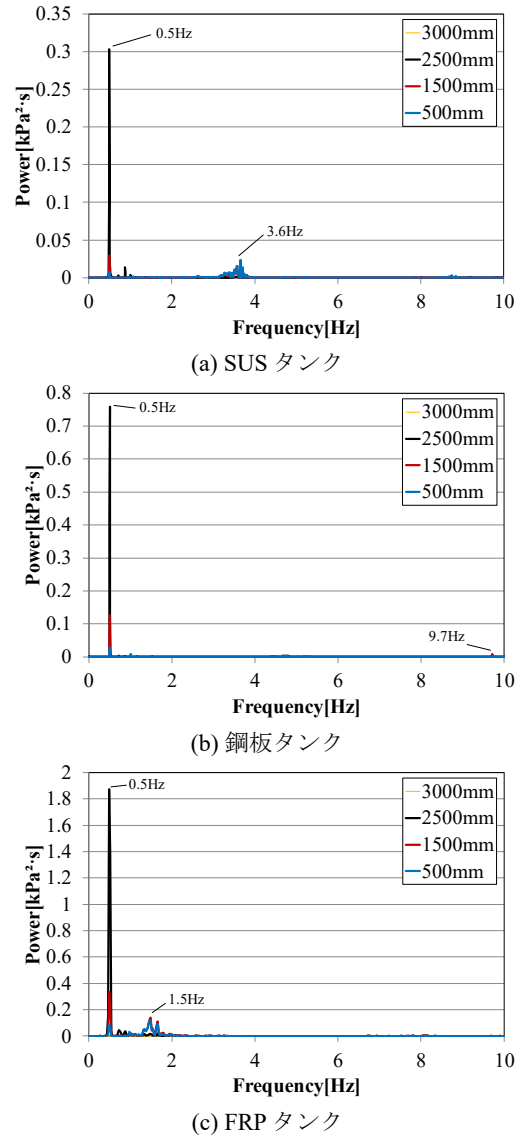


図-12 動液圧のパワースペクトル

と確認した。

次に鋼板タンクは、スペクトルピークはほぼ 0.5Hz に集中しているが、わずかに 9.7Hz にもスペクトルピークが存在していることがわかる。これは SUS タンク同様、加速度のスペクトル解析した結果と一致していることから壁面での振動が微小ながらも内溶液に影響を与えていたことが考えられる。しかし、0.5Hz でのスペクトルピークの卓越ほどではないことから、鋼板タンクではほぼスロッシング 1 次モード固有振動数で内溶液が揺動していたことがわかる。

最後に FRP タンクは、スロッシング 1 次モード固有振動数である 0.5Hz の他に 1.5Hz 付近にもスペクトルピークが存在している。これは、前述した壁面の剛性が低いことに起因していると考えられる。また SUS タンク同様、スロッシング 1 次モード固有振動数である 0.5Hz では、タンクの上部である 2,500mm でスペクトルピークが存在しているのに対し、1.5Hz 付近では 500mm や 1,500mm でスペクトル

ピークが存在している。このことから水面付近で顕著に発生するスロッシングとタンク下部で主に発生するバルジングの特徴が混在している結果となったと考えられる。

5. おわりに

本研究では、一般に広く使われている構造形式が異なる同一寸法のタンクを使い、振動台を用いての振動実験を行い、バルジング振動応答特性の違いを明らかにしてきた。この結果、タンクの構造別に比較すると、側板のパネルの剛性が大きくバルジングの発生に関与していることがわかる。

具体的には、タンクの側板での応答加速度のスペクトルピークは、FRPタンク、SUSタンク、鋼板タンクの順で低周波側に存在している。さらに、FRPタンクとSUSタンクの応答加速度をスペクトル解析した結果は、箕輪¹⁰⁾の提案している簡易式で得られたバルジング発生域周波数帯にほぼ入っていることである。

まず鋼板タンクは、側板の剛性が他の二つのタンクより高いので、応答加速度の値が小さく、側板の応答加速度のスペクトルのピークが高周波側にあることから、バルジング発生域周波数に入っていないことがわかる。このことから、鋼板タンクのバルジングに関してはここで取り上げたサイズでは安全であると考えられる。ただし、スロッシングに関しては照査をする必要があると考える。

一方、SUSタンクとFRPタンクは、鋼板と比較して側板の剛性が低いことから、応答加速度のスペクトルピークが低周波側に存在し、かつバルジング発生域周波数に存在している。これより側板の剛性の低いSUSタンクとFRPタンクでは、バルジングの発生が考えられるので、耐震設計上、バルジングに関する検討を要すると考えられる。

ところで、前述のように各タンク形式毎の最新の設計基準¹²⁾において、バルジングによる設計基準が無い状況下であるので、早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定する必要があると考える。特に側板の応答加速度のスペクトルのピークがバルジング発生域周波数に入る可能性が高い、SUSタンクとFRPタンクに関してである。これらの形式は、最新の設計基準で設計されたタンクにも多数の被害発生例が報告^{1),2),4)}されていることを鑑み、早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定することが、必要不可欠である。

今後の研究課題としては、バルジングに対応する設計基準を規定するための基礎データ収集を続けて行うこと、またデータの整理から、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。さらに、構造解析によりタンクの側壁の強度の影響等を検討していく予定である。一方、既存のタンクの耐震性向上に関しても検討をする必要がある。既存のタンクに装着可能で、スロッシング現象で効果

が確認されている著者らが提案している浮体式制振装置^{20),21)}のバルジング発生時の制振効果の確認も行う予定である。

謝辞：本研究を行なうに際し、中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻 塩野谷遼氏（現：東京都水道局）の協力を得た。元茨城大学 井上涼介先生からは、貴重な調査データの提供を受けた。ここに記して両氏に謝意を述べる。また、本研究の一部は、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（2013～2017年度設置、主査：坂井藤一氏）の活動の一環として行われたものである。最後に本研究の一部は、(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。

参考文献

- 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，2012.12.
- 2) 国立研究開発法人建築研究所：平成 28 年(2016 年)熊本地震による建築物等被害第五次調査報告（速報），2016.5.
- 3) 井上涼介，坂井藤一，大峯秀一：2011 年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 4, pp. 764-773, 2015.9.
- 4) 厚生労働省：平成 28 年(2016 年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書，2016.6.
- 5) 井上涼介，坂井藤一，大峯秀一：2016 年熊本地震における水槽被害および地震動特性との関連について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 4, pp. 711-720, 2017.9.
- 6) 坂井藤一，迫田治行：大形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，1975.11.
- 7) 岡田統夫，坂井藤一，迫田治行：有限要素法による大形液体タンクの地震応答解析，川崎重工技報，No. 59 & 61，1975.12. & 1976.6.
- 8) 箕輪親宏：長方形水槽のスロッシングインパクトー阪神大震災の水槽被害に関して，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 63, No. 612, pp. 2643-2649, 1997.8.
- 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, 2002.4.
- 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，2004.11.
- 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, 2017.9.
- 12) 強化プラスチック協会：FRP 水槽構造設計計算法（1996 年版），1996.12.
- 13) Housner, G. W. : The dynamic behavior of water tank, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol. 53, 1963.

- 14) 遠田豊, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68, No. 2, pp. 637-644, 2012.8.
 - 15) 小野泰介, 曾根龍太, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: スロッシング発生時に貯水槽壁面が受ける動液圧に関する実物実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. 168-174, 2014.9.
 - 16) 鬼頭史城: 矩形水槽壁の接水振動について, 造船協会論文集, 第 106~115 号, 1959~1963.
 - 17) 坂井藤一: 円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二, 三の提案, 圧力技術, 第 18 巻, 第 4 号, 1980.5.
 - 18) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
 - 19) 新井学, 坂本智, 平野廣和: 最近発生した地震による貯水槽被害の特徴に関して, 防衛施設学会年次フォーラム 2019, A4, 2019.2.
 - 20) 小野泰介, 曾根龍太, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 受水槽のスロッシング対策のための浮体式制振装置の開発, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2, pp. 621-629, 2015.2.
 - 21) 小野泰介, 河田彰, 井田剛史, 平野廣和, 石川友樹: 貯水槽の耐震化向上のための 8 の字型浮体式制振装置の開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 4, pp. 641-648, 2018.9.
- (2019.11.2 受付, 2020.1.17 修正, 2020.2.16 受理)

COMPARISON OF BULGING VIBRATION RESPONSE CHARACTERISTICS OF REAL SCALE TANKS WITH DIFFERENT STRUCTURAL FORM

Taisuke ONO, Jyunpei TAKEMOTO, Tsuyoshi IDA,
Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

The damage investigation of the rectangular tank by the Great East Japan Earthquake and the Kumamoto Earthquake was performed. There were cases where the ceiling and upper side plates were damaged, and cases where the side plates and corners below the center were damaged. It is thought that the former is caused by the liquid level fluctuation due to sloshing, and the latter is caused by the bulging mainly caused by the vibration of the tank structure. In this study, the same size of stainless steel, steel, and FRP made of three kinds of water tank to perform vibration experiment by installing the in large shaking table, reveal a difference of bulging behavior due to the difference in the tank structure format. As a result, in the lower structure with the side plate rigidity is remarkable occurrence of the bulging phenomenon, the rigidity we revealed that contributes to the generation of bulging vibration.