矩形アクリル製水槽を用いての バルジング振動に関する振動実験

河田 彰¹·因 和樹²·瀬戸 大輔³·井田 剛史⁴·平野 廣和⁵

 ¹正会員 (㈱十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516) akira-kawata@togawa.co.jp
²学生員 中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27) kazuki-in@civil.chuo-u.ac.jp
³学生員 中央大学大学院理工学研究科都市環境専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27) seto@civil.chuo-u.ac.jp
⁴正会員 (㈱十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516) tsuyoshi-ida@togawa.co.jp
⁵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) hirano@tamacc.chuo-u.ac.jp

貯水槽の耐震問題に関しては、東日本大震災や熊本地震の被害調査で最新の基準で設計・製作されていた貯水槽 が、スロッシング現象やバルジング現象等が原因となって損傷していることが判明している。特にバルジング現象が 原因の被害の発生が目立っている。そこで、バルジング現象を明らかにすることが希求されており、取り扱いが簡単 な小型振動台において、側壁の薄い矩形アクリル製水槽を用いて加振実験を行う。この結果、バルジング現象を再現 するとともに、スロッシング現象とは異なった特徴を示すことが掴めたので、これを報告するものである。

Key Words : bulging vibration, vibration experiment, earthquake resistant, water tank

1. はじめに

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^{1,2}によると、貯水槽に発生する被害には、大きく分けて2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る。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、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。

一方,東日本大震災の記憶も鮮明に残る中,2016年4 月14日~16日に熊本県を中心として震度7の地震が2回, 震度6強が2回発生し,余震は10月10日現在で4,081回 となっている.この地震は,活断層による直下型の地震 であり,震源が浅いことから地表面に大きな揺れを生じ させて甚大な被害を発生した.さらに,複数の活断層が 同時に動いた可能性があり,前震・本震・余震の区別が 難しい地震とも言われている.特に熊本地震では,著者 らの現地調査 ³においてスロッシングのみならずバルジ ングによる被害が多数見られたことから,バルジングに 関する検討を行うものである.

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 45らが中心となって行ってきたが、ここで取り上 げる貯水槽に関する研究は、箕輪ら⁶⁷の研究や著者ら⁸⁰ 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貯水 槽の耐震設計に取り入れていくかが、今後貯水槽の耐震 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.

このような背景からバルジング現象を明らかにするために、矩形のアクリル製水槽を用いて、取り扱いが簡単な小型振動台において加振実験を行う.この結果、バルジング現象は、スロッシング現象とは異なった特徴を示すことが掴めたので、これを報告するものである.

2. 貯水槽の耐震設計基準の現状

現状の貯水槽の耐震設計基準 %においてスロッシング は、貯水槽壁板を完全剛体と仮定し、Housnerの式 ¹⁰に 代表されるように、貯水槽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, 貯水槽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)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,設計に反映されてこなかったと考えられる.図-1 に示す模式図の様に、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水平方向の圧力 P'w(動液 圧)が作用する.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¹¹.

3. 実験概要

3.1 矩形水槽モデル

本実験は、水槽壁面の変位を計測することを主眼とし、 かつ同時に水面の状況等を可視化することを目的として いる.そのために水槽壁面の材料を透明な材料であるア クリル製とする.さらに、壁面の厚さは、通常は接着の ために 6mm 以上を必要とするが、壁面変位をできる限 り大きく得るために、接着の限界である 3mm を採用し ている.

本実験に用いる矩形水槽モデルは、外側部450× 450mm、高さ450mm、厚み3mmのアクリル製であり、水 を高さの90%である405mmまで満たしている.この水槽 を振動台にボルトで固定する.水槽壁面の変位を計測す るために振動台へ直接3台のレーザ変位計センサーを配



図-1 バルジング発生時の側板に生ずる圧力の模式図



写真-1 振動実験の状況

置する.変位計aは水槽底部から高さ方向の1/4点である 112.5mm位置,変位計bは同1/2点である225mm位置,変 位計cは同3/4点である337.5mmの位置にそれぞれ配置し ている.レーザー変位計は、(株) KEYENCE社製のIL-600を用い、データサンプリング周期は、10msである. ここで変位方向は、壁面外側を正、内側を負とする.



図-2 水槽の形状と計測機器の配置概略図

以上,振動実験の状況を写真-1 に,水槽の形状と計 測機器の配置の概略図を図-2 にそれぞれ示す.

3.2 振動条件

振動台は、(株) 十川ゴム所有の島津サーボパルサフ オースシュミレーター(EHF-JF30KNV-150-070)を用い る.

加振条件は、事前の水槽壁面のハンマリングによる打 撃試験から、壁面の固有振動数が8.0~9.0Hz付近である ことを掴んでいるので、この振動数付近を中心として設 定する.具体的には、周波数を5.0Hzから11.0Hzまで 1.0Hz刻みの7ケースとする.さらに本実験では全ての実 験状態で加速度を一定とし、7.9m/s²に設定する.また、 加振時間は同様に10秒間の一定とする.

4. 実験結果

4.1 バルジング振動時の壁面挙動

図-3 には各振動数における壁面の最大変位を,図-4 には RMS 値を示す. ここで留意すべき点として,静水 圧ですでに壁面は変位計 *a* で+3.4mm,変位計 *b* で +4.5mm,変位計 *c* で+3.9mmの変位が既に発生している. そこで,ここでは水を入れる前の状態を基準とし,その 時の変位を 0.0mm とする.また,RMS 値は加振開始の1 秒後から 9秒後までの範囲で評価をする.

図-3 に示す壁面の最大変位は、+側においては 5.0Hz から 9.0Hz にかけてほぼ直線的に変位が増加し、ここで ピークを迎えて減少傾向に向かう.これに対して-側は 7.0Hzを超えると変位が大きく増加し 9.0Hz で最大を示す. ここで、aとcは同様の値を示しているのに対して、bが 最大変位を示している.RMS 値に関しては、5.0Hz から 8.0Hz まで徐々に増加し、9.0Hz でピークを示している. 特に、タンク中心部にあたる変位計 b が最も壁面の変位 量が大きく、この傾向が顕著に現れている.この結果よ り、8.0Hz~11.0Hz の比較的広い周波数範囲にバルジン グの固有振動数があることが推測される.

図-5 にはバルジングが最も顕著に見られた 9.0Hz で加振した場合の変位計 b における時刻歴応答変位の結果を示す.加振終了後,壁面変位は直ちに減衰しており,減衰の小さいスロッシングとは明らかに異なった特徴を有していることがわかる.また,写真-2 は同条件での壁面の変形挙動を示す.これよりバルジングにより壁面の中心部を中心として膨らみながら変形して振動している様子がわかる.

4.2 バルジング振動時の水面挙動

写真-3に 5.0Hz, 7.0Hz, 9.0Hz, 11.0Hzの振動数で加振した



図-5 9.0Hz,変位計bでの時刻歴応答変位

際の水面波形を示す.振動数が低いほど波長の比較的長い明確な水面波形が見られるのに対し、振動数が高くなるにつれて表面が細かな波長の短い波形に変化していくことがわかる. 図-3 に示すように、バルジングの共振域と考えられる壁面変位が大きい 9.0Hz では、波長の非常に短い細かな波形が見られる.

このことからも、9.0Hz 付近で見られるバルジングは、 液面の大きな液面揺動が起こるスロッシングとは異なり、 表面が高周波の波で覆われる挙動を示していることが判 る.



5. 終わりに

本論文では450×450×450mmのアクリル製矩形モデルを 用いて、バルジング現象について検証を行った.その結 果,壁面変位より 8.0Hz~11.0Hz の比較的広い周波数範 囲にバルジングの固有振動数があることが推測される. これは、著者らが実施した FRP 貯水槽での振動実験[®]と 合致している.また、壁面のハンマリングにより得られ た壁面の卓越振動数がこの範囲に入っていることも掴め た.

ところでスロッシングは、固有振動数の明らかなピー ク値が存在し、かつスロッシングが発生すると減衰が小 さいことから、収束までに時間がかかることが既往の研 究¹⁰からわかっている.また、タンクの上部に大きな力 が加わるため、上部破損の原因であると考えられている. これに対しバルジングでは、壁面変位の結果より、発生 する周波数域がある幅で存在することがわかる.さらに 壁面の変位は中心部が最大を示すことから、バルジング による応答荷重は壁面下部に最も掛かり、そこで被害が 発生することが考えられる.実際に、熊本地震等でバル ジング被害があった貯水槽は、パネル式タンクでありパ ネルの最下段部分のパネルで損傷している.このことか らも最下段のパネルに負荷が掛かっていることになる.

また、貯水槽は最新の設計基準においてもバルジング による設計基準が定められていな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。特に壁面の応答加速度のスペクトルのピー クが、バルジング発生周波数域に入る可能性のあることが 懸念され、そのため新耐震設計基準とされている 1997 年 以降製造された貯水槽であっても、バルジングにより破 損被害が生じている ¹ことに鑑み、バルジングに対応し た新たな耐震設計基準を追加することが必要と考える。 最終的には、現状の震度法による静的解析ではなく、動



(a) 5.0Hz



(b) 7.0Hz



(C)9Hz



(d)11.0Hz **写真-3** 水面形状

的な設計手法を取り入れることが望ましい.

さらに貯水槽の耐震性向上の一つの提案として,例え ば免震構造の採用などが考えられる.そのため,既存の 貯水槽のバルジングに対しての耐震性向上に関する検証 を行うことが必要である.具体的には,既存の貯水槽に 装着可能で,スロッシング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^{10,13}などのバルジング 発生時の制振効果の確認を行うことである.

謝 辞

振動実験を行うに際し、中央大学理工学部都市環境学 科の学生諸君から協力を得た.ここに記して感謝の意を 表す.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

- 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) 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,第34回土木学会地震工学研究発表会,A13-639, 2014.10.
- 3) 平野廣和,井田剛史,河田彰,石川友樹:既存貯水槽の耐 震性能向上のための制振装置の開発,第7回インフラ・ラ イフライン減災対策シンポジウム講演論文,2016.12.
- 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,1975.11.
- 5) 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, 1975.12.& 1976.6.

- (6) 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.
- (1) 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.
- 8) 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.4,2017.8.
- 9) 強化プラスチックス協会:FRP水槽構造設計計算法 (1996年版), 1996.12.
- Housner, G. W. : The dynamic behavior of water tank, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol. 53, 1963.
- 11) 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.
- 小野泰介,曽根龍太,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.
- 13) 平野廣和:巨大地震に備えての貯水槽の耐震性向上の必要 性-既存貯水槽用の施工簡単かつ安価な制振装置の開発-, 給排水設備研究, Vol.31, No.3, pp.49, 2014.10.

Vibration experiment on bulging vibration using a rectangular acrylic water tank

Akira KAWATA, Kazuki In, Daisuke SETO, Tsuyoshi IDA and Hirokazu HIRANO

It has been found that the water tank which had been designed and manufactured on the latest standards for the damage investigation of the Great East Japan Earthquake and the Kumamoto earthquake was damaged due to sloshing and bulging. Therefore, in order to clarify the bulging phenomenon, in a compact vibration table easy to handle, a vibration experiment is performed using a rectangular acrylic water tank. As a result, it was found that the bulging phenomenon shows a different characteristic from the sloshing phenomenon, so we report this.