

「地震時スロッシングによる配水池内沈殿物の舞い上がり機構の解明」

神戸大学大学院工学研究科

鋤田 泰子

1 研究の背景と目的

水道システムにおいて家庭の蛇口から出る水は配水池から配水管・給水管を通じて供給されるが、配水池には浄水処理で処理しきれなかったフロック（凝集剤の添加により綿くず状のもの）や管路内の汚れが沈殿している。沈殿物が地震時にスロッシング（液面揺動）によって舞い上がれば、配水池が地震の揺れに対して安全であっても、配水池から供給される管路に濁水が混入し、安心・安全な水を供給することができなくなる。

著者らは、2022年度に模型水槽（長さ1.6m、高さ1m）の振動実験を行い、トレーサによる水流と沈殿物の舞い上がりとそのプロセス等について確認した。スロッシング固有周期をもつ正弦波による振動台実験で以下の点が明らかになった。

- ・ 水槽底部の沈殿物は水位振幅と同じタイミングで水平方向に動く。
- ・ 沈殿物の舞い上がり有無は水位に依存する。
- ・ 沈殿物の舞い上がり現象は加振後に遅れて発生し、濁度上昇は数時間継続する。

先行研究の振動実験では、画像分析、濁度分析だけであったため、物理的に評価できていなかった。また、実験方法（加振条件、実験ケース、沈殿物の状態、観測方法など）には課題が残されており、それらの課題については整理しているが、その後の実験には至っていない。

一方、2024年1月に発生した能登半島地震では、複数のステンレスパネル製の配水池や貯水槽が10基以上被災した。2007年能登半島地震において二つの配水池でステンレスパネル製貯水槽の側壁パネルが破断して以降、ステンレスパネル配水池の耐震性について着目されるようになった。配水池側面が変形するような破壊（図1）は、地震時のバルジングによるものと考えられている。バルジング現象は一般に周期0.5s以下の短周期振動により、タンク壁体と内部貯水が連成振動し、剛体移動による動水圧（剛体圧）に加えて、バルジング変形による動水圧（変形圧）が発生する現象を指している。奥能登地域の小型配水池のスロッシングの固有周期は2s程度である。2024年能登半島地震では、震源近くの観測点の多くで1~2s近くの卓越周期をもつ強震動であること、さらに継続時間が長いことが指摘されている。観測波は不規則波であり短周期応答だけでなく長周期応答に関与する振動数の成分を含むこと、さらに上述の能登半島地震の長い継続時間をもつ強震動の特徴を踏まえると、奥能登地域の配水池では短周期振動による動水圧とともにスロッシングの励起による動水圧が同時に作用したのではないかと考えられる。

本研究の目的は、水槽スロッシング振動実験に基づいて、スロッシング発生時の配水池内の水流と沈殿物の舞い上がりメカニズムを明らかにすることであるが、とくに地震動の振動特性による水流と舞い上がりについて着目した。



図1 2024年能登半島地震における配水池被害

2 研究方法・研究内容

本研究では、先行研究で得られたトレーサによる水流の可視化も考慮し、短周期振動時と長周期振動時（1~2sの周期は厳密には長周期ではないが、本研究では、短周期振動と区別をするために、スロッシング振動を長周期振動と呼ぶ）、様々な周期帯が含まれる観測地震波を加振した場合のトレーサによる水槽内水流と側壁水圧の関係について振動実験から明らかにする。

本実験には、神戸大学にある水平一軸の振動装置を用いた。実験に用いた鋼製水槽の内寸は幅 1,600 mm、奥行き 800 mm、高さ 1,000 mm である（図 2 参照）。水深は 600 mm とした。水槽の長手方向の一側面はアクリル板になっており、水槽内部を可視できる。水槽側面に圧力計を複数貼り付けた。

加振波は、短周期波（ 8m/s^2 、周期 0.2s の正弦波 15 波）、長周期波（スロッシング固有周期波）（ 0.3m/s^2 、周期 1.58s の正弦波 15 波）、能登半島地震の K-NET 穴水の 1/2 振幅調整波の 3 波を用いた。長周期波と観測波のスロッシング一次固有周期での応答加速度はほぼ同じである。

図 3、図 4 は実験結果の一例として、長周期波加振時のトレーサの浮上時の様子と、加振時の水槽底板加速度、速度ポテンシャル理論に基づく液面水位、右側面底部の水圧を示している。加振とともに直径 13mm の消臭ビーズであるトレーサの粒が二つの柱状に上昇していくことが確認できた。観測波でも同様にトレーサが舞い上がる現象を確認できたが、短周期波加振時にはトレーサはほとんど動かなかった。

液面水位については、速度ポテンシャル理論から算出される計算式よりも観測される水位振幅は大き



図 2 模型水槽の様子

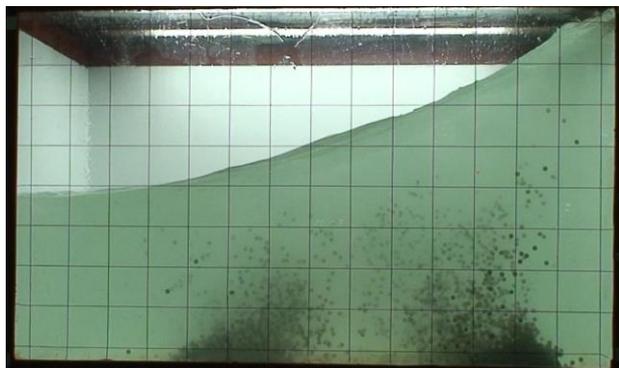
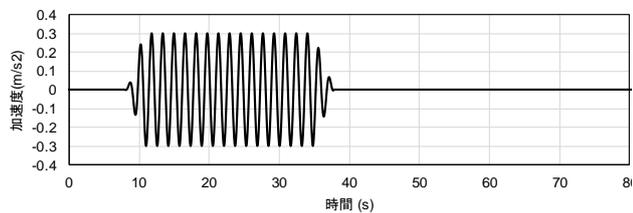
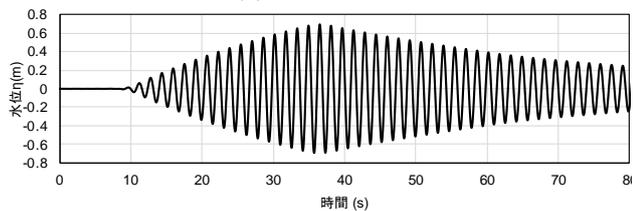


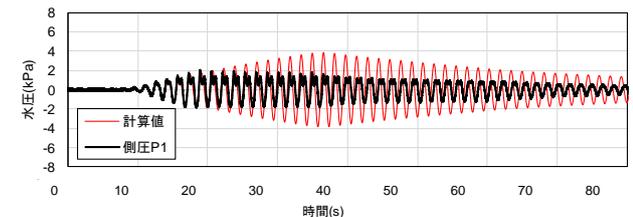
図 3 長周期波加振時のトレーサの浮上り



(a) 加速度



(b) 液面水位（計算式に基づく）



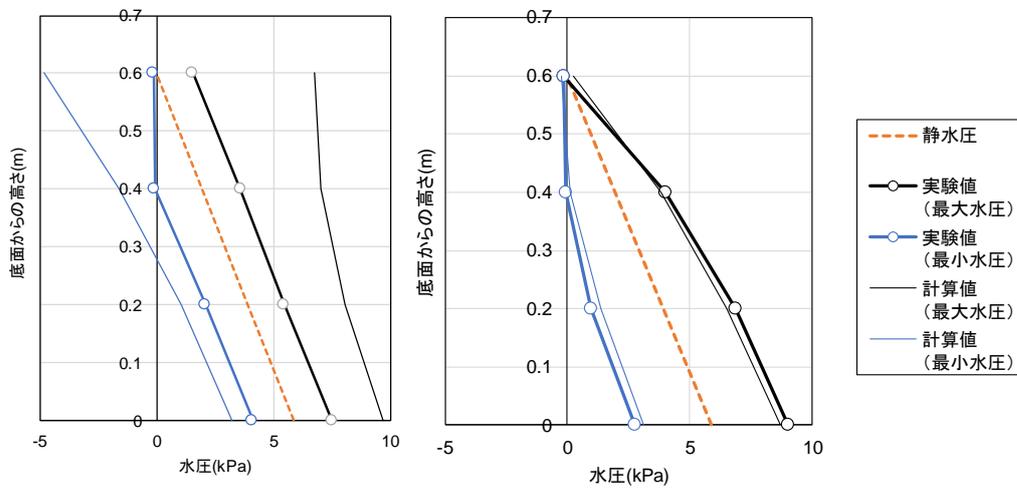
(c) 右側面の水圧 ($z = 0\text{ m}$)

図 4 長周期波加振時の液面水位と側壁水圧

くなり、液面が早く天井に達した。また、アクリル面右側面に設置した圧力計から加振による水圧変化を確認したところ、液面が天井に到達すると、理論計算式で算出される側面底部の水圧よりも小さく、一定の水圧以上にならなかった。

短周期波では、液面水位がスロッシングの一次モードになることはなく、水圧や水位は理論計算値と整合的であった。観測波では、長周期波と同様のスロッシング時の液面変位になり、加振途中までは加速度と水圧は対応していたが、加振途中から水圧は液面揺動に対応して振動することが確認できた。

水槽側壁の水圧を初期静水圧に実験加振時の水槽底部の最大・最小水圧となる時刻の水圧分布を合わせた水圧分布を図5に示す。図5には長周期加振波と短周期加振波の場合を示している。短周期振動の場合には理論値の水圧と整合的である。一方、長周期波においては液面が天井に到達し、深さ方向に一様な水圧分布となるため、初期静水圧が一様に増減することがわかった。観測波の場合は長周期加振波に似た特徴をもつが、最大水圧は短周期水圧よりも大きくなることがわかった。



(a) 長周期加振波($T = 1.58$ s) (b) 短周期加振波 ($T = 0.2$ s)

図5 加振時の最大・最小水圧分布 (静水圧+計測水圧)

3 研究成果

本研究の実験結果として、以下の点が挙げられる。

- (1) 水槽のスロッシング固有周期をもつ正弦波で加振したところ、加速度に対して1/4周期分の位相が遅れて側壁の水面上昇が発生し、水面上昇量に応じて水圧が上昇することがわかった。ただし、天井に液面が到達する場合は、深さに関わらず計測水圧が一定値に制限された。水槽底部にあったトレーサは加振当初は水平移動していたが、その後に浮き上がった。
- (2) 短周期波で加振したところ、加速度と同様な位相を持つ水圧上昇が認められたが、加振終了後には水圧はすぐに0になった。また、水槽底部のトレーサはほぼ移動しなかった。
- (3) 速度ポテンシャル理論から導出されたスロッシング時の側壁水圧は、天井に当たらない場合や短周期加振波による加振の場合には実験で得られる水圧と整合的であった。また、スロッシング時の液面水位が微小である場合には、理論式と一致するが、水位振幅が大きくなるにつれて実験水位の方が理論計算値よりも大きく、整合しなくなる。
- (4) 能登半島地震の観測波による加振では、側圧と加速度との位相が対応する時刻が

あることと、底面にあったトレーサがスロッシング時にみられるような水平移動ののちに舞い上がる挙動があることの両方が確認された。さらに、加速度の主要部が終了した後に液面揺動による水圧変動が継続することから、短周期振動と長周期振動の両方が作用していることが明らかになった。

- (5) 観測波加振時の側壁の最大水圧は、初期静水面で0となる水圧分布ではなく、静水圧分布に対して正、負に一様に増加、減少させた分布であり、スロッシング時の水圧分布に類似するものの、短周期加振波よりも大きな水圧が側壁に作用することがわかった。スロッシング振動によって初期静水面の上部にも水が存在するため、側壁水圧にはこれらの水圧も考慮する必要がある。小型矩形水槽のスロッシング固有周期が2s程度で、その周期帯が卓越する地震動が発生しうることを踏まえ、側壁水圧は短周期波だけでなくスロッシングによる水圧を加味して明らかにする必要がある。

以上を総じて、本研究の成果について、沈殿物の舞い上がりメカニズムについて水槽内のトレーサ挙動から整理をすると、以下の通りにまとめられる。短周期波のような慣性圧作用時には底部の沈殿物の移動そのものは発生しない。沈殿物の移動は、液体貯槽が自由水面を持ち、横振動が加えられてスロッシングが励起されると、沈殿物の水平移動から浮き上がりへと移行していく。ただし、本実験でトレーサが浮き上がるのは、水面が天井に到達するような大きな液面揺動が生じた場合に限定されている。液面が天井に衝突すると、水の流れが拘束され、加振後の側圧増分である側壁水圧は深さ方向に一定値を超えなくなった。さらに、天井に当たる場合の側圧は、ポテンシャル理論で説明できないため、より高度な数値シミュレーションで理解を深める必要がある。

4 生活や産業への貢献および波及効果

液体貯槽の振動問題において、水平方向のスロッシングと貯槽が縦に加振される場合に鉛直方向に軸対称な波形のバルジングとの二つの振動がある。スロッシングの固有周期は長く、それぞれの動水圧との連成が考えにくいいため分けて整理をされ、慣性圧と変形圧を併せて短周期応答、流動圧を長周期応答としてそれぞれ設計手法が規定されている。石油タンクに代表される大規模な円筒形貯槽の場合、バルジング振動応答の周期は0.15~0.55s、スロッシング応答の固有周期が4~12sと離れているため、対象となる地震動やその応答も分離できる。

一方、小型矩形水槽のスロッシング応答の固有周期は2s程度である。2s近くの周期帯の応答加速度が大きくなる地震動が観測されていることを踏まえると、スロッシングとバルジングが同時に作用することが十分考えられる。バルジングだけを対象とした水圧分布だけで貯水槽類を耐震設計するのは危険である。本実験で用いた加振波は限定されたものであるが、水槽内の挙動は明らかにバルジングとスロッシングの両要素の特徴が現れたものであり、長周期と短周期が含まれる観測波の水圧応答は短周期応答よりも大きな側圧が作用することが示された。小型矩形水槽の地震時のスロッシングによる液面揺動とそれによる水流、側壁水圧や底部沈殿物の舞い上がりについて、学術研究だけでなく、水槽メーカーにおいても実験や解析から水槽の耐震性能について検討していく必要がある。本研究成果は今後の研究・技術開発において貴重な資料になると期待される。