バルジング用制振装置の効果の検討

○中央大学大学院　学生会員　竹本　純平　中央大学大学院　学生会員　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

熊本地震での著者らの現地調査等[1]により，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，スロッシング（内容液の固有振動数と地震波の卓越振動数の共振による液面揺動）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（内容液と構造体の連成振動）が原因と考えられる．

スロッシングに関する耐震性能向上の研究は，著者らの研究グループが浮体式波動抑制装置を開発し，大きな効果を得てきた．一方，矩形貯水槽におけるバルジングに関する研究は，実験では箕輪らの研究[2]や著者らの研究[3]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，今後の貯水槽の耐震性と安全性向上のためには，一つ重要な課題となる．

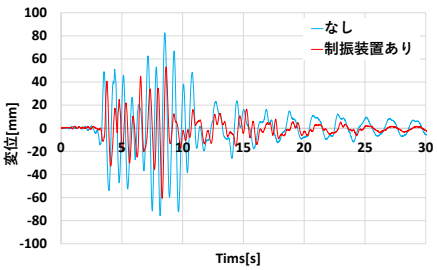
そこで本報では，バルジング用に開発した制振装置により，既存貯水槽の耐震性能を向上することを試みるものである．この結果，既存貯水槽の耐震性能の向上が確認出来たので報告する．

2. 実験概要

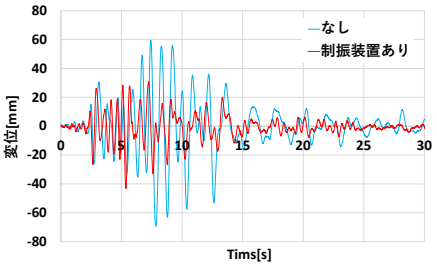
制振装置の効果を検証するために，**写真-1** に示す，3000mm×3000mm×3000mm の FRP 製貯水槽を用い，加振実験を行う．ここで，この FRP 製水槽は 1980 年に水槽耐震設計基準が制定されるより前の非耐震仕様である．さらに加振方向面は，20 年余り使われ劣化が一部進んでいる可能性があるパネルを用いている．このタンクに水位を通常設定水位と同じである内容量 90%の水位 2700mm まで注水する．著者らの研究グループでは，バルジングにより受ける影響として貯水槽隅角部が弱点となることを指摘してきた[1]．そのため，本研究で使用するバルジングの制振装置は，貯水槽隅角部の 4 隅，貯水槽底から 1000mm と 2000mm 位置の 8 ヶ所にゴムを主体とする弾性変形ダンパーを取り付けるものとする．これにより制振装置の有無による貯水槽側壁応答加速度の低減効果に関して地震波を用いて、比較を行う．

本実験で用いる地震波は，2 種類とし，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 SN 方向観測波の 30%変位相当と熊本地震宇土 NS 方向観測波変位 50%相当とし，加振方向は計測面に直交に加振する．加振実験には，愛知工業大学が所有する大型振動装置を用いる．本実験において貯水槽の膨らむ方向を正(+)凹む方向を負(-)とする．

写真-1 非耐震性 FRP 水槽



(a)神戸 SN30%



(b)熊本宇土 NS50%

図-1 1500mm の位置における変位

3. 実験結果

3. 1 壁面応答変位

図-1 に 1500mm の位置における壁面応答変位を示す．**図-1**(a)は神戸 SN30%で加振時の壁面応答変位である．非制振の場合，最大変位は+側で 82.64mm であるのに対し，制振装置付加した場合は 53.12mm と 36%程度低減されている．－側では，非制振時-75.76mm であるのに対し，制振装置付加時は，-60.72mm と 20%程度低減できている．

また，**図-1**(b)は熊本宇土 NS50%で加振時の壁面変位である．非制振の場合の最大変位は 59.44mm であるのに対し，制振装置を付加した場合は 30.88mm であり，48%程度低減することができた．－側では，非制振時は-69.36mm であり，制振装置付加時は-43.20mm と 38%程

キーワード：FRP 製水槽，バルジング，制振装置，
連絡先：〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27　TEL．03-3817-1816　Fax．03-3817-1803

度低減できている．

3. 2 壁面応答加速度

図-3 に 2000mm の位置における壁面応答加速度をす．**図-3**(a)は神戸 SN30%で加振時の壁面応答加速度であり、非制振の場合の最大加速度は+側では，7.56m/s^2 であり，-側では-7.60m/s^2 である．また制振装置を付加した場合+側では，7.14m/s^2 であり，-側では，-6.67m/s^2 となっており，最大加速度での比較では顕著な変化は見られない．しかしながら，非制振時に対し，制振装置を付加することで，繰り返しの加速度が抑制できており，5s 以降減衰が促されていることがわかる．**図-3**(b)は熊本地震宇土 NS50%で加振時の壁面応答加速度である．+側の最大加速度は非制振の場合，6.46m/s^2 であり，制振装置を付加した場合は，4.45m/s^2 となった．制振装置ありなしで比較すると 1.92m/s^2 の 29%程度低減されている．また-側では，非制振の場合-7.25m/s^2 であり，制振装置を付加した場合は，-6.91m/s^2 であり，0.35m/s^2 の 5%程度の低減に留まっている．しかしながら，非制振時に対し，制振装置を付加することで，繰り返しの加速度が抑制できており，5s 以降減衰が促されていることがわかる．

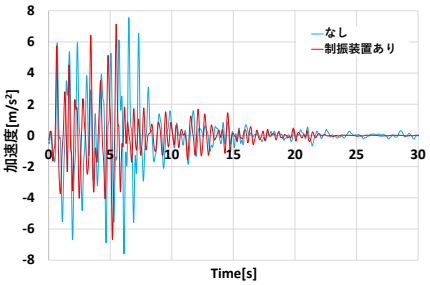
3. 3 レインフロー解析

制振装置を付加することによる壁面応答変位と壁面応答加速度の減衰効果をより明確なものとするために，レインフロー解析を実施する．レインフロー解析は通常，不規則な繰り返し変動荷重を受ける機械や構造物などにおいて，疲労寿命を予測する手法として用いられ，雨だれの経路から，疲労寿命に寄与する振幅とその発生回数を決定するものである．本研究においてこの手法を壁面変位および加速度に当てはめ，制振装置付加に伴う低減効果を分析する．

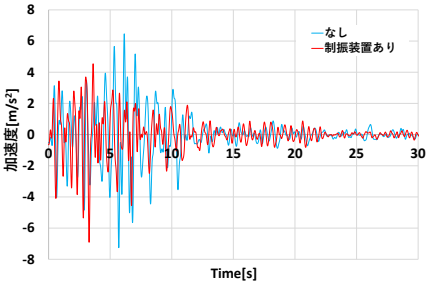
図-4 は壁面変位のレインフロー解析の結果であり，(a)が神戸 SN30%加振時，(b)が熊本宇土 NS50%加振時である．(a)において非制振の場合，全振幅 100mm～130mm の発生回数が 4.5 回であるが，制振装置付加時は，0.5 回と大幅に低減されている．(b)においても，非制振時は，全振幅 80mm～120mm の発生回数が 5.5 回であるが，制振装置付加時は，0 回と大幅な低減ができている．このことから，大振幅に制振装置の効果が発揮したと考えられる．一方、**図-5** は壁面応答加速度のレインフロー解析結果であり，(a)は神戸 SN30%加振時，(b)は熊本宇土 NS50%加振時である．(a)において，非制振の場合 11~16m/s^2 の発生回数が 6.5 回であるの対し，制振装置ありの場合は 2 回である．また(b)において，6.0~13.0m/s^2 の発生回数は，非制振の場合が，6.5 回であるのに対し，制振装置ありの場合は 4.5 回である．この解析結果より，制振装置を付加させたことで，水槽壁面の大きな応答の繰り返しを抑制し，減衰を促す効果があると考えられる．

4. おわりに

本研究では，既存貯水槽における耐震性向上のための制振装置の検討としてバルジングの対策案について検討を行った．バルジング用制振装置をタンク隅角部に設置することで，壁面応答を低減させることができた．さらにレインフロー解析を実施することで，制振装置により，大きな変位ならびに大きな加速度の繰り返し発生回数を抑制することができ，減衰効果を明確にすることができた．ところで本研究で用いた貯水槽は，前途の非耐震設計仕様であるので，それに該当する貯水槽の耐震化向上に効果があるものと考えられる．

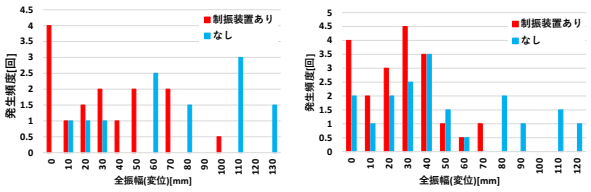


(a) 神戸 SN30%



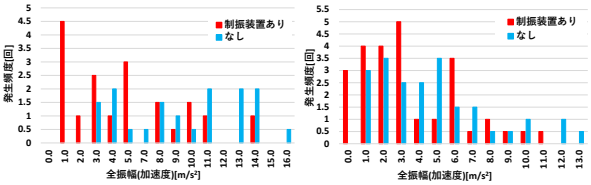
(b)熊本宇土 NS50%

図-3 2000mm における壁面応答加速度



(a)神戸 SN30%　　(b)熊本宇土 NS50%

図-4 応答変位のレインフロー解析



(a)神戸 SN30%　　(b)熊本宇土 NS50%

図-5 応答加速度のレインフロー解析

謝　辞

本研究は，積水アクアシステム(株)，(株)十川ゴム，(株)エヌ・ワイ・ケイとの共同研究として行われた．また，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) 小野泰介　他：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証，土木学会構造工学論文集 Vol.66A, pp.137-146,2020.3.
2) 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.
3) 小野泰介他：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.