アクリル製矩形水槽を用いての実験と解析でのバルジング現象の検討

中央大学 学生員　○因　和樹　　㈱十川ゴム 正会員 河田 彰
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

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．特に中央～下部を中心としての側板や隅角部が破損するような，タンク構造体の振動が主体となるバルジング現象による被害の発生が目立っている．このような背景から，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るかが，今後貯水槽の耐震性と安全性向上の重要な課題になっている．

このような背景から本報では，バルジング現象によって生じる損傷の危険性を低減し，かつ耐震性と安全性の向上を目的とし，この現象のメカニズムとその影響の分析を行う．具体的には，**写真-1** に示すアクリル製の矩形模型水槽を用いての小型振動台による振動実験 [1]により得られた実験データと数値流体解析の 2 種類の異なる手法での分析及び比較を行うことで，バルジング現象の特徴の把握を行うものである．

2. 解析概要

数値流体解析は，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．本解析に用いるアクリル水槽の解析モデル及び波高プロット点 A，B を**図-1** に示す．ここでは，a 点を水槽底部から高さ方向の 1/4 点（112.5mm），b点を同 1/2 点（225mm），c点を同 3/4 点（337.5mm）とする．水槽部は Shell 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，壁面変位量と実験結果との比較を行う．また，実験では計測していない液面波高と壁面に掛かる応力を算出することでバルジング現象の把握を行う．また，**表-1** に実験及び解析条件の諸元を示す．なお，要素数は 141,000 である．

解析の第一として，水を入れた状態における静的な解析を行い，実験による静水圧時の壁面変位結果との比較する．構造－流体の連成解析を行う場合，自重の釣り合い計算を行う必要があるため，これを動的計算の初期条件とする．次に動的解析を行い，本報では加速度を入力条件とする．また，吉原ら [2]の実験式(1)から壁面の減衰定数を算出し，Rayleigh 減衰の形で与える．なお，バルジング時において減衰定数の範囲は 2～5%が一般的値である．

$$h_i = 0.312 f_i \qquad (1)$$

h_iは減衰定数(%)，f_iはi次固有振動数(Hz)である．

3. 実験結果及び解析結果

(1) 壁面挙動

写真-2 に実験による静水圧時の壁面変位，**図-2** に静的解析による X 軸方向変位を示す．両結果共に静水圧により壁面が変位していることが確認できる．また，**表-2** に両結果の静水圧時の壁面変位の値を示す．各点とも解析のほうが実験と比較して 1.2～1.3 倍程度の変位を示している．これは，薄いアクリル板の板圧の許容誤差が板圧の 10%まで許容されており，厚い側になっているためと考えられる．次に，**図-3** にb点の 5.0～13.0Hz における壁面の最大変位を示す．ここでは静水圧時(0.0mm)を基準とし，壁面が外側へ変位する最大変位を＋側変位(凸)，内側への変位を－側変位(凹)とする．実験による最大変位は，9.0Hz を除くと，5.0Hz～10.0Hz にかけてほぼ直線的に変位が増加し，10.0Hz においてピークを迎えて減少傾向に向かう．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が生じ

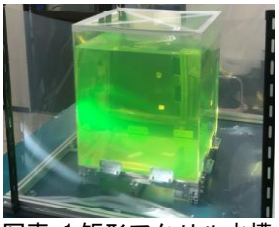


写真-1 矩形アクリル水槽

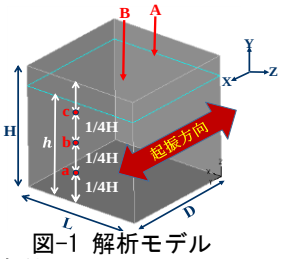


図-1 解析モデル

表-1 諸条件

種類	矩形水槽	入力加速度[m/s²]	3.5
材質	アクリル	入力波形	正弦波
幅 L[mm]	450	入力振動数［Hz］	5.0～13.0
奥行き D[mm]	450	入力振幅［mm］	3.55～0.52
高さ H[mm]	450	入力波数［波］	50～130
水位 h[mm]	405	入力加振時間[s]	10
板厚 t[mm]	3.0	水槽部	Shell要素
ヤング率 E[N/m²]	3.0E+09	流体部	ポテンシャルベース 3D流体要素
ポアソン比 ν	0.35	境界条件	底面固定(x,y,z方向)
水槽密度ρ_s[kg/m³]	1190	流体水面	自由水面

写真-2 静圧時壁面変位

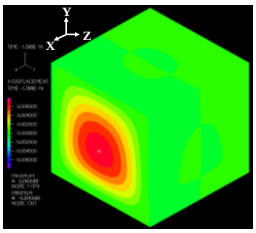


図-2 X 軸方向変位(静的解析)

表-2 静圧時変位

[mm]	a点	b点	c点
実験	+3.4	+4.5	+3.9
解析	+4.3	+6.7	+5.0

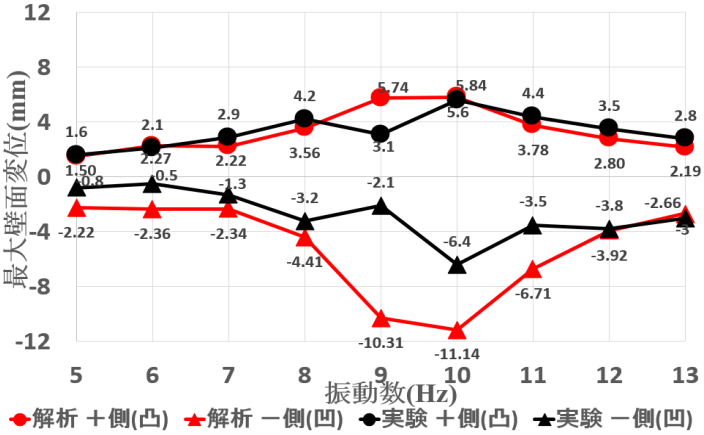


図-3 壁面最大変位

キーワード　：バルジング，振動実験，矩形水槽，流体解析
連絡先　：　〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27　tel.03-3817-1816　fax.03-3817-1803

ていることが推測される．次に，**図-4** に両結果共にバルジングが最も顕著に見られた 10.0Hz 加振時のb点の時刻歴応答壁面変位をそれぞれ示す．加振時に＋側では，実験は 5.8mm，解析は 5.6mm を示している．両結果共に，加振 10s 後，壁面変位は直ちに減衰しており，変位の減衰が小さいスロッシングとは異なり，減衰が大きいバルジングの特徴を有していることがわかる．一方，壁面の－側変位(凹)の解析結果に注目すると，実験時よりも変位が大きく増加している．これは，前述の板厚の許容誤差や実験時の底部固定の差異によって差が生じたと考えられる．また，**図-5**，**写真-3** に 10.0Hz 加振時の壁面の X 軸方向変位及び変位挙動を示す．これにより，壁面の中心部を中心として外側，内側へと繰り返し変位しているバルジング特有の挙動がみられる．

(2) 液面挙動

写真-4 にバルジング共振域と考えられる壁面変位が大きい 10.0Hz 加振時の水面波形及び**図-6** に**図-1** の B 点の時刻歴応答液面変位を示す．これより，波長の短い波形が見られ，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．次に，10.0Hz 加振時の**図-1** の A 点の時刻歴応答波高のパワースペクトル結果を**図-7** に示す．これより，壁面付近において，高周波の波のみならず，1.3Hz 付近で卓越ピークが見られる．これは，スロッシング 1 次モードの振動数と一致している．よって，壁面付近においては，長周期振動と短周期振動の複数のモードが混在した挙動を示していることがわかる．

(3) 動液圧と壁面応力

図-8，**図-9(a)** に，5.0～13.0Hz における最大全水圧分布の解析結果及びバルジング現象が最も顕著に見られた 10.0Hz の最大全水圧図を示す．最大全水圧は 10.0Hz において壁面全体に 6.0～8.0kPa と大きな値を示している．これは，短周期振動によって水が壁面全体に力を及ぼすバルジング現象の特徴であると考えられる．また，同様の現象が 8.0～11.0Hz の範囲においても水圧が大きく作用していることがわかる．つまり，側壁に水圧が増幅される現象がバルジングであるので，8.0～11.0Hz 付近にバルジング共振域があると思われる．さらに，力の作用が水槽高さ 0～50%付近で大きく影響していることから，水槽下部付近に大きな力が加わる特徴を示している．したがって，長周期振動による内容液水面付近で局所的に力を及ぼすスロッシング現象（液面揺動の励起）とは異なる現象が生じている．

次に，**図-9(b)** に 10.0Hz における最大壁面応力図を示す．これにより，壁面中央部，底面接触部及び隅角部において応力が集中していることがわかる．よって，バルジング現象が生じた際にこれらの位置が破壊箇所となる可能性が高いと考えられる．

4. おわりに

本論文では，アクリル製矩形モデルを用いて，実験と解析の両面からバルジング現象についての検討を行った．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共振域があることがわかった．また，バルジング現象はスロッシング現象とは異なり，壁面全体に力が作用することからスロッシングとは別の制振対策が求められる．今後は，実機による検証や新たな制振装置を開発することが求められる．

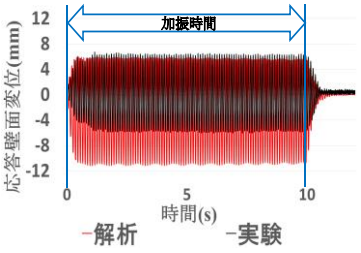


図-4 時刻歴応答変位(10Hz)

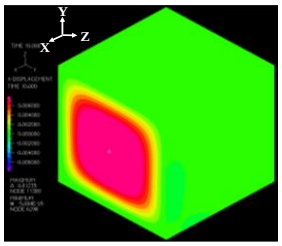


図-5 X 軸方向変位(10Hz)

写真-3 変位挙動(10Hz)

写真-4 水面波形(10Hz)

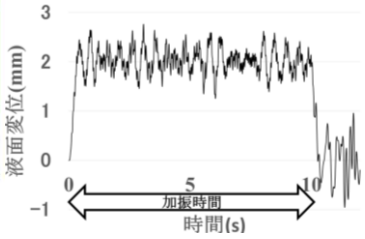


図-6 応答波高 B 点(10Hz)

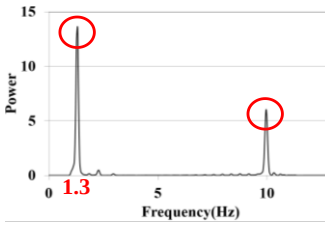


図-7 パワースペクトル A 点(10Hz)

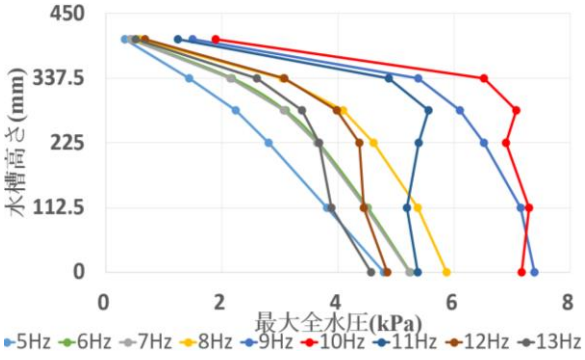
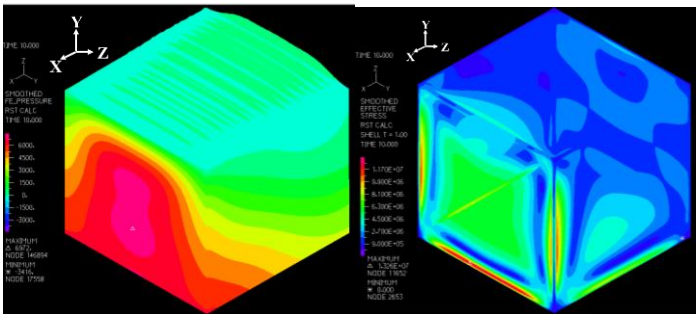


図-8 最大全水圧分布(解析)



(a) 全水圧図　　(b) 壁面応力図

図-9 解析結果(10Hz)

参考文献

1)河田：矩形アクリル製水槽を用いてのバルジング現象に関する挙動把握のための実験的検証，第 37 回地震工学論文集 2017.11

2)吉原醇一ら：水槽の振動特性について-文献調査による実験データの検討- 大林組技術研究所報 No.24 1982