

振動実験と数値流体解析を用いたバルジング現象の特徴の把握

Grasp of the characteristic of the bulging phenomenon using a vibration experiment and numerical value fluid analysis

16N3100004L 因 和樹 (設計工学研究室)

KAZUKI IN/ Design Engineering Lab.

Key Words : bulging, vibration testing, Rectangular water tank, fluid analysis

1. はじめに

東日本大震災の被害調査で最新の基準で設計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顕著であった¹⁾。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。しかし、バルジングに関する研究は、石油タンク等における研究²⁾については行われてきたが、貯水槽における研究は、箕輪らの研究³⁾の他に既存の研究はあまりないのが現状である。したがって、今後貯水槽の更なる耐震安全性の向上のためには、スロッシング対策のみならず、バルジング対策についての検討も必要不可欠となっている。

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、共同で行ったアクリル製の矩形模型水槽を用いた小型振動台による振動実験⁴⁾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. 実験概要

本実験では、水槽壁面の変位計測と水面の可視化を目的としているため、剛性が小さく、壁面が透明な材料である写真-1のアクリル製矩形模型水槽(以下、アクリル水槽とする)を用いる。水槽の大きさは外側部450mm×450mm×450mm、板厚は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3.0mmとした。また、水位は水槽高さの90%である405mmとし、水槽をボルトによる底部固定として振動実験を行った。図-1に実験概要図を示す。計測方法は、振動台に設置した(株)KEYENCE社製のIL-600レーザー変位計センサーを用いることで、水槽壁面中央である水槽底部から112.5mm、225mm、337.5mmの3箇所の壁面変位を計測する。ここでは、サンプリング周波数は1000Hzである。この振動条件を表-1に示す。加速度(3.5m/s²)と加振時間(10s)を一定として、周波数を5.0Hz～14.0Hzまで1.0Hz刻みの10ケースとする。これは、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8.0～10.0Hz付近であることを掴んでいるためである。変位計により計測した壁面変位結果と外部カメラによる壁面と液面変位映像結果により、バルジング現象の特有の把握を行う。

3. 数値流体解析の概要

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

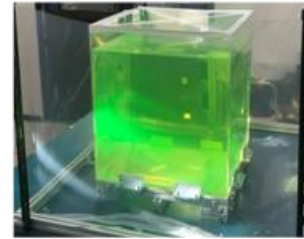


写真-1 アクリル矩形水槽

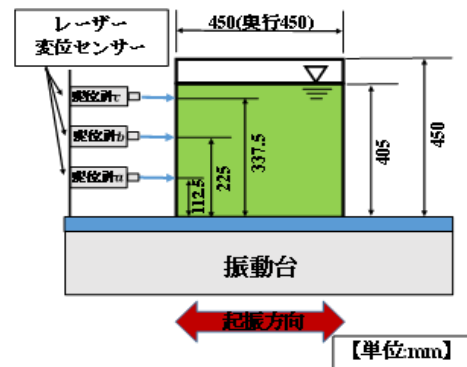


図-1 振動実験概要図

表-1 振動条件

入力加速度[m/s ²]	3.5
入力波形	正弦波
入力振動数 [Hz]	5.0~14.0
入力振幅 [mm]	3.55~0.45
入力波数 [波]	50~140
入力加振時間[s]	10

表-2 解析条件

種類	矩形水槽
材質	アクリル
幅 L[mm]	450
奥行 D[mm]	450
高さ H[mm]	450
水位 h[mm]	405
板厚 t[mm]	3.0
ヤング率 E[N/mm ²]	3.0E+09
ポアソン比 ν	0.35
水槽密度 ρ [kg/cm ³]	1190
水槽部	Shell要素
流体部	ボテンシャルベース 3D流体要素
境界条件	底面固定(XYZ方向)
流体水面	自由水面

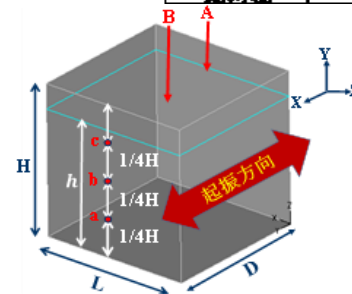


図-2 解析モデル

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である。表-2に解析条件を示す。また、本解析に用いるアクリル水槽の解析モデル及び波高点A, Bを図-2に示す。ここで、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圧力及び応力を算出することによりバルジング現象の把握を行う．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をする．また，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⁹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．

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

h_i : 減衰定数(%), f_i : i 次固有振動数(Hz)

4. 実験結果及び解析結果

(1) 静水圧(実験⁴)と解析

写真-2 に実験による静水圧時の壁面変位，図-3 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-3 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大きい変位を示している．これは，3mmの薄いアクリル板の板厚の許容誤差が10%の2.7~3.3mmまで許容されているため，その計測の結果，解析の方が，実験と比較して1.2~1.3倍程度+側になっていたと考えられる．

(2) 壁面挙動(実験⁴)と解析

図-4 にb点の5.0Hz~14.0Hz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ていることが推測される．

ここで，図-5 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を示しており，+側変位は両結果ともに一致した．さらに，加振10秒後，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-側変位の解析結果に注目すると，実験時よりも変位が約2倍に増加している．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る差と，アクリル水槽を施工する際，角部に張り合わせ部材を使用しているため変形しにくく，差が生じたと考えられる．次に，図-6 に解析によって算出した10.0Hz加振時のa~c点の時刻歴応答壁面変位と図-7 にこのときのX軸変位図を示す．加振時に+側では，a点

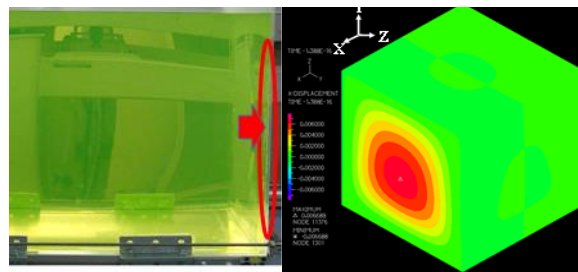


写真-2 壁面変位(静水圧時) 図-3 X軸方向変位(静的解析)

表-3 静水圧時変位

(mm)	a点	b点	c点
実験	+3.4	+5.5	+3.9
解析	+4.3	+6.7	+5.0

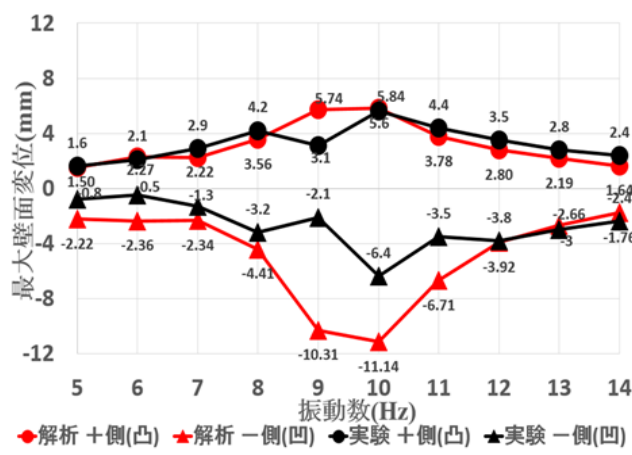


図-4 最大壁面変位

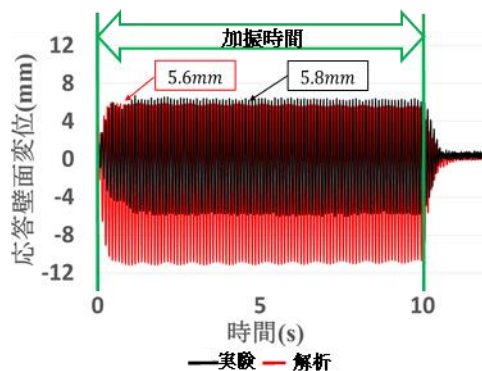


図-5 時刻歴応答変位(10.0Hz)

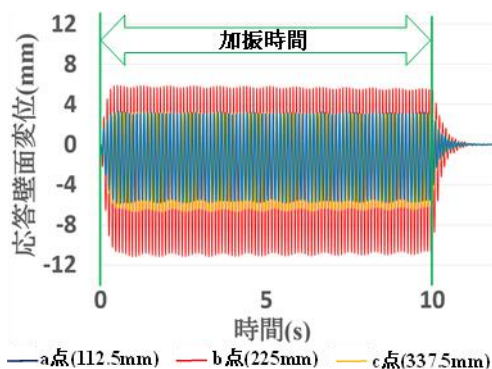


図-6 時刻歴応答変位解析結果(10.0Hz)

は3.2mm, b点は5.6mm, c点は3.3mm, また, 一側では, a点は-5.8mm, b点は-11.1mm, c点は-6.6mmを示している. この結果より, 中心部で大きく変形しているバルジング現象の特徴がわかる. また, 写真-3に10.0Hz加振時の実験による変位挙動を示す. これらより, 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.

(3) 液面挙動 (実験⁴と解析)

写真-4(a)~(d)に5.0Hz, 7.0Hz, 10.0Hz, 11.0Hz加振時の水面波形を示す. 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.

次に, 解析により, バルジング共振域と考えられる壁面変位が大きい10.0Hz加振時における図-2のA, B点の時刻歴応答波高のパワースペクトル結果を図-8(a), (b)に示す. (a)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, 矩形水槽のスロッシング1次モードの振動数と一致している. これにより, 実験では波高の計測が困難であり判断できなかったが, 壁面付近においては, 長周期振動と短周期振動の2つのモードが混在した挙動を示していることがわかる. 一方, (b)において, 1.0Hz, 1.9Hz, 2.2Hz, 2.7Hz付近の複数の卓越ピークが見られ, 10.0Hz付近の高周波の波は見られなかった. これにより, 液面中心部においては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.

さらに, 解析により, 図-9(a), (b)に10.0Hz加振時の図-2のA, B点の時刻歴応答液面変位を示す. (a)において, 液面が振幅約15mmで, 振動数1.3Hzで動いていることから, スロッシング1次モードのような揺動をしていることがわかる. さらに, その波の上に10.0Hzの振動数が含まれていることから, 長周期と短周期の2つのモードが混在していることがわかる. 一方, (b)において, 液面が加振開始後, 急激に振幅約2.7mmまで達し, その後, 複雑な周期で微小振動し, 加振終了後, 急激に減少していることがわかる. このことから, 波長の短い複雑な波形が見られ, 大きな液面揺動が起こるスロッシングとは異なり, 表面が多数の周波の波で覆われる挙動を示していることが解析からも読み取れる.

(4) 全水圧 (解析)

図-10に壁面中央部の5.0Hz~14.0Hzにおける最大全水圧分布の解析結果を示す. 最大全水圧は8.0Hz~11.0Hzの範囲において壁面全体(水槽高さ0~337.5mm)付近に水圧が約3~8kPaと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, 8.0Hz~11.0Hz付近にバルジング共振域があると思われる. さらに, バルジング現象特有の水槽下部付近に大きな力が加わる特徴も読み取れる. また, 図-11に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. これにより, 10.0Hzにおいて短周期振動によって壁面全体に約6kPa~8kPaと大きな力が及ぼされていることがわかる. このように, バルジング時は,

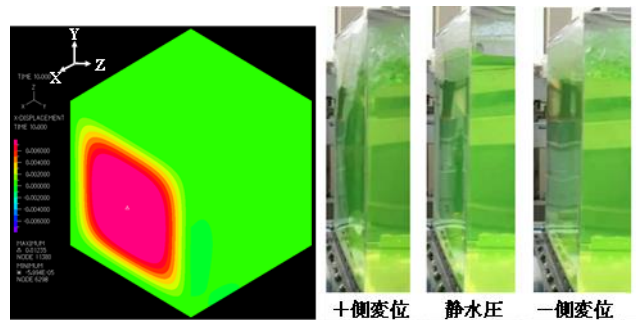


図-7 X軸方向変位(10.0Hz)

写真-3 変位挙動(10.0Hz)

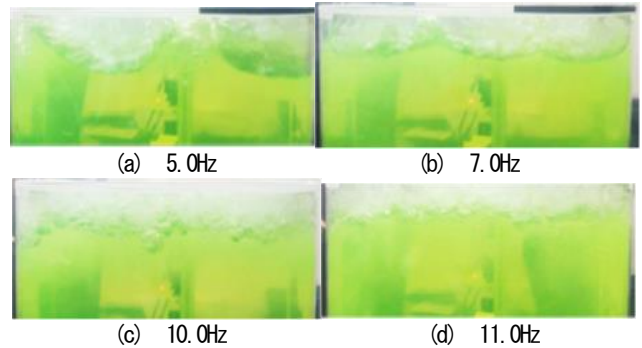


写真-4 水面波形

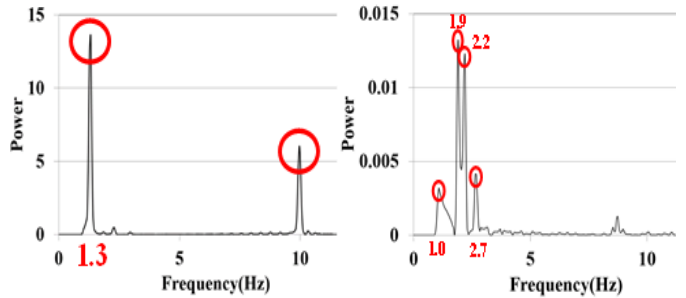


図-8 解析: パワースペクトル(10.0Hz)

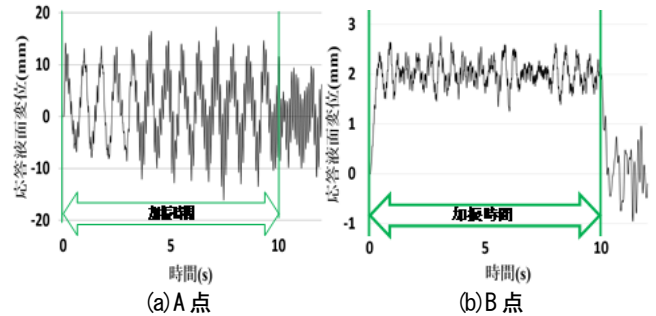


図-9 解析: 応答波高(10.0Hz)

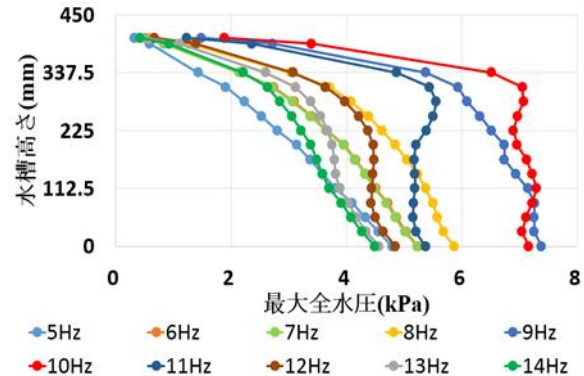


図-10 最大全水圧分布(解析)

中央部～下部を中心として破損しやすいことが考えられる。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。

(5) 壁面応力（解析）

図-12(a)に壁面中央部、図-12(b)に壁面隅角部による、静水圧時と5.0Hz～14.0Hzにおける最大応力分布の解析結果を示す。バルジング共振域と思われる8.0Hz～11.0Hzの範囲において、壁面中央部では、底面接触部付近（水槽高さ0mm）では約11～14MPa、中心付近（水槽高さ112.5～337.5mm）では約4～6MPaと大きく作用していることがわかる。一方、壁面隅角部においては、中心付近（水槽高さ112.5～337.5mm）で約0.5～2.5MPaと大きく作用していることがわかる。このように、バルジング時は、壁面中央部中心付近、底面接触部付近及び隅角部中心付近において応力が集中していることがわかる。また、図-13にバルジング現象が最も顕著であった10.0Hzにおける最大応力図を示す。これにより、10Hzにおいて、壁面中央部では底面接触部付近（水槽高さ0mm）に約14MPa、中心付近（水槽高さ112.5～337.5mm）に5～6MPaと非常に大きな値を示した。また、静水圧時と比較して底面接触部付近では約2倍、中心付近に約1.7～2.8倍の力を受けていることがわかる。一方、10Hzにおいて、壁面隅角部では中心付近（水槽高さ112.5～337.5mm）に1.5MPa～2.5MPaの値を示した。また、静水圧と比較して中心付近に約4～15倍の力を受けていることがわかる。これより、これらの応力集中箇所が東日本大震災における実際の貯水槽のバルジング現象による損傷被害箇所²⁾とおおよそ一致していることが確認できる。したがって、バルジング現象が生じた際は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。

5. おわりに

本論文では、極力剛性を低くしたアクリル製矩形水槽を用いて、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。さらに、この現象はスロッシング現象とは異なり、壁面中心に力が作用することもわかった。また、液面映像と解析結果より、バルジング共振域において水面が長周期と短周期の波で覆われる複数の液面モードが混在した挙動を確認した。さらに、解析結果により、バルジング共振域では、全水圧は、壁面全体（水槽高さ0～75%）大きな力が加わる特徴がわかった。また、応力は、壁面中心付近、底面接触部付近及び隅角部中心付近に集中する特徴がわかった。つまり、バルジング現象時ではスロッシング現象時とは異なる全水圧や応力を受けるため、従来のスロッシング対策とは別の制振対策が求められる。

今後の課題として、実機による検証や新たな制振装置を開発することが挙げられる。

参考文献

1) 井上涼介 他：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回地震工学研究発表会，A1369，20140

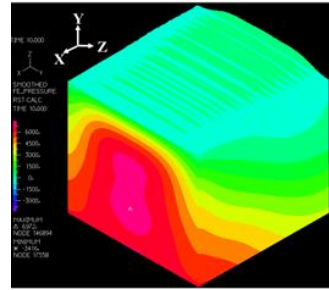
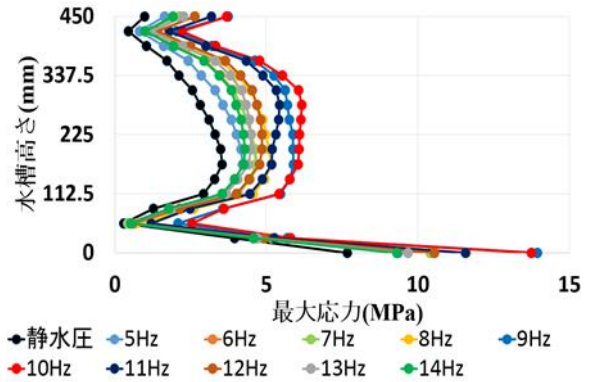
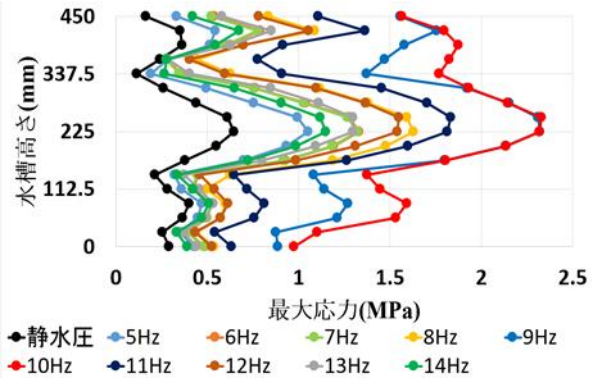


図-11 最大全水圧図(10.0Hz)



(a) 壁面中央部



(b) 壁面隅角部

図-12 最大応力分布(解析)

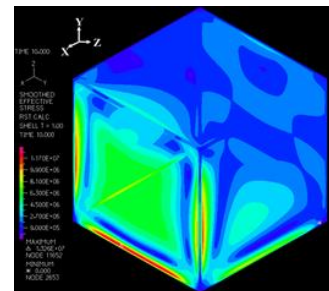


図-13 最大応力図(10.0Hz)

- 2) 坂井藤一 他：大型貯水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，197511
- 3) 箕輪親宏 他：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，pp106-108，201248
- 4) 塩野谷遼 他：実験水槽を用いた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.420，78
- 5) 河田彰，因和樹 他：矩形アクリル製水槽を用いたのバルジング振動に関する振動実験，地震工学研究発表会，201710
- 6) 吉原醇一 他：可撓性矩形水槽の振動特性について，大林組技術研究所報，No.20，pp17-24，1980，