

微動計測装置を用いた貯水槽のバルジング固有振動数の推定

Estimation the natural frequency of the bulging in water tank using the micro-tremor measurement device

齊藤崇*, 小野泰介**, 池田直生***, 平野廣和†, 佐藤尚次****
Shu Saito, Taisuke Ono, Naoki Ikeda, Hirokazu Hirano, Naotsugu Sato

*中央大学, 大学院理工学研究科都市人間環境学専攻前期課程 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

**博士 (工学), (株) エヌ・ワイ・ケイ (〒349-0131 埼玉県蓮田市根金 1689-1)

***JFE エンジニアリング (株) (〒212-0013 神奈川県川崎市幸区堀川町 580)

†工博, 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)

****工博, 中央大学教授, 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

Various damages to water tanks have been reported due to sloshing and bulging. In particular, bulging has just added to the latest guideline, so it is necessary to understand it as soon as possible. In this paper, we calculate the bulging natural frequencies by the micro-tremor measurement device being installed on the roof panel of the water tank. Furthermore, as they are compared with the results from accelerometers installed on the wall and from finite element analysis, we confirm whether bulging natural frequencies calculated by using this device are correct. We also examine the usefulness of this device. As a result, it is found that calculated bulging natural frequencies by each method were almost identical.

Keywords: micro-tremor measurement; bulging; natural frequency; water tank

キーワード: 微動計測, バルジング, 固有振動数, 貯水槽

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震(以下, 東日本大震災とする)を始め2016年の熊本地震, 2022年の福島県沖地震等, 震度6弱を超える地震が発生する度に貯水槽の損傷被害が多数報告¹⁾⁴⁾されるに至っている。発生する損傷は, 大きく分けて2種類あることが我々の研究¹⁾などでわかってきている。一つは貯水槽の天井や上部の側板が破損した事例であり, もう一つは貯水槽の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現象であり, 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生じることが原因である。これに対し, 後者は貯水槽構造体の振動が主体となるバルジング現象⁵⁾⁶⁾であり, 内容液と壁面構造体との連成振動が原因となるものである。全く異なった二つの現象が地震動の卓越振動数の違いにより発生することになる。

ここで貯水槽のスロッシング現象については, 従来から Housner の理論式⁷⁾を用いて各種の設計基準で規定さ

れている。これに対してバルジング現象については, 2022年4月に改訂された水道施設耐震工法指針・解説2022年版(日本水道協会)⁸⁾で新たに設計基準として規定が追加されたばかりである。

これを受けて, 早急にバルジング現象の発生の有無に関して検討を行い, 貯水槽の耐震安全性を向上させなければならない。特にバルジング現象は内容液と壁面構造体との連成振動であることから, 発生の有無を探るには貯水槽壁面(以下, 壁面とする)の固有振動数を把握することが必要不可欠である。特に既存の貯水槽において簡易的に壁面の固有振動数を知ることは, バルジング現象に関する耐震性の有無を把握するために必要なことである。これにより貯水槽の耐震性の向上のために, 例えば制振装置の取り付け等の有無の判断材料とする。

そこで本研究では, バルジング固有振動数を推定するために, 壁面の固有振動数について微動計測装置を用いて簡易的に測定できる方法を提案する。具体的には貯水槽で最も計測装置を容易に置くことができる水槽の天板部分に着目し, ここに高精度のサーボ型加速度計を用いた微動計測装置を設置し, 壁面部分を軽く叩く事により

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: hirano@tamacc.chuo-u.ac.jp

加速度を計測するものである。この手法の妥当性を裏付けるために、通常用いられるひずみゲージ型加速度計(以下、加速度計)を壁面に設置して加速度を同時に計測し、両者の比較を行うものである。さらに、これらの計測結果と有限要素解析から得られる固有振動数を比較する。以上のことから、微動計測により簡易に壁面の固有振動数を求められるか否かを確認するとともに、微動計測の有用性の検討を行うものである。

2. バルジング振動に対する考え方

2.1 貯水槽の耐震設計基準の現状

現状における貯水槽の耐震設計基準⁸⁾⁹⁾において、スロッシングは壁面を完全剛体と仮定し、Housnerの理論式⁷⁾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としている。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、本研究で扱うバルジングは、壁面が液体と接して振動することから、壁面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全く反映されてこなかったことから、多くの貯水槽に損傷被害¹⁾⁴⁾を生じたと考えられる。

バルジング発生時には図-1に示す模式図の様に、壁面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)が繰り返し作用する。ここで l は加振断面方向の長さの $1/2$ 、 h は水深である。地震発生時にこの動液圧が壁面を加振することで、連成振動を起こすことにより、下部側板のパネルに損傷被害を生じさせるものと考えられる。

2.2 10Hz 以上のバルジング振動の扱い

国際耐震安全センター(ISSC)では、地震動の加速度を $0.5\sim 10\text{Hz}$ の間を有効加速度とし、 10Hz を超える加速度は耐震強度上の考慮を不要とする手法¹⁰⁾が採られている。地震動の高振動数成分、特に 10Hz 以上の成分については、加速度応答が大きくなる場合であってもそのエネルギーは小さいことから、構造物の損傷に与える影響は少ないとされている。このことから 10Hz 以上の地震動は、貯水槽にも被害を与える可能性は低いと考えられる。そこで、この 10Hz を境としてバルジング振動数がこれ以下であれば、制振装置¹¹⁾を設置する等の対策が必要であると考えられる。

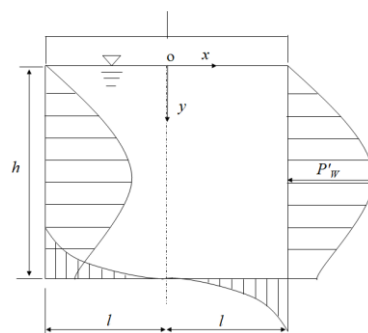


図-1 バルジング発生時の壁面に生ずる圧力の模式図



写真-1 一体型微動計測装置 (DATAMARK JU410)



写真-2 ステンレス製一体型水槽

3. 計測方法

3.1 微動計測装置

微動計測には、写真-1に示す白山工業(株)製 DATAMARK JU410の一体型微動計測装置(以下、微動計)を用いる。これは高精度のサーボ型加速度計を内蔵した軽量(約 3kg)の一体型であり、バッテリー駆動のため機動性を要求される計測を円滑に行うことができる。

3.2 計測用貯水槽

本研究において使用する水槽は、写真-2に示すステンレス製一体型水槽である。この水槽は板厚 2.0mm であり、壁面はコルゲート構造を有している。材質はSUS444(高純度フェライト系ステンレス鋼)を使用しており、水深 1740mm まで注水して計測を行う。ステンレス製一体型水槽の諸元を表-1に示す。

3.3 微動計での計測

微動計は、図-2(a)に示す通り貯水槽天板の中心付近(■印に示す位置)に設置する。ここでは貯水槽の長辺方向

を x 軸, 短辺方向を y 軸とし, x, y の加速度を測定する。バルジングは壁面が弾性体であることから, 壁面が変形しながら振動を発生する現象である。そのため z 軸方向の応答加速度も計測, 解析を行うが, 本研究では検討の対象外としている。

本計測では, 貯水槽の常時微動計測の他, プラスチックハンマーで SUS タンクの長辺壁面, 短辺壁面をそれぞれ小さく叩いたときの計測も行う。ここでの微動計測は, サンプル周波数 1000Hz で行う。

3.4 加速度計での計測

微動計測の妥当性を確認するため, 加速度計を水槽壁面に取り付けての計測も同時に行う。加速度計は, (株)共和電業製の小型低容量加速度センサ変換器 AS-5GB を用いる。加速度計での計測は図-2(b), (c)に示すように, 長辺壁面, 短辺壁面には受台上から高さ 900mm の位置に加速度計を 1ヶ所ずつ設置し, それぞれ微動計と同時に計測する。長辺壁面の●印は y 軸方向の加速度, 短辺壁面の▲印は x 軸方向の加速度をそれぞれ計測することを示している。また加速度計の感度方向は, 貯水槽の膨らむ方向を正 (+), 凹む方向を負 (-) とする。ここでの加速度計の計測は, サンプル周波数 1000Hz で行う。

3.5 微動計測

本計測では, 微動計を天板に置いた状態で, 表-2 に示す 3 種類の計測を行う。Test1 は常時微動計測, Test2 は長辺壁面を軽く叩いた時の微動計測, Test3 は短辺壁面を軽く叩いた時の微動計測を行う。

図-3, 4, 5 にそれぞれ Test1, 2, 3 の x, y 方向の微動計から得られた応答加速度を示す。各計測の応答加速度には計測者が微動計を設置するため, 貯水槽天板を歩行した加速度が含まれている。ここで Test1 はスペクトル解析を行うにあたり計測者が貯水槽天板を歩行した際の振動を考慮し, 図-3 の範囲に示した 40~120s 間の応答加速度をスペクトル解析する。Test2 では図-4 に示すように, 計測し始めてから約 5 秒後に長辺壁面を軽く叩いた際にオーバーフローしているため, この部分を切り取り 10 秒後からスペクトル解析を行う。Test3 では図-5 に示すように, 計測し始めてから約 12 秒後に短辺壁面を軽く叩いた際にオーバーフローしているため, この部分を切り取り 17 秒後からスペクトル解析を行う。

3.6 固有振動数解析

計測結果との比較を行うため, 貯水槽の固有振動数解析を行う。ここでは汎用有限要素解析ソフトウェアである ADINA¹²⁾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連成させての解析が可能なことである。

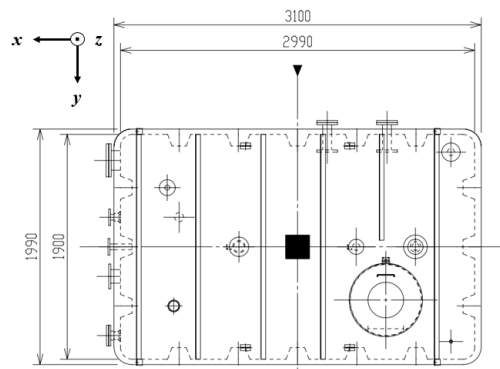
本解析で用いる貯水槽の解析モデルを図-6 に示す。ここで短辺壁面に直交方向を x 軸, 長辺壁面に直交方向を

表-1 ステンレス製一体型水槽諸元

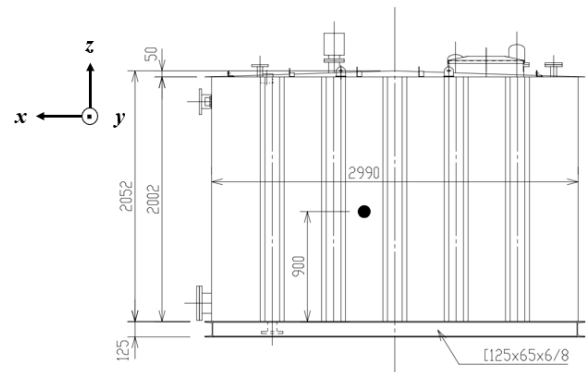
材質	SUS444
幅(mm)	1900
長さ(mm)	2990
高さ(mm)	2000
有効容量(m ³)	9.5
水位(mm)	1740
屋根板厚(mm)	2.0
側板厚(mm)	2.0
底板厚(mm)	2.0

表-2 微動計を天板に置いての計測

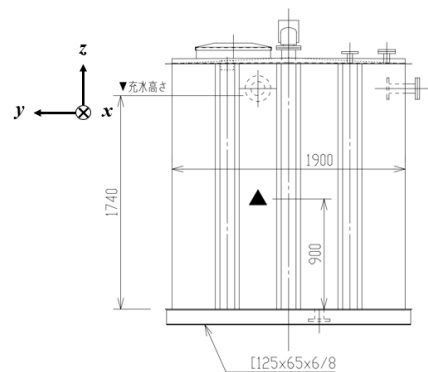
Test1	常時微動計測
Test2	長辺壁面を叩いた微動計測
Test3	短辺壁面を叩いた微動計測



(a) 天板 (平面図) (■ : 微動計)

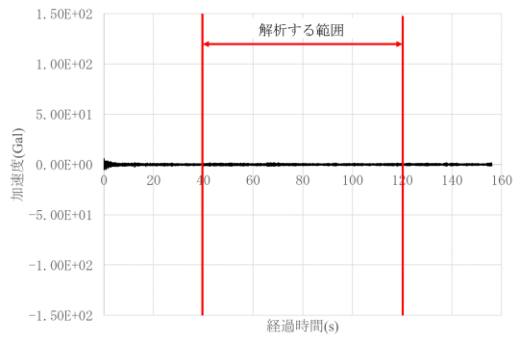


(b) 長辺壁面 (正面図) (● : 加速度計(y))

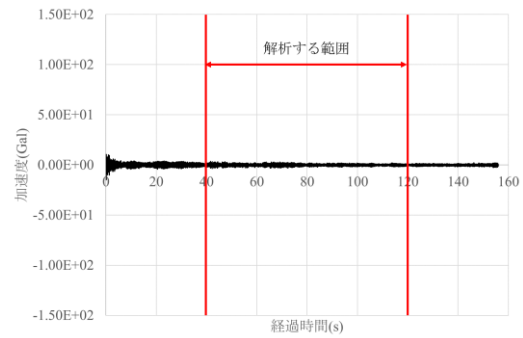


(c) 短辺壁面 (右側面図) (▲ : 加速度計(x))

図-2 微動計及び加速度計設置位置

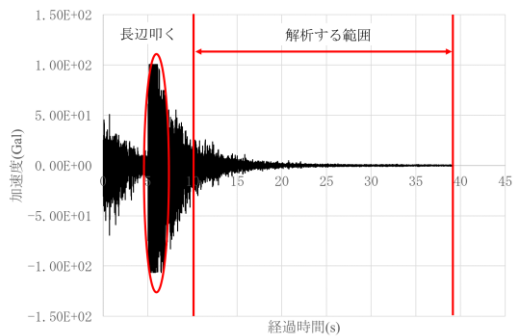


(a)x 方向

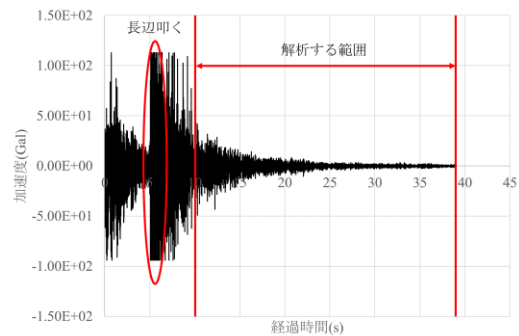


(b)y 方向

図-3 Test1 微動計測による応答加速度 (常時微動)

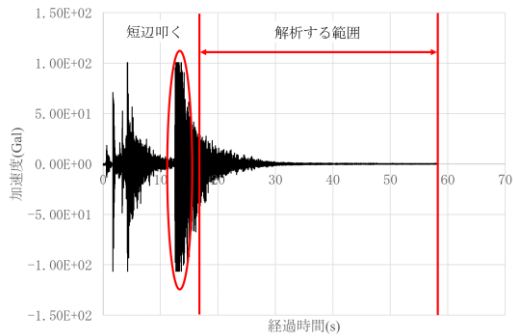


(a)x 方向

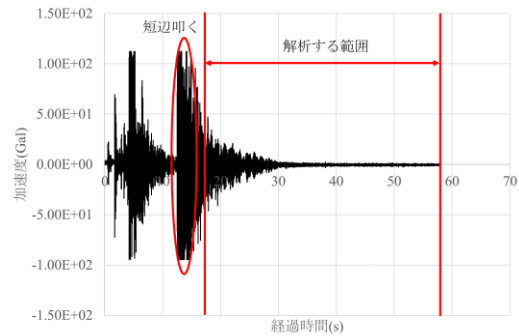


(b)y 方向

図-4 Test2 微動計測による応答加速度 (長辺壁面を軽く叩く)



(a)x 方向



(b)y 方向

図-5 Test3 微動計測による応答加速度 (短辺壁面を軽く叩く)

y 軸とする。解析条件は、水槽部を Shell 要素、流体水面を自由水面とする。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解析を実施する。なお、要素数は 78030 で、水槽部は 15938、流体部は 62092 である。また拘束条件は底面部 4 辺の変位と回転を固定している。

バルジング固有振動数は、落合の研究¹⁰⁾を考慮して固有振動数解析の範囲を 0~20Hz とする。この 0~20Hz の間において、1Hz 毎に固有振動数解析を行い、それぞれ 1000mode の範囲で固有振動数を算出する。一般に固有振動数解析は、決められた周波数領域で一括して行われる。しかし、この方法を本研究で採用すると、スロッシングモードが卓越して刺激係数として顕著に表れることになる。これに対してバルジングモードの刺激係数は、小さ

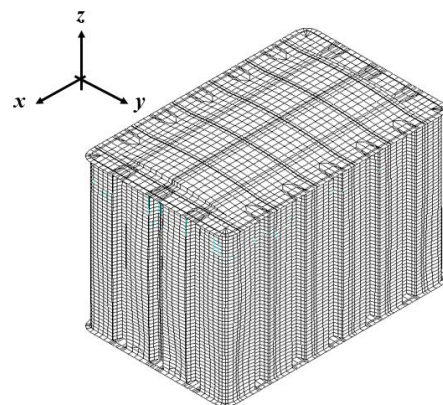
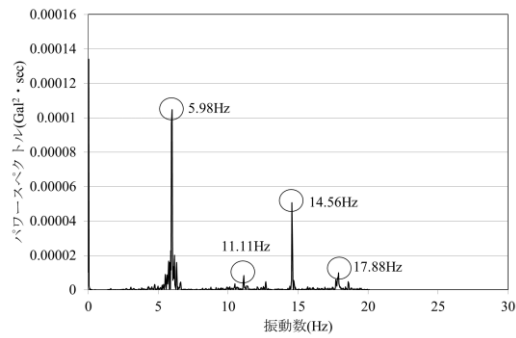
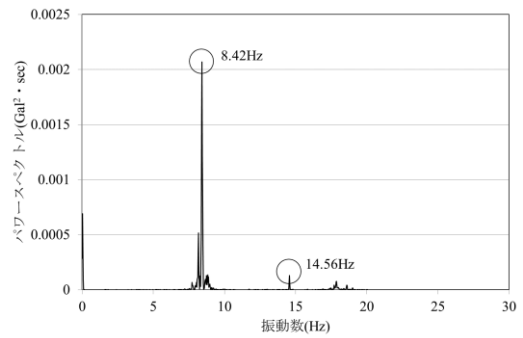


図-6 貯水槽の解析モデル

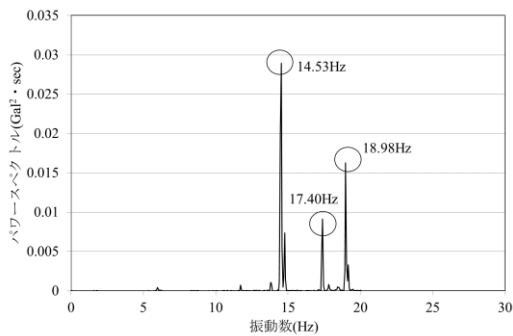


(a) x 方向

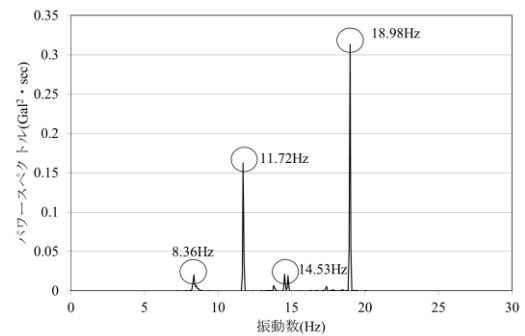


(b) y 方向

図-7 Test1 微動計測によるスペクトル解析結果 (常時微動)

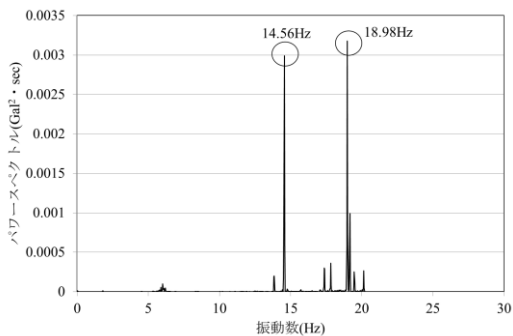


(a) x 方向

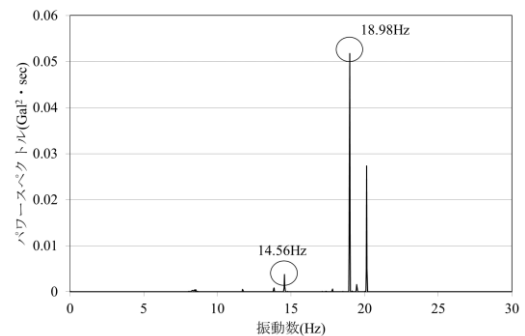


(b) y 方向

図-8 Test2 微動計測によるスペクトル解析結果 (長辺壁面を軽く叩く)



(a) x 方向



(b) y 方向

図-9 Test3 微動計測によるスペクトル解析結果 (短辺壁面を軽く叩く)

な値となり明確に表れないので、見落とす可能性がある。よって本研究では、竹本ら¹²⁾が提案した従来の予め決められた広い振動数幅で一括して固有振動数解析を行うのではなく、この振動数幅の間隔を細かく区切って固有振動数解析を繰り返し行う手法を採用する。これにより、一括して振動数の幅で解析することで、見落とす可能性が高いバルジングモードの刺激係数を算出することを可能としている。

ここで算出された刺激係数は、以下の手順でバルジングの固有振動数の確認を行う。

1. x, y 方向の刺激係数を確認し、 10^{-4} より大きい刺激係数を抽出する。
2. 1 で確認できた刺激係数に対応するモード図を算出してこれを確認する。

4. 計測結果

4.1 微動計測のスペクトル解析結果

図-7, 8, 9 は、水槽天井部に設置した微動計から得られた3種類の各計測でのx, y方向の応答加速度をスペクトル解析した結果である。

ここで20Hzより大きい振動数は、前述の通り対象範囲外であるので、20Hz以下のローパスフィルタ処理を施してからスペクトル解析を行っている。

(1) x 方向

図-7(a)から5.98Hz, 11.11Hz, 14.56Hz, 17.88Hzで、図-8(a)から14.53Hz, 17.40Hz, 18.98Hzで、図-9(a)から14.56Hz, 18.98Hzでスペクトルが卓越していることがわかる。

いずれの計測でも 14.5Hz 付近で卓越している。また図-8(a), 9(a)から長辺壁面, 短辺壁面それぞれを軽くプラスチックハンマーで叩くと, 19.0Hz 付近にも卓越振動数が存在していることが確認できる。よって, x 方向では 14.5Hz 付近, 19.0Hz 付近に壁面の固有振動数が存在している。このため 14.5Hz 付近ならびに 19.0Hz 付近にバルジング固有振動数が存在している可能性があるとして推測できる。

(2) y 方向

図-7(b)から 8.42Hz, 14.56Hz で, 図-8(b)から 8.36Hz, 11.72Hz, 14.53Hz, 18.98Hz で, 図-9(b)から 14.56Hz, 18.98Hz でスペクトルが卓越していることがわかる。

x 方向と同様, いずれの計測でも 14.5Hz 付近で卓越している。また図-8(b), 9(b)から長辺壁面, 短辺壁面それぞれを軽くプラスチックハンマーで叩くと, 19.0Hz 付近にも卓越していることが確認できる。よって, y 方向でも 14.5Hz 付近, 19.0Hz 付近に壁面の固有振動数が存在している。このため 14.5Hz 付近ならびに 19.0Hz 付近にバルジング固有振動数が存在している可能性があるとして推測できる。

(3) 貯水槽天板の振動数

図-7 から x 方向では 5.98Hz に, y 方向では 8.42Hz 付近にスペクトルピークが存在している。一方, 図-8, 9にはこれらの値がスペクトルピークとして存在しないことから, 5.98Hz や 8.42Hz は壁面の振動数ではなく別の振動数である可能性がある。これは微動計を貯水槽天板の中心付近に設置したことにより, 算出された天板の固有振動数の可能性がある。また, 設置条件を含めた水槽全体の振動モード, あるいは設置箇所の建物, 地盤の応答を含んでいる可能性もある。そこで天板を歩行した振動により, 貯水槽天板の固有振動数を把握しやすくなるため, 図-3 の 0~40s までの計測者の歩行時の応答加速度をスペクトル解析した結果を図-10 に示す。一般的に人間の歩行時の振動数は 1~2Hz であるため, 2~20Hz でバンドパスフィルタ処理をしてスペクトル解析を行っている。図-10 から x 方向では 5.98Hz, y 方向では 8.39Hz と図-7 とほぼ同じような結果を得られたことから, これらの値は壁面の固有振動数ではなく, 天井部の固有振動数の可能性がある。このように微動計測で天板の固有振動数が卓越して算出された要因として, 貯水槽内部が内容液で満たされていないことで, 天板が壁面部分と比べて揺れやすいことが挙げられる。

4.2 加速度計のスペクトル解析結果

短辺壁面と長辺壁面に設置された加速度計から得られた計測ケース毎の応答加速度をスペクトル解析した結果を図-11, 12, 13 に示す。ここで, 短辺壁面に設置された加速度計から得られるスペクトルは x 方向の振動数を, 長辺壁面に設置された加速度計から得られるスペクトルは y 方向の振動数を示す。

表-3 固有振動数と刺激係数

固有振動数(Hz)	刺激係数		
	x	y	z
...
8.504	-322.351	-28.78	12.845
...
9.592	-128797	417.589	-474.548
...
11.796	0.205	-0.018	0.059
...
13.089	0.295	0.191	-0.076
...
13.975	0	0.196	0.002
...
14.163	0.002	-0.201	-0.010
...
18.749	1310.710	-1054.380	162.957

なお, 加速度計から得られた応答加速度は, 計測者が貯水槽天板の歩行が終了し, 十分に貯水槽の振動が収まってから計測を開始している。よって得られた加速度波形の切り取りを行わず, そのままスペクトル解析を行っている。また, 微動計と同様加速度計も 20Hz 以下のローパスフィルタ処理をしてスペクトル解析を行っている。

(1) 短辺壁面 (x 方向)

図-11(a)から 11.72Hz, 14.50Hz, 17.36Hz, 19.16Hz で, 図-12(a)から 11.72Hz, 14.47Hz, 17.36Hz, 18.98Hz で, 図-13(a)から 17.36Hz, 18.98Hz でスペクトルが卓越していることがわかる。

いずれの計測でも 17.3Hz 付近, 19.0Hz 付近で卓越している。また, 図-11(a), 12(a)から 11.7Hz 付近, 14.5Hz 付近にも卓越していることがわかる。よって, 短辺壁面に設置された加速度計から x 方向は 11.7Hz 付近, 14.5Hz 付近, 17.3Hz 付近, 19.0Hz 付近に壁面の固有振動数が存在している可能性がある。

(2) 長辺壁面 (y 方向)

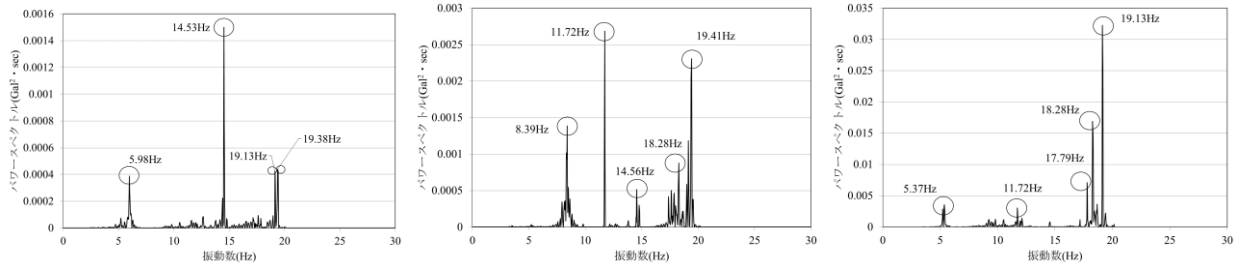
図-11(b)から 11.72Hz, 14.56Hz, 17.36Hz, 18.98Hz で, 図-12(b)から 11.72Hz, 13.82Hz, 14.56Hz, 17.36Hz, 18.98Hz で, 図-13(b)から 14.56Hz, 18.98Hz でスペクトルが卓越していることがわかる。

いずれの計測でも 14.5Hz 付近, 19.0Hz 付近で卓越している。また, 図-11(b), 12(b)から 11.7Hz 付近にも卓越していることがわかる。よって, 長辺壁面に設置された加速度計から y 方向は 11.7Hz 付近, 14.5Hz 付近, 19.0Hz 付近に壁面の固有振動数が存在している可能性がある。

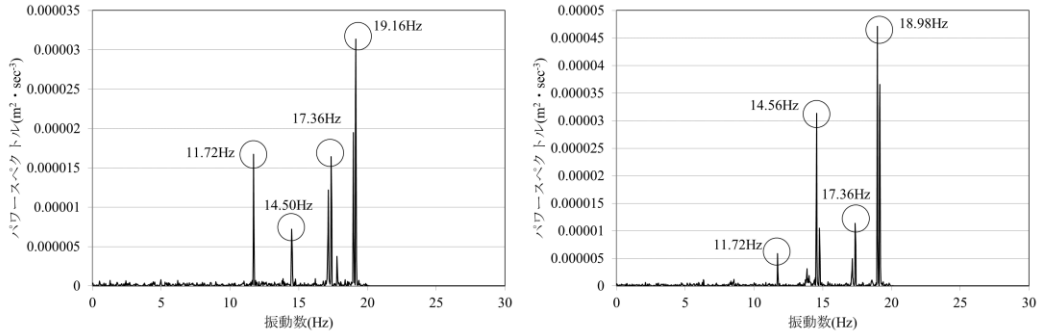
5. 固有振動数解析結果

固有振動数解析により算出された固有振動数と刺激係数を表-3 に示す。また, 算出した刺激係数から推定したモード図と固有振動数を図-14 にそれぞれ示す。

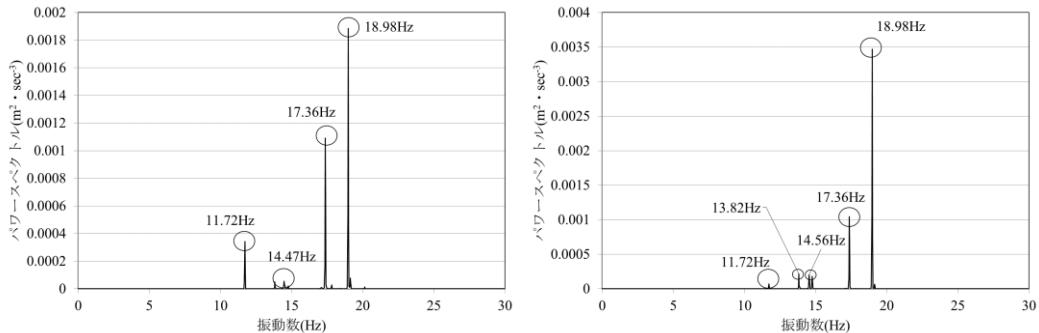
図-14(a)の 8.504Hz は, 天板部分にモードが表れていることから, これは天板部分の固有振動数であると推定される。よって, 壁面の固有振動数からバルジング固有



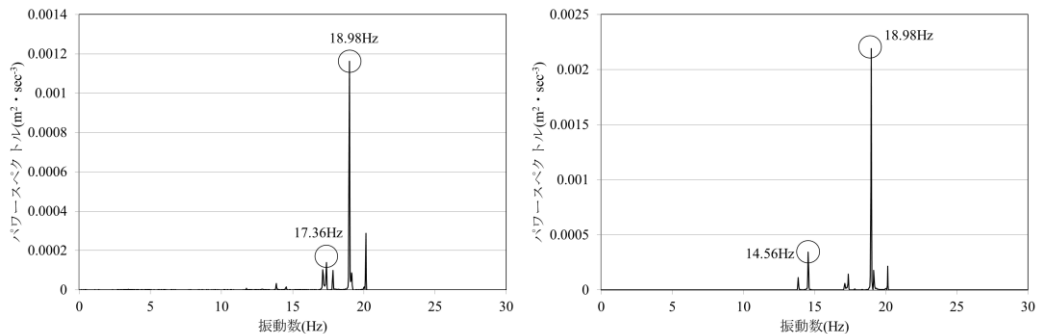
(a) x方向 (b) y方向 (c) z方向
図-10 Test1 貯水槽天板歩行時の微動計測によるスペクトル解析結果 (常時微動)



(a) 短辺壁面 (x方向) (b) 長辺壁面 (y方向)
図-11 Test1 加速度計スペクトル解析結果 (常時微動)



(a) 短辺壁面 (x方向) (b) 長辺壁面 (y方向)
図-12 Test2 加速度計スペクトル解析結果 (長辺壁面を軽く叩く)



(a) 短辺壁面 (x方向) (b) 長辺壁面 (y方向)
図-13 Test3 加速度計スペクトル解析結果 (短辺壁面を軽く叩く)

振動数を推定する場合は、8.504Hz を除外して考えることにする。

図-14(b)の9.592Hzは、 x 、 y 方向の刺激係数の値が大きい。一方9.592Hzは、 x 、 y 方向の刺激係数の値が大きい18.749Hzのほぼ1/2の振動数であることから9.592Hzは、18.749Hzの倍振動の影響を受けているものと考えられる。また、 z 方向の刺激係数の絶対値は9.592Hzが大きいですが、壁面での z 方向は壁面が膨らむ方向ではないため、バルジング振動を推定する場合、考慮する必要はないと判断する。一方、計測では9.5Hz付近には卓越する振動数は得られていないことから、固有振動数解析で得られた9.592Hzの固有振動数は、壁面のバルジング振動への影響は小さいと考えられる。

図-14(c)の11.796Hzは長辺壁面(y 方向)で顕著にモードが出ている。また、短辺壁面(x 方向)や天板にもモードが出ていることから、貯水槽の天板を含む壁面全体の固有振動数である可能性が高い。

図-14(d)~図-14(g)の13.089Hz、13.975Hz、14.163Hz、18.749Hzは、長辺壁面(y 方向)にモードが発現していることがわかる。これより13.089Hz、13.975Hz、14.163Hz、18.749Hzが、壁面の固有振動数である可能性がある。

以上の解析結果から、バルジングの固有振動数は、11.796Hz、13.089Hz、13.975Hz、14.163Hz、18.749Hz付近に存在する可能性が高い。

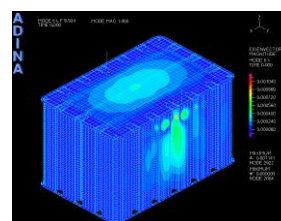
6. 計測結果と固有振動数解析結果との比較

微動計と加速度計の2つの計測結果から、 x 方向、 y 方向ともに11.7Hz付近、14.5Hz付近ならびに19.0Hz付近に卓越振動数が存在している。一方、固有振動数解析においても11.796Hz、14.163Hzならびに18.749Hzが計測結果と近接する値を有している。これらのことから、微動計を貯水槽天板の中心付近に設置することで、簡易的に貯水槽の壁面の固有振動数を把握できたと考える。これにより、貯水槽のバルジング固有振動数を算出できていると考えられる。

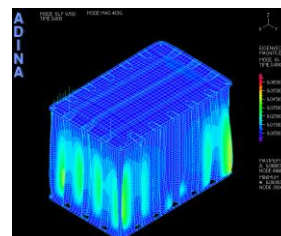
ここで、11.7Hz付近の値が微動計、加速度計の計測結果で卓越振動数として存在しており、特に長辺壁面を軽く叩く場合、 y 方向にモードが顕著に表れている。さらに固有振動数解析の結果を見ると壁面のみならず天板にもモードが生じていることから、貯水槽全体構造の固有振動数である可能性が高い。

次に14.5Hz付近の値が、図-8、9の x 方向、 y 方向ともに振動数の卓越が見られる。さらに、図-14(f)と比較すると隅角部下部付近にモードが表れている。ところでバルジングによる損傷は、隅角部下部付近に生じている事例が多いことから、このモードはバルジング固有振動数の一つであると考えられる。

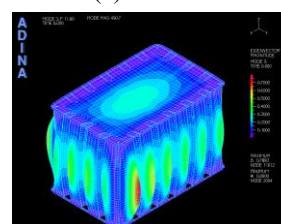
一方、微動計測のスペクトル解析の結果と固有振動数解析結果から8.5Hz付近の振動数の卓越が得られている。



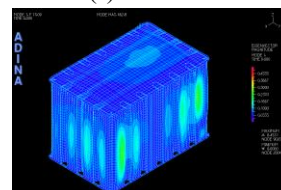
(a) 8.504Hz



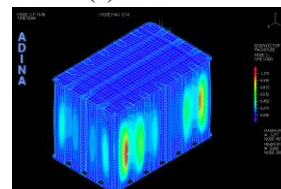
(b) 9.592Hz



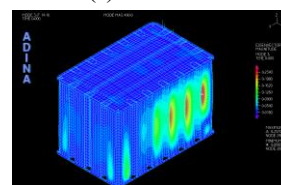
(c) 11.796Hz



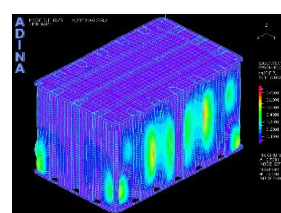
(d) 13.089Hz



(e) 13.975Hz



(f) 14.163 Hz



(g) 18.749Hz

図-14 モード図と固有振動数

これは、壁面の固有振動数ではなく天井板の固有振動数である可能性が高い。したがってバルジング振動数を把握する場合、8.5Hz 付近の値を除外して考える必要がある。

7. おわりに

本研究は、ステンレス製一体型水槽を用いて、貯水槽天板に設置した微動計ならびに長辺壁面、短辺壁面にそれぞれ設置した加速度計から得られる加速度から壁面の固有振動数を算出し、固有振動数解析結果と比較することを行った。これら計測結果と解析結果から、微動計ならびに加速度計から得られる値は、固有振動数解析で得られた値とおおむね一致した。このことから、本研究で提案した貯水槽天井板の中心付近に微動計を設置し、プラスチックハンマーなどで壁面を軽く叩くなどの外乱を与えることで、簡易的に貯水槽のバルジング固有振動数を求められる可能性が示された。なお、バルジング固有振動数を正確に求めるには、現状では有限要素法による固有振動数解析などで微動計による計測結果を補完することが望ましい。ここで注意すべき点は、貯水槽天板の固有振動数を含む場合があるため、天板に対しても外乱を与えて算出された値を除外してバルジング振動数を考える必要がある。

また本研究で使用した貯水槽のバルジング固有振動数は、計測結果と固有振動数解析の結果から、11.7Hz、14.5Hz 付近、19.0Hz 付近であることが確認されている。既往の研究¹⁰⁾から10Hzを超える加速度は、耐震設計強度上の考慮が不要であることから、本研究で扱うバルジングでは、考慮する必要のない振動数域と考える。よって本研究に使用した貯水槽は、バルジング振動に対しては安全であり、制振装置を取り付ける必要はないと判断する。

今後検討すべきことは、既存の実機貯水槽での計測の実績を積むことである。さらに、形状や材質の異なる貯水槽を対象とした場合にも、微動計を貯水槽天板に設置することで簡易的に貯水槽のバルジング固有振動数を把握できるか否かについてである。

謝辞

本研究を行うに際し、中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻 白井航太氏及び同大学理工学部都市環境学科 平井秀氏、鈴木ゆり氏の学生の協力を得た。ここに記して謝意を述べる。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)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 小野泰介, 遠田豊, 竹本純平, 平野廣和: 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.
- 2) 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.
- 3) 国立研究開発法人建築研究所: 平成28年(2016年)熊本地震による建築物等被害第五次調査報告(速報), 2016.
- 4) 井上涼介, 坂井藤一, 大峯秀一: 2016年熊本地震における水槽被害および地震動特性との関連について, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.711-720, 2017.
- 5) 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, pp.404-411, 2017.
- 6) 小野泰介, 竹本純平, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 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.76, No.4, pp.66-74, 2020.
- 7) Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tank, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol.53, No.2, pp.381-387, 1963.
- 8) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説 2022年版, 2022.
- 9) 強化プラスチック協会: FRP 水槽構造設計計算法(1996年版), 1996.
- 10) 落合兼寛: 原子力発電所の耐震性能を知る—震発生後の電力安定供給のために—, 日本原子力学会誌, Vol.56, No.2, pp.12-16, 2014.
- 11) 大野紗希, 小野泰介, 竹本純平, 宮本裕太, 平野廣和: 非耐震仕様のFRP製貯水槽を用いてのバルジング特性の把握とその制振対策の検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.78, No.4, pp.511-522, 2022.
- 12) 竹本純平, 小野泰介, 平野廣和, 佐藤尚次: ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての時刻歴応答解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.76, No.2, pp.153-162, 2020.

(2022年9月20日受付)

(2023年2月10日受理)