

## 既存ステンレス製一体型貯水槽のバルジング固有振動数の把握

中央大学 学生会員 ○平井 秀 (株) エヌ・ワイ・ケイ 正会員 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

バルジングに関する設計基準が新たに提案されるに至っている。しかし耐震設計上必要な既存の貯水槽のバルジング振動数を把握する方法は、現状では室内実験段階<sup>1)</sup>で微動計測装置を用いて簡易的に測定する方法の提案に限られている。具体的には、小型貯水槽の天井部に微動計測装置を設置し、側板部分を軽く叩く事により振動を計測するものである。そこで本報では、既存の配水池に設置されているステンレス製一体型貯水槽である WSP 方式の貯水槽を取り上げ、現地計測と有限要素解析から得られる固有振動数を算出し、両者の比較を行い、本手法の有効性と汎用性を示す。その結果、既存貯水槽の耐震性能に関する調査や点検への適用を目指すものである。

## 2. 現地計測

## 2.1 計測対象の貯水槽

本計測は、既存のステンレス製一体型貯水槽の振動計測を行う。本貯水槽は容量 307.8m<sup>3</sup> の WSP 方式の貯水槽である。貯水槽諸元を表-1 に示す。

## 2.2 微動計測装置

微動計測には、(株)白山工業製の DATAMARK JU410 の一体型微動計測装置(以下、微動計)を用いる。ここでは微動計を天井に設置し、側板をプラスチックハンマーで軽く叩き、振動を発生させている。これによりバルジング固有振動数が求められることが示されている<sup>1)</sup>。

## 3. 微動計観測

## 3.1 計測位置

微動計設置位置は図-1 に示す様に貯水槽天井の①~④の4箇所<sup>2)</sup>に設置する。

## 3.2 計測内容

本計測では貯水槽の常時微動計測に加えて、貯水槽の長辺、短辺をプラスチックハンマーでそれぞれ小さく叩いたときの計測も行う。微動計のサンプリング周波数は 1000Hz とする。ここで貯水槽の短辺方向を x 軸、長辺方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、x, y, z の加速度を測定する。また、本計測は表-2 に示す 5 つの条件でそれぞれ計測を行う。Case1 は常時微動計測、Case2, 3, 4, 5 は貯水槽天井部①, ②, ③, ④の各位置に微動計を設置し、側板を軽く叩いた時の微動計測を行う。

## 3.3 計測データの分析方法

Case2, 3, 4, 5 では計測開始後側板を軽く叩いているため、一定の減衰状態に移行したと判断できる所からスペクトル解析を行う。

本報は電源周波数を考慮し、50Hz のローパスフィルタを施し解析を行う。なお 50Hz 以上は解析の対象外とする。

## 3.4 固有振動数の推定方法

スペクトル解析の結果からバルジング固有振動数を推定する。推定方法は以下に示す手順で行う。

表-1 貯水槽諸元

材質(液相部)	SUS316
材質(気相部)	SUS329J4L
幅(mm)	9000
長さ(mm)	9000
高さ(mm)	4500
有効容量(m <sup>3</sup> )	307.8
水位(mm)	3800
屋根板厚(mm)	2.0mm以上
3段目側板板厚(mm)	2.0mm以上
2段目側板板厚(mm)	4.0mm以上
1段目側板板厚(mm)	4.0mm以上
底板板厚(mm)	3.0mm以上
アニュラプレート板厚(mm)	6.0mm以上

表-2 計測条件

	位置	計測種類
Case1	①	常時微動
Case2	①	側板を叩く
Case3	②	側板を叩く
Case4	③	側板を叩く
Case5	④	側板を叩く

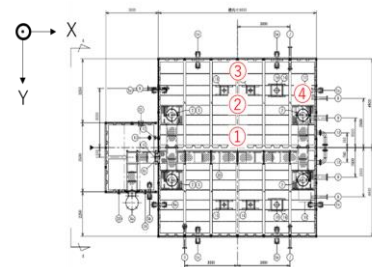


図-1 微動計設置位置

- (1) Case1 の計測から得られたパワースペクトルの内、最も卓越している振動数を確認する。この時、内部に配置されている補強材等の固有振動数となっている可能性があることに留意する。
- (2) Case2~5 のパワースペクトル、卓越振動数を x, y 方向でそれぞれ確認する。
- (3) (1)で確認した卓越振動数と一致しているものを抽出する。

## 3.5 固有振動数の測定結果

図-2(a)より常時微動計測である Case1 より x 方向で最も卓越したのは 27.00Hz である。図-2~6(a)より側板を叩いた Case2~5 において x 方向でそれぞれ共通して卓越したのは 23.47Hz, 26.95Hz が代表的な値である。

図-2(b)より常時微動計測である Case1 より y 方向で卓越したのは 22.16Hz, 26.31Hz, 27.00Hz である。図-2~6(b)より側板を叩いた Case2~5 において y 方向でそれぞれ共通して卓越したのは 21.75Hz, 24.93Hz, 26.98Hz が代表的な値である。よって、長辺方向は 21~26Hz, 短辺方向は 22~27Hz が固有振動数であると考えられる。

## 4. 固有振動数解析

## 4.1 解析内容

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 ADINA を用いる。ADINA 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である。

本解析には図-7 に示すモデルを用いる。ここで貯水槽の長辺方向を x 軸、短辺方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。解析条件は、水槽部を Shell 要素、補強材は Beam 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解析を実施する。拘束条件は底面周りの辺の変位と回転を固定している。固有振動数解析の範囲は微動計での計測結

果を考慮して20~40Hzとし、算出された刺激係数よりバルジング固有振動数を推定する。推定方法は以下に示す手順で行う。

- (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)で確認した刺激係数に対応するモード図を算出して確認する。

## 4.2 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。また算出された刺激係数から算出した固有振動数とそのモード図を図-8に示す。図-8(a)の23.93Hzは $x$ 方向の側板全体に顕著なモードが発生している。一方、 $y$ 方向はモードがほとんど発生していないことからこの値は側板の固有振動数である可能性が高い。図-8(b)の24.27Hzは $x$ ,  $y$ 方向共に顕著なモードが表れており、側板の固有振動数であると推定される。なお $x$ ,  $y$ 方向共にモードが表れているのは両方向の固有振動数が近接していることが原因であると考えられる。図-8(c), (d)の26.06Hz, 27.05Hzは隅角部や側板の一部にのみモードが表れている。モードが発生している箇所と補強材の溶接部分が概ね一致していることから、これらの値は補強材の固有振動数であると推定される。以上より、側板の固有振動数は長辺、短辺方向共に23~24Hzである可能性が高い。

## 5. 計測結果と固有振動数解析の比較

微動計の計測結果から、長辺方向は21~26Hz、短辺方向は22~27Hzに卓越振動数が存在している。一方、固有振動数解析は長辺、短辺方向共に23~24Hzにおいて側板にモードが発生している。以上より、本計測を行うことで側板の固有振動数を概ね把握できたと考える。ここで、計測では27Hz付近の卓越振動数が確認された。固有振動数解析の結果を確認すると、補強材にモードが発生していることから、これらの値は補強材の固有振動数である可能性が高い。また、計測では30Hz代にも卓越振動数が確認できる。原因として、電源周波数の半分の値に近接していることから交流電源の倍振動を計測した影響や周辺の生活振動を計測した影響があると考えられる。以上より、本報で用いた貯水槽のバルジング固有振動数は、長辺方向は21~25Hz、短辺方向は22~26Hzの範囲に存在する可能性が高い。

ところで、自然界での地震振動数は概ね10Hz以下であり、それ以上となった場合も地震としてのエネルギーは小さいとされている<sup>2)</sup>。よって本報で用いた貯水槽はバルジング振動に対して安全であると考えられる。

## 6. おわりに

本報では、既存のWSP方式のステンレス製一体型の貯水槽を用いて計測を行い、貯水槽天井に設置した微動計から得られる加速度から側板の固有振動数を算出した。また、貯水槽の固有振動数解析を行い、計測結果との比較を行った。計測結果と解析結果から、微動計測によって得られる値は、固有振動数解析から得られた値と概ね一致した。以上より、本報で示した貯水槽の天井部に微動計測装置を設置し、側板部分を軽く叩く事により振動を計測する手法はバルジング振動を捉えるための新たな手法として有効であり、実務への適用も十分に可能であると考えられる。また、本報で用いた貯水槽のバルジング固有振動数は、長辺方向は21~25Hz、

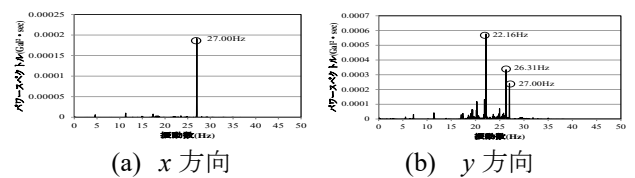


図-2 Case1におけるパワースペクトル

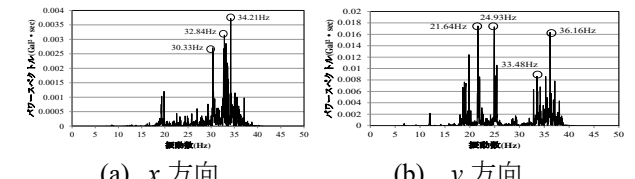


図-3 Case2におけるパワースペクトル

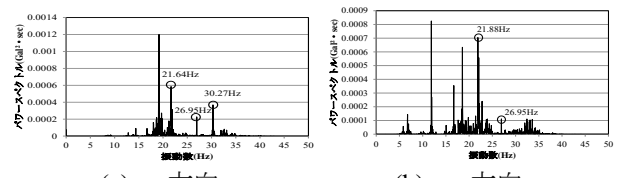


図-4 Case3におけるパワースペクトル

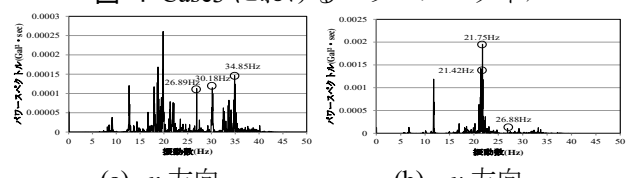


図-5 Case4におけるパワースペクトル

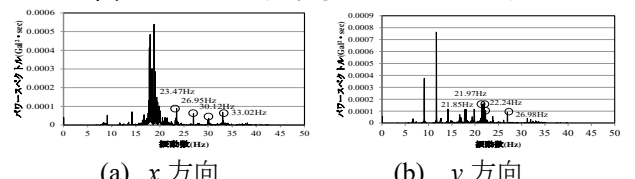


図-6 Case5におけるパワースペクトル

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
23.927	12370.400	4747.450	-19826.100
24.272	17958.100	380.159	700.962
26.059	695.482	1576.960	973.529
27.049	5486.350	-1116.604	-2775.430

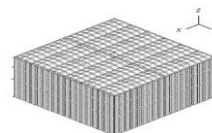


図-7 貯水槽の解析モデル

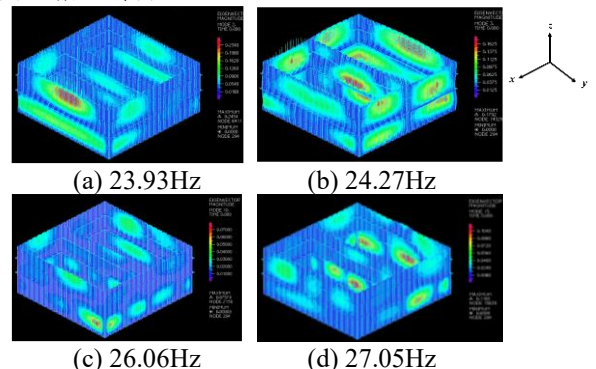


図-8 固有振動数とそのモード図

短辺方向は22~26Hzであると推定される。これは10Hz以上の地震については考慮が不要<sup>2)</sup>であることから、バルジング振動に対して安全であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 齊藤崇他: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, 土木学会 構造工学論文 Vol.69A 2023.3 (投稿中)
- 2) 落合兼寛:原子力発電所の耐震性能を知る-震災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.