

矩形容器において方向角を変化させた場合のスロッシング現象の解析

○中央大学 学生会員 榎本 みのり 中央大学大学院 学生会員 竹本 純平
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

日本ステンレス工業会のパネル式ステンレス製タンクの設計指針¹⁾によると、貯水タンクのスロッシングの固有振動数導出は、矩形タンクにおいても円筒形の式を用いている。タンク断面が正方形であればこの考え方も成り立つ可能性はあるが、断面が長方形であれば短辺と長辺があることからこの考え方は適用できない可能性が高い。

一方、遠田²⁾の矩形断面容器で加振振動数を一定として回転角度毎の波高の特性を捉える振動実験によれば、正方形断面の場合と長方形断面の場合とはその特性が異なることを指摘している。長方形断面においては、長方形の短辺と長辺を代表長としたスロッシングの固有振動数が存在する。これに対して正方形断面は長辺と短辺が等しい特別な例となっている。

このようなことから、本報では数値解析により遠田らの振動実験を再現する事を行うものである。ところで、遠田らの実験と同一の条件で計算を行う場合には、通常は時刻歴応答解析を行う必要がある。しかし、この解析には多くの計算時間を要することになる。これに対し本報では、簡易的にこの現象を求める計算方法として固有振動数解析を行い、これより刺激係数を求めて、卓越固有振動数を算出する手法を提案するものである。

この結果、振動実験結果を再現する事ができるとともに、日本ステンレス工業会の設計指針の問題点を指摘できたのでここに論ずるものとする。

2. 解析方法

本解析では、汎用有限要素法プログラム ADINA を用いてスロッシング現象の固有振動数解析を行う。ADINA は構造解析のみならず、構造問題や流体問題を一つのマトリクスで解く構造-流体連成解析が可能である。今回の解析対象である容器は、流体部と構造部が相互に影響するため、連成解析が可能なこのプログラムを使用することとする。

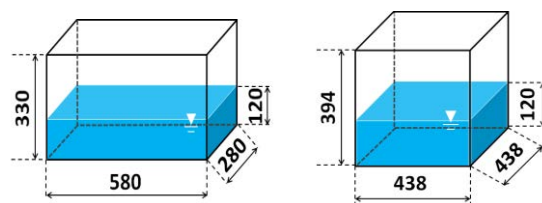
図-1 に解析に用いる矩形容器としての(a)長方形断面容器と(b)正方形断面容器のモデルを示す。

2.1 固有振動数解析

スロッシング現象により波高が最も大きくなるのは、入力振動数とスロッシング固有振動数が一致して共振する場合である。そこで、矩形断面容器のスロッシング n 次モード振動数の理論値を式(1)の Housner³⁾の理論式から算出し、解析値と比較する。

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right)} \quad (1)$$

ここで f [Hz] はスロッシング固有振動数、 g [m/s²] は重力加速度、 L [m] は容器の幅、 H [m] は水深である。表-1



(a) 長方形断面容器

(b) 正方形断面容器

図-1 解析モデル

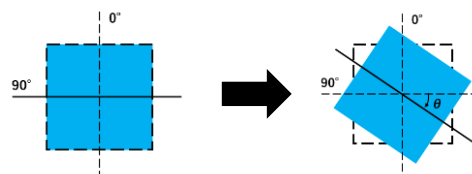


図-2 方向角の設定

表-1 容器のスロッシング n 次モード振動数

	水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
正方形	120	438	1.11	2.3
長方形	120	580	0.88	1.97
		280	1.56	2.89

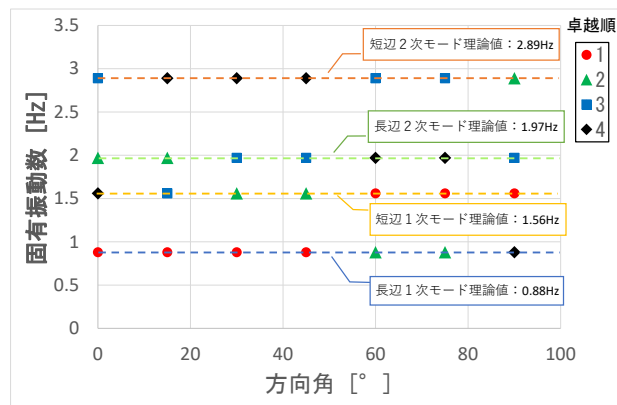


図-3 方向角変化時の固有振動数（長辺方向）

表-2 角度ごとの刺激係数値（長辺方向）

刺激係数 角度	長辺1次 (0.88Hz)	短辺1次 (1.56Hz)	長辺2次 (1.97Hz)	短辺2次 (2.89Hz)
0	3.73019	1.5697E-11	0.93395	4.2624E-11
15	3.59828	0.828631	0.90125	0.173033
30	3.22694	1.60299	0.807325	0.334763
45	2.63721	2.26884	0.660216	0.473908
60	1.86351	2.77468	0.467394	0.579456
75	0.964888	3.09405	0.239773	0.646097
90	2.3587E-10	3.20909	9.7576E-05	0.670346

キーワード：スロッシング、固有振動数

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL. 03-3817-1816 Fax. 03-3817-1803

に解析で用いた容器のスロッシング 1 次, 2 次モード振動数の理論値を示す。

容器を設置する方向角 θ を図-2 のように定義し, $\theta=0^\circ\sim90^\circ$ の間で設定する。長方形容器の場合には, 方向角を 15° 間隔で設定し, 正方形容器の場合には, 方向角を 5° 間隔で設定する。また, 長方形容器については長辺方向, 短辺方向それぞれについて解析を行うこととする。

3. 解析結果

図-3 に長方形断面容器長辺方向における方向角変化時の固有振動数の変化を示す。ここで理論値とは式(1)より求めた方向角 0° におけるスロッシング固有振動数である。方向角 0° の時, 長辺 1 次, 2 次モードの順で固有値が卓越した。しかし, 角度を変化させるにつれて 50° 付近から短辺方向のモードが出現し固有値が短辺方向へと移り始め, 方向角 90° の時には, 短辺方向のみの卓越となった。表-2 に角度ごとの刺激係数值, 図-4 に表-2 を元に作成した方向角と刺激係数值の関係図を示す。この図表からも角度を増加させると長辺方向は刺激係数の値が小さくなり, 短辺方向は大きくなるのが分かる。短辺方向についても, 長辺方向と同様に角度を変化させることで, 短辺方向から長辺方向へと固有振動数が変化していく結果となった。

図-5 に正方形断面容器における方向角変化時の固有振動数を示す。長方形断面容器とは異なり, スロッシング固有振動数は 1 次モード 2 次モード共に, 一定の値を取っていることが確認できる。表-3 に示す刺激係数值もほぼ一定の値をとっている。

以上の結果から, 矩形容器において辺長比が異なる場合, 方向角を変化させることで他辺の固有振動数が混在することが確認できた。一方で辺長比の等しい正方形断面容器では, 方向角が変化してもスロッシング固有振動数は変化しないということが分かる。

ここで, 正方形断面容器方向角 0° について, 図-6(a) にスロッシング 1 次の固有振動数である 1.11Hz , (b) にスロッシング 2 次の固有振動数である 2.30Hz の液面モード図を示す。図-6(a)(b)共に 1 次モード, 2 次モードの波形を再現できており, 解析の再現性を示すことができている。これは実験での液面モードとも一致している。

4. おわりに

本研究では, 方向角を変化させた矩形容器に対し, 固有振動数解析で得られた刺激係数を角度毎に整理した。その結果, 辺長比が異なる時には他辺の固有振動数が混在すること, 方向角が重要な要素になることを示すことができた。これにより, 日本ステンレス工業会の設計指針に記されている円筒形の式を用いてスロッシング固有振動数を算出することには, 問題があると考えられる。長辺と短辺を用い, かつ方向角を考慮した設計を行うことがスロッシング対策の設計には必要になると思われる。

今後の課題として, 時刻歴応答解析を行う場合の減衰の表現方法の検討を行い, 解析による実験結果の再現性向上を行う。

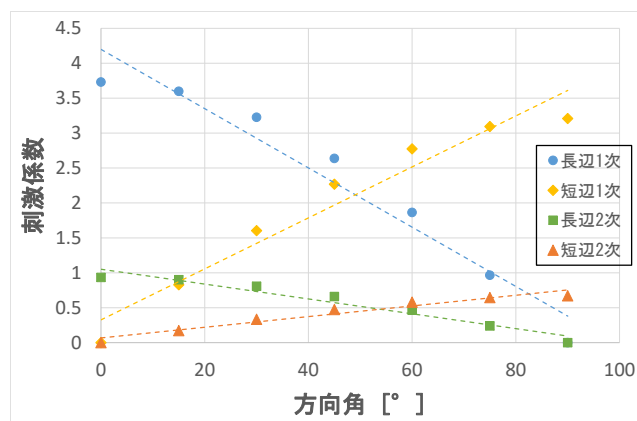


図-4 方向角と刺激係数值の関係

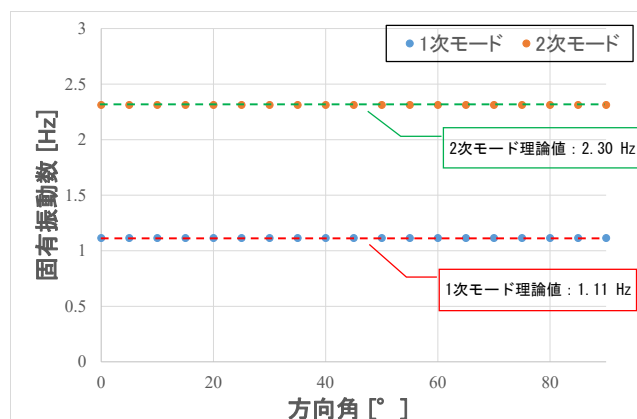
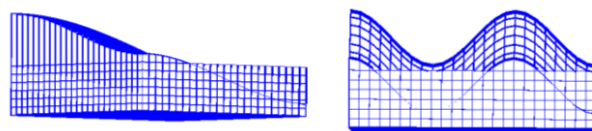


図-5 方向角変化時の固有振動数 (正方形)

表-3 角度ごとの刺激係数值 (正方形)

刺激係数 角度	1次モード (1.11Hz)	2次モード (2.30Hz)
0	2.797	0.659
5	2.909	0.830
10	3.390	0.667
15	2.794	0.604
20	2.780	0.684
25	3.885	0.719
30	3.873	0.693
35	3.705	0.833
40	2.793	0.767
45	3.075	0.617
50	3.815	0.780
55	3.241	0.786
60	2.905	0.717
65	2.961	0.778
70	3.136	0.764
75	3.853	0.797
80	3.779	0.684
85	2.769	0.748
90	2.797	0.659



(a) 1 次モード(1.11Hz) (b) 2 次モード(2.30Hz)

図-6 正方形断面容器方向角 0° の液面モード

参考文献

- 1) 日本ステンレス工業会設計指針, 2013
- 2) 遠田豊, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.78, No.2, 2012.
- 3) Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tank, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol.53, 1963.