

地震対策を目指した液面固有振動モードの解析

I.T. <科①ゼミ>

1. はじめに

液体の入った容器が振動すると、共振がおこって液面が大きく揺れ、液体が溢れたり容器が損傷することがある(スロッシング)[1]。2003年十勝沖地震では、震源から比較的離れた苫小牧市の石油タンクにおいて、石油と長周期地震動の共振により大きな振動が発生しタンクが破損、大規模火災が発生した[1]。このような被害に対して各施設で適切な対策を講じるために、個別の容器内で液体が共振しやすい固有周期を知ることが必要であるが、発生する振動のモードによって全く異なる固有周期を持つことがある。そこで、矩形水槽の長さとお水深の比によって、発生する固有振動モードがどのように変化するかを調べた。



(図1)実験に用いた水槽(35×42×30cm)



(図2)実験の模式図

2. 仮説・調査方法

2.1 仮説

波長に比べて水深が十分に大きい深水波の場合、底付近ではあまり振動しない。一方浅水波の場合、水全体がほぼ水平に運動するような波が生じるため、底面との流体摩擦などのエネルギー損失が生じやすくなり、結果的に水深が浅くなると波長の短い高次モードが卓越して発生するという仮説を立てた。

2.2 実験内容

水槽に加振して波を発生させ、水面で計測した加速度波形をフーリエ変換して周波数スペクトルを得た。1分間のスペクトルで最も長時間ピークが継続した周波数を共振しやすい周波数と見なし、振動モードごとの理論値(→式2)と比較することで、発生した定常波のモードを推定した。

2.3 理論値の算出法

水面波の速度は次のような式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

(c:波の速度 λ:波長 h:水深 π:円周率 g:重力加速度)

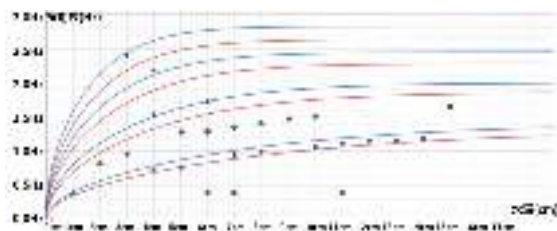
矩形水槽の固有振動数が自由端で反射する定常波の振動数と等しいと考えると、(式1)のλを、波長と長さl、定常波の節数nの関係により置き換えて変形することができ、次のような振動数の理論値が得られる(→式2)。

$$f_{req.} = \sqrt{\frac{ng}{4l\pi}} f\left(\frac{n\pi h}{l}\right) \quad (2)$$

$$f(x) = \tanh(x)$$

3. 実験結果

3.1 計測の結果



横軸:水深[cm] 縦軸:振動数[Hz]
プロットした点は測定した値、赤のグラフは長辺方向の理論値、青のグラフは短辺方向の理論値で、下から順に(定常波の節の数)=1,2,3,4の場合を表す。

実験の結果、長辺方向の $n=1$ の振動に整合する結果が多く得られたが、両方向のどの振動にも整合しない固有振動も発生したことがわかった(図3)。



(図4)長辺・短辺方向の振動の節数と辺の長さに対する水深の比(横軸:水深[m]÷辺の長さ[m],縦軸:節の数)

理論値に整合的なデータを集計し、横軸に水深と辺の長さの比、縦軸に節数 n を取った結果(図4)、振動する辺の長さに対して水深が浅いほど、一次に加えて高次モードも卓越して発生したことがわかった。

4. 考察

図4で得られた結果は仮説と矛盾する点はないが、図3では長辺・短辺方向の振動では説明がつかない固有振動モードを表す結果が得られた。これがどのように生じたものであるかは定かではないが、矩形水槽の固有振動数が単純な定常波だけでは表せない場合があるか、あるいは水の粘性などの無視した要素が影響して理論値とズレが生じた可能性がある。また、水深が深い条件では発

生しなかった高次モードの固有振動も、浅い条件では見られたため、高次モードであるほど水深の浅い条件下で発生しやすくなると考えた。

5. 今後の課題

今回の実験では理解しがたい結果も得られたため、周波数だけでなく観測した加速度波形そのものを詳細に分析したり、シミュレーション等を用いてスロッシングの挙動を観測と照らし合わせる必要となる。

また、実際の地震動の卓越周波数帯と照らし合わせることで、地震によるスロッシングのリスクをより定量的に評価できると考える。

謝辞

研究を進めるにあたり、実験や分析について助言して下さった指導員の木浦さんに心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1]地震調査研究推進本部HP「大型石油タンクの地震時安全性向上のための研究開発」(https://www.jishin.go.jp/resource/column/column_18win_p0 8/)(最終閲覧日2024年2月7日)
- [2]Egon Krause, “Fluid Mechanics”, Springer Japan, 2008