

傾斜側壁を有する容器内のスロッシング挙動

電力中央研究所 正会員 ○高畠 大輔
電力中央研究所 正会員 豊田 幸宏

1. はじめに

2003 年十勝沖地震で発生した石油タンクの火災など、スロッシングが原因とされる被害が多々報告されており、そのメカニズムや対策に関する研究事例は多く存在する。一方、ため池などの貯水地においても、地震時のスロッシングにより溢水などの被害が発生することが考えられる。貯水池は建設コストや施工のし易さから、側壁を傾斜させることがあるが、これまでに甚大な被害事例がないため、傾斜壁を有する容器（以下、傾斜壁容器）内のスロッシングに関する研究事例は少ない。小野ら¹⁾は傾斜角と固有周期の関係について検討しているが、傾斜角によるスロッシング波高や減衰定数に関する検討はされていない。

本稿では、貯水池のような傾斜壁容器内のスロッシングに関して、傾斜角がスロッシング波高や減衰定数に及ぼす影響について述べる。

2. 数値計算手法

本研究では傾斜壁容器内のスロッシング挙動を分析するため、水面を VOF 法²⁾によって追跡する 3 次元流体解析コードを用いた数値流体計算を実施した。図 1 に計算モデルの一例を示す。計算モデルは傾斜壁（鉛直壁も含む）を有する容器で、容器側壁の傾斜角と初期水位を計算パラメタとした。ただし、ここでは鉛直 2 次元断面におけるスロッシング挙動について分析するため、奥行き方向の側壁はすべてのケースで鉛直壁とした。計算座標系は、容器底面中心を原点とした直交座標系で、幅方向 x 軸、奥行き方向 y 軸、鉛直方向 z 軸である。

入力波形は、各ケースの固有円振動数を次式¹⁾により計算し、その振動数と加速度振幅 50gal の正弦波 3 波であり、x 軸方向に与えた。

$$\omega' = \sqrt{gk' \tanh(k'h)} \quad (1-1)$$

$$k' = \pi/L' \quad (1-2)$$

$$L' = L + 2h/\tan \alpha \quad (1-3)$$

ここで、 ω' は固有円振動数、 g は重力加速度、 h は初期推移、 L は底面幅、 α は傾斜角である。尚、容器底面と側壁における境界条件はフリースリップ条件とした。

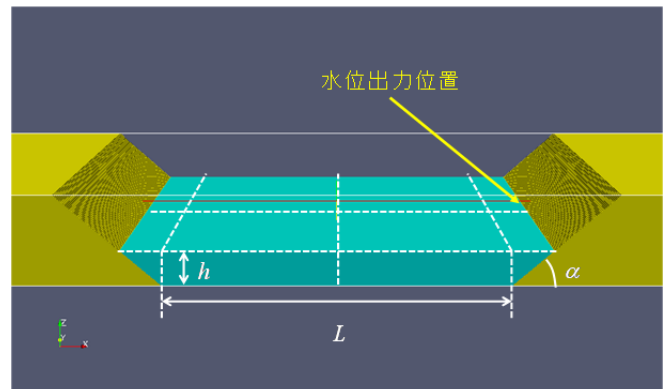


図 1 計算モデル

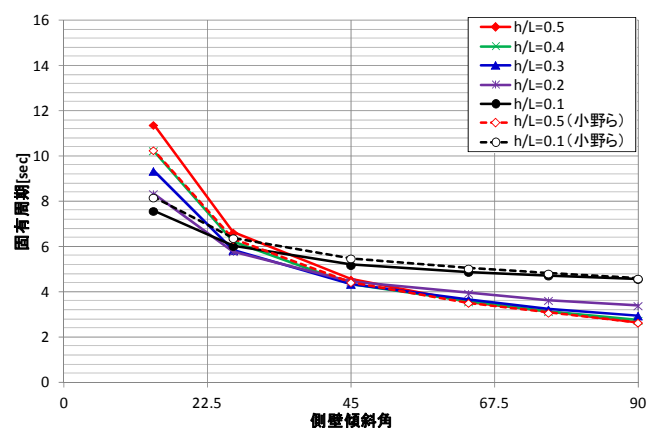


図 2 傾斜角と固有周期

3. 傾斜角がスロッシングに及ぼす影響

L を固定し、 h_0/L と α をパラメタとして、固有周期、遡上距離及び減衰定数に及ぼす影響を検討する。本研究では、 $L=2,5,8\text{m}$ で計算しているが、本稿では $L=5\text{m}$ についてのみ示す。ただし、これらの結果は無次元化により同等の結果となることを確認している。

3.1 固有周期

図 2 に傾斜角と固有周期の関係を示す。ここでは、 h_0/L を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 の 5 通り、 α を 14.04 度 ($\tan\alpha=0.25$)、26.57 度 ($\tan\alpha=0.5$)、45 度 ($\tan\alpha=1$)、

キーワード スロッシング、斜面境界、貯水池、固有周期、減衰定数

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 04-7182-1181

63.43 度 ($\tan\alpha=2$), 75.96 度 ($\tan\alpha=4$), 90 度 ($\tan\alpha=\infty$) の 6 通りとし, 人工地震波を入力し水位の時系列変化から固有周期を計算した. また, 小野らの式による結果を併記した. 同図より傾斜角が小さいでは小野らの結果との差が大きいが, 全体的によく一致することが確認できる.

3.2 遡上距離

図 3 に傾斜角と遡上距離, 遡上鉛直距離の関係を示す. ここで, 遡上距離とはスロッシングにより側壁を遡上した距離で, 静水時の水面位置から内溶液の最大到達点までの距離を入力波形の変位振幅で除した値で定義し, 図 3(a)には両側の側壁で定義した遡上距離の最大値を示している. また, 図 3(b)には $\sin\alpha$ を掛けた鉛直遡上距離についても示しており, 上記の定義から α が 90 度において両者は一致する. h_0/L が小さいケースでは, 傾斜角が遡上距離に及ぼす影響は小さいが, h_0/L が大きいほど遡上距離に及ぼす影響は大きくなり, 鉛直壁容器と傾斜壁容器を比べると, $h_0/L=0.1$ や $h_0/L=0.4$, $\tan\alpha=4$ のケースを除いて遡上距離が 2/3 程度以下に, また α が最小の傾斜壁容器では 1/3 倍程度小さくなる. 一方, $\tan\alpha$ が 0.25~4 の区間では遡上距離への影響は大きくない. 鉛直遡上距離についても同様の傾向を示しており, $h_0/L=0.4$, $\tan\alpha=4$ のケースを除いては α に対して単調増加の傾向を示す.

3.3 減衰定数

図 4 に傾斜角と減衰定数の関係を示す. 減衰定数は図 1 に示すように静水時の水面位置における水位の減衰自由振動曲線における振幅比から算出した. h_0/L に着目すると, これらの差による減衰定数への影響は小さく, どの h_0/L においてもほぼ同等の値となっている. 一方, 傾斜角に着目すると, 直立壁に比べて傾斜壁の方が, 減衰定数が大きくなる傾向にあり, 特に, $\tan\alpha$ が 1 以下のケースでは減衰定数が大きくなる. しかし, $h_0/L=0.1$ では傾斜角による減衰定数への影響が見られず全体的に他の h_0/L に比べて大きくなった. この原因については今後検討する.

4. まとめ

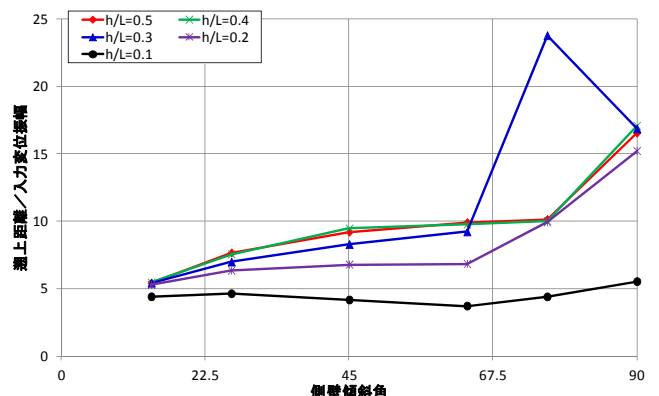
本研究では, 傾斜壁を有する容器におけるスロッシング挙動について, 傾斜角が遡上距離や減衰定数に及ぼす影響を数値流体計算により検討した. その結果, 傾斜角が小さいほど遡上距離や遡上鉛直高さは小さく,

減衰定数は大きくなる傾向にあることが示された.

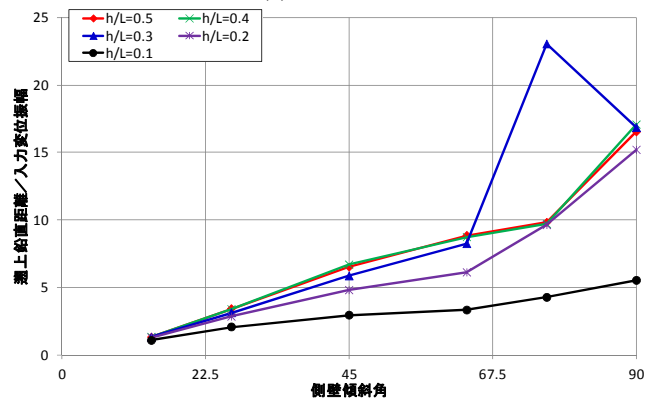
今後は再現実験による境界条件の評価方法や, 3 次元による影響の検討を実施する予定である.

参考文献

- 1) 小野祐輔, 緒方浩二, Charles Scawthorn: 傾斜側壁を持つ貯水池におけるスロッシングの固有周期, 応用力学論文集, Vol.11, pp.557-563, 2008
- 2) Hirt, C.W. and B.D. Nichols: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of computer physics, Vol.39, pp.201-225



(a)遡上距離



(b)遡上鉛直距離

図 3 傾斜角と遡上距離・遡上鉛直距離

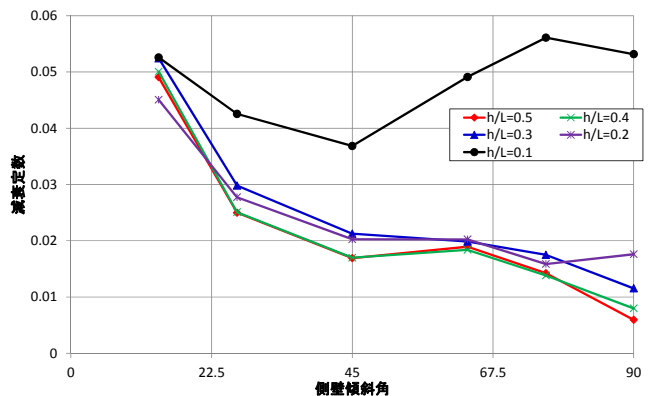


図 4 傾斜角と減衰定数