第Ⅱ部門

スロッシング発生時における矩形水槽内の平板に作用する流体力に関する数値計算

(株)オリエンタルコンサルタンツ 学生員 小森 遥菜 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 重松

研究背景・目的 1.

静止液体が入っている容器に地震動などの外部振動 が作用すると,容器内の液体が激しく揺動するスロッ シング現象が発生することがある.2011年に発生した 東日本大震災では震源から遠く離れた浄水場の沈殿池 内に沈降促進のために設置されている傾斜板が変形・ 落下するなどの被害が発生したため,水道水の水供給 に大きな支障が生じたと報告されており,スロッシン グが原因ではないかと推測されている.今後,南海ト ラフ地震や直下型の活断層型地震などの大型の地震が 高い確率で発生すると言われており、発災時の被害の 軽減ならびに災害後の迅速な水供給の観点から傾斜板 の変形・落下対策を講じることが求められている.

このような状況に鑑み,本研究では静水中に傾斜板 が設置された矩形水槽内でスロッシングが発生した際 に,傾斜板に作用する流体力を定量的に予測する手法 を開発することを目的とする.

計算手法 2.

本研究では構造物体表面における境界条件を厳密に 満足させるため, Immersed Boundary Method (以後 IB法と称す)を適用した.IB法は,物体表面におけ る境界条件を課しこれを満足させるように強制外力を 流体に作用させる手法である.本研究では鉛直2次元 問題を対象とし,流体の支配方程式には非圧縮粘性流 体に対する質量保存則(1)と運動方程式(2)を用いた. 数値計算ではこれらの式を直交格子点上に離散化し, スタッガード配置した流速および圧力を算定した¹⁾.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla) \, \boldsymbol{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} + \boldsymbol{g} \qquad (2)$$

ここに, ρ は流体密度, μ は流体の粘性係数,uは速 度ベクトル, pは圧力を表す.gはNavier-Stokes 式の 外力項で,重力加速度を含む外部加速度ベクトルを表 している.FはIB法において表面物体で作用反作用 の関係が成立するように付加される強制外力である. なお,水面位置の計算には VOF 法を用いた. IB 法で は物体表面上に Lagrange 点を配置し, この Lagrange 点上の運動量を0とすることによって平板上の境界条

孝昌

件を満足させた.平板厚は1.0×10⁻³mとし,平板の 両面にdk/dx = 0.1となるよう Lagrange 点を配置し て計算を行った.ここで, dk は Lagrange 点間の距離, dx は直交格子間距離を表している.なお,本研究で は, dx = dz = 0.01m として計算した. Lagrange 点 における物理量の算定には,外向き法線方向の平板領 域外部補間点における流速や圧力の値を直交格子デー タから補間して用いた.

計算結果 3.

(1) 理論値との水位変動量比較

構築した数値計算モデルの妥当性を確認するため, スロッシング発生時の応答波高を高山ら²⁾の理論値 と本手法による計算結果の比較を図-1に示す.ここ で,応答波高とは静水状態の水面からの水位変動量を 指す.計算条件は加振振幅 2.0×10^{-3} m,加振振動周 期 5.5s, 容器幅 0.9m, 水深 0.2m である. 同図より両 者は良好に一致していることが見てとれる.時間が経 過するにつれて理論値よりも計算結果のほうが山が大 きく,谷が小さくなる傾向にあるがこれは倉木ら³⁾の 計算結果と同様の傾向を示している.

(2) 傾斜板枚数と応答波高

矩形容器内に傾斜板を設置した状態で水平に次式で 示す加速度を作用させてスロッシングを発生させた.

$$\alpha_x = a_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \tag{3}$$

ここに, a_0 は加速度振幅,Tは振動周期を表す.

矩形容器内の傾斜板枚数を複数枚設置して、水面変 動に及ぼす影響について検討した.計算領域を図-2に 示す.このとき,加振振幅を0.01m,加振周期を1.38s, 加速度振幅を $0.21 \mathrm{m/s^2}$,板の長さを $0.15 \mathrm{m}$,板傾斜 角度を 60 ℃した 図-3 に計算結果を示す. 同図より 傾斜板が容器内に存在することによって水面の変動が 抑制されていることが分かる.この傾向は宇佐美ら4) の実験結果と同様の傾向を示している.

(3) 傾斜板に作用する流体力

次にスロッシング発生時に傾斜板に作用する流体力 を求めた.図-4には,すべての傾斜板に作用する流 体力の総和より求めた傾斜板1枚あたりの流体力の経

Haruna KOMORI, Takaaki SHIGEMATSU , shige@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

時変化を示す.同図の F* は流体力を次式で示される 無次流体力である.

$$F^* = \frac{F}{\rho A a_0} \tag{4}$$

ここに, F は全傾斜板に作用する流体力の合力, ρ は 流体密度,Aは傾斜板の水平投影面積を示す.図-4よ り傾斜板の枚数が増えると傾斜板1枚あたりに作用す る流体力は減少することが分かる.次に傾斜板3枚の 場合の左端に配置された傾斜板の上端,中央,下端に 作用する流体力を図-5 に,傾斜板周りの渦度及び流 体力分布を図-6に示す.図-5によれば,上下端部に 作用する流体力が大きいことが分かる.上端部は流体 力そのものが大きく,またその変動も大きいが,下端 部に作用する流体力は上端部と同様に大きいものの, 変動は大きくない.これは,上端部に作用する流体力 は水面変動の影響を受けていることを示していると考 えられる.中央部の流体力は上下端部の流体力と比較 すると小さく, 極大・極小値の出現する位相が上下端 のそれとは異なる.この原因として,図-6に示す渦 の影響が大きいと考えられる。

4. 結論

本研究では IB 法を用いて流体中に設置された平板 の境界条件を厳密に満足させ,その存在が流体運動に 及ぼす影響を評価することが可能な数値計算手法を構 築した.同モデルを用いて計算を行った結果,以下の 結論が得られた.

- ・傾斜板の設置により、水面変動量が減少した.こ れよりスロッシングを抑制するに足る流体力が傾 斜板に作用していることが分かる。
- ・ 傾斜板の設置枚数の増加により、傾斜板1枚あた
 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・
- ・傾斜板に作用する流体力は不均一で,中央部より
 も上下端で大きな流体力が作用することが明らかになった.

参考文献

- 竹岡 佑介,重松 孝昌,中條 壮大:一方向流中に設置され た固体群に作用する流体力に関する数値計算,土木学会論 文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, P 761-765, 2010.
- 2) 高山知司:振動外力を受けるタンク内発生波の非定常解に ついて,港湾技術研究所報告, Vol.15, No.2, 1976.
- 3) 倉木宏成,武口達,澤田達男,棚橋隆彦: Arbitary Lagrangian-Eulerian GSMAC 有限要素法による非線形 水面波の数値解析,日本機械学会論文集 (B編), Vol.57, No.540, 1991.
- 4) 宇佐美仁貴,重松孝昌:矩形水槽内のスロッシングに及ぼ す傾斜板の影響に関する研究,土木学会関西支部学術講演 会,2014.



図-5 上端,中央,下端に作用する流体力の時間変化



図-6 t/T=1 における傾斜板周りの渦度及び流速分布