

OpenFOAM による移動格子を用いたスロッシング解析 の精度検証

小俣 哲平*¹・本田 隆英*¹

Keywords : sloshing, OpenFOAM, numerical simulation, hydrodynamic pressure, earthquake, STAR-CD
スロッシング現象, OpenFOAM, 数値解析, 動水圧, 地震動, STAR-CD

1. はじめに

タンクや水槽等の液体の入った構造物に、地震動等によって周期的な振動が与えられると、水面が大きくうねるスロッシング現象が発生する場合がある。2003 年十勝沖地震では、長周期地震動により苫小牧市にある石油コンビナートにおいて、スロッシング現象が発生し、石油タンクの火災や浮き屋根の沈没といった被害が生じている。スロッシング現象の解析手法はいくつかあるが¹⁾³⁾、例えば、数値流体解析 (CFD) を用いてスロッシング解析を実施する場合、流体に地震の加速度を体積力として与える方法が一般的である。しかしこの手法は、構造物に地震の変位を与えず、実現象とは異なる条件のため、浮体などが存在する場合に解析に不具合が生じる可能性がある。一方、オープンソースの CFD コードである OpenFOAM には、近年移動格子と呼ばれる格子自体を剛体としてあるいは変形を伴いながら並進運動や回転運動させる解析手法が導入された。これにより、構造物自体を直接振動させ、実現象と同じ条件でスロッシング解析が可能となった。

そこで本検討では、移動格子を使用したスロッシング解析を行い、水面変動および圧力分布の精度を既往の数値解析結果及び理論式と比較・検証した。解析対象は単純矩形の水槽とした。比較対象として既往の数値解析は、三次元流体解析ソフト STAR-CD により、計算された壁面近傍での水面挙動の時系列結果³⁾を、理論式との比較検証では、壁面近傍での水面挙動及び壁面に作用する動水圧について検証を行った。水面挙動の理論式には Housner 理論に基づく評価式⁴⁾を使用し、動水圧の精度検証にはポテンシャル解析に基づく

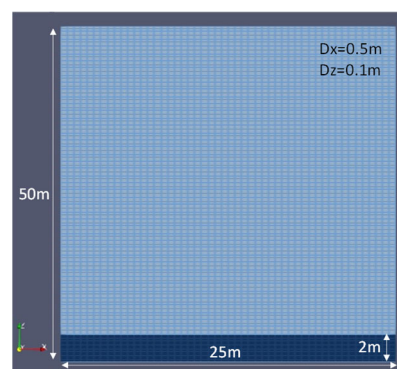


図-1 矩形水槽の計算格子 (断面図)
Fig.1 Computational mesh of rectangular tank

Westergaard 式⁵⁾を使用した。また、加速度入力による解析も実施し、変位入力による解析結果との違いを確認した。さらに、一般的に動水圧の発生には流体の圧縮性が寄与する⁵⁾。そこで、流体の圧縮性のスロッシング解析への影響を確認するため、圧縮性が考慮できる OpenFOAM の解析ソルバーである compressibleInterFoam を用いた計算を行った。

2. 解析条件

解析には、OpenFOAM の移動格子に対応した VOF 法に基づく非圧縮性気液二層流ソルバーである interFoam を使用した。解析は、長さ 25m、水深 2m の矩形水槽を基本モデルとし、図-1 のようにモデル化した。上面は大気圧開放とし、溢水がないように十分な高さとしている。解析は二次元で実施し、解析格子サイズは $dx = 0.5m$, $dz = 0.1m$, 最大時間刻み幅は 0.01 秒とした。加震は水平方向のみとし、使用した地震動は図-2 に示す防災科学技術研究所が公開する K-NET (全国強震観測

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

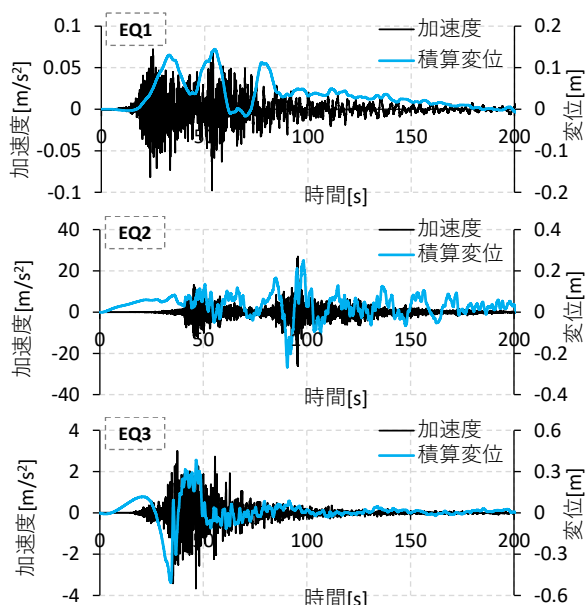


図-2 計算入力地震動
Fig.2 Input earthquake motion

網) および KiKnet (基盤強震観測網) による 3 種類の加速度時系列データまたは加速度の 2 回積分から算出した変位時系列データのいずれかを入力とした。また、スロッシング現象による水位変動は水槽壁面の摩擦抵抗により時間経過とともに低減していくため、乱流粘性に基づく壁関数の導入により壁面摩擦の影響を考慮した。

3. SATR-CD による解析結果との比較

3.1 既往解析手法について

既往解析結果として、汎用数値流体解析コード SATR-CD による結果と比較する。SATR-CD は、液相、気相のそれぞれについて連続式および Navier-Stokes 式から成る。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデル、自由液面の追跡には VOF 法を適用した。外力となる地震については、図-2 に示す EQ1 及び EQ3 の地震加速度を水槽内の流体に直接与えた。解析対象は図-1 に示す水槽とした。解析メッシュサイズは、 $dx = dy = 0.5 \text{ m}$ 、 $dz = 0.1 \text{ m}$ 、時間刻みは $dt = 0.05 \text{ s}$ とした。壁面の摩擦抵抗も考慮した

3.2 比較結果

OpenFOAM の解析条件は 2.1 節で記述した条件とした。図-3 に SATR-CD と OpenFOAM の壁面での水位変化の解析結果の比較を示す。同図より、両者の解析結果は概ね整合していることが確認でき、OpenFOAM の変位入力による解析手法は妥当であると考えられる。しかし、解析結果後半部においては水位の変動量は概ね同じであるが、位相に若干のずれが生じ、

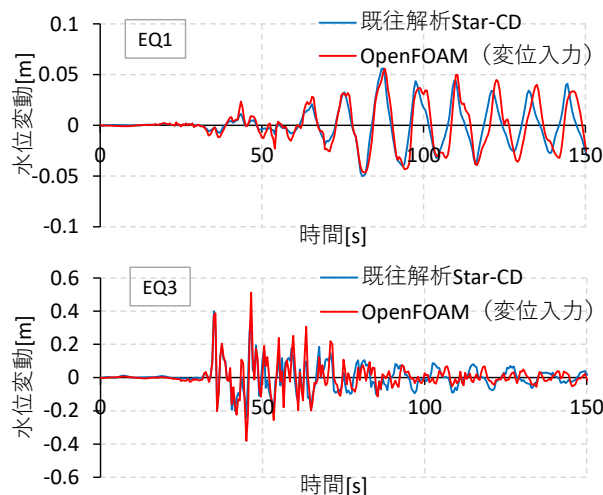


図-3 水位の既往解析との比較
Fig.3 Comparison with previous analyses of water level

OpenFOAM による解析結果は SATR-CD に比べて遅れが生じている。これは、壁面摩擦の違いが要因の一つとして考えられる。

4. 入力方法による結果の比較

壁面近傍での水位変動および壁面に作用する圧力の解析精度を理論値と比較するとともに、変位入力と加速度入力による結果比較を行った。

4.1 壁面近傍での水位の比較

水位変動の解析精度検証のため、Housner 理論による壁面での最大スロッシング高と比較した。Housner 理論では、水面変動に微小振幅を仮定し、水槽の固有周期に対応する地震動の応答速度から、最大スロッシング高を算出する。Housner 理論による最大スロッシング高 d_{max} は次式で表される。

$$d_{max} = \frac{0.5271 \coth(1.58 \frac{h}{l})}{\frac{g}{\omega^2 \theta_h l} - 1} \quad (1)$$

$$\theta_h = S_a \frac{\omega^2}{g}, S_a = \frac{S_v}{\omega} \quad (2)$$

$$\omega^2 = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{g}{l} \tanh\left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l}\right) \quad (3)$$

ここで、 g : 重力加速度、 $2l$: 水槽全長、 h : 水深、 S_a : 応答変位、 S_v : 応答速度である。

精度検証のケースは図-1 のモデルを基本に、水槽の長さを 5m~25m、水深を 1m~13m の幅で変更し、組み合わせた 10 ケースを対象に解析を実施し、壁面での水位変動の最大変位を比較した。入力した地震動は図-2 に示した EQ1 を使用した。

図-4 に解析で得られた最大スロッシング高と Housner

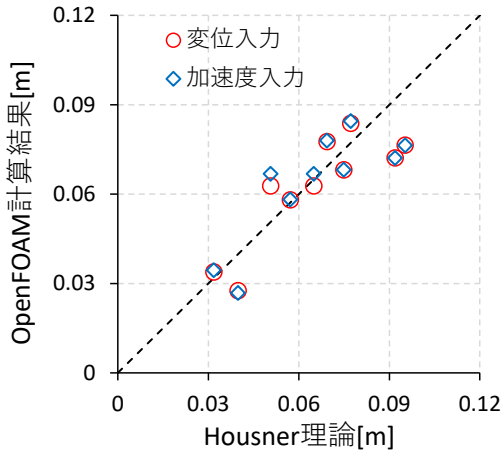


図-4 Housner 理論とのスロッシング高比較

Fig.4 Comparison of sloshing height with Housner theory

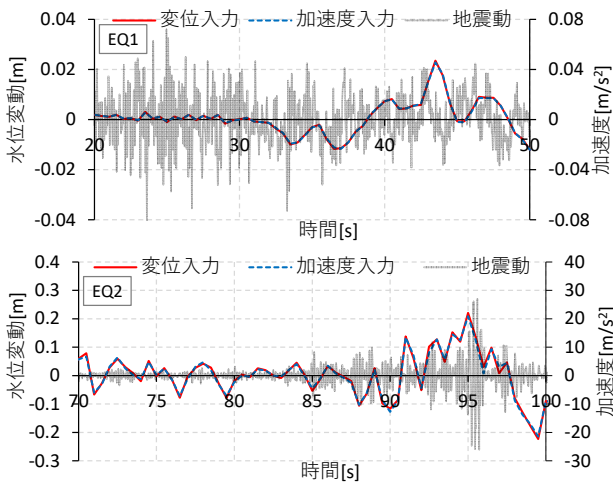


図-5 壁面近傍での水位時系列の比較

Fig.5 Comparison of water level time series near the wall

理論による理論値との比較結果を示す。同図より、変位入力による解析結果は理論値と概ね良好な一致を示していることが分かる。入力した地震動 EQ1 は、加速度が比較的小さく、Housner 理論の仮定である水面変動の微小振幅を大きく逸脱していないことから、Housner 理論、数値解析ともにスロッシング高を精度良く解析出来ていると考えられる。なお、最大誤差 30%程度の結果も見られるが、これについては壁面の摩擦や壁関数に関するパラメタ、水平方向の格子サイズについて今後詳細な検討が必要である。また同図には、従来の解析手法である加速度入力方法による解析結果も併記した。最大スロッシング高の解析結果について、変位入力と加速度入力の両手法による差異はほとんどないことが確認された。

図-5 に壁面近傍での水位時系列比較の結果の一例を示す。同図には、入力した地震動 EQ1 及び EQ2 の加速度波形を併記し、最大加速度が含まれる時間付近を示している。同図より、水位の変化は地震加速度に応答

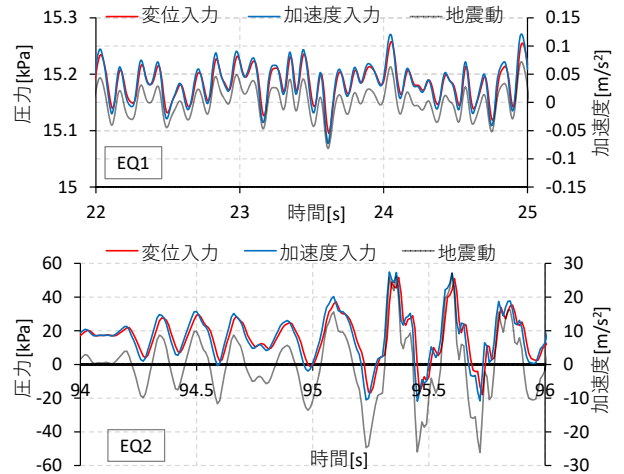


図-6 壁面の圧力時系列の比較

Fig.6 Comparison of pressure time series on the side wall

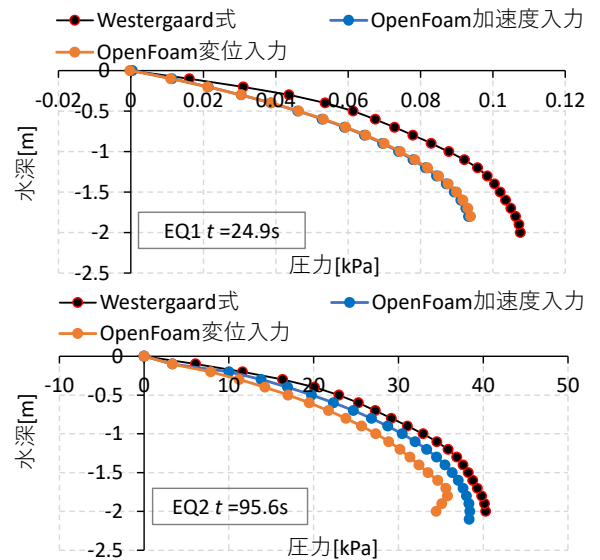


図-7 壁面動水圧の比較

Fig.7 Comparison of hydrodynamic pressure on the wall

していることが確認できるが、地震動 EQ1 で最大加速度が発生する 25 秒付近において水面変動が見られないのは、入力した地震度の周期が水槽の固有周期から外れているためと考えられる。2種類の地震動ともに、加速度入力と変位入力による水位変動の結果の差異はほとんど見られず、水位変動結果は入力手法に依存しないことが確認できた。

4.2 壁面に作用する圧力の比較

図-6 に、壁面の初期水面から 1.5m の深さ位置の圧力の時系列結果の比較を示す。水位の比較結果と同様に、地震動の最大加速度が発生する時刻付近を示している。同図より、2種類の地震動の圧力の解析結果は、両者とも加速度の時系列変化に反応して変化していることが確認できるが、変位入力の方が加速度入力に比較してわずかに小さくなっている。

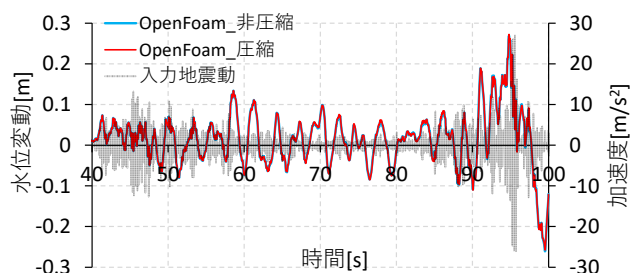


図-8 水位時系列の比較

Fig.8 Comparison of water level

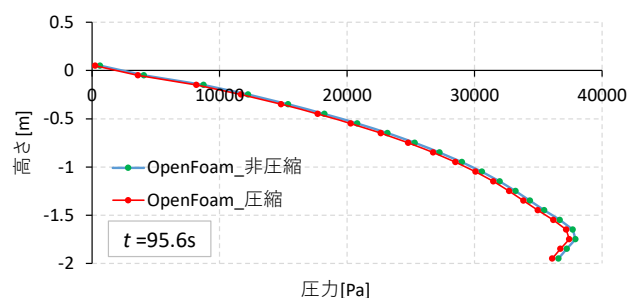


図-9 壁面動水圧の比較 (圧力最大時)

Fig.9 Comparison of hydrodynamic pressure on the wall

図-7 に、最大加速度発生時刻の壁面に作用する動水圧を示す。なお、水深は同時刻の水面を $z=0\text{m}$ として表記した。動水圧の理論値については、Westergaard 式を使用して算出した。同図より、動水圧の鉛直分布傾向は両手法ともに理論値に類似しているが、発生した動水圧が大きい地震動 EQ2 のケースでは、加速度入力の解析結果の方が理論値に近く、変位入力の解析結果は過少評価となっている。この要因として、入力した変位時系列データを加速度の積分により算定した際の誤差の影響が考えられる。入力変位データについては、再度 2 階微分を行い元の加速度データに一致することを確認しているものの、OpenFOAM の時間刻みによっては計算内で変位から算出される入力加速度が過少になっている可能性がある。また、加速度入力の場合、入力された加速度データを入力境界面セルの中央の加速度として直接運動方程式に導入し計算を実施する。一方で、変位入力手法では入力された変位データから変換した速度をセル境界面の連続式に導入し、その関係式を使用して運動方程式を計算するため、計算セルの中央から境界面までの長さによっては誤差が生じる可能性がある。

5. 圧縮性の影響

流体の圧縮性を考慮した解析を行い、非圧縮条件での解析結果と比較を行った。圧縮性を考慮した解析のソルバーには、compressibleInterFoam を使用した。入力した地震動は図-2 の地震動 EQ2 を使用し、変位入力手法において解析を実施した。図-8 に、圧縮性を考慮した解析による水位の時系列結果を、図-9 には、壁面圧力最大時刻における動水圧の鉛直分布をそれぞれ示す。それぞれの図には、非圧縮条件での解析結果を併記した。図-8 より、非圧縮条件と圧縮性を考慮した解析で壁面水位の時系列結果及び動水圧の鉛直分布に大きな違いはなく、流体の圧縮性はスロッシングの水位変動や圧力に影響しないことが確認された。なお、圧縮性を考慮した場合の解析時間は、非圧縮条件での解析時間の数倍であったため、計算条件にも依るが、解析時間を考慮すると非圧縮条件での計算が合理的と言える。

6. 結論

OpenFOAM を使用したスロッシング現象の解析を、加速度または変位を入力する各手法により実施し比較した。両者の手法間で水位の解析結果に大きな違いはないものの、圧力については変位入力の場合に過小評価となる可能性がある。一方で、例えば水域内に浮体がある場合、従来の加速度入力では浮体に作用する重力まで変化させてしまうため、変位入力による手法に優位性がある。流体の圧縮性は、水位変動、動水圧ともに解析結果に影響はなかった。

参考文献

- 1) 大平幸一郎, 高島知行, 三上貴仁, 柴山知也: 湾湖でのスロッシング現象と影響評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 73, No. 1, p.56-66, 2017.
- 2) 有光剛, 川崎浩司: 3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D による貯水槽のスロッシング荷重評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 5, I_685-I_690, 2018.
- 3) 本田 隆英・織田 幸伸・伊藤 一教: 取水路を対象としたスロッシングシミュレーション, 大成建設技術センター報, 第 48 号, 2015.
- 4) (社)日本建築学会: 容器構造設計指針・同解説, 302p., 1996.
- 5) 上部達生・工藤勝己・長田信: 混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験, 港湾空港技術研究所 資料 0641, 1989.