

〈研究発表〉

CFDによる浄水場濃縮槽におけるスロッシングのシミュレーション

土屋 玄¹⁾, 谷口 文武²⁾, 石川 眞³⁾

¹⁾ (株)新日本エグザ 東京事務所 (〒110-0015 台東区東上野 4-6-7-202, E-mail: g-tsuchiya@shinnihon-exa.co.jp)

²⁾ (株)新日本エグザ 東京事務所 (〒110-0015 台東区東上野 4-6-7-202, E-mail: f-taniguchi@shinnihon-exa.co.jp)

³⁾ 横浜市 道路局 河川事業課 (〒231-0017 横浜市中区港町 2-6)

概要

自由水面のある水槽では、地震時に液面の揺動が誘起されるとスロッシングが発生して、水槽からの越流や池内設備への波圧による損傷、水位計の計測エラーによる施設運用上の不具合などの影響を生じさせる。このための対策としては、池内設備機器の強化はもとより、この液面の揺動を最小限に抑えることが必要不可欠である。今回、受託業務の中で浄水場の濃縮槽を対象に、地震時のスロッシングについてのシミュレーションを、オープンソースの CFD ソフトである OpenFOAM を用いて行ったので、その結果について報告する。

キーワード: CFD, スロッシング, シミュレーション, OpenFOAM

1. はじめに

近年、水道施設においては耐震対策が重要な施策の一つとなっている。これについては、耐震工法指針¹⁾の中で「池状構造物等の耐震設計では、必要に応じて液面揺動の影響を考慮する」ことになっており、簡便な液面揺動の検討として、ハウズナーの理論に基づくスペクトル法、 n 波共振法およびポテンシャル理論に基づく応答スペクトル法が紹介されている。実務的にはこれらのいずれかの式を解くことによりスロッシングの一次固有周期と水槽内水位面の波高を求めることができるが、この計算の解は正弦波であり、実際の液面の挙動を把握することは困難である。しかしながら、地震時のスロッシングを最小限に抑えるための検討を行う上で液面の挙動の可視化は不可欠な要件となる。このためのツールとしては現状、CFD がもっとも有効であると考えられる。CFD そのものは従来からさまざまな分野で活用されてきたが、PC の計算能力が脆弱であったことから、空気の連行を伴う水面の挙動解析のような実用レベルでの計算を行うには高機能のワークステーションないしはスーパーコンピュータ等に頼らざるを得なく、計算コストを含めハードルが高かった。このため、国内の上下水道計画や実施設計等の分野での適用事例はなく、研究レベルにとどまっていた^{2),3),4)}が、Linux の普及によるオープンソース化や PC の高機能化により、PC での解析が可能となった。

これらを背景に、今回浄水場の濃縮槽を対象に、レベル2地震動に対するスロッシングのシミュレーションを行った。

2. 施設の概要とモデルの構築

2.1 施設の形状

今回、解析の対象とした施設の形状の概要は以下のとおりである。

形状：中央に集泥部を持つコンクリート円形濃縮槽

直径：30m

高さ：6m（水深 5.5m）

2.2 解析モデルの構築

(1) 対象施設のジオメトリとメッシュの作成

現有施設の設計図から、プリ・プロセッサの機能を持つオープンソースの salome-meca を用いて3次元のジオメトリの作成とメッシュの生成を行った。

Fig.1 に濃縮槽本体のメッシュの生成状況を示す。

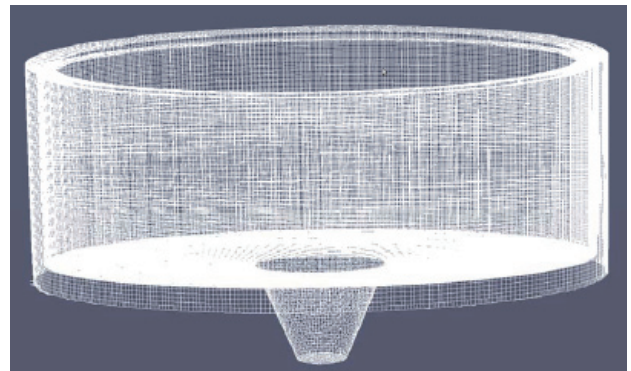


Fig.1: 3D-Modelling and Meshing of the thickener tank

なお、計算領域として、地震時にスロッシングにより、内部の流体が水槽から流出することを想定して、

メッシュについては水槽の周辺部と上部も対象とした。生成したメッシュは以下のとおりである。

形状：Hex メッシュ

要素数：858,482 セル

メッシュサイズ：一辺約 40cm

(2) ソルバーと基礎方程式

スロッシングに関する研究はポテンシャル流近似を行う方法などが主流であったが、3次元粘性流を再現できないこと、任意の形状に対応できない等の理由により LES を用いた研究が報告されている⁹⁾が、LES を用いた場合には計算負荷が大きくなり、PC の能力を超え、計算が収束しない場合も想定される。このため、今回は計算時間の短縮と収束性に重点を置いて、基礎方程式には RANS を用いて再現性の検討を行うこととした。今回の解析には内製のコードではなく、オープンソースの CFD ソフトである OpenFOAM を用いたため、ソースファイルからコードの中で RANS が使われていることの確認を行った。以下に、今回用いたソルバーの RANS のコードの一部を示す。

```
fvVectorMatrix UEqn
(
    fvm::ddt(rho, U)
    + fvm::div(rhoPhi, U)
    - fvm::laplacian(muEff, U)
    - (fvc::grad(U) & fvc::grad(muEff))
);
```

このコードは、

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \phi \mathbf{U} - \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U}$$

を意味しており、RANS の左辺となっていることが確認できた。

なお、ソルバーには、液面の挙動を表現するために「VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性・等温 2 相流」を適用した。地震動については、躯体の 30%程度が埋設されていることから、内部の流体も含め躯体全体に対して加速度を与えた。

(3) シミュレーションの環境と設定条件

シミュレーションの環境と設定条件を以下に示す。

CPU : Core i7-3820, 8CPU で並列計算

OS : LinuxOS ubuntu11.4-64bit

CFD ソフトウェア : OpenFOAM 2.10

解析対象時間 : 30 秒間の液面の挙動

計算タイムステップ : 0.001 秒

アウトプットファイルの作成 : 0.05 秒

物性値 : ν (動粘性率) = $1 \times 10^{-6} \text{ kgm}^{-3}$

水面の境界条件 : free surface

上記の環境と設定条件において計算に要した時間は約 9 時間であった。

3. 解析結果

3.1 スロッシングの状況

液面の半周期の X-Y 軸に対称な断面のスナップショット (液面の状況) を Fig.2 から Fig.5 に示す。図中で、VOF は alpha として表現している。Fig.2 は初期状態を、Fig.3 は越流が始まる状況 (t=1.2s 後) を、Fig.4 はタンクからの越流高が最大となった時点 (t=2.4s 後) での液面の状況を示す。

(1) 一次固有周期

Fig.5 で観測されたように、半周期は 3.50s であり、一次固有周期は 7.00s となる (解析からは harmonic oscillator が形成されておらず、半周期以降の液面のスロッシングについては液面からの跳水が大きいため、半周期で求めた)。この値は後述の簡易計算の値である 7.47s と比較して短い時間となっている。

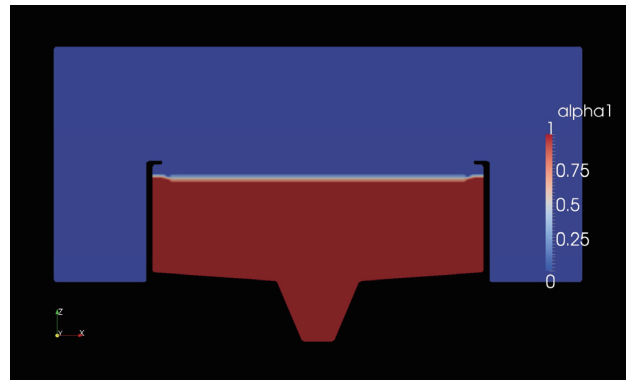


Fig.2: Initial conditions for phase fraction alpha

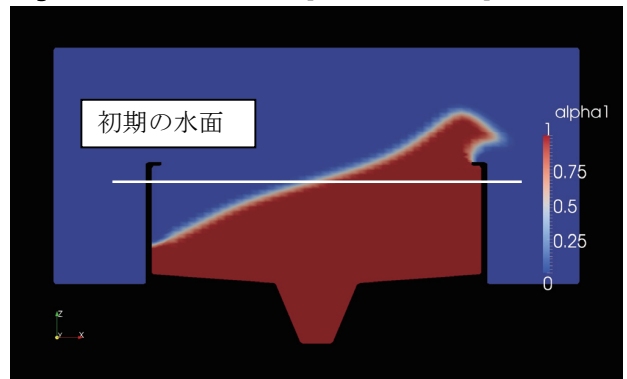


Fig.3: Snapshot of phase of alpha at t=1.2s

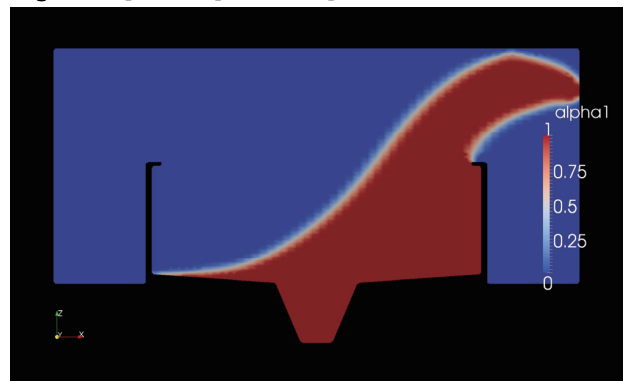


Fig.4: Snapshot of phase alpha at t=2.40s

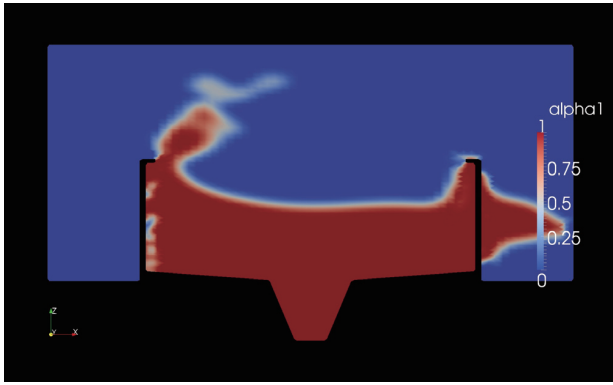


Fig.5: Snapshot of phase alpha at t=3.50s
(2) 液面のスロッシング

スロッシングの状況としては、地震動を与えた後の半周期までは harmonic oscillator に近い液面の挙動が認められたが、半周期以降については揺れ戻しが大きく、またその都度タンク内の水量が失われるため水面は各時間において乱雑な状態となり、harmonic oscillator は形成されておらず、固有振動数の確認もできなかった。これらのスナップショットを Fig.6 と Fig.7 に示す。



Fig.6: Snapshot of phase alpha at t=5.60s

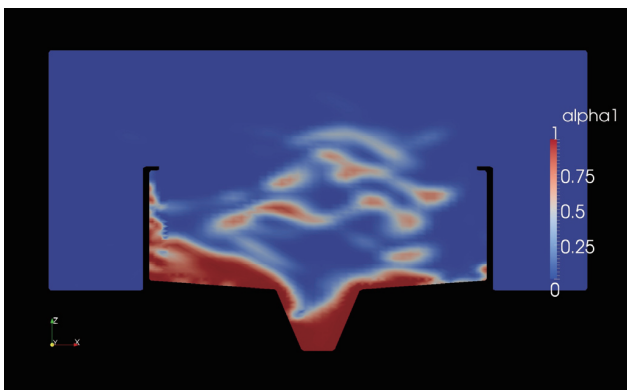


Fig.7: Snapshot of phase alpha at t=28.40s

3.2 平面方向の流速の分布

断面のスロッシングに対応するする $H=5.0\text{m}$ の平断面での Fig.3 に対応する速度分布 ($t=1.2\text{s}$) を Fig.8 に、Fig.5 に対応する速度分布 ($t=3.5\text{s}$) を Fig.9 にお

の示す。Fig.8 では、地震動を与えた 1.2 秒後であることから、速度分布は X 軸方向に一様に分布しているのが分かる。これに対して Fig.9 では揺れ戻しの直後であり、円周方向の壁面に沿った流れの影響を受け、歪んだ速度分布となっている。

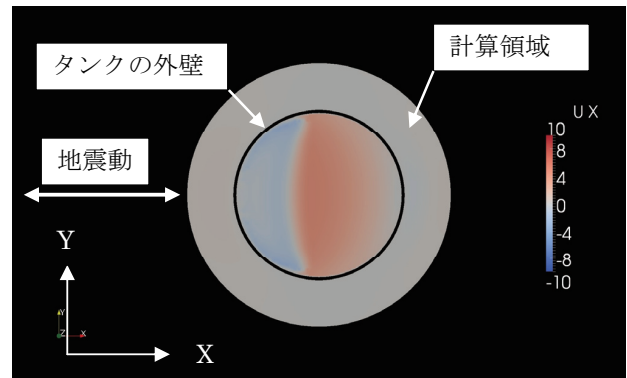


Fig.8: Snapshot of the velocity distribution of X-direction at t=1.2s, H=5.0m

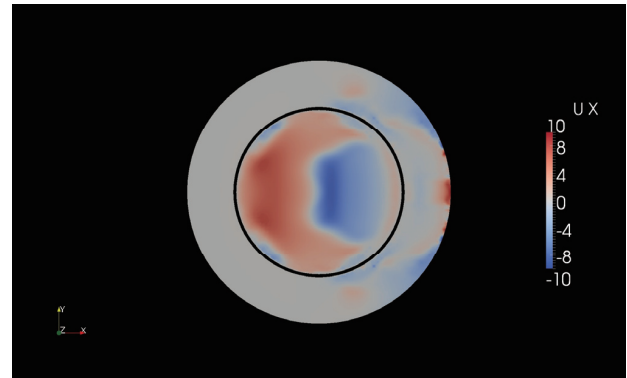


Fig.9: Snapshot of the velocity distribution of X-direction at t=3.5, H=5.0m

4. 結果の考察と今後の課題

4.1 計算値との比較

今回シミュレーション結果を耐震工法指針¹⁾の中で示されているポテンシャル理論に基づく応答スペクトル法（以下、応答スペクトル法という）で計算した結果との比較を行う。

(1) 応答スペクトル法での計算結果

応答スペクトル法においてスロッシングの振幅（最大波高 η_{\max} ）は式(1)により求まる。

$$\eta_{\max} = 0.245 T \times \left(1.841 \frac{H}{R} \right) S_v \quad (1)$$

ここに、 T はスロッシングの一次固有周期であり、次式で与えられている。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh\left(1.841 \frac{H}{R}\right)}}$$

その他、 H は液面高さであり、 R は水槽の半径、 S_v は速度応答スペクトルである。上式より、一次固有周期

は7.47sとなる。対象とした濃縮槽に対するレベル2地震動のときの S_v の計算値は200cn/sであったので、式(1)より η_{\max} は215.4cmとなる。

(2) シミュレーション結果との比較

上記計算結果に対して、シミュレーション結果は両側の壁面を固定端とした harmonic oscillator は形成されなかった。このことは Fig.3 に示しているように、地震動を与えた 2.7 秒後にはタンクからの越流が始まっており、タンク内の水量が一定に保たれていなかったことや、タンクの幾何学形状から地震動に対し当然のことながら、スペクトルが X-軸方向にではなく、Fig.9 に見られるように円周方向の壁面に沿って伝播したことなどがその主な原因と考えられる。

(3) 結論

今回の解析から以下の結果がえられた。

- 上下水道施設におけるタンク類は水面と床スラブとの間のフリーボードが 1m 前後の場合が多く（今回のケースでは 0.5m であった）、大きな地震時にはタンクからの越流が生じる可能性が大きい。
- この越流に関しては、Fig.5 に見られるように、スラブの張り出し部が越流の防止に貢献していることが分かる。
- レベル2のような大きな地震動ではスロッシングの波形は正弦波とはなり得ない場合があり、特に半周期以降のスロッシングについては、慣性力を受けて乱雑な水面形を呈している。これは別途行った矩形タンクでのスロッシングとは大きく異なっていたことから、簡易計算だけではなく、施設ごとに個別に解析をする必要があるといえる。

その他、Fig.6 で分かるように、壁面上部のスラブの張り出し部が越流に対して一定の抑止効果の役割を果たしていることが確認できた。このことから、地震時のスロッシングに対して、越流防止対策を講じる上で形状検討の対称になり得ると考えられる。

4.2 今後の課題

今回の解析では、計算時間の短縮と収束性の向上に重点をおいて RANS で解析を行った。また地震動としてレベル2での加速度を 30 秒間与え続けたため、エネルギーの散逸は無視できるものとして、乱流解析で一般に用いられる $k-\epsilon$ モデル等の 2 方程式モデルは採用しなかった。このため、解析上、比較的大きな液面の揺動が観測されている懸念がある。

地震動に対する液面の挙動については現地での確認ができなかったことから、今回は理論式に基づく解析となっている。このため、地震動の与え方や、LES や

DNS 等のモデルについてどの程度の差異が出るかの確認を行う必要があると考えられる。また、今回は理論計算のみで終始しているため、解析と現実の差異や許容誤差の範囲を知るためにも水理実験により、現象の検証を行う必要があると考えられる。

最後に、本研究は SW-CFD 研究会での活動の成果を踏まえたものであり、今回の解析にあたっては、関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 水道施設耐震工法指針・解説, 2009 年版, (社)日本水道協会
- 2) 功刀亮, 岡本幸彦, 大橋一聡, 斉藤功 (2004) 水中プロペラ式 OD の酸素移動係数解析に関する研究, 第 41 回下水道研究発表会講演集, 918-920
- 3) 豊岡和宏, 古米弘明, 土屋玄, 谷口文武, 佐藤茂雄 (2004) CFD と活性汚泥モデルを用いた OD 内容酸素濃度の基礎的な解析, 第 41 回下水道研究発表会講演集, 792-794
- 4) 豊岡和宏, 古米弘明, 土屋玄, 谷口文武, 山田文隆, 佐藤茂雄 (2004) CFD と活性汚泥モデルを用いた OD 内容酸素濃度の基礎的な解析 (2), 第 42 回下水道研究発表会講演集, 873-875
- 5) 石井翔大 (2011) 燃料貯蔵タンク内のスロッシング特性の解析