

## VOF法を用いた長周期地震動による受水槽のスロッシング解析

金沢大学工学部土木建設工学科 水崎洋佑  
 金沢大学理工研究域 正会員 宮島昌克  
 大阪市水道局 正会員 村田幸一

## 1. はじめに

地震発生後、上水道配水システムで流量増加・水圧低下といった異常挙動の発生が確認されることがある。一般的には、流量増加・水圧低下といった異常挙動は水道管破裂による大規模漏水が発生した際に確認される現象であるが、本研究が対象とする地震発生後の流量増加・水圧低下は大規模漏水が発生していないケースである。

図-1にマンション等に設置されている受水槽の断面図を示す。受水槽内には通常、2本の水位センサーが設けられており、水面が長い方の水位センサーを下回った場合に、自動的に引給水が行われ、短い方の水位センサーが水面を感知した場合に自動的に引水が止まる仕組みになっている。図に示したように、平常時、水面が長い方の水位センサーより上にある場合でも、地震発生時にはスロッシングが起り、図のように水面が斜めになった際には、水面が長い方の水位センサーを下回ることになり、引水が開始される。このような現象が、地震が発生した地域の多くの受水槽で発生し、異常挙動が発生すると考えられている。<sup>1)</sup>

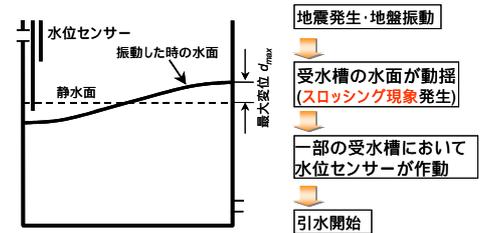


図-1 受水槽引水までの流れ

## 2. VOF法によるスロッシング解析

スロッシング解析では、Housnerの耐震計算式を用いられることが多いが、この式では、スロッシングによる最大変位のみしか算出されず、地震による振動特性を十分に考慮することができなかった。したがって本研究ではVOF法<sup>2)</sup> (Volume Of Fluid Method) を用いて、動的解析を行った。VOF法はHirt<sup>3)</sup>らによって開発された、自由液面の解析の手法である。流体のセルを空気・液体・固体(壁)にそれぞれ分類し、さらに液体と気体のセルを導入し、セル内の液体充填率 $F$ 値で液面を認識する方法である。以下が $F$ 値を算出する式である。

$$F = \frac{\text{計算セル内の液体体積 (面積)}}{\text{計算セルの体積 (面積)}} \quad (1)$$

この液体充填率 $F$ 値を用いると、格計算セルを次のように分類することができる。

- ・  $F=0$  : 気体セル (セル内には液体が存在しない)。
- ・  $F=1$  : 液体セル (計算セルは液体に満たされている)。
- ・  $0 < F < 1$  : 表面セル (計算セルには気液界面が存在する)。

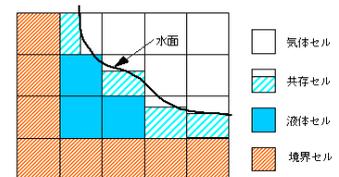


図-2 VOF法のモデル図

VOF法を用いた解析では、動的な解析を行うことができ、地震動特性を考慮することが可能であり、そして流体力学的アプローチが可能である。また様々な形状を考慮することができるので、様々な形状の受水槽を想定した解析が可能である。その他にもVOF法の特徴として、スロッシングの時刻歴応答が解析でき、その結果を視覚的に捉えることができるという利点がある。

また解析ソフトはOpenFOAM<sup>4)</sup>を用いた。OpenFOAMは、OpenCDF社が開発し、GNUのGeneral Public Licenceの下で、フリーかつオープンソースとして配布されており、化学反応や乱流、熱伝達を含む複雑な流体の流れから、固体力学や電磁力学、そして経済の支配方程式までさまざまな現象をシミュレートすることができるCDFツールである。またC++モジュールの柔軟な組み合わせが可能でカスタマイズ可能であり、様々なプログラムを作成可能である。そして可視化のための単純データ操作からメッシュ作成にいたるまで様々なプリ・ポスト処理の仕事を

行うユーリティが豊富である。

### 3. スロッシング解析の内容・結果

まず直方体型水槽を用いて正弦波を入力し、スロッシング変位量の計測を行った。水槽は長辺60cm, 短辺30cm, 高さ36cmである。この水槽に水深23cmの水を入れ、加速度40galで振動範囲数0.4～2.1Hz, 振動継続時間240秒に設定しスロッシング変位を計測した。<sup>5)</sup>この条件と同じ条件で、VOF法による解析を行った。セルのサイズは一辺を1cmの立方体とし、時間増分量を0.01秒とした。振動継続時間は60秒である。

実験では、振動数1.0Hzの際にもっともスロッシングによる水面の変位量が大きくなったが、解析でも振動数1.0Hzの際に最も変位量が大きくなった。図-3は解析による時間経過による水槽左側面の水面位置を示したものである。

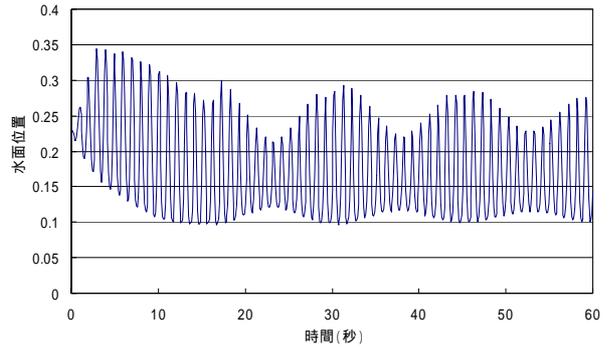


図-3 時間による水面位置の変化(1.0Hz)

### 4. 設定条件の変更

VOF法の計算精度は、セル数や時間増分量に大きく関係し、セル数を増やし、時間増分量を細かくするほど、計算精度は上がると考えられる。しかしセル数を増やしたり、時間増分量を細かくすることにより、計算に要する時間は大きくなり、それだけでなく計算機の容量不足によるオーバーフローが想定される。そのため精度の良い結果が得られ、かつ、これらの問題点を考慮して、妥当な設定条件を求める必要がある。そこでセルサイズを一辺が0.5cm, 1.0cm, 2.0cmの立方体、時間増分量を0.001秒, 0.01秒, 0.1秒と変更し、最も変位の大きかった振動数1.0Hzで解析を行った。その結果、セルサイズ0.5cmでは図-3とほぼ同じ形状のグラフとなったが、2.0cmではピークは同じであるが、凹凸がはっきりとしない形状のグラフとなった。また時間増分量の変更では、ほとんど変化が見られなかった。したがって、この水槽を想定した解析ではセルサイズ1.0cm, 時間増分量は0.01秒が妥当であると考えられる。この水槽の体積は64800cm<sup>3</sup>であるのでセル数は64800個である。よって今後、受水槽を想定したスロッシング解析では、セル数を65000個前後に設定することが望ましいと考えられる。

### 5. まとめ

実験値と解析値で、最もスロッシングによる最大変位が大きくなる振動数は一致したが、実験値と解析値で、違う点が多少見られるので解析プログラムの見直しが今後必要である。また、スロッシングによる水面の動きが実験結果と解析結果で一致するか確認する必要がある。今後検証していく予定である。

本研究の目的は長周期地震動が、受水槽内のスロッシングによる異常挙動についての危険性を示すことである。そのため、長周期地震波形を用いた解析を行い、その際のスロッシングについて考察を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 村田幸一, 宮島昌克, 仙福太郎: 地震動の長周期成分による上水貯水槽のスロッシングに関する研究, 日本自然学会術講演会講演概要集, pp.116-121.2006.
- 2) 米沢望: VOF法を用いた自由液面の数値解析手法, 水理工学論文集, Vol.39, pp.373-378, 1995.
- 3) Hirt, C. and Nichols, B.D: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journ. of Computational Physics 39, pp201-225, 1981.
- 4) OpenFOAM ユーザーガイド: <http://www.ofwikija.org/index.php?title=OpenFOAM> (2009年12月21日現在)
- 5) 小林正明: 長周期地震動の継続時間と水供給システムにおける異常挙動の相関性, 平成19年度, 金沢大学学士學位論文, 2007.