

津波来襲時の地下管路内における気液二相流の 圧力変動に関する数値計算

高橋 研也¹・西畑 剛²・Duc Thang CHU³

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail:kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 土木部門土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽二丁目2-8)
E-mail:takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail:ducthang.chu@mail.penta-ocean.co.jp

地下管路内において気液二相流となる津波を対象とした水理模型実験の数値計算による再現をOpenFOAMにより実施し、水理模型実験結果と比較することによりOpenFOAMの適用性や気相の影響などについて検証した。その結果、管路や気相を計算対象とする場合のOpenFOAMの優位性が確認されるとともに、管内の初期状態が流れや圧力分布に影響を与えていることが分かった。また、管路出口水位や浸水深のみならず、管内空気塊が排出される様子やその気相速度もよく再現されたが、エアハンマー現象に伴う大きな圧力変動までは再現されなかった。津波来襲時の溢水現象を再現するためには地下管路内における気液二相流を考慮する必要があることが分かったが、再現精度をより向上させるためには圧縮性流体の計算をするなどの方法が考えられる。

Key Words : tsunami, overflow via underground pipeline, OpenFOAM, pressure fluctuations, air-water two-phase flow

1. はじめに

2010年チリ地震津波および2011年東北地方太平洋沖地震津波来襲時においては、遡上波が到達する前に津波が排水路を逆流して陸上へ溢水する現象が確認された¹⁾。最近では、この現象を評価するための水理模型実験が数例実施されており^{2),3),4)}、一次元サージ解析モデル^{3),4)}や平面二次元氾濫解析モデルの拡張^{2),3),5)}、三次元解析モデルの適用⁶⁾が試みられている。しかし、溢水を防ぐ対策工として立孔を蓋により閉塞する場合や、発電所施設のポンプ取水路などの場合は、気相の影響が管内圧力や溢水量に現れると考えられる。高橋・西畑⁷⁾はこの点に着目した水理模型実験をおこない、地下管路内において生じる現象には気相の存在が大きく影響していることを明らかにしたが、地下管路内壁や溢水対策施設の設計を進めていくには、既存の数値計算ツールによって気相の影響をどの程度再現できるか確認しておく必要がある。

そこで、本研究では気液二相流を対象とした高橋・西畑⁷⁾の水理模型実験の数値計算による再現を三次元数値流体力学ツールOpenFOAM⁸⁾により実施し、実験結果と比較することによって上記の点を検証することを目的とする。

2. 既往の水理模型実験

図-1に実験断面図を示す。長さ50m、幅0.6m、高さ1.2mの二次元水路を用いたが、模型設置部のみを図示している。事前に水路内に海底勾配1/10の海底床模型を設置し、勾配部法肩から10.48m沖側に設置したゲートを急開させるダム破壊法により津波を造波し、反射波が到達するまでの押し波1波を対象に勾配部法肩上の波高計 α 6において入射津波高の検定をおこなった。表-1に実験条件を示す。造波水深は図-1に示すように水平管路内の初期状態が気相のみまたは液相のみとなるように3種類、入射津波高は1種類を設定し、合計3種類の検定をおこなった。その結果、目標入射津波高を概ね満足したが、いずれのケースにおいても分裂波が見られた。特に、造波水深が22.9cmと浅いケースでは碎波段波となったが、その他のケースでは非碎波であった。

次に、上記の検定により決定した入射津波を対象として溢水実験をおこなった。図-1に示すように、 $\phi 65$ の水平・鉛直管路を有する陸上地形模型を海底床模型上に設置し、岸壁上に津波が越流しない高さの防潮壁を設置した。図中に示すように、水路内には波高計および流速計を、地下管路内には圧力計を設置してサンプリング周波

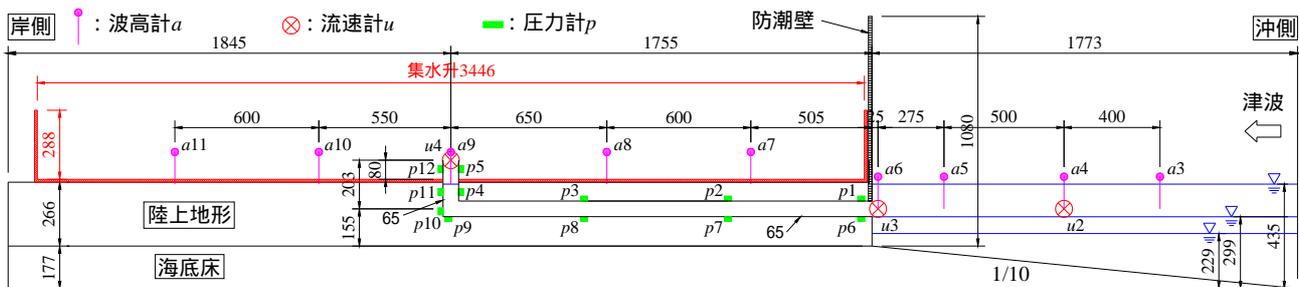


図-1 実験断面図（模型設置部のみを图示，単位：mm）⁷⁾

表-1 実験条件

ケース	入射津波高(cm)	造波水深(cm)	出口延長(cm)	出口状態
1	25.8	22.9	0.0	閉塞
2				
3		29.9	5.0	開放
4		43.5	20.5	

表-2 計算条件

数値計算ツール	CADMAS-SURF/3D ⁹⁾	OpenFOAM [®]
解析手法	差分法 (SMAC法)	有限体積法 (InterFoam)
計算領域	x: 4.400 m y: 0.600 m z: 1.300 m	x: 4.278 m y: 0.600 m z: 1.200 m
計算格子形状	構造格子	非構造格子
計算格子間隔	$\Delta x = 0.005 - 0.110$ m $\Delta y = 0.007 - 0.020$ m $\Delta z = 0.005 - 0.030$ m	$\Delta x = 0.030$ m $\Delta y = 0.015$ m $\Delta z = 0.010$ m
総計算セル数	578,496	491,190
乱流モデル	使用しない	

数100Hzにて計測した。図中の計測器番号は高橋・西畑⁷⁾によるものと対応させている。また、陸上地形模型上には集水升を設け、集水升内の浸水深（水位）を波高計a7, 8, 10, 11により計測した。ケース3, 4においては、引き波時に溢水が終了するように地下管路出口を5.0 cm ~ 20.5 cmまで延長した。

以上の条件において、地下管路出口を開放して溢水させた場合（ケース2~4）および対策工を想定して蓋により完全に閉塞した場合（ケース1）の合計4ケースの実験をおこなった。

3. 数値計算

(1) 既存の数値計算ツールの適用性の検証

まず、既存の数値計算ツールとして、構造格子を扱う単相流モデルであるCADMAS-SURF/3D⁹⁾と非構造格子を扱う二相流モデルであるOpenFOAM[®]を選定し、水平管路内の初期状態が液相のみであり管路内で生じている現象が最も簡単なケースであると考えられるケース4の

再現計算を通して適用性の検証をおこなった。

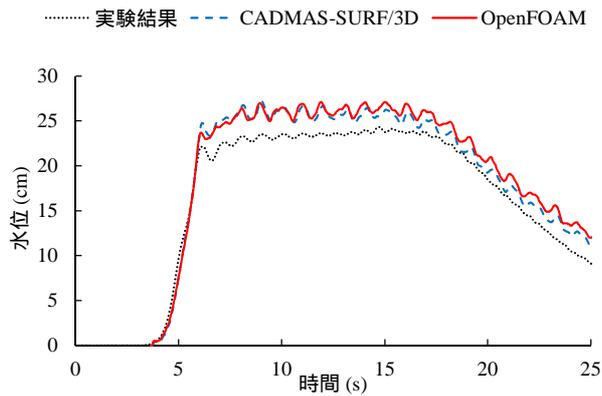
表-2に計算条件を示す。CADMAS-SURF/3D⁹⁾およびOpenFOAM[®]の計算領域や計算格子間隔などの計算条件を可能な限り近づけ、両者の計算結果を比較できるようにした。なお、乱流モデルを使用せず、OpenFOAM[®]においてはver. 2.2.0の不混和流体の非圧縮性・等温二相流用ソルバであるinterFoamを使用した。津波の造波は、波高計a4および流速計u2の設置位置を造波境界とし、水位および水平流速の実験計測値を入力することによっておこなった。なお、水平流速は鉛直一様分布として与えた。

図-2にCADMAS-SURF/3D⁹⁾およびOpenFOAM[®]による計算結果と実験結果との比較を示す。波高計a4（造波境界）における計算水位は、実験では地下管路内外の流入出や反射波の影響などによって水路内に流速分布が生じているにも関わらず、水平流速の実験計測値を鉛直一様分布と仮定して与えたために実験水位を上回っているが、CADMAS-SURF/3D⁹⁾とOpenFOAM[®]とで同様の波形を示している。次に、波高計a8における計算水位（すなわち、集水升内の溢水後の浸水深）を見ると、OpenFOAM[®]においては浸水深が鉛直格子間隔 $\Delta z = 1.0$ cmよりも低い場合の液面高さの取得方法に課題があることが分かるが、浸水深が Δz よりも高くなった後からはOpenFOAM[®]による計算結果の方が実験結果により一致している。また、圧力計p9（地下管路内屈曲部）における計算圧力を見ると、非構造格子を扱うOpenFOAM[®]による計算結果の方が実験結果により一致しており、管路を計算対象とする場合のOpenFOAM[®]の優位性が確認できる。

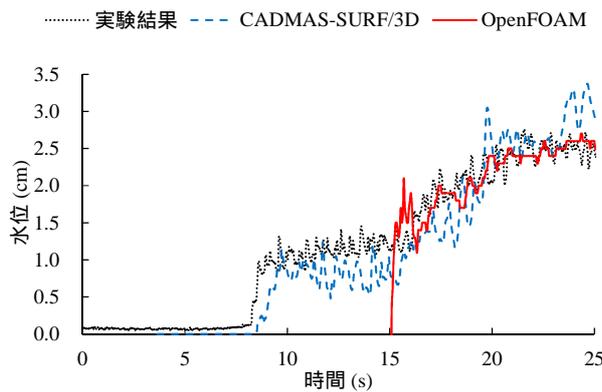
以上のように、再現計算に当たってはいくつかの課題が残されているものの、以下では実験結果の再現性がより高かったOpenFOAM[®]を用いて表-1に示す合計4ケースについての再現計算をおこない、考察を加える。

(2) OpenFOAM[®]による再現計算の方法

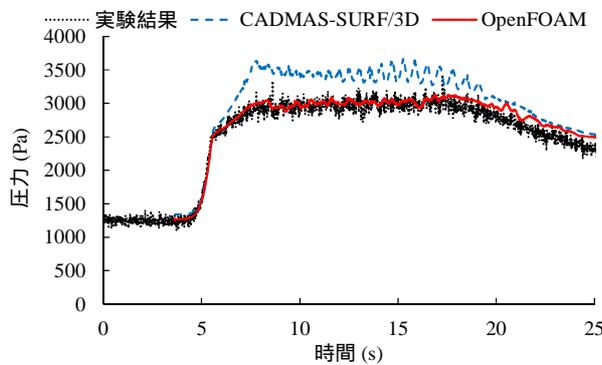
計算条件は表-2に示す通りとしたが、より詳細な再現計算とするために計算領域を2次元水路全体（ $x = 50.000$ m）へ変更し、水理模型実験と同様にダム破壊法により津波を造波した。図-3に解析モデル図を示す。ダム～模型周辺～管路設置部と徐々に格子間隔を細かくする不等



(a) 波高計a4 (造波境界)における水位変動時系列



(b) 波高計a8における水位 (浸水深) 変動時系列



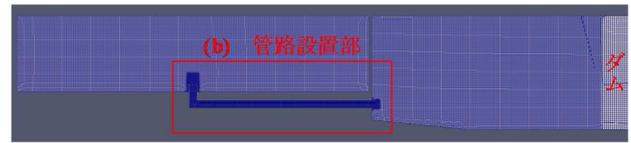
(c) 圧力計p9 (地下管路内屈曲部)における圧力変動時系列

図-2 CADMAS-SURF/3D[®]およびOpenFOAM[®]による計算結果と実験結果との比較

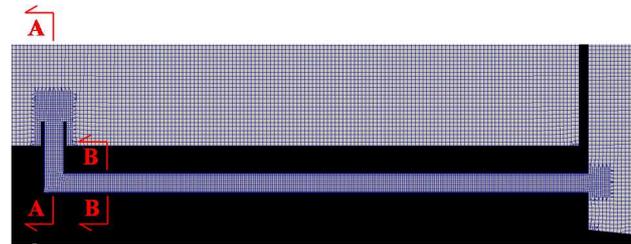
間隔格子として設定し、管路内においては境界層メッシュを追加した。特に、管路屈曲部および出口部肉厚等の形状を忠実に再現した。なお、総計算セル数は5,477,760セルとなり、OpenFOAM[®]のバージョンはv1706とした。

(3) 地下管路内の流速分布および圧力分布の計算結果

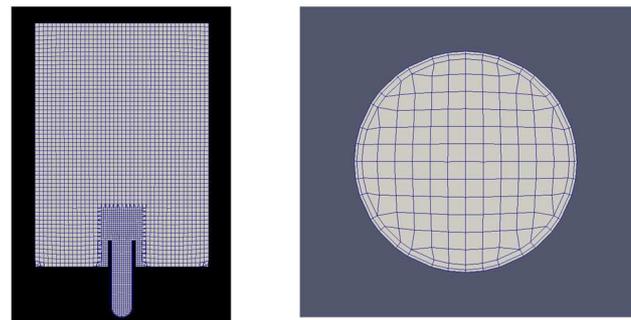
図-4に管路出口を開放したケース2～4の溢水時における地下管路内の流速分布の計算結果を、図-5に圧力分布の計算結果を示す。地下管路内の初期状態が気相のみでさらに碎波段波が空気塊を巻き込みながら流入してくる



(a) 計算領域全体断面図



(b) 管路設置部断面図 (水路中央断面: y=0.300m)



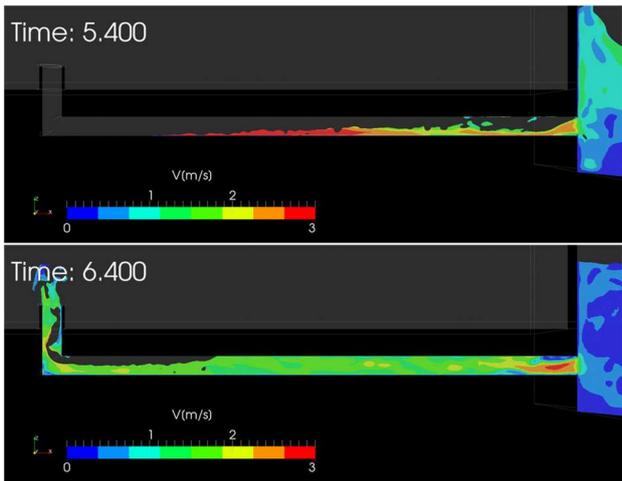
(c) 管路詳細正面図

図-3 OpenFOAM[®]による再現計算における解析モデル図

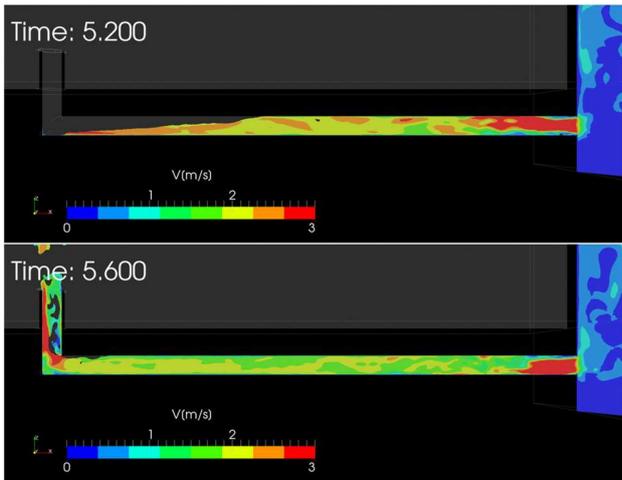
ケース2,3においては、管内の空気塊が流入してきた津波とともに排出されて勢いよく溢水する様子が良く再現された。ケース2,3における流速分布の計算結果から遡上水脈の流速は2m/sを超えており、圧力分布の計算結果から遡上水脈が勢いよく鉛直管に作用して高い圧力を生じていることが分かった。また、地下管路内の初期状態が液相のみであるケース4においては、管内を液相のみが流入して静かに溢水する様子が再現された。ケース4における流速分布の計算結果から鉛直管内で剥離や乱れを伴う複雑な流れ場となること、圧力分布の計算結果からそれに伴う右側壁面と左側壁面との顕著な圧力差が生じていること、入口損失や屈折損失が生じる位置においては圧力が低下していることが分かった。

(4) 地下管路内における空気塊の挙動の再現性

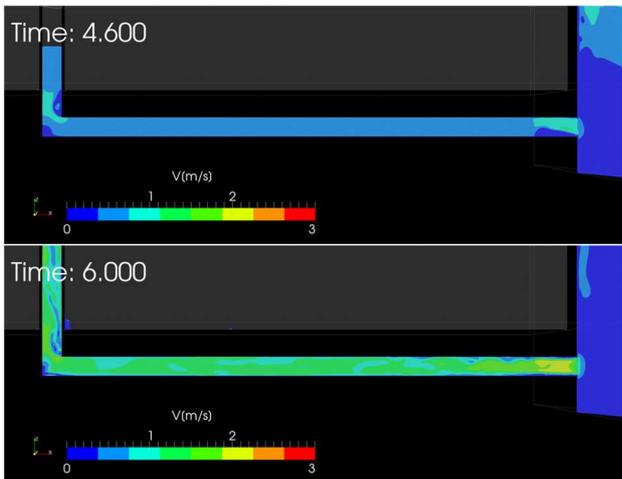
図-6に地下管路出口を閉塞したケース1, 図-7に開放したケース2における水面形の実験結果と計算結果との比較を示す。出口を閉塞したケース1の場合は管内に顕著な流れは認められず、蓋と液相との間に気相が閉じ込められ、水平管内で形成されたスラグ流により空気塊が海側へ排出される様子が良く再現された。このときの管内圧力は、入口前面における津波による水位上昇に伴う静水圧と概ね一致していた。また、出口を開放したケース2の場合は管内の空気塊が流入してきた津波とともに



(a) ケース2 (造波水深22.9 cm, 出口開放)

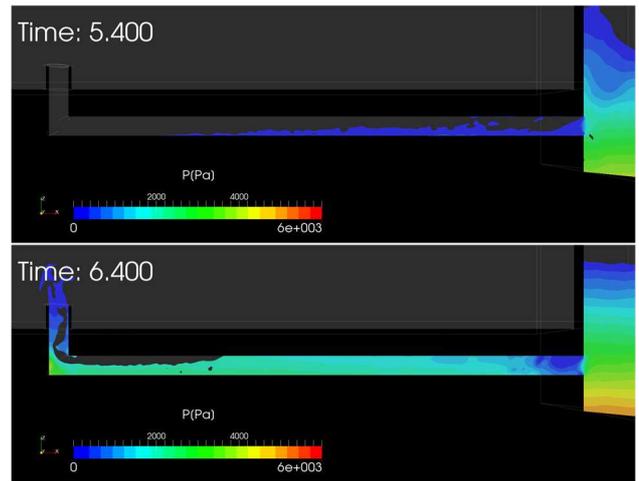


(b) ケース3 (造波水深29.9 cm, 出口開放)

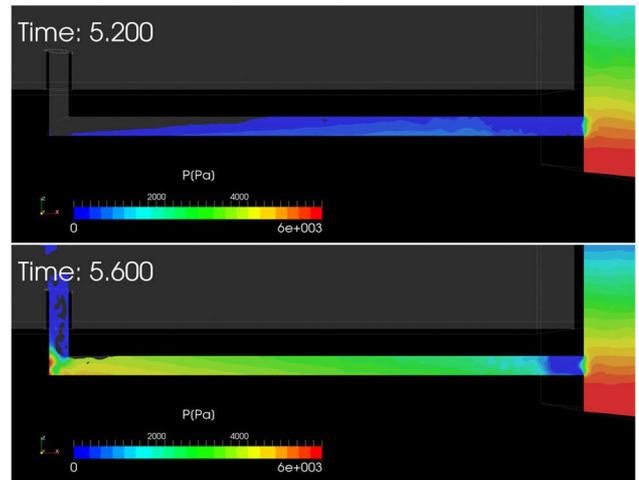


(c) ケース4 (造波水深43.5 cm, 出口開放)

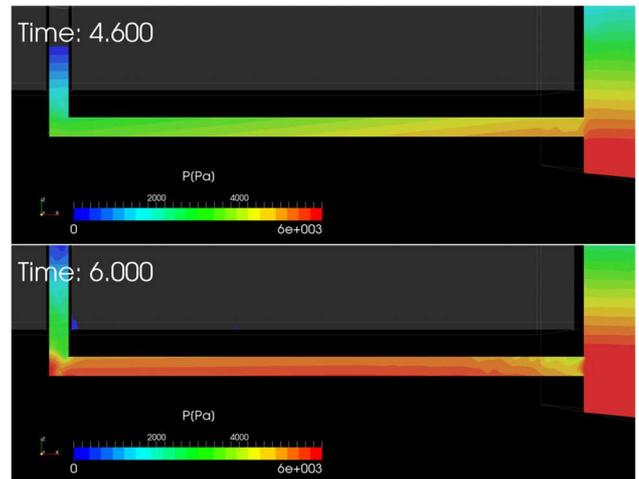
図-4 溢水時における地下管路内の流速分布の計算結果



(a) ケース2 (造波水深22.9 cm, 出口開放)



(b) ケース3 (造波水深29.9 cm, 出口開放)



(c) ケース4 (造波水深43.5 cm, 出口開放)

図-5 溢水時における地下管路内の圧力分布の計算結果

排出されて勢いよく溢水し，集水升内に水が溜まっていく様子が良く再現された。

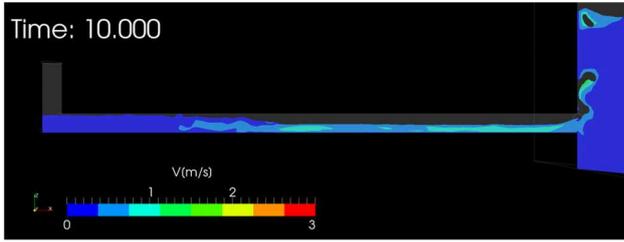
以上の計算結果は不混和流体の非圧縮性・等温二相流用ソルバであるinterFoamを使用したものではあるものの，非構造格子を扱えるOpenFOAM®を用いれば，地下管路内における空気塊の挙動を精度良く再現することができると分かった。

(5) 時系列データの比較

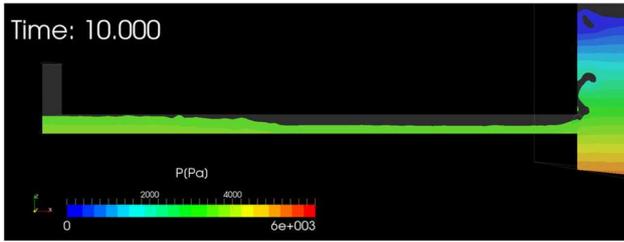
図-8に管路出口を開放したケース2～4における水位変動時系列の計算結果と実験結果との比較を示す。OpenFOAM®による再現計算においては，水理模型実験で使用したダムゲートの急開挙動を再現するのではなく，ダム範囲に初期水位を設定することによって津波を造波したため，計算と実験とで津波フロントの形状が異な



(a) 実験状況



(b) 流速分布の計算結果

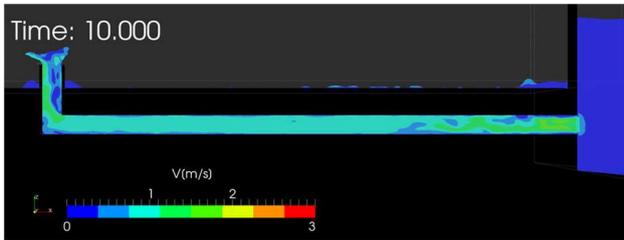


(c) 圧力分布の計算結果

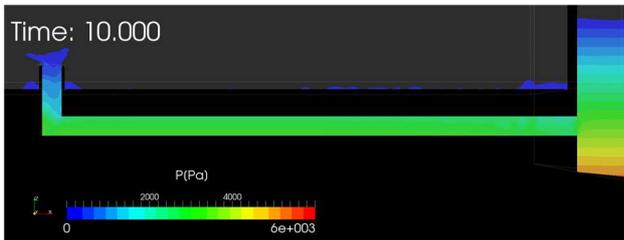
図-6 ケース1 (出口閉塞) における水面形の実験結果と計算結果との比較



(a) 実験結果



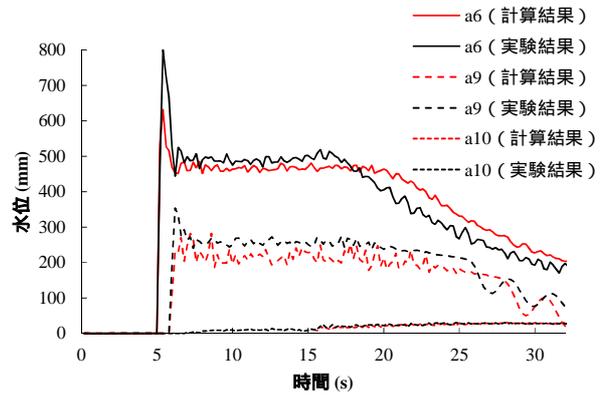
(b) 流速分布の計算結果



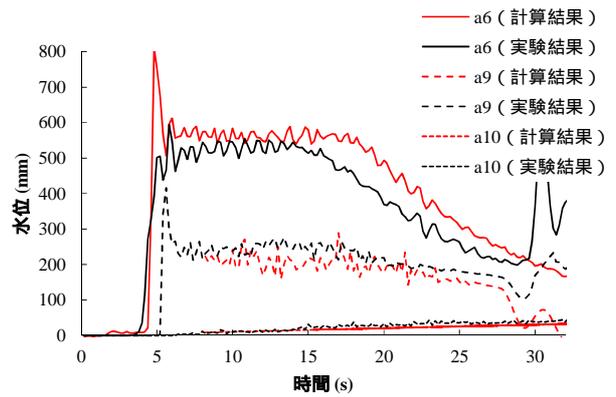
(c) 圧力分布の計算結果

図-7 ケース2 (出口開放) における水面形の実験結果と計算結果との比較

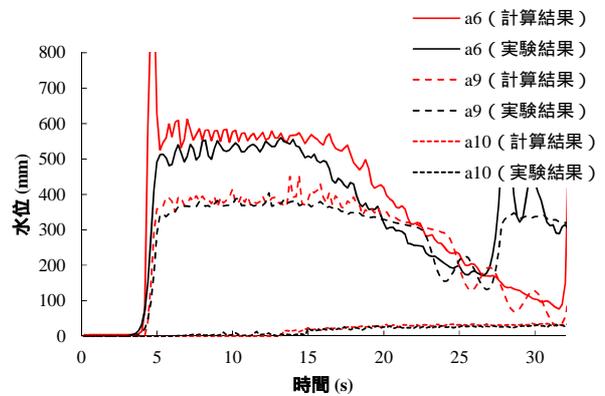
ることとなった。そのため、防潮壁へ津波が作用した瞬間の波高計a6における前面水位の這い上がりまでは再現できなかったが、後続波の津波高は良く一致し、さらに、波高計a9における管路出口水位や波高計a10における浸



(a) ケース2 (造波水深22.9 cm, 出口開放)



(b) ケース3 (造波水深29.9 cm, 出口開放)



(c) ケース4 (造波水深43.5 cm, 出口開放)

図-8 水位変動時系列の計算結果と実験結果との比較

水深を含めてよく再現された。

図-9に管路出口を閉塞したケース1および開放したケース2における圧力変動時系列の計算結果と実験結果との比較を示す。佐藤¹⁰⁾に倣い、上側壁面p3と下側壁面p8との差圧変動時系列も示した。なお、上下差圧変動は、空気塊と水塊を判別する手法として有効であることが判明しており、上下差圧変動が下がりはじめた時は空気塊先端が圧力変動計測点に達したことを、そして上がった時は空気塊が通過したことを意味する。出口閉塞(ケース1)の場合は圧力波の伝播により出口開放(ケース2)

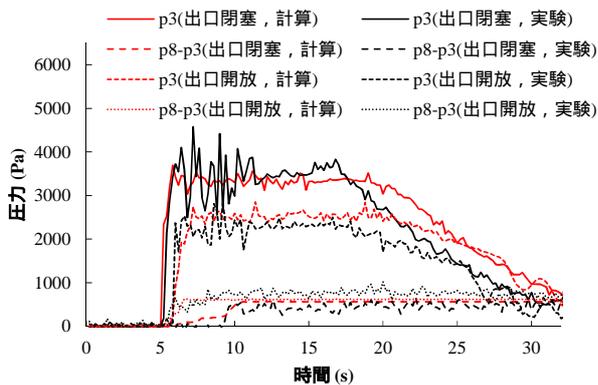


図-9 ケース1 (出口閉塞) およびケース2 (出口開放) における圧力変動時系列の計算結果と実験結果との比較

の場合よりも早く管内圧力が上昇する様子や、管内気相速度 (空気塊の排出速度) などがよく再現されたが、出口閉塞 (ケース1) の場合において地下管路内に閉じ込められた気相の影響によるエアハンマー現象に伴う上側壁面 p_3 での大きな圧力変動までは再現されなかった。

4. おわりに

本研究においては、地下管路内において気液二相流となる津波を対象とした既往の水理模型実験の数値計算による再現を、非構造格子を扱える二相流モデルであるOpenFOAMにより実施して実験結果と比較した。その結果、津波来襲時の溢水現象を再現するためには地下管路内における気液二相流を考慮する必要があることが分かったが、エアハンマー現象に伴う大きな圧力変動までは再現されなかった。再現精度をより向上させるためには、圧縮性流体用ソルバを使用するなどの方法が考えられる

が、実務への適用に当たっては今後の課題である。

参考文献

- 1) 橋本貴之, 今村文彦: 2010年チリ津波による被害に関する気仙沼での現地調査報告書, 津波工学研究報告, 第27号, pp.91-95, 2010.
- 2) 高橋俊彦, 福山貴子, 新保裕美, 秋山義信, 田中昌宏, 池谷 毅: 津波氾濫シミュレーションの水理模型実験による検証, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No.1, pp.22-32, 2013.
- 3) 高島知行, 織田幸伸, 伊藤一教, 本田隆英: 津波による管路溢水・陸域氾濫連成解析手法の構築, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No.1, pp.1-13, 2016.
- 4) 佐藤嘉則, 松山昌史, 太田京助, 内野大介: 津波到達時の取放水設備からの溢水量算定手法に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No.2, pp.L1051-L1056, 2017.
- 5) 水橋光希, 田島芳満, 佐藤慎司, 佐貫 宏: 地下管路との水の流入出を考慮した津波氾濫モデルの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, pp.L396-L400, 2013.
- 6) 高島知行, 本田隆英, 織田幸伸, 伊藤一教: 管水路網を対象とした津波による内水氾濫解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, pp.L381-L385, 2013.
- 7) 高橋研也, 西畑 剛: 津波来襲時の地下管路内における気液二相流の圧力変動に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 70, No.2, pp.L349-L354, 2014.
- 8) OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, 参照 2017-06-30.
- 9) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発 - 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書 -, 沿岸技術ライブラリー, No.39, 235p., 2010.
- 10) 佐藤隆宏: 水平管内気液二相流における流動と圧力変動に及ぼす出口水位条件の影響, 電力中央研究所報告, U99021, 1999.

(2018.3.15 受付)

NUMERICAL SIMULATION ON PRESSURE FLUCTUATIONS OF AIR-WATER TWO-PHASE FLOW IN UNDERGROUND PIPELINE CAUSED BY TSUNAMI

Kenya TAKAHASHI, Takeshi NISHIHATA and Duc Thang CHU

Numerical simulation of hydraulic model tests for tsunami that is air-water two-phase flow in the underground pipeline was performed by OpenFOAM, and the applicability of OpenFOAM and the influence of gas phase were verified by comparing the calculation results with the hydraulic model test results. As a result, it was confirmed that the advantage of OpenFOAM in the case of pipeline or gas phase calculation target, and that the initial state inside the pipeline influences flow and pressure distribution. Also, not only the water surface elevation at the exit of the pipeline and flooding depth, but also the air mass in the pipeline and the gas phase velocity was reproduced well. However, large pressure fluctuations associated with the air hammer phenomenon were not reproduced. In order to reproduce the overflow phenomenon at the time of the arrival of the tsunami, it is necessary to consider the air-water two-phase flow in the underground pipeline. In order to further improve the reproduction accuracy, a method such as calculating a compressive fluid can be considered.