

Building-cube 法に基づく気液二相流解析による建築物の浸水評価

名古屋大学 学生会員 ○森下 将吏
 名古屋大学 正会員 西口 浩司
 神戸大学 非会員 嶋田 宗将
 大成建設 正会員 永野 雄一
 鹿島建設 非会員 伊藤 嘉晃
 東京工業大学 正会員 田村 哲郎

1. はじめに

近年、気候変動により都市部での氾濫リスクが上昇している。しかし、一般的な浅水方程式に基づく1次元または2次元モデルでは、構造物が密集する都市部における水の複雑な3次元の流れや構造物に作用する非定常流体力を計算することはできない。そこで、本研究では大規模並列計算に適したビルディング・キューブ法（BCM）を用いた有限体積法による気液二相流解析手法を提案する。BCMに基づくセル中心有限体積法は、従来から単相流や流体-構造連成問題に適用されてきたものであるが、気液二相流への適用例はない。本研究では、3次元ダムブレイク問題と建物浸水解析を行い、その妥当性と有効性を検証した。

2. 数値解析手法

本研究では、連続体力学における基礎方程式である、連続の式、運動方程式を検査体積において体積平均化 [1] を行った式を支配方程式として用いる。流体の構成方程式として非圧縮性 Newton 流体を仮定する。

速度ベクトルをセル中心に定義し、有限体積法を利用して離散化を行う。この際、応力 σ_{mix} を圧力 p と偏差応力 σ'_{mix} に分け、フラクショナル・ステップ法 [3] を用いて速度場と圧力場を分離して計算する。

3. 3次元ダムブレイク解析

数値解析においては、水槽上面に対流境界条件を、その他の面には滑り壁境界条件を仮定する。解析領域は辺長 1.171875 mm の立方体セルを 16^3 個だけ有するキューブで一様に分割し、総セル数は 53,764,096 である。空気の質量密度として、 1.18 kg m^{-3} 、空気の粘性係数として、 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ 、水の質量密度として、 997 kg m^{-3} 、水の粘性係数として、 $8.87 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$ を与える。

図-1 に自由界面を示す。ここで、 t^* は無次元化時間である。図-2 より、提案手法による数値解と実験結果はおおむね一致していることが確認される。次に、センサー1における無次元化された圧力の時刻歴の比較結果を図-3 に示す。

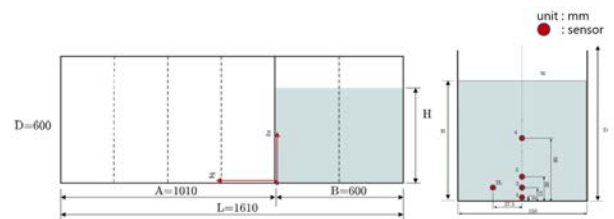


図-1 Experimental setting of 3D dam-break problem and positions of pressure sensor

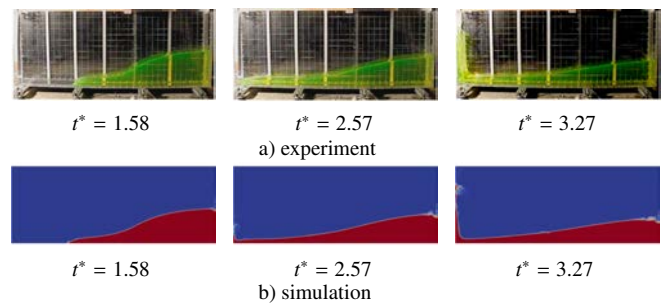


図-2 Comparison of free surface between experiment and simulation

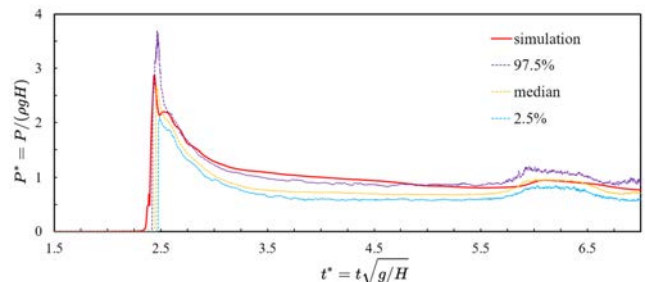


図-3 Comparison of time history of pressure at sensor 1 between experiment and simulation

図-3 より、高精度に圧力ピーク値を捉えられていることが分かる。なお、ダムブレイク実験では計測値のばらつきが大きいため、この実験結果では同一条件で 100 回の実験が実施されており、図-3 では 2.5 パーセントイル値、中央値、および 97.5 パーセントイルの圧力時刻歴と数値解析結果を比較している。

キーワード ビルディング・キューブ法, 気液二相流, 有限体積法

連絡先 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 E-mail: morishita.masashi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

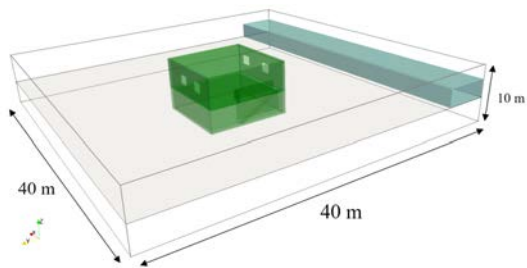


図-4 Numerical model for estimating water immersion inside building during flooding

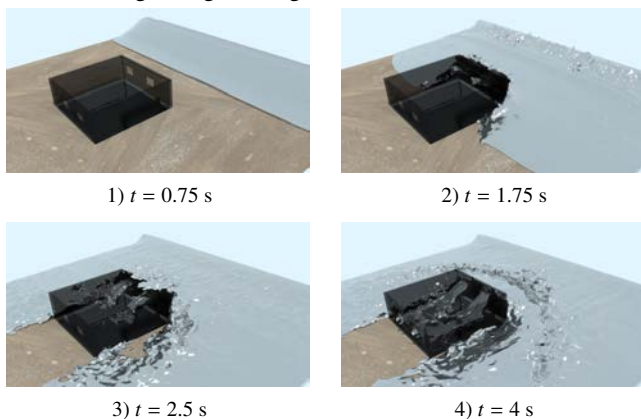


図-5 Numerical result of free surface of water immersion inside building during flooding

4. 建物内部への浸水解析

次に、図-4の解析モデルを考える。洪水による水流として、図-4に示すように解析領域境界から流速 3 m s^{-1} で流入する高さ 2 m のダムブレイク流を仮定する。建築物として、階段と地下空間を有する構造を仮定し、窓からの流入を想定する。なお、本研究では建築物を埋め込み境界法によりモデル化する。流体の物性は前節の問題と同一である。解析領域の上流面には流入境界条件、底面には滑り壁境界条件、その他の解析領域端面には対流境界条件を適用する。解析領域は直交メッシュにより階層的に分割し、最小セルサイズは 78.125 mm 、総セル数は $14,876,672$ である。

解析結果を図-5に示す。図-5より、ダムブレイク流が建築物の周囲に流れ込み、構造と水流が衝突することで、複雑な水の流動が再現されていることがわかる。特に、建築物の壁面に水流が衝突し跳ね上がり、窓から水が建築物内に侵入する挙動が確認できる。また、図-6は圧力分布を示しており、非定常な水の流動によって、衝突の前後で複雑に圧力値が上下していることがわかる。

以上のような水の3次元的な流動および建物壁に生じる非定常な流体力は、1次元や2次元の洪水解析モデルでは評価が困難であり、3次元解析によってのみ評価することができるものである。

5. 結言

本研究では、1次元や2次元の洪水解析モデルでは計算が困難である建築物の周囲やその内部等の水の3次元的な流

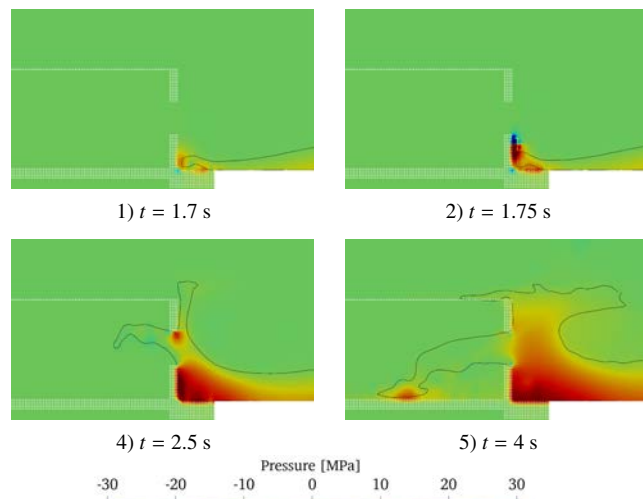


図-6 Pressure distribution at $x = 18.85 \text{ m}$. Black line represents 0.5 contour line of VOF function.

動および構造に作用する非定常流体力を評価するため、大規模な3次元気液二相流問題に着目した。そして、超並列計算機環境で高いスケーラビリティを実現できるビルディング・キューブ法に基づくセル中心有限体積法を用いた気液二相流解析法を提案し、洪水時の建築物内への浸水評価を試みた。また、本論文で述べた空間平均化された運動方程式は、構成方程式に弾性体及びニュートン流体を仮定することで、構造-流体連成問題を取り扱える定式化となっている。よって、今後の研究として、構造内部の非定常な応力分布の評価も考えられる。

参考文献

- [1] Nishiguchi, K., Okazawa, S., Tsubokura, M.: Multimaterial Eulerian finite element formulation for pressure-sensitive adhesives, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.114, No.13, pp.1368-1388, 2018.
- [2] 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠: 大規模並列計算に適した階層型直交メッシュ法による完全オイラー型固体-流体連成解析, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.73, No.2, pp.153-163, 2017.
- [3] Shimada, T., Nishiguchi, et al. Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems, *Int J Numer Methods Eng*, Vol.123, pp.1294-1328, 2021.
- [4] Lobovsky, L., et al.: Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.48, pp.407-434, 2014.