

# 地下空間への浸水シミュレーション技術の適用とその検証

榎 木 康 太      野 畑 有 秀

## Application and Validation of Inundation Simulation for Underground Space

Kota Enoki      Arihide Nobata

### Abstract

Numerical simulation technology based on computational fluid dynamics has been applied for predicting the inundation process in underground space. In this study, the accuracy of a simulation is validated by performing a comparison with a hydraulic model experiment capturing unsteady flows from a stair entrance to an underground space. It is confirmed that the simulation can reproduce the experimental results reasonably well. The inundation process considering a vertical opening, which resembles an elevator shaft, is investigated. It is demonstrated that the vertical opening between basement floors can accelerate the inundation at deeper floors. Furthermore, the developed technology can provide useful information to ensure safety in underground spaces that are vulnerable to inundation hazards.

### 概 要

水害に対して脆弱性のある地下空間においては、避難安全性の確保や重要設備の保全が重要である。このような検討の際には、地下空間への浸水過程を事前に把握することが有用であるため、数値流体力学に基づく予測技術の開発を行った。まず、階段入口から地下空間に流入する非定常流れを対象とした水理実験を対象に、浸水過程のシミュレーションの精度検証を行い、非線形性の高い水理的な現象や浸水の経時的な変化が概ね再現されていることを確認した。次に、本技術の実案件適用を想定し、エレベータシャフトに代表される地下空間の鉛直開口の有無による浸水状況の違いについて検討した。鉛直開口を通じ、上階から下階への水の移動が促進されることを確認し、地上部だけでなく、地下各階をつなぐ開口部に対しても適切な浸水対策を検討することがより効果的であることを示した。本技術は、複雑な形状を有する地下空間における浸水対策の検討やその定量的な評価に貢献するものと期待される。

## 1. はじめに

度重なる台風の来襲や頻発する集中豪雨等により、毎年、全国各地で甚大な浸水被害が発生している。また、将来にわたる降雨特性(短時間豪雨頻度増加などの雨の降り方)に対する地球温暖化の影響も定量的に明らかとなりつつあり、それによれば、浸水被害リスクのますますの増加が懸念される。一方で、限られたスペースの有効活用という目的のもと、大都市を中心に、豪雨による河川氾濫や内水氾濫等の水害に対して脆弱性のある地下空間の利用機会は増加している。都市部の再開発による商業空間化や大規模化に伴い、地下空間の利用用途は多様化しており、複数の鉄道路線の乗り入れも相まって地下の空間配置や空間形状も複雑化の傾向がある。

このように多様化・複雑化する地下空間において、近年避難安全性の確保や重要設備の保全を目的とした浸水予測技術の重要性が増している。特に、空間の複雑性の高い地下空間では、浸水時に流れ込む流体の水理的性状が複雑に変化する非定常性の強い流れとなるため、その適切な予測には、数値流体力学に基づく手法の適用が期待される。この手法では、これまで主として、ある程度理想化された条件についての水理模型実験を対象とした水流の再現計算の検討<sup>2),3)</sup>等がなされてきた。本論文に

においても、地下空間における避難安全性や重要設備の保全の検討に資する浸水過程の予測を目的とした数値流体力学に基づく解析手法の開発を行い、その適用可能性を検討する。具体的には、まず、階段入口から地下空間に流入する非定常流れを対象とした水理実験を対象として、浸水過程のシミュレーションを実施し、実験と比較し精度の検証を行う。次に、試みとして実案件適用を想定し、地下空間におけるエレベータシャフト等の鉛直方向に各階を貫通した開口の有無による浸水状況の変化について検討した。これらの事例を通じ、浸水シミュレーション技術の有用性を示す。

## 2. 浸水過程のシミュレーション技術の検証

### 2.1 解析手法

解析には、ソースプログラム公開型の数値流体解析ソフトウェアである OpenFOAM<sup>® 4)</sup>を用いる。OpenFOAMは、セル中心の有限体積法により離散化された偏微分方程式を解くためのプログラムライブラリ群の総称であり、標準でいくつかのソルバーが用意されている。その中から、自由表面を有する流れのソルバーであるinterFOAMを用いる。interFOAMでは、非定常非圧縮ナビエーストークス方程式と、個々の計算セルにおける気相に対する液相

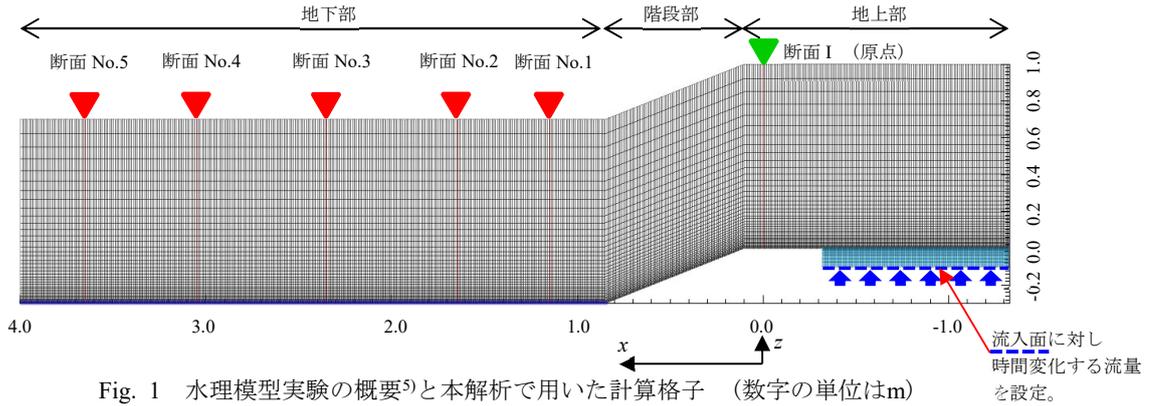


Fig. 1 水理模型実験の概要<sup>5)</sup>と本解析で用いた計算格子（数字の単位はm）

Hydraulic Model Experiment and Computational Grids

の占める割合に関する輸送式とを連立させて、自由表面を追跡するVOF法 (Volume Of Fraction法) が採用されている。各支配方程式 (運動量, 圧力修正量, 乱流統計量等) の連成にはPIMPLE法と呼ばれる分離・反復解法が用いられ、非定常の流れ場が計算される。乱流モデルには、SST k- $\omega$ モデルを採用する。対流項は二次精度のLinear Upwindスキームを用いる。また、主な境界条件として、床面第1セル (壁面に最も近い計算セル群) には、滑面を想定し、一般化対数則を適用する。計算領域の最上流端と最下流端、側面も同様の壁面境界条件を設定した。

2.2 解析条件

2.2.1 解析モデル 本解析手法の検証として、水理模型実験<sup>5)</sup>を対象にした計算を実施する。水理模型実験の概要を以下に示す。実験では、幅30cm, 長さ4m余りの水槽内に階段を想定したスロープと流路を配している。水槽の長手方向 (x方向, 流下方向) に沿った断面をFig. 1に示す。解析領域はx方向5.3m×y方向0.3m×z方向1.2mである。実験模型は大きく分けて地上部・階段部・地下部からなる。Fig. 1において青色の点線で示した流入面に時間変化する流量を与えると、薄い青色の領域で示したバッファ用の水槽に水がたまっのち、地上部へ流出する。その後、流れは、階段部を通じて地下部に流入・貯留する。実験では、断面Iにおけるハイドログラフ (時間と流量との関係図), 断面No. 1~No. 5の地下部の各測定点において容量式波高計により計測された水深の時系列データが示されている。本解析では、この実験模型を計算空間内に図のような計算格子 (計算セル) により再現し、計測結果と比較することで解析手法の妥当性について検討する。計算格子の最小格子幅は約1cmである。水平方向の格子間隔はx方向1cm, y方向2cmである。時間刻みは0.001sとした。

2.2.2 流入条件 実験における流入部の流量設定は論文には明確に記述されていないが、断面Iにおけるハイドログラフが示されている。そこで解析では、断面Iにおけるハイドログラフの再現性を目安とし、地上部の流入面に与える流量を調整した。そして、Fig. 2に示すような実験結果とほぼ経時的に一致した流入流量を推定し、流

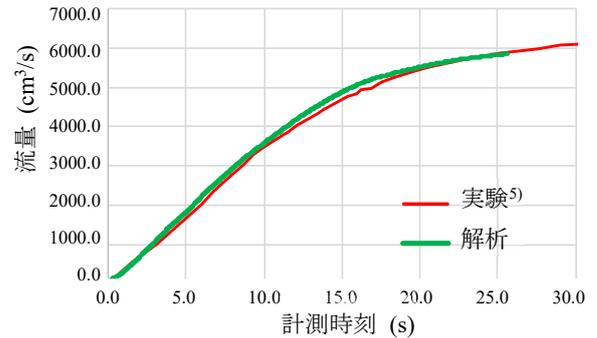


Fig. 2 断面Iにおけるハイドログラフ

Hydrograph at Section I

入条件として設定した。

2.3 解析結果

Fig. 3に各計測点における水深の時間変化の、実験結果と解析結果との比較を示す。各図では、水理模型実験の断面No. 1~5の中心において計測された水深の時間変化が実線で、解析された水深の時間変化が点線で、それぞれ表されている。実験では容量式波高計の仕様のため、初期水位2.5cmが地下部に設定された。解析でも同水深を初期状態として設定の上、解析を実施している。Fig. 3(a) No. 1の測定点において、実験は計測時間7s付近から14s付近にかけて浅い水深が測定されている。この浅い水深は、スロープを下って加速されたことにより、フルード数が1を超えた射流の状態となったためである。なお、フルード数 $F$ は  $F = U / \sqrt{gH}$  ( $g$ :重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ ,  $H$ :水深(m),  $U$ :流速(m/s)) で定義される。解析では、6s付近から18s付近にかけて、実験と同じ理由による浅い水深の状態が計算されている。Fig. 3(b) No. 2においてもこの射流状態は解析結果において計測時間12sから13sにかけてははっきりと確認できる。一方、実測では解析ほど明瞭ではないものの9sから11sの間に観測されている。射流先端部の跳水部分はNo. 2付近まで移動したことが実験と解析結果より伺える。以上より、射流先端部の跳水は、No. 1から最速ではNo. 2付近まで達した後、地下部の全体的な水深の増加により上流に向かって押し戻され、No. 1の、実験における14s, 解析における18s, での急激な水深増加に至っ

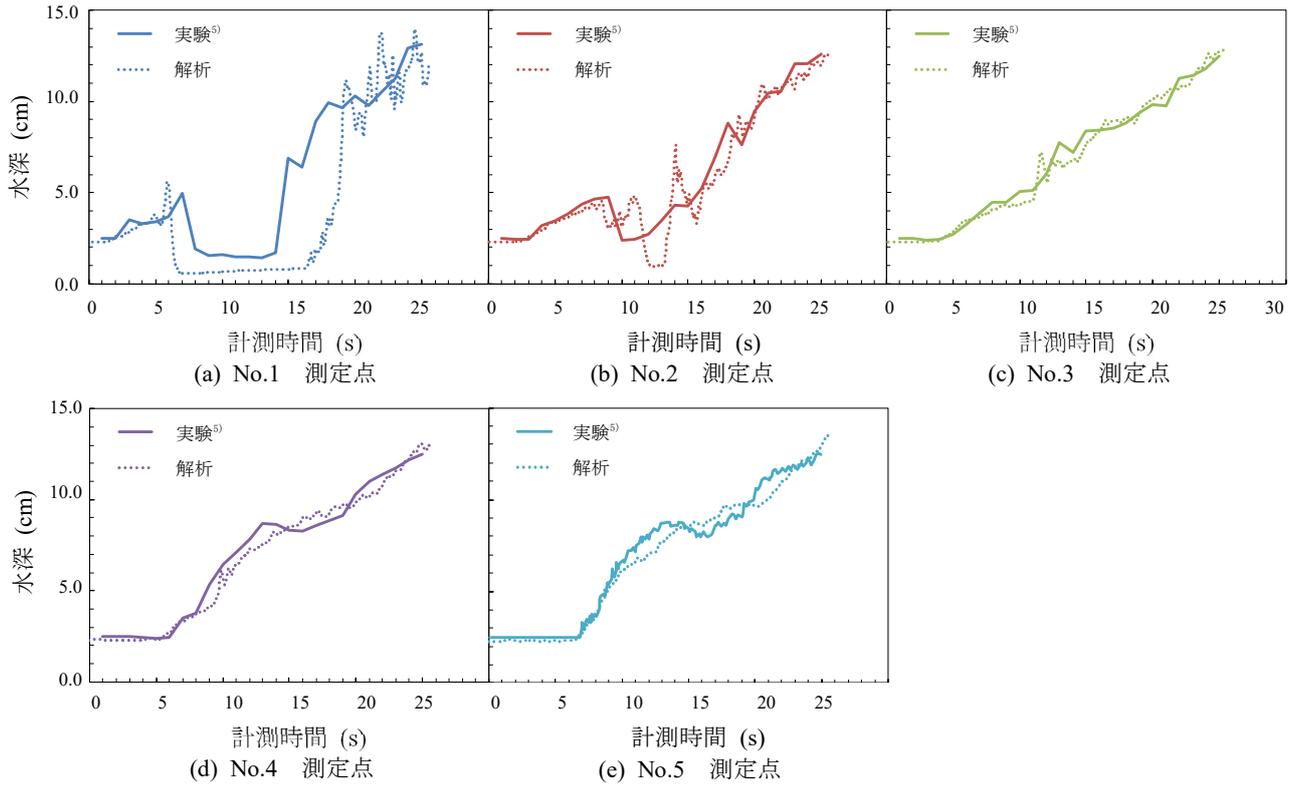


Fig. 3 測定点における水深の時間変化の実験と解析結果の比較  
Comparison of Measured and Simulated Temporal Variations of Water Depth

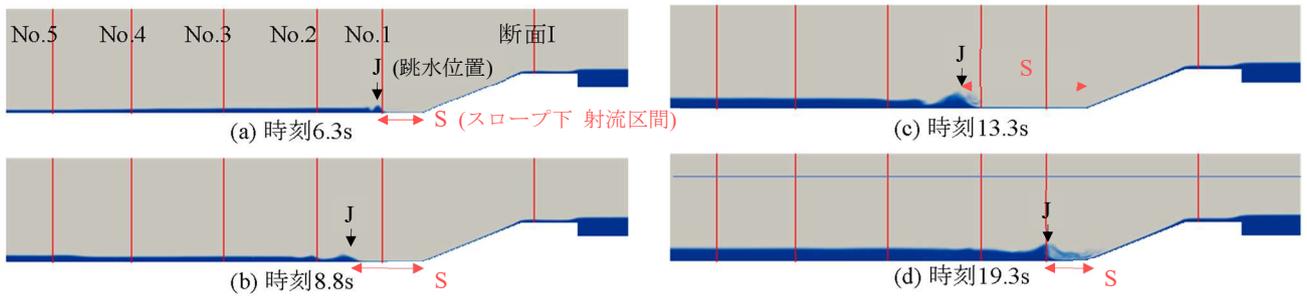


Fig. 4 水理実験模型流路中央断面における流体部分の遷移 (流体解析結果)  
Transition of Volume of Water at the Center of Computational Domain ( $x-z$  plane at  $y=0$ )

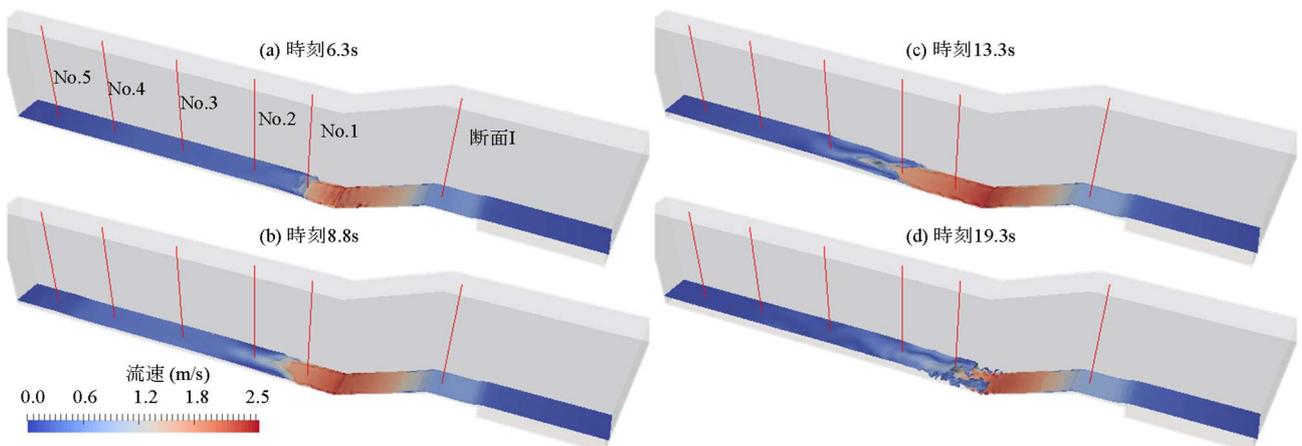


Fig. 5 水面の状態変化と流速分布  
Transition of Simulated Water Surface and velocity (Overview)

たとみられる。水深が浅い状況において非線形性の高い現象である射流からの跳水や、その遷移ラインの移動がある程度解析により再現されていることがわかる。No. 1やNo. 2ほど急激な水深変化がない(c) No. 3～(e) No. 5では、実験と解析との間で大きな差はなく、水深の経時変化が解析により、よく再現されていることがわかる。

次に、Fig. 4に水槽中央断面において計算された流れの時間変化を、Fig. 5に解析結果において液相と気相の境界となる液相の占有率が0.5となる等値面(水面に相当)の遷移を俯瞰した様子を示す。なお、等値面は流速で色付けされている。両図(a)時刻6.3sでは射流部分(橙系の色の部分)がNo. 1まで達している。両図(b)時刻8.8sでは跳水現象にともなう水深の急激な変化がNo. 2の位置にまで達し、両図(c)時刻13.3sでは射流部分がNo. 2に達している。No. 3～No. 5では水深が緩やかに上昇する。地下部の水深増加にともない、一度No. 2付近まで前進した跳水部分が、両図(d)時刻19.3s付近ではNo. 1付近に後退した後、定在状態となる様子が確認できる。

### 3. 地下階の浸水過程の解析

ここでは、実案件適用を想定し、複数階からなる地下空間における、エレベータシャフト等の各階を貫通する開口の有無による浸水状況の変化について検討する。

#### 3.1 解析モデルの概要

Fig. 6に想定建築物の地下階をモデル化した解析領域の概要を示す。想定建築物の地下は地下2階から地下4階に駐車場を有し、車両アクセスのために地上レベルGL0mから地下1階レベルまで、地下1階から地下2階レベルまで、地下2階から地下3階レベルまで、地下3階から地下4階レベルまで、それぞれ直線状の車路(幅員 7m)で構成されるスロープが伸びている。以降の説明では、地下階の表記をBと階数で簡略的に表記する(例えば地下1階をB1と表記)。各階の階高は4mである。Fig. 6にて流入と示された地上レベルの面に大河川の外水氾濫時の破堤箇所近傍や窪地のような立地を想定して50m<sup>3</sup>/sの流量を設

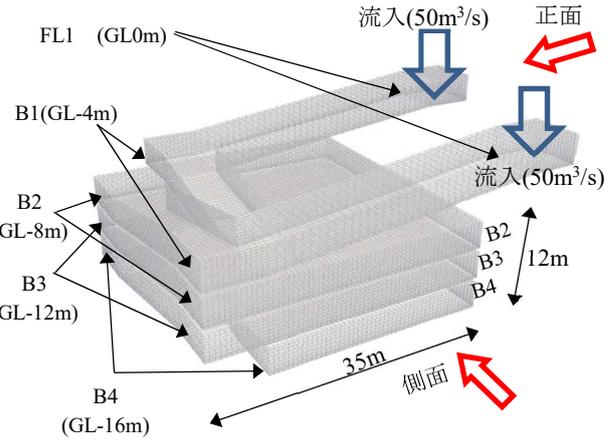


Fig. 6 解析領域の概要  
Simulation Model

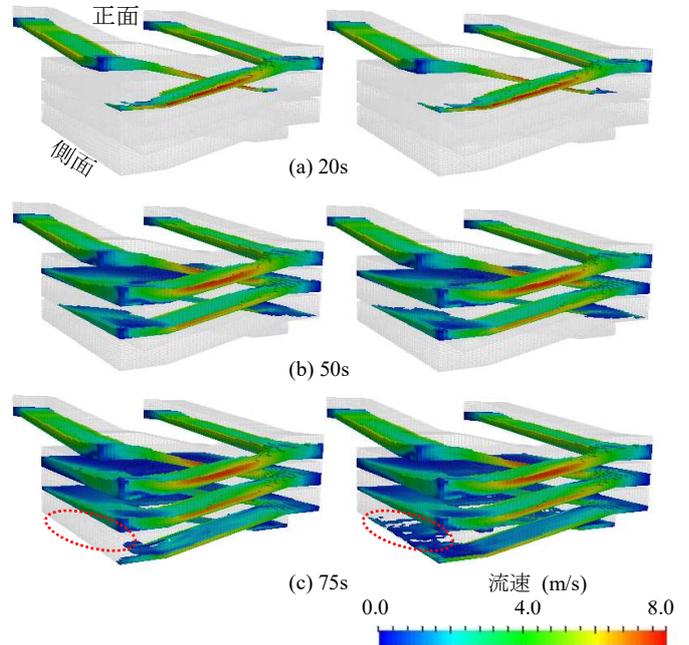


Fig. 7 シミュレーション結果 (貫通開口なし:左 あり:右)  
Simulated Results of Velocity of Water (Without Vertical Void: Left, With Vertical Void: Right)

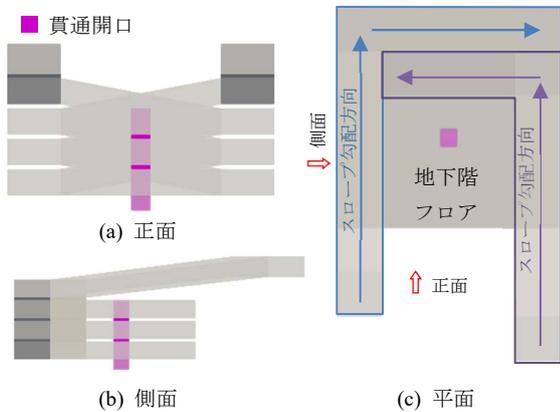
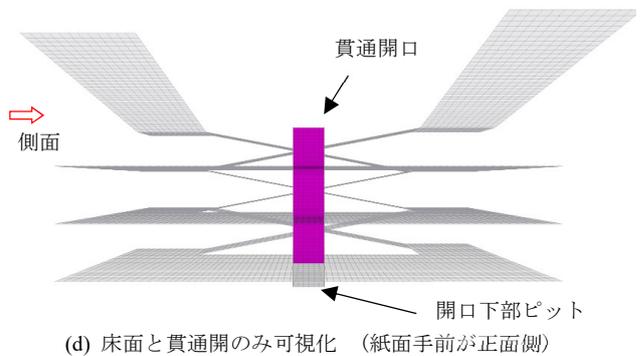


Fig. 8 貫通開口の位置  
Position of the Vertical Void



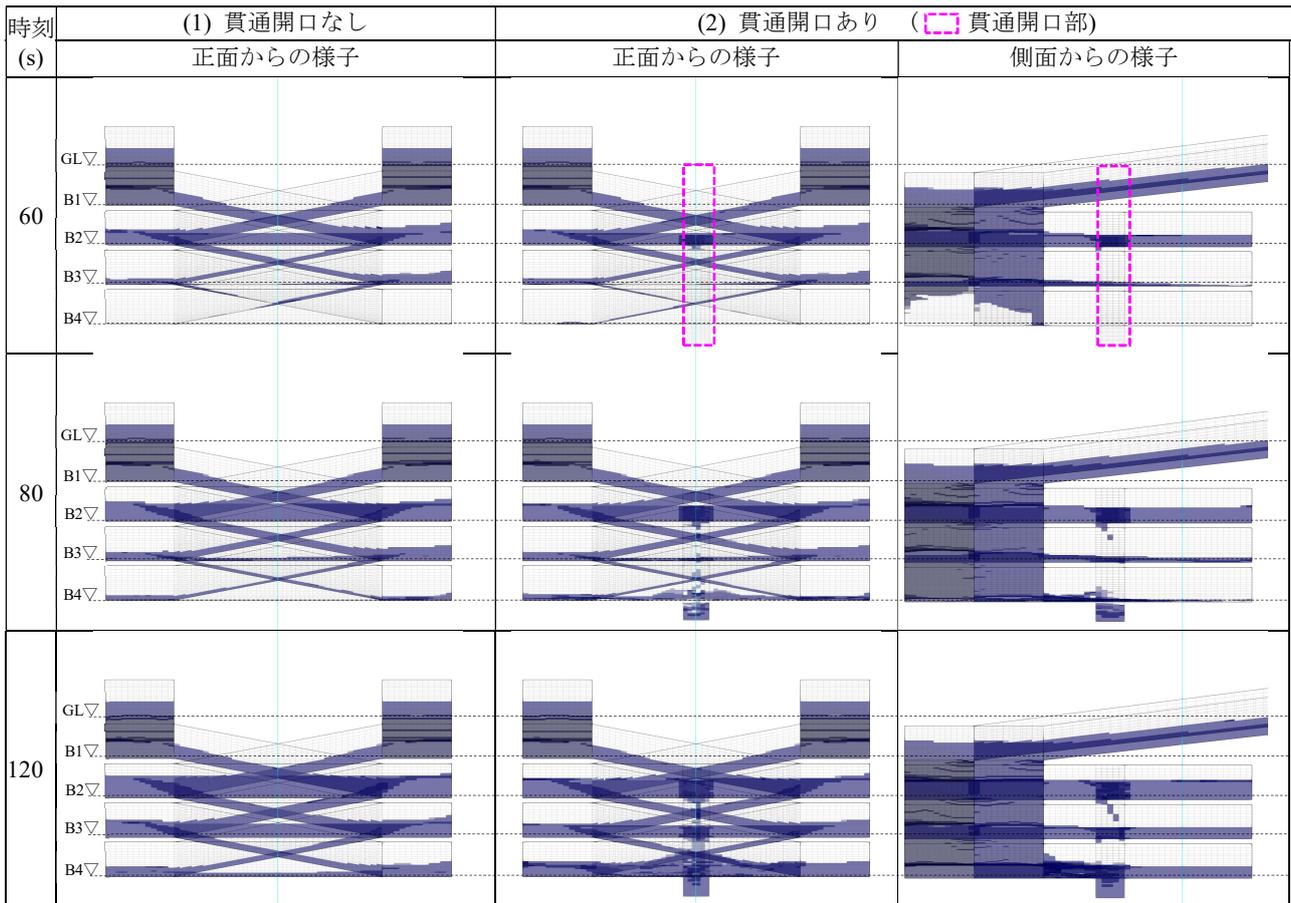


Fig. 9 貫通開口の有無による浸水状況の変化の比較

Comparison of Transition of Volume of Water for The Cases with (2) and without (1) Vertical Void

定し、地下階への浸水状況を解析する。流入が2か所あるのは、地下駐車場の入口と出口両方からの水の流入を表している。なお、便宜的にFig. 6のように流入部側を建物の正面、それに交差する視線方向を建物側面と表現する。また、計算開始時刻を0sとする。最小格子幅は鉛直方向7cm、水平方向58cmとした。時間刻み0.01sとした。他の解析条件は、前章の水理実験による検証と同様とした。

### 3.2 解析結果

**3.2.1 貫通開口なしの場合** Fig. 7に、解析された浸水状況の時間的な変化を示す。左の系列が「貫通開口なし」の場合である。右の系列は「貫通開口あり」の場合であり次節にて詳細を述べる。上から順に(a)時刻20s, (b)時刻50s, (c)時刻75sの状態に該当する。各地下階に浸水が進行していく様子がわかる。また、車路では、地上部から流入してくる水の流速が、各階に浸水する水の流速に比べて高く、スロープにより加速されている状況がわかる。さらに、75sの図においてB2とB3の浸水状況を比較すると、B3へ浸水が広がり始めている段階では、B2の水深が既に深くなった状態であることがわかる。

**3.2.2 貫通開口ありの場合** 実際の地下駐車場施設にはエレベータ等の貫通開口が存在する。開口に対し適切な浸水防止策が講じられていない場合には、開口を通じ水が浸入し、地下階へと広がる状況も想定される。そ

こで、本報告では前述の地下階にエレベータシャフトのような開口が各階を縦貫しているモデルを作成し、開口が存在しない場合と比べて、浸水状況がどのように変化するか解析にて調査した。なお、貫通開口のモデル化に際しては、シャフト部の床を除去するだけでなく、エレベータシャフトの壁(厚みが0の流体が透過しない壁でモデル化)を設け、各階エレベータの入り口に当たる部分のみ水が通過するように設定し、より実際の建物の貫通開口に近い状況を再現した。Fig. 8に貫通開口の位置を示す。(a)正面、(b)側面からの視点であり、(c)平面は上部から見下ろした図で、スロープ勾配方向も付記した。(d)はB2レベルで建物正面側から床面を可視化した様子を示す。設定した開口は、B2とB3、B4を貫通している。解析では、これまでの流入条件と同一条件を設定した。Fig. 7の右側の系列は、貫通開口ありの場合の浸水状況の時間的な推移である。(a)20sと(b)50sは貫通開口なしの場合と大きな差異はないが、(c)75sにおいて赤い点線で囲ったB4の浸水状況に明確な差が確認される。次節ではこの差異について述べる。

**3.2.3 貫通開口の有無による浸水状況比較** Fig. 9に両方のモデルの浸水状況の時間変化(60~120s)を示す。Fig. 9左の列が「貫通開口なし」のモデルを建物正面から見た状況、中央の列が「貫通開口あり」のモデルを建物正面から、右列が同モデルを側面から見た状況を示し

たものである。図中青系の透過着色部分が水を表している。また、Table. 1には各時刻において各階フロアのほぼ中央 (Fig. 9のシアン色の1本の直線上) で取得された床面からの浸水深 (液相の占有率が0.5となる高さ) を示す。Fig. 9(1)「貫通開口なし」の場合と(2)「貫通開口あり」の場合を比較すると貫通開口を通じてB2やB3からB4へと水が移動している様子が確認できる。時刻80sをみると、(2)では貫通開口を通じて水が移動した分B2の水深が1.73mと(1)の1.91mに比べて低く、逆にB4では(2)0.12mと(1)0mに比べて水深が高いことがわかる。

浸水が進んだ時刻120sでは、それぞれのケースで各階の水深を比較すると(1)では地下に行くほど2.29m, 1.58m, 0.50mと水深が低くなる傾向があるが、(2)では水深は2.01m, 1.25m, 1.35mと(1)ほど差が顕著ではないことがわかる。つまり、貫通開口を通じてより地上に近いB2からB3, B4への水の移動が促進された結果、全階を通じてより平均的に水深が増加したと解釈できる。このことから、地下階の貫通開口に対し適切な浸水対策を講じなければ、貫通開口を通じて移動した水により、想定上の浸水速度以上の速度で、最下階B4の浸水が進行してしまう危険性があることがわかる。すなわち、浸水時の対策や避難計画を検討する際に、地上部だけでなく地下階間の大きな貫通開口に対する配慮が必要であることが示唆される。

#### 4. まとめ

本報告では、地下空間における避難安全性や重要設備の保全の検討に資する、地下空間への浸水過程の予測のために数値流体力学に基づく解析手法の適用可能性を検討した。まとめると以下の通りになる。

- 1) 階段入口から地下空間に流入する非定常流れを想定した水理実験を対象に浸水過程のシミュレーションを実施した。その精度の検証を行った結果、非線形性の高い水理学的な現象や浸水の経時的な変化がある程度再現されていることが確認された。
- 2) 実案件適用を想定し、地下空間における鉛直開口の有無による浸水状況の変化について検討した。シミュレーションにより鉛直開口を通じてより地上に近地下階から下階への水の移動が促進される

Table 1 貫通開口の有無による各階水深変化  
Transition of Water Depth in Basement Floors

時刻 (s)		60		80		120	
貫通開口		無	有	無	有	無	有
各階 浸水深 (m)	B2	1.28	1.23	1.91	1.73	2.29	2.01
	B3	0.00	0.00	0.30	0.30	1.58	1.25
	B4	0.00	0.00	0.00	0.12	0.50	1.35

ことを確認し、地上部だけでなく地下の各階を貫通する開口部に対しても適切な浸水対策を講じる必要があることが示唆された。

なお、より現実的な浸水対策の策定のためには、シミュレーションの前提条件となる災害規模の吟味が不可欠である。今後は、本技術をベースに、より広域の災害想定を考慮する方法について検討し、様々な顧客の状況に応じた適切な対策提案を可能とする技術開発へと展開していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会，“気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言”，国土交通省，2019-10，  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/pdf/04\\_teigeehonbun.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/04_teigeehonbun.pdf)，(参照 2020-06-04)
- 2) 内堀 和昭，小野 清秋：水害対策のための 3 次元自由表面シミュレーション，日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル，Vol. 2015, No. 135, pp. 1-9, 2015
- 3) 辰己賢一，他：市街地氾濫模型実験，京都大学防災研究所年報，Vol. 46B, pp. 275-286, 2002
- 4) H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby : A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in physics, Vol. 12, No. 6, pp. 620-631, 1998.11
- 5) 本田洋平，多田彰秀，古本勝弘：階段入口から地下空間へ流入する遷移流れの数値シミュレーション法に関する研究，長崎大学工学部研究報告，Vol. 32, No. 59, pp. 171-177, 2002