

都市水害時における小規模地下空間への浸水過程の数値解析

米山 望・間島真嗣*・戸田圭一・山本大介**

*国土交通省

**京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究は、階段部も含めた小規模地下空間での氾濫水の挙動を解析モデルにより精度よく予測することを目的としている。まず、地下空間内の氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼす階段部のみを対象として、実物大階段模型に VOF 法を用いた三次元数値解析手法を適用した結果、流況をおおむね再現できた。つぎに、小規模地下空間の実験模型（縮尺 1/15）の浸水挙動に適用した。その結果、VOF 法を用いた三次元数値解析法は小規模地下空間の内の氾濫水の挙動に適用可能であることがわかった。

キーワード： 三次元数値解析，小規模地下空間，都市型水害，浸水解析，VOF 法

1. はじめに

福岡水害 (1999 年, 2003 年) や東海水害 (2000 年) のように都市部で洪水氾濫が発生すると地下空間が浸水する恐れがある。地下空間には大きく分けて、駅前地下街といった大規模なもの、ビルの地下階や地下室といった小規模なものがある。このうち、小規模な地下空間は床面積、容積が小さいために急激な浸水深の増加が予想される。実際に、1999 年の福岡水害、同年の東京都新宿区では、地下室で水死するという事故が発生している。近年、大規模な地下空間での浸水被害に対する認識が高まり、その対策について検討が進んできた。しかし、小規模な地下空間については、浸水深の急上昇により、実際に人命が失われる可能性が大規模地下街より高いにも関わらず、被害に対する認識および対策に対する検討が十分とは言えない。

このため、著者らの研究グループでは、小規模地下空間における浸水被害の軽減に関する研究を行っている。本研究は、小規模地下空間の浸水挙動の予測に着目し、数値解析の浸水挙動予測への適用性を検証したものである。

以下では、まず、これまでの地下浸水解析法について簡単に説明した後、本研究で用いる VOF 法に基づいた三次元流動解析モデル（以下、VOF モデル）について説明する。次に、地下空間内の氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼすであろう階段部のみを対象とした解析を行い、実物大階段模型を用いた実験結果と

比較することにより VOF モデルの階段部流動への適用性を検証する。さらに、小規模地下空間の実験模型を対象とした解析を行ない、実験結果と比較することにより小規模地下空間内流動への適用性を検証する。また、従来の浸水解析法の一つであるポンド（貯留槽）モデルとの比較も行ない、本研究の解析モデルの優位性を確認する。

2. 地下浸水の解析手法

栗山 (2002) は大阪市北区梅田の地下街、およびそれに接続する地下鉄路線を対象として浸水解析を行った。彼はスロットモデルの概念を組み込んだポンド（貯留槽）モデルを適用した。ポンドモデルは貯留槽内の流れを詳細には表せないものの、実際の地形場に適用することが比較的容易であり、かつ氾濫水の拡がりの概略を表現できるモデルである。次に中井 (2003) はポンドモデルの妥当性を検証するため、京都市御池地下街の水理模型を用い、模型実験を行った。その結果、ポンドモデルの解析結果は浸水実験の結果を定性的に再現していた。

本研究は、階段部も含めた小規模地下空間での氾濫水の挙動を精度よく予測することを目的としている。地上が氾濫した際には、氾濫水は階段部を通して地下空間に流入するため、階段部で加速された氾濫水が、地下空間内で複雑な挙動を示すことが予想される。ポンドモデルでは、氾濫水の挙動の概略を表現

できるものの、詳細に挙動を検討することは難しい。そこで、本研究では、著者ら(米山・守屋, 1995; 米山, 2001)によるVOFモデルを地下浸水解析に適用しその妥当性を検証する。この解析手法の特徴として、

- ① 大変形を伴う水面変動が計算可能
- ② 計算が安定で長時間の継続計算が可能
- ③ アルゴリズムが単純で独自の工夫が容易
- ④ 自由水面の形状が階段状になるため、高精度な水面形変動予測ができない

が挙げられる。著者らはこの手法を用いて、三次元ダムブレイク流れや揚水発電所を想定した貯水池内三次元流動(米山・井上, 2001), 跳水現象を対象とした鉛直2次元解析, 日本海中部地震津波(米山・松山, 1997), 北海道南西沖地震津波(米山ら, 2002)を対象とした津波遡上現象の再現を行なっている。本研究では、水のない(dry)の状態の地下空間が浸水する状況を想定しているため、津波遡上現象に適用した解析手法を用いた。この解析手法は、地下空間への浸水と同様にdryの状態である地形への遡上を想定しているため、適用が容易と考えたためである。

2.1 VOF法を用いた三次元流体解析手法の概要

以下では、VOFモデルについて簡単に説明する。

(1) 基礎方程式

VOFモデルで用いる基礎方程式は、以下のようなものである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式(Reynolds方程式)($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 u_i :流速の各方向成分、 G_i :単位体積あたりの外力、 p :圧力、 ρ :流体密度、 ν :動粘性係数、 F :各計算セルの流体存在割合、 $\bar{\cdot}$:レイノルズ平均量、 $\overline{\cdot}$:レイノルズ平均量からの変動量であり、式(2)中のレイノルズ応力 $-\overline{u'_i u'_j}$ を求めるため、以下の乱流評価式を用いる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

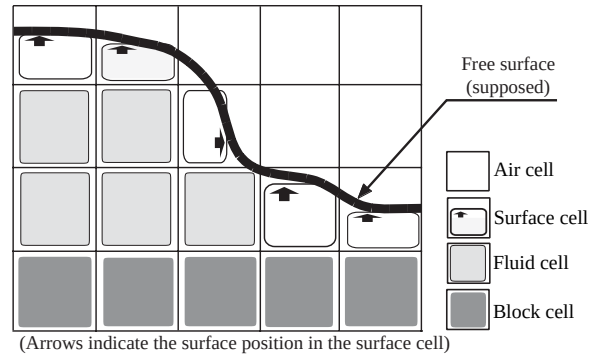


Fig. 1 expression of free surface and classification of computation cell in VOF method

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

ここで、 $k(\equiv \overline{u'_i u'_i}/2)$:乱流エネルギー、 $\varepsilon(\equiv \overline{\nu u'_i u'_i u'_{i,j}})$:乱流エネルギー散逸率、 ν_t :渦動粘性係数であり、式(3)～式(4)中の定数は $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.45$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ とした。

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化して解析する。各物理量の定義点は、流速のみを計算セルの境界面中央、その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。

(2) 水面の移動法

水面の移動は、VOF法に基づき次式を用いて計算する。

(流体体積の移流方程式)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

ここで、 F は各計算セルの流体存在割合であり、

$$F = \frac{\text{計算セル内の流体体積}}{\text{計算セルの体積}}$$

と表される。

計算ではまず、各計算セルを F の値および周囲のセルの状況から空セル、表面セル、流体セル等に分類する。Fig. 1に水面形状の表現および F の分類例を示す。次に水面形状の変形・移動を行う。この際、流体移動量は式(7)を用いて算定する。この算定は、風上側の計算セルの状況に応じて行われる。Fig. 2に流体移動量の算定例を示す。この手法の詳細については、米山・守屋(1995)を参照されたい。

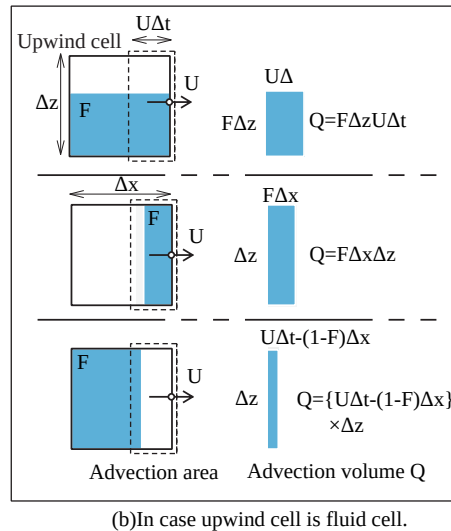
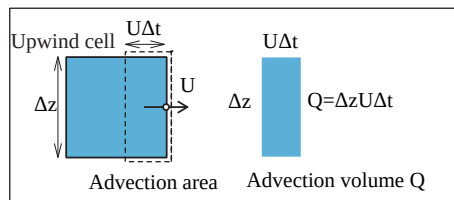


Fig. 2 Advection method of F value

3. 実物大階段模型を対象とした検討

ここでは、小規模地下空間内の氾濫水挙動に大きな影響を及ぼすとおもわれる階段部の流れに着目し、VOFモデルの階段部流動への適用性について検討する。まず、モデルを検証するために行った実物階段模型を用いた階段下部の水位および流速測定について概要を説明する。

3.1 実物階段模型を用いた実験の概要

Fig. 3に対象とした実物大階段模型の概要を示す。同図には階段下部の流速および水位測定を行った断面および解析対象範囲もあわせて表示している。実験は、階段上部の水深を一定として、測定断面で計測を行った。上部の水深は、10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cmと変化させ、流速は測定断面内の9点をピトー管を用いて計測した。

3.2 解析結果と実験結果の比較

VOFモデルによる解析は、三次元で行った。メッシュ総数は110,864となった。作成した解析用メッシュの鉛直断面図をFig. 4に示す。Fig. 5に階段下流通路における断面平均流速を、Fig. 6に水路中央水深を実験値と解析値ともに示す。階段下流通路での断面平均流速の実験値と解析値の差は、越流水深が大きいケー

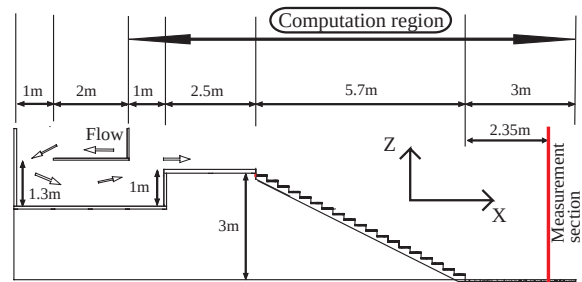


Fig. 3 Real size stair model

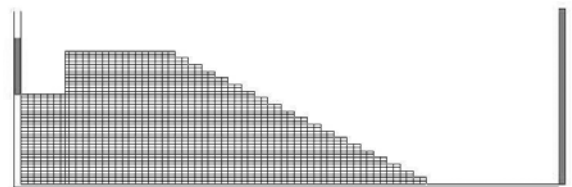


Fig. 4 Computation meshes for the real size stair model (Vertical section)

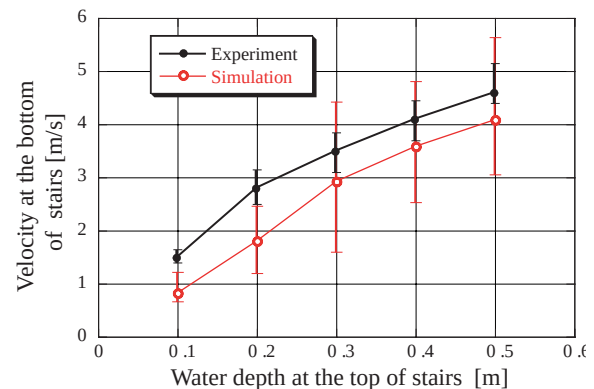


Fig. 5 Comparison of cross-sectional mean velocities at the bottom of stairs

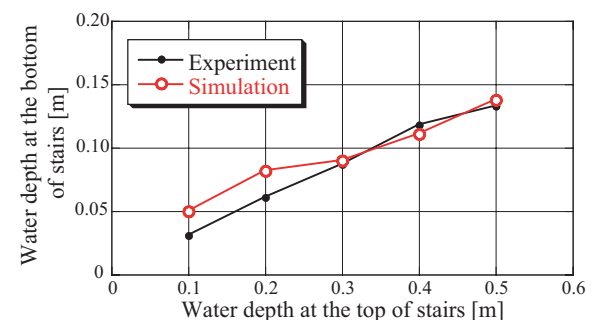


Fig. 6 Comparison of the depth at the bottom of stairs

スの場合、1割程度であり、解析による流速の変動幅の中に位置していることがわかった。また、水路中央水深はおおむね一致していることがわかった。以上より、階段下流通路の流況をおおむね再現できたことから、VOF法モデルを階段部の流況に適用できることがわかった。

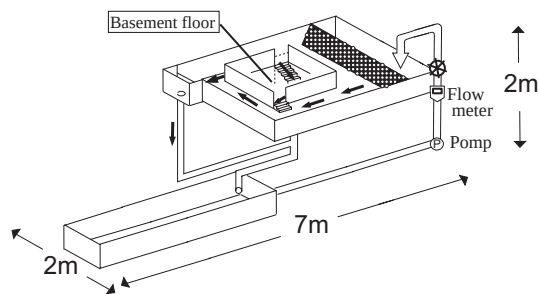


Fig. 7 Small underground space model

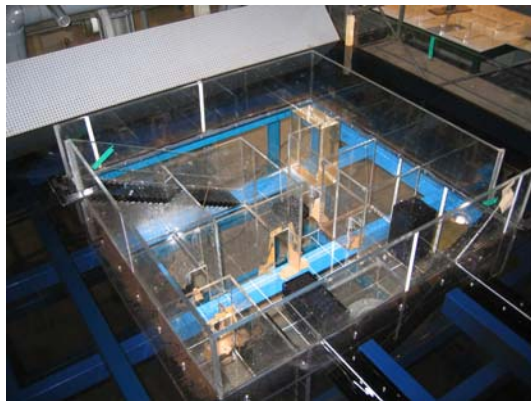


Photo 1 Basement floor of the small underground space model

4. 仮想の小規模地下室を対象とした検討

前章の結果を受け、階段部を含む小規模地下空間での氾濫挙動への適用性について検証する。

4.1 小規模地下室の浸水実験

(1) 実験装置の概要

本研究で使用した実験模型は京都大学防災研究所宇治川水理実験所に設置された小規模地下空間模型である。この小規模地下空間模型は1辺が15m程度のビルの地下階を想定したものである。実験はフルード相似則を用いて行い縮尺は1/15とした。実験模型の概略をFig. 7に、実験装置のうちの地下室部をPhoto 1に示す。また、Fig. 8に地下室の平面図とともに、浸水深の計測位置を表示した。

(2) 実験結果の考察

流入口より越流水深3.3cmで、毎秒0.91ℓ流入させた場合（実験ケース1とする）の各計測地点における水深変化をFig. 9に、同じ流入流量で、地下室模型内に仕切り板をおいた場合（Fig. 8参照；実験ケース2とする）の水深変化をFig. 10に示す。実験ケース1から、

- 浸水の開始と同時に地下室内の浸水深が急激に上昇すること
- 部屋の配置などの影響で地点により浸水の到達時間が異なること

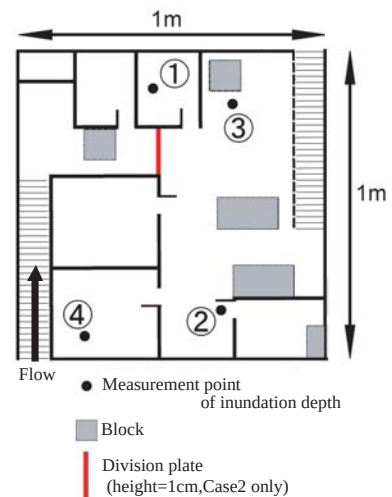


Fig. 8 Basement floor of the small underground space model

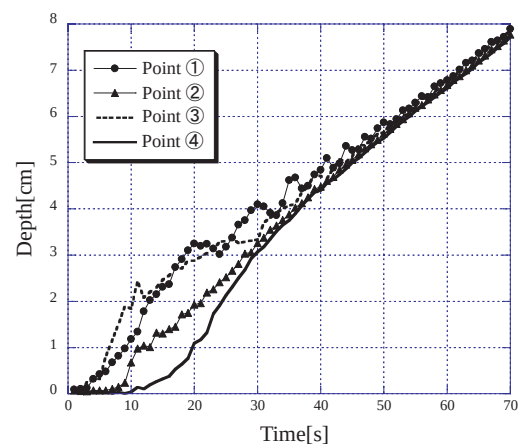


Fig. 9 Time variation of the measured inundation depth(case1)

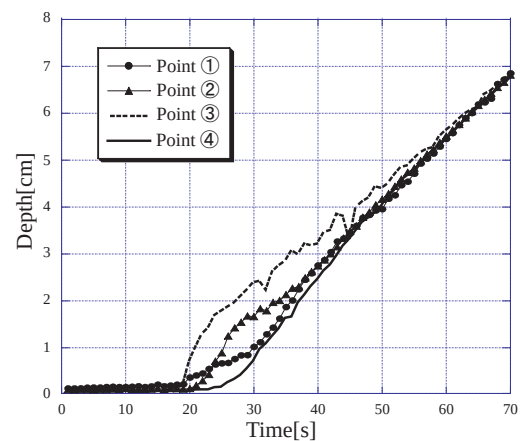


Fig. 10 Time variation of the measured inundation depth(case2)

がわかった。本実験を実物換算で考えると、1mの水深に達するまでの時間は3.8分であることがわかり、小規模な地下室で浸水が発生した場合、短い時間で

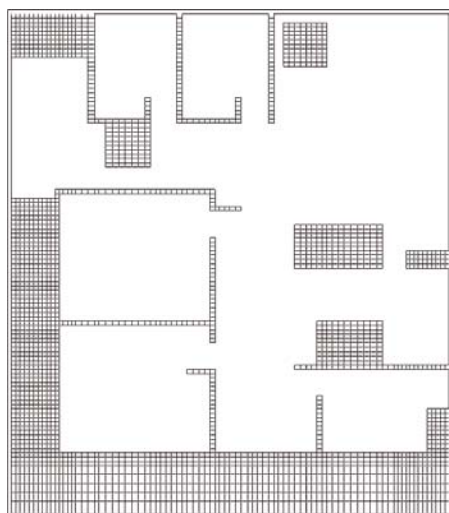


Fig. 11 Computational meshes for numerical simulation (basement floor level)

深刻な状況になることが確認された。また、実験ケース2からは、地下室模型内に仕切り板等が設置されている場合、浸水深の上昇開始時間を遅らせることができることがわかった。遅らせた時間は、今回の実験では実物換算で1分10秒であり、地下空間に何らかの工夫を施すことにより、避難経路などを一定時間浸水から守れる可能性があることがわかった。

4.2 数値解析による浸水過程の再現

本研究では、VOF モデルにより浸水過程の再現計算を行うとともに、比較のため従来より用いられているポンドモデルに基づく解析も併せて行った。

(1) VOF モデルの解析条件

VOF モデルの解析は階段部を含む地下室部分を解析範囲とした。解析メッシュ分割を Fig. 11 に示す。階段部の階段1ステップの踏面(2cm)を2等分(Y軸方向)、蹴上(1cm)を2等分(Z軸方向)して作成した。また、X軸方向は階段幅(10cm)を10等分した。つまり、階段部では、メッシュ刻み幅をX方向が1cm、Z方向が0.5cm、Y方向が1cmである。階段部以外のメッシュ分割は、地下空間模型の部屋を仕切る壁や障害物をメッシュと一致させるため、メッシュ刻み幅を変化させている。メッシュ数は、61,6896メッシュ(X方向84×Y方向68×Z方向108)となった。なお、氾濫水は階段上部の流入口から一定流量0.91ℓ/sで流入させた。

(2) ポンドモデルの解析条件

ポンドモデルによる解析は、栗山らの方法(栗山, 2002)に基づいて行った。用いた貯留槽の分割を Fig. 12 に示す。貯留槽の分割は廊下に設置した障害物を水の流入しない1つの貯留槽として扱って行なった。貯留槽の数は30個となった。

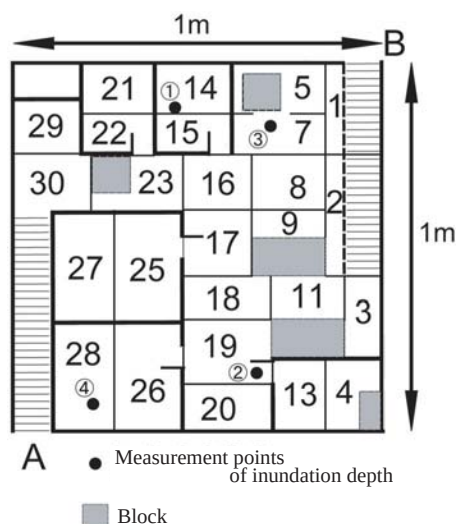


Fig. 12 Computational ponds and the pond numbers

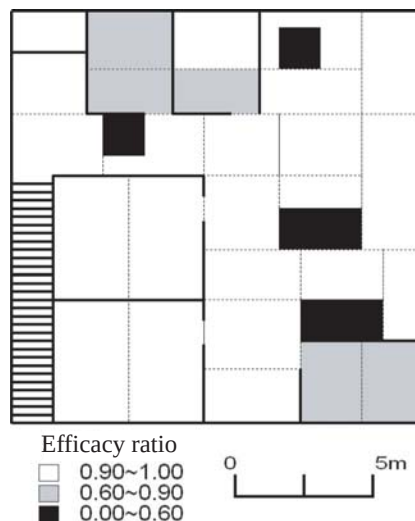


Fig. 13 Efficacy ratios of each pond

Fig. 12 に示したように、氾濫水が流入する階段は計算領域に含めていない。これは実験時に地下室模型上部から撮影した画像を解析した結果、水が階段を流下するのに0.6秒程度しかかからないため階段直下から計算を開始しても解析結果に影響はないと考えたためである。本解析では、階段からの流入を一定流量0.91ℓ/sを30番のポンドに直接与えることで表現した。また、地下室内の平面部はすべて同一平面上に位置する。各貯留槽ごとの有効率を Fig. 13 に示す。有効率は

$$\text{有効率} = \frac{\text{実際に水が溜まる底面積}}{\text{貯留槽の底面積}}$$

で定義する。これを各貯留槽ごとに決定した。なお各貯留槽の有効率の算出は実験の対象とした地下室模

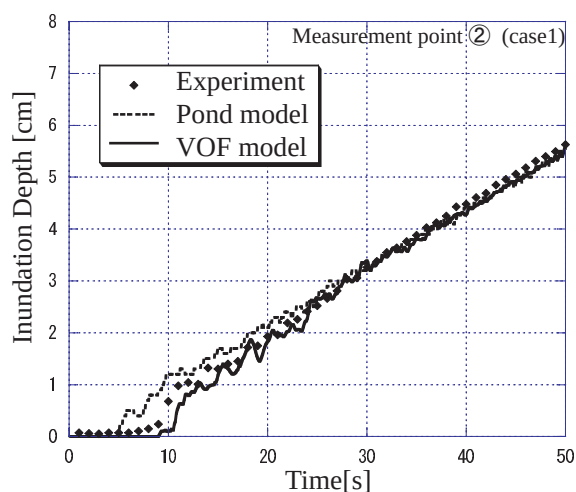


Fig. 14 Comparison of time variations of inundation depth (point 2)

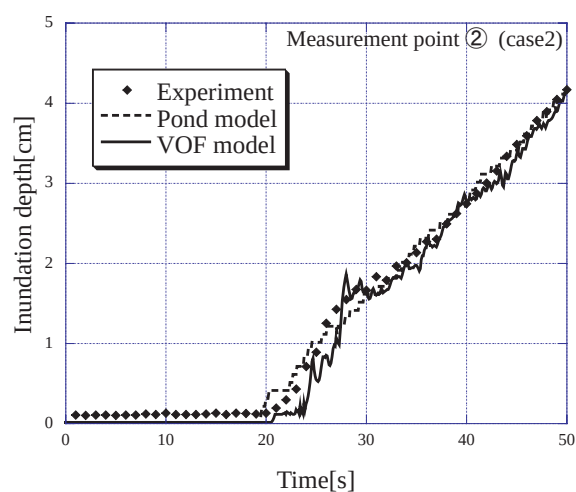


Fig. 16 Comparison of time variations of inundation depth (point 2)

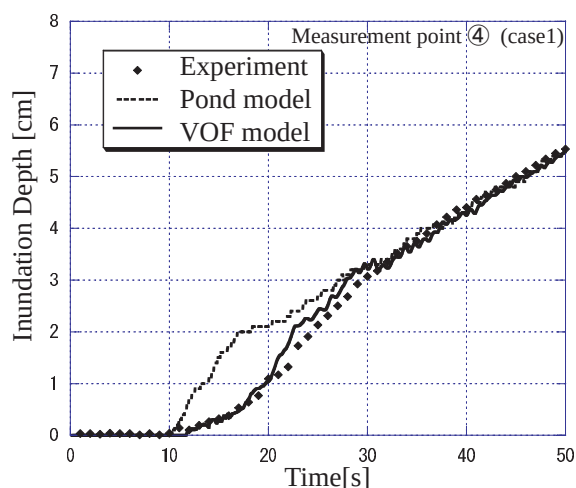


Fig. 15 Comparison of time variations of inundation depth (point 4)

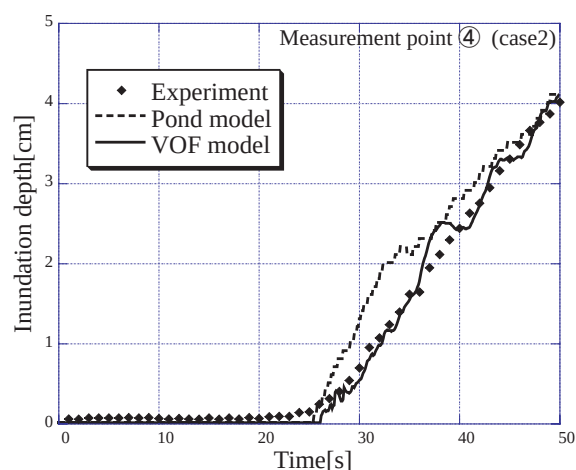


Fig. 17 Comparison of time variations of inundation depth (point 4)

型の設計図面及び実験時の測定をもとに行った。

4.3 実験結果と解析結果の比較

(1) 浸水深の時間変化

実験ケース1, 2について、ポンドモデルおよびVOFモデルを用いて解析をおこない、計測地点2, 4の水位上昇を実験ケース1について比較した結果をFig. 14およびFig. 15に示す。

地点2では、ポンドモデルでの氾濫水の到達時間が実験結果に比べて5秒程度早いのにに対して、VOFモデルではおおむね一致している。地点4では、氾濫水到達後(10秒後)から40秒後まで、ポンドモデルによる解析結果と実験結果では、最大1.5cm程度の水深差があるのに対して、VOFモデルでは実験結果をおおむね再現できている。

実験ケース2におけるFig. 16, Fig. 17に測定点2, 4におけるポンドモデル, VOFモデル, 実験によ

る水深の時間変化を示す。地点2では、VOFモデル、ポンドモデルともに実験結果をおおむね再現できている。地点4では、VOFモデルによる結果は実験結果をおおむね再現している。それに対して、ポンドモデルでは氾濫水到達後(計算開始25秒後)から計算開始40秒後までに最大0.7cm程度の差がみられる。

以上のように、ポンドモデルに比べ、VOFモデルは実験に近い結果を示した。とくに流入階段部から最も離れた地点4では、ポンドモデルと比較して実験の再現性がよい。VOFモデルでは、流入口である階段での流速や、障害物、開放状態のドアによる流れの変化を表現できるため、水深測定点が障害物に近い地点2, 流入口から最も離れている地点4で実験をよく再現できたと考えられる。

(2) 浸水域の時間変化

Fig. 18に実験ケース1における浸水域の時間変化をVOFモデル、ポンドモデル別に実験での浸水の先

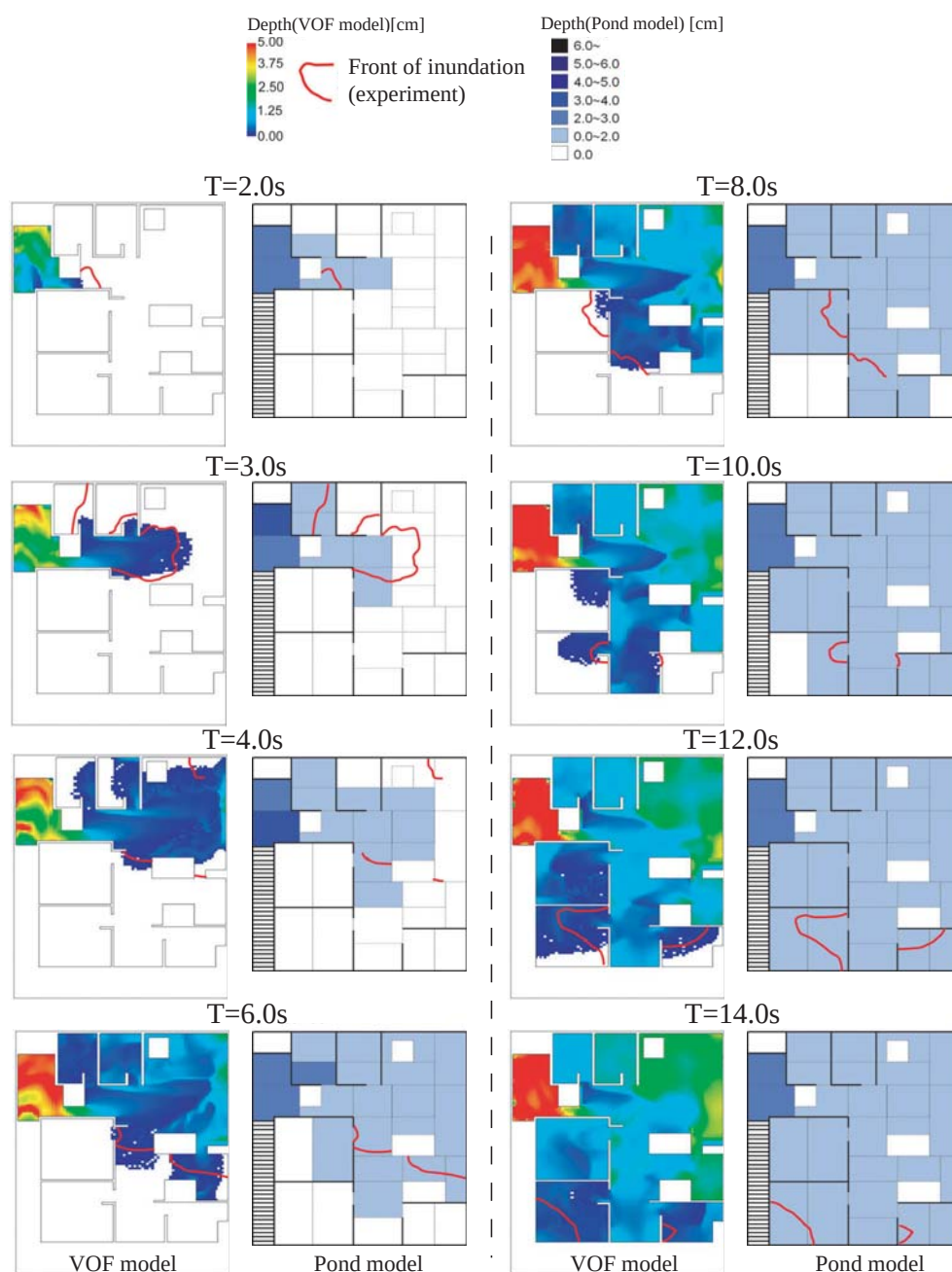


Fig. 18 Comparison of time variations of inundation area

端とともに示す。実験での浸水の先端は、実験時に模型上部からビデオ撮影し画像解析したものを用いた。VOFモデルでは、浸水域の広がり実験と比較しておおむね一致している。ポンドモデルでは、全体として浸水域の広がりをよく表現しているとはいえない。これは格子の解像度だけでなく、流速や障害物による影響を表現できないためだと考えられる。計算開始4秒後では、障害物による狭窄部で氾濫水が加速し直進する様子が、VOFモデルでは表現できているが、ポンドモデルでは表現できていないことがわかる。

以上からわかるように、VOFモデルは、実験の水

深変化を精度よく再現している。特に、流入口からの距離が長い、計測地点4における浸水先端の到達を適切に再現している。一方、ポンドモデルは、計測地点2においては十分な精度で再現しているといえるが、計測地点4では到達の遅れを再現できていない。このことから、入り組んだ地下空間での浸水を解析する場合においては、流れの速さおよび方向を適切に再現できるVOFモデルが有効であることがわかる。

5. まとめと今後の予定

以上述べてきたように、小規模地下空間での浸水

被害を想定し、仮想の地下室を対象に浸水実験を行うとともに数値解析を行ってその適用性を検証した。その結果以下のことがわかった。

- 水理実験の結果、小規模地下空間では浸水開始後、浸水深が急上昇するとともに、地下室内の部屋の配置の影響で、場所によって浸水先端の到達時間に有意な差があることが確認された。
- ポンドモデルおよび三次元モデルを水理実験の浸水現象に適用したところ、流入口に比較的近い位置では、両モデルとも適切に水位上昇を再現できるが、流入口から離れた位置では、三次元モデルが現象を良好に再現した。これは、ポンドモデルでは地下室内の部屋配置の影響を受けた流れの流速や流向の変化を適切に解析できないためと考えられる。

今後は、多くの条件を設定して実験・解析を行い、浸水域の時間変化を含めた詳細な比較・検討を行う。また、地上部の氾濫状況を考慮するために地上部を含めた浸水解析を行って、より現実に近い条件での浸水挙動の再現を試みる。さらにこれらを踏まえて小規模地下空間での被害軽減のための方策を検討する予定である。

参考文献

- 栗山健作 (2002) : 都市の多層地下空間における浸水解析法の研究, 京都大学修士論文.
- 中井勉 (2003) : 地下空間の浸水危険性に関する水理学的研究, 京都大学修士論文.
- 米山望・守屋祥一 (1995) : VOF 法を用いた自由液面の数値解析手法, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.373-378.
- 米山望・松山昌史 (1997) : 自由液面解析コード (FRESH-FV) を用いた津波遡上解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.266-270.
- 米山望 (2001) : 自由水面をもつ多次元流れの数値水理学的研究, 京都大学博士論文.
- 米山望・井上素行 (2001) : 三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.127-140.
- 米山望・松山昌史・田中寛好 (2002) : 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, 139-150.

Numerical Analysis for Inundation Process of Small Underground Space in Urban Flood

Nozomu YONEYAMA, Shinji AIHATA*, Keiichi TODA and Daisuke YAMAMOTO**

*Ministry of Land Infrastructure and Transport

**Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The purpose of this study is that the inundation process of a small underground space included stairs is predicted precisely by numerical simulation. A 3-D numerical simulation model with VOF method is applied to a stair and a small underground space in urban flood. The stair which is simulated is a full-sized hydraulic model, and the small underground space is a hydraulic model with 1/15 scale. It is found that the numerical simulation model can be applied to the stair in urban flood, and the computation result of the small underground space shows good agreement with the experimental result.

Keywords : numerical analysis, inundation process, small underground space, urban flood, VOF method