

階段入口から地下空間へ浸入する非定常流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation on Unsteady Flow Induced by Overland Flood Flow Intrusion
from Stair's Entrance into Underground Space

多田彰秀¹・本田洋平²・古本勝弘³

Akihide TADA, Yohei HONDA and Katsuhiko FURUMOTO

This paper deals with the development on a numerical simulation method of unsteady flows induced by overland flood flow intrusion into underground space in an urban area. In particular, unsteady flows such as a surge and a hydraulic jump in the underground space are investigated experimentally and numerically. The numerical model used here can reproduce the unsteady flow with the propagation of an interface between open channel free surface flow and pressurized pipe flow. The calculations are carried out under the experimental conditions of laboratory tests. The numerical results are compared with the laboratory tests to make sure the validity of the model.

Keywords; inundation flow, numerical simulation, underground space, urban area

1. はじめに

近年、多様化の進む大都市部の地下空間が、高潮、津波および河川の溢水・破堤に伴う洪水氾濫水などによって浸水する場合、大量の水が短時間に流入し、地下空間内では常流・射流の混在する非定常な遷移流れが出現するものと予想される。これまでの開水路内に発生する常流・射流が混在する流れに関する数値解析法では、流れの状態を定常流として取り扱った研究^{1), 2)}が大半であり、それらを時間的に変化の激しい地下空間内の常流・射流が混在する遷移流れに適用することは難しいものと判断される。

本研究は、現実の地下空間への浸水過程を数値シミュレーションするための第一段階として、地上部の階段入口から地下空間に流入する非定常流れを実験水路内に発生させるとともに、地下空間（地下通路部）に出現する常流・射流が混在する遷移流れの数値シミュレーションを行い、水理実験結果との比較を通して数値解析法の有効性を検証するものである。

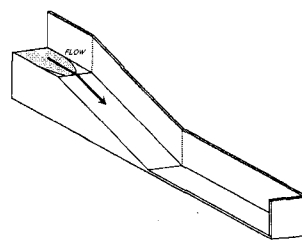


図-1 解析対象とした非定常流れ

キーワード； 氾濫浸水，数値シミュレーション，地下空間，大都市部

1) 正 会 員 博士(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

2) 修士(工) 桐相愛 愛媛営業所

3) 正 会 員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

2. 解析対象とした水理現象

実際の地下空間において氾濫水に伴う浸水流れを詳細に計測した研究事例は、これまでに報告されていない。このため、地下空間における浸水シミュレーションを実施しても、解析結果の妥当性を検証するデータがないのが現状である。本研究では、地下空間内で発生する不連続部を含む非定常な遷移流れを水理実験により詳細に計測するとともに、その再現計算を行うことによって浸水シミュレーション法の構築を最終目標としている。すなわち、地上部から地下空間へ通じる階段に見立てた斜路に水平の袋小路通路が連結した実験水路を高速で流下する非定常流れ(図-1 参照)を対象とし、水理実験結果および再現計算結果の比較より浸水シミュレーション法の有効性について検討する。

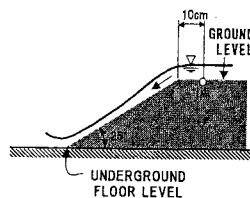


図-2 階段入口を想定した模型

3. 境界条件として与える流入流量の評価について

これまで地下空間への浸水過程に着目した既存の研究は、高橋・中川ら³⁾や井上・戸田ら⁴⁾などによるものだけで、その数は多くない。また、それらの研究では、地上部の階段入口から地下空間へ流入する流れが「段落ちモデル」で説明できるものとし、流量係数を与えて地下空間への流入流量が評価されている。しかし、段落ちモデルによる評価法では、地上部から地下部へ流入するに要する時間および階段勾配による加速の効果などが考慮されておらず、さらに地上部の水深が0.5 m以上になると実際よりも小さな流量を与えることも指摘されている⁵⁾。

そこで、図-2 に示すような階段入口を想定した模型を用いて水理実験を行い、階段入口から地下空間へ流入する流量の評価を行った。実験は、図-3 に示すフローチャートに従い、実験水路の上流端バルブの開度により流量を変化させるとともに、実験水路内の流れが定常状態となっていることを確認した後、地上部 i 点の水深 h_i 、下流端三角堰の越流水深 H および越流量 Q_v の計測を合計 12 ケース実施した。それらの結果と最小自乗法を用いて、流量評価式(図-3 の(2)式)の流量係数 $C_*' = 22.33$ 、ベキ乗定数 $a = 1.87$ が算定された。図-4 は、地上部に相当する i 点の水深 h_i と(2)式で評価される流量 Q との関係を示したものである。図中には、実験で計測された越流水深 H を(1)式に代入して算定した流量 Q_v (□)がプロットされている。 Q_v と(2)式との差は小さく、提案する流量評価式の妥当性が確認できる。さらに、段落ちモデルに流量係数 $\mu = 0.8$ および $\mu = 1.0$ を与えた場合の流量がそれぞれ細線および破線で併記されている。図より、地上部 i 点の水深が 1.5 cm までは、(2)式と段落ちモデルの流量評価に大差はない。しかし、水深が 2.5 cm 以上の領域では、本研究で対象とする実験水路の流入流量を(2)式の方が段落ちモデルより厳密に評価しているといえる。

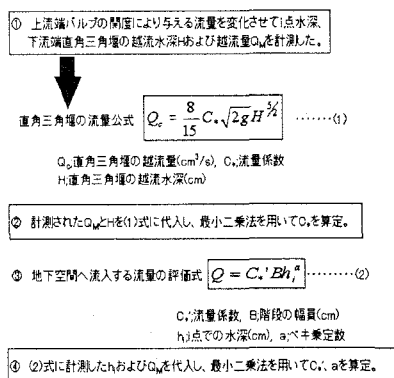


図-3 水理実験のフローチャート

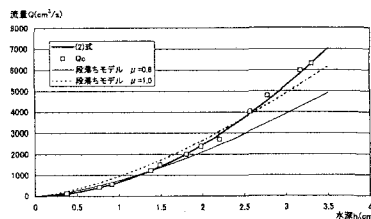


図-4 地上部から地下空間への流入流量

4. 浸水実験の概要および実験結果

数値解析法の有効性を検証するため、図-5 に示すような実験装置(水路幅; 30cm、斜路部傾斜角; 25°)を作製し、上述したような非定常な遷移流れの水利実験を行った。ここに、地下通路部の上流端に近い No.1 波高計設置断面を断面Ⅰ、そこで計測された水深を h_1 とし、順次下流に向かってそれぞれ断面Ⅱ、 h_2 、……断面Ⅴ、 h_5 と定義している。また、地下通路部の水深を容量式波高計で計測するためには、常時、波高計ブローグの先端が水中に没していなければならない。そのため、地下通路部に相当する水路には一定水深の湛水を貯留させて初期状態を設定した。次いで、上流端

のバルブから一定流量を供給しつつ、上下可動な排水管用で本水路に流入しないように排水させながら流量の定常供給状態を確認した。その後、排水管を急閉することで流れを切り替え、本水路に流量を与えて非定常流れを発生させた。さらに、断面Ⅰから断面Ⅴの水路中央部に設置された容量式波高計(サンプリング周波数; 10Hz)で水深の時間変化を計測した。

図-6 は、地上部に相当する本水路 i 点での水深 h_i の時間変化を流量評価式((2)式)に代入して算出した流量ハイドログラフの一例(ケース3)である。図より、地上部を伝播した水が i 点到達時から約 15 秒間は急激に増加し、その後 $t=30$ s まで漸増するとともに、 $t=40$ s で定常状態となっていることが分かる。

図-7 は、図-6 に示した非定常な流量が流れた場合(ケース3)に各断面で計測された水深の時間変化を示したものである。この図より、断面Ⅰの水深 h_1 は、地上部を伝播してきた水が i 点を通過して 3 秒後に断面Ⅰへ到達し、急激に増加していることが分かる。これは、斜路部を高速で下流した水が地下通路部の湛水に衝突した際に生じる水面上昇である。さらに、その先端部が下流に伝播していくため、水深の急激な変化が順次下流側断面で計測されている。断面Ⅳの水深 h_4 に着目すると、 $t=9.5$ s に水深が急激に増加している。これは、上述の水面上昇が下流端で反射し、段波を形成しながら上流側に遡上したものと考えられる。また、断面Ⅰの水深 h_1 および断面Ⅱの水深 h_2 では、それぞれ $t=8$ s および $t=9.5$ s に水深が急激に落ち込み、 h_1 では $t=14$ s まで初期水深(2.46cm)より小さな水深となっている。これは、この区間の流れが跳水前面の射流状態となっているためである。なお、 $t=15$ s 以降、上流側に位置する断面Ⅰの水深 h_1 および断面Ⅱの水深 h_2 が激しく振動している。これは、跳水に伴う水面の動揺および水中に連行された微細な空気泡が波高計ブローグに付着したことによるものと考えられる。

以上の浸水実験から明らかにされた地下通路内の非定常な遷移流れについて、次章で再現計算を試みる。

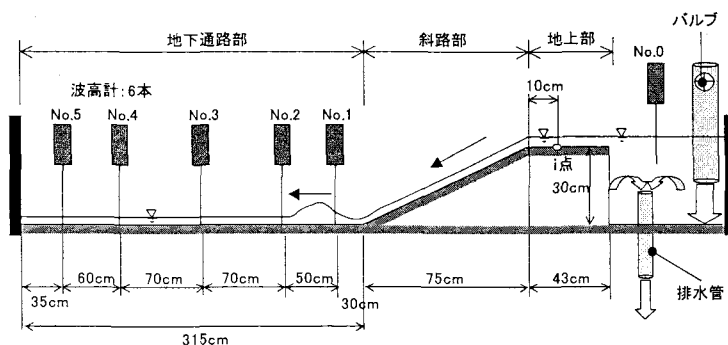


図-5 浸水過程に関する水利実験の概要

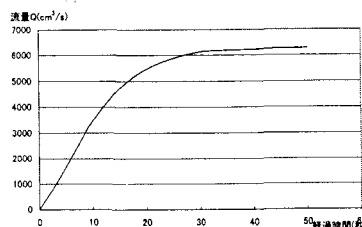


図-6 i点における流量ハイドログラフ(ケース3)

5. 浸水過程の数値シミュレーション法の概要

一次元開水路非定常流の基礎式は次のとおりである。

$$\text{連続式； } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

運動方程式；

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = gA \left(\sin \theta - \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} \right) + \frac{\partial(-u'^2 A)}{\partial x} \quad \cdot (4)$$

(4)式に含まれる底面せん断応力および乱れによる運動量輸送項については、次式を用いて評価する。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2 u |u|}{R^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial(-u'^2 A)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad , \quad D_h = \alpha h |u| \quad (6)$$

ここに、 Q ；流量、 A ；断面積、 h ；水深、 R ；径深、 u ；断面平均流速、 u' ；乱れ強さ、 τ_{bx} ；底面に作用するせん断応力、 θ ；水路床勾配、 ρ ；水の密度、 g ；重力加速度、 n ；マンニングの粗度係数(=0.01m³s)、 D_h ；渦動粘性係数および α ；係数(=0.05)である。

運動方程式に含まれる慣性項の離散化に際しては、段波や跳水などの不連続部で数値振動を生じにくい特徴を有する TVD 法 (Total Variation Diminishing) のうち Harten の提案するスキームを採用した⁶⁾。また、数値解析の初期条件としては、浸水実験と同様に地下通路部に相当する水路に一定水深の湛水を与えた。さらに、計算時間ステップ(Δt)を 0.00075 s、計算格子幅(Δx)を 2.5cm とするとともに、上流端 (図-8 の i 点) において水理実験より得られた水深 h_i および流量 Q の時間変化を境界条件として与えている。一方、下流端の境界条件としては、流量 $Q=0$ 、 $(\partial h / \partial x)=0$ を与えて、地上部、斜路部および地下通路部を一体とみなして、常流・射流が混在する非定常な遷移流れの再現計算を行った。

6. 計算結果と実験結果の比較

図-9 は、波高計を設置した断面 I ～断面 V における水深の時間変化を示している。図中には、計算結果(太実線)および実験結果(□)が併記されている。地下通路部の上流端に位置する断面 I の水深 h_i に着目すると、

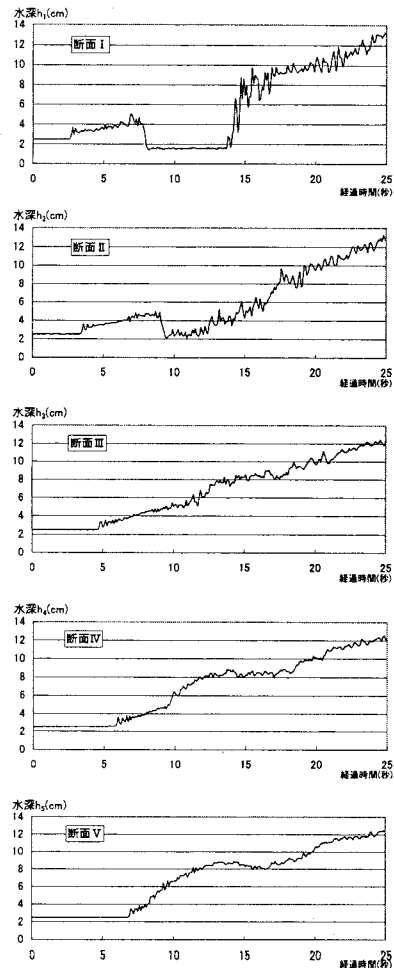


図-7 各断面の水深変化 (ケース 3)

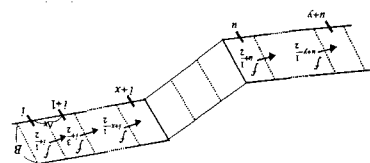


図-8 計算に用いる一次元格子

水深の変化が実験値よりも遅れて出現しており、射流発生時間にも遅れが生じている。さらに、射流状態となっている時間帯の水深も実験値より過小評価されている。しかし、射流の出現時間については両者とも等しく、うまく再現されているものと判断される。また、断面Ⅱの水深 h_2 では不連続部の伝播速度が実験値より小さく、水深の変化が遅れて現れている。一方、不連続部が生じない下流側の断面Ⅳおよび断面Ⅴにおいては、実験値より計算された水深の方が若干小さくなっているものの定性的にはよい一致を示しており、計算結果の妥当性が確認される。

図-10は、波高計を設置した各断面における流速の計算結果である。図中の横軸は計算開始からの経過時間、縦軸は流速 u の値を示しており、下流方向への流れを正としている。時間の経過とともに上流側の断面Ⅰから下流側の断面Ⅴへと順次正の流速が出現しており、初期状態の湛水が下流方向へ運ばれているものと判断できる。また、浸水実験でも射流区間が出現した断面Ⅰについては、 $t=8\sim17\text{s}$ の間に非常に大きな正の流速が出現しており、射流状態を再現しているものと考えられる。一方、 $t=18\text{s}$ 以降は急激に流速が減少し、常流状態となっている。さらに、下流側の断面Ⅳおよび断面Ⅴでは、 $t=16\text{s}$ 前後の流速が負の値を示している。これは、上流側で発生した移動跳수가減衰しながら下流端まで流下し、その後、反射して形成された小規模な不連続部の遡上に対応するものと考えられる。

図-11は、各断面におけるフルード数 F_r の時間的変化（計算値）を示している。断面Ⅰおよび断面Ⅱにおいて F_r が1以上の時間領域が認められることから、上述したような射流状態の出現が再確認される。これらのことより、本研究で対象とした地下通路部には複雑な遷移流れが発生しているものと判断される。なお、不連続部の伝播速度に関する誤差の要因としては、実験水路床の横断方向の微小な傾きのため流下方向に対して直角な水面変化を計測できなかったことが考えられる。また、強い非定常流れでは、水位上昇時には水面勾配が大きくなるため、同じ水深でも大きな流量が流れることが知られている。すなわち、図-6から非定常性の強いと判断される $t=0\sim15\text{s}$ の時間領域では、地上部 i 点の水深 h_i と流量評価式 ((2)式) から算定された流入流量より大きな流量が地下通路内に流入していたものと推測される。そこで、流入流量の補正を行って再現計算を試みるとともに、再度、実験値との比較を行った。

図-12は、 $t=0\sim15\text{s}$ の i 点の水深 h_i を概ね12.5%増加させて流入流量の補正を行った後の流量ハイドロ

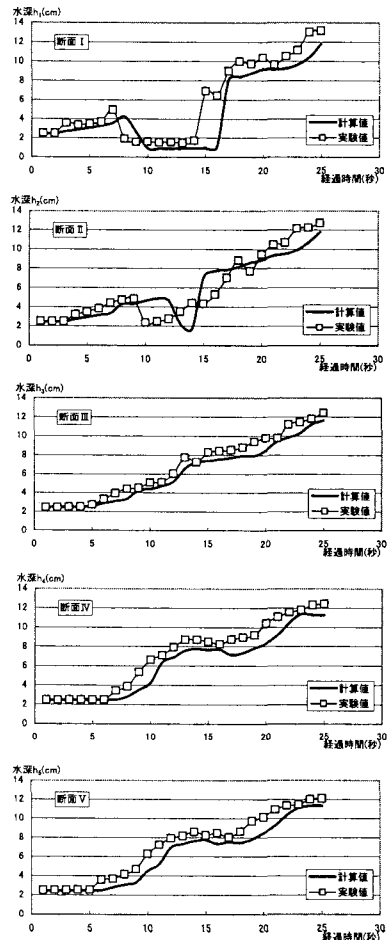


図-9 実験値と計算値との比較(ケース3)

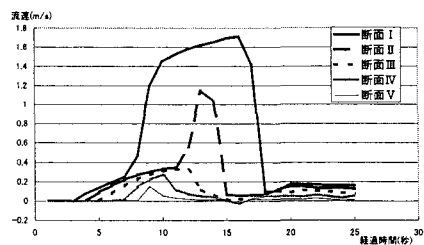


図-10 各計算断面における流速の時間変化

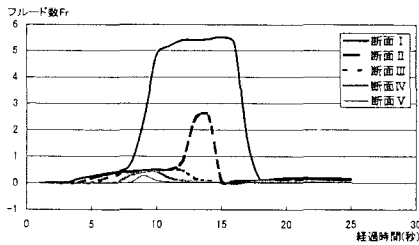


図-11 各断面におけるフルード数の時間変化

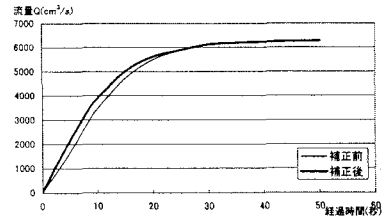


図-12 補正後の流量ハイドログラフ(ケース 3)

グラフ(太実線)を示したものである。なお、図中には補正前の流量ハイドログラフ(細実線)も併記されている。

図-13は、図-12に示した補正後の流量ハイドログラフを水路上流端の境界条件として与えた場合に地下通路部を流下する遷移流れの計算結果である。図中には、流量補正後の計算結果(太実線)、流量補正前の計算値(細実線)および実験値(□)が併記されている。図より、断面Ⅰの水深 h_1 の水面上昇および射流発生時間は、流量を補正することでよい一致を示している。一方、射流から常流へ遷移する時間については補正前と変化がなく、十分な改善には至らなかった。断面Ⅱの水深 h_2 では、不連続部の伝播速度が流量補正前より若干大きくなっているものの実験値よりは小さく、水深変化も遅れて出現している。一方、不連続部が生じない下流側の断面Ⅲ、断面Ⅳおよび断面Ⅴについては、流入流量を補正することで実験値の水深とほぼ一致する計算結果を得ることができおり、流入流量の補正の効果が顕著に現れている。

以上をまとめれば、流入流量の補正によって、地下通路部上流端での水面上昇、射流の発生時間および下流側断面での水深変化は実験値とよく一致することが明らかとなった。

7. おわりに

本研究では、現実の地下空間への浸水過程を数値シミュレーションするための解析手法を確立する目的で、地下空間に出現する常流・射流が混在する非定常な遷移流れの再現計算をHartenの提案するTVDスキームを採用して行った。その結果、流れの非定常性を考慮して流入流量を補正した場合に、計算結果は実験結果と概ねよい一致を示すことが確認された。同様の条件下で一次風上差分を用い計算をも試みたが、不連続部で数値振動が出現し、妥当な結果を得ることができなかった。以上のことから、本研究で用いた数値シミュレーション法の有効性が確認された。今後は、地下通路部上流で発生する移動跳水の伝播速度の改善を行うとともに、地下空間での浸水予測シミュレーションを実施するために、ここで用いた数値解析モデルを平面二次元モデルへ拡張する予定である。

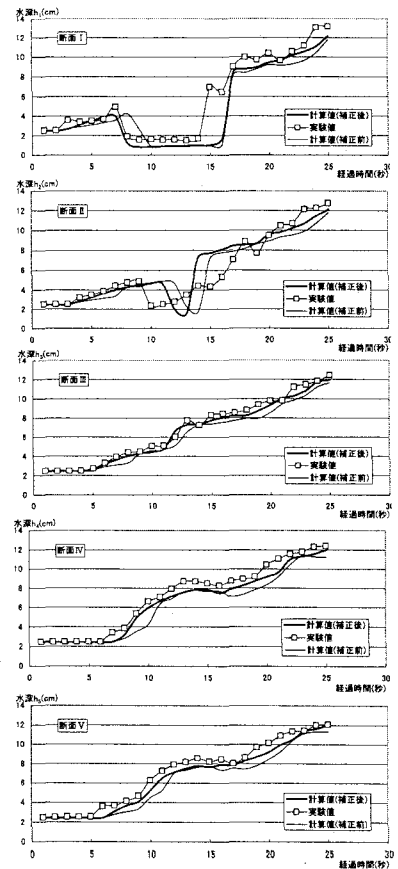


図-13 実験値と計算値の比較(ケース 3)

《参考文献》

- 1) 崇田徳彦、清水康行、渡邊康玄; MacCormack 法を用いた常・射流計算, 開発土木研究所月報, No.448, pp.23～32, 1990.
- 2) 清水康行、山下恭正; 一般曲線座標系を用いた常・射流混在流れの計算, 開発土木研究所月報, No.455, pp.18～32, 1991.
- 3) 高橋 保、中川 一、野村 出; 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号 B-2, pp.427～442, 1990.
- 4) 井上和也、中川 一、戸田圭一、溝田敏夫; 地下空間の氾濫水の解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 2 巻, 土木学会, pp.95～102, 1997
- 5) 多田彰秀、井上啓由、本田洋平、古本勝弘; 直階段から地下空間へ流入する流量の評価に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 45 巻, 2001.
- 6) 細田 尚、多田彰秀、井上和也、北原政宏; 管路・開水路流れ境界面の伝播を伴う急変非定常流の解析法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No. 503/II-29, pp. 89-97, 1994.