

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

本田 洋平*・多田 彰秀**・古本 勝弘**

Numerical Simulation of Hydraulic Transient Induced by the Inflow Discharge into the Underground Space

by

Yohei HONDA*, Akihide TADA** and Katsuhiko FURUMOTO**

This paper deals with the development on a numerical simulation method of the hydraulic transient induced by overland flood flow intrusion into underground space in an urban area. In particular, hydraulic transients such as the surge and the undular bore in the underground space are investigated experimentally and numerically. The numerical model used here can reproduce the hydraulic transient 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.

1. はじめに

近年、多様化の進む地下空間が、高潮や河川の溢水・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、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。

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存在し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。

3. 流入流量の評価

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・中川・戸田ら⁴⁾などによるものだけで数が少ない。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図-2に示すような「段落ちモデル」で説明できるものと

平成14年4月18日受理

*（株）相愛（元大学院博士前期課程環境システム工学専攻）

**社会開発工学科（Department of Civil Engineering）

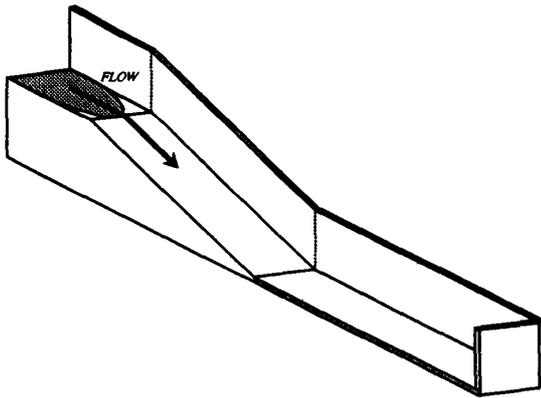


図-1 解析対象とした水理現象

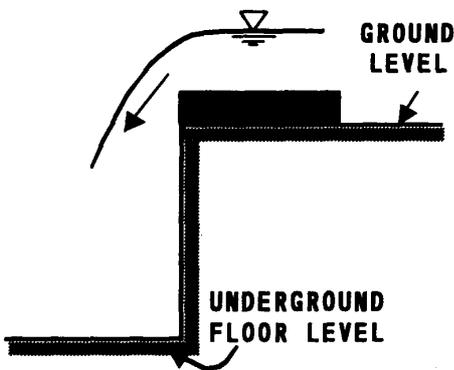


図-2 段落ちモデル³⁾

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0.5m以上になると実際よりも小さな流量を与える可能性があることも指摘されている³⁾。

そこで、図-3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-4に示すフローチャートに従い、実験水路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

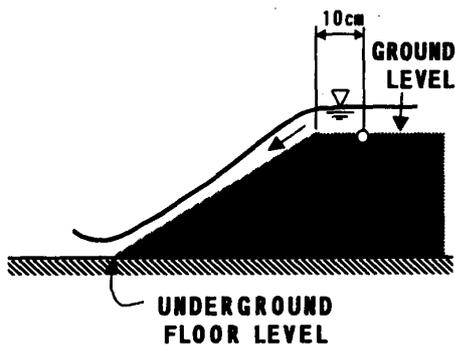


図-3 階段入口を想定した模型

① 上流端バルブの開度により与える流量を変化させて*i*点水深、下流端直角三角堰の越流水深*H*および越流量*Q_M*を計測した。

直角三角堰の流量公式 $Q_c = \frac{8}{15} C_w \sqrt{2g} H^{3/2}$ (1)

Q_c: 直角三角堰の越流量(cm³/s), *C_w*: 流量係数
H: 直角三角堰の越流水深(cm)

② 計測された*Q_M*と*H*を(1)式に代入し、最小二乗法を用いて*C_w*を算定。

③ 地下空間へ流入する流量の評価式 $Q = C_*' B h_i^a$ (2)

C_{}'*: 流量係数, *B*: 階段の幅員(cm)
h_i: *i*点での水深(cm), *a*: ベキ乗定数

④ (2)式に計測した*h_i*および*Q_M*を代入し、最小二乗法を用いて*C_{*}'*, *a*を算定。

図-4 水理実験のフローチャート

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*、下流端直角堰の越流水深*H*および越流量*Q_M*の計測を合計12ケース実施した。その結果、流量評価式(2)式における流量係数*C_{*}'* = 22.33, ベキ乗定数*a* = 1.87が算定された。図-5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_c*(□)がプロットされている。*Q_c*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*μ* = 0.8および*μ* = 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1.5cm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2.5cm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。

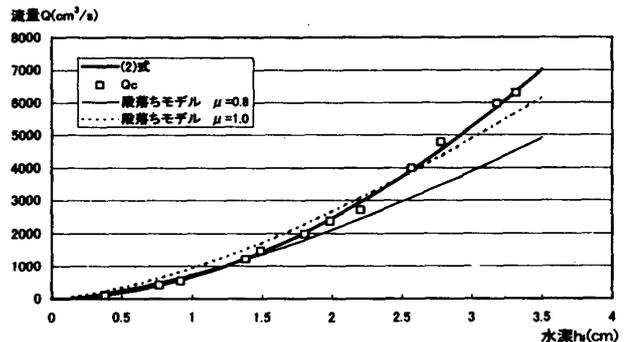


図-5 地上部からの流入流量

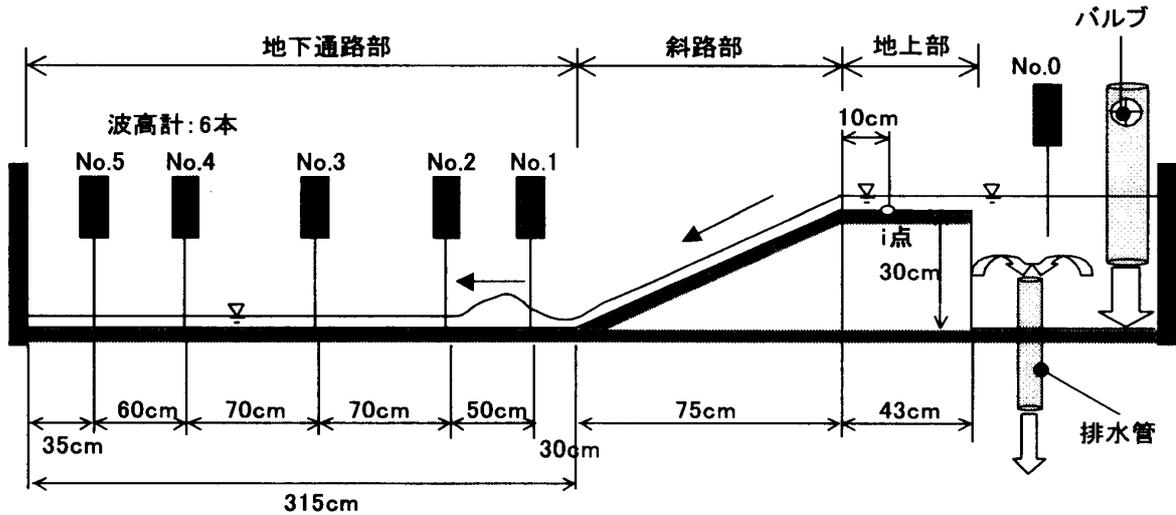


図-6 浸水実験の概要

4. 浸水実験の概要と実験結果

数値解析法の有効性を検証するため、図-6に示すような実験装置(水路幅;30cm, 斜路部傾斜角;25°)を製作し、上述したような非定常な遷移流れの水理実験を行った。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、波高計プローブ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-7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 $t=30s$ まで漸増するとともに、 $t=40s$ で定常状態となっていることが分かる。

図-8は、図-7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、斜路部を高速で流下した水が地下通路部の湛水

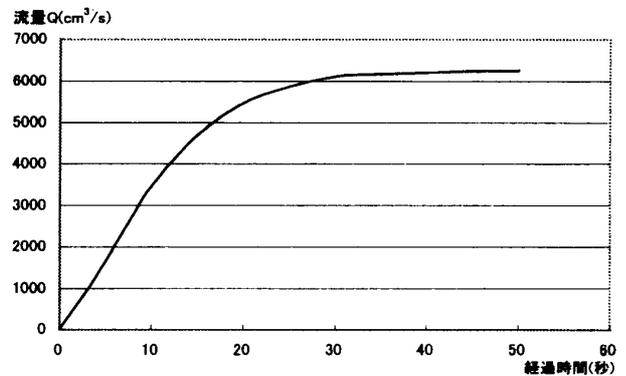


図-7 i点における流量ハイドログラフ(ケース3)

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、 $t=9.5s$ で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 $t=8s$ および $t=9.5s$ に水深が急激に落ち込み、 h_1 では $t=14s$ 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、 $t=15s$ 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プローブ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。

5. 浸水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。

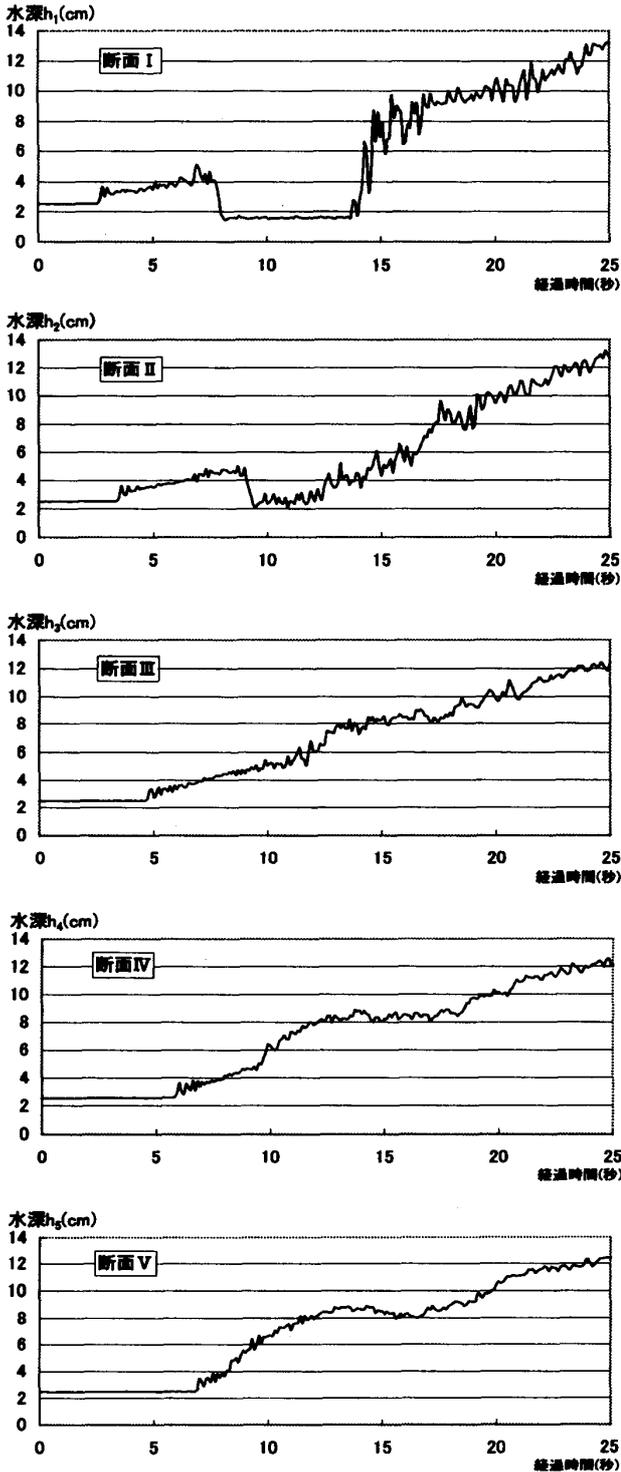


図-8 各断面の水深変化(ケース3)

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

運動方程式; $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = gA \left(\sin \theta - \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} \right) + \frac{\partial(-\overline{u^2}A)}{\partial x}$ (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。

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

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

ここに、 Q ; 流量、 A ; 断面積、 h ; 水深、 R ; 径深、 u ; 断面平均流速、 $\overline{u^2}$; 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 ; マニングの粗度係数(=0.01m^{-1/3}s)、 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0.00075s、計算格子幅(Δx)を2.5cmとするとともに、上流端(図-9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。

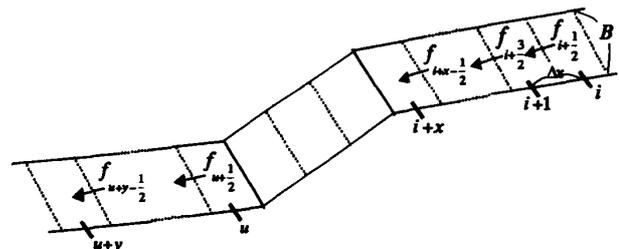


図-9 計算に用いる一次元格子

6. 計算結果と実験結果の比較

図-10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、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

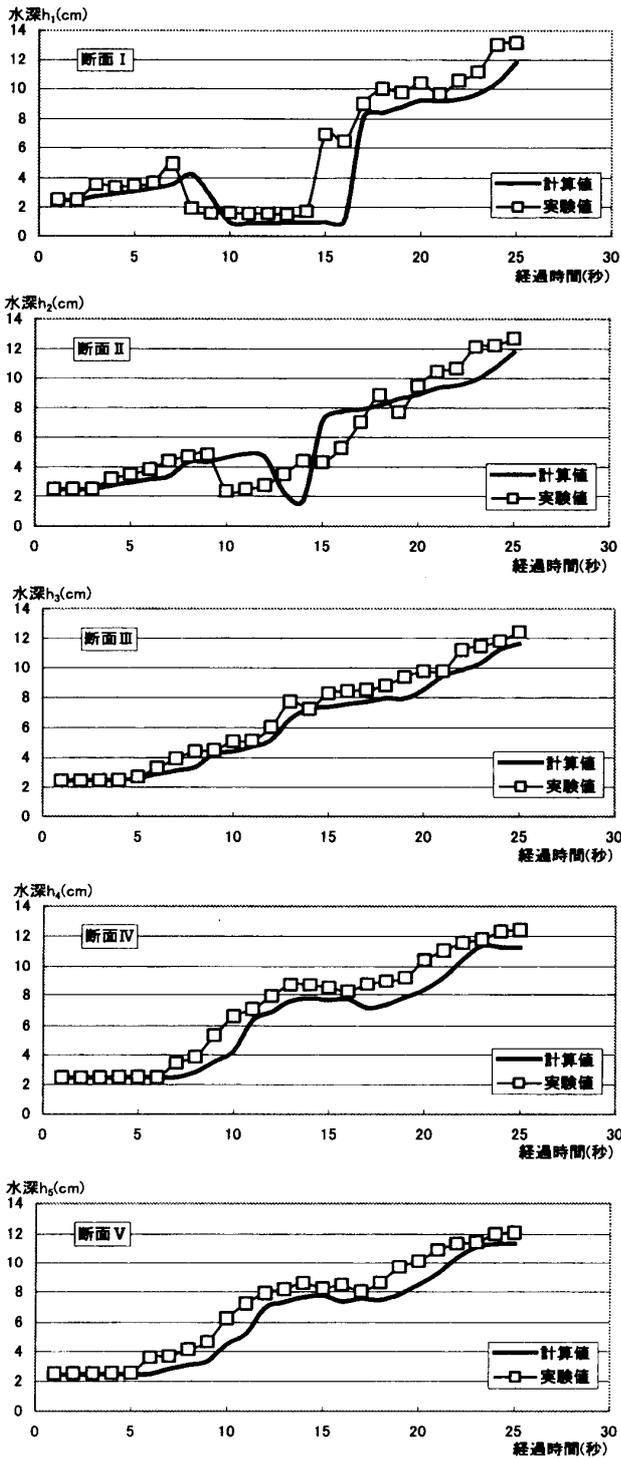


図-10 実験値と計算値の比較 (ケース3)

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-11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

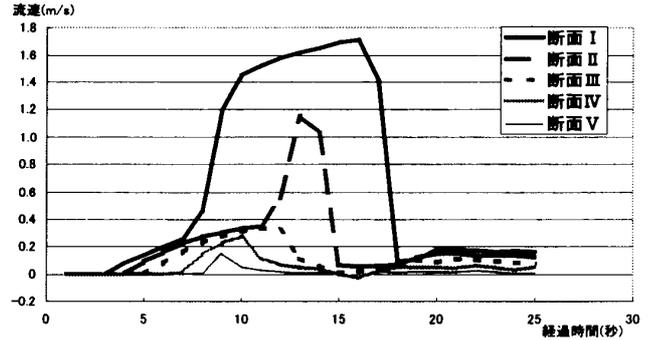


図-11 各断面における流速の時間変化 (ケース3)

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、 $t = 8 \sim 17$ 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、 $t = 18$ 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、 $t = 16$ 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水が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-12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

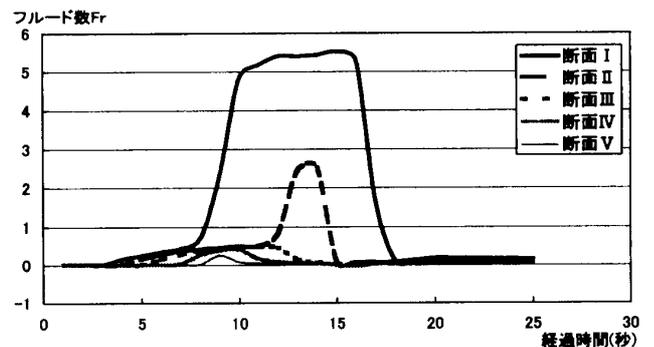


図-12 各断面におけるフルード数の時間変化 (ケース3)

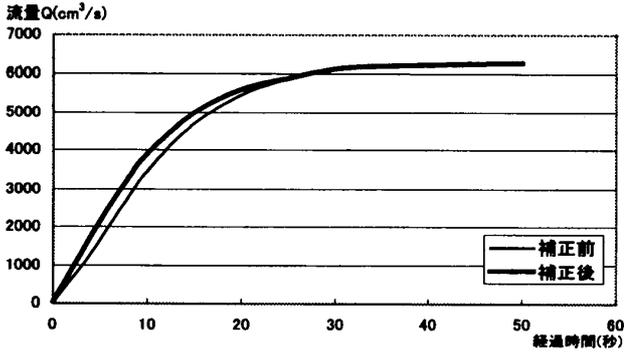


図-13 補正後の流量ハイドログラフ (ケース3)

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-7から非定常性の強いと判断される $t = 0 \sim 15s$ 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-13は、 $t = 0 \sim 15s$ 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-14は、図-13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ており、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. まとめ

本研究では、現実の地下空間への浸水過程を数値シ

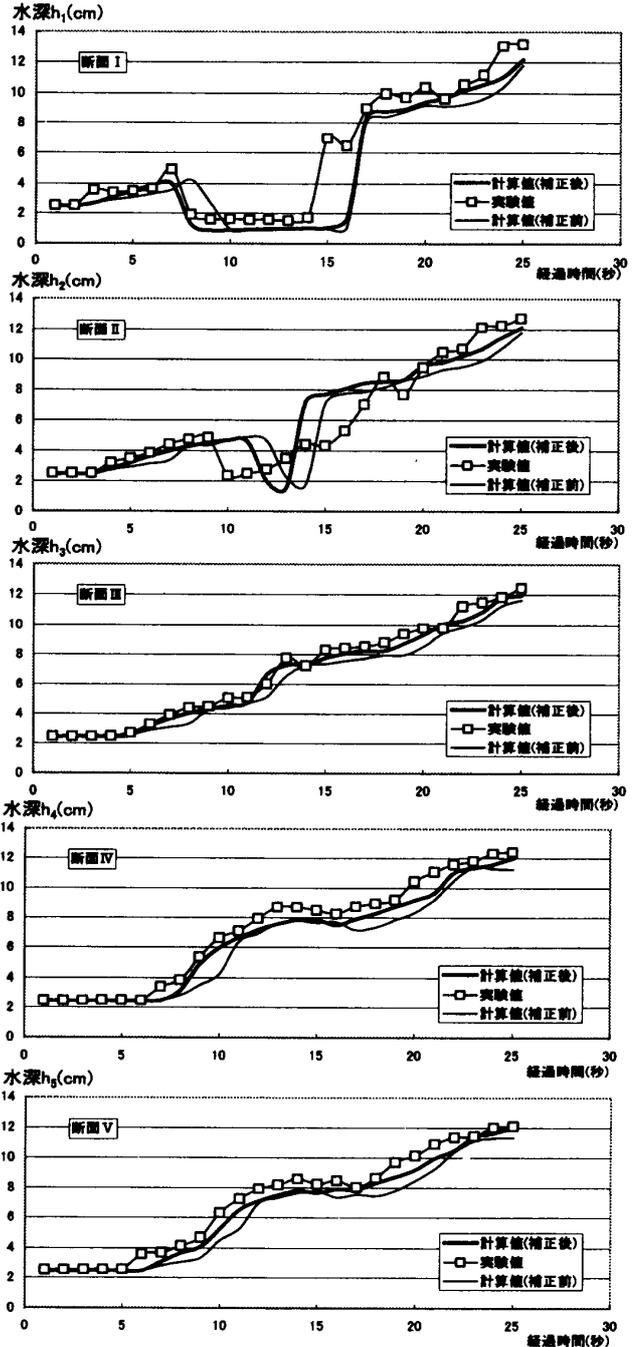


図-14 実験値と計算値の比較 (ケース3)

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た計算をも試みたが、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。

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, pp.901~906, 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.