

常流・射流が混在する一次元開水路流れの数値解析法の開発

長崎大学大学院 学生会員○本田洋平 長崎大学工学部 正員 多田彰秀
 長崎大学工学部 学生会員 松尾拓也 長崎大学工学部 正員 古本勝弘

1. はじめに

これまでの常流・射流が混在する流れについての数値解析法の研究は、流れの状態を定常流として取り扱った研究がほとんどである¹⁾。しかし、高潮、河川の溢水や破堤による洪水氾濫などにより地下空間が浸水する場合、大量の流量が短時間で流入することが予想される。すなわち、地下空間での浸水予測シミュレーションを行う際には、流れを非定常流として取り扱う必要がある。

本研究は、階段入口から地下空間に流入する流れを想定した実験水路内に発生する段波や跳水の混在する流れを対象として、そのような不連続部を有する流れでも数値振動が生じにくいとされるTVD法のうちHartenの提案するスキーム²⁾を用いて数値解析し、実験結果との比較により解析手法の有効性を検証しようとするものである。

2. 計算手法

開水路非定常流の一次元基礎式は、次のとおりである。

$$\text{連続式: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad , \quad \text{運動方程式: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = gA \left(\sin \theta - \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} \right) + \frac{\partial(-u^2 A)}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 Q ; 流量、 A ; 断面積、 h ; 水深、 R ; 径深、 u ; 断面平均流速、 u'^2 ; 乱れ強さ、 τ_{bx} ; 壁面に作用するせん断応力、 θ ; 水路床勾配、 ρ ; 水の密度、 g ; 重力加速度を示す。

(1)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法のうちHartenの提案するスキームを採用した。

計算は、図-2に示すような実験水路内の流れを対象とする。すなわち、地上部から地下空間へ通じる階段入口に見立てた斜路(材質;木製)に水平の袋小路通路が連結した水路(材質;アクリル製)を高速で流下する非定常流の挙動を解析する。また、水深計測に容量式波高計を用いる実験の都合上、初期条件として地下部に相当する水路には一定水深の湛水を与えている。図-1は計算格子のイメージ図である。解析に際しては、時間ステップ(Δt)を0.002秒、格子幅(Δx)は5cmとするとともに、上流端において水理実験より得られた流量 Q および水深 h 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、常流・射流が混在する一次元開水路流れの再現計算を試みる。

3. 水理実験

解析手法の有効性を検証するため、図-2に示す寸法の実験装置(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流の水理実験を行った。

まず、水深を容量式波高計で計測するため常に計器の先端は水中でなければならない。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て本水路に流量を与えている。No.1からNo.5の各断面の水路中央部に設置した容量式波高計(サンプリング周波数;10Hz)で水深

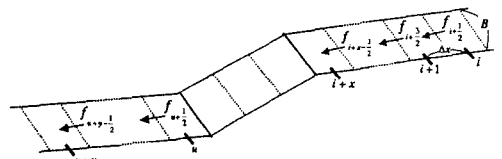


図-1 計算に用いる一次元格子

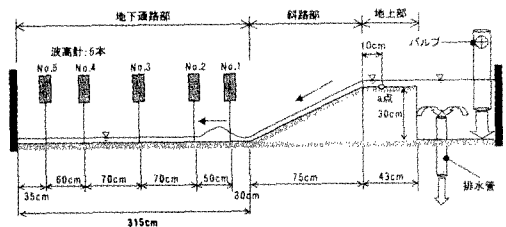


図-2 実験装置の概略図

の時間変化を計測した。図-3 は、地上部に相当する本水路 a 地点に供給された流量の時間変化の一例である。地上部を伝播した水が a 点到達時から約 15 秒間は急激に増加し、その後約 30 秒まで漸増している。さらに、40 秒経過時点ではほぼ一定値を示し定常状態となっていることが分かる。本研究では、流れが a 点に到達した時から 25 秒間を対象として、実験水路上での流れの非定常挙動の再現計算を行った。

4. 実験結果と計算結果との比較

図-4 は、図-3 に示した流量変化を与えた場合に地下通路部を伝播する流れの再現計算結果である。地上部、斜路部も一体として計算しているが、縦軸の縮尺の関係から地下通路部での水面形の時間変化のみを示している。横軸は地下通路部開始地点から下流方向への距離 x 、縦軸は水深である。この図より、斜路部を高速で流下した水が湛水に衝突した後、水の先端部が下流側に進むとともに、水の先端部が下流端に達した後は、段波が形成され、上流側に向かって遡上する過程が再現されている。さらに、波高計を設置した各断面における水深の時間変化を図-5 に示している。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。射流状態の出現時間が最も長い No.1 波高計設置断面では、水深および伝播速度に関しては計算結果と実験結果はよい一致を示している。しかし、下流側の断面になるに従い不連続部の伝播速度に関して計算結果の方が実験結果よりも小さく、水深の変化が実験値よりも遅れて出現している。この要因の一つとしては、実験水路床の横断方向の微小な傾きにより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。

5. まとめ

本研究では、跳水や段波(不連続部)を有する流れに代表されるような常流・射流が混在する一次元開水路流れの再現計算を Harten の提案する TVD スキームを採用して行った。その結果、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元上差分を用いた計算を試みたが、不連続部で数値振動が出現し、妥当な結果は得られなかった。以上のことから、本研究で用いた数値解析法の有効性が確認された。今後は、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平面二次元へのモデルの拡張を行う予定である。

参考文献

- 1) 清水康行ら: 一般曲線座標系を用いた常流・射流混在流れの計算, 開発土木研究所月報 No.455, pp.18-33, 1991.
- 2) 細田 尚ら: 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.

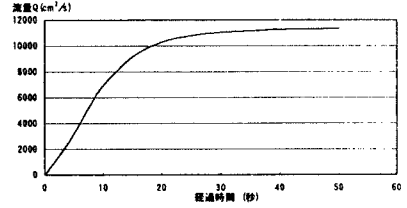


図-3 a 点における流量変化(ケース 7)

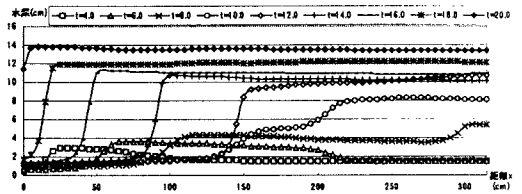


図-4 地下通路部を伝播する非定常流(計算結果)

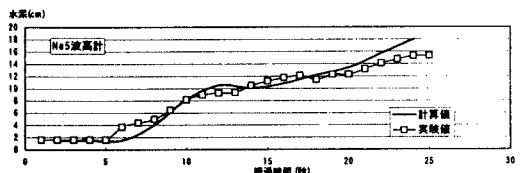
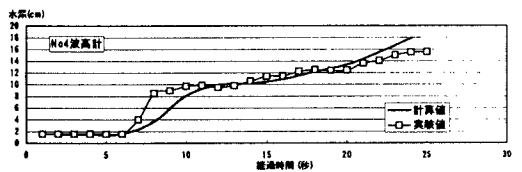
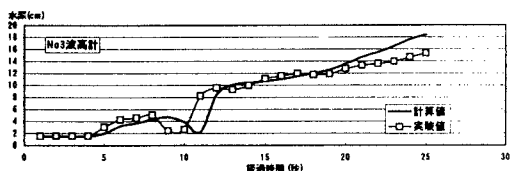
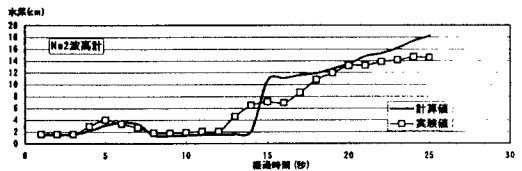
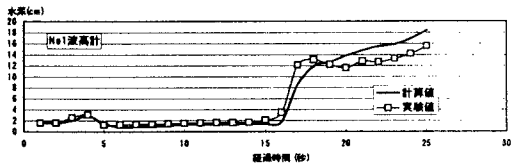


図-5 実験値と計算値の比較