流束差分離法を用いた圧力・自由表面流れの数値解析

九州工業大学工学部　学生会員　○山下　未貴　　九州工業大学工学部　フェロー会員　秋山壽一郎
九州工業大学工学部　正 会 員　重枝　未玲　　九州工業大学大学院　学 生 会 員　田邉　武司

1. はじめに

近年，都市部では集中豪雨による内水氾濫が頻発している．2003年には「特定都市河川浸水被害対策法」が制定され，河川・雨水排除システム・雨水貯留施設等を一体的に捉え総合的に都市型水害を軽減する対策が必要とされるようになった．本研究では，以上のような背景を踏まえ，都市部の暗渠区間を含む内水河川や下水道網などで発生する圧力・自由表面流れを対象にスロットモデルを用いた流束差分離法に基づく数値モデルを構築し，その予測精度を既存の実験結果に基づき検証した．

２．数値モデルの概要

下水道や都市河川の暗渠区間では，流入する雨水の流量によって自由表面流れあるいは圧力流れが生じる．圧力流れが生じた場合，その区間でのピエゾ水頭が大きくなるため，地表面からの排水が困難となり，内水氾濫が生じる．従って，圧力流れが発生する箇所を予測することは，内水氾濫を予測する上で極めて重要となる．

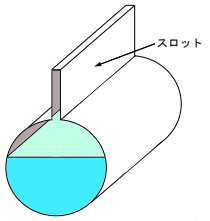


図-1　スロットモデル

自由表面流れと圧力流れが混在する流れはスロットモデルで取り扱う[1]．スロットモデルは，図-1に示すように水路あるいは管路天端に非常に狭いスロットを設けることで，満水状態となった場合スロットにより水位を強制的に上昇させ，圧力流れを再現するモデルである．スロットモデルを用いることで圧力流れと自由表面流れの両状態を同一の基礎式で表現でき，圧力・自由表面流が混在する流れの一体解析を行うことが可能となる．

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}+\boldsymbol{S}=0 \quad (1)$$
$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix}A & uA\end{pmatrix}^T$$
$$\boldsymbol{E}=\begin{pmatrix}uA & u^2A+gF_h\end{pmatrix}^T$$
$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}0 & -gA(S_o-S_f)\end{pmatrix}^T$$

A=流積，u=流速，g=重力加速度，S_0=水路床勾配，S_f=摩擦勾配，F_h=静水圧項

$$h=h_f+\frac{A-A_f}{b_s} \qquad P=P_f$$
$$F_h=A_f\left(0.5h_f+\frac{A-A_f}{b_s}\right)+\frac{(A-A_f)^2}{2b_s} \quad (2)$$

A=管路の断面積，P=満管の潤辺，h=最大高さ(直径，円形管路の場合のd)，b=スロット幅

基礎方程式は式(1)の自由表面流れの基礎方程式である．ここに，$\boldsymbol{U}$=保存量ベクトル，$\boldsymbol{E}$=流束ベクトル，$\boldsymbol{S}$=発生・消滅項ベクトルである．自由表面流れの基礎方程式は，水深をピエゾ水頭と等しいと仮定することで，圧力流れに適用可能であることがわかっている[1]．そこで圧力流れの場合には，水深，静水圧条件および潤辺を計算に式(2)を用いる．基礎方程式の離散化は流束差分離法(FDS法)に基づき行った．

３．モデルの検証

まず，自由表面流れの実験結果に基づき，次に，圧力・自由表面流が混在する流れの実験結果に基づき，本モデルの検証を行った．

まず，Gharangik and Chaudhry[2]によって得られた1次元定常跳水に関する実験結果を用いて検証を行った．用いられた実験水路は長さ14.0m、幅0.45mの水平矩形水路であり，その粗度係数nはn=0.008～0.011 である．境界条件は，水路上流端で水深h=0.043m，流速u=2.737m/s を与え，水路下流端では水深h=0.222m を与えている．

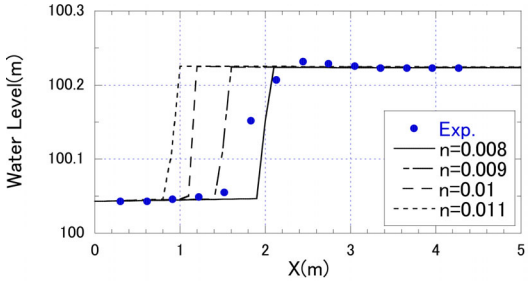


図-2 1次元定常跳水の実験結果に基づく検証

図-2は，本モデルを用いてn=0.008～0.011 まで変化させて得られた解析結果と実験値との比較を行なったものである．計算条件はΔx=0.1mである．図-2 から，本モデルが跳水位置やその高さを良好に再現している(n=0.008～0.009の時)ことがわかる．また，nが小さくなるにつれ、跳水位置も下流側に移動し、その移動距離の変化も定性的に良く再現できていることも確認できる．

次に，WES[3]の1次元ダム破壊流れの実験結果に基づき検証を行った．WES[3]の実験水路は長さ122.0m、幅1.22mの長方形水路である．ダムは水路中央(x=61m) に設けられ，それを瞬間的に取り除くことによりダム破壊流れを発生させ

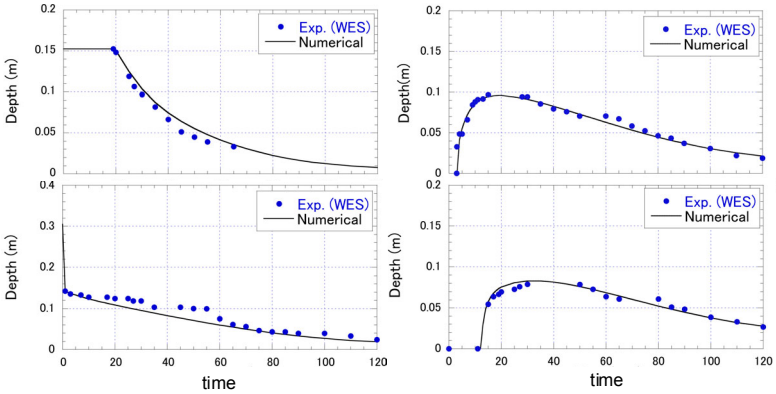


図-3 1次元ダム破壊流れの実験結果に基づく検証

ている．ダムにおける貯水槽初期水深は0.305m，水路床勾配S_0=0.005で，氾濫源はドライベッド状態である．また，実験水路の粗度係数はn=0.009である．本解析では極めて小さな初期水深h_t=0.00001mを与え，それ以下の水深ではドライベッド状態であると仮定し流速を0とした．また，格子間隔はΔx=0.1mとした．境界条件は水路上流端で閉境界を与えている．

図-3は，各測定点での水深の経時変化について，計算結果と実験結果との比較を行ったものである．これらより計算値は実験値を良く再現していることがわかる．また，ダムでの急激な水深の低下や氾濫流の予測に重要なフロントの到達時間を良く再現していることもわかる．このように，本モデルはダム破壊流れのように，変化が急激な自由表面流を十分な精度で再現できることが確認された．

最後に，Capart et al.[4)]が行った実験に基づき，数値モデルの圧力・自由表面流れへの適用性について検討した．実験装置は，**図-4**に示す直径0.145m，長さ12.74mの円形管路で，水路床勾配が，上流端から3.48mまでは0.01954，9.23mまでは0.01704，下流端までは0.01225と変化している．上流端から0.0042m/s^{3}の一定流量を射流で流入させ，下流端の堰を上昇させることで強制的に跳水を発生させ，それを水路上流へ伝播させている．また，跳水が上流端付近まで伝播した時に，下流端の堰を下降させることで水位低下を引き起こしている．その際，水位もしくはピエゾ水頭を，C1～C7の圧力計により測定している．

解析の初期条件には小さな一定水深を，境界条件にはCapart et al.[4)]の実験条件と同様に，上流端には0.0042m/s^{3}の一定流量を与え，下流端には水位またはピエゾ水頭を与えた．Manningの粗度係数n=0.009とした．格子サイズはΔx=0.1m，Courant数=0.95，スロット幅は管路直径の10%として計算している．

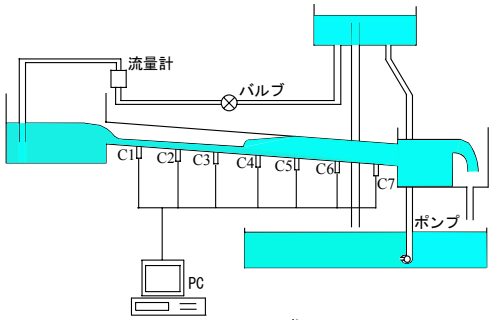
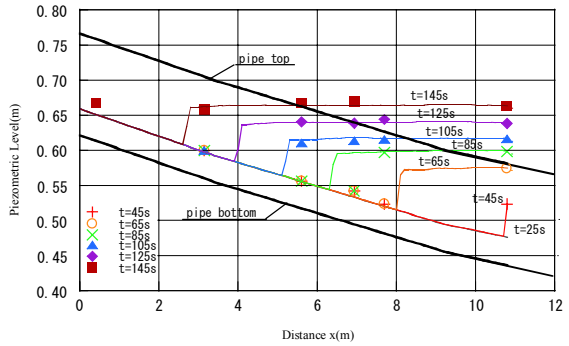
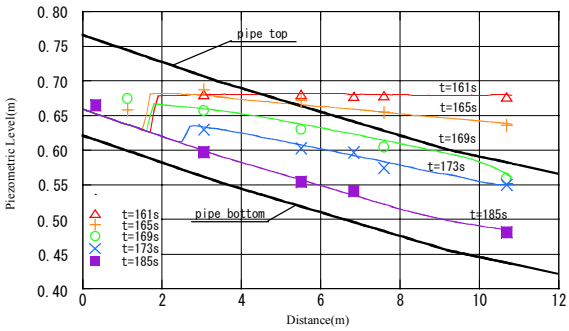


図-4 Capart et al.[4)]の実験装置



(a) 0～145s



(b) 161～185s

図-5 圧力・自由表面流れの実験結果に基づく検証

図-5は，解析値と実験結果との比較を行ったものである．解析結果は実線で，実験結果はプロットで表している．これよりFDS解析モデルはすべての地点で圧力・自由表面流れ両方を高い精度で再現していること，また，自由表面流れから圧力流れへと，さらに圧力流れから自由表面流れへと遷移するプロセスや圧力流れが生じる区間も再現していること，などが確認できる．このように，FDS法に基づく本モデルは，自由表面・圧力流れが混在する複雑な流れを再現可能であることが確認された．

4．おわりに

本研究では，スロットモデルを用いた流束差分離法に基づく数値モデルを構築し，その予測精度を既存の実験結果に基づき検証した．その結果，本モデルが自由表面流れのみならず，自由表面・圧力流が混在する複雑な流れや，その遷移プロセス，また圧力流れが生じる区間を再現することが可能であることがわかった．このように，本モデルは，内水氾濫を予測する上で重要な都市河川の暗渠区間や下水道で圧力流れが生じる区間の予測に有用であると考えられる．

今後は，このモデルをネットワークモデルとし管路網や水路網に適用できるモデルへと改善していくとともに，地表面流とのリンク方法について検討する予定である．

参考文献

1) Chaudhry, M. H.: Applied Hydraulic Transients, Von Nostrand Reihhold, New York, 1979.

2) Gharangik, A.M. and Chaudhry, M.H.: Numerical simulation of hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.9, pp.1195-1211, 1991.

3) U.S. Corps of Engineers: Flood resulting from suddenly breached dams, Miscellaneous paper 2(374), Report1, U.S. Army Corps of Engineers,Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1960.

4) Capart, H., Sillen, X. and Zech, Y.: Numerical and experimental water transients in sewer pipes, J. of Hyd. Res., IAHR, Vol.35, No.5, pp.659-672, 1997.