

準平面2次元数値モデルを用いた圧力流・自由表面流混在流れの数値解析

九州工業大学大学院 正会員 重枝未玲 九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山壽一郎
九州工業大学大学院 学生会員 松本拓磨 九州工業大学工学部 学生会員 ○川上優

1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨の激化に伴い、東京などの大都市では都市型水害が頻発している。都市域氾濫の予測のためには、そこでの雨水排除を受け持つ中小河川や下水道網での雨水の挙動的な確かな予測が必要となる。本研究は、既存の実験結果やテスト問題に基づき、圧力流・自由表面流混在流れの準平面2次元モデルを検証したものである。

2. 圧力流・自由表面流混在流れの準平面2次元数値モデルの概要

圧力流・自由表面流混在流れの準平面2次元数値モデルは、①計算セルの境界に対して数値流束を計算することで、平面2次元モデルのように河道特性や下水道線形が流れに及ぼす影響を考慮し、②セル境界の数値流束には、横断面で面積分された数値流束を用いることで、1次元モデルのように高い計算効率で解析を行うことを目的としたモデルである。

同モデルは、(1) 下水道や河道線形に沿って計算セルを配置し、(2) 計算セルをコントロールボリュームとして、計算セル境界の法線方向に対して、セル境界の横断面で面積分された数値流束を算定し、(3) 全てのセル境界線に対して数値流束を線積分することで、計算セル内の体積、流速と体積との積を算定し、圧力流・自由表面流混在流れを予測する。その概要は図-1に示す通りである。

3. 結果と考察

(1) 圧力・自由表面流れの取扱いに関する検証

まず、横断面形の異なる水路での再現性を検証するため、本モデルを断面形状が異なる管路内の圧力・自由表面流の実験結果に適用した。

a) 長方形断面管路での圧力・自由表面流れ¹⁾

実験装置は、長さ30m、幅0.51m、粗度係数は $0.012\text{m}^{-1/3}\text{s}$ の水平水路であり、水路上流端から10mの位置に、長さ10m、高さ0.148mの長方形断面の管路区間が設けられている。初期水深を0.128mとした後、上流端から波を発生させることで、管路区間に圧力流れを発生させている。管路区間の上下流、水路上端から①10.5m②14m③16m④19.5mの地点で水位と圧力が計測されている。解析対称領域を21個のセルで分割し、図-2に示す管路区間上下流の圧力水頭を境界条件とした。スロット幅及びピエゾ管の面積は、それぞれ水路幅および計算セルの面積の10%とした。図-3は、測定点②について、実験値と解析結果との比較を行ったものである。これより、本モデルは、自由表面流れから圧力流れへ、さらに圧力流れから自由表面流れへと遷移する複雑なプロセスを再現可能であることがわかる。

b) 円管での圧力・自由表面流れ²⁾

実験装置は直径0.145m、長さ12.74mの円形管路である。その水路床勾配は0.01954(上流端～3.48m)、0.01704(3.48～9.23m)、0.01225(9.23～下流端)である。上流端から $0.0042\text{m}^3/\text{s}$ の一定流量を流入させ、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

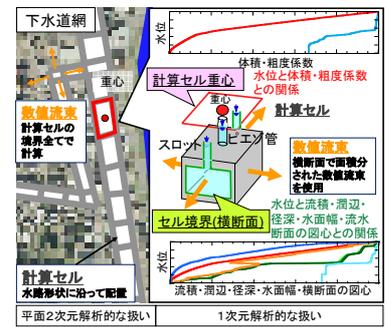


図-1 準平面2次元モデルの概要

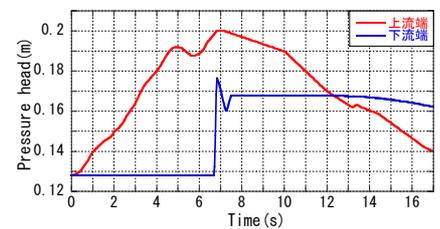


図-2 境界条件

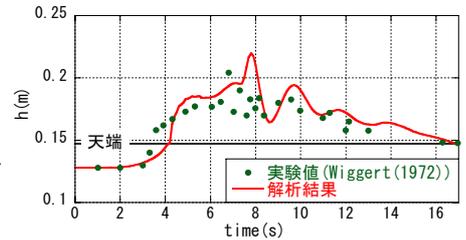


図-3 測定点②での圧力水頭の比較

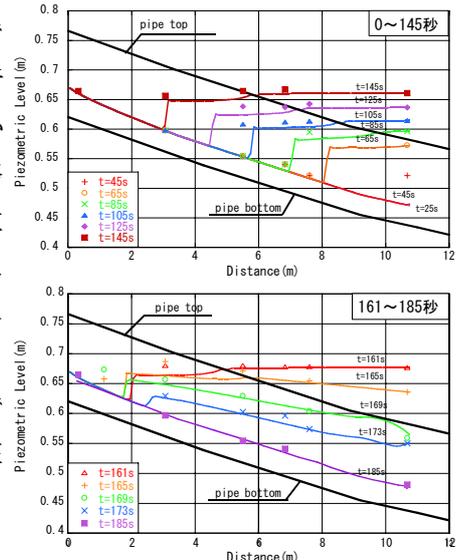


図-4 ピエゾ水頭の縦断変化の比較

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を低下させている。管路に設置した7箇所の圧力計により、水位もしくはピエゾ水頭が測定されている。解析対象領域を108個の計算セルで分割し、解析の初期条件に小さな一定水深を、境界条件として上流端には $0.0042\text{m}^3/\text{s}$ 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の粗度係数は $n=0.009$ とした。スロット幅およびピエゾ水頭の面積は、それぞれ管路直径と管路中心での計算セル面積の0.05%とした。図-4は、解析値と実験結果との比較を行ったものである。これより、本モデルは、複数の横断面を有する閉水路内の自由表面・圧力流れを再現可能であることがわかる。

水路の線形の影響を適切に評価できるかについて検証する目的で、屈曲部を有するダム破壊流れの実験結果³⁾に基づき、本モデルを検証した。実験水路は、長方形断面の貯水槽(幅2.4m×長さ2.39m)と水路(幅0.495m×長さ8.2m)とを接続したもので、水路中に45度の屈曲部を有している。貯水槽及び水路は水平に設置されており、その粗度係数 $n=0.011$ である。初期水深は、貯水槽で水深 $h=0.25\text{m}$ 、水路で水深 $h=0.01\text{m}$ である。9箇所の測定点で、水深が測定されている。解析対象領域を105個の計算セルで分割し、下流端の境界条件には限界水深を与えた。なお、本モデルでは屈曲部と同様な形状の計算セルを用いることで水路屈曲部の形状を考慮している。図-5は、屈曲部の影響が顕著となる屈曲部の測定点G6での解析結果と実験値との比較を行ったものである。これより、水路の線形等の形状の変化を適切に評価できることがわかる。

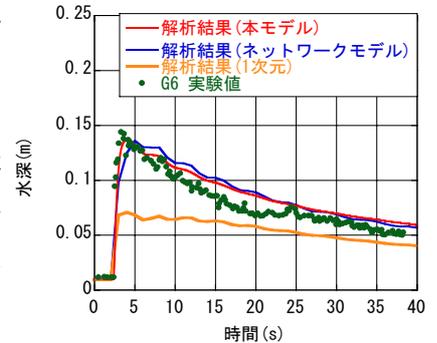


図-5 屈曲部での水深の経時変化

(2) 管路網の取扱いに関する検証

最後、管路網への適用性について検証する目的で、管路網のテスト問題⁴⁾に基づき、本モデルを検証した。管路網は、図-6に示す通りである。長さ100mの各管路は1辺が1mの正方形断面である。各管路の水路勾配は $S_{01}=0.002$, $S_{02}=S_{03}=0.001$, $S_{04}=0.0$, $S_{05}=S_{06}=0.001$, $S_{07}=0.002$ で、粗度係数 $n=0.01$ である。この管路網は軸対称であり、適切な数値解法であれば得られる結果も軸対象となる。解析対象領域を144個のセルで分割し、初期条件を、 $Q_0=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $Q_1=Q_2=0.05\text{m}^3/\text{s}$, $Q_3=0.0\text{m}^3/\text{s}$, $Q_4=Q_5=0.05\text{m}^3/\text{s}$, $Q_6=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $h_0=h_1=h_2=h_3=h_4=h_5=h_6=0.2\text{m}$ とし定常状態を求めた後、上流端から、最大流量が $2.5\text{m}^3/\text{s}$ の正三角波形の流量ハイドログラフを600秒間隔で与えた。図-7は、各管路中心における水深の経時変化を示したものである。これより、本モデルは、(1) 管路1では自由表面流れと圧力流れが混在すること、(2) 上下対称の位置にある管路2, 3および5, 6の解析結果は対称であること、など、定性的ではあるが、管路網で生じる圧力・自由表面流れを解析可能であることがわかる。

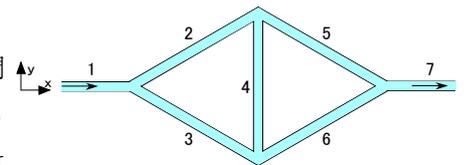


図-6 テスト問題の管路網⁴⁾

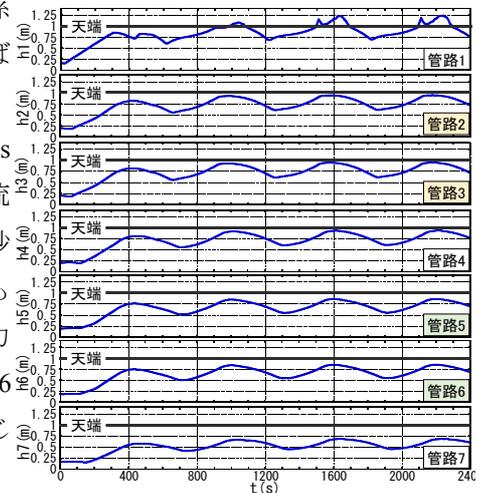


図-7 各管路での水深の経時変化

4. おわりに

本研究から、本モデルは、(1) 横断面形状の異なる水路で圧力、自由表面流れ、(2) 水路線形の変化、(3) 管路網内の圧力、自由表面流れを解析可能であることが確認された。なお、同モデルは、河道の洪水解析にも適用可能なモデルである。今後、同モデルの河道への適用性についても検討したいと考えている。

謝辞:本研究は、科学研究費補助金若手研究B(課題番号: 25820225, 研究代表者: 重枝未玲)の助成を受けたものである。

参考文献: 1)Wiggert, D.: Transient flow in free-surface, pressurized systems, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE*, Vol.98(1), pp.11-26, 1972. 2)Capart, H. et al: Numerical and experimental water transients in sewer pipes, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol.35, No.5, pp.659-672, 1997. 3)Sorares, S. et al: Dam-break flow through sharp bends, Physical models and 2d Boltzmann, *European Commission, ISBN 92-828-7108-8*, 1999. 4)Garcia-Navarro, P. et al: An implicit method for water flow modeling in channels and pipes, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol.32, No.5, pp.721-742, 1994.