

平成22年03月26日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760344
 研究課題名(和文) 圧力・自由表面流れの予測を目的とした平面2次元スロットモデルの構築
 研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL COMBINED WITH PRISMANN SLOT FOR FREE-SURFACE-PRESSURIZED FLOWS
 研究代表者
 重枝 未玲 (SHIGE-EDA MIREI)
 九州工業大学大学院・工学研究院・准教授
 研究者番号：70380730

研究成果の概要：本研究では、中小都市河川の暗渠区間、下水道網、地下街を対象に、圧力・自由表面流れを高精度・高効率で予測できるダイナミックネットワークスロットモデルを開発した。同モデルは、運動量の保存を考慮した平面2次元スロットモデルを湾曲部や分合流部に、1次元スロットモデルを直線区間に適用することで、複雑な水路・下水道網と圧力・自由表面流れを取り扱う。実験データに基づく検証と実下水道網への適用から、同モデルの基本性能と妥当性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	210,000	2,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：圧力・自由表面流れ，数値解析，平面2次元モデル，スロットモデル，ダイナミックネットワークモデル，都市河川，暗渠区間，下水道網

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨による洪水氾濫が頻発し、甚大な被害が生じている。ここ数年間では、東海(2000年9月)、九州(2003年7月)、新潟・福島(2004年7月)、宮崎(2005年9月)などの数多くの豪雨災害が発生している。高度に都市化された名古屋市、福岡市などでは、中小河川や水路網、下水道網の排水不良または下水道からの逆流による複合的な内水氾濫

が生じるとともに、その氾濫水が地下街入り口から流入・湛水することによる地下街氾濫が生じている。このような都市型水害は、近年頻発する傾向にある。

中小都市河川では用地確保や土地利用との関係から、道路と交差する箇所に暗渠区間が設けられる。地下街には当然のことながら閉じた空間が存在する。このため、そこでの流れは、水位と暗渠の天端または地下街の天

井の高さとの関係から圧力流れまたは自由表面流れもしくは両流れが混在した流れが生じる。

圧力流れが生じる区間は、流下能力の低下によりボトルネックを生じさせるため、中小都市河川の氾濫を引き起こす。一般に、中小都市河川では計画高水流量相当の流量が流れた場合、暗渠区間で圧力流れ状態が生じないように河道設計がなされている。しかし、多くの中小都市河川は未だ整備途上にあること、また、大河川に比べ計画規模が小さく設定されており超過洪水が発生する可能性が高いこと、さらに近年の豪雨は想定範囲を超えており、観測史上最大規模の豪雨やそれに近い規模の豪雨が発生することも稀ではなくなっていることから、暗渠区間で圧力流れが生じる可能性は高くなっている。また、地下街氾濫では圧力流れが氾濫流の挙動に大きな影響を及ぼすことは容易に想像できる。このように、圧力流れは都市部での氾濫現象の発生や地下街での氾濫流の挙動に深く関係している。そのため、都市型水害の発生やその対策を講じる上で圧力流れまたは自由表面流れもしくは両流れが混在した流れを高い精度で予測することは極めて重要になる。

圧力流れと自由表面流れが混在した流れの数値解析法には、一般的に1次元スロットモデルが用いられる。1次元スロットモデルでは基礎方程式に自由表面流れと同じ1次元の浅水流方程式を用い、水路または管路の天端にスロットを設け、満水もしくは満管状態となった場合にはスロット内に水を流入させ、そこでの水位上昇を圧力に反映させることで、水路あるいは管内の断面積を変化させずに圧力流れが再現される。

このように圧力流れと自由表面流れの1次元数値モデルは既に開発されている。しかし、1次元モデルを中小都市河川や地下街へ適用する場合には次のような問題点が残る。

■ 中小都市河川では河川空間の確保が困難であるため、一般に十分な河道断面積を確保することが難しく、曲率の大きな湾曲部や漸縮・漸拡部を有するなど河道線形が複雑になる。また、河道線形が複雑な区間と暗渠区間とが接続される場合が多く、そのような区間では1次元モデルの予測精度は十分ではない。

■ 地下街の街路は規則的で複雑な線形を持つようなものは少ない。しかし、街路区画が多数存在するため、そこでの流れは分合流を繰り返す。1次元モデルでは分合流部には内部境界条件が必要となるが、氾濫流のような非定常流を適切に取り扱える内部境界条件は存在しない。そのため、1次元モデルの予測精度は十分ではない。

2. 研究の目的

本研究は、以上のような背景を踏まえ、暗渠区間を含む中小都市河川の洪水流、下水道網の圧力・自由表面流や地下街での氾濫流の挙動を高い精度で予測できる数値モデルの開発を目的としている。このためには以下の要素を満たすモデルを構築する。

- (1) 圧力／自由表面流状態が混在する流れを再現できる。
- (2) 複雑な河道線形と縦横断形状を再現でき、そこでの流れを再現できる。
- (3) 地下街での分合流とその流量を再現できる。

3. 研究の方法

(1) 数値モデルの構築

これまでに、申請者は氾濫流の挙動予測を目的に、有限体積法、非構造格子、流束差分法などの高度な数値解析手法に基づく氾濫解析モデルを開発し、その予測精度を実験結果に基づき明らかにしてきた(重枝・秋山：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証、水工学論文集、第48巻、pp.577-582(2004).)。さらに、このモデルを急流小都市河川(秋山ら：平面2次元数値モデルによる急流都市河川の流況解析、水工学論文集、第48巻、pp.631-636(2004).)や大分県の大野川・乙津川(重枝ら：大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水流解析と河道内樹木が乙津川への分流量に及ぼす影響、河川技術論文集、第12巻、pp.85-90(2006).)に適用し、水理構造物や樹木群がある場での流況を十分な精度で再現できることを示した。

当初の計画では、上記の平面2次元モデルに圧力流状態の取り扱いを組み込み、中小都市河川の洪水流および地下街の氾濫流の挙動を高精度で予測できる数値モデルの開発を行うこととした。しかしながら、圧力流れが生じる可能性がある都市河川の暗渠区間、地下街空間、下水道などについては、横断面形状の規格が統一されていることが多く、湾曲部や分合流部などには平面2次元モデルが必要ではあるが、それ以外の区間については1次元モデルでも十分な精度で流れが予測できると考えられる。また、横断面形状の規格が統一されているような区間で平面2次元モデルを適用すると計算効率も低下する。そこで、湾曲部や分合流部には平面2次元モデルを、それ以外では1次元モデルを適用し、圧力・自由表面流れを高精度・高効率で予測可能なダイナミックネットワークスロットモデルの構築に取り組んだ。

(2) モデルの検証

ダイナミックネットワークスロットモデ

ルの検証は次のように行った．①単純な直線水路での圧力，自由表面流れが混在する既存の実験データに基づき，その取り扱いについて検証した．次に，②水路が湾曲する自由表面流れについて平面2次元モデルと1次元モデルとの接続方法について検証した．最後に，③自由表面と圧力流れが混在する管路網のテスト問題や管路と開水路とが合流する実験結果に基づき，同モデルの総合的な予測精度について検証した．

(3) モデルの適用

2003年九州豪雨災害時に甚大は被害が生じた飯塚市街地の下水道網に，同モデルを適用し，内水氾濫時の圧力・自由表面流れの予測を行うとともに，同市街地の下水道の排水不良プロセスについて検討した．

4. 研究成果

(1) ダイナミックネットワークスロットモデルの構築

ダイナミックネットワークスロットモデルは①平面2次元スロットモデルと②1次元スロットモデルとで構成される．

平面2次元スロットモデルでは，基礎方程式に空間平均操作を施した2次元浅水流方程式を用い，満管状態となった場合には暗渠区間や管路の天端に設けた仮想的なピエゾ管により，1次元スロットモデルでは基礎方程式に1次元の浅水流方程式を用い，満水もしくは満管状態となった場合には水路または管路の天端に設けた仮想的なスロットにより，強制的に水位を上昇させ圧力に反映させることで，水路もしくは管内の断面積を変化させずに圧力流れを取り扱うこととした．

ネットワークモデルでは，水路や下水道をブランチとし，水路や下水道の始点と終点をノードとして，各ブランチをノードで接続することで，水路あるいは下水道網を取り扱う．一般に，ブランチ部では1次元スロットモデルにより，ノード部では各ブランチから流入出する流量と質量保存により，水深と流速が求められる．しかし，このようなモデルは運動量保存を考慮しているわけではないので，当然のことながら，接続部での水位あるいは圧力上昇を考慮することはできない．本研究では質量保存則に加えて運動量保存則を考慮した平面2次元スロットモデルをノード部に導入することで，ノード部についても運動量保存を考慮できるダイナミックネットワークモデルとした．ダイナミックネットワークモデルの概念図を図-1に示す．図-2にブランチとノード部を用いて作成した水路網の一例を示す．

以下では1次元および平面2次元スロットモデルの概要について述べる．いずれのモデルについても，基礎方程式の離散化は流束差

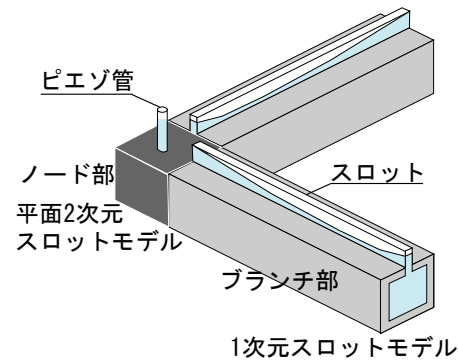


図-1 ダイナミックネットワークスロットモデル

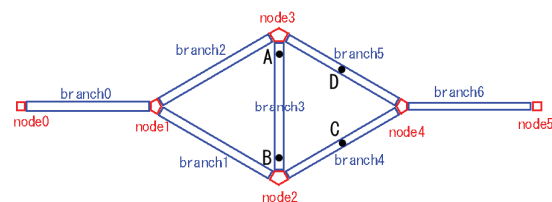


図-2 ノード・ブランチ部による水路網の一例

分離法(FDS法)に基づき行った．

① 1次元スロットモデルの基礎方程式

1次元スロットモデルの基礎方程式は次式で表される．

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここに， \mathbf{U} =保存量ベクトル， \mathbf{E} =流束ベクトル， \mathbf{S} =発生・消滅項ベクトルである．これらのベクトルは次式によって表される．

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (A \quad uA)^T ; & \mathbf{E} &= (uA \quad u^2A + gF_h)^T ; \\ \mathbf{S} &= (q \quad -gA(S_0 - S_f))^T \end{aligned} \quad (2)$$

ここに， A =流積， u =流速， g =重力加速度， S_0 ， S_f =水路床勾配と摩擦勾配， F_h =静水圧項， q =単位長さ当りの流入出量である．水路床勾配と摩擦勾配は，それぞれ次のように処理する．摩擦勾配はManningの公式によって計算される．

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{A^2R^{4/3}} \quad (3)$$

ここに， n =Manningの粗度係数， Q =流量， $R=A/P$ で表される径深， P =潤辺である．

圧力流れが発生した場合の水深，静水圧および潤辺は，それぞれ以下のような式で表される．

$$\begin{aligned} h &= h_f + \frac{A - A_f}{b_s} ; & P &= P_f ; \\ F_h &= A_f \left(0.5h_f + \frac{A - A_f}{b_s} \right) + \frac{(A - A_f)^2}{2b_s} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 A_f =満管時の断面積、 P_f =満管時の潤辺、 h_f =満管時の水深 (断面形状が長方形の場合には水路高、円形の場合には直径)、 b_s =スロット幅である。

②平面2次元スロットモデルの基礎方程式
平面2次元スロットモデルの基礎方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{U}_{node}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_{node}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_{node}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (5)$$

ここに、 \mathbf{U} =保存量ベクトル、 \mathbf{E} 、 \mathbf{F} = x 、 y 方向の流束ベクトル、 \mathbf{S} =発生・消滅項ベクトルである。下付けの node は、node 部の諸量であることを示している。これらのベクトルは次式によって表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{node} &= (h \quad uh \quad vh)^T ; \\ \mathbf{E}_{node} &= (uh \quad u^2h + 0.5gh^2 \quad uvh)^T \quad (6) \\ \mathbf{F}_{node} &= (vh \quad uvh \quad v^2h + 0.5gh^2)^T \\ \mathbf{S}_{node} &= (q \quad -gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad -gh(S_{oy} - S_{fy}))^T \end{aligned}$$

ここに、 h =水深、 u 、 v = x 、 y の流速、 g =重力加速度、 S_{ox} 、 S_{oy} 、 S_{fx} 、 S_{fy} = x 、 y 方向の水路床勾配と摩擦勾配、 q =単位面積当りの流入流出量である。

圧力流れが生じた場合の水深は次式で表される。

$$h = h_f + \frac{V - V_f}{A_s} \quad (7)$$

ここに、 V =水の体積、 V_f =満管時の水の体積、 A_s =スロットの断面積、 h_f =ノード部の最大高さである。

③1次元と平面2次元スロットモデルの接続
1次元と平面2次元スロットモデルとの接続は、次のように行う。まず、ノード部に適用する平面2次元スロットモデルの基礎方程式を非構造有限体積法に基づく流束差分法により、次式のように離散化する。

$$A_k \frac{\mathbf{U}_{nodek}^{t+1} - \mathbf{U}_{nodek}^t}{\Delta t} + \sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{Lj} + A_k \mathbf{S}_{nodek} = \mathbf{0} \quad (8)$$

ここに、 k 、 t はそれぞれノードおよび時間に関する添え字である。 A_k =ノードの面積、 \mathbf{F}_L =外向き法線方向を正としたノードの境界線での数値流束である。この数値流束に、次式の1次元スロットモデルより求められるブランチ部での数値流束を用いることで両モデルを接続する。

$$\mathbf{F}_{Lj} = (\pm F_1 \quad \pm F_2 n_x \quad \pm F_2 n_y)^T \quad (9)$$

ここに、 F_1 および F_2 は1次元スロットモデルにより求められる数値流束である。また、ノードが、ブランチの上流端に対応する場合には正の符号を、下流端に対応する場合には負の符号を用いる。ここに、 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ =外向き

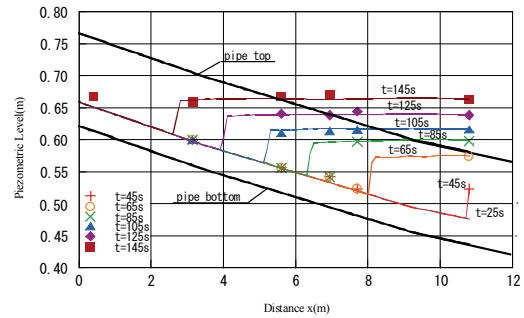


図-3 圧力・自由表面流れが混在する
実験結果に基づく検証
(プロット：実験値，ライン：解析結果)

法線方向ベクトルである。

(2) ダイナミックネットワークスロットモデルの検証

ダイナミックネットワークスロットモデルを様々な実験結果に適用し、その予測精度を検証した後、実下水道網へ適用し、豪雨時の排水プロセスを検討した。

圧力・自由表面流れが混在する管路内の実験結果に基づく検証から、図-3に示すように、同モデルが圧力・自由表面流れのいずれも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、などが確認され、本モデルが自由表面・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明らかとなった。

次に、水路が湾曲するダム破壊流れの実験結果に基づく検証から、図-4に示すように、本モデルが通常の1次元解析では不可能な水路の曲がりやを考慮することができ湾曲の影響が最も大きくなると考えられる測定点での実験値を概ね再現できることが確認され、本モデルが水路の曲がりなどの形状の変化を取り扱うことが可能であることが明らかとなった。

最後に、自由表面と圧力流れが混在し、分合流が生じる管路網のテスト問題や図-5に示すような管路と開水路とが合流する実験結果に基づく検証により、自由表面流れから圧力流れへの遷移やその逆のプロセスやそれに伴う分あるいは合流を解析可能であること、などが確認され、本モデルが管路網で生じる分合流を伴う圧力・自由表面流れを解析可能であること、都市河川での暗渠区間あるいは下水道の流入を再現可能であること、などが明らかとなった。

(3) ダイナミックネットワークスロットモデルの実下水道動網への適用

上記のように検証されたダイナミックネットワークスロットモデルを2003年九州豪

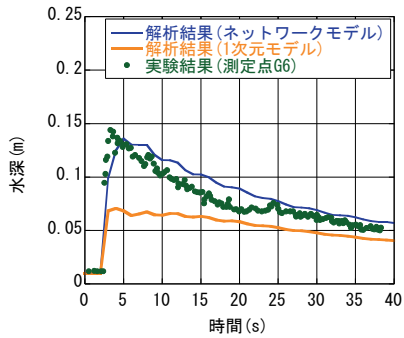


図-4 水路が湾曲するダム破壊流れの実験結果に基づく検証

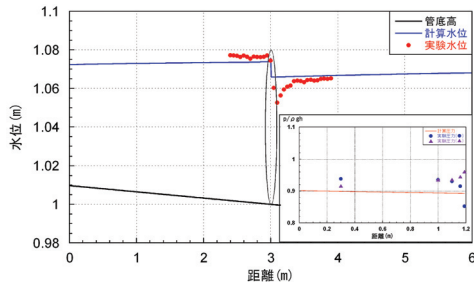


図-5 管路と開水路とが合流する実験結果に基づく検証 (右下：管路内の圧力の比較)

雨災害時の飯塚市街地の下水道網に適用し、氾濫解析と併用することで、そこでの浸水プロセスと下水道による排水プロセスの再現を行った。飯塚市では、支川の溢水氾濫と下水道網の排水不良により内水氾濫が生じている。下水道網内の流れの実測データは存在しないので、直接的な比較は困難であるが、図-6に示すように、最大浸水域や浸水深を概ね再現できることが確認された。また、図-7に示すように、下水道内で圧力流れが生じ排水不良を起し、内水氾濫が生じる時間や場所についても聞き取り調査による浸水プロセスと同様であることも確認された。このように、本モデルは実下水道網についても十分な精度で再現できると推察される。

(4) 成果のまとめ

本研究で得られた成果は次の通りである。

- ①複雑な河道線形と縦横断形状を再現でき、そこでの圧力・自由表面流状態が混在する流れを取り扱うことが可能なダイナミックネットワークスロットモデルを構築した。
- ②同モデルを様々な実験結果に適用した結果、複雑な水路あるいは管路網で生じる圧力・自由表面流を再現できることが確認された。
- ③同モデルを実下水道網に適用した結果、そこでの圧力・自由表面流を十分な精度で再現できることがわかった。
- ④以上から、本研究で開発したダイナミックネットワークスロットモデルは、複雑な水路あるいは管路網で生じる圧力・自由表面流を

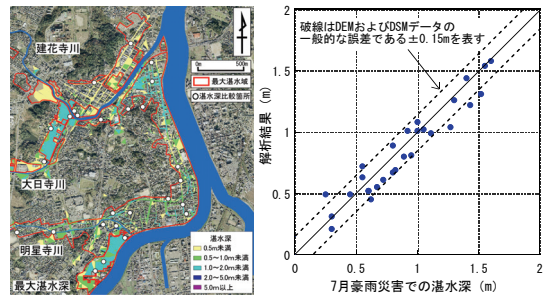
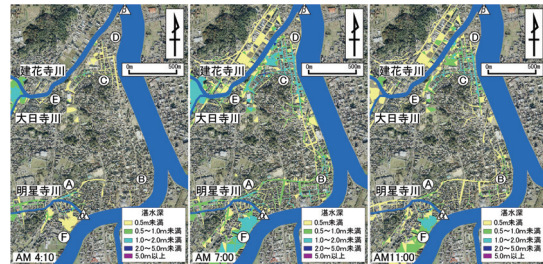
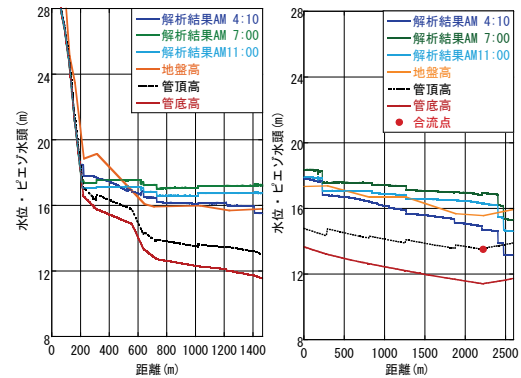


図-6 最大浸水域と浸水深の比較



(a) 浸水プロセス



(b) 下水道網の水位・ピエゾ水頭の経時変化 (左：西1号幹線、右：西部幹線)

図-7 2003年九州豪雨災害時の飯塚市街地の下水道網への適用と浸水プロセスと下水道による排水プロセスの予測

十分な精度で再現できる性能を有しており、実下水道網の圧力・自由表面流れの予測が可能であることが明らかとなった。このようなモデルは、国内および海外でも開発されておらず、世界最先端のモデルであると考えられる。

なお、本研究では、現地データを入手できなかったことから、地下街への適用性を明らかにすることができなかった。また、同モデルは中小都市河川を対象としているが、同モデルに準2次元解析のような分割断面や樹木群の取り扱いを組み込むことで、1級河川のような大河川においても適用することが可能となり、平面2次元解析に比べ高効率に1次元解析に比べ高精度に洪水追跡を行える可能性がある。今後は、これらの点についても検討し、同モデルを水災時の被害軽減対策を検討する上で有用なツールの一つとなる

ように改善したいと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知, 水工学論文集, 査読有, 第 54 巻, 2010, pp. 919-924.
- ② 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析, 水工学論文集, 査読有, 第 53 巻, 2009, pp. 829-834.
- ③ 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 自由表面・圧力流れのダイナミックネットワークモデルの構築と都市域下水道網への適用, 河川技術論文集, 査読有, 第 14 巻, 2008, pp. 241-246.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 池田知央: 流域流出・都市域氾濫解析モデルの遠賀川流域への適用, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 平成 22 年 3 月 6 日, 崇城大学.
- ② 小園裕司: 飯塚市街地を対象とした内水氾濫解析, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会, 平成 21 年 3 月 7 日, 九州大学.
- ③ 山下未貴: 流束差分法を用いた圧力・自由表面流れの数値解析, 平成 19 年度土木学会西部支部研究発表会, 平成 20 年 3 月 8 日, 長崎大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重枝 未玲 (SHIGE-EDA MIREI)

九州工業大学大学院・工学研究院・准教授
研究者番号: 70380730

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし