

## 氾濫域に陰解法を用いた一次元排水解析手法

A 1-dimensional drainage simulation by use of the implicit method to estimate inundation area.

○ 安瀬地一作\*, 桐博英\*, 関島建志\*, 中田達\*, 木村延明\*

○ AZECHI Issaku, KIRI Hirohide, SEKIJIMA Kenji, NAKADA Toru, KIMURA Nobuaki

### 1. はじめに

近年、台風の大型化や梅雨前線の活発化による豪雨災害が頻発し、人的被害やライフライン、農地、農業用施設等に甚大な被害が及んでいる。災害の際には、救助活動やライフラインの復旧が最優先であるため、農地や農業用施設の復旧は必然的に遅くなる。しかしながら、農地や農業用施設は食糧生産の基盤であることはもちろんのこと、地域住民の生活を支える基盤でもあり、農村地域の都市化が進む現在では特にその重要性が増している。とりわけ、排水機場などの農業用排水システムは、農地の防災だけでなく地域住民を水災害から守る地域防災の役割も担っているため、農業用排水システムの機能不全は、農業生産だけでなく地域住民の生活にも大きな影響を与える。事実、東日本大震災に伴う巨大津波により被災した農業用排水機場が長期にわたり機能不全となったことで塩害が長期化しており、深刻な被害が発生している<sup>(1)(2)(3)</sup>。通常、農業用排水施設は実質的には地域の防災を担っているのであるが、農地の排水改善や防災を目的としているため、都市防災を目的として整備されたものよりも規模が小さい。したがって、近年頻発する想定外の豪雨には、予備排水や事前排水、切り替え排水を行うなど、ソフト的な対策により対応しなければならない。このような現状の下、排水状況が各施設の操作による排水状況・被害状況の変化を予測、想定するためには数値シミュレーションが便利である。現在、洪水氾濫の様子を再現するためには平面二次元解析がよく用いられるが、ゲートや排水機場などの操作方法を様々に変化させ、いろいろなパターンの解析を迅速に行うには計算負荷が大きく不便である。そのためか、農業地域の排水解析では、排水路の非定常解析をベースとした一次元解析が用いられることが多い。このとき、氾濫域の取り扱いには、最も簡易な場合、排水路一次元非定常解析から得られた水位と背後地の標高、地形勾配から湛水深、湛水幅を算定し、運動方程式ではこれを無視し質量保存のみ考慮する白石らの方法<sup>(4)</sup>が用いられている。この方法は、氾濫域で運動方程式を考慮していないため、氾濫現象を再現できているかどうか

非常に疑わしい。宮津ら<sup>(5)</sup>は、氾濫域を地形起伏に応じて任意多角形セルで表現し、各セル間の水移動を考慮することによって氾濫域の流況を精度良く再現している。しかし、氾濫域は一次元的な扱いではないため、地形データの作成および計算が若干複雑である。そこで、本研究では、白石らの方法と同様の地形データを用いて比較的簡易に氾濫域の流動現象を再現するために、氾濫域解析に陰的差分法を適用した陰陽混合型一次元非定常解析を開発した。

### 2. 基礎方程式と解法

大小さまざまな排水路網が入り組んだ農業地域では、氾濫域の長さが排水路の空間刻み  $\Delta x$  (100~400m) と同程度かそれ以下の場合も多いため、氾濫現象を再現するためには氾濫域の空間刻みを小さくする必要がある。その場合、全体の時間刻み  $\Delta t$  も同様に小さくせざるを得なくなり、計算効率が低下する。このような CFL 条件の制約を避けるため、氾濫域のみを陰的に解くことは有効であるが、運動方程式をそのまま陰的に差分すると、非線形の移流項があるためにかえって計算効率が悪くなる。そこで、本研究では移流項を省略して線形化した方程式を用いて氾濫域の計算を行った。洪水氾濫解析では、移流項はその他の項に比べて無視できるとして、しばしば移流項が省略されている<sup>(6)(7)</sup>。

基礎方程式は、水路では一次元の質量保存式 ((1) 式) および運動量保存式 ((2) 式) を用いた。氾濫域の解析では、(1) 式と移流項を省略した運動量保存式 (3) 式を用いる。排水路一次元非定常解析では、移流項は三次風上差分法である QUICKEST (QUICK with estimated streaming term) を用いて陽的に差分し、氾濫域では陰的に差分する。幅を一定とし、(3) 式の右辺第一項および二項を線形化すれば、(4)、(5) 式のように三重対角行列となり、容易に解ける。なお、差分格子は Staggered 格子とし、氾濫域では横流入量による運動量の変化項 ((2) 式右辺第 3 項) は考慮していない。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

\* 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門 National Institute for Rural Engineering, NARO

Key Word 数値解析, 排水解析, 氾濫解析, 陰陽混合法

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + g(i_0 - S_f) - \frac{q_l}{A}(u - u_{ll}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_l}{\partial t} = -gA_l \frac{\partial h_l}{\partial x} + gA_l \left( i_{0l} - \frac{N_l^2 u_l^2}{h_l^3} \right) \quad (3)$$

$$h_{li}^{n+1} = h_{li}^n + (q_{li+1}^{n+1} - q_{li}^{n+1}) \frac{\Delta t}{\Delta x_l} \quad (4)$$

$$\frac{q_{li}^{n+1} - q_{li}^n}{\Delta t} = -gh_{li+1/2}^n \frac{(h_{li+1}^{n+1} - h_{li-1}^{n+1})}{\Delta x_l} + gh_{li+1/2}^n \left( i_{0l} - \frac{N_l^2 |u_{li}^n| q_{li}^{n+1}}{(h_{li+1/2}^n)^3} \right) \quad (5)$$

ここに、 $u$ は流速(m/s)、 $A$ は流水断面積(m<sup>2</sup>)、 $Q$ は流量(m<sup>3</sup>/s)、 $h$ は水深(m)、 $i_0$ は水路床勾配、 $S_f$ はエネルギー勾配、 $u_{ll}$ は横流入速度の $u$ 方向成分(m/s)、 $g$ は重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $R$ は径深(m)、 $N$ は Manning 粗度係数、 $q$ は単位幅流量(m<sup>2</sup>/s)であり、添え字の $l$ は氾濫域(横流入)の諸元、 $i$ は空間ステップ、 $n$ は時間ステップを表わす。

### 3. 計算条件

テストシミュレーションは全長 2,000m、水路床勾配 1/1000、粗度係数 0.012、1m×1m の矩形断面水路にて行った。氾濫域の勾配は 1/300、氾濫域粗度係数(陰陽混合法のみ必要)は 0.3、氾濫域長は 300m とした。計算空間ステップは、水路では 50m、氾濫域では 5m、時間ステップは 1s とした。上流では流量、下流では水深を指定する Dirichlet 条件とした。それぞれの境界条件は Fig.1 の○および×で示している。初期条件は等流水深、流速とした。なお、水路内計算の空間ステップを 5m とした場合には計算は破綻する。今回は、氾濫域には一様の勾配、粗度の地形を用いたが、地形条件や粗度は適宜設定可能である。また、(4)式において降雨を考慮すれば流出現象も扱うことができる。

### 4. 解析結果

Fig.1 の青丸は陰陽混合法、黄丸は白石らの方法により得られた 1,500m 地点の水深変化である。水深 1m 以上が湛水を表わしている。氾濫域の空間ステップを小さくしても陰陽混合法では安定的に計算できている。白石らの方法では、氾濫域での流動を考慮しておらず、氾濫域方向(水路と直角方向)の動水勾配はゼロで水路壁を越えたら直ちに氾濫域全域に広がる。したがって、1m を超えると水深はほとんど変化しなくなる。対して、陰陽混合法では、1m を超えてからも水深は緩やかに増加しており、実際の氾濫現象と近い傾向が得られていると思われる。また、水深、継続時間ともに陰陽混合法の方

が大きくなっている。

### 5. まとめ

氾濫域において、陰解法を適用することによって氾濫域の空間ステップを小さくしても安定的に計算できる。また、陰陽混合法による計算では、従来の方法に比べて湛水継続時間、水深ともに大きい結果となった。今後は計算の妥当性の検証とともに、宮津らの方法や平面二次元解析との比較を行う。

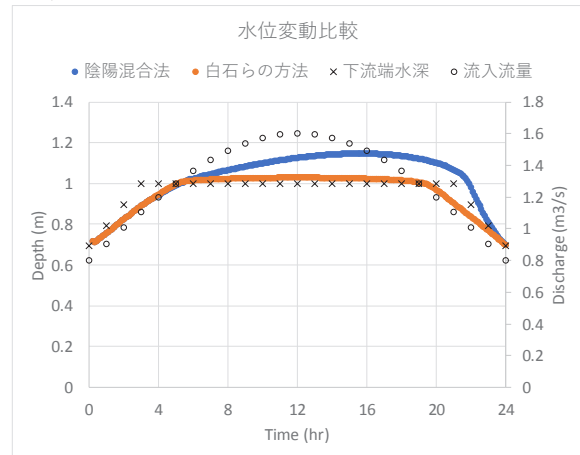


Fig.1 Water depth and boundary condition

### 参考文献

- (1) 星信幸, 遊佐隆洋, "宮城県における津波による水田への影響と除塩", 日本海水学会誌, 66(2), 2012, 74-78
- (2) 森一司, 高橋朋佑, 岡庭信幸, 柴崎直明, 大内拓哉, "2011年東北地方太平洋沖地震による仙台平野南部地域での地下水環境変化について", 地下水学会誌, 54(1), 2012, 11-23
- (3) 中矢哲郎, 丹治肇, 桐博英, "農地・排水系施設の復旧状況からみる 2011 東日本地震津波による塩害長期化の実態", 土木学会論文集 B1 (水工学), 69(4), 2013, I\_1471-I\_1476
- (4) 白石英彦・中道宏, "農業水利計画のための数理モデルシミュレーション手法—新たな広域水管理をめざして—", 土地改良技術情報センター, 1993.
- (5) 宮津進・吉川夏樹・阿部聡・三沢眞一・安田浩保, "田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用", 農業農村工学会論文集, 282, 2012, 15 - 24
- (6) 安田浩保・白土正美・後藤智明・山田正, "水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発", 土木学会論文集, No.740/II-64, 2003, 1-7
- (7) Gustavo A. M. de Almeida and Paul Bates, "Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling", Water Resources Research, 49, 2013, 4833-4844