

農業用水路を詳細に考慮した氾濫解析

FLOOD INUNDATION SIMULATION CONSIDERING IRRIGATION CHANNELS

中田俊也¹・八木剛²・豊田政史³・富所五郎⁴

Toshiya NAKADA, Takeshi YAGI, Masashi TOYOTA and Goro TOMIDOKORO

¹信州大学大学院工学系研究科修士課程社会開発工学専攻 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

²修(工) (株) NIPPONコーポレーション (〒104-8380 東京都中央区京橋1-19-11)

³正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

⁴正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

Many researchers have simulated flood inundation considering underground spaces and sewerages in the large cities such as Tokyo and Osaka. On the other hand, in the local cities such as Nagano, there are many irrigation channels, which are substituted for the combined sewers when it rains. It has not been investigated whether they have an influence on the behavior of inundation water or not. With these points as background, we made a flood inundation simulation considering irrigation channels. This paper focuses the northern part of Nagano-city, where there are many irrigation channels. The results proved that the irrigation channels have little influence on the behavior of inundation water in this analysis region except the immediate vicinity of them. In result, it is effective to have a flood inundation simulation considering the irrigation channels, when evacuation information (for example, the selection of evacuation places and routes) is required in high accuracy.

Key Words: irrigation channel, local city, inundation simulation

1. はじめに

近年, 局地的な豪雨災害がふえており, 減災という観点からソフト的な水害対策の強化が図られている。ソフト的な水害対策を行ううえでは, 数値解析による氾濫水の挙動予測が有効な手段となる。その場合, 都市部における地下空間や排水路網など, 地域ごとに地形条件とともに社会基盤が多様化しており, それらを詳細に反映した解析を行う必要がある。

近年頻発している都市型水害の経験から, 東京や大阪などの都市部を主に対象として, 下水道などの排水路網および地下空間の特徴を考慮した研究や内水氾濫に関する研究^{1), 2), 3), 4)}が数多く行われてきている。これらの研究対象は, 従来行われてきたような「破堤が起こった場合に, 氾濫水が地上をどう広がるか」ということに加えて, 排水機場の新設・増強による浸水被害軽減効果の検討¹⁾や, 地下空間における連絡階段の規模を考慮した浸水過程の評価³⁾といった事項にまで及んでいる。

一方, 長野などの地方都市には, 降雨時に合流式下水道の排水機能を代替する農業用の水路網が存在し, その

多くは旧流路のような標高の低いところに作られている。そのため, 外水氾濫が発生した場合, 氾濫水が農業用水路に集中して流下する可能性がある。また, 水路には雨水が集中して流入するので, その付近では内水氾濫が発生しやすくなると予想される。これらのことを検討するために, 農業用水路が多く存在する場所において氾濫解析を行い, それらが氾濫水の挙動にどの程度影響を及ぼすかをみることは大きな意義があると思われるが, これまでにそのような解析例はみられない。

上述のような背景をふまえて, 長野市北部を対象領域として農業用水路(以下, 用水路)を考慮した氾濫解析を行う。ここでは, それらに流れ込む排水管渠も考慮する。解析手法としては, 有限要素法による水平二次元不定流解析を主として用いる。なお, 用水路の一部と排水管渠については, Manningの等流公式を用いて, 流れを簡易的に評価する。

本研究では, 外水氾濫発生を想定して, このモデルによる解析結果と用水路・排水管渠を考慮しない場合の解析結果を比較する。そして, 用水路・排水管渠が氾濫水の挙動に与える影響を把握し, 氾濫解析にそれらを考慮することの必要性を検討する。

2. 解析の概要

(1) 解析方法

本研究では、以下に示すReynoldsの運動方程式、連続の式を基礎式として水平二次元不定流解析を行う。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gI_x - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \tau_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = gI_y - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \tau_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u \cdot d) + \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot d) = 0 \quad (3)$$

ここで、 x 軸は水平面内の東方向を、 y 軸は北方向を正としている。 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速成分、 I_x, I_y はそれぞれ x, y 方向の平均勾配、 ζ は基準面上の水位、 d は水深、 A_h は水平渦動粘性係数、 τ_x, τ_y は底面せん断応力を ρd で割ったものであり、 ρ は水の密度である。

また、離散化については、空間変数に対しては Galerkin 有限要素法、時間変数に対しては two-step Lax-Wendroff 法を用いる⁵⁾。

大半が開水路流れである用水路については、上述のモデルを適用することができる。その場合、一般的に水路幅の小さいものを取り扱うと計算格子幅が小さくなり、CFL 条件から時間刻み幅を細かくすることが必要となる。その結果、莫大な計算時間を要する。そこで、用水路については、幅 5m 未満のもののみ、倉地ら⁶⁾の水路の解析手法と同様に、地表面と用水路間の流量の受け渡しを節点での吸い込み・湧き出しのみで評価し、Manning の等流公式を用いて水路内の流速を求める方法とする。また、地下構造となっている排水管渠についても、地表面流れのモデルを適用することができないため、幅 5m 未満の用水路と同様の解析手法とする。

(2) 解析領域

本研究では、用水路・排水管渠が数多く存在し、過去に洪水による被害を受けてきた長野市北部を対象領域とする。図-1 に解析領域と本解析において考慮する道路・用水路・排水管渠および本研究で想定する破堤点を示す。また、本解析において、道路は横断距離 20m 以上、用水路は幅 2m 以上のもの、排水管渠は長野市が管理するもの全てを考慮する。破堤点は、破堤の危険があるといわれている長野県庁から西側 500m の地点・裾花川の左岸側とする。また、図-2 に解析領域の標高を示す。標高差は最大で 55m であり、破堤点付近が最も高く、そこから裾花川、犀川、千曲川に沿って緩やかに低くなり、千

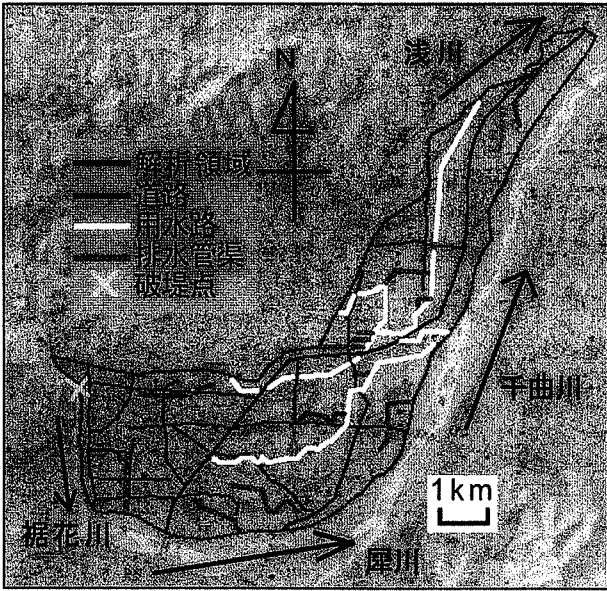


図-1 解析領域

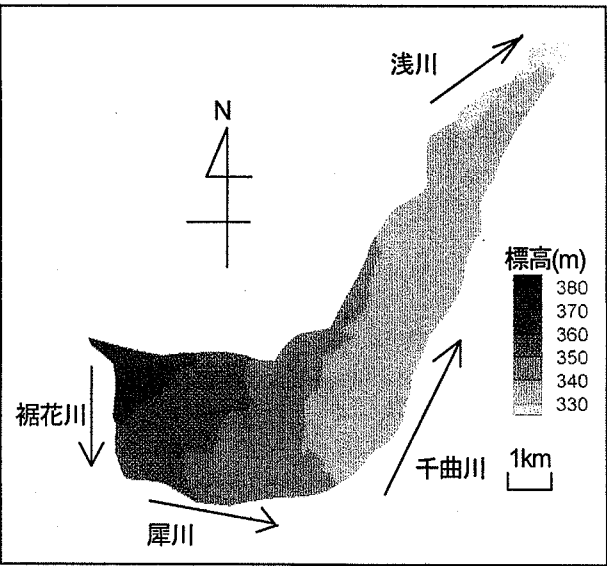


図-2 解析領域の標高

表-1 土地利用別粗度係数 (m^{-1/3}・s)

土地利用	田	農用地	建物用地	道路	水路	排水管渠
粗度係数	0.030	0.035	0.060	0.020	0.020	0.020

曲川と浅川の合流部付近が最も低くなっている。

(3) 解析メッシュ

氾濫水の挙動には、土地利用・標高が大きな影響を与える。そのため本研究では、八木ら⁷⁾と同様に各種数値データ⁸⁾を用い、土地利用・標高を考慮した解析メッシュを自動作成する。ここで、土地利用の違いについて

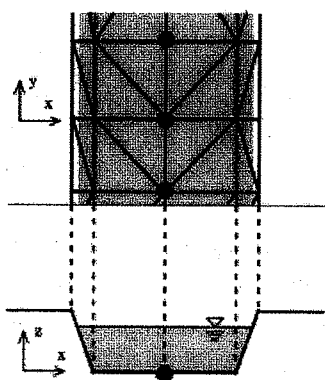


図-3 用水路メッシュ

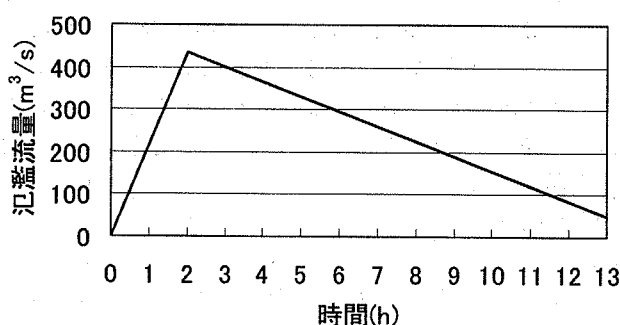


図-4 氾濫ハイドログラフ

は、各要素に土地利用に対応する粗度係数（表-1）を与えることにより表現する。建物による氾濫水の挙動への影響の考慮方法については、要素内の建物を抗力として考慮する方法⁹⁾や建物の占有率と水深の関係を考慮する方法¹⁰⁾などがある。しかし、本研究の目的は用水路による影響を捉えることであるため、建物用地にも他の土地利用と同様に一定の粗度係数を与えるという簡便な方法をとる。また、粗度係数の設定について、川池ら¹⁾は建物用地を0.067、道路を0.043、田・農用地を0.025としている。しかし、本研究では解析領域内の建物の占有率が低いことを考慮し¹⁰⁾、建物用地の粗度係数を0.060とする。道路については、アスファルト舗装されているため、田・農用地よりも氾濫水が速く伝わると考えて、0.020に設定する。

標高については、各節点に「50mメッシュ標高」（国土地理院発行のラスターデータ）より内挿した値を与える。

なお、用水路・排水管渠・道路については、氾濫水の挙動に与える影響を適確に表現するために、解析メッシュを以下のように作成する。

幅5m以上の用水路については、横断方向を4節点以下で表現すると、標高差のない用水路要素のみから寄与をうける節点が存在しなくなる。このため、用水路が氾濫水の挙動に与える影響を適確に表現しにくい。そこで本

研究では、図-3のように用水路を横断方向に5節点で表現する。このように用水路を表現することにより、中央節点（図中の●）が標高差のない用水路要素以外からの寄与をうけないため、用水路が氾濫水の挙動に与える影響を適確に表現できる。

幅5m未満の用水路・排水管渠については、それぞれ20m、30m間隔で節点を与え、一次元的に表現する。なお、排水管渠については、すべて2m×2mの正方形断面であるとして解析を行う。

道路については倉地ら⁶⁾と同様のメッシュを与える。

(4) 解析条件

氾濫流量については、平成7年に長野県北部で起きた梅雨前線豪雨時の流量データをもとに想定する（図-4）。

外水氾濫発生時には、降雨の影響による用水路内の水位上昇が予想される。そのため本研究では、降雨の影響を考慮するために、氾濫流量の想定に用いたデータに対応する期間の降雨データから合理式を用いて流量を算出し、それを用水路に定常的に与えるという簡便な方法をとる。また、用水路に流入しない雨水については地下へ浸透せず、そのすべてが地表面に留まると仮定し、解析領域全体に一樣な分布で与える。

本研究では、用水路・排水管渠が氾濫水の挙動に与える影響をみるために、それらを考慮する場合（case-1）と、考慮しない場合（case-2）の解析を行い、次章でその結果を比較・考察する。ここで、case-2の解析メッシュは、case-1と同じ節点配置・要素構成とする。しかし、用水路部分の土地利用・標高については、他の場所と同様に数値データを用いて補間により与えている。また、case-2では雨水のすべてを解析領域全体に一樣な分布で与えている。

3. 結果と考察

(1) 幅5m以上の用水路が氾濫水の挙動に与える影響

図-5に、氾濫水の進行方向と用水路の流下方向が異なる地域のcase-1、case-2における破堤5時間後の水深図を示す。図中の実線は、解析境界である千曲川堤防を示す。ここで、case-1において、水深の大きいところが用水路の位置（北側は幅5m、深さ3m、南側は幅10m、深さ3m）であり、矢印は氾濫水の進行方向を示す。また、南側の用水路の拡大図を図-6に示す。さらに、図-7に、氾濫水の進行方向と用水路の流下方向が一致する地域のcase-1、case-2における破堤7時間後の流速図を示す。図中の実線は、用水路（幅7m、深さ3m）、矢印は氾濫水の進行方向を示す。

図-5において、両ケースで氾濫水の拡がり方に違いがみられない。このことから、用水路の存在が氾濫水全

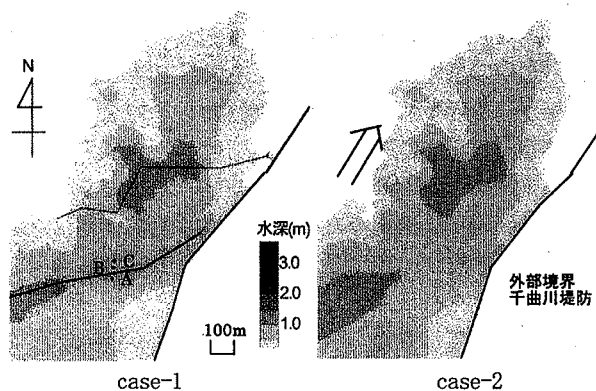


図-5 氾濫水の進行方向と用水路の流下方向が異なる地域の水深図（破堤5時間後）

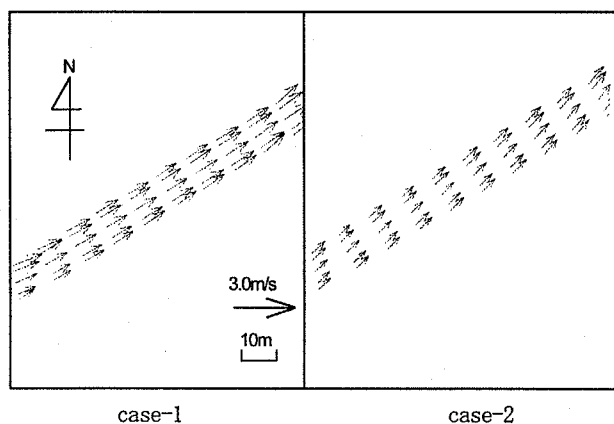


図-6 用水路における流速ベクトル拡大図（破堤5時間後）

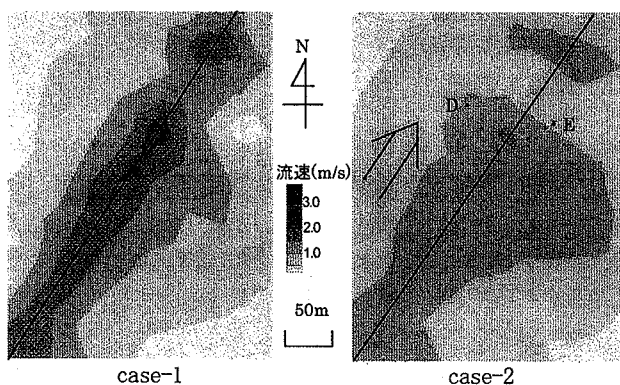


図-7 氾濫水の進行方向と用水路の流下方向が一致する地域の流速図（破堤7時間後）

体の挙動に対してあまり影響を与えていないと考えられる。しかし、用水路のごく近傍に着目すると、図-6から、case-1ではcase-2と異なり、氾濫水が用水路内をそ

の流下方向に大きな流速で流れていることが確認できる。また、図-7から、用水路付近でcase-2よりもcase-1の流速が大きく、用水路が氾濫水の流速を大きくする働きをしていることがわかる。また、ここには示さないが両ケースで流速ベクトルの向きに大きな違いはみられなかった。

用水路が氾濫水の挙動に与える影響を詳しくみるために、まず、図-5中の点Bにおける水深および流速の時間変化図を図-8に示す。この図から、両ケースで水深には違いがみられないが、流速はcase-2よりもcase-1の方が大きいことがわかり、この差は用水路による影響と考えられる。しかし、ここには示さないが、図-5中の点Aおよび点Cにおいては、両ケースで水深および流速の時間変化に違いはみられなかった。ここで、点Aおよび点Bは用水路からそれぞれ30m、点Cは60mの地点である。よって、この用水路が氾濫水の挙動に影響を及ぼしているのは用水路の北側30～60m程度の範囲であるといえる。次に、図-7中の点Dにおける水深および流速の時間変化図を図-9に示す。この図から、点Dにおいて、水深・流速ともに両ケースで違いがないことがわかる。また、点Eにおいても同様に両ケースで違いはみられなかった。ここで、点Dおよび点Eは用水路からそれぞれ30mの地点である。図-7をみると、この用水路が氾濫水の挙動に影響を与えていることは明らかである。しかし、用水路から少し離れた点Dおよび点Eまでは影響を及ぼさなかったと考えられる。よって、この用水路が氾濫水の挙動に影響を及ぼしているのは用水路の両側30m未満の範囲であるといえる。

当然ながら、用水路が氾濫水の挙動に影響を及ぼす範囲は、氾濫流量や用水路の位置などさまざまな条件により変化すると考えられる。しかし、上述の結果から考えると、その範囲は用水路のごく近傍のみであるといえる。

また、氾濫水の広がる速さという観点でみると、点A～点Eすべての点において、case-2よりもcase-1の方が氾濫水の到達が早かった。しかし、その差は最大でも3分程度であった。本節で、用水路による氾濫水の挙動に対する影響が特に大きい範囲を検討したことを考えると、本解析対象領域内において、用水路の存在が氾濫水到達時間に与える影響は小さいといえる。この理由については、用水路が氾濫水の流速を大きくする働きと、用水路がその内部に氾濫水を貯留し、氾濫水の広がりを抑制する働きが打ち消し合ったためと推測される。

これまでの結果をまとめると、以下ようになる。①用水路が氾濫水の挙動に対して影響を与える範囲は狭い。②避難警報発令時において重要であると考えられる氾濫水の到達時間に対して、用水路の有無による影響は小さい。このことから、氾濫解析において用水路を考慮する必要性は低いと思われる。しかし、用水路のごく近傍においては、流況に変化があらわれ、避難行動時の危険度¹⁾が高まることなどが考えられる。そのため、ハザード

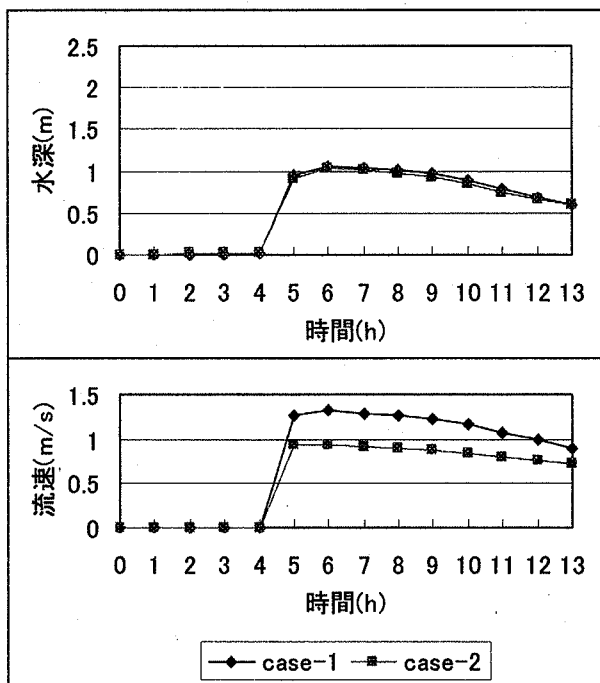


図-8 点Bにおける水深および流速の時間変化図

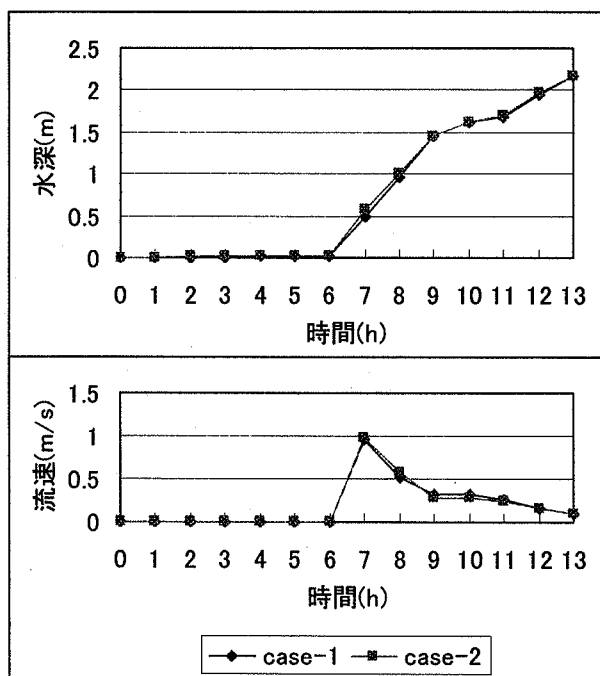


図-9 点Dにおける水深および流速の時間変化図

マップの作成時や避難場所の選定時には用水路の存在を考慮する必要がある。

(2) 幅5m未満の用水路が氾濫水の挙動に与える影響

図-10に、一次元的に表現した用水路（幅3m、深さ1.5m）付近のcase-1、case-2における破堤3時間後の水深図を示す。図中の実線は、用水路を示す。この図にお

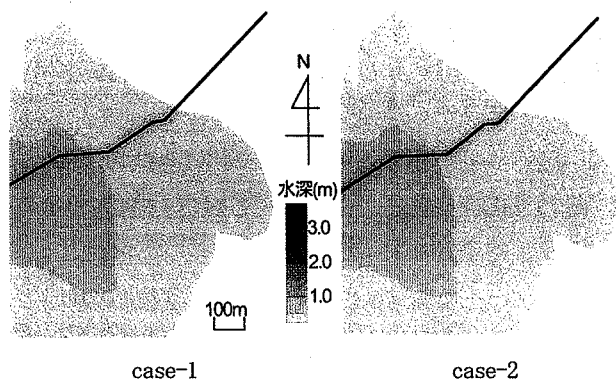


図-10 一次元的に表現した用水路付近の水深図
(破堤3時間後)

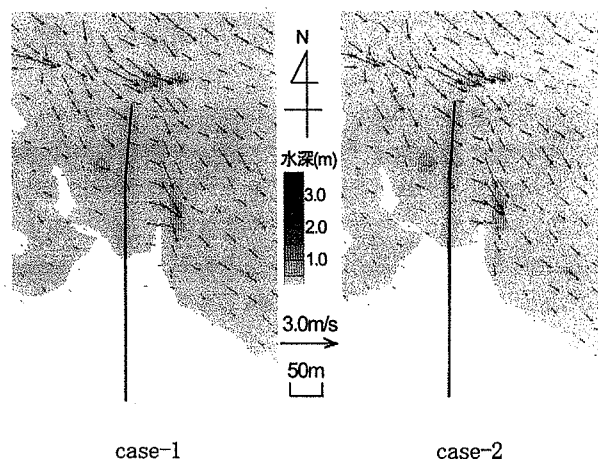


図-11 排水管渠付近の水深および流速ベクトル図
(破堤1時間後)

いて、両ケースで違いはみられず、この用水路は氾濫水の挙動に影響を及ぼしていないと考えられる。しかし、本解析モデルでは、幅5m未満の用水路を流れる水と地表を流れる水との相互作用を節点における流量の受け渡しのみで表現しており、双方の流速・水深の相互作用は考慮していない。そのため、本解析結果から幅の小さい用水路が氾濫水の挙動に影響を与えないとは断定できない。

(3) 排水管渠が氾濫水の挙動に与える影響

図-11に、排水管渠付近のcase-1、case-2における破堤1時間後の水深および流速ベクトル図を示す。図中の実線は、排水管渠を示す。この図から、水深・流速ベクトルともに両ケースで違いがみられず、排水管渠が氾濫水の挙動にほとんど影響を与えていないことがわかる。なお、他の排水管渠付近でも同様の結果となった。本研究で考慮した排水管渠は、雨水排水のために敷設されたものであり、許容流量が小さい。そのため、排水管渠内

の流量が氾濫流量に対して小さく、排水管渠が氾濫水の挙動にあまり影響を与えなかったと考えられる。よって、本解析領域において排水管渠を考慮する必要性は低いといえる。

4. おわりに

本研究では、農業用水路・排水管渠が氾濫水の挙動に与える影響をみるために、農業用水路・排水管渠が数多く存在する長野市北部を対象領域とし、それらを考慮する場合としない場合について氾濫解析を行った。その結果、農業用水路・雨水排水用の排水管渠が氾濫水全体の挙動に与える影響は小さいが、幅の大きい農業用水路はそのごく近傍において氾濫水の挙動に影響を与えることがわかった。そのため、ハザードマップ作成時や避難場所の選定時には、農業用水路の存在を考慮する必要があるといえる。

今後の課題を以下に記す。

1. 本研究で用いたモデルでは、幅5m未満の農業用水路を流れる水と地表を流れる水との相互作用を適確に表現できない。氾濫水の挙動に対して、幅5m以上の用水路による影響が小さいことを考えると、幅5m未満の用水路による影響は無視できるほど小さいことが予想される。しかし、氾濫流量や用水路の位置などの条件によっては影響が大きくなる可能性もあるため、幅5m未満の用水路の取り扱い方法を検討し、その影響を正確に捉えてみる必要がある。
2. 外水氾濫発生時には、流域内において降水量がかなり多いことが予想されるため、農業用水路付近における内水氾濫の危険性がある。しかし、本研究において、降雨の影響を簡易的に取り扱ったため、農業用水路における内水氾濫の様子を適確に表現できなかった。そのため今後、流出解析を用いて降雨の影響をより正確に考慮する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、長野市から排水管渠の資料を提供していただきました。また、本解析モデルの一部に本学大学院修了生である倉地勇二氏（現新潟県）

が作成したものを使わせていただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川池健司, 丸山寛起, 吉本静磨, 野口正人: 諫早低平地における氾濫解析とその浸水被害軽減策への応用に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp. 565-570, 2005.
- 2) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井勉, 竹内典久: 複雑な地下空間の浸水実験, 水工学論文集, 第48巻, pp. 583-588, 2004.
- 3) 関根正人, 河上展久: 都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析, 水工学論文集, 第49巻, pp. 595-600, 2005.
- 4) 武田誠, 松尾直規, 山中威士, 森田豊: 総合的な氾濫解析システムの構築に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp. 613-618, 2005.
- 5) 富所五郎, 谷川勝彦, 松本明人: 標高を解とした解適合格子用いた有限要素氾濫解析, 水工学論文集, 第46巻, pp. 361-366, 2002.
- 6) 倉地勇二, 島田ゆり, 富所五郎, 豊田政史: 数値地図を活用し土地利用を詳細に表した非構造格子を用いた氾濫解析, 平成14年度研究発表会講演概要集, 土木学会中部支部, II-9, pp. 167-168, 2003.
- 7) 八木剛, 島田ゆり, 岩佐隆広, 富所五郎, 豊田政史: 数値情報を利用した洪水氾濫解析のための非構造格子の作成, 平成15年度研究発表会講演概要集, 土木学会中部支部, II-24, pp. 169-170, 2004.
- 8) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>), L03-09M-20-02.0.zip. (平成9年, 長野)
- 9) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第45巻, pp. 895-900, 2001.
- 10) 武田誠: 高潮の氾濫解析とその都市域への応用に関する研究, 京都大学博士論文, pp. 106-119, 1996.
- 11) 松浦茂樹, 小栗幸雄: 親水活動にとって魅力的な砂州及びその周辺の物理的条件, 土木技術資料, 第28巻, 第11号, pp. 567-572, 1986.

(2005. 4. 7 受付)