下水道解析を考慮した h-VA氾濫解析モデルに関する検討

STUDY ON H-VA INUNDATION ANALYSIS MODEL CONSIDERING SEWER ANALYSIS

武田 誠¹・松尾直規² Makoto TAKEDA and Naoki MATSUO

¹正会員 博士(工) 中部大学准教授 工学部都市建設工学科(〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200) ²フェロー 工学博士 中部大学教授 工学部都市建設工学科(〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

Inundation analysis methods are widely used and have presented effective information in the examination of measurement for water disaster. However, further improvements of them in precision and the effectiveness of analysis are now desired. Recently, the detailed ground elevation data are obtained for development of the survey technology. As the usual analysis method treats average ground elevation and average water depth in the analysis grid, the detailed ground level data has not be yet used effectively. Authors have examined the h-VA inundation analysis method under various conditions. This new analysis method considered the characteristics of ground elevation in analysis grid. Until now, the characteristics of h-VA inundation analysis method are evaluated and nesting model with h-VA inundation analysis has been developed. In this study, the h-VA inundation analysis model, along with sewer system analysis and nesting model, is examined and the validity of this analysis model is shown.

Key Words: H-VA inundation analysis method, Sewer system analysis, Nesting model, Numerical simulation

1. はじめに

氾濫解析は水災対策を検討するツールとして重要な役 割を担う. 詳細な氾濫状況を再現し、貯留施設や避難シ ステムなどの浸水対策を検討するためには、道路や排水 路、下水道システムなどの水理を十分に表現する必要が あり、精緻な氾濫解析モデルが要求される. しかし、計 算容量, 計算時間が多大となることから, 多数の計算条 件を要する実務では、道路網、構造物形状を表現するま での小さい格子スケールが採用できないのが実情であろ う. したがって、氾濫解析に用いられる格子スケールは 50m~100mのものが一般的である¹⁾. 一方, レーザープ ロファイラーなどの測量技術の発展により, 平面方向 2.5m毎に0.15mの精度を持つ地盤高データが整備される ようになってきた. このような地盤高データを氾濫解析 に取り入れる場合、50m~100mの幅を持った格子の平均 地盤高を求めるために使用されることが多く、詳細な地 盤高データが十分に生かされていない状況にある.

また、地盤高データを直接格子に与える詳細な解析の 研究事例²⁾も報告されているが、一般には解析範囲が狭 くなることから境界条件の設定が課題となり,広い解析 範囲を適用すれば、多大な計算時間が課題となる.

ところで、危険度の高い水災の事例として、地下街、地下鉄などの地下空間への浸水があり、戸田・石垣・馬場ら³)、関根ら⁴)によって、水理現象の解明から危険度評価まで、高度かつ有益な研究成果が得られている。しかし、地下施設の入り口付近の水理現象は数mスケールであり、地下浸水解析との接続を行う場合には、氾濫解析において、このようなスケールの分解能を想定する必要がある。さらに、浸水時の道路などの危険度評価を実施するためにも数mの格子スケールは必要であろう。

著者らは、格子スケールを小さくするという観点では無く、格子の中の地盤高の影響を考慮する氾濫解析法 (h-VA氾濫解析法)を提案し、その解析法の特性を検討している^{5/6}. さらに、h-VA氾濫解析法では、格子内の詳細な地盤高特性を解析に反映することから、ある程度粗い格子を用いた解析でも浸水位が適切に表現できる.この利点を活かし、氾濫解析におけるネスティングモデルを構築し、その有効性を示している⁶. h-VA氾濫解析法を用いたネスティングモデルは、検討対象領域に詳細

なスケールを持つ格子を配置し解析することが可能であるので、前述した地下浸水の解析と矛盾無く接続できることが期待される.

本研究では、これまで構築されているh-VA氾濫解析法およびそのネスティングモデルを基礎とし、それらのモデルに下水道解析モデルを導入することで、「下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル」「下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル(ネスティングモデル)」を構築し、その有用性を議論している.

2. 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル

(1) h-VA氾濫解析法の概要

h-VA氾濫解析法では、以下の仮定を設ける.

A)格子内に流入した水は格子内の地盤高の低い方へ瞬時 に流れ、連続式の未知量は水深ではなく水量とする.

B)運動方程式において、移流項、粘性項は大きな影響を 与えず省略できると仮定し、流量を未知量とする.

ここで、A)の仮定は、格子を一つのポンドにみなしたことに対応している。また、氾濫水の流れの解析には、簡単化のため、圧力項(重力項)と底面摩擦項が大きな影響を与えるとみなし、移流項、粘性項を省略して用いた。

これら二つの仮定を考慮し、連続式の本来の意味である「入ってきた正味の流量は氾濫水の体積の時間変化に等しい」という式と、流量を未知量として取り扱った移流項、粘性項を無視した運動方程式を本解析モデルの基礎式とする。それぞれの式を以下に示す。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = (Q_{x1} - Q_{x2}) + (Q_{y1} - Q_{y2}) \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -gA_x \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 Q_x \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$
 (2)

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -gA_y \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 Q_y \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$
 (3)

ここで,V は格子内の水量, Q_x,Q_y はそれぞれx,y 方向の流量($Q_x = uA_x,Q_y = vA_y$), A_x,A_y はそれぞれぞれぞれ Q_x,Q_y が定義されている箇所のx,y 方向の流水断面積,H は水位である.解析法の詳細については,紙面の都合上,武田ら 50 を参考にしていただきたい.本計算手法は,得られた格子内最大水深から水位を求め,格子内で水位が一定であると仮定して,地盤高を引くことにより,詳細な浸水深を求めることが出来る.

なお、移流項、粘性項を無視した影響は、破堤箇所近 傍で生じているものの、破堤箇所から離れたところでは 現れておらず⁶⁰、本解析における浸水の様子からも、上 記の仮定は問題ないと考えている。

(2) 下水道解析の概要

下水管の解析では、以下の連続式とエネルギー方程式を用いる.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{g n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0$$
 (5)
ここで、 A は流水断面積、 Q は流量、 q は横流入量、

u は流速(=Q/A), h は水深, g は重力加速度, θ は河床勾配, n はマニングの粗度係数, R は径深, x は距離, t は時間である。下水管内は、開水路流れと管路流れが共存する場となるので、スロットモデルを適用し、スロット幅の決定には、 gA_S/C^2 (g は重力加速度, A_S は管の断面積, C は波速であり、20m/Sを仮定)を用

 A_S は管の断面積、C は波速であり、20m/sを仮定)を用いている.

マンホールの水位は、つぎの連続式で求めている.

$$A_{m} \frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q + Q_{in} - Q_{out} \tag{6}$$

ここに、 A_m はマンホールの面積(水位が地盤高よりも高い場合は氾濫格子の面積)、H は水位、 $\sum Q$ はマンホールにつながっている下水道管からの正味の流入流量、 Q_{in} は氾濫格子からの流入流量($KLh\sqrt{gh}: K$ は流量係数(0.554)、L はマンホールの円周、h は浸水深)、 Q_{out} はポンプが存在する場合の流出流量である.

著者らは、氾濫域から下水道への落ち込み流量の評価について検討している⁷⁸が、ここでは、マンホールが開いているとした一般的な落ち込み流量の算出法を用いている。なお、下水道の解析モデルの詳細は、松尾ら⁷、武田ら⁸を参考にしていただきたい。

(3) h-VA氾濫解析法と下水道モデルの水の受け渡し

本研究における落ち込み流量の決定には、上記のように段落ち式を用いており、その式には浸水深が用いられる. h-VA氾濫解析モデルでは、格子内の最低地盤高における浸水深が求められるので、その値から格子内一定と仮定する水位を求め、マンホール高(マンホールにおける地盤高)を差し引くことで、マンホールにおける浸水深を求め、落ち込み流量を算出している。したがって、本取り扱いの場合、格子内にある複数のマンホールの落ち込み流量は、マンホール高に応じて異なる。さらに、個々のマンホールで計算される流入・流出分の水量を用いて、氾濫格子の連続式で求められる水量を補正しており、補正水量とh-V関係から得られる水深(水位)を用いてマンホールの水深とそれに接する下水管断面の水深を補正している。

(4) 計算条件

本研究では、名古屋市内の下水道処理区の地盤勾配が緩やかな箇所を対象に、破堤の条件を用いて検討した.5m毎の地盤高データから10m格子(格子内平均地盤高、格子数:357個×550個)を設置し、平面二次元不定流モデル(以後、従来モデルとする)を用いた。本研究では、

この解析結果を真値とする.また,50m格子(格子内平均地盤高,格子数:71個×110個)を用いた従来モデル,50m格子(格子内最低地盤高,格子数:71個×110個)のh-VA氾濫解析モデルを用い,それぞれの比較を行った.解析モデルには,(2)で示した下水道解析が含まれている.表-1に解析条件をまとめて示す.さらに,図-1に計算条件に対応する計算領域を示す.なお,本研究では,図-1の赤色の破堤箇所において,図-2の仮想的な流入流量を与え,ポンプ排水および自然排水は考慮していない.

(5) 計算結果および考察

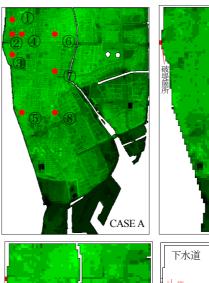
まず、本研究の基礎となるCASE Aにおける浸水深の 分布の時間変化を図-3に示す. 本図から, 計算開始1時 間後には、破堤箇所からの浸水の広がりがみられると共 に、下水道からの噴き出しによる道路に沿った浸水もみ られる. 計算開始2時間後の浸水状況にも, 地表面を流 れて伝わる氾濫水の広がりの他に、下水道からの噴き出 しによる浸水が遠方に拡がっている。したがって、破堤 に伴う浸水が生じた場合には、下水道ネットワークの状 況や地盤高の状況から、地表面の流れよりも先に遠方で 噴き出し、浸水が生じることも十分に考えられる. 実際 には、破堤による浸水が生じる前に、内水氾濫が生じる 場合が多く同一の条件とはならないが、この点は破堤に 伴う浸水時の避難における注意すべき点であるといえる. 本研究で想定した計算条件は、実際の浸水の事例ではな いため、十分な計算結果の妥当性評価は難しい. 本研究 の目的が、「粗い格子を用いた解析で、如何に細かい格 子を用いた解析に近づくことができるか」にあることか ら、このCASE Aの結果を真値と見なし、議論を進める.

図-4にそれぞれの計算結果の最大浸水深を示す. なお, 比較のために, 武田らの研究ので示された, CASE Aと同様の計算領域および計算条件の下での下水道解析を考慮しない氾濫解析の結果を「CASE O」として, 図-4に示す. まず, CASE AとCASE Oの比較から, 下水道システムの有無により,全体の浸水の傾向は変化が無いものの, CASE Aの方が下水道を通じてより遠方に浸水が生じていることが分かる. なお, CASE AはCASE Oに比べて破堤箇所近傍の浸水が大きくなっている. 氾濫水が下水道管へ入り, 再び破堤近傍の管へ流れ込んで噴き出し,浸水深を増大させた可能性はあるが,この原因については,今後十分に検討を進める必要がある.

つぎに、CASE BとCASE Aを比べれば、CASE Bは 50m格子および従来モデルによる解析であるので、解析 の分解能が粗く、CASE Aでみられた道路に沿った浸水 が現れていない。さらに、CASE Bの方がより広域に浸水が生じていることも分かる。また、CASE CとCASE Aを比べれば、h-VA氾濫解析モデルであるCASE Cは、50m格子を用いているにも関わらず、道路に沿った浸水が表現されている。さらに、最大浸水深の分布や下水道に伴う遠方への浸水の様子など、CASE Cの結果はCASE

表-1 計算条件

CASE A	CASE B	CASE C	
従来モデル	従来モデル	h-VA氾濫解析モデル	
10m格子 (格子内平均地盤高)	50m格子 (格子内平均地盤高)	50m格子 (格子内最低地盤高)	



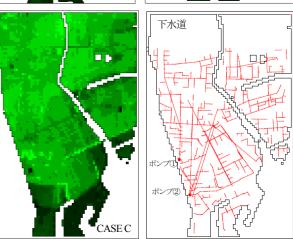


図-1 計算領域

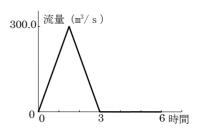


図-2 破堤箇所の流入流量

Aの結果と一致している.

CASE Cでは、マンホールの水位がマンホール高(本研究では、CASE Aのマンホールに対応する地盤高)よりも高い場合に、氾濫格子へ下水道水が噴き出すとしている。一方、CASE Bは、格子内平均地盤高よりもマンホールの水位が高い場合に下水道水が噴き出すとしている。CASE Bの格子内平均地盤高がCASE Aのマンホール高よりも低いことで、CASE Aよりも多量に氾濫格子へ

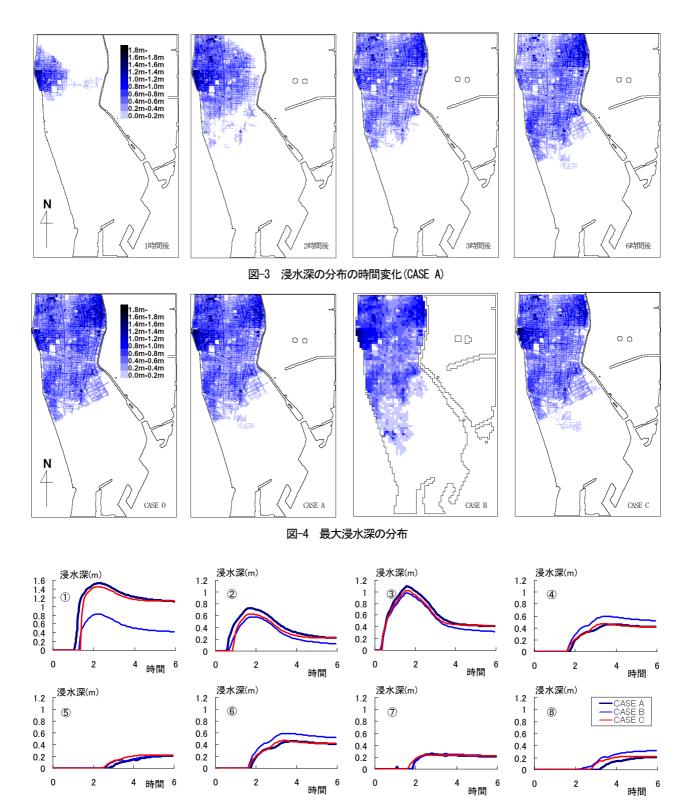


図-5 浸水深の時間変化

つぎに、図-1のCASE Aに示した① \sim ⑧における浸水深の時間変化を図-5に示す。本図から、CASE BはCASE Aと一致しないものが多いが、CASE CはCASE Aと同様の浸水深の変化を示しており、一致するものも多く見られる。さらに、破堤箇所に近い①、②、③では、CASE

水が噴き出し、それが拡がったものと考えられる.

CとCAES Aの浸水深のピーク値が一致していないが、 CASE Cが格子内地盤高の分布特性を計算に反映させて いることから、4時間後以降では、CASE Cのすべての結果がCAES Aと一致している.

図-6に、CASE Cによる浸水深の分布の時間変化を示す。本図と図-3を比較すると、CASE Cの方が若干浸水が拡がっているが、ほとんど一致している結果となった。

これらのことから、「下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル」は50m格子を用いた解析であったが、10m格子の結果と同程度の精度を有しており、下水道解析を

含めたh-VA氾濫解析モデルの妥当性が示された.

3. 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル (ネスティングモデル)

(1) 氾濫解析におけるネスティングモデル

格子内の地盤高特性を反映し、水位を適切に解析できるh-VA氾濫解析法の利点を活用し、広領域にh-VA氾濫解析法を、狭領域に平面二次元不定流モデル(従来モデルとする)を適用し、その間を接続させるネスティングモデルを開発した⁶. 本研究では、その解析モデルを基礎として、下水道解析およびネスティングモデルを考慮したh-VA氾濫解析モデルの構築を試みた。ネスティングモデルの概要は、以下のとおりである。

接続1:運動方程式を計算した後で、大領域から小領域へ単位幅流量を受け渡す。まず、大領域の流量受け渡し断面の水位と小領域の地盤高から水深を求める。 大領域の流量を小領域の流量に配分する場合には、マニング則を用い、水深の5/3乗をその配分に用いた。 得られた小領域の格子の流量を格子幅で割って単位幅流量を求めた。

接続2:連続式を計算した後で、小領域から大領域へ水量を受け渡す。大領域の格子内に存在する小領域の格子の水量を総和し、大領域の格子の水量とした。

(2) ネスティングモデルと下水道モデルの水の受け渡し

ネスティングモデルと下水道解析の関係のイメージを 図-7に示す。ここでの氾濫域と下水道との水の受け渡し は2.(3)と同様の取り扱いを行っており、領域の違いを 考慮したマンホールと氾濫格子との対応関係を新たに設 けて、氾濫格子からマンホールへの落ち込み流量やマン ホールから氾濫格子への噴き出し流量を算出している。

(3) 計算条件

図-8のように、50m格子の広領域(格子内最低地盤高、格子数:71個×110個)と10m格子の狭領域(格子内平均地盤高、60個×230個)を配置した。図-8の赤色の箇所から図-2の仮想的な流入流量を与え、ポンプ排水、自然排水は考慮していない。以後、本解析をCASEDとする。

(4) 計算結果および考察

図-9に最大浸水深の分布を、図-10に浸水深の分布の時間変化を示す。図-9と図-4から、CASE Dの結果は、CASE A、CASE Cとほぼ同様の結果とみなせる。さらに、図-10の結果も、CASE A、CASE Cの浸水の時間変化とほぼ同様となっており、モデルの妥当性が示された。

図-11は、狭領域における浸水深の時間変化である。 本図から、道路に沿った浸水の様子が確認できる。本研究では、狭領域に10m格子を配置したが、地盤高の情報が入手できれば、さらに細かい格子を設置することも可

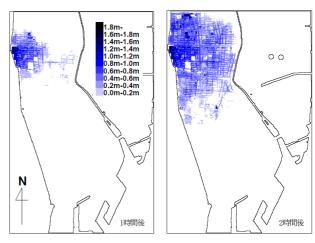


図-6 浸水深の分布の時間変化(CASE C)

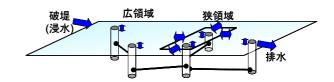


図-7 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル (ネスティングモデル)

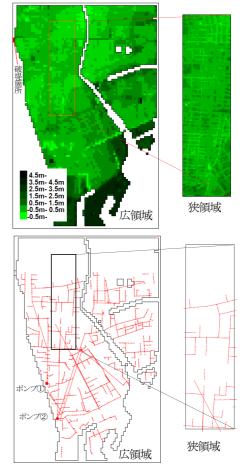
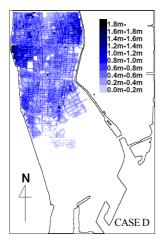
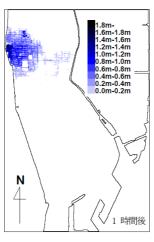
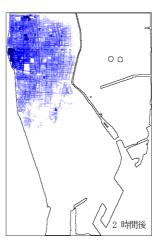


図-8 計算領域 (CASE D)

能であり、例えば、地下街への入り口付近の詳細な解析 も矛盾無く実施できることが期待される.







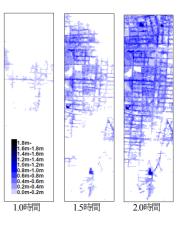


図-9 最大浸水深の分布

図-10 浸水深の分布の時間変化(CASE D)

図-11 浸水深の分布(狭領域)

表-2 計算時間(分)

4. 計算時間に関する検討

表-2に計算に要した実時間を示す.使用したコンピュータにより計算時間は異なるので、その比率をみてみれば、CASE Aと同精度であったCASE Cは、CAES Aの約25.6倍の計算速度となり、下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデルは、計算速度の観点からも非常に有用であると言える。さらにCASE DはCASE Aの約2.6倍の計算速度となり、その有用性は高いものと推察される.

5. おわりに

本研究で得られた成果は、以下のようである.

- 1) 氾濫解析における格子スケールの問題について言及 し、特に、地下空間の浸水のスケールとハザード マップや治水施設の評価に用いられる格子スケール の違いに触れ、氾濫解析におけるネスティングモデ ルの利点について述べた.
- 2) 著者らが検討しているh-VA氾濫解析法およびその ネスティングモデルを基礎とし、それらに下水道解 析を組み込んだ解析モデルを構築した.
- 3) 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデルは,50m 格子を用いた場合でも,真値と見なした10m格子を 用いた解析結果(CASEA)と同程度の精度を有し ていることを確認した.さらに,格子内平均地盤高 を用いた従来モデルでは,浸水が大きく広がること, 破堤などの大規模な浸水では,下水管を通じて地表 面流れよりも早く遠方で噴き出す可能性を示した.
- 4) ネスティングモデルを考慮したh-VA氾濫解析モデル (CASE D) の最大浸水深の分布および浸水深の分布の時間変化は、CASE Aと同様な結果を示したことから、モデルの妥当性が示された.
- 5) 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデル(CASE C)の計算速度は、本研究の場合、真値とするCASE

CASE A	CASE B	CASE C	CASE D
487	14	19	184

Aの約26倍にもなった. さらに、狭領域の氾濫水理を詳細に解析するネスティングモデル (CASE D) の計算速度もCASE Aの約2.6倍となった. これらのことから、両モデルの有用性が示された.

参考文献

- 1)浸水想定区域図作成マニュアル:国土交通省河川局治水課, 平成17年6月.
- 2)椿涼太,藤田一朗,岡部健士:航空レーザー測量を用いた高 解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析,土木学会論文集B, Vol.62, No.1, pp.41-52, 2006.
- 3)大西良純,石垣泰輔,馬場康之,戸田圭一:地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用,水工学論文集,第52巻,pp.841-846,2008.
- 4)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,595-600,2005.
- 5)武田誠,小寺大輔,松尾直規:格子内の地盤高特性を考慮した簡便な氾濫解析法に関する研究,水工学論文集,第52巻,pp.853-858,2008.
- 6)武田誠, 松尾直規, ポカレルパラメソル: h-VA氾濫解析法を 用いたネスティングモデルに関する検討, 水工学論文集 第 53巻, pp.835-840, 2009.
- 7)松尾直規, 武田誠:都市域における氾濫解析システムの適用 と下水道流入モデルに関する検討,河川技術論文集第12巻, pp.97-102,2006.
- 8)武田誠,山中威士,霧生元道,松尾直規:都市内水氾濫解析における複雑な下水道管網のモデル化に関する検討,河川技術論文集第15巻,pp.393-398,2009.

(2009.9.30受付)