

降雨流出・洪水氾濫解析モデルの地中流の再現精度の検証

九州工業大学工学部 学生会員 田中 博登・九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲・学生会員 伊藤 翔吾

1. はじめに

近年、想定を超えた豪雨による水害が頻発しており、流域治水に代表される流域レベルでの危機管理対策の策定が課題である。流域全体での河川への流入を把握するには、地表面流だけでなく地中流の挙動の把握が不可欠である。実流域での地中流の検証は、河川流量や地下水のピエゾ水頭のデータが限定されるため、数値解析モデルの検証のためのデータとしては十分ではなく、そのため、降雨流出・洪水氾濫解析モデルの地中流の再現性については、十分に検証されているわけではない^{1),2)}。本研究は、以上を踏まえ、地中流の室内実験を実施し、水位や流量の測定結果に基づき同モデルの再現精度を検証したものである。

2. 実験の概要

図-1に示す実験装置を用いて、地中流の実験を実施した。幅0.40m、勾配1/20の水路に粒径3.08mmの細礫を厚さ0.22mで敷き詰め、土層の上下流端には砂留めを設置して形状変化が起こらないようにした。食紅で着色した水を上流端から流量 $Q=1.12 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ で供給し、流れの先端が土層に達した瞬間を時刻 $t=0\text{s}$ として測定を開始した。流量 Q は $t=1080\text{s}$ まで一定流量 $Q=1.12 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ とし、 $t=1080\text{s}$ でバルブを閉め $Q=0\text{ m}^3/\text{s}$ とした。測定は $t=2160\text{s}$ まで実施した。測定項目は、地中流の流動水深 h_g と下流端流量 Q であり、図-1に示す測定点で、 h_g は側壁から撮影した画像を画像解析することで、流量 Q はバケツで回収した水の重量の経時変化と水温より求められる密度から単位時間当たりの体積を求め算定した。土壌のパラメータである透水係数 K_a 、空隙率 λ_e は、事前に実施した土質試験結果に基づき算出した。表-1に、土層に関する実験条件を示す。

3. 解析の概要

解析には降雨流出・洪水氾濫解析モデル²⁾を用いた、同モデルは降雨流出と洪水氾濫解析を一体的に解析するモデルである。同モデルは、地表面流をDynamic Waveモデルで、地中流をDiffusion Waveモデルで取り扱い、地表面と地中での水のやり取りは、土壌への浸透と土壌からの滲出流量で考慮される。本研究では、降雨流出・洪水氾濫解析モデルの地中流モデルについて検証を実施した。地中流モデルの基礎方程式は、式(1)に示す自由水面地下水流の連続の式と式(2)に示す飽和不飽和流れを考慮した流量流積関数式である。地中流の数値解析手法には、有限体積法と中心差分を用いた。数値解析法の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。

本解析では、 $d_c=0$ としてマトリックス部を無視し、1層のみの地層を考慮した。土層への流入流量は、上流端での湧き出しとして単位面積当りの流量を与えた。流入流量ハイドログラフは、増水時は事前に計測した流量ハイドログラフから、減水時は土層上流の水位ハイドログラフから波形を仮定し、図-2のように設定した。解析対象領域を1120個の三角セルで分割した。解析は、表-1の K_a 、 λ_e の実測値を用いた再現解析(Run5)と、 K_a 、 λ_e を15%程度変化させた解析(Run1~4, 6~9)を行い、その感度解析を実施した。表-2に解析条件を示す。

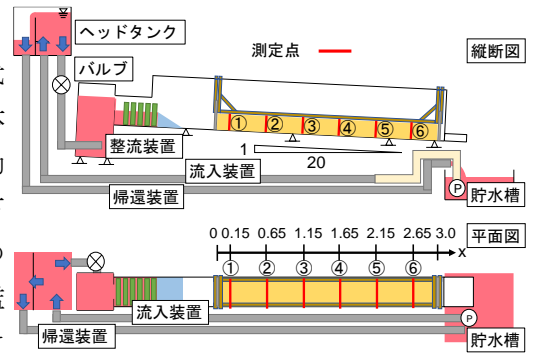


図-1 実験装置図

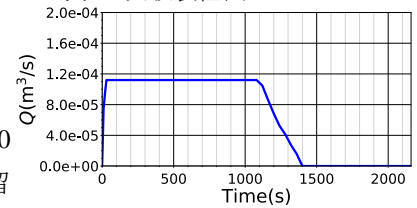


図-2 流入流量ハイドログラフ

表-1 実験条件

Parameter	λ_e	$K_a(\text{m/s})$	$d(\text{mm})$	S_{0x}	$D(\text{m})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
Exp.	0.457	0.0578	3.08	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$

表-2 解析条件

Parameter	λ_e	$K_a(\text{m/s})$	$d(\text{mm})$	S_{0x}	$D(\text{m})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$	
Comp.	Run1	0.411	0.0491	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run2	0.411	0.0578	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run3	0.411	0.0664	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run4	0.457	0.0491	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run5	0.457	0.0578	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run6	0.457	0.0664	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run7	0.503	0.0491	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run8	0.503	0.0578	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$
	Run9	0.503	0.0664	0.308	1/20	0.22	$1.12\text{e-}04$

$$\lambda_e \frac{\partial h_G}{\partial t} + \frac{\partial q_{Gx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Gy}}{\partial y} = f_i - q_s \quad (1)$$

$$q_{Gx} = \theta \cdot \frac{\partial H}{\partial x}; q_{Gy} = \theta \cdot \frac{\partial H}{\partial y}$$

$$\theta = \begin{cases} -K_c \cdot h_G \cdot (h_G d_c)^\beta & (0 \leq h_G \leq d_c) \\ -\{K_c \cdot d_c + K_a \cdot (h + h_G - d_c)\} & (d_c < h_G) \end{cases} \quad (2)$$

λ_e : 有効空隙率, q_{Gx} , q_{Gy} : 方向の単位幅流量, f_i : 土壌への単位面積当たりの浸透流量, q_s : 土壌からの単位面積当たりの滲出流量, H : 水位(= $h+h_e+Z$), $K_c=K_a/\beta$, K_a : 重力水が卓越するA層内の飽和透水係数, β : 重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比, h_G : 地下水の流動水深, d_c : マトリックス部の最大水分量を水深で表した値

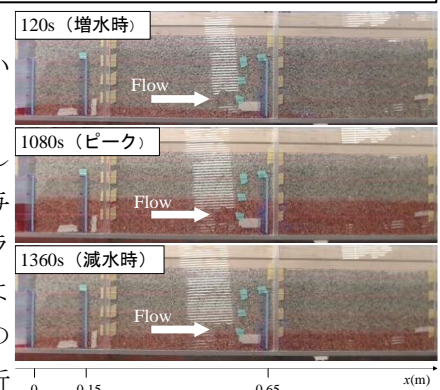


図-3 地中流の流況写真

4. 結果と考察

図-3に地中流の流況写真の経時変化を、図-4にRun5の水面形の経時変化の解析結果を示す。ここに、 H_g は地中流の水位である。図中には、実測値から K_a を15%減少させ、 λ_e を10%減少させたRun1の解析結果もあわせて示している。図-3より、通水後、地中に浸透した水が時間の経過とともに下流に浸透し、地中水深が上昇した後、 $Q=0\text{m}^3/\text{s}$ とした $t=1080\text{s}$ 以降、水深が低下する様子が確認できる。図-3と図-4を比較すると、解析結果は、図-3に示すような地中流の挙動を定性的に再現していることが確認できる。また、解析結果と実験値とを比較すると、Run5の水面形は、ピーク時の水位を過小に評価しているものの、全体的に水面形の再現精度が高いこと、一方で、Run1の水面形はピーク水位を再現しているものの、増水時、減水時は水位を過大評価していること、などが確認できる。地中流の全体的な再現精度はRun5が高く、ピーク水位の再現精度はRun1が高いことを踏まえると、実土壌パラメータと土質試験のパラメータの間には、10%程度のずれがあると考えられる。図-5にRun1とRun5の流量ハイドログラムを示す。これより、Run1と5の流量ハイドログラムは概ね一致すること、実験結果と比較すると、解析結果は、減水時の流量低減が遅く若干のずれが確認できる。これは、解析では地中流が減水しdry状態となる場合に特別な取り扱いをしておらず、非常に小さい水深を与えて解析しているため、水の供給が実験に比べ長い時間続いたためと考えられる。ただし、解析と実験結果との流量の絶対誤差は $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、その差は非常に小さい。このように、降雨流出・洪水氾濫解析モデルは、地中流を再現可能であることが確認できる。

図-6、図-7に、流量と水位ハイドログラムの感度解析結果を示す。これらより、(1)同一の空隙率 λ_e で比較した場合(Run1~3, 4~6, 7~9)、透水係数 K_a を大きくすると、流量 Q や地中流水位 H_g の立ち上がりが早くなること、(2)同一の透水係数 K_a で比較した場合(Run1・4・7, Run2・5・8, Run3・6・9)、空隙率 λ_e を大きくすると、流量 Q や地中流水位 H_g の立ち上がりが遅くなること、が確認できる。また、 K_a , λ_e の組み合わせが異なるRun1, 5, 9を比較すると、図-6の流量ハイドログラムは概ね一致しているものの、地中水位には差異が生じることが確認できる。このことは、 λ_e , K_a のパラメータ値の推定には、流量あるいは水位の一方のデータだけでなく、両データに基づき行う必要があることを示唆している。また、多くのRunで減水時の流量を過大に評価している。これは地中流のdry-wetの遷移状態での取り扱いが十分ではないためと考えられる。パラメータの推定方法や地中流のdry-wetの遷移の取り扱いについては、今後の検討が必要である。

5. おわりに

本研究では降雨流出・洪水氾濫解析モデルの地中流の再現精度について、実験結果に基づき検証した。その結果、本モデルは、(1)地中流の水位や流量の経時変化を再現できること、(2)感度解析の結果、 K_a , λ_e の組み合わせにより流量と水位の解析結果のレスポンスが異なり、このことを踏まえたパラメータ推定が必要になること、などが確認された。

謝辞: 本研究を実施するに当たり、科学研究費基盤研究(C)(課題番号: 21K04277, 研究代表者: 重枝未玲)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献: 1)重枝ら: 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp. I_1303-I_1308, 2019. 2)重枝ら: 河川技術論文集, 第27巻, pp.93-98, 2021.

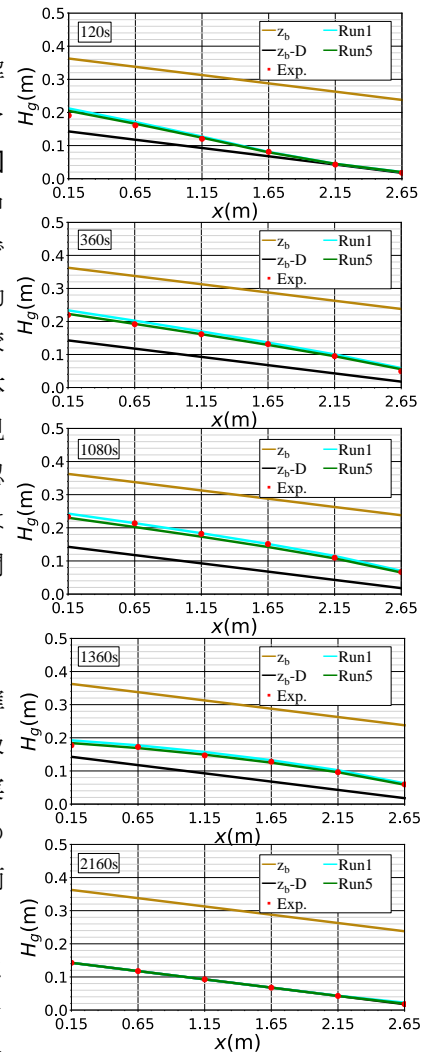


図-4 水面形の経時変化

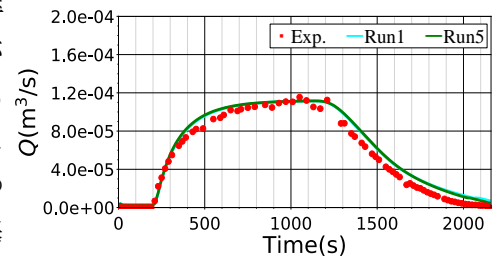


図-5 流量ハイドログラム

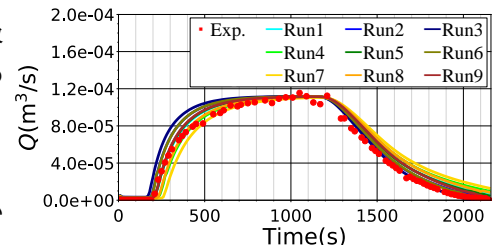


図-6 流量ハイドログラムの感度解析

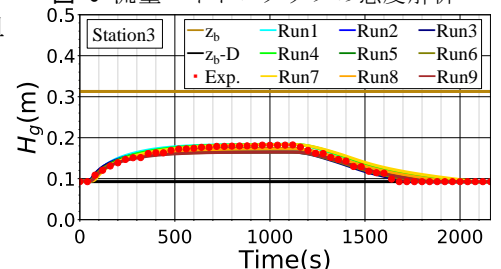


図-7 水位ハイドログラムの感度解析