

一次元カラム実験装置を用いた吸水及び水位上昇過程への

大気-地表水-地下水連成数値解析の適用性の検証

Application of a numerical simulation coupled with atmospheric flow, surface flow and ground water flow to a column experiment with drainage and imbibition

平嶋智希<sup>1</sup>, 石川雄大<sup>2</sup>, 日比義彦<sup>3</sup>, 守村融<sup>4</sup>

1 名城大学大学院理工学部 193434006@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学大学院理工学部

3 名城大学理工学部

4 八千代エンジニアリング

## 概 要

以前に日比と守村らは、洪水時における越流前の遊水池内の水位上昇を大気-地表水-地下水連成数値解析手法(ASG 法)を用いて再現した。さらに、著者らは、以前に不飽和状態の 0.8mm ガラスビーズが詰まったカラムを鉛直に設置し、カラム下端より水をガラスビーズ上端から 45cm の高さまで注入した。また、この水位上昇実験を ASG 法で再現した結果、実験結果と解析結果の飽和度と地表水の水位上昇の経時変化はほぼ一致した。本研究では、さらに詳細な ASG 法の解析精度を求めるために一次元カラム実験装置下端より排水を行う水位低下試験と、それに続けてカラム下端より水を注入する水位上昇実験を行った。さらに、この実験の排水過程から吸水過程へ連続した解析を行った。その結果水位低下については再現性を確保できたが、水位上昇及び飽和度の経時変化については課題が残る結果となった。

キーワード：混相流 カラム実験 飽和度型支配方程式 地下水浸透 表面水

## 1. はじめに

近年、地球温暖化の影響によって異常気象が発生し、大きな災害が多く起きている。わが国の河川では地形特性上、大雨が降った際に洪水が発生しやすくなっている。実例として、2015 年 9 月 10 日に台風によって鬼怒川流域に長時間豪雨が降り続けた結果、発生した河川の氾濫が挙げられる。この影響で鬼怒川に設置されていた堤防が破壊され、甚大な被害が生じてしまった。そのため、河川などの水位上昇を予測できる解析が必要となっている。

以前に日比と守村ら<sup>1)</sup>は、洪水時における越流前の遊水池内の水位上昇を大気-地表水-地下水連成数値解析手法(ASG 法)<sup>2)</sup>を用いて再現した。さらに、著者らは、不飽和状態の 0.8mm ガラスビーズが詰まったカラムを鉛直に設置し、水を一次元カラム実験装置下端より注入する、水位上昇実験を実施した。また、その水位上昇実験を ASG 法で再現した<sup>3)</sup>。その結果、実験結果と解析結果の体積含水率と地表水の水位上昇の経時変化はほぼ一致した。今回は一次元カラム実験装置下端より排水を行う水位低下実験と、それに続けてカラム下端より水を注入する水位上昇実験を行った。その実験の排水過程から吸水過程までを連続した解析で行い、水位変動と飽和度の経時変化の実験結果との比較を行った。

## 2. 大気-地表水-地下水連成数値解析手法(ASG 法)

ASG 法とは地表水と大気流れに加え、地盤中の地下水の流れと水の飽和度の変化を取り扱うことができる数値解析手法である。ASG 法では、地表水及び大気の流れに以下の式(1)と(2)の Navier-Stokes の式と質量保存の式を使用する。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{V} - \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{V}$ 、 $\mu$ 、 $p$ 、 $\rho$ は流体の速度ベクトル、粘性係数、圧力、密度であり、 $t$ は時間、 $\mathbf{g}$ は上向きを正とした場合の重力加速度である。また、地盤の水とガスの支配方程式は以下の式(3)、(4)のようにそれぞれ表すことができる。

$$\frac{\partial \{\Phi S_{rw} + [1 - (S_{rw} + S_{rg})] \Phi S_w\}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) k_s (\nabla p_w + \rho_w g \nabla z) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \{\Phi S_{rg} + [1 - (S_{rw} + S_{rg})] \Phi S_g\}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{K_{rg}}{\mu_g} \right) k_s (\nabla p_g + \rho_g g \nabla z) \right] \quad (4)$$

ここで、 $\Phi$ は間隙率、 $S_{rw}$ 、 $S_{rg}$ はそれぞれ水とガスの残留飽和度、 $S_w$ 、 $S_g$ はそれぞれ水とガスの有効飽和度、 $K_{rw}$ 、 $K_{rg}$ はそれぞれ水相とガス相の相対透過度、 $K_s$ は固有透過度である。これらの式を連成させて、数値解析を行う。



### 3. 実験方法

排水過程と吸水過程の連続した解析を行った際の ASG 法の解析精度の検証を行うために今回の実験では 0.8mm ガラスビーズに対し、図 1 と図 2 に示すような一次元カラム実験装置を用いて、水位低下実験及び水位上昇実験を行った。また、水位低下実験及び水位上昇実験の設定水位を表 1 に示す。使用したカラムの内径は 50mm、長さは 1556mm である。今回の実験では間隙率が 0.345 となるようにカラム下端より 56mm から 1056mm の高さまで 50mm ごとに 0.8mm ガラスビーズ(粒度範囲：0.71~0.99mm、密度 2.5g/cm<sup>3</sup>)を詰めた。土試料中の体積含水率の経時変化を計測するため、土壌水分センサー(デカゴン社、EC-5、測定範囲 0~100%，精度±3%)とデータロガー(デカゴン社、Em5b、容量 49k)を使用した。土壌水分センサーはカラム下端より 256mm、456mm、656mm、856mm の位置にポリシールUK-液性水膨張弾性シール材(スリーボンドユニコム株式会社、酸化カルシウム)を使用してカラムに取り付けられた。

水位低下実験ではカラム下端に水位一定装置を繋ぎ、カラム内の水位と水位一定装置の水位の水頭差を利用することで水を排水させて実験を行った。また、吸水実験ではカラム下端とマリOTTタンクを繋ぎ、カラム内の初期水位とマリOTTタンクの設定水位に水頭差を設け、吸水を行った。カラム内の土試料より上部の地表水の水位低下は目視のみ、水位上昇は目視及び動画撮影(株式会社 JVC ケンウッド製の Everio ハイビジョンメモリームービー、64GB 搭載)によって記録した。今回の実験はカラム内部からの排水、または、カラム内部への吸水が終了するまでそれぞれの段階で実験及び撮影を続けた。さらに、土壌水分センサーを使用し、カラム内部での体積含水率を計測し、水の飽和度の経時変化を求めた。

表 1 実験時のカラム下端からの設定水位

水位低下実験	水位上昇実験
35.6cm	15.6cm
→15.6cm	→35.6cm
→5.6cm	→150.6cm

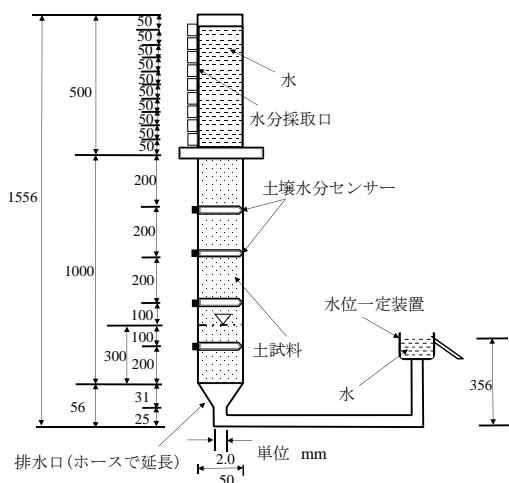


図 1 水位低下実験装置概略図

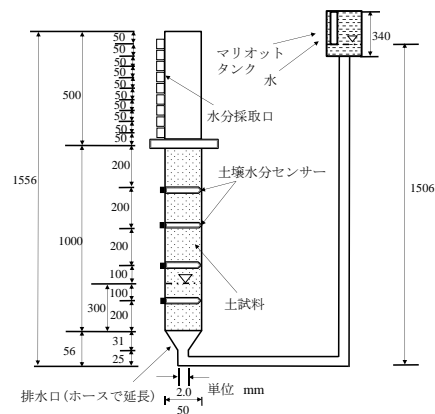


図 2 水位上昇実験装置概略図

### 4. 解析条件

今回の水位低下実験及び水位上昇実験については、図3のような軸対象座標での解析を行った。解析領域は節点総数が3672、要素数が3055であった。解析の際の初期条件と境界条件はカラム上端での統合圧力を0.0kPaとした。また、カラム下端での統合圧力とそれぞれの段階での解析時間は表2のように変化させた。流速はカラム上端と下端ではx方向の流速を0とした。また、カラム右側の境界のy=5.6cm以下ではx方向、y方向の流速を共に0とし、y=5.6cm以上ではx方向の流速のみを0とした。左側の境界では全ての高さでx方向の流速のみを0とした。ガス圧力と水圧の初期値は水位がカラム下端より1506mmとなる静圧または静水圧とした。また、流速の初期値を0.0とした。今回の解析で使用した土試料の物理特性を表3に示す。今回の解析で使用した固有透過度は、水位低下実験結果から得られた水位変動を用いて変水位透水試験のデータ方法で求められた。また、排水時と吸水時の連続した解析では同じ固有透過度を使用し、水分特性曲線のみを変えた。解析に使用した水分特性曲線は以下の式(5)の van Genuchten の式を用いた<sup>4)</sup>。ここで  $P_c$  は水圧と空気圧の差から求められる毛管圧とし、 $\alpha$  と  $\beta$  は van Genuchten パラメータであり、 $\gamma=1-1/\beta$  となる。

$$S_e = (1 + |\alpha P_c|^\beta)^{-\gamma} \quad (5)$$

水とガスの有効飽和度  $S_e$  と  $S_w$  の関係は以下の式(6)となり、水とガスの残留飽和度をそれぞれ  $S_{rw}$ 、 $S_{rg}$  とした。

$$S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rg}} \quad (6)$$

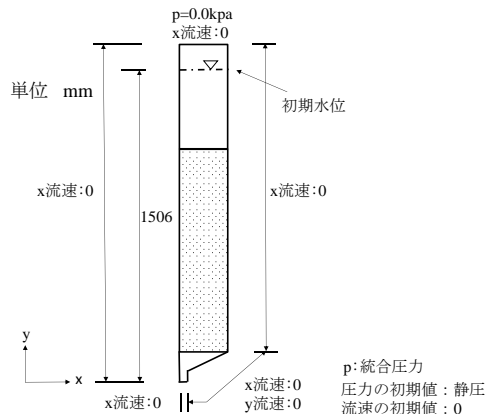


図 3 解析の境界条件と初期条件



表 2 カラム下端での段階ごとの統合圧力の設定圧力と  
圧力変動開始時間

排水過程	吸水過程
0.356kPa(1000s)	0.156(2000s)
→0.156kPa(2000s)	→0.356(2000s)
→0.056kPa(2000s)	→1.506(3600s)

表 3 0.8mm ガラスビーズの物理特性

パラメータ	排水過程	吸水過程
固有透過度( $m^2$ )	2.092e-10	2.092e-10
間隙率	0.345	0.345
$\alpha$ ( $kPa^{-1}$ )	1.8393	1.5226
$\beta$	4.2915	8.850
水の残留飽和度	0.192	0.213
ガスの残留飽和度	0.015	0.070

## 5. 実験結果と解析結果の比較

図 4 に排水過程の 0.8mm ガラスビーズの解析結果と実験結果の地表水水位の経時変化を示す。図 4 より実験開始から土試料の上端に至るまでの実験結果と解析結果の経時変化は、ほぼ一致した。このため、排水過程においては ASG 法により、0.8mm ガラスビーズの表面水中の水位低下を再現できた。

図 5～図 8 には 4 箇所の高さにおける飽和度の経時変化を示す。カラム下端からの高さ 85.6cm と高さ 65.6cm については実験結果と解析結果の飽和度の減少する速度はほぼ同じだったが、実験結果の残留飽和度の方が解析結果より低くなった。カラム下端からの高さ 45.6cm については水位低下開始から最初の 10000 秒程度までは実験結果と解析結果の飽和度が同じ推移をしたが、二段階目の水位低下に移ると実験結果の飽和度が解析結果より低くなった。カラム下端から高さ 25.6cm についても同様に、水位低下開始から 10000 秒ほどまでは実験結果と解析結果が同じ推移をしているが、10000 秒を超えたあたりから実験結果と解析結果にずれが生じ徐々に実験結果の飽和度が解析結果より低くなった。

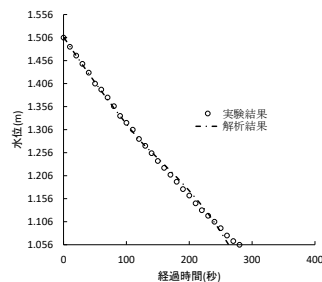


図 4 排水過程の地表水水位の経時変化

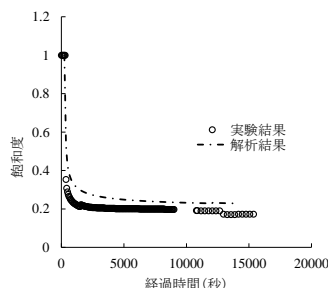


図 5 排水過程の飽和度の経時変化(85.6cm)

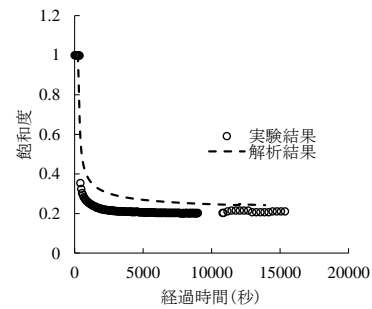


図 6 排水過程の飽和度の経時変化(65.6cm)

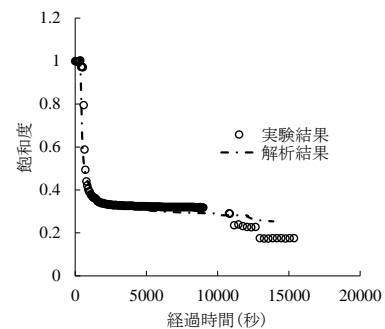


図 7 排水過程の飽和度の経時変化(45.6cm)

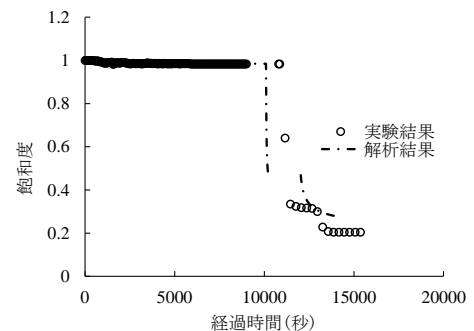


図 8 排水過程の飽和度の経時変化(25.6cm)

図 9 に吸水過程の 0.8mm ガラスビーズの解析結果と実験結果の地表水水位の経時変化を示す。水位上昇開始から 4000 秒付近で土試料上端より水がはじめてから、解析結果と実験結果の地表水水位の経時変化は一致せず、解析結果の水位上昇速度が実験結果を上回っていた。図 9 では吸水過程の水位変動から求めた固有透過度ではなく、排水過程の水位変動から得られた固有透過度を使用したため、解析結果の方が実験結果よりも早く水位が上昇したと考えられる。また、図 10 にカラム下端より 35.6cm の高さに初期水位を設定した吸水過程の地表水水位の経時変化図を示す。図 10 では吸水過程の水位変動より得られた固有透過度を使用しており、図 9 とは逆に実験結果の水位上昇が解析結果を上回った。図 10 の実験結果と解析結果の水位変動は図 9 よりも両者の乖離が少ないことが分かる。このことより連続で解析する際にも排水過程と吸水過程で固有透過度を変えて解析する必要がある。

図 11～図 14 には 4 箇所の高さにおける 0.8mm ガラスビーズの解析結果と実験結果の吸水過程の飽和度の経時変化を示す。カラム下端より高さ 85.6cm と高さ 65.6cm では、どちらの結果も開始から 4000 秒程度で飽和度が上昇し始めており、最終的な飽和度は同じとなった。ただし、



排水過程から吸水過程の解析を連続で行ったため、排水過程の最後の飽和度が実験結果と解析結果でずれた。高さ 45.6cm の位置では水位上昇試験の際に土壌水分センサー付近に空気が封入したと推察される。そのため実験結果の飽和度が十分に上昇しなかったと考えられる。高さ 25.6cm の位置での解析結果と実験結果の最後の飽和度は一致していたが、実験結果の飽和度の上昇が 4000 秒付近からに対して、解析結果の飽和度の上昇が 2000 秒付近から始めていることからあきらかにずれが生じていた。

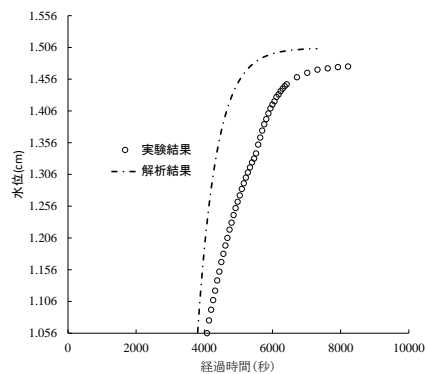


図 9 吸水過程の地表水水位の経時変化

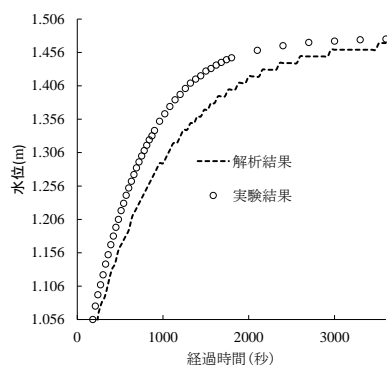


図 10 吸水過程のみの地表水水位の経時変化

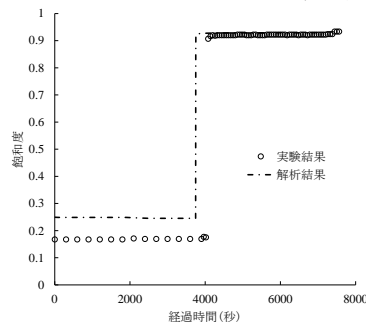


図 11 吸水過程の飽和度の経時変化(85.6cm)

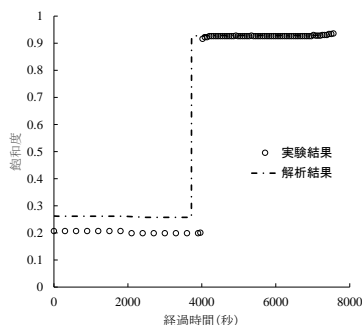


図 12 吸水過程の飽和度の経時変化(65.6cm)

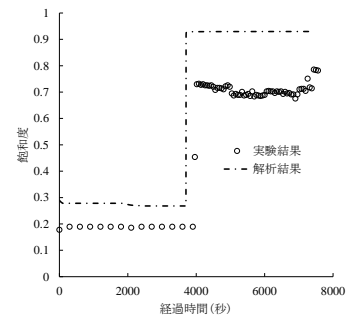


図 13 吸水過程の飽和度の経時変化(45.6cm)

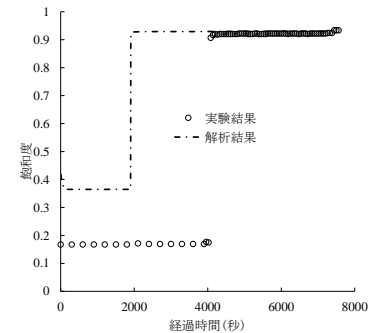


図 14 吸水過程の飽和度の経時変化(25.6cm)

## 6. まとめ

今回の一次元カラム実験装置を使用した実験結果とそれをシミュレーションした結果を比較した結果、0.8mm ガラスビーズの排水過程の地表水水位の経時変化を ASG 法によって再現することが分かった。しかし、吸水過程での飽和度の経時変化では実験結果と解析結果にずれが若干生じてしまい、十分な精度で再現することができなかった。このため、解析精度の上昇が今後の課題である。また、排水過程から吸水過程への連続した解析の場合、同一の固有透過度を使用すると、あとから実施した吸水過程で実験結果と解析結果にずれが生じるため、吸水過程と排水過程では各々の実験の水位変動を用いて得られた固有透過度を使用して解析を行う必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 井川直之、守村融、保坂幸一、富樫聡、日比義彦：遊水池への地下水湛水が洪水調節に及ぼす影響評価に関する解析的研究、日本地下水学会秋季講演会(2017)
- 2) Yoshihiko HIBI、Akira TOMIGASHI：A numerical simulation model for a coupled porous medium and surface fluid system with multiphase flow 地下水学会誌、60 巻第 4 号、pp409-434(2018)
- 3) 平嶋智希、石川雄大、日比義彦、守村融：1 次元カラムを用いた水位上昇時の大気-地面水-地下水連成数値解析手法の検証、日本地下水学会春季講演会、pp26-29(2019)
- 4) Van Genuchten M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 1980 Vol.44 No.5 pp.892-898. (1980)