

堤体浸透問題に関する大気-地表水-地下水連成数値解析手法(ASGMF 法)の精度の検証

名城大学 学生会員 ○石川 雄大
 名城大学 学生会員 平嶋 智希
 名城大学 正会員 日比 義彦

1. はじめに

現在地球温暖化の影響により気候の変動が見られ、日本では大雨の増加に伴い洪水、堤防の決壊が多く発生している。日比、守村ら¹⁾は、洪水時における越流前の遊水地内の水位上昇を大気-地表水-地下水連成数値解析手法(ASGMF 法)を用いて再現した。しかし、その精度の検証は行われていない。

本研究では2次元水槽内に堤防を構築し、堤防左側から水を浸透させ堤防内を水が浸透の様子を観察した。この実験結果をASGMF法を用いて再現し、両者の結果を比較する事により精度の検証を行った。

2. 実験方法

本研究で使用した2次元水槽を図1に示す。

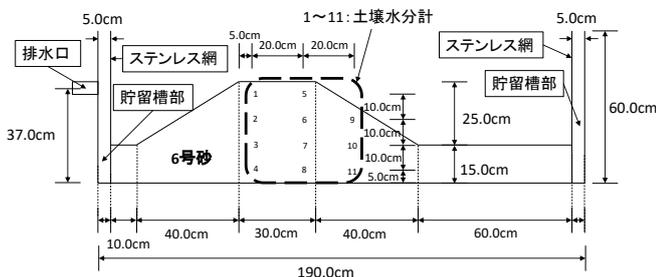


図1 実験装置

図1の水槽両端から5.0cmに設置されたステンレス網の間に、6号砂(密度2.65g/cm³、粒径0.1mm-0.4mm)により高さ15.0cmの基礎地盤と高さ25.0cm、基礎幅110.0cm、天端幅30.0cmの堤体を構築した。左側貯留槽では高さ37.0cmの箇所に排水口を設け、左側貯留槽の水位が一定となるようにした。基礎地盤と堤体を構築する際には、6号砂とその質量の6%の水を均等に混合し、間隙率n=0.5となるように層厚5.0cm毎に8層に分けて土試料を水槽内に投入し、各層においてランマーを用いて締固めた。実験開始時に左側貯留槽上部からホースを使用して実験開始後80秒で水位が37.0cmとなるように水を左側貯留槽に注入した。実験開始後左右貯留槽の水位を5分毎、堤防内の浸潤面の様子をビデオカメラで記録した。また、飽和度を測定するためデカゴ

ン社製の土壌水分計(体積含水率測定範囲0%~100%、精度:±3%但しキャリブレーション時は±1~2%)を水槽背面から設置した。

3. 解析手法

本解析で用いるASGMF法では地表水と大気と地盤中の流れに加え、地盤中の飽和度を扱うことが出来る。表面水及び大気中のガスの流れには圧力を求める式(1)と流速を求める式(2)を適用した。

$$(\Delta t / \rho) \nabla \cdot (\nabla p_{t+\Delta t} + \rho \vec{g}) = \nabla \cdot V^* \quad (1)$$

$$V_{t+\Delta t} - (\mu / \rho) \Delta t \nabla^2 V_{t+\Delta t} = V^* - (\Delta t / \rho) (\nabla p_{t+\Delta t} + \rho \vec{g}) \quad (2)$$

tは時間、Δtは時間増分、ρは流体の密度、V_{t+Δt}とp_{t+Δt}は時間t+Δtにおける流体の流速と圧力、gは重力加速度ベクトルである。またμは流体の粘性係数である。R_iを節点iにおける位置ベクトルとし、流速ベクトルV*は位置ベクトルR_i-V_{t+Δt}Δtにおける流速となる。大気と地表水より構成される地表面システム中の流体の体積に対する水の体積の比を密度関数S_{wi}とし、位置ベクトルR_i-V_{t+Δt}Δtにおける密度関数をS_{wi}*とすると、時間t+Δtにおける密度関数は式(3)の様に求めることが出来る。

$$S_{wi,t+\Delta t} = S_{wi}^* \quad (3)$$

土試料中の流れに関してグローバル圧力Pは水圧p_w、ガス圧p_gと毛管圧p_{cgw}とすると式(4)の様に求めることが出来る。

$$P = f_w p_w + f_g p_g - \int_{S_w} p_{cgw} (df_g / dS_w) dS_w \quad (4)$$

K_{rw}とK_{rg}は固有透過度k_sに対する水相とガス相の相対透過度、μ_wとμ_gは水とガスの粘性係数であり、これらを用いてλ_w = K_{rw}/μ_w、λ_g = K_{rg}/μ_g、λ = λ_w + λ_gとし、f_w = λ_w/λ、f_g = λ_g/λと定義する。

土試料中の水とガスの流れのグローバル圧力PをDarcyの法則と質量保存則より式(5)のように求めることが出来る。

$$\partial \Phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) \vec{g}] \quad (5)$$

Φ は間隙率、 ρ_w と ρ_g は水とガスの密度である。

$p_{t+\Delta t}$ 土試料中の水の飽和度 S_w は式(6)より算出される。

$$\partial S_w / \partial t + V_{soil} \cdot \nabla S_w = \nabla \cdot (D_{soil} \nabla S_w) \tag{6}$$

ここで V_{soil} と D_{soil} は以下のようになる。

$$V_{soil} = -[V_t(df_g/dS_w) - k_s(\rho_g - \rho_w)g(d\lambda/dS_w)]/\Phi \tag{7}$$

$$D_{soil} = [-\kappa k_s(dp_{cgw}/dS_w)]/\Phi \tag{8}$$

$$\kappa = K_{rg}K_{rw}/(\mu_g K_{rw} + \mu_w K_{rg}) \tag{9}$$

V_t は合計流速、 Φ は間隙率を表す。

4. 解析条件

本解析では実験装置を図2のようにモデル化した。

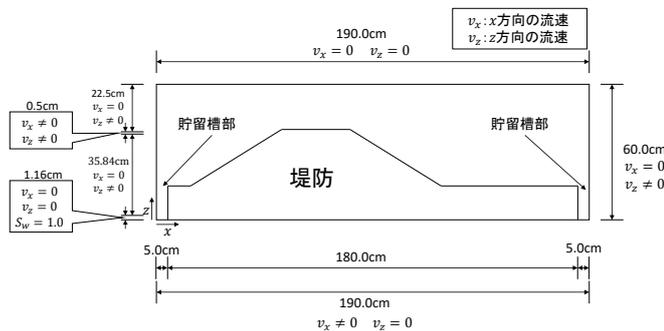


図2 解析モデル

本解析で使用する解析モデルは、解析モデルの左右の境界から幅 5.0cm の範囲を貯留槽とした。境界条件については図2に示す。水槽左側の境界条件では水槽の底から、ホースの内径相当の高さまでの区間で水が注入されるものとした。なお、解析開始 80 秒後に左側貯留槽の水位が 37.0cm となるようにこの区間で水圧を経時変化させた。初期状態の流体の圧力は水位以下で静水圧、水位以上で水槽の上端(高さ 60.0cm)でガス圧が 0 とする静圧とした。解析モデルを節点数 93313 と要素数 92920 で分割し、堤防の固有透過度は別途実験で算出した $4.218 \times 10^{-11} \text{m}^2$ 、間隙率は 0.498 とし、実験中に測定し得られた室温、水温から算出した水の密度 $8.94 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$ 、ガスの密度 $1.80 \times 10^{-8} \text{g/cm}^3$

とした。本研究で用いた水分特性曲線を図3に示す。図3は本実験にて水頭法で求めた。

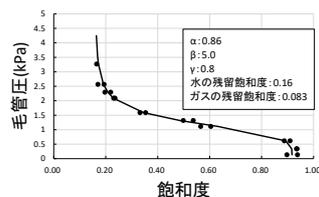


図3 水分特性曲線

5. 結果

経過時間 500 秒、1500 秒の実験結果と解析結果の浸潤面の位置を図4と図5に示す。図4と5に示す

実線は解析の飽和度 0.1 の位置を示す。また、図1に示す土壌水分計9と10の実験結果と解析結果の飽和度の経時変化を図6に示す。

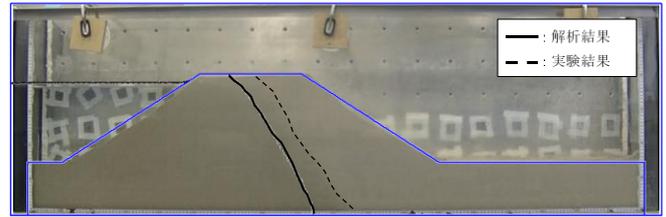


図4 経過時間 500 秒

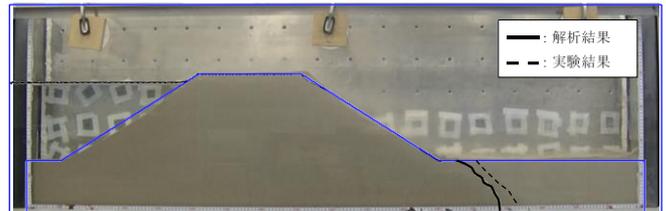


図5 経過時間 1500 秒

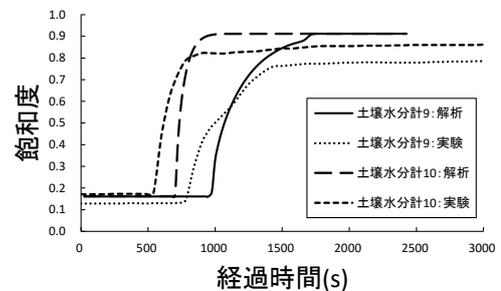


図6 飽和度の経時変化

図4と図5によると実験結果は解析結果より若干水の浸透が早い、ほぼ両者が一致したと判断出来る。また、図6より飽和度の経時変化についても、必ずしも一致しなかったが概ね解析結果は実験を再現していると判断出来る。従って、ASGMF法は概ね堤体への浸透問題を解析する事が出来ることが分かった。

6. まとめ

本研究では堤防浸透実験を ASGMF 法により再現することにより精度の検証を行った。実験結果と解析結果を比較した結果、概ね一致したことから堤防への浸透問題に ASGMF 法を適用することが出来る。

参考文献

- 1) 日比義彦、守村融、保坂幸一、富樫聡：ASG法を用いた遊水地内の水位上昇のシミュレーション、日本地下水学会 2018 年春季講演会予稿、pp2-5