

01. ASG 法を用いた遊水地内の水位上昇のシミュレーション

○日比義彦（名城大学）

守村 融（八千代エンジニアリング）・保坂幸一（同）・富樫 聡（産総研）

1. はじめに

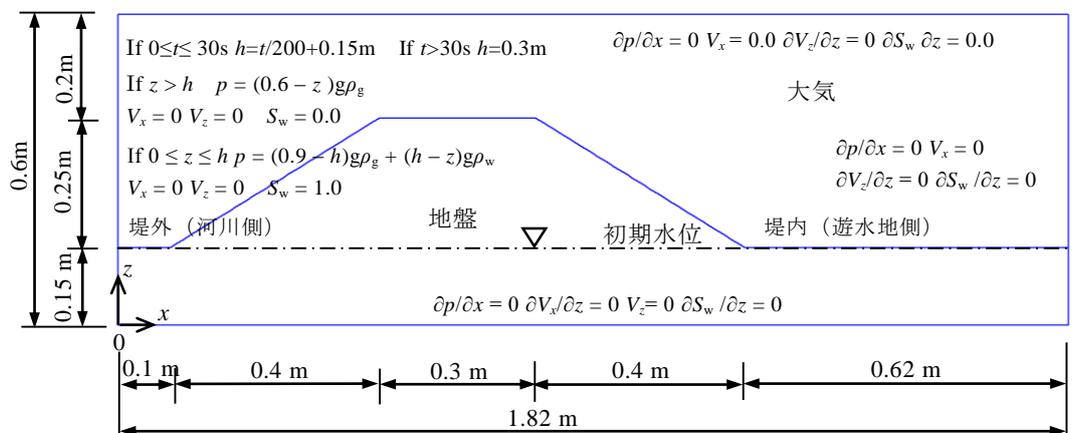
国内では、台風または集中豪雨に伴う洪水により河川堤防の決壊などによる氾濫・水害が毎年生じている¹⁾。このような堤防の破堤を防ぐために、荒川調節池または田中調節池などのような調節池または遊水地（以下、遊水地と称す）がこれまでに多く整備されてきた。洪水時に河川水を遊水地に流すことにより河川流量を調整して河川水位の上昇を抑えて河川堤防の破堤を防ぐことが遊水地の設置目的となる。

しかし、遊水地の底面の土質が礫質土のような透水性がよい地盤の場合には、河川水位が上昇した際に、河川水が遊水地へ越流する前に、河川水が調節池または遊水地の底面より遊水地内へ流出して、遊水地の貯水能力を低下させる可能性がある。そこで、本研究では、河川水位が上昇した際に、遊水地内（堤内）の水位がどのように上昇し、かつ、堤体と基礎地盤がどのような保水状態になるかを、6種類の堤体と基礎地盤の土質について数値解析により求めた。なお、数値解析は大気-表面水-地下水連成数値解析手法(以下、ASG法と称す)^{2),3)}を用いた。

2. 数値解析手法

今回の数値解析では、表面水の水位上昇と流れに加え、地盤中の地下水の流れと水の飽和度の変化を取り扱う必要がある。そこで、これらの現象を取り扱える数値解析手法であるASG法を用いた数値解析プログラム `gsflow2d-cip-ves-tras-poten629-fullcip-v` を本研究で用いた。ASG法では、大気の流れに Navier-Stokes の式と質量保存の法則を適用し、CIPを用いたセミ・ラグランジェ法と後退差分法を用いた分離法により Navier-Stokes の式と質量保存の法則を定式化した。また、液体と気体の2相流体の界面（密度関数）の追跡については、Navier-Stokes の式と質量保存の法則の非混合流体モデルと、CIPを用いたセミ・ラグランジェ法を適用した。地下水については、ダルシーの法則と不飽和特性を考慮した質量の法則より誘導される飽和型支配方程式を用いた。地下水の飽和型支配方程式は水の飽和度を未知変数とする移流拡散方程式となり、移流に関する流速と拡散に相当する拡散係数を流体全体の圧力であるグロ

和型支配方程式は水の飽和度を未知変数とする移流拡散方程式となり、移流に関する流速と拡散に相当する拡散係数を流体全体の圧力であるグロ



p : 圧力、 V_x : x 方向の流速、 V_z : z 方向の流速、 S_w : 密度関数または水の飽和度
 t : 経過時間、 h : 水位、 g : 重力加速度、 ρ_g : ガスの密度、 ρ_w : 水の密度

図-1 数値解析モデル、境界条件と初期条件

ーバル圧力の勾配と不飽和特性により求める。地下水の飽和型支配方程式に CIP を用いたセミ・ラグランジュ法を適用すれば、水の飽和度を求めることができる。地下水中の水の飽和度と、表面水ー大気システム中の密度関数は 0 から 1 となり、同じ値の範囲となることより地下水と、表面水ー大気システムで相互に利用できる。従って、地下水と、表面水ー大気システムの境界において圧力の伝達と流速の連続性および流体の出入りが表すことができる。

今回の解析では、土質と堤内の水位上昇の関係の特性を効率よく求めるために、解析領域の大きさを実寸大の大きさではなく、図-1 に示す室内実験の水槽の大きさ相当とした。また、境界条件は、地盤の下端の境界は不透水とし、大気の上端の境界では水平方向の流速を 0 とし、鉛直に流体が流入または流出できるようにした。解析領域の右側の境界では、水平方向の流速を 0 とし、境界沿いに界面が上下できるようにした。また、解析領域の右側の境界では水圧を一定にしていないことより、右側の境界からの流体の流入または流出がなく、遊水地内に水が溜まるようにした。解析境界の左側は、水位または水圧と飽和度または密度関数を既知とし、左側の境界の水位または水圧が上昇することにより堤外側の水位が上昇し、その影響で堤内側の水位が上昇するという解析を本研究では行った。実際には、解析スタート時の左側の水位は解析領域の下端より 15cm の高さとし、30 秒後に堤体の天端高さと同じ、解析領域の下端より 30cm の高さとした。水位より低い個所の水の飽和度を 1.0 とし、水位より高い個所の密度関数を 0.0 とした。初期水位は解析領域下端より 15cm の高さとし、水位以深の飽和度を 1.0 とし、水位より高い密度関数を 0.0 とした。水とガスの初期圧力は静水圧または静圧状態とし、地盤中の初期飽和度は、静水圧状態の水圧と静圧状態のガス圧より毛管圧 p_{cng} を求めて、以下の van Genuchten モデルより水の飽和度 S_w を計算した。

$$S_w = [1 + (\alpha p_{cng})^\beta]^{-\gamma} \quad (1)$$

ここで、 α と β は van Genuchten パラメータであり、 $\gamma = 1 - 1/\beta$ となる。ここでの S_w は一般的に有効飽和度と称し、実際の飽和度 $S_{w-reall}$ は残留飽和度 S_{rw} とガスの残留飽和度 S_{rg} を用いて以下の式により求められる。

$$S_{w-reall} = (1 - S_{rw} - S_{rg}) S_w + S_{rw} \quad (2)$$

また、地盤内のグローバル圧力は、上記の静水圧状態の水圧と静圧状態のガス圧と、以下の Mualem モデルをから求められた水の相対透過度 K_{rw} とガスの相対透過度 K_{rg} を用いて求められた。

$$K_{rw} = S_w^{1/2} [1 - (1 - S_w^{1/\gamma})^\gamma]^2 \quad (3)$$

$$K_{rg} = (1 - S_w)^{1/2} (1 - S_w^{1/\gamma})^{2\gamma} \quad (3)$$

今回の解析では礫質土から砂質土を対象とするので、解析に用いる透過度は $1.0 \times 10^{-10} m^2$ と $1.0 \times 10^{-11} m^2$ とし、水分特性曲線は図-2 と表-1 に示す 3 種類とした。水分

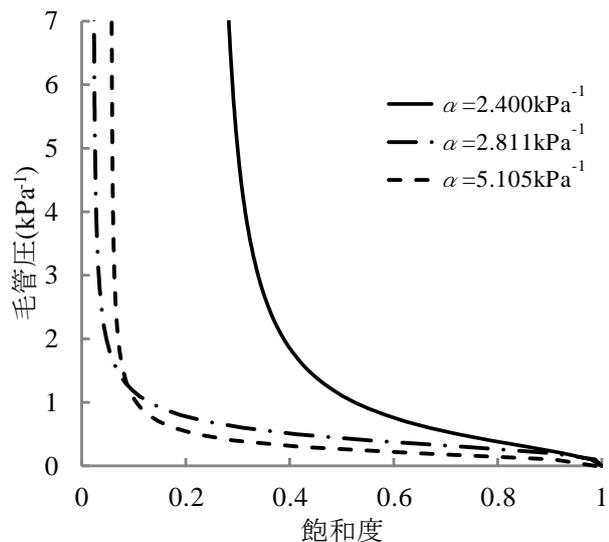


図-2 水分特性曲線

表-1 水分特性曲線の特性値と間隙率

曲線名	α (kPa ⁻¹)	β	S_{rw}	S_{rg}
曲線 $\alpha = 2.400 kPa^{-1}$	2.400	2.035	0.242	0.000
曲線 $\alpha = 2.811 kPa^{-1}$	2.811	3.1081	0.02188	0.000
曲線 $\alpha = 5.105 kPa^{-1}$	5.105	2.8069	0.0562	0.0118

特性曲線については、ガラスビーズ粒径 0.2mm と 4mm について水頭法により求めた吸水過程の曲線を参考にして、堤体の高さ 0.15m で初期状態の飽和度の分布に違いが生じるようにした。本研究では、上記の 2 種類の透過度と水分特性曲線の 6 通りの組み合わせについて ASG 法による解析を行った。

3. 数値解析結果

透過度が $1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ の場合の堤内の水位上昇と地盤内の飽和度の分布を図-3 に、透過度が $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ の場合の堤内の水位上昇と地盤内の飽和度の分布を図-4 に示す。図-3 と図-4 によると、ASG 法を用いた数値解析が中間に地盤などの多孔質体で区切られて溜まっている 2 つの表面水の水位変動を再現できることがわかった。当然であるが、透過度が $1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ の場合の堤内の水位上昇は、水分特性に関わらず、透過度が $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ の場合より速くなった。図-3 によると、透過度が $1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ の場合には、van Genuchten パラメーターの α が小さいほど堤内の水位上昇の速度は速くなった。その際に、堤体内がほぼ飽和され、かつ、堤内外の水位がほぼ等しくなるまでの時間は、 $\alpha = 5.105 \text{kPa}^{-1}$ の場合の方が $\alpha = 2.811 \text{kPa}^{-1}$ の場合より 400 秒以上遅くなった。また、図-4 によると、透過度が $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ の場合には、最も速く堤内の水位が上昇したのは、 $\alpha = 2.400 \text{kPa}^{-1}$ の場合であり、 $\alpha = 2.811 \text{kPa}^{-1}$ の場合および $\alpha = 5.105 \text{kPa}^{-1}$ の場合の堤内の水位上昇の時間は、 $\alpha = 2.400 \text{kPa}^{-1}$ の場合に比べて 4 倍時間がかかった。 $\alpha = 2.811 \text{kPa}^{-1}$ の場合と $\alpha = 5.105 \text{kPa}^{-1}$ の場合の堤内の水位上昇の速度はあまり大差がないが、若干、 $\alpha = 5.105 \text{kPa}^{-1}$ の場合の堤内の水位上昇の方が $\alpha = 2.811 \text{kPa}^{-1}$ の場合より速くなった。 $\alpha = 2.400 \text{kPa}^{-1}$ の場合の堤内の水位上昇が、 $\alpha = 2.811 \text{kPa}^{-1}$ の場合と $\alpha = 5.105 \text{kPa}^{-1}$ の場合より速くなった原因は、初期状態の堤体内の水分状態（飽和度の分布）の違いによると考えられる。

以上のことより、堤外の水位上昇が原因で生じる堤内の水位上昇の速度は、堤体の固有透過度の

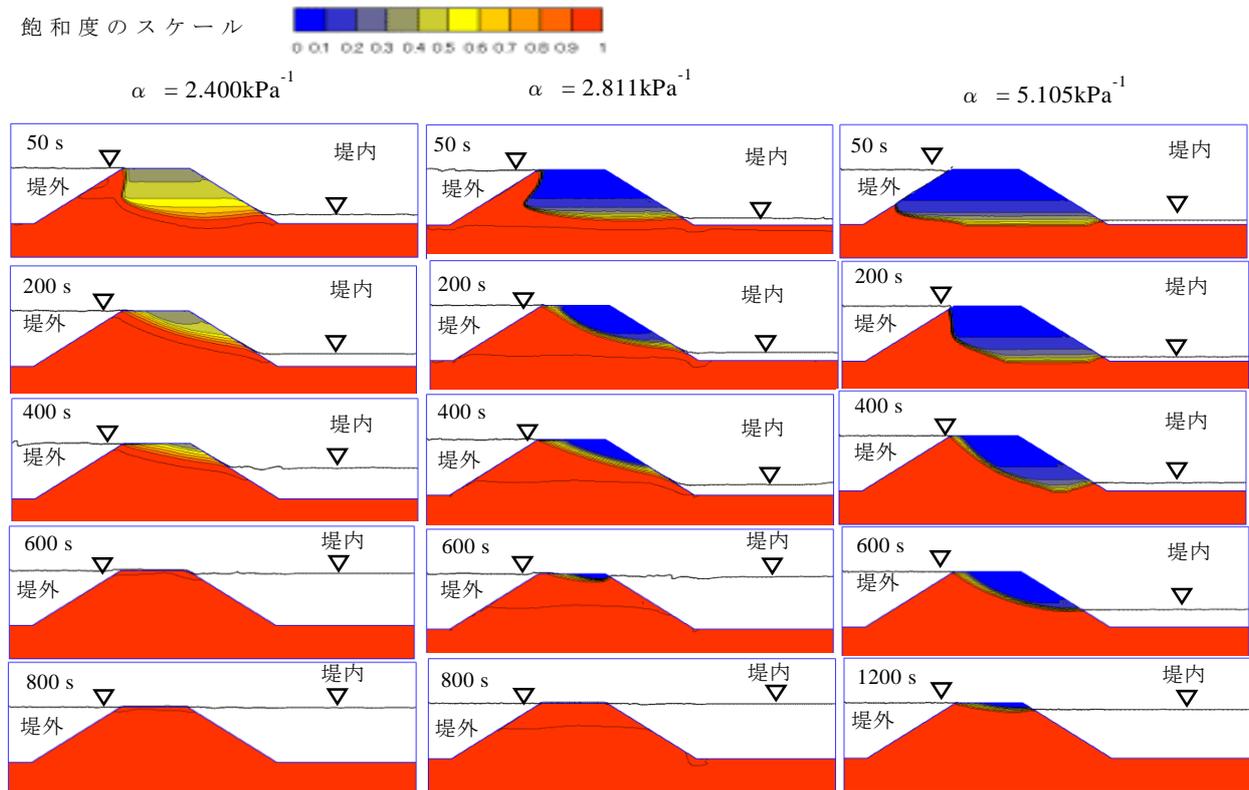


図-3 透過度 $k = 1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ における堤内の水位上昇と地盤内の飽和度の分布

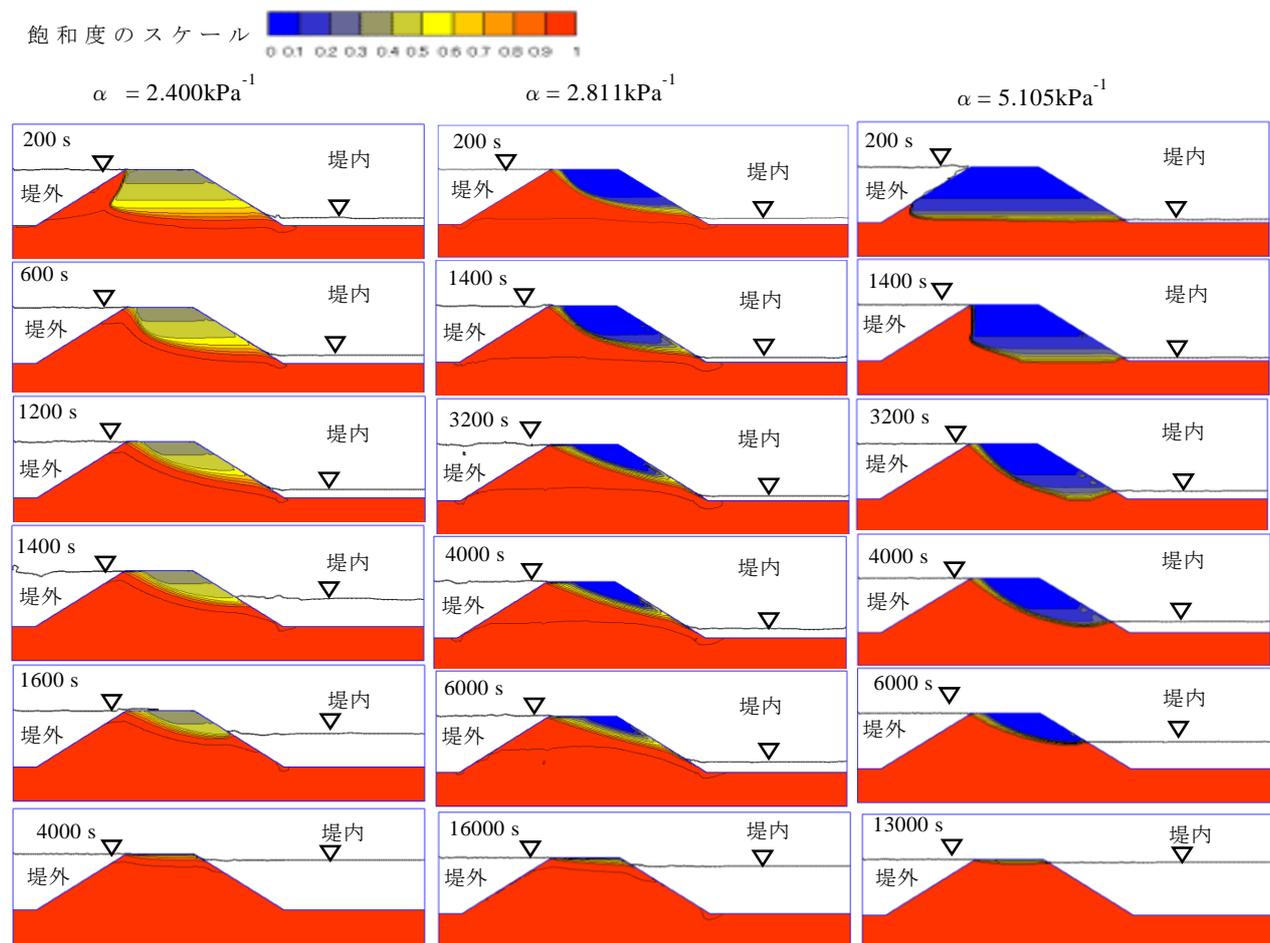


図-4 透過度 $k = 1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ における堤内の水位上昇と地盤内の飽和度の分布

影響を受けることは当然であるが、堤内の水位上昇開始直前の堤体内の水分状態と水分特性の影響も受けることがわかった。従って、固有透過度が同じとした場合には、水分が高い状態を保持できる土質材料の堤体および基礎地盤の場合に、堤内の水位が速く上昇することがわかった。

4. まとめ

本研究の結果より、ASG法を用いた数値解析が中間に地盤などの多孔質体で区切られて溜まっている2つの表面水の水位変動を再現することがわかった。また、堤外の水位上昇が原因で生じる堤内の水位上昇の速度は、堤体の固有透過度の影響のみ受けるのではなく、水位上昇開始直前の堤体内の水分状態と水分特性の影響も受けることが本研究の解析結果よりわかった。

参考文献

- 1) Technical Support Unit of APFM, Integrated Flood Management Case Study Japan (2004): Tokai Heavy Rain (September 2000), The Associate Program on Flood Management, 1-46.
- 2) Hibi, Y., A. Tomigashi and M. Hirose (2015): Evaluation of a Numerical Simulation Model for a System Coupling Atmospheric Gas, Surface Water and Unsaturated or Saturated Porous Medium, Journal of Contaminant Hydrology, 183, 121-134
- 3) 日比義彦, 富樫聡(2017): 複雑な形状の堤体の越流問題への大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法の適用性の検討, 混相流, 31(1), 29-36.