

11. 堤体表面を被覆した場合の越流時の土中ガスの挙動

○井川尚之（八千代エンジニアリング株式会社）・
富樫聡（同）・日比義彦（名城大学）

1. はじめに

我が国の治水対策において河川堤防は、洪水時の人命の保護や住宅などの国民の財産に係る被害を最小化するために重要な役目を果たしている。しかしながら、計画超過洪水が発生した場合や、堤防整備の遅れによる暫定堤防区間、質的に脆弱な堤体区間などのネック箇所が残存する場合には、河川堤防が破堤して人的および経済的に深刻な被害をもたらすことがある。

実際に、平成27年9月関東・東北豪雨では、茨城県常総市域の鬼怒川左岸堤防が破堤して甚大な浸水被害が生じた。その他、平成12年9月東海豪雨でも庄内川や新川などで18箇所の破堤が発生するなど、激甚な被害をもたらす河川の破堤はん濫と浸水被害は、インフラの維持管理の時代とも言える現代においても潜在的なリスクの大きな災害であると考えられる。

ここで、土堤を基本とする河川堤防の破堤原因のうち、74%は越流破堤であるとの報告がある¹⁾。一方で、これまでの平時の堤防管理や堤防強化事業においては、堤体の土質性状調査や堤体浸透流解析結果から評価するパイピングや円弧すべり、また、堤防川表側法尻の洪水流による浸食等に対する安全性照査に基づく対策が主となっており、越流による堤体の破壊は考慮されていない。このような背景を踏まえて、日比・富樫は、新たな堤防管理に役立てることを目的として河川堤防の飽和不飽和浸透流、越流、土中ガスの移動を同時に解く数値解析手法（ASG法）を提案し、実験等によりその精度を検証している²⁾、³⁾。本研究では、ASG法を適用し、いくつかのモデルケースで洪水時の越流・浸透同時解析をおこない、とくに洪水時の堤体内の土中ガスの挙動に着目し、鬼怒川堤防調査委員会でも言及されたエアブロー⁴⁾の発生に関する定量化をおこなった。

2. 越流時の土中ガスの移動機構と数値解析の理論

2.1. エアブロー現象

前期無降雨期間が長く続いた場合の集中豪雨等では、降雨が堤防堤体に浸透するときに、急激な堤体の浸潤化は通常降雨のような不飽和から飽和に向かう土・水・空気の三相の物理・力学的変化のみならず間隙空気や間隙水中に溶存している空気が気泡として分離し、堤防の弱線に沿って地表に噴発する現象が生じる。これをエアブローと呼ぶ⁵⁾。なお、一般的に水より空気の方が土の中は通りやすいため、直ちに堤防決壊につながるものではないと推定されているものの⁴⁾、現状ではエアブローの発生が堤防にどのような影響を及ぼすのか、そのメカニズムについては十分に明らかにされていない⁵⁾。

本研究では、エアブロー発生のメカニズム把握の一助とする目的で、モデルケースによる数値解析をおこなった。

2.2. 大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法（ASG法）

ここでは、以下の大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法（ASG法）²⁾、³⁾について詳述する。

ASG法では、地表水および大気中のガスの流れに Navier-Stokes の式と質量保存の法則を適用している。Navier-Stokes の式と質量保存の法則に、CIP を用いたセミ・ラグランジェ法と、位置ベクトル $\mathbf{R}_i - \mathbf{V}^i \Delta t$ の時間 t の流速ベクトル \mathbf{V}^* を用いると、Navier-Stokes の式と質量保存の法則は以下の式(1)と(2)のようになる。ここで、 \mathbf{R}_i は節点 i の位置ベクトル、 t は時間、 Δt は時間増分、 \mathbf{V}^i は時間 t の流速ベクトルである。

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

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

なお、 $\mathbf{V}^{t+\Delta t}$ は時間 $t+\Delta t$ の流速ベクトル、 $p^{t+\Delta t}$ は時間 $t+\Delta t$ の圧力、 \mathbf{g} は上向きを正とした場合の重力加速度ベクトルである。本研究では、式(1)と式(2)をガラーキン型有限要素法(GFEM)と後退差分法で離散化した。表面水と大気内の粘性係数 μ と密度 ρ は、流体の全体積に占める水の体積の比である密度関数 S_w を用いて以下の式のように表すことができる。

$$\rho = S_w \rho_w + (1 - S_w) \rho_g \quad (3)$$

$$\mu = S_w \mu_w + (1 - S_w) \mu_g \quad (4)$$

ここで、 μ_w と μ_g はそれぞれ水とガスの粘性係数を、また、 ρ_w と ρ_g はそれぞれ水とガスの密度を表す。

流体を非圧縮性とする、下記の式(5)は S_w の変化を表すことができ、また、同時に自由水面の移動も表す。

$$S_w^{t+\Delta t} = S_w^{t_{R_i - \mathbf{V}^t \Delta t}} \quad (5)$$

ここで、 $S_w^{t_{R_i - \mathbf{V}^t \Delta t}}$ は位置ベクトル $\mathbf{R}_i - \mathbf{V}^t \Delta t$ の時間 t の水の飽和度、 $S_w^{t+\Delta t}$ は時間 $t+\Delta t$ における水の飽和度である。なお、 S_w が 0.5 の場合を自由水面とした。また、本研究では、CIP を用いた内挿法より、節点毎に位置ベクトル $\mathbf{R}_i - \mathbf{V}^t \Delta t$ における時間 t の S_w を求めた。

多孔質体中の水とガスの流れの支配方程式については、Darcy の法則と質量保存の法則より求められる以下の式を用いた。

$$\partial \Phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) \mathbf{g} \nabla z] \quad (6)$$

ここで、 P はグローバル圧力である。また、 $\lambda_w = K_{rw} / \mu_w$ 、 $\lambda_g = K_{rg} / \mu_g$ と $\lambda = \lambda_w + \lambda_g$ とすると f_w と f_g は以下の式(7)のように定義される。

$$f_w = \lambda_w / \lambda \quad (7a)$$

$$f_g = \lambda_g / \lambda \quad (7b)$$

次にグローバル圧力 P を以下の式(8)のように定義する。

$$P = f_w p_w + f_g p_g - \int_{S_w} p_{cwg} (df_g / dS_w) dS_w \quad (8)$$

$p = f_w p_w + f_g p_g$ とすると、式(6)は以下のようになる。

$$\partial \Phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla p - \int_{S_w} p_{cwg} (df_g / dS_w) dS_w + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) \mathbf{g} \nabla z] \quad (9)$$

本研究では、式(9)を GFEM により離散化した。解析領域内の p は、式(2)と式(9)を同時に解くことにより得ることができる。さらに、多孔質体中の水とガスを含む流体の合計流速 \mathbf{V}_T は、式(8)の P を用いて以下の式(10)より求めることができる。

$$\mathbf{V}_T = -\lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) \mathbf{g} \nabla z] \quad (10)$$

また、多孔質体中の水の飽和度 S_w は以下の式(11)より求めることができる。

$$\partial S_w / \partial t + \mathbf{V}_{soil} \cdot \nabla S_w = \nabla \cdot (D_{soil} \nabla S_w) \quad (11)$$

ここで、 \mathbf{V}_{soil} と D_{soil} は以下のように定義される。

$$\mathbf{V}_{soil} = -[\mathbf{V}_T (df_g / dS_w) - (\rho_g - \rho_w) \mathbf{g} (d\lambda / dS_w)] / \Phi \quad (12a)$$

$$D_{soil} = [-\kappa k_s (dp_{cwg} / dS_w)] / \Phi \quad (12b)$$

$$\kappa = K_{rg} K_{rw} / (\mu_g K_{rw} + \mu_w K_{rg}) \quad (12c)$$

さらに本研究では、式(11)に CIP を用いたセミ・ラグランジェ法と GFEM により離散化し、時間項に後退差分法を適用した。 K_{rw} 、 K_{rg} と p_{cwg} は、式(11)から得られた S_w と以下の式(13)から計算することができる。

$$K_{rw} = S_w^{1/2} [1 - (1 - S_w^{1/\gamma})^\gamma]^2 \quad (13a)$$

$$K_{rg} = (1 - S_w)^{1/2} (1 - S_w^{1/\gamma})^{2\gamma} \quad (13b)$$

$$p_{cwg} = (S_w^{1/\gamma} - 1)^{1/\beta} / \alpha \quad (13c)$$

ここで、 α と β は van Genuchten パラメータであり、さらに $\gamma=1-1/\beta$ である。

式(8)から、多孔質体中の水圧とガス圧力は以下の式(14)のように求められる。

$$p_w = P - f_g p_{cgw} + \int_{S_w} p_{cgw} (df_g/dS_w) dS_w \quad (14a)$$

$$p_g = P / f_g - (f_w / f_g) p_w + \int_{S_w} p_{cgw} (df_g/dS_w) dS_w / f_g \quad (14b)$$

3. 越流時の土中ガスの挙動解析

3.1. 解析モデルと解析定数

本解析で用いた解析モデル領域は、横幅 110m、高さ 50m とし、表 1 に示す物理特性を有する地盤が解析領域の下端に厚さ 10m で位置するものとした（以降、この地盤部分を基礎地盤と称す）。なお、流体の物理特性は表 2 に示す。

堤体は解析モデル中央の基礎地盤の上に、高さ 5m、天端幅が 10m、底面幅が 20m の台形で形成されたものとした。これを基本として、裏小段を設けた場合の堤体も検討している。

後述の浸透対策ありのケースでは、堤防の地表面（天端）と越水が流下する側の法面（裏法面）を厚さ 0.20m の難透気性材料で覆ったものとした。このとき、難透気性材料の透過度を地盤改良の透過度相当 $9.6 \times 10^{-18} \text{m}^2$ とし、間隙率と水分特性曲線は表-1 の土の値と同じとした。

解析領域は、節点数 45,212 と要素 44,830 で分割された。また、解析領域の下端の境界（基礎地盤の下端）を不透水境界とし、解析領域の上端の境界（大気相の上端）の圧力を大気圧である 0kPa とした。

境界条件は、解析領域の上端の境界の水平方向の流速を 0 とした。基礎地盤の左右境界の鉛直方向の流速を 0 とし、表面水と大気の左右の境界の鉛直と水平方向の流速を 0 とした。解析領域の左側の境界では、表面水の水位を深さ 3m とし、右側では 0m とした。（図 1 参照）。

表 1 土の物理特性

固有透過度		$1.737 \times 10^{-11} \text{m}^2$
間隙率		0.402
水分特性曲線定数	α	0.231 kPa
	β	4.500
水の残留飽和度		0.187
空気の残留飽和度		0.0

表 2 流体の物理特性

水	
密度	0.998g/cm^3
粘性係数	$9.327 \times 10^{-7} \text{kPa s}$
ガス	
密度	0.012g/cm^3
粘性係数	$1.80 \times 10^{-8} \text{kPa s}$

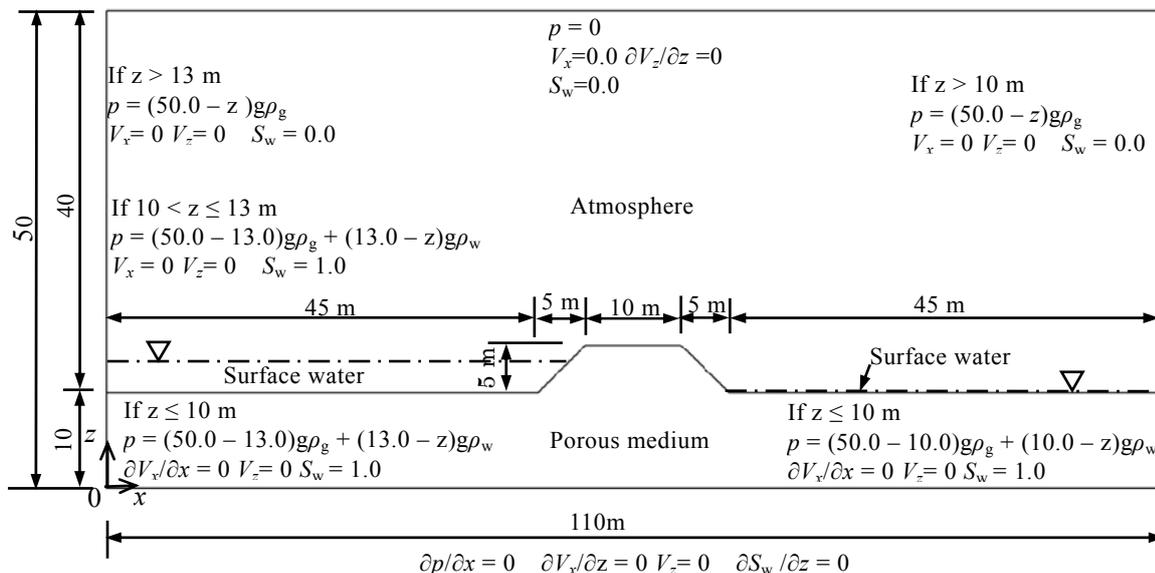


図 1 解析モデルと境界条件

初期状態では、基礎地盤、堤体、表面水と大気中の流速を 0 とした。また、堤体左側の表面水と堤体内の水位を解析領域の下端から 13m とし、右側の水位を解析領域下端より 10m とした。水位以下の表面水と基礎地盤の密度関数または水の飽和度を 1.0、大気の密度関数を 0.0 とした。さらに、水圧とガス圧は、それぞれ、上記の水位とガス圧の境界条件を満たす静水圧と静圧とした。堤体内の水の飽和度は、前記の堤体内の水圧と土中ガス圧より求められた毛管圧により van Genuchten の式を用いて求められた。

3.2. 解析ケース

ここでは、図 1 に示すモデルを用いた 3 ケースの結果について整理する。検討した 3 ケースはそれぞれ、ケース 1 「浸透対策なし」、ケース 2 「浸透対策なし（裏小段あり）」、ケース 3 「浸透対策あり」である。浸透対策は、堤防の地表面（天端）と裏法面を地盤改良材相当の難透気性材料で被覆する対策を想定した。なお、本研究では上記の境界と初期条件のもと、36000秒まで解析を行って越流前の定常状態の流れを再現し、その後、左側の境界の水位が水深6mとなるように上昇させて越流を再現した。

3.3. 解析結果

図 2、図 3、図 4 はそれぞれケース 1、ケース 2、ケース 3 の越流計算の開始時点と越流計算開始後 18000秒後に得られた飽和度の分布を図化したものである。これら解析結果より、3 ケースの計算開始時点の飽和度分布におおきな違いがないことがわかる。すなわち、川表側は河川水位、川裏側は堤防裏法面に浸潤線がすりつくような飽和度の分布である。一方、計算開始から18000秒後の解析結果を見ると、浸透対策を想定しないケース 1 とケース 2 は堤体内がほぼ飽和している。ここで、ケース 1 とケース 2 において、堤体内が完全に飽和する前の飽和領域と不飽和領域が混在するとき（計算開始後9000秒）の解析結果を図化したものが図 5、図 6 である。とくに、流速ベクトル図中に示す矢印は土中のガス（空気）の移動方向を示すものである。これら結果を見ると、堤体が不飽和から飽和に至る過程で堤体内に残留する土中ガスの様子が確認できる。川表からの河川水の浸透と堤防天端からの越流水の浸透により、堤体中にガスが残留し、さらに水の浸透によって堤体外部でガスが押し出されるような挙動を示しており、これがエアブローを表現しているものと考えられる。エアブローは堤防天端のみでなく堤防裏法面でも生じており、裏小段を有するケース 2 では裏法面長がケース 1 よりも短いいためか、エアブローがより高い地点で生じており、これに伴い土中の残留ガスの量も少ないように思われる。

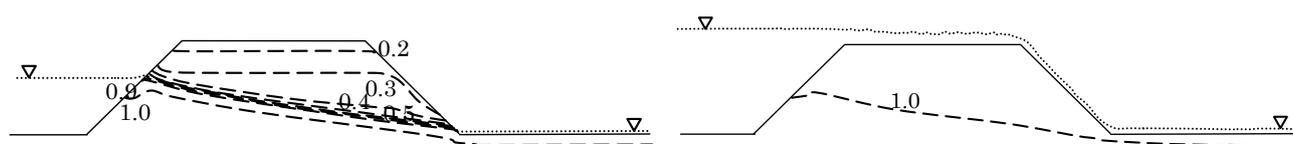


図 2 ケース 1 の計算結果：飽和度の分布（左）計算開始時点、（右）計算開始後 18000 秒

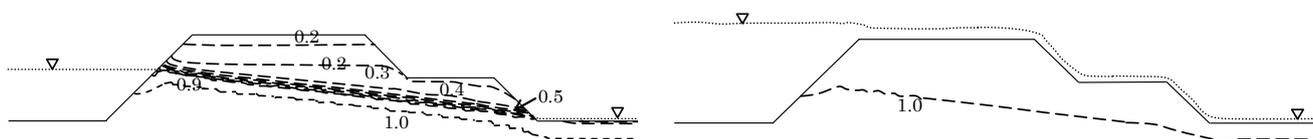


図 3 ケース 2 の計算結果：飽和度の分布（左）計算開始時点、（右）計算開始後 18000 秒

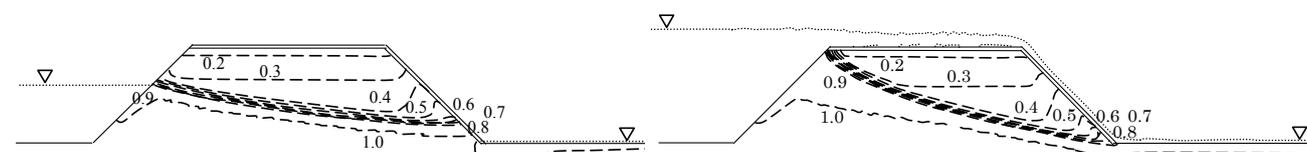


図 4 ケース 3 の計算結果：飽和度の分布（左）計算開始時点、（右）計算開始後 18000 秒

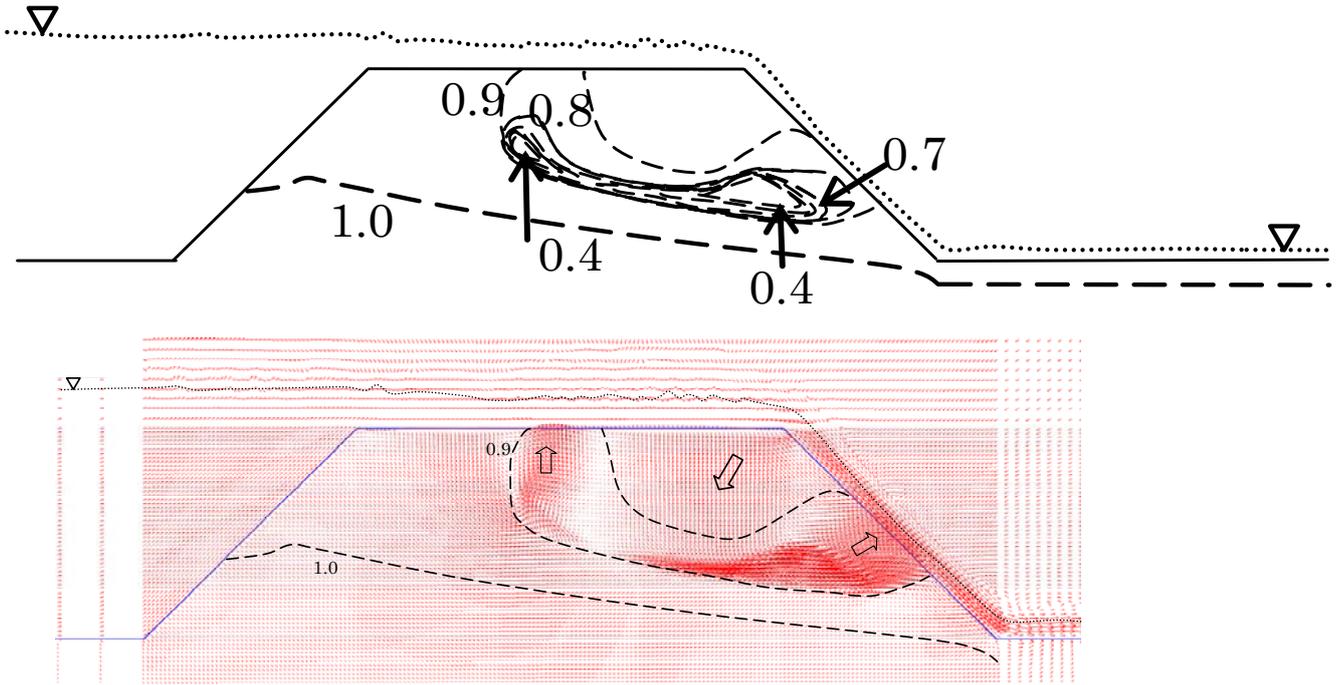


図5 ケース1の計算結果：計算開始後9000秒 (上) 飽和度の分布、(下) 流速ベクトル

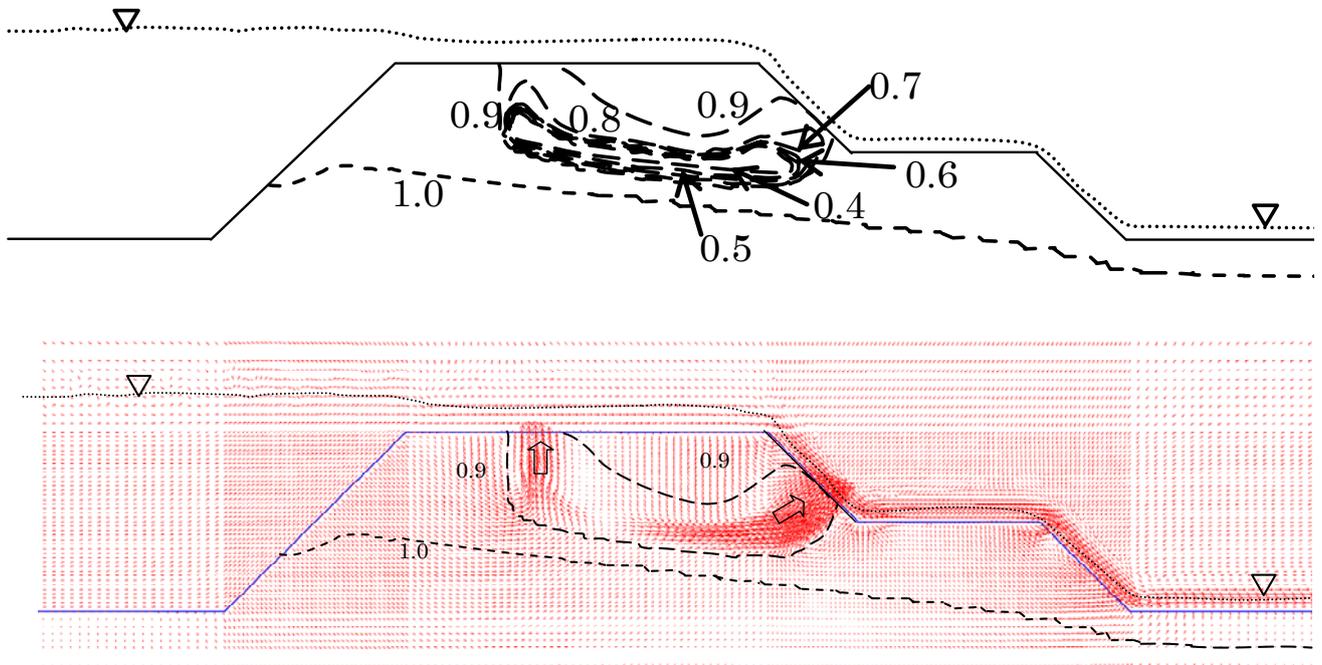


図6 ケース2の計算結果：計算開始後9000秒 (上) 飽和度の分布、(下) 流速ベクトル

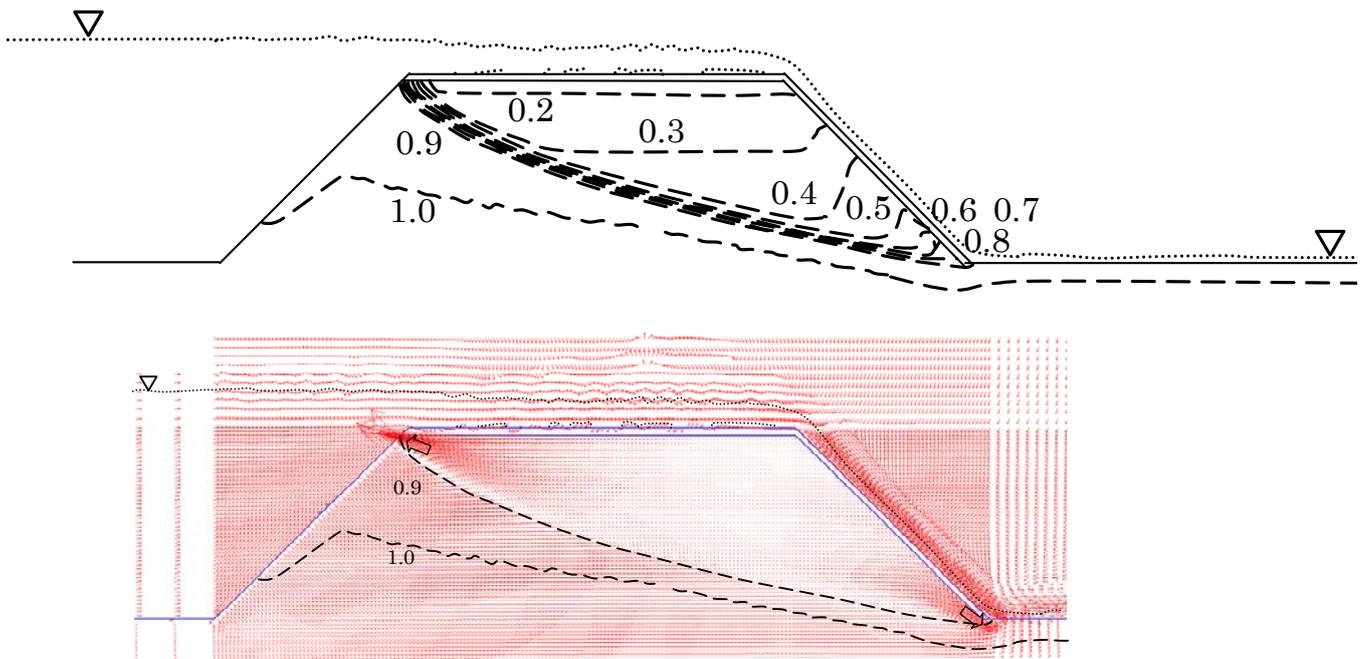


図7 ケース3の計算結果：計算開始後18000秒 (上) 飽和度の分布、(下) 流速ベクトル

堤体天端と越流の下流側の法面を難透気性材料で被覆したケース3では、計算開始後18000秒後でも堤体内に不飽和帯が残留することが分かった(図4参照)。従って、不飽和帯における見掛けの粘着力を考慮することができるものと考えられる。しかしながら、不飽和帯内で残留した土中ガスの圧力は上昇する結果となり、土の全応力が変化しない場合にはこの土中ガス圧により有効応力が低下する可能性がある。その際には、堤体が破壊される可能性がある。さらに、図7に示すとおり、難透気性材料で被覆した堤体表面の両端の不飽和帯から土中ガスが噴出しており、このガスが表面水または大気に放出される過程で減圧されて気泡となった場合には土の強度低下を生じる可能性がある。

4. まとめ

大気-表面水-多孔質体連成数値解析(ASG法)により越流と浸透流の同時解析をおこない、モデルケースにおいてエアブローの発生状況を確認した。堤防の地表面を地盤改良材相当の難透気性材料で被覆した場合は、被覆した面で挟まれた領域のガス圧が高い値で一定となり、越流後も不飽和領域が堤体内に残ることが分かった。しかし、被覆した表面の両端より流体が堤体外に早い速度で流出する結果となった。本研究結果は、これまでメカニズムが不明瞭であった越水破堤と浸透流の関係や、越流発生時のエアブローなどを定量化する試みであり、今後の様々なモデルケースへの適用や室内実験により検証を通じて、堤防管理に有用な新たな知見を得られる可能性が期待できる。

参考文献

- 1) 李 圭太, 小山倫史大西有三, 古川秀明, 小林猛嗣: 越流を考慮した河川堤防の浸透破壊に対する応力-浸透連成解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.4(1), pp.1-9, 2009.
- 2) Hibi, Y., Tomigashi, A. and Hirose, M: Evaluation of a numerical simulation model for a system coupling atmospheric gas, surface water and unsaturated or saturated porous medium, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.183, pp.121-134, 2015.
- 3) 日比義彦, 富樫聡: 多孔質体内の流れの飽和度型支配方程式を用いた堤体の越流数値解析, 混相流, 第29巻, 4号, pp.326-334, 2015.
- 4) 国土交通省関東地方整備局: 第2回鬼怒川堤防調査委員会資料(平成27年10月5日), 2015.
- 5) 前田健一, 柴田賢, 馬場千児, 小林剛, 榊尾孝之, 尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, 第18巻, pp.305-310, 2012.