

砂質堤防越水時の浸透とすべり破壊を考慮した越流破壊解析法の検討

水谷英朗・中川一・與田敏昭⁽¹⁾・川池健司・張浩

(1) 株式会社 ニュージェック

要 旨

本研究では、均一型砂質堤防の越水模型実験を実施し、砂質堤防の越流侵食現象が再現可能な数値解析モデルの構築を図った。実験では、堤防の越流破壊現象について粒径および浸透流の進行が越流侵食に与える影響について考察を行った。数値解析では、粒径および浸透の進行によって変化するせん断抵抗の影響を考慮した堤防の越流侵食モデルの構築を図った。流れの水深積分モデル、堤体内の浸透流解析、非平衡流砂モデルの枠組みによる土砂輸送、斜面安定解析の4つを結合し同時に解析することにより越流侵食破壊現象の再現を試み、一部の検証ケースにおいて計算モデルの結果は概ね良好な結果が得られ、堤防越水時の不飽和堤土の侵食評価において、浸透水によるせん断抵抗の変化を考慮することの重要性が示された。

キーワード：砂質堤防，越流侵食，浸透流，サクシオン，すべり破壊

1. はじめに

日本の年間降水量は世界平均に比べ多く、特に九州南部、四国南部、南紀、東海中部の岐阜県と北陸地域では年平均2000mmを超え、世界でも多雨域に属している。そして、我が国では洪水も多く、急激な河川水位上昇による堤防決壊や越水による洪水氾濫の対策が古くからの課題である。河川堤防は、人命および資産を外水氾濫から守る最後の砦であり、地球温暖化に伴う気候変動等により超過洪水の発生ポテンシャルが増加している中、堤防強化はこれまで以上に防災上大きな役割を担う。

計画降雨を上回る場合を想定した堤防強化対策や検討も進められつつある中、設計上安全度の閾値を越える外力が来襲した際に、越流した堤防がどれだけ持ちこたえるか（堤防の粘り強さ（藤田・諏訪（2000））などの越流破堤の時間変化過程の評価やその予測技術構築が現在直面している課題である。

破堤要因の多数を占めると言われる越流侵食の対策を検討する上で、堤防侵食現象を再現し得る数値計算モデル構築の重要度は高く、越流侵食対策や下流側の洪水被害評価に繋がるような、越流水および堤体侵食現象を時間的に追跡できる計算モデルの構築が求められている。これまで堤防越流侵食に関す

る実験的研究は少なくないものの、数値解析に関する研究事例はそれ程多くなく未だ乏しいと言える。

堤防の越流侵食モデルの開発が遅れている原因として、堤防の越流破壊現象が急勾配の移動床水理で、浸透、侵食、局部すべり破壊や崩落などが複雑に絡んだ現象であるため、モデル化を困難にしていることが一つ考えられる。また、堤防の越流侵食プロセスは通常は裏法面における不飽和土の侵食であるため、河道内の飽和した河床面の侵食プロセスと異なる挙動を示す。不飽和土はサクシオンの影響により河川内の飽和土と比較してせん断強度が大きく、またそのせん断強度は飽和度とともに変化する。そのため、不飽和土では浸透と侵食を一体としてとらえる必要があり、このこともモデル開発を遅らせている原因の一つと考えられる。そして、もう一つ大きな原因として、粘着性のある土の侵食速度の評価である。堤防に用いられる材料は粘土を含む砂質土も多く、粘土分が少量含まれるだけで、粘土粒子間に働く化学的な作用により砂のみの材料に比べ侵食速度が非常に小さくなることが知られている。その粘土分も含む材料の普遍的な侵食速度式が現在議論の段階にあるため、堤防の越流侵食のモデル開発を大きく困難にしている。

これまでの堤防越流侵食に関する数値シミュレ

ションの研究事例として、Tawatchai and Chinnarasri (2001) は 1 次元不定流計算にMPM式を基に急勾配水路に対応した流砂量式を用いて侵食計算を行い、そして、円弧すべりの斜面安定解析を加えたシミュレーションを行っている。ただし、流砂量式の係数については、実験に合うよう試行錯誤的に決定している。

後藤ら(2002, 2008)の研究では、粒子法を用いて越流水の解析および表層せん断および水撃作用を考慮した堤防裏法面の侵食プロセスを再現する試みを実施している。侵食プロセスについては、侵食速度に関する水理実験より得られた侵食速度に基づいて評価している。

Wang and Bowles (2007) は粘着性土の切り立った堤防の越流破壊プロセスについて、1次元の浅水流方程式と簡易Bishop法を用いた3次元の斜面安定解析により再現検証を行っている。

上記したように堤防の越流侵食シミュレーションに関する研究はいくつか存在するが、多くは侵食速度の評価部分に課題が残されており、堤体土等の実験条件が異なるとそのまま適用するには問題がある。粘着性土の侵食速度の課題も残されているが、非粘着性の堤土においても、前述したように侵食評価に浸透流の影響を考慮していないため、不飽和堤体表層の飽和度によってせん断抵抗が変化する侵食プロセスを考慮できておらず、既往研究で普遍性のある侵食評価技術が構築されているとは言い難い。

本研究では、不飽和堤体の越流侵食に着眼点を置き、砂質堤防の越水模型実験を実施し、粒径や越流前の堤体飽和度の違いが越流侵食プロセスに与える影響を確認する。そして、計算モデル構築のための検証データを実験により蓄積し、そして浸透および越流水の影響を考慮した砂質堤防越流破壊モデルの構築を図った。

2. 砂質堤防の越流破壊解析法

本研究の堤防越流破壊解析モデルは、堤体内の浸透流解析、越流水の流れ解析、堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析、堤体表面のすべり破壊解析の4つの解析モデルから構成されている。Fig. 1には本研究の各解析モデル間の相互作用、すなわち各モデル間でやりとりする変数について模式図で示している。本研究で重要なところは、浸透流解析により堤体飽和度の変化が計算され、侵食速度評価にその浸透流解析の解析結果が用いられている点にある。

以降、各解析過程について記述する。

◆ Interaction among the modules

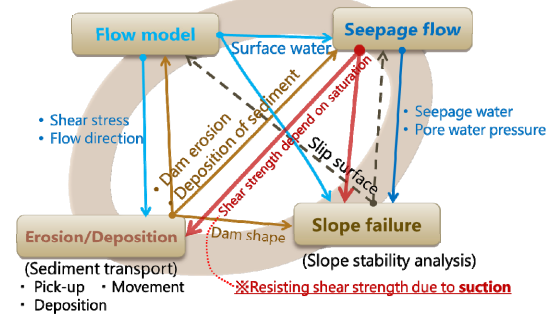


Fig. 1 Schematic diagram of interaction between each module

2.1 堤体内の浸透流解析

非定常の飽和・不飽和浸透流解析は、次式のRichards式を支配方程式としており、代表断面の鉛直2次元の解析を行う。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (1)$$

ここで、 $C(\psi)$ は比水分容量($=\partial \theta_w / \partial \psi$)、 θ_w は体積含水率、 ψ は圧力水頭、 K_x, K_z はx, z方向の透水係数である。そして、Richards式を解くのに必要な圧力水頭と含水率および圧力水頭と不飽和透水係数 K の関係式は、次式のvan Genuchten (1980) の式を用いた。

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} 1 / \left(1 + |\alpha \psi|^\eta \right)^m & \text{if } (\psi < 0) \\ 1 & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e^{0.5} \left[1 + \left(1 - S_e^{1/m} \right)^2 \right] & \text{if } (\psi < 0) \\ K_s & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$C = \begin{cases} m \left[1 + (\alpha \psi)^\eta \right]^{m-1} \eta (\alpha \psi)^{\eta-1} \alpha (\theta_s - \theta_r) & \text{if } (\psi < 0) \\ 0 & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_s, θ_r はそれぞれ飽和および残留体積含水率、 α, η は土質試験より与えられる保水性に関するパラメータ、 $m = 1 - \eta^{-1}$ 、 K_s は飽和時の透水係数である。

2.2 越流水の流れ解析

越流水の流れ計算には水深方向に積分した平面2次元浅水流方程式を用いる。方程式内では水位と水深平均流速が未知数となり、以下に示すx, y方向の運動方程式および連続式から求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここで、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 g は重力加速度、 H は水位、 h は水深、 ρ は水の密度である。また、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ は乱れによるせん断力で次式より求められる。

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (8)$$

ε は渦動粘性係数で、 $\varepsilon = \kappa u_* h / 6$ で与え、ここに κ はカルマン定数 (=0.4) で u_* は摩擦速度である。また、底面のせん断力は次式で評価した。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (10)$$

ここで、 n はマニング粗度係数である。

以上の式を離散化し、圧力-速度の連成解析法で SIMPLE 法の収束性を改善した SIMPLER 法 (Patankar, 1980) を用いて解いている。

2.3 堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析

越流水によって法面が侵食し堤体形状が変化し、そして、侵食された土砂が法尻近傍もしくは法尻から幾分離れた場所で堆積する。本研究では侵食しながら変化する堤体法面の局所勾配の侵食および堆積へ与える影響を考慮するために、地形に沿った砂粒の運動方程式を解く非平衡流砂モデルのフレームワーク (例えば、長田ら (2001)) を用いて解析を行った。

堤防越流による侵食現象は、流速が大きく、水深が小さく、そして法面勾配が急であるため、河道の河床変動計算で用いられているような流砂量式や pick-up rate の式をそのまま用いた場合では侵食量が過大に算出される傾向がある (例えば、Tawatchai and Chinnarasri (2001))。また、堤体は河道内の河床砂に比べて小さな粒径の土で構成されており、サクシオンによるせん断抵抗の増加などの影響により、砂質堤土の粒径が大きい程侵食が大きくなる可能性があり (Nakagawa et al., 2011)、掃流砂量式をそのまま堤防越流侵食に適用するには問題がある。本研究では、Nakagawa et al. (2011) の研究と同様にサクシオンによるせん断抵抗の増加を考慮することを考え、本研究では pick-up rate 式にその効果を導入して堤防越流破壊シミュレーションを試みた。

(1) pick-up 量の計算

各計算メッシュからの単位時間あたり離脱土砂量は pick-up rate p_s を用いて次式のように表せる。

$$V_p = (A_3 d) / A_2 p_s S_p \quad (11)$$

ここで、 d は河床材料粒径、 A_2, A_3 は砂粒の 2 次元、3 次元の形状係数 ($= \pi/4, \pi/6$)、 S_p は離脱地点メッシュの鉛直方向射影面積である。

pick-up rate は局所勾配の影響を考慮した中川・辻本・村上 (1985) の式にサクシオンによるせん断力増加を考慮した次式より計算を行った。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \phi \tau_{*c} + \tau_{*suc}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (12)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (13)$$

$$\phi = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (14)$$

ここで、 τ_*, τ_{*c} は無次元掃流力と無次元限界掃流力、 G_* は流れと砂粒の移動方向の影響を考慮する補正係数、 ϕ は局所勾配が移動限界に与える補正係数、 σ は河床材料の密度 ($\sigma/\rho = 2.65$)、 θ_b は河床最大傾斜方向の勾配角、 k_L は抗力と揚力の比 ($= 0.85$)、 μ_s は砂の静止摩擦係数 ($= 0.7$)、 ψ は河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度、 α は砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度である。定数については、中川ら (1985) が飽和土の実験で提案している $F_0 = 0.03, k_p = 0.7, m_p = 3$ をそのまま用いた。

ここで、本研究では Nakagawa et al. (2011) の研究に倣ってサクシオンによるせん断抵抗の増加効果をこの pick-up rate の式の限界掃流力にサクシオンによるせん断抵抗増の導入を考える。サクシオンによるせん断抵抗増分 τ_{suc} は、Vanapalli et al. (1996) の研究を参考に、浸透流計算で得られた各点の負の圧力水頭 ψ から次のように求められる。

$$\tau_{suc} = |u_a - u_w| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi = \rho g |\psi| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi \quad (15)$$

ここで、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧で、 $|u_a - u_w|$ はサクシオンである。

Egiazaroff (1965) は混合砂礫に関する限界掃流力の式を提案した。本研究では、その限界掃流力の式にサクシオンによるせん断抵抗増の導入を考える。

抗力と摩擦力が釣り合う砂粒の移動限界を考えると、抗力 R_T 、摩擦力 F は次のように表現できる。

$$R_T = \frac{\rho}{2} C_D u_b^2 A_2 d \quad (16)$$

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\sigma - \rho) g f + \tau_{suc} A_2 d^2 \quad (17)$$

ここで、 ρ, σ は水および砂粒の密度、 C_D は抗力係数、 u_b は砂粒に作用する代表流速、 d は砂の粒径、 A_2, A_3 は砂粒の形状係数、 f は摩擦係数 ($= \tan \phi$) を表す。 $R_T = F$ の限界掃流力の条件より、

$$\frac{u_b^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{4}{3C_D} \tan \phi + \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd} \quad (18)$$

が得られる。粒径 d の砂粒に作用する抵抗力の代表流速 u_b は、底面より ad の位置の流速であると仮定し、また混合砂礫床の相当粗度 k_s は、ほぼ平均粒径に等しいため、

$$\frac{u_b^2}{u_*^2} = 5.75 \log_{10} \left(\frac{30.2ad}{d_m} \right) \quad (19)$$

となり、 $a = 0.63$, $\tan \phi = 1.0$, $C_D = 0.4$, $u_* = u'_{*c}$ とすると、Egiazaroffの式にサクシオンによる限界掃流力の増加の項が追加された次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{u'_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = & \frac{4}{3C_D} \frac{1}{[5.75 \log_{10} 19(d/d_m)]^2} \\ & + \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd [5.75 \log_{10} 19(d/d_m)]^2} \end{aligned} \quad (20)$$

右辺第2項がサクシオンによるせん断抵抗増分である。本研究では一様砂の実験への適用を行っているため、 $d_m = d$ とし、次式によってサクシオンによるせん断力増加の効果を表し、式(12)の岩垣式(1956)および芦田・道上(1972)により修正されたEgiazaroffの式より求めた無次元限界掃流力 τ_{c*} に加えて移動限界とした。

$$\tau_{suc*} = \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd [5.75 \log_{10} 19]^2} \quad (21)$$

堤体裏法面の越流侵食過程において、越流水により浸透と侵食がほぼ同時に進行していると考えられる。Photo1は越流侵食実験の堤体を水路横から撮影したものである。越流水により裏法面が侵食されているのと同時に越流水が浸透し wetting front が堤体内部へと進行している様子が確認できる。堤体土の粒径によって浸透速度が異なり、粒径が小さなケースは裏法面において wetting front と侵食面の間が薄く、浸透の進行によって堤体表層が飽和し、サクシオンによるせん断抵抗が弱まった後に侵食が進行している様子が確認できる。このような越流侵食現象において、越流水の浸透、堤体土の飽和度を考慮したせん断抵抗の変化、そして飽和層および不飽和土の侵食速度の評価が現象を再現する上で重要であることが分かる。

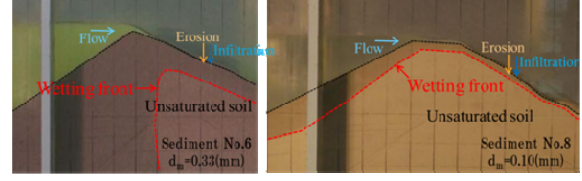


Photo 1 Embankment erosion process due to overtopping flow under different sediment conditions

本研究ではその浸透と侵食の現象をFig.2に示すような越流水による浸透と、飽和層と不飽和土の侵食プロセスの繰り返しとしてモデル化を行った。表層の飽和層とその下に不飽和土が存在し、まず飽和層が侵食され、その次に不飽和層が侵食され、浸透が進む。計算においてこのプロセスの繰り返しをモデル化した。このプロセスを飽和土と不飽和土の二つの pick-up rate 式を用いて評価することとした。式(12)より不飽和土の侵食量を求め、飽和土は同式でサクシオンによるせん断抵抗増を考慮せずに侵食量を評価する。

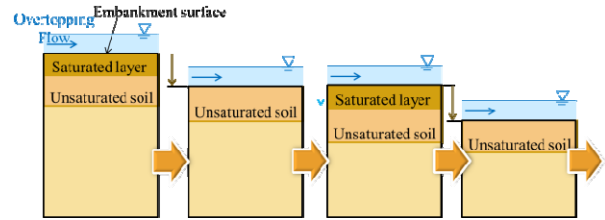


Fig. 2 Schematic diagram of erosion process

この侵食面のモデル化で問題となるのは、表層の飽和層厚の定義である。本研究では、飽和層の厚さは浸透流解析の結果より評価し、もし表層の解析メッシュが飽和していない場合は、堤防表層において浸透は常に進行して表層にわずかな飽和層が存在していると考え、その飽和層厚 D_s を透水係数と圧力水頭差 $\Delta\psi$ と計算ステップを乗じて求めた。

$$D_s := U_s \Delta t = -K_z \Delta\psi \Delta t \quad (22)$$

ここで、 U_s は飽和層の進行速度、 K_z は鉛直方向の透水係数、 Δt は侵食計算の計算ステップである。侵食計算の1ステップにおいて、飽和層の侵食を飽和土の pick-up rate の式で評価し、次式のように飽和層が全て侵食するために必要な時間を算定し、侵食計算1ステップの残りの時間を不飽和層の侵食とする。

$$\Delta t_s = D_s / E_{rs} \quad (23)$$

$$\Delta t_u = \Delta t - \Delta t_s \quad (\Delta t_u \geq 0) \quad (24)$$

$$E_r \Delta t = E_{rs} \Delta t_s + E_{ru} \Delta t_u \quad (25)$$

ここで, Er_s, Er_u はpick-up量から求められる飽和層の侵食速度, 不飽和土の侵食速度である。そして, Δt_s は1ステップ内において飽和層を侵食するために必要な時間, Δt_u は1ステップ内の不飽和土の侵食に費やされる時間である。計算された侵食速度によって1ステップの侵食高が飽和層内で収まる場合や, 飽和層のみ侵食され不飽和土は侵食されない場合, そして, 飽和層と不飽和土の両方が侵食される現象がモデル化されることになる。そして, 浸透流解析によって堤体表層が飽和状態であれば $Er_u = Er_s$ とし, 飽和土の侵食速度式のみで侵食を評価する。

上記した浸透流解析結果を用いたモデル化により, 浸透速度の大きな堤体土の計算では飽和土の侵食に近いものとなり, 浸透速度の小さな堤体土の計算では, 不飽和土の浸透速度影響を強く受けた侵食プロセスを表現することが可能となる。

(2) 堆積量の計算

後述する運動方程式より計算される砂粒の移動地点における土砂堆積量をstep lengthの確率密度関数を用いて求める。計算メッシュ*i*から出発した砂粒の移動経路において, 離脱から*n*ステップ後の位置における単位時間あたりの堆積量 $V_{d(n)}$ は次式で計算される。

$$V_{d(n)} = V_p f_s(s_{(n)}) \Delta s \quad (26)$$

ここで, V_p は離脱地点の pick-up 量, f_s は step length の確率密度関数を表し, $s_{(n)}$ は離脱した砂粒の移動距離, Δs は1ステップの砂粒移動距離である。本研究では, 堤防法面ではほとんど堆積が生じないことから $s_{(n)}$ は移動限界以下となった地点からの移動距離とした。step length の確率密度関数は, 次式のような指数関数を用いる。

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (27)$$

ここで, λ は砂粒の平均 step length である。平均 step length については Sekine and Kikkawa (1992) が提案した局所的な掃流力の影響を考慮した次の近似式を用いた。

$$\lambda = \alpha_2 \left(\frac{u_*}{w_0}\right)^{3/2} \cdot \left[1 - \frac{(u_{*c}/w_0)}{u_*/w_0}\right] \quad (28)$$

ここで, $\alpha_2 = 3.0 \times 10^3$, w_0 は砂粒の沈降速度を示す。

(3) 砂粒の運動方程式を用いた移動経路計算

代表離脱砂粒の移動経路を, 砂粒の滑動形式の運動方程式を用いて計算する。河床平面を表すために $x-z$ 平面, $y-z$ 平面内の河床平面と平行な単位ベ

クトルを, それぞれ $\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$ とする。砂粒に作用する力として, 抗力, 摩擦力, 重力, 浮力, 揚力を考えると, $\mathbf{p}_{bj}$ ($j=1,2$) 方向についての砂粒の運動方程式は以下になる。

$$m_{sed} \frac{du_{sedj}}{dt} = D_j + W_j - F_j \quad (j=1,2) \quad (29)$$

ここで, m_{sed} は砂粒の仮想質量であり, 付加質量係数 $C_m (=0.5)$ を用いて, 次式で表せる。

$$m_{sed(k)} = \rho(\sigma/\rho + C_m) A_3 d^3 \quad (30)$$

D_j, F_j, W_j は, 砂粒に作用する抗力, 摩擦力の $\mathbf{p}_{bj}$ 方向成分, 水中重力であり, 粒径 d の砂粒に作用するそれぞれの大きさを D, F, W とすれば, 次のように表せる。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho (u_{bi} - u_{sedi})^2 c_e A_2 d^2 \quad (31)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos \theta_{bx} \cos \theta_{by}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (32)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (33)$$

ここで, u_{sedj} は砂粒移動速度の $\mathbf{p}_{bj}$ 方向成分, u_{bj} は底面近傍の流速 $\mathbf{p}_{bj}$ 方向成分, C_D は抗力係数 ($=0.4$), c_e は砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数, μ_k は砂粒の動摩擦係数 ($=0.35$), θ_{bx}, θ_{by} は x, y 方向の河床勾配角, θ_p は $\mathbf{p}_{b1}$ と $\mathbf{p}_{b2}$ のなす角度である。 c_e は遮蔽係数に相当するもので, ここでは簡単のため, 静止砂粒に対しては0.4, 移動中の砂粒に対しては1.0を用いた。

(4) 堤体形状の計算

上述した方法によって算出したpick-up量, 堆積量を用いて, 堤体形状変動量の計算を行う。移動砂粒の位置についてはメッシュ点に関係ないため, 移動経路より堆積量を各ステップ近傍メッシュに配分して堆積させている。各計算メッシュにおいて, 移動している砂粒全ての土砂堆積配分量を合計し, 以下の式で堤体形状の変動量を求める。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{\sum V_d - V_p}{S_d} \quad (34)$$

2.4 堤体法面のすべり破壊解析

堤防の越流破壊において, シルトや粘土で粘着性を含む場合や砂でも粒径が小さい堤土は, 侵食面が切り立ちオーバーハングやそれに近い形状となり, すべり破壊を生じて破壊に至る。そのため, 堤体の

越流破壊解析において、なんらかのすべり破壊を再現できる計算過程を導入する必要がある。

本研究では、Tawatchai and Chinnarasri (2001)やWang and Bowles (2007)の研究と同様に越流破壊モデルに斜面安定解析を導入する。斜面の安定解析には、これまで様々な手法が提案されているが、今回対象とする堤防破壊現象においてすべり面は必ずしも円弧状とは限らないため、任意形状のすべり面が見いだせるスライス分割法の一つである簡易Janbu法が適していると判断し適用を行った。任意形状のすべり面の各スライスに作用する水平および鉛直力を求め、すべり土塊全体の水平方向の力のつり合いから安全率を求めている。スライス間に働く不静定せん断力の影響を無視した簡易Janbu法の安定率 F_s の算定式を次式に示す。

$$F_s = \sum_i R_i / \sum_i T_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (35)$$

$$R_i = \frac{c'l_i \cos \alpha_i + (W_i - u_{wi}l_i \cos \alpha_i) \tan \phi}{\cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \phi / F_s)} \quad (36)$$

$$T_i = W_i \tan \alpha_i \quad (37)$$

ここで、 n は分割スライス数、添字 i はスライス番号、 W_i 、 l_i 、 u_{wi} 、 α_i はそれぞれ各スライスの重量、スライス底面の長さ、スライス底面に働く平均間隙水圧、水平面に対する傾きを表す。そして、 c' は土の粘着力、 ϕ は土の内部摩擦角である。上述した簡易Janbu法の式は、不飽和土のサクシオンによるせん断抵抗増の効果は考慮されていない。本研究では、その負の間隙水圧によるせん断抵抗増を斜面安定解析にも考慮する。不飽和堤体内すべり土塊底面のせん断抵抗にサクシオンによるせん断抵抗増分を加え次式で表す。

$$R_f = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi + \tau_{suc} \quad (38)$$

そして、式(35)と同様の導出過程により、以下のサクシオンによるせん断抵抗増が考慮された式が得られる。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{c'l_i + (N_i - u_{wi}l_i) \tan \phi + \tau_{suc i} l_i\}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (39)$$

$$N_i = \frac{W_i - \frac{1}{F_s} (c' + u_{wi} \tan \phi + \tau_{suc i}) l_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi}{F_s} \right)} \quad (40)$$

浸透流解析の含水率の計算結果は各スライス重量の計算に反映され、圧力水頭がスライス底面に働く平均間隙水圧の計算に用いられる。上式で求められ

る安全率が最小となるすべり面の形状をYamagami and Ueta(1986)と同様にBarker(1980)の考えに従って、数理計画法の一つである動的計画法(Dynamic programming)の最適化手法を用いて見出す。

また、すべり土塊については、すべり破壊と同時に越流水によって下流へ全て流されると考え、解析範囲から土塊を取り除く方法もこれまでの研究で見られるが(例えば、Tingsanchali and Chinnarasri (2001), Wang and Bowles (2007))、すべり土塊が大きい場合はその土塊が下流側の流れや侵食に与える影響は少ないと考えられる。本研究では簡易的ではあるが、下流側へすべり土塊を移動させ、流送過程も他の砂と同様の越流水によって輸送されることとした。Fig.3には本研究で用いたすべり土塊の簡易的な移動および堆積方法の模式図を示す。

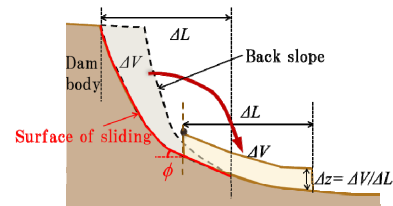


Fig. 3 Simple treatment of sliding mass

本モデルでは、簡易的に斜面安定解析から計算されたすべり土塊は、下流側の安息角以下となる地点まで移動させて堆積させる。その際、堆積範囲の縦断距離はすべり土塊の縦断距離と一致させ、堆積高はすべり土塊体積と縦断距離より求められる平均的な高さとして計算を行った。

3. 越水模型実験

本研究では、粒径や越流前の堤体飽和度の違いが越流侵食プロセスに与える影響を調査するために、粒径の異なる3つの砂質堤防について越水模型実験を実施した。

3.1 実験方法

実験には宇治川オープンラボラトリーの長さ500cm、幅30cmの直線水路を用いた。水路勾配を水平に設定し、水路下流部に基礎地盤および模型堤体を作成した。今回実験を実施した模型堤体は堤防高15cm、法面勾配1.0:2.0と設定し、Fig. 4に基礎地盤等の寸法を示す。水路の壁面はガラス製であるため、側面から浸透の様子や侵食プロセスが観察でき、本研究では、実験中に横からビデオカメラにより堤体の様子を撮影し、その撮影画像から堤体形状の変化を読み取った。

実験全ケースについては、Table 1に示す。堤体土

については、珪砂の6号, 7号, 8号を使用し, 粒度分布をFig.5に, 中央粒径および平均粒径をTable 2に示した。粒径の異なる3つの堤体土について, 越流前に高水位を維持し, 堤体土が浸透水により飽和に近い状態にしてから越流開始を実施するケース(本研究では, 越流前浸透ケースと呼ぶ)と, 設定した流量条件で水路内に水がない状態から一気に越流するまで水位上昇させたケースと2つのパターンについて実験を実施している。粒径の違いと飽和度の違いの影響のみを見るために, 流量条件を同じとし一定流量とした。

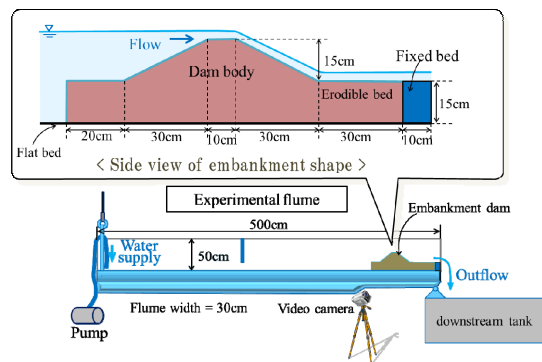


Fig. 4 Experimental flume

Table 1 Experimental cases

#	Supply discharge (cm ³ /s)	Sediment type	Infiltration prior to flow overtopping	Initial moisture content of dam (%)
1	1172.0	No.6	No	3.89
2			Yes	5.86
3		No.7	No	6.79
4			Yes	9.53
5		No.8	No	4.59
6			Yes	5.71

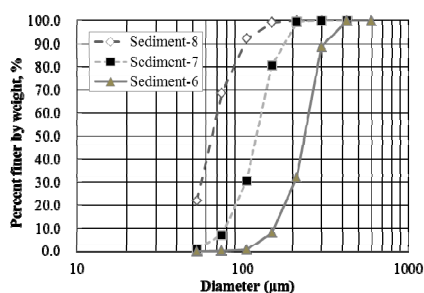


Fig. 5 Size distributions of embankment material

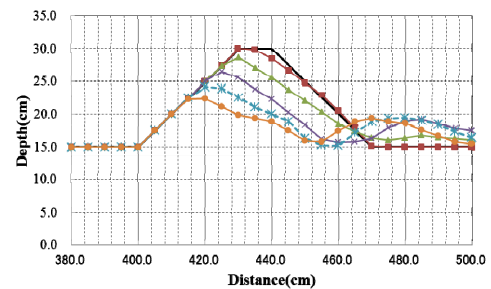
Table 2 Median and mean diameter of each sediment

	No.6	No.7	No.8
d ₅₀ (mm)	0.239	0.123	0.064
d _m (mm)	0.334	0.174	0.100

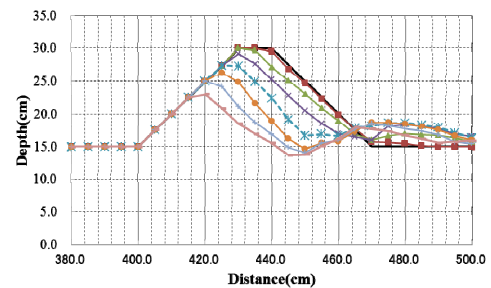
3.2 実験結果と考察

(1) 粒径の異なる均一型砂質堤防の越流侵食

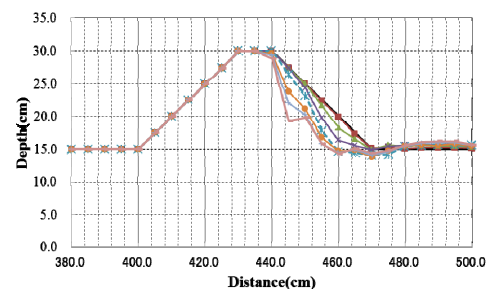
Fig. 6には, Case1,-3,-5の越流前浸透無しケースの10秒毎の堤体形状変化の実験結果を示す。



(a) Case1: Sediment No.6



(b) Case3: Sediment No.7



(c) Case5: Sediment No.8

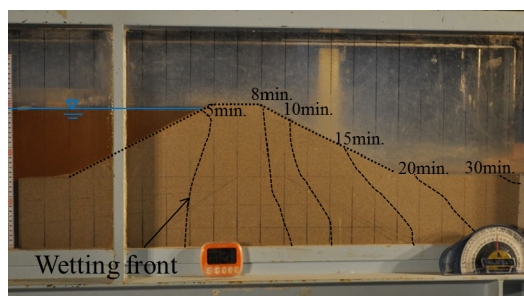
Fig. 6 Experimental results of embankment shape

Fig. 6より, 粒径の侵食速度に与える影響は大きく, 本研究で用いた堤体土の粒径範囲では, 粒径が小さいほど, 侵食が軽減される結果となった。粒径が大きいケースほど, 堤体裏法面の侵食面の勾配は, 粒径が大きいケースほど緩勾配で裏法尻下流部の体積が多い結果となった。粒径の小さな8号砂ケースは, 侵食初期過程において堤防天端は侵食せず, 裏法尻近くから侵食し, 上流へ侵食が拡大し裏法面が急勾配となっている様子が確認できる。

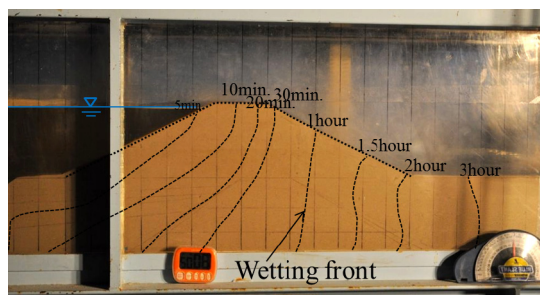
この実験結果より, 河川のシミュレーションで用いられている粒径や勾配のみで決まる移動限界評価による流砂量式では, 粒径が大きいほど流砂量が小さく評価されるため, この堤体の越流侵食を再現することが難しいことが分かる。

(2) 堤体飽和度が越流侵食に与える影響

次に越流前浸透の影響，すなわち越流前の堤体の飽和度が越流時の侵食速度に与える影響を確認するために，各堤体土ケースについて越流前浸透の有無の比較を行った。まず，参考のためFig.7にwetting frontの経時変化を図示した。6号砂と8号砂で大きく浸透水の進行速度が異なり，堤体全体に浸透水が行き渡る時間に大きな差があることが確認できる。



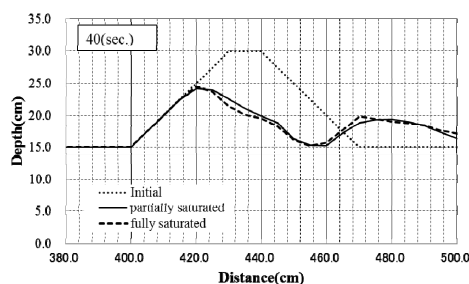
(a) Sediment No.6



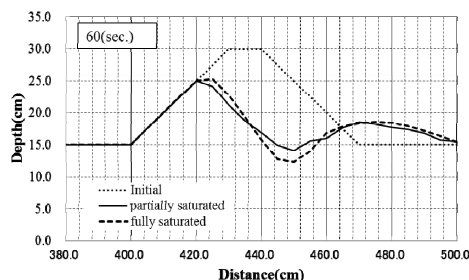
(b) Sediment No.8

Fig. 7 Infiltration process prior to flow overtopping

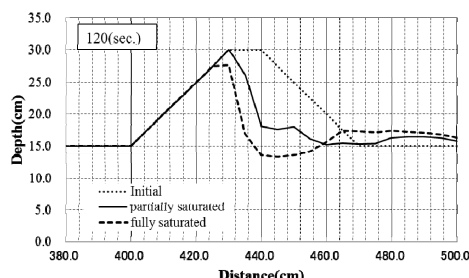
Fig.8に越流前浸透有無ケースの比較図を示す。6号砂の粒径が大きく浸透速度が大きなCase1とCase2については，越流前浸透の有無の影響は小さいことが確認できる。7号砂および8号砂のケースは，特に侵食面の法尻において侵食の差が生じている。8号砂の粒径が小さく浸透速度の遅いケースは，越流前裏法面の飽和度の違いが大きくせん断抵抗に影響を及ぼし，越流前浸透の有無で侵食速度が大きく異なっている。これらの原因については，サクシンの効果による粒子間力は粒径が小さいほど大きく，そのため粒径が小さいほどせん断抵抗が増加していることが考えられる。また，6号砂については浸透速度が大きいため，越流前浸透が無しのケースにおいても，越流水により裏法面表層の飽和の程度が越流前浸透有りケースと同等になっていると考えられる。



(a) Case1 vs. Case2: Sediment No.6



(b) Case3 vs. Case4: Sediment No.7



(c) Case5 vs. Case6: Sediment No.8

Fig. 8 Comparisons of experimental results

4. 数値シミュレーション

2. に記述した数値解析モデルにより本研究の越流侵食実験の再現計算を実施した。

4.1 計算条件

計算格子の解像度については，水平面の堤体越流方向は $\Delta x=1.0 \sim 2.0\text{cm}$ ，堤防法線方向(実験水路の横断方向)に $\Delta y=1.0\text{cm}$ と設定し，鉛直断面については， $\Delta x=1.0\text{cm}$ ， $\Delta z=0.5\text{cm}$ と設定し計算を実施した。

式(2)の水分特性曲線のパラメータや透水係数等の土壌パラメータをTable 3に示す。水分特性曲線のパラメータに関しては，Fig.9に示す吸水過程の保水性試験の結果から最小二乗法で決定した。また，式(15)のサクシンによるせん断抵抗増分と圧力水頭の関係については，Table 3のパラメータを用いるとFig.10のようになり，粒径が小さいほどサクシンによるせん断抵抗増分が大きく，飽和度が大きくなり飽和状態に近づくるとせん断抵抗増分の効果が小さくなる様子が確認できる。

Table 3 Soil parameters of different sediments

Parameters	No.6	No.7	No.8
θ_s	0.319	0.351	0.40
θ_r	0.061	0.095	0.025
α	3.837	2.552	1.043
η	3.852	4.148	1.701
K_s (m/sec.)	2.15×10^{-4}	8.75×10^{-5}	1.56×10^{-5}
d_m (mm)	0.334	0.174	0.100

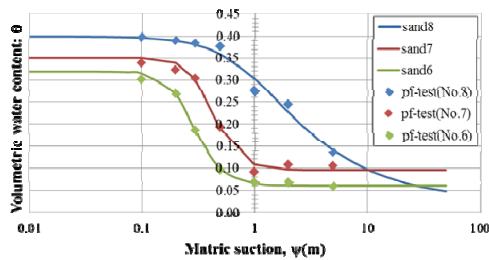
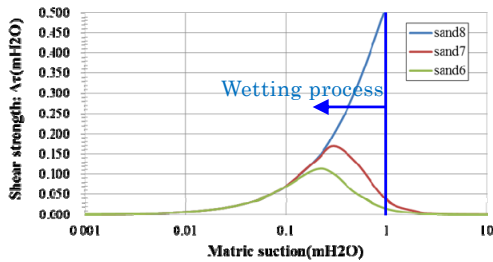


Fig. 9 Soil moisture retention curve

Fig. 10 Relationship between $\Delta\tau$ and $|\psi|$

4.2 計算結果

(1) 浸透流解析結果の検証

越流侵食解析の前に、浸透流解析の検証のため、越水を生じさせない堤体浸透実験を実施した。7号砂を用いて堤体模型を作成後、一定流量で通水を開始後、水位が堤防天端に達したら流量調節により水位を一定に保ち、Fig.11に示す地点の堤体土内部の含水率の時間変化を計測した。含水率の計測にはCampbell Scientific 社製 WCR(Water Content Reflectometer)を用いて計測を行った。

Fig. 12に代表地点における計算結果と実験結果の比較図を示す。概ね良好に浸透流による含水率の変化が捉えられていることが確認できる。

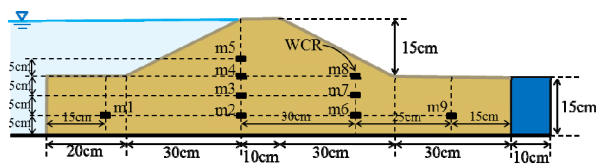


Fig. 11 Positions of WCRs

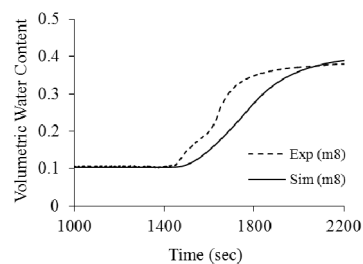
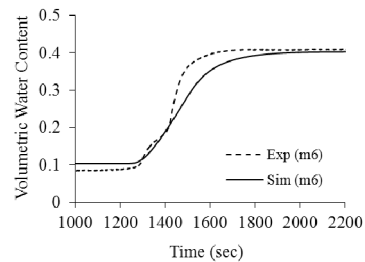
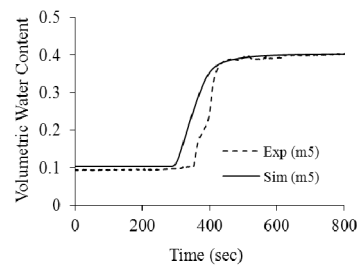
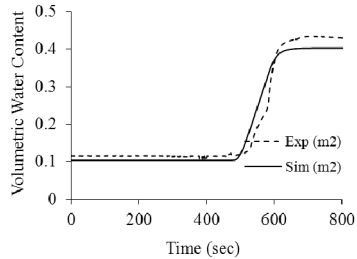
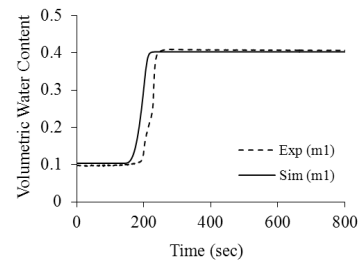


Fig. 12 Comparisons of simulated and experimental results of temporal moisture variations inside the embankment

(2) 越流侵食解析結果の検証

次に堤体の越流侵食実験の検証計算を実施した。Fig.13にCase3の堤体侵食過程の計算結果と実験結果の比較図を示す。本研究で構築した解析モデルによる計算結果は概ね良好に実験結果を再現していることが確認できる。

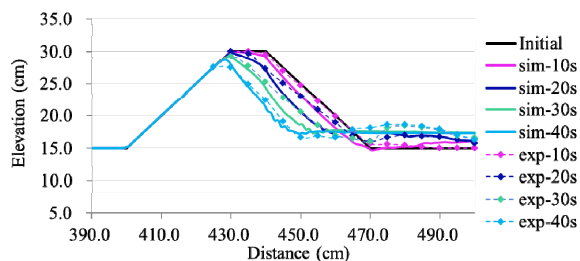


Fig. 13 Simulated and experimental results of embankment shape

5. おわりに

本研究では、粒径が異なる3つの均一型砂質堤防の越水模型実験を実施し、堤防の越流破壊現象について粒径および浸透流の進行が越流侵食に与える影響について考察を行い、そしてその実験データを用いて粒径および浸透の進行によって変化するせん断抵抗の影響を考慮した堤防の越流侵食モデルの構築を図った。

越水模型実験より、不飽和堤土の越流侵食において、粒径が小さいほどサクシヨンの効果は大きく侵食が大きく軽減されることが示された。また、越流前浸透の有無の実験結果比較により、粒径の大きなケースについては、裏法面において越流水の浸透速度が大きく、堤体形状の実験結果に大きな差異は見られなかったが、浸透速度の小さな堤体土については、越流前の堤体の飽和度によって侵食の進行が大きく影響されることが示された。

また、本研究では堤体内の浸透流解析、越流水の流れ解析、堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析、堤体法面のすべり破壊解析の4つの解析モデルを結合し、堤防越流破壊解析モデルの構築を行った。pick-up rateの式にサクシヨンによるせん断抵抗増の効果を考慮し、飽和土および不飽和土の両式を用いて不飽和堤土の侵食と浸透がほぼ同時に進行する越流侵食プロセスのモデル化を提案した。一部の実験ケースに適用し、計算結果は概ね良好な結果が得られたが、現時点では検証ケースが不十分であることは否めなく、今後さらなる実験ケースについても再現検証を進める予定である。

謝 辞

本稿は、科学研究費補助金 基盤研究(B) (No.22360197)、日本学術振興会アジア・アフリカ学術基盤形成事業(コーディネーター:中川一)、および京都大学GCOE-ARSプログラムの助成を受け

たものである。ここに厚く感謝する。

参考文献

- 芦田和男, 道上正規 (1972): 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69.
- 岩垣雄一 (1956): 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21.
- 後藤仁志, 林稔, 織田晃治, 酒井哲郎 (2002): 越流水による河川堤防侵食過程のグリッドレス解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.439-444.
- 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久 (2008): 粒子法による河川堤防裏法侵食の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第52巻, pp.979-984.
- 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾 (1985): 側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566.
- 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭 (2001): 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684, -56, pp.21-34.
- 藤田光一, 諏訪義雄 (2000): 減災システム整備における河川堤防技術, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.1-6.
- Baker, R. (1980): Determination of the critical slip surface in slope stability computations, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 4, pp. 333-359.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proceedings of ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp. 225-247.
- Nakagawa, H., Utsumi, T., Kawaike, K., Baba, Y. and Zhang, H. (2011): Erosion of unsaturated river embankment due to overtopping water, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 55, S K-1-K4.
- Sekine, M. and Kikkawa, H. (1992): Mechanics of saltating grains, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.118, No.4, pp.536-558.
- S. V. Patankar (1980): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington DC, 197.
- Tingsanchali, T. and Chinnarasri C. (2001): Numerical modeling of dam failure due to overtopping, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 46 (1), pp.113-130.
- Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, Vol. 44, pp. 892-898.

Vanapalli, S.K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996): Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33(3), pp. 379-392.

Yamagami, T. and Ueta, Y. (1986): Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes: An application of dynamic programming to the Janbu method, Journal of Japan Landslide Society, Vol. 22(4),

pp. 8-16.

Wang, Z. and Bowles, D., S. (2007) : A numerical method for simulating one-dimensional headcut migration and overtopping breaching in cohesive and zoned embankments, Water Resources Research, Vol. 43, W05411, pp. 1-17.

(論文受理日：2012年6月8日)

Numerical Study on River Embankment Failure due to Overtopping Flow Considering Infiltration and Mass Sliding

Hideaki MIZUTANI, Hajime NAKAGAWA, Toshiaki YODEN⁽¹⁾, Kenji KAWAIKE and Hao ZHANG

(1) NEWJEC Inc.

Synopsis

In this study, experiments were conducted to clarify the mechanism of embankment erosion due to overtopping flow under saturated and unsaturated sediment, and a numerical model was developed to compute the erosion of river embankment by flow overtopping. An influence of saturation and sediment size in the erosion process was discussed using the results of experiments. In the computation of erosion process of embankment, the infiltration process and shear strength due to suction on the unsaturated sediment bed were considered as a new equation. In order to simulate a phenomenon of embankment erosion, the numerical model consists of four modules, two-dimensional shallow water flow, seepage flow, sediment transport using framework of non-equilibrium model and two-dimensional slope stability. The developed model was tested for erosion of embankment. The numerical results of embankment surface erosion and moisture movement in the embankment were agreeable with the results of experiments.

Keywords: sandy embankment, erosion due to overtopping flow, seepage flow, suction, mass sliding