

堤体飽和度に着目した堤防の越流 侵食のメカニズムに関する研究

與田 敏昭*・中川 一**・水谷 英朗***・川池 健司**・張 浩**

Research on the Mechanisms of River Embankment by Erosion due to Overtopping Flow in Consideration of Soil Saturation

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

Abstract

This paper reports laboratory experiments and numerical simulations of river embankment failure due to overtopping flow. The experimental results for small-scaled physical model showed that wet condition in the embankment significantly influences on the location of erosions, and the degree of soil compaction also strongly influences the erosion shape of embankments and the volume of sediment yield. A numerical model was developed to simulate the erosion process of embankments by overtopping flow. The proposed model considered the effects of infiltration process and resisting shear stress due to suction of unsaturated sediment. The simulated results generally agreed with the result of the experiments using non-cohesive sediments.

キーワード：堤防，小型堤防実験，越流侵食，数値解析，サクシオン

Key words : river embankment, small-scale model, erosion due to overtopping flow, numerical study, suction

* 株式会社ニュージェック
NEWJEC Inc.

** 京都大学防災研究所 流域災害研究センター 河川防
災システム研究領域
River Disaster Prevention Systems, Research Center for
Fluvial and Coastal Disasters, Disaster Prevention
Research Institute, Kyoto University

*** 京都大学防災研究所 流域災害研究センター 流域圏
観測研究領域 (白浜海象観測所)
Field Research Section for Fluvial and Coastal Hazards
(Shirahama Oceanographic Observatory), Research Cen-
ter for Fluvial and Coastal Disasters, Disaster Prevention
Research Institute, Kyoto University

本論文に対する討論は平成26年11月末日まで受け付ける。

1. はじめに

河川の氾濫原に人口や資産の集中する我が国では、河川堤防は人命や資産を守るために大きな役割を担っている。しかし、河川堤防の大きな特徴として、大部分の堤防が土を材料としているため、大規模な洪水による越流、浸透、侵食により破壊されることがあり、堤防の強化は治水上の重要な課題である。

堤防強化にあたって、浸透や侵食については『河川堤防設計指針』¹⁾による安全性照査の技術的方針に基づき、堤防の質的強化が図られている。しかし、洪水災害において、過去の破堤要因の多くを占めている越水に対して、現在のところ連続的な堤防における効果的な対策を施すための技術的な知見は不足しており、効果的な越水対策を具体的に検討することが難しい状況にある²⁾。このため、堤防の耐越水機能を強化することは、減災に大きく寄与するものとなる。

しかしながら、治水計画上は河川堤防の越水は考慮されないものであることもあり、河川堤防の越流侵食に関する研究数は必ずしも多くない。また、河川堤防はその履歴が複雑であることが多く、また堤体土の強さや被覆植生の物理的機構など未解明な要素が多いことより、解析的アプローチではなく、模型実験や現地実験を中心に研究が進められてきた。

模型実験としては、建設省土木研究所（現独立行政法人土木研究所）において、堤体高3m程度の実物大の土堤を用いた越流による土堤の破堤機構の実験が行われており、越流による堤防破壊は裏り侵食から天端崩壊に進行すること、土質条件により堤体の侵食量が異なることおよび越流に対する保護工の効果等についての知見が得られている³⁻⁵⁾。現地実験としては、現地堤防を用いた越流実験による耐侵食性の評価⁶⁻¹⁰⁾や、実験水路に設けた堤防を用いた越流実験による破堤の横断方向への拡幅過程の検討^{11,12)}が実施されている。また、越流水の水理学的・土質学的観点からの破堤機構の評価¹³⁾や、越流水の水理特性と堤体挙動の調査^{14,15)}なども実施されている。さらに、堤防の越流侵食に関する数値解析については、後藤

ら¹⁶⁾によるMPS法による解析や、藤澤¹⁷⁾による土の侵食速度式を用いた解析手法の研究などがある。

しかし、これらの模型実験や現地実験については、大型堤防であるが故に、実験条件や実験回数に制約があるという課題があり、現時点では越流破堤のメカニズムが十分に究明されていない状況である。また、解析的検討については、侵食速度の評価部分に課題が残されているため、現時点では実用的なモデル化には至っていない。

このため、本研究では、越水堤防の開発に向けて、越水のメカニズム解明のための新たな知見の収集・蓄積を図るために、一定の実験条件を管理することが可能な模型堤防を用いた越流実験を実施し、これまでに十分に検討されていない浸透現象と越流侵食現象の関係に着目した検討を行った。また、数値解析モデルによる越流破堤現象の定量化に関する検討を行った。

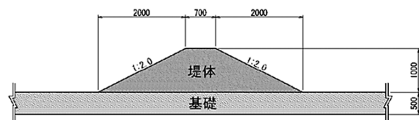
2. 小型堤防実験による越流侵食・浸透メカニズムの評価

浸透現象と越流侵食現象のメカニズムを検討するために、堤防模型による実験を行った。建設省土木研究所での大型模型堤防での実験結果より、実河川での越流侵食のメカニズムを知るためには、実際の堤防材料を用いて、また実堤防と同じような施工方法で築造された実験を行う重要性が明らかとなっている。このため、堤防模型は、実際の堤防材料を用いつつ、土質条件や施工条件を管理することと、実験回数を多く実施できることより、小型堤防模型（堤防高1.0m）を用いるものとした。

2.1 実験装置

小型堤水理実験装置を図1に示す。実験装置は、気象・外気環境等の影響を避けるため京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー実験棟内に作成した。水路長は全長47.0m（沈砂池を除く）、幅2.0m、高さ2.5mであり、堤体側面の一部は観測のためにガラス張りとした。模型堤防は、基礎部（高さ0.5m、延長17.0m）の上に、高

【堤体詳細図】



【平面図】

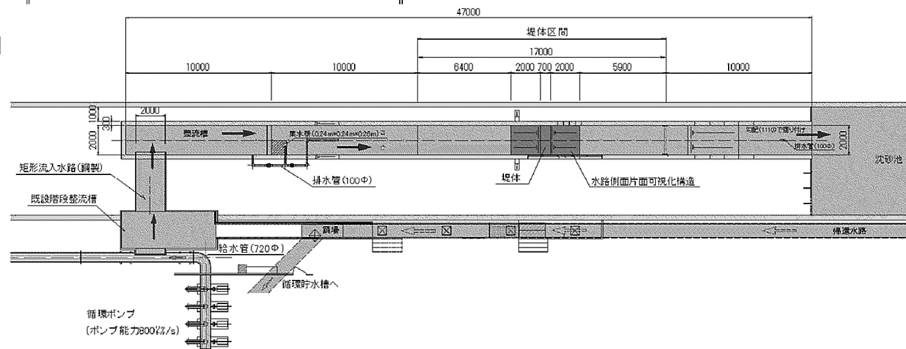


図1 小型堤水理実験装置 (単位: mm)

さ1.0m, 天端幅0.7m, のり面勾配1:2の堤体を作成した。なお, 実験時の越流水深は, 予備実験でポンプ流量と越流水深の関係を求め, ポンプ操作により越流水深を10cm, 20cm, 30cmの3通りに変化させた。

堤体および基礎部の材料は, 河川堤防の堤防強化工事等で使用している混合改良土を用いた。実験に使用した土は, 土の物理試験(土粒子の密度試験, 含水比試験, 粒度試験, 液性限界・塑性限界試験, 土の保水性試験)および力学試験(土の三軸圧縮試験, 土の締固め試験, 土の透水試験, 土の圧密試験)を実施した。実験材料の粒度分布を図2に示す。また, 土の透水係数は $2 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ であった(90%締固め調整時)。なお, 実験材料は, 実験の進捗にあわせて数回に分けて搬入し, 搬入毎に土質試験を実施して, 材料に大きな違いがないことを確認した。

堤体, 基礎部の作成は, 土の含水比を散水等により最適含水比に調整しながら, 層厚10cm程度ごとに締固めを行った。堤体の作成方法および手順は常に同一として, 締固めの各段階でRI試験を行い, 目標の締固め度(堤体部90%程度, 基礎部90%以上)となるように管理した。なお, 堤体・基礎部は裸堤とした。

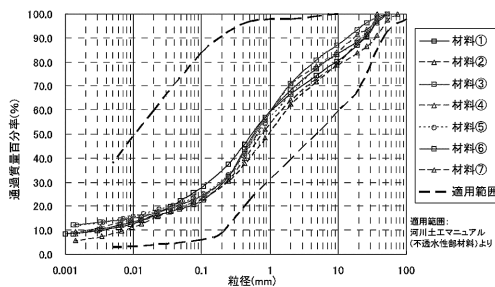


図2 実験材料の粒度分布

2.2 実験方法

越流侵食実験では, 同一の材料, 手順により作成した土堤防を用いて, 越流時の侵食状況を計測した。浸透現象と越流侵食現象の関係に着目するため, 堤体内への浸透に伴う湿潤状態について, 以下のケースで実験を行った。

- ①越流侵食実験前に一定時間の湛水を行い堤体内に定常湿潤面(飽和域)を設けた後に越水を開始するケース(堤体・基礎部とも湿潤するため「堤体湿潤時」とよぶ)
- ②越流侵食実験前に湛水を行わず, 堤体内に湿潤面を設けない条件で越水を開始するケース(堤体・基礎部とも非湿潤状態であるため「堤体非湿潤時」とよぶ)

なお、特異な実験結果を判別するため、同一条件で複数回の実験を行った（①は基礎ケースとして実験結果のバラツキも評価するために13回、②では3回の同一条件実験を実施）。

堤体湿潤時は、堤体上流側の水位を、天端水位状態で24時間以上の湛水を行い、堤体内湿潤面が定常状態となった後に、所定の越流水深となるようにポンプ流量を設定して越流させた。実験は、堤体天端が破壊されて所定の越流水深が維持されなくなる時点（＝「破堤」と定義）まで、越水と通水停止（侵食変形計測）を繰り返し実施した。

越流侵食実験での計測項目は、越流時の流況撮影および堤体内に埋設した間隙水圧計（図3に示す5箇所）による堤体内湿潤状態の計測である。堤体内湿潤面が定常状態かどうかの判定は、裏のり面に近い間隙水圧計#3を常時観測して確認した。越流による堤体侵食量は、通水開始後2分、10分等の間隔で通水を一時停止し、堤体および基礎部の侵食変形をレーザー変位計により計測した。この方法では、連続して通水する場合と侵食形状が一致しなくなることも想定されたが、通水時の堤体形状を直接計測することが困難であったため、このような段階的計測方法によるものとし、各実験での通水時間やポンプ操作方法を統一することで、実験間の差異を確認することに着目するものとした。

2.3 実験結果

堤体湿潤時および堤体非湿潤時の実験結果は以下のものであった。なお、湿潤状況以外の条件は、越流水深30cm、堤体締固め度90%で統一した。

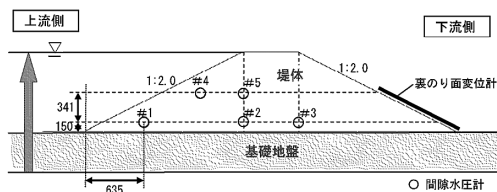


図3 計測機器設置位置 (単位: mm)

(1) 堤体湿潤時の越流侵食結果

越流侵食実験前の堤体内湿潤面の時間的変化は図4のようであり、24時間の湛水でほぼ定常状態になったことを確認した後に越流を開始した。変位計で計測した侵食形状を図5に示す。この実験ケースでは、まず通水2分後に、のり尻が局部的に深く（初期地盤高から30cm程度まで）まで侵食されるとともに、のり面中央付近より下が侵食された。のり面の侵食箇所は、越流前湛水による湿潤面と概ね一致している。のり肩については、侵食は見られない。通水12分後（累積）では、のり面の侵食が進行して、のり肩の少し下から崖状の侵食面となる。通水22分（累積）では、天端中央付近までのり面の侵食が進行し、階段状になっていた基礎部も侵食され始めている。のり尻部およびのり尻下流は侵食土の再堆積により実験開始時の地盤高付近まで上昇している。以後は、通水により堤防天端の侵食は上流側に進行し、のり尻部およびのり尻下流は深く侵食される。最終的に、通水169分（累積）で破堤し、実験を中止した。

また、同一条件で複数回の実験を行い、実験結果のバラツキについても評価した。その結果、特異なケースを除外すると、図7に示すように、いずれのケースでも侵食開始場所がのり尻付近となっており、実験結果のバラツキは小さい。また、侵食進行の時間的変化については、局所的な土質の状態が要因と見られる違いが見られる場合があるが、概ねの傾向は同様であった。

(2) 堤体非湿潤時の越流侵食結果

堤体非湿潤時の実験結果（堤体形状）を図6に示す。このケースでは通水2分後に、のり面が少し侵食した程度でのり尻は変化が見られない。通水12分（累積）でも、のり面の侵食は進行するがのり尻の侵食は僅かであり、通水22分（累積）に

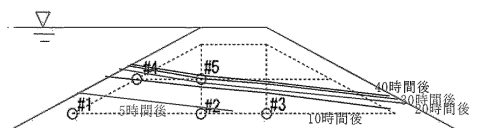


図4 堤体内湿潤面の時間的変化

なって、のり尻の大きな侵食が見られる。その後、のり面の侵食が進行して破堤に至っている。

2.4 堤体内湿潤状態の違いによる越流侵食への影響

越流時に侵食が開始する場所の評価は、越流開始後、短時間（2分間）で通水を一時停止した時点で侵食されている場所を侵食開始場所とすることにより比較した。通水2分後の侵食形状の比較を、特異ケースを除くケースを重ねて図7に示す。湛水ありの場合の侵食開始場所は裏のり尻付近、湛水なしの場合は裏のり面となっており、堤体内湿潤状態による違いが見られた。また、湛水ありの場合の侵食開始場所は、概ね湿潤面より下である。また、湿潤条件が異なる場合の、通水時間と侵食量の関係を図8に示す。これより、同じ通水時間では堤体湿潤時の方が、侵食量が多くなることが示された。これらの比較より、堤体内湿潤状態は侵食開始場所や侵食進行速さなどに大きく影響することが明らかであり、湿潤（飽和）状

態の堤体は、非湿潤（不飽和）状態よりも侵食しやすく、侵食量が多くなる。

不飽和土は飽和土と比較してサクシヨンの影響によりせん断強度が大きくなるとともに、飽和度とともにせん断強度が変化する。このため、実河川での堤防の越流侵食メカニズム解明のためには、堤体土質の飽和・不飽和状態と侵食の関係が重要な課題であると考えられる。

3. 越流侵食の解析方法の検討

小型堤防を用いた実験的検討で明らかとなったように、実河川堤防での越流侵食は、堤体内の湿潤状態の影響を大きく受ける。このため、越流侵食現象の数値解析モデル化においては、浸透に伴い不飽和土が飽和化するメカニズムを評価することが重要であると思われる。

一方、第2章では実河川での越流侵食メカニズムを把握するために、粘着性を有する実際の堤防材料を用いた実験を行ったが、粘着性土の侵食速度の評価については現在議論の段階であり、モデ

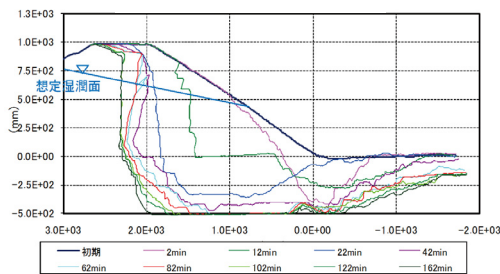


図5 越流侵食形状（堤体湿潤時）

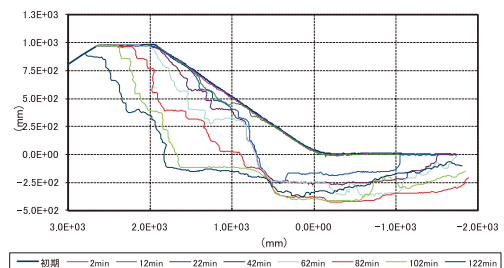


図6 越流侵食形状（堤体非湿潤時）

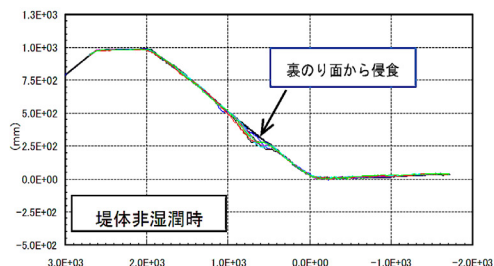
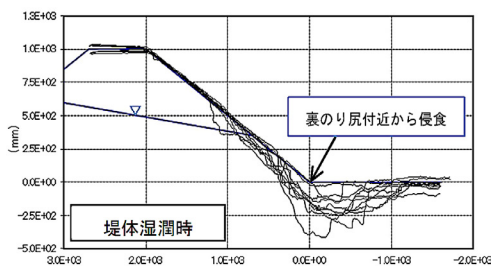


図7 通水2分後の侵食形状の比較（実験結果重ね合わせ）

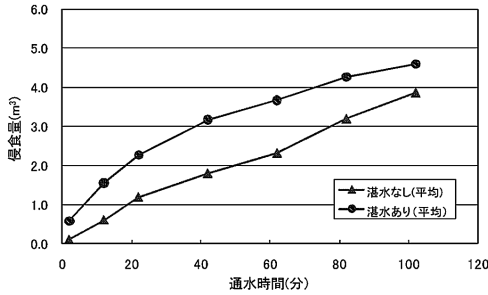


図8 通水時間と侵食量の関係

ル化の大きな課題である。

越流侵食モデルの開発においては、このような課題を全て解決する必要があるが、本研究では、まずは小型実験で重要性が明らかとなった不飽和土の越流侵食に着眼点をおき、不確定要因の多い粘着性土質ではなく、非粘着性土質を対象とした検討を行うものとした。

3.1 越流侵食解析法

越流侵食解析モデルは、①堤体内の浸透流解析、②越流水の流れ解析、③堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析、④堤体法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。以下に各解析過程について示す。

(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の式¹⁸⁾を用いた。

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

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

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

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) 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、 τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{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。

$$u_*^2 = C_f (u^2 + v^2) \quad (9)$$

$$C_f = \frac{gn^2}{\sqrt[3]{h}} \quad (10)$$

ただし、 C_f は河床抵抗係数、 n はマンニング粗度係数である。底面のせん断力は次式で評価した。

$$\tau_{bx} = \rho gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (11)$$

$$\tau_{by} = \rho gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (12)$$

(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¹⁹⁾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には侵食量が過大に算出される傾向がある。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ほど侵食が大きくなる可能性があり、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²⁰⁾。このため、本研究では、中川ら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、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。

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。

$$V_p = (A_3 d) / A_2 p_s S_p \quad (13)$$

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(=π/4, π/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式¹⁴⁾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。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \rho \tau_{*c} + \tau_{*suc}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (14)$$

$$G_* = \frac{\cos\psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (15)$$

$$\phi = \frac{\mu_s \cos\theta_b - \sin\theta_b \cos\alpha + k_L \mu_s}{\cos\psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (16)$$

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²¹⁾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、前述の実験結果で着目された堤体の湿潤状態を考慮する手法として、本研究では中川ら²⁰⁾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導入することを考える。サクシオンによるせん断抵抗増分 τ_{suc} は、既往研究²²⁾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。

$$\tau_{suc} = |u_a - u_w| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan\phi = \rho g |\psi| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan\phi \quad (17)$$

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。

本研究では、Egiazaroffの限界掃流力の式²³⁾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 、摩擦係数 F は次のように表現できる。

$$R_T = \frac{\rho}{2} C_D u_b^2 A_2 d \quad (18)$$

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\sigma - \rho) g f + \tau_{suc} A_2 d^2 \quad (19)$$

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 φ)を表す。 $R_T = F$ の限界掃流力の条件より、

$$\frac{u_b^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{4}{3C_D} \tan \varphi + \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd} \quad (20)$$

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、

$$\frac{u_b^2}{u_*^2} = 5.75 \log_{10} \left(\frac{30.2ad}{d_m} \right) \quad (21)$$

となり、 $\alpha = 0.63$ 、 $\tan \varphi = 1.0$ 、 $C_D = 0.4$ 、 $u_* = u_*^*$ 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。

$$\frac{u_*'^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{4}{1.2} \frac{1}{\left[5.75 \log_{10} 19 \left(\frac{d}{d_m} \right) \right]^2} + \frac{2\tau_{suc}}{0.4\rho(\sigma/\rho - 1)gd \left[5.75 \log_{10} 19 \left(\frac{d}{d_m} \right) \right]^2} \quad (22)$$

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た。

$$\tau_{suc}^* = \frac{2\tau_{suc}}{0.4\rho(\sigma/\rho - 1)gd \left[5.75 \log_{10} 19 \right]^2} \quad (23)$$

本研究ではその浸透と侵食の現象を図9に示すように、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、浸透が進む侵食プロセスの繰り返しとしてモデル化を行った。このプロセスを飽和土と不飽和土の二つの pick-up rate 式を用いて評価した。式(14)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した。この侵食面のモデル化において、表層の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。

$$D_s = U_s \Delta t = -K_z \Delta\psi \Delta t \quad (24)$$

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。

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。

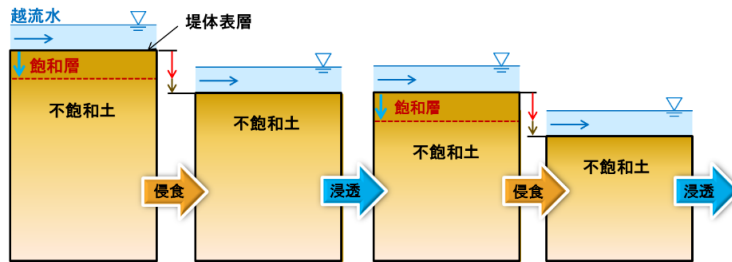


図9 侵食過程の概略図

(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、越流破壊モデルに斜面安定解析を導入した^{24,25)}。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、これを用いた。

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

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

$$T_i = W_i \tan \alpha_i$$

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、不飽和土のサクショ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ョンによるせん断抵抗増分を加え次式で表す。

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

そして、式 (25) と同様の導出過程により、以下のサクションによるせん断抵抗増が考慮された式が得られる。

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

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

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、数理計画法の一つである動的計画法 (Dynamic programming) の最適化手法^{26,27)}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^{28,29)}で見られるが、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くないと考えられる。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。図10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。

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。

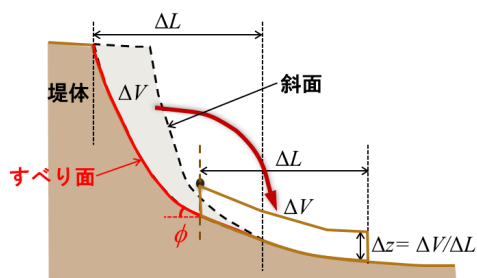


図10 すべり土塊の模式図

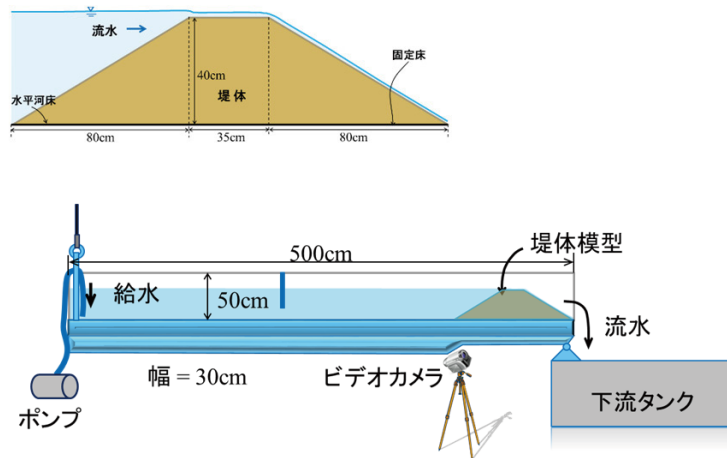


図11 検証実験模型装置

3.2 非粘着性土質を用いた越水実験

構築した非粘着性土質堤防の越流侵食解析モデルの検証データを取得することを目的として、非粘着性土を用いた堤防模型による越流侵食実験を行った。

(1) 実験方法

実験は長さ500cm、幅30cm、深さ50cmの直線水路を用いた。水路勾配を水平に設定し、水路下部に模型堤体を作成した。模型装置を図11に示す。堤高は40cm、法勾配は表法、裏法とも1.0:2.0とした。

実験ケースを表1に示す。堤体土は珪砂の6号、7号、8号を使用した。粒度分布を図12に示す。また、流量条件は同一とした。本実験では、実験前の湛水は行わずに越流侵食させた。このため、堤防のり面からの浸透により堤体表層から飽和域が拡大するものとなった。なお、飽和速度は粒径の大きな6号砂が最も速くなる。

水路の壁面は透明アクリル製であるため、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、実験中に横からデジタルビデオカメラにより堤体侵食の様子を撮影し、その撮影画像から堤体形状の変化を読み取った。

表1 実験ケース

#	流量 (cm ³ /s)	堤体土	d_m (mm)	堤体の初期含水量 (%)	堤体土の間隙率
1	7840.0	No.6	0.334	13.0	0.51
2		No.7	0.174	11.5	0.51
3		No.8	0.100	12.0	0.55

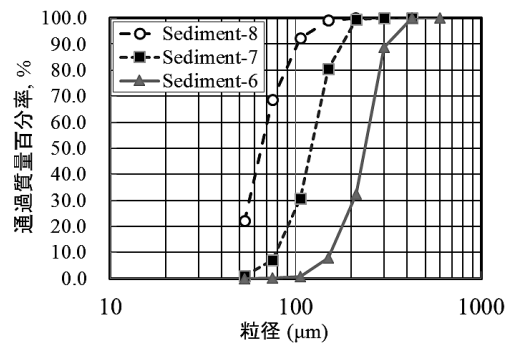
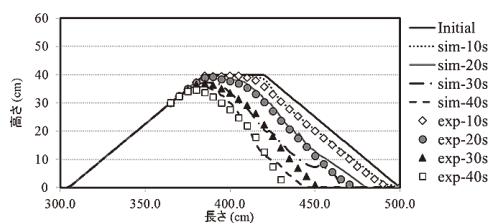


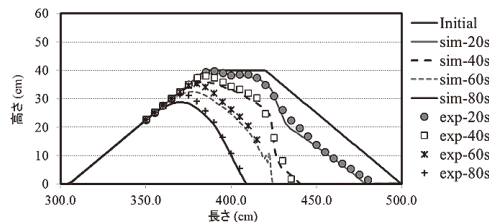
図12 堤体土の粒度分布

(2) 実験結果

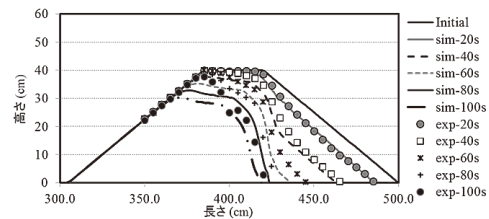
実験結果を解析結果とあわせて図13に示す。これより、粒径が侵食速度に与える影響は大きく、本研究で用いた堤体土の粒径範囲では、粒径が小さいほど、侵食が軽減される結果となった。粒径が大きいケースほど、堤体裏法面の侵食面の勾配は緩勾配で、裏法尻下流部の体積が多い結果と



(a): Case-1



(b): Case-2



(c): Case-3

図13 越流侵食実験結果と解析結果の比較

表2 土壌パラメータ

パラメータ	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}

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。

これらの実験で用いた土のパラメータについては、Nakagawa et al.²⁰⁾により調査された表2の値を適用した。ここで、Van Genuchten式¹⁸⁾のパラメータは、pFメータ計測により得られた土壌水分量の非線形回帰式を用いて評価した。土の水分特性曲線を図14に、せん断力の増加とサクシオン

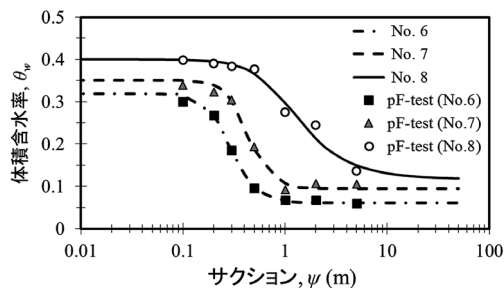


図14 土の水分特性曲線

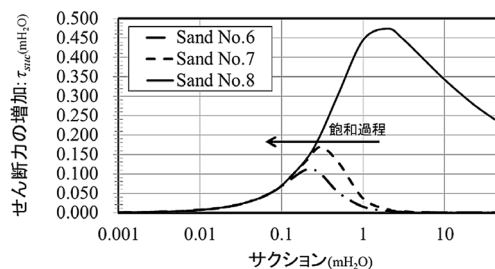


図15 せん断力の増加とサクシオンの関係

の関係を図15に示す。これより、サクシオンとせん断力の関係は、土の粒径と関連し、粒径が小さいほどサクシオンによるせん断抵抗の増分が大きく、土が飽和状態に近づきサクシオンの値が小さくなるほど、せん断抵抗の増分の効果が小さくなることが示されている。さらに、粒径が小さく透水性が小さいほど、浸透して飽和に達する時間が長くなることより、サクシオンによるせん断抵抗が維持される時間が長くなることになる。また、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、粒径が小さいほど侵食量が大きくなることになるため、実験結果のような堤体侵食現象を再現することが難しいことが示唆された。

3.3 数値シミュレーション

非粘着性土を用いた越水侵食実験により得られた実験データを用いて、越流侵食解析モデルを検証することによりモデル構築を図った。

(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。

(2) 越流侵食解析結果

図13に、Case-1, 2, 3の解析結果と実験結果の比較を示す。実験での越流侵食の時間的進行状況は、解析モデルで良好な再現性を示した。Case-3（8号砂）のケースでは、計算の侵食量が実験値より、やや大きくなっているものの、特に、Case-2（7号砂）の解析結果の整合性は良好である。

解析での侵食量は、6号砂・7号砂に比べて8号砂で小さくなっている。これは、サクシオンによるせん断抵抗の増加の影響であり、図15に示すように8号砂のサクシオンの最大値が他の粒径に比べて大きい。このように、解析モデルは、実験で見られたように粒径が小さくなるほど侵食速度が小さくなることを表現することが可能であり、以前の土砂掃流モデルより精度が高い予測が可能である。

また、サクシオンによるせん断抵抗は、越流水による堤体表層からの浸透で飽和状態に近づくに従い減少する。粒径の大きな6号砂では、他の砂に比べて透水係数が大きいために、侵食面表层が越流水により直ちに飽和状態に変化するため、サクシオンによるせん断抵抗の影響が小さい。このメカニズムにより、粒径が大きい土の堤体の方が、速く破壊に至っている要因にもなっている。

4. まとめ

本研究では、小型堤防を用いて、湿潤状態の異なる堤体での越流侵食実験を実施し、堤体湿潤状態が侵食進行過程に与える影響について考察を行うとともに、浸透現象に着目した越流侵食の数値解析モデルの構築を行った。本研究で得られた知見は以下のものである。

・実堤防を想定した小型模型を用いた越流侵食実験より、堤体内湿潤条件で越流侵食開始場所が

異なるとともに、また同じ土質であっても堤体の湿潤状態により侵食進行が異なるなど、堤体内の湿潤状態は越流侵食に大きな影響を与える。

- ・粒径の異なる非粘着性土質を用いた越流侵食実験結果より、本実験で用いた粒径範囲では、粒径が小さいほどサクシオンの効果が大きく、侵食が軽減されることが示された。
- ・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の式にサクシオ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。
- ・構築したモデルを用いて実験ケースに適用し、解析結果は概ね良好な結果が得られた
- ・本モデルでは、非粘着性土質堤防を対象とした。今後、本モデルを実河川の堤防越流侵食に適用するためには、非粘着性土の侵食速度について、実用的な手法の検討を進めることが課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，2007。
- 2) 社団法人土木学会：「耐越水堤防整備の技術的な実現性の見解」について、耐越水堤防整備の技術的な実現性検討委員会報告書，2008。
- 3) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書－解説編－，土研資料2074号，1984。
- 4) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書－資料編－，土研資料1761号，1982。
- 5) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書－資料編（Ⅱ）－，土研資料2050号，1984。
- 6) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所：一関遊水地堤防の耐力に係わる水理実験報告書，1994。
- 7) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所：堤防の耐力に係わる水理実験実施解析検討業務報告

- 書, 1995.
- 8) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所: 堤防の耐力試験に関する調査業務報告書, 1996.
 - 9) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所: 平成19年9月洪水による堤防越流実験結果について, 国土交通省東北地方整備局管内技術研究発表, 2008.
 - 10) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所: 堤防浸透越流実験について - 今後の堤防設計・管理に向けて -, 国土交通省東北地方整備局管内技術研究発表, 2008.
 - 11) 独立行政法人土木技術研究所寒地土木研究所: 十勝川千代田実験水路における横断堤を用いた正面越流破堤実験, 寒地土木研究所月報 No.670, 2009.
 - 12) 島田友典・渡邊康玄・横山 洋・辻 珠希: 千代田実験水路における横断堤越水破堤実験, 水工学論文集, 第53巻, pp.871-876, 2009.
 - 13) 村本嘉雄: 洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究, 自然災害特別研究成果, 1986.
 - 14) Powledge, G.R. et al; Mechanics of overflow erosion on embankment. I, Journal of Hydauric Engineering, ASCE, Vol.115, No.8, pp1040-1055, 1989.
 - 15) Powledge, G.R. et al; Mechanics of overflow erosion on embankment. II, Journal of Hydauric Engineering, ASCE, Vol.115, No.8, pp1056-1075, 1989.
 - 16) 後藤仁志・林 稔・織田晃治・酒井哲郎: 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, 2002.
 - 17) 藤澤和謙・村上 章・西村伸一・玖珠隆行: 土の侵食速度を用いた堤体の越流破堤解析, 土木学会論文集A2, Vol.68, No.2, pp.1103-114, 2012.
 - 18) Van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of American Journal, Vol.44, PP.892-898, 1980.
 - 19) 長田信寿・細田 尚・村本嘉雄・中藤達昭: 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, II-56, pp.21-34, 2001.
 - 20) Nakagawa, H., Utumi, T., Kawaike, K., Baba, Y. and Zhang, H.: Erosion of unsaturated river embankment due to overtopping water, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.55, SK-1-K4, 2011.
 - 21) 中川博次・辻本哲郎・村上正吾: 側壁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, 1985.
 - 22) Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W: Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, Canadian Geotechnical Journal, Vol.33, No.3, pp.379-392, 1996.
 - 23) Egiazaroff, I.V: Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proceeding of ASCE, Vol.91, No.HY4, pp.225-247, 1965.
 - 24) Tingsanchali, T. and Chinnarasri C.: Numerical modeling of dam failure due to overtopping, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, Vo.46, No.1, pp.113-130, 2001.
 - 25) Wang, Z. and Bowles, D., S.: A numerical method for simulating one-dimension headcut migration and overtopping breaching in cohesive and zoned embankments, Water Resources Research, Vol.43, W05411, pp.1-17, 2007.
 - 26) Yamagami, T. and Ueta, Y.: 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, No.4, pp.8-16, 1986.
 - 27) Baker, R.: Determination of the critical slip surface in slope stability computations, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.4, pp.333-359, 1980.
 - 28) Tingsanchali, T. and Chinnarasri C.: Numerical modeling of dam failure due to overtopping, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, Vol.46, No.1, pp.113-130, 2001.
 - 29) Wang, Z. and Bowles, D., S.: 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, 2007.

(投稿受理:平成25年8月16日
訂正稿受理:平成25年12月26日)