第Ⅱ部門

越流による不飽和堤体の侵食に関する研究

京都大学大学院工学研究科	学生員	○内海崇晴
京都大学防災研究所	正会員	中川一
京都大学防災研究所	正会員	川池健司
京都大学防災研究所	正会員	馬場康之
京都大学防災研究所	正会員	張浩
京都大学大学院工学研究科	学生員	又賀俊匡

<u>1. はじめに</u>

河川堤防は住民の命や資産を洪水から防御する重要な防災 構造物である。しかし、堤防は嵩上げや腹付けを繰り返して きた背景を持つため、その内部土質構造は複雑かつ不明瞭で あり、破堤現象に関する研究の蓄積はまだまだ不十分な段階 であると考える。

本研究では、堤防決壊の主原因として多くの事例が報告さ れている越流侵食現象に主眼を置く。不飽和堤体土の侵食に 大きく影響を与えると考えられるサクションの影響を考慮 し、新たな侵食速度式を用いた数値計算を行った。計算結果 は模型堤防を用いて行った実験結果と比較し、侵食速度式の 妥当性を検証する。

2. 実験による検討

本研究における水理実験は、京都大学防災研究所宇治川オ ープンラボラトリーにある長さ5m、幅30cm、高さ50cmの 実験水路も用いた。水路の側面はアクリル製になっており、 側面から実験を観察した。堤防模型は水路上流側を堤外地、 水路下流側を堤内地と見立てて図1の様に単一砂を用いて作 成した。堤体は堤高40cm、天端幅35cm、法面勾配を2割と し、裏法尻が下流端と一致するように作成した。堤外地側か ら一定流量7.84(l/s)を与え、堤体が越流侵食される様子を水 路側面より観察する越流侵食実験を行った。表1に各実験ケ ースを示す。各実験ケースの結果は、越流侵食計算結果と共 に後ほど示す。



表1 越流侵食実験・計算ケース

ケース	堤体材料	透水係数(m/s)	50%粒径(mm)
F6	硅砂6号	2.15E-04	0.239
F7	硅砂7号	8.75E-05	0.123
F8	硅砂8号	1.56E-05	0.0644

<u>3. 数値計算による検討</u>

<u>3.1 越流侵食計算の基礎式</u>

ここでは、堤防越流を移動床上の流れと考えて、以下の1 次元河床変動に対する基礎式を用いる¹⁾。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial u M}{\partial s} = gh\sin\theta - \frac{1}{\rho_m}\frac{\partial P}{\partial s} - \frac{\tau_b}{\rho_m}$$
(1)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial s} = \frac{E_r}{c_*} \left\{ c_* + \left(1 - c_*\right) s_b \right\} - q_{pe}$$
(2)

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cM}{\partial s} = E_r \tag{3}$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{Er}{c_*} = 0 \tag{4}$$

式(1)は浅水流を仮定した運動量保存式、式(2)は水と流砂を 含めた流動部分全体の連続式であり、式(3)はそのうち流砂の 実質部分に関する質量保存式、並びに式(4)は河床材料の保存 則として河床変動を表す式である。ここで、sは河床に沿っ た軸であり、hは河床s軸から垂直に測った水深、uは断面 平均流速、 $\sin\theta$ は局所的な法面勾配である。Pは全水圧を表 し、cは流体中における個体成分の濃度、 ρ_m は流送されてい る個体成分も含めた流体の密度である。また、 s_b は河床材料 の飽和度、 q_{pe} は越流水が法面を流下する途中で法面に浸透す る量である。そして、 z_b は基準面からの河床位、c*は河床に おける土砂濃度である。底面せん断力 τ_b にいては江頭²の研 究を参考とした。

Takaharu UTSUMI, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, Yasuyuki BABA, ZHANG and Toshimasa MATAGA

3.2 侵食速度式について

本研究では不飽和土のせん断強度特性に注目する。 Vanapalli ら及び軽部らを参考にサクションによる粘着力増 分 *A*t を以下のように表す。

$$\Delta \tau = \left(u_a - u_w\right) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \tan \phi' = \rho_w g |\psi| \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \tan \phi' \tag{5}$$

ここで、 $u_a - u_w$ は間隙空気圧と間隙水圧の差でありサクション、 θ は体積含水率、 θ_r 及び θ_s は保水性試験から得られる 堤体材料固有のパラメータ、 φ 'は飽和土における内部摩擦角、 ψ は圧力水頭である。図2に式(5)の関係を示す。





式(5)を高橋による侵食速度式に組み込むことにより、以下 の侵食速度式 E_r と平衡濃度 c'_* が得られた。ここで、 K_T は係 数であり、本研究ではすべての計算ケースにおいて、 $K_T = 0.05$ と一定値を用いる。これらを用いて表1に示した条件で越流 侵食計算を行う。

$$c'_{\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta - \Delta \tau / gh \cos \theta}{(\rho_s - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)}$$
(6)
$$\frac{E_r'}{c_*} = \sqrt{gh} K_T \sin^{3/2} \theta^{1/2} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1\right) (c'_{\infty} - c) \frac{h}{d_s}$$
(7)
$$\times \left\{ 1 - \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_m} c \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1\right) - \frac{\Delta \tau}{\rho_m gh \sin \theta} \right\}$$
(6)

4. 実験結果と計算結果の比較

図3に計算結果と実験結果の比較を示す。越流侵食実験では、粒径が小さいほど侵食が速く、侵食面の勾配がより急になることを確認した。越流侵食計算においても、同様の傾向を再現できている。しかし、F6の計算結果は実験結果よりも侵食の進行が速くなった。F6の計算結果と実験結果の差の原因としては、式(5)のサクションによる粘着力増分 Δτ が影響を与えていると考える。本研究においては、越流侵食計算と同時に堤体内の浸透流計算も行っている。そのため、堤体の浸透が進行するほどは小さな値をとる。また、硅砂6号は透水係数が大きいこと及びサクションによる粘着力増分

Δτの最大値が硅砂7号、硅砂8号よりも小さい。計算ケース F6では浸透の進行が速く、サクションによる粘着力増分Δτ の値が小さいため、侵食が速く進行したと考える。式(5)はサ クションが増加するに伴いせん断強度が増加することを表 した式であり、堤体への浸透によるサクション低下によりせ ん断強度が減少するという現象を表していないことも考え られる。サクションを除荷する過程においての不飽和せん断 試験を行い、式(5)の適用性の確認が求められる。



5. 結論

本研究では、不飽和土のせん断強度特性式(5)を組み込むこ とにより、不飽和堤体の越流侵食計算に用いる侵食速度式を 新たに提案し、堤防模型を用いた越流侵食実験結果と計算結 果を比較した。計算結果では、粒径が小さいほど侵食面勾配 が大きく侵食速度が遅いという実験結果を再現することが できた。しかし、硅砂6号を用いた計算結果は実験結果より 侵食の進行が速かった。サクションを除荷する過程において の不飽和剪断試験を行い、式(5)の適用性の確認が求められる。

参考文献

- 伊藤直樹:越流による河川堤防の破壊現象に関する研究、 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士論文、 2007.
- 江頭進治:土石流の流動機構と氾濫・堆積域の解析-基礎
 理論からハザードマップまで-、水工学シリーズ 99-A-6、
 1999.7.