

越水によって集中的に生じる堤体侵食の数値解析

Numerical analysis of concentrated erosion on embankments due to overflow

○藤澤和謙*, 西村伸一*, 珠玖隆行*, 村上 章**

K. Fujisawa, S. Nishimura, T. Shuku, A. Murakami

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨時に防水や利水を目的とする堤防やため池等の土構造物が決壊に至る事例が多く報告されており、その主要な原因として越水が挙げられる。越流による堤体の決壊過程を十分に把握し、効果的な越流対策を施すことが求められるが、その際には、堤体の侵食過程を予測するための数値解析手法が有効なツールとなる。堤体の侵食解析については、これまでにいくつかの手法が提案されている。しかし、越水によって集中的に生じる3次元的な破堤過程を表現したものは少なく、その安定性と再現性は検証されていないのが現状である。そこで、本研究では、堤体の3次元的な越流侵食過程を安定的にシミュレートできる数値解析手法の開発に取り組み、その手法の再現性について考察した。

2. 侵食速度と支配方程式

堤体が越流による侵食を受ける場合には、侵食によって水流に取り込まれた堤体土の粒子は瞬時に下流へと運ばれるため、そのほとんどは堤体上で再び堆積することはない。したがって、侵食速度 E を用いて、堤体表面高さ η の時間変化は以下の式で与えることができる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{E}{1-\lambda_p}, \quad E = \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma \quad (1)$$

ここに、侵食速度 E は底面せん断応力 τ の関数であることが知られている。式(1)に現れる τ_c は限界せん断応力、 α と γ は材料定数である。この底面せん断応力と侵食速度の関係は粘着性の材料だけでなく、非粘着性の材料についても適用することができる。均一な砂の場合には、限界せん断応力 τ_c の値は粒径の大きさによって、大凡決定される。堤体上の越流水の流れは、以下に示す浅水流方程式に従うとする。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(\partial \eta / \partial x + S_{fx}) \\ -gh(\partial \eta / \partial y + S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、 u と v はそれぞれ x 方向、 y 方向の流速、 h は水深、 g は重力加速度の大きさを表す。式(2)中の S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ x 方向、 y 方向の摩擦勾配であり、マンニングの粗度係数 n を用いると以下のように表される。

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

また、摩擦勾配を用いて底面せん断応力 τ は

$$\tau = \rho g h \sqrt{S_{fx}^2 + S_{fy}^2} \quad (4)$$

と表される。式(4)から底面せん断応力を求め、侵食速度 E を評価する。式(1)と式(2)が表面流による侵食を記述する支配方程式であり、未知数は流速 u 、 v 、水深 h 、地表面の高さ η の4つとなる。

3. 数値解析手法

式(2)の浅水流方程式を解くに当たっては、表面流のない領域 (Dry 領域) と表面流のある (Wet 領域) とを安定的に解析可能なリーマンソルバーを用いた有限体積法を適用した。解析手法には、

*岡山大学大学院 Okayama University, **京都大学大学院 Kyoto University

Key Words: 堤体, 越流, 侵食, 浅水流方程式

Yoon & Kang (2004) によって提案された計算手法¹⁾に、Zhou et al. (2001) による SGM (Surface Gradient Method)²⁾ の概念を導入した。式(2) の左辺の第 2, 3 項であるフラックス項と同式右辺のソース項とのバランスが崩れることが原因となり、侵食によって地表面の勾配が複雑に変化する箇所においては、流速が小さい場合に計算が破綻することが確認された。この数値計算上の不安定性を解消するため、Zhou et al. (2001) によって提案された SGM を非構造計算格子へと拡張して導入し、式(1)と式(2)を連立して数値計算を行ったものが、本論で適用した解析手法である。

4. 数値解析結果

堤防やため池の越流侵食では、越流初期には広範囲に渡って水が溢れだすものの、侵食が進むにつれて流れが集中し、破堤幅となる流路が形成される。侵食による集中流の発現を再現するには、侵食によって変化する地表面形状に合わせて、Dry/Wet 領域の水流と地表面の変化を首尾よく計算できるかどうか重要な課題となる。図 1 には解析に用いた初期条件および境界条件を示す。堤体の天端には、中央部に深さ 2cm の窪みを設け、水流が堤体中央部に集中するように意図した。図 1 に示す越流水の初期水面形は流入側の境界

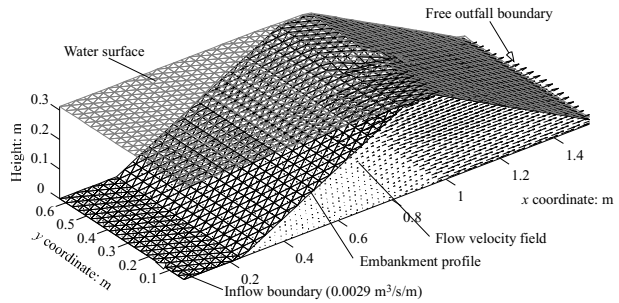


図 1 堤体形状の初期条件と初期水面形

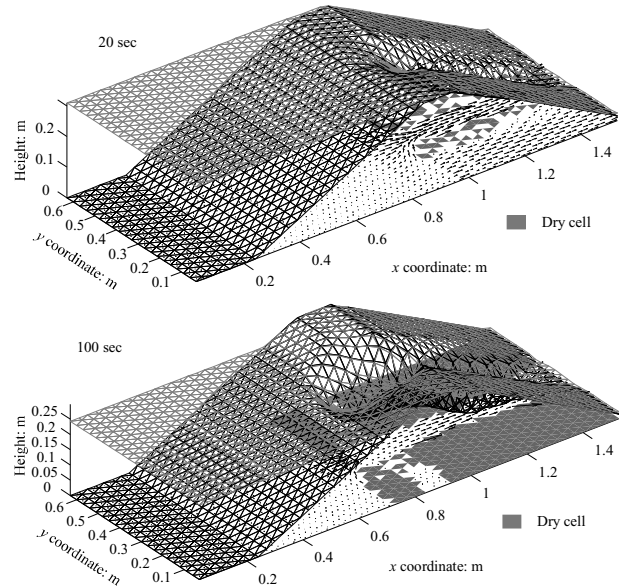


図 2 侵食による堤体形状の変化(20 秒後と 100 秒後)

条件として与えた $0.0029 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の流量が堤体上を流れる時の定常解を採用した。計算に当たって、間隙率には 0.395 、堤体の侵食特性には $\tau_c = 0.1 \text{ Pa}$ 、 $\alpha = 8.42 \times 10^{-5} \text{ m/s}/\text{Pa}^{3/2}$ 、 $\gamma = 1.5$ 、マンニングの粗度係数には 0.0158 を仮定した。図 2 に 20 秒後及び 100 秒後の数値解析結果を示す。これらの図の xy 平面には、流速分布の矢印プロットを示し、Dry と判定されたセルを灰色で塗りつぶしてある。図 2 から、越流侵食開始時 (20 秒後) には、天端の窪みによって、流速が大きな下流側斜面の中央付近で侵食が卓越する。水流と侵食が卓越する付近の脇には、少しであるが Dry と判定されるセルが出現している。侵食開始の 50 秒後になると、下流側斜面の流れは完全に中央部へと集中し、下流側斜面のその他の箇所は Dry となった。100 秒後には、集中流による侵食が堤高を減少させ、堤体上流側の水面が低下していく様子が見てとれる。水面の低下によって堤体の上流側斜面においても Dry セルが増加していき、600 秒後にはほぼ侵食も治まる結果となった。以上の数値結果は、自然な侵食過程を再現しており、提案した数値解析手法によって、侵食に伴う集中流の発展や流路の形成を首尾よく計算できることが分かる。

参考文献 1) Yoon & Kang: Finite volume model for two dimensional shallow water flows on unstructured grids, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.130, No.7, pp.678–688, 2004. 2) Zhou et al.: The surface gradient method for the treatment of source term in the shallow-water equations, *Journal of Computational Physics*, Vol.168, pp.1–25, 2001.