

静水圧条件下における堤体越流侵食過程の再現手法の検討

新潟大学理学部理学科

新潟大学大学院自然科学研究科

新潟大学災害・復興科学研究所

学生会員

正会員

○仮澤 広晃

大泉 尚紀

安田 浩保

1 はじめに

河川堤防が決壊に至る要因は様々であるが、近年では特に計画高水位を越えた洪水が堤防を越流して裏法面を侵食する越流破堤が頻発している。越流による堤体の侵食が主要因となり破堤する事例が千曲川をはじめとした各地の河川で多発している。しかし、越流から破堤に至る過程での堤体の侵食メカニズムは、その実測が十分にできないことが要因の一つとなり、十分な解明はなされていない。

越流侵食の進行過程における堤体の断面形状の変化は土砂輸送によって生じる。この変化を記述する土砂輸送モデルとして、河床変動を掃流砂の流砂量から記述するモデルや、土の侵食速度に基づき記述するモデル等が候補に挙げられる。しかし、堤体の断面形状の変化における土砂輸送についての詳しいことは不明であり、現状では土砂輸送モデルの合理的な選定は不可能である。また、堤体の断面形状は天端および川裏部と裏法面の間で底面勾配の急変が伴い、特に裏法肩と法尻の部分では流線の曲率が大きくなり、非静水圧性が顕著となることが知られている¹⁾。しかしながら、このような局所的に生じる非静水圧性が堤体侵食の進行過程の全体に対してどのような影響を及ぼすかについても不明である。

これらを踏まえると、堤体侵食の進行過程を記述し得るモデルの構成として、土砂輸送のモデルには掃流砂型、または侵食速度型のモデルの2つと、流れのモデルとして静水圧、非静水圧型のモデルの2つによる、合計4つの組み合わせが考えられる。前述した通り、非静水圧性が顕著となるのは流線の曲率が大きくなる箇所であり、堤体侵食の過程全体の一部である。また、静水圧近似の流れのモデルの数値解析によって堤体の侵食過程をどれほど再現できるかについての検討例は少ない。そこで、本研究では、流れには静水圧近似のモデルを用い、土砂輸送モデルについては掃流砂型、侵食速度型のモデルそれぞれを用いて数値解析を行い、侵食過程の再現がどのように異なるか調べた。

2 数値解析手法

2.1 流れのモデル

本研究では、静水圧近似を用いた流れのモデルとして式(1)、(2)で表される一次元浅水流方程式を適用する。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 M |M|}{D^{5/3}} = 0 \quad (2)$$

ここに、 M は流量フラックス、 H は水位、 D は水深、 g は重力加速度、 n はManningの粗度係数を表す。

2.2 土砂輸送のモデル

土砂輸送モデルに適用する掃流砂型モデルは式(3)で表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここに、 z は底面位、 λ は間隙率、 q_B は掃流砂量である。流砂関数には式(4)に示すMeyer-Peter・Müller式を採用した。

$$q_B = 8(\tau - \tau_c)^{3/2} \sqrt{sgd^3} \quad (4)$$

ここに、 τ はせん断応力、 τ_c は限界せん断応力、 s は砂粒子の水中比重、 d は粒径を表す。限界せん断応力 τ_c は岩垣の式²⁾から算出した。

一方、侵食速度型のモデルは式(5)で表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{E}{1-\lambda} = 0 \quad (5)$$

ここで、侵食速度 E はせん断応力 τ の関数であり、既往の研究³⁾によれば、式(6)のように与えられる。

$$E = \begin{cases} \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 α および γ は材料定数である。

また、本研究では越流水による堤体侵食過程を土砂輸送による底面の変動のみによって記述するものとし、堤体内への浸透流やすべり崩壊等を考えないものとする。ただし、これらを考慮する必要性を否定するものではない。

2.3 計算条件

計算領域には長さ 100(m) と奥行き 1(m), 空間の離散間隔 $\Delta x = 1.0$ (m), 時間の離散間隔 $\Delta t = 0.0001$ (s) を設定した。堤体上流側の境界条件には単位幅流量 0.50 (m^3/s) を与え, 下流端境界条件には等流水深を与えた。材料定数には $\alpha = 5.0 \times 10^{-5}$ ($m/Pa/s$), $\gamma = 1.5$ を仮定し, 間隙率を 0.4, Manning の粗度係数を 0.02 とした。図-1 に初期条件 (堤体の初期形状 & 初期水面) を示す。初期水面は底面を固定床とした条件での計算により求めた。

3 解析結果

3.1 解析結果

図-2 は越流侵食開始 1 分後, 図-3 は 5 分後の解析結果である。両図中の緑線は土砂輸送モデルを掃流砂型とした場合 (Case1), 赤線は侵食速度型とした場合 (Case2) の底面位をそれぞれ示し, 黒色の点線は初期の底面位を表す。なお, 紙面の都合上, 表示区間を 40m~90m としてある。

掃流砂型モデルを用いた Case1 では, 侵食開始 1 分の時点で裏法肩が大きく削られ, 裏法尻では対照的に堆積と考えられる底面位の上昇が起こっている。さらに, 侵食開始 5 分後では天端部が大きく崩れ, 初期の堤体形状から大きく変動した結果となった。一方で侵食速度型モデルを用いた Case2 では, 侵食開始 1 分の時点では初期形状を概ね保っている。侵食開始 5 分後では, 裏法面から法尻にかけて底面位が洗掘されるような侵食過程となった。

3.2 考察

一般的に, 越流による堤体の侵食は, 堤体の裏法尻, 法面で表層が大きく削られる⁴⁾。近年の被災事例では, その進行過程の実測値が存在しないため, 想像の域を脱しないが, 越流水によって川裏法尻部で洗掘され, 侵食が進行して決壊に至っていると考えられている。しかし, 前章で述べた掃流砂型モデルを用いた緑線で示した Case1 の結果は, このような侵食プロセスとは乖離しており, 裏法面ではむしろ底面位が上昇している。河川のような漸変流に適用される掃流砂型モデルは, 急勾配かつ勾配の急変を伴う流れの場合は想定されないため, 掃流砂型モデルによる侵食過程の記述は有効でない可能性がある。

一方で侵食速度型のモデルを用いた赤線で示した Case2 の結果は, 静水圧の条件下ではあるが, 裏法面, 法尻の洗掘という点で再現性がある。侵食速度型モデルは侵食によって流れに取り込まれた土粒子の再堆積を無視した前提を用いており, 流速が大きくなる裏法面での土砂流出の記述としては有効となると考えられる。しかし, Case2 の結果は

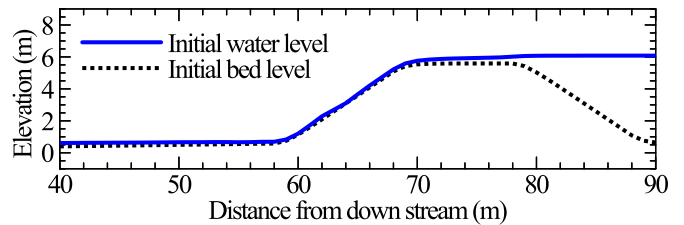


図-1 初期条件 (t = 0 s)

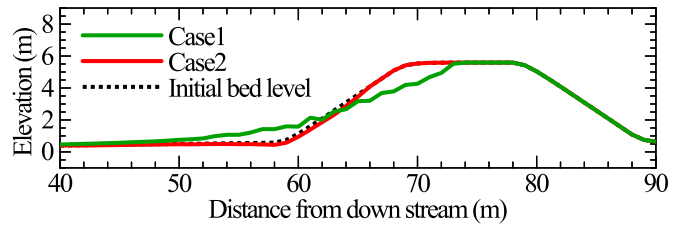


図-2 底面位 (t = 60 s)

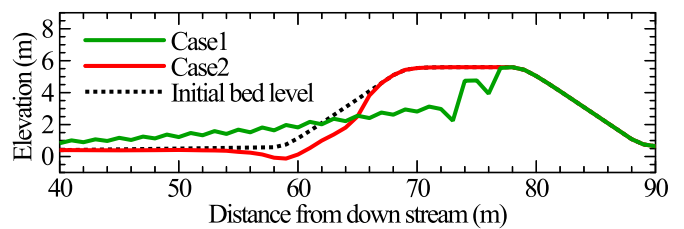


図-3 底面位 (t = 300 s)

天端部の底面変動が乏しく, この点についての検討は今後の課題としたい。

4 おわりに

本研究では, 堤体上を流れる越流水に静水圧を仮定した浅水流方程式を用いて, 異なる 2 つの土砂輸送モデルによって堤体越流侵食解析を行い, 侵食過程の差異を調べた。その結果, 侵食過程の再現における侵食速度型モデルの有効性が示唆された。また, 静水圧の仮定においても, 実現象に見られる堤体の越流侵食プロセスの再現可能性を示した。

今後は, 流れに非静水圧性を考慮したモデルを用いて越流侵食の数値解析を行い, 静水圧の仮定を用いた場合の解析結果との差異を調べる予定である。

参考文献

- 1) 本田隆英, 小俣哲平, 織田幸伸, 伊藤一教: 津波越流時の海岸堤防に生じる局所圧力に関する固定床水理実験, 土木学会論文集 B3(海岸開発), Vol.72, No. 2, I.539-I.544, 2016.
- 2) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21, 1956.
- 3) Gary Parker, Norihiro Izumi: Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 419, pp. 203-238, 2000.
- 4) たとえば, 千曲川堤防調査委員会: 千曲川堤防調査委員会報告書, 2020.