

浸透流を考慮した非静水圧・非平衡1次元洪水流・河床変動モデルによる 越流侵食破堤解析と遠心模型実験に基づく検証

九州工業大学大学院 学生会員 ○高橋 快吏・正会員 重枝 未玲

1. はじめに

近年、洪水被害の軽減を目的に粘り強い河川堤防の整備が進められている¹⁾。遠心模型実験は、実地盤応力状態が再現可能であるため、同実験の結果に基づく数値解析モデルの検証は実現象の再現性を示す上で重要と考えられる。本研究は、以上のような背景を踏まえ、浸透流を考慮した非静水圧・非平衡1次元河床変動解析モデルを新たに構築するとともに、越流破堤の侵食プロセスの遠心模型実験²⁾に適用することで、その再現性と適用限界について検討したものである。

2. 解析モデルの概要

浸透流を考慮した非静水圧・非平衡1次元河床変動モデルは、著者ら³⁾が開発した非静水圧・非平衡1次元河床変動モデルに、以下の①,②の改良を実施したモデルである。①浸透流解析モデルを導入し、地表面流と地中流での水のやり取りを考慮。②河床材料の粘着力 c と安息角 ϕ 、地中流水位を考慮した崩落モデルを導入。以下では、その概要について述べる。図-1にモデルに用いられる記号の定義図を示す。

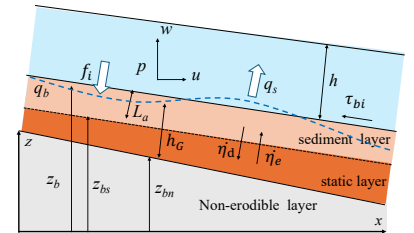


図-1 記号の定義図

同モデルの基礎方程式は、式(1)の水深平均された連続の式と運動方程式、半水深を原点とした運動方程式の重み付き残差方程式、式(2)の半水深を原点とした連続の式の重み付き残差方程式、式(3)、(4)の水面、底面での運動学的条件である。同方程式は、式(5)~(7)のx方向流速 u 、z方向流速 w 、圧力 p の水深方向分布を用いて、鉛直2次元の連続の式とReynolds方程式と半水深位置 \bar{z} を原点とする両式のモーメントを水深積分することで得られる。鉛直方向の断面平均流速 W は、 w_b 、 w_s 、 w'_2 を用いて式(8)のように表される。地表面流と地中流との水のやりとりは、行列 R 中の地表面から土壌への浸透流量 f_i と土壌から地表面への滲出流量 q_s で考慮する。その際、水のやり取りに伴う運動量交換も考慮されている。非平衡河床変動モデルの基礎方程式は、式(9)の流砂の連続の式と式(10)の流砂層の連続の式である。式(11)で貯留層と流砂層の境界位置を、式(12)、(13)で堆積速度、侵食速度を、式(14)で平衡状態の流砂層厚を、式(15)で単位幅流砂量を、無次元限界掃流力 τ_{*cp} の評価には、式(16)のように圧力勾配の影響を考慮した。浸透流解析モデルの基礎方程式は、式(17)に示す自由水面地下水流の連続の式と式(18)に示すダルシー則から導かれた運動の式である。滲出流量 q_s と浸透流量 f_i は、式(19)と式(20)より求める。斜面崩落モデルには、河床材料の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ および地中流水位から限界高さを算定し、隣接セルとの河床位差が限界高さを超えた場合に斜面崩落させ、河床位差を限界高さとするモデルを用いた。単位幅流砂量 q_b には、河床位差が限界高さを超えないように制限を設けている。

非静水圧・非平衡1次元洪水流モデル

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = M + S + P \quad (1)$$

$$h \cdot \frac{\partial z_b}{\partial t} - h/2 \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (u' \cdot h^2/6h \cdot \frac{\partial \bar{z}}{\partial x}) = Wh \quad (2)$$

$$w_s = \frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{\partial U}{\partial x} + u_s \cdot \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} \quad (3), \quad w_b = \frac{\partial z_b}{\partial t} + u_b \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (4)$$

$$u = U + u'(2\eta - 1) \quad (5), \quad w = w_b(1 - \eta) + w'_2 4\eta(1 - \eta) + w_s \eta \quad (6)$$

$$p = \rho g (h + h'_b)(1 - \eta) + \rho g h'_s 4\eta(1 - \eta) \quad (7), \quad W = 1/2 \cdot w_b + 2/3 \cdot w'_2 + 1/2 w_s \quad (8)$$

$$U = \begin{pmatrix} \frac{h}{U} \\ \frac{h}{Wh} \\ \frac{u'}{u'h} \end{pmatrix}; M = \begin{pmatrix} 0 \\ -1/3 \cdot \frac{\partial u'^2}{\partial x} \\ -u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x} \\ M_5 \end{pmatrix}; P = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} (1/2 \cdot g h'_b h + 2/3 \cdot g h'_s h) / \rho - g h'_b \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ g h'_b \\ -g h'_b/2 \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + g h'_2 \cdot \frac{\partial h'_s}{\partial x} - 4g h'_2 \cdot \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} \\ 8g h'_2 \end{pmatrix};$$

$$E = \begin{pmatrix} \frac{U^2 h}{UWh} \\ \frac{U u' h}{U u' h} \\ \frac{U u' h}{U u' h} \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} q_s - f_i \\ U(q_s - f_i) \\ W(q_s - f_i) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} 0 \\ -g h \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} - g h S_f \\ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\tau}_{xz}/\rho \cdot h) - g h S_f \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} - \sigma_{zb}/\rho \\ 3g h S_f - 6 \cdot \bar{\tau}_{xz}/\rho \\ S_5 \end{pmatrix}$$

$$M_5 = u' \cdot h \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + 24/45 \cdot \frac{\partial w'_2 u' h}{\partial x} - 2u' \cdot h \cdot \frac{\partial W}{\partial x} - u' \cdot u' \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$S_5 = -2u' \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} + w^2 - 6g h S_f \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} + 12 \cdot \bar{\tau}_{xz}/\rho \cdot \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} + 6 \cdot \sigma_{zb}/\rho - 12 \cdot \bar{\sigma}_z/\rho$$

$$w' = w_s - w_b, \quad w^2 = w_s^2 - 2w_s w_b + w_b^2 + 48/45 \cdot w'_2 \cdot \tau_b/\rho = g h S_f, \quad \sigma_{zb}/\rho = 2g h S_f \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$\bar{\tau}_{xz}/\rho = k/6 \cdot \sqrt{g h |S_f|} \cdot h \cdot (2u'/h), \quad \bar{\sigma}_z/\rho = 2 \cdot k/\rho \cdot \sqrt{g h |S_f|} \cdot h \cdot (w_s - w_b)/h$$

$$S_f = n^2 (U_{nu}^2 + W^2) / h^{4/3} \text{sgn}(U_{nu}), \quad U_{nu} = \{1 + 3(2k) \sqrt{g n^2 / h^{1/3}}\} U - u'$$

U : x方向の水深平均流速, u' : 流速 u の偏差成分, w_b : 底面での流速, w_s : 水面での流速, w'_2 : 半水深の流速 w の偏差成分, p : 圧力, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, h : 水深, h'_b : 底面での偏差成分, h'_s : 半水深での偏差成分, $\eta = (z - z_b)/h$, z_b : 河床位, $\text{sgn}(a)$: a が正の場合には1を負の場合には-1を返す関数, n : Manningの粗度係数, k : カルマン定数(=0.41).

非平衡河床変動モデル

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + 1/(1-p) \cdot \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (9), \quad \frac{\partial L_a}{\partial t} + 1/(1-p) \cdot \frac{\partial q_b}{\partial x} = -1/(1-p) \cdot (\eta_d - \eta_e) \quad (10)$$

$$z_{bs} = z_b - L_a \quad (11), \quad \eta_d = k_d \cdot L_a/d \cdot \sqrt{sgd^3/d} \quad (12), \quad \eta_e = k_e \cdot \Delta \tau_e/\gamma_s \cdot \sqrt{sgd^3/d} \quad (13)$$

$$L_{av} = k_d/\gamma_s \cdot k_d \cdot \Delta \tau_e \cdot d \quad (14), \quad q_b/\sqrt{sgd^3} = L_a/L_{av} \cdot q_{beq}/\sqrt{sgd^3} \cdot \text{sgn}(u_b) \quad (15)$$

$$\tau_{*cp} = \tau_{*c} (k + \nabla P_b) \cdot (m + s/\mu_s) \quad (16),$$

$$k = (0.1), \quad P = (z_b + P/\rho)/s, m = 1/\sqrt{1 + (\partial z_b/\partial x)^2} \cdot (-\partial z_b/\partial x), \quad k_e \sim O(10^{-2}, 10^1)$$

$$k_d/k_e = 2-30, \quad \nabla P_b = (\partial P/\partial x)|_{z=z_b}, \quad \partial P/\partial z|_{z=z_b} = ((z_b + h + h'_b)/s, -(h - h'_b + 4h'_s)/s \cdot h)$$

γ_s : 河床材料の比重(= ρ_s/ρ), ρ_s : 河床材料の密度, s : 河床材料の水中比重($\gamma_s - 1$), $\Delta \tau_e = \tau_* - \tau_{*cp}$, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*cp} : 無次元限界掃流力, k_d : 堆積速度係数, k_e : 侵食速度係数.

浸透流解析モデル

$$\frac{\partial h_G}{\partial t} + 1/e \cdot \frac{\partial q_G}{\partial x} = 1/e \cdot (f_i - q_s) \quad (17), \quad q_G = -\Theta \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (18)$$

$$q_s = \begin{cases} \lambda_e (h_G + z_{bn} - z_b)/\Delta t & (H \geq z_b) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (19), \quad \Theta = \begin{cases} K_c \cdot h_G \cdot (h_G/d_c)^\beta & (0 \leq h_G \leq d_c) \\ K_c d_c + K_a \cdot (H - d_c) & (d_c < h_G) \end{cases}$$

$$f_i = \begin{cases} 0 & (H \geq z_b) \\ \lambda_c (z_b - H)/\Delta t & (f_p \cdot \Delta t \geq \lambda_c (z_b - H) \geq h) \\ h/\Delta t & (f_p \cdot \Delta t \geq h \geq \lambda_c (z_b - H)) \\ f_p & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (20), \quad H = \begin{cases} h + h_G + z_{bn} & (h_G + z_{bn} \geq z_b) \\ h_G + z_{bn} & (h_G + z_{bn} < z_b) \end{cases}$$

h_G : 地下水流の水深, f_i : 地表面から土壌への浸透流量, q_s : 土壌から地表面への滲出流量, z_{bn} : 基礎地盤の河床位, d_c (= $z_{bb} - z_{bn}$): 基礎地盤の河床位と固定床位の差, K_c, K_a : 水平方向の透水係数, f_p : 浸透能, $f_p = K_p$: 鉛直方向の浸透係数, λ_e : 空隙率.

3. モデルの検証

本研究で構築したモデルを、遠心模型越流破堤実験結果²⁾に基づき検証した。実験では、高さ2m、幅1mの実物大堤防を想定して、縮尺比1/20で、高さ45 mmの基礎地盤の上に、上流より40 mmの位置から法面勾配1:2、天端幅50 mm、堤体高さ100 mmとなる実験堤防が作成されている。遠心加速度は20gと設定されている。基礎地盤材料には、珪砂8号、堤体材料にDL-clay（非塑性シルト質土）と珪砂4号の混合土が用いられている。流量0.0428 L/sとして、越流破堤を発生させている。本研究では、珪砂4号とDL-clayの混合比が9:1のCase5の実験結果に基づき、モデルの検証を実施した。なお、堤体材料の内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c 、透水係数 K_E は、それぞれ $\phi = 38.0^\circ$ 、 $c = 1.64 \text{ kN/m}^2$ 、 $K_E = 8.41 \times 10^{-5} (\text{m/s})$ である。

解析では、図-2に示す遠心模型の堤体のスケールを20倍とした実物大堤防を対象とした。流量は、遠心模型実験の縮尺に合わせ、実験流量の400倍の流量を与えた。上流端境界条件には、天端での越流状態を実験と一致させるように、水深と流速を与えた。下流端境界条件には自由流出条件を与えた。基礎地盤・堤体の粒径には50%粒径を、粗度係数にはそれぞれ0.011、0.014(Case5) $\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ を与えた。流砂量式にはEngelund & Fredsøe⁴⁾を用いた。堆積速度係数 k_d と侵食速度係数 k_e は、0.01と0.30を用いた。

図-3に、Case5の越水直前の浸潤線の実験値と解析結果との比較を示す。遠心模型実験ではフルードの相似則が満たされる。また、侵食時間は実スケールの N 倍、浸透時間は N^2 倍となる。そのため、鉛直方向の透水係数 K_V には、実験値 K_E を N 倍した値を用いた。水平方向の透水係数 K_H には K_V の1.1倍を用いた。これは、 K_H が一般に K_V の1~1.1倍の範囲であることを踏まえ感度解析から決定した。図-3より、透水係数を N 倍した結果は再現精度が高いことが確認できる。このように、本モデルは、今回の土質条件には限定されるが、透水係数を適切に設定すれば、堤体内の浸透状況を再現可能なことが確認できる。

図-4に、Case5の河床位の実験値と解析結果との比較を示す。図中には越水前、 $t = 0.3\text{min}, 0.6\text{min}$ の浸潤線もあわせて示している。図-4 (a)には、粘着力 c を考慮した場合の解析結果を、図-4 (b)には粘着力 c を考慮しない場合の解析結果を示す。これらより、いずれの解析結果も、裏法面での破堤形状の再現性が低下しているものの、表法肩までの侵食時間を再現していることが確認できる。一方で、法尻周辺については、粘着力を考慮した場合、粘着力により斜面の崩壊が抑制されていること、粘着力を0とした場合には、粘着力を考慮したものに比べ侵食形状を再現できることが確認できる。これは、浸透状況により粘着力が変化していることを示唆しており、堤防越流侵食の再現には、浸透と越流による土質の変化を考慮する必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究から、浸透流を考慮した非静水圧・非平衡1次元河床変動解析モデルは越流破堤の侵食プロセスの遠心模型実験を、表法肩の侵食時間の再現していることが確認された。また、堤防越流侵食の再現には、浸透と越流による土質の変化を考慮する必要があると考えられる。

参考文献：1) 国土交通省国土技術総合研究所河川研究部河川研究室，国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ(土質・振動)：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料(案)，2023。2) 鬼丸颯人，川尻峻三，重枝未玲，前田健一，廣岡明彦：越水時の堤防侵食プロセスに及ぼす堤体土質の影響に関する遠心模型実験，河川技術論文集，第30巻，pp. 239-pp. 244，2024。3) 重枝未玲，山西威毅，川尻峻三，廣岡明彦：非静水圧・非平衡1次元河床変動解析モデルの改良と堤防越流と侵食実験への適用，土木学会論文集，Vol.82，No.16，25-16123，2026。4) Engelund, F. and Fredsøe, J.: A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. *Hydrology Research*, Vol. 7 (5), pp.293-306, 1976。

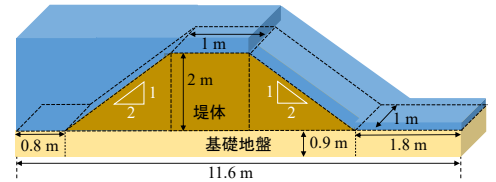


図-2 解析対象領域

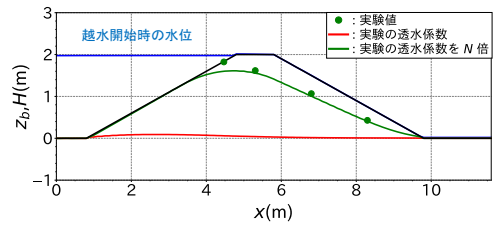
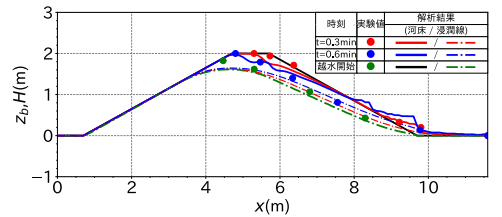
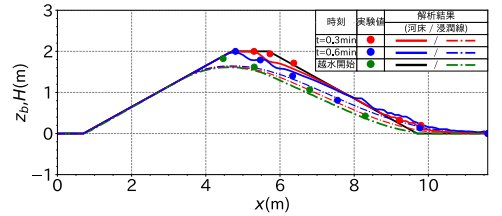


図-3 越水直前の浸潤線の実験値と解析結果との比較



(a) 粘着力を考慮した場合



(b) 粘着力を考慮しない場合

図-4 Case5の河床位の実験値と解析結果との比較