第 II 部門　　構造物の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション

京都大学大学院工学研究科　学生員　○東田遼
京都大学大学院工学研究科　正会員　音田慎一郎

1. はじめに

近年，局地的集中豪雨に伴う河川堤防の越流による決壊が発生しており，その対策として越流開始から堤防決壊までの時間を延ばすため，堤防を構造物で補強する粘り強い堤防が提案されている．本研究では，粒度分布による粘り強さを表現するため侵食係数を導入するとともに，掃流から浮遊への遷移を考慮した土砂輸送モデルを用いて構造物を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーションを行い，結果の妥当性を検証する．

2. 数値解析モデル

流れの基礎式は以下の通りである．

[連続式]

$$\frac{\partial(1-c)\Phi}{\partial t}+\frac{\partial(1-c)u_j\Phi}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\{(1-c)u_i\}+\frac{\partial}{\partial x_j}\{(1-c)u_iu_j\}=(1-c)g_i\\&-\frac{(1-c)}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\{-(1-c)\overline{u_i'u_j'}\}\\&+\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(1-c)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right\}-\frac{\nu(1-c)^2u_i}{K_d}\end{aligned} \tag{2}$$

ここに，t：時間，x_i：デカルト座標系，u_i：流速ベクトルのx_i方向成分，Φ：密度関数，c：固相の体積濃度，u_i'：乱れ速度ベクトル，p：圧力，ρ：流体の密度，ν：動粘性係数，g_i：重力加速度ベクトル，K_d：固有透水係数である．

河床変動モデル[1)]における流れ方向とその横断方向の掃流砂式，浮遊砂浮上量，および侵食係数は次式で表される．

[掃流砂量式・浮遊砂浮上量式]

$$q_r=aC_e(\tau_*-\tau_{*cr})^{\frac{3}{2}}\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}-1\right)gd^3} \tag{3}$$

$$q_{bs}=(1-r_{st})q_r \tag{4}$$

$$q_{bn}=q_{bs}\left(-\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s\mu_k\tau_*}}\frac{\partial z_b}{\partial n}\right) \tag{5}$$

$$q_{su}=\frac{a_s}{h_s}r_{st}\,q_r \tag{6}$$

[侵食係数]

$$C_e=p\left(\frac{U'_c}{{U_c}^2\tau_{*c}}\right)^q \tag{7}$$

ここに，q_r：主流（s）方向の全流砂量，q_{bs}：主流(s)方向の掃流砂量式，q_{bn}：横断(n)方向の掃流砂量，τ_*：無次元掃流力，τ_{*c}：無次元限界掃流力，τ_{*cr}：河床勾配と圧力勾配を考慮した無次元限界掃流力，ρ_s：砂粒子密度，ρ_w：水の密度，d：河床材料の粒径，r_{st}：全流砂量に対する浮遊砂の比，z_b：河床高，μ_s：静止摩擦係数，μ_k：動摩擦係数，q_{su}：浮遊砂の浮上量，h_s：掃流層厚，C_e：侵食係数，U_c：均等係数，U'_c：曲率係数，$a_s=0.1$，$p=0.2922$，$q=0.9768$である．

得られた流砂量式に対して座標変換を行い，次式より河床変動計算を行う．

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{1}{1-\lambda}\left\{\frac{\partial q_{bx}}{\partial x}+\frac{\partial q_{by}}{\partial y}+\left(q_{su}-w_fC_b\right)\right\}=0 \tag{7}$$

ここに，q_{bx}：x方向の流砂量，q_{by}：y方向の流砂量，λ：河床材料の空隙率，w_f：浮遊砂の沈降速度，C_b：Bottom Layer の浮遊砂濃度である．

式(3)は全流砂量であり，式(4), (6)より掃流砂と浮遊砂とに分配することで掃流から浮遊への遷移を考慮している．式(7)の侵食係数を式(3)に導

Ryo Higashida and Shinichiro Onda
higashida.ryo.45p@st.kyoto-u.ac.jp

入することで，粒度分布による侵食特性を表現し，一様粒径の砂質土から粒度分布を持つ粘性土まで同じ式で取り扱っている．

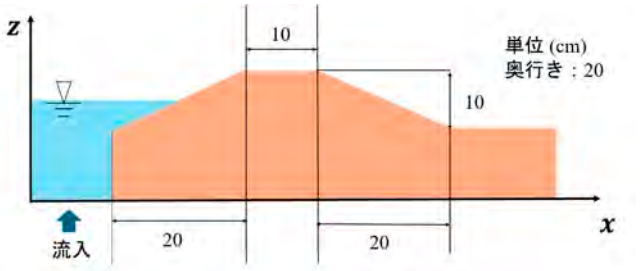


図 1 計算対象の概要

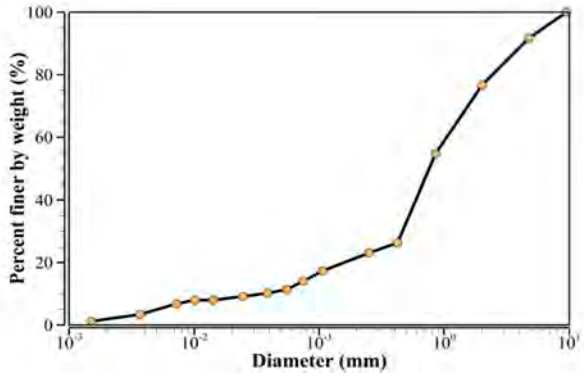


図 2 粒径加積曲線

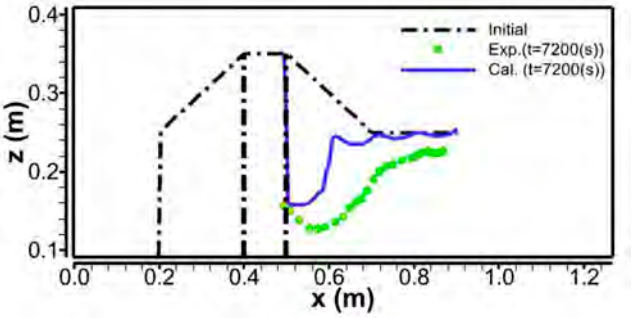


図 3 計算結果と実験結果[2)]の比較($t = 7200$s)

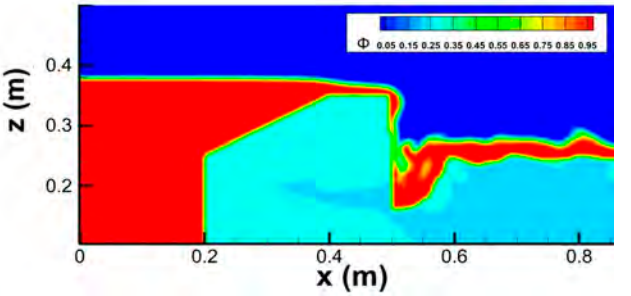


図 4 $t = 4800$s における流況

3. モデルの適用と結果の考察

数値解析モデルを天端と堤防壁面に構造物を設置した堤防の越流侵食実験に適用した[2)]．実験の概略図を**図 1** に示す．堤体材料には**図 2** に示す粒径分布を持つ粘性土を用い，これをもとに，計算では平均粒径を 0.75 (mm), 均等係数U_cを 26.3, 曲率係数U_c'を 5.8 とした．流入流量は 0.0016 (m^3/s)である．計算格子は$\Delta x = 0.005$ (m)，$\Delta y = 0.067$ (m)，$\Delta z = 0.005$ (m)とし，格子数は主流，横断，鉛直方向に 180，3，80 とした．また，計算時間間隔は$\Delta t = 0.0005$ (s)とした．

図 3 に平衡状態に達したと見られる$t = 7200$ (s)での堤体形状の実験結果との比較を示す．裏法肩真下($x = 0.5(m)$)を見ると洗掘深がおおむね実験結果と一致したことが確認できる．しかし，裏法面全体で見ると，計算結果は実験結果における侵食形状を十分に再現できていない．計算結果では洗掘孔が裏法肩真下($x = 0.5(m)$)に生じた一方で，実験結果では裏法肩からやや離れた位置($x = 0.55$~$0.6(m)$)に形成されている．これは，本研究で用いた流れのモデルでは堤防の裏法肩からの水の飛び出しが適切に再現されておらず，**図 4** のように越流した水が壁体をつたい，水衝部が実験とずれてしまったためと考察される．

4. おわりに

本研究では，堤体材料の粒径分布による粘り強さと掃流から浮遊への遷移を考慮して，構造物を設置した堤防の越流侵食に関する数値解析を行った．侵食係数の導入によって粘性土堤防であっても砂質土堤防と同様の扱いで数値解析を行うことができたが，水衝部の位置の違いによる洗掘形状に違いがあるため，今後，モデルの改良について検討したい．

参考文献

1) 音田慎一郎，南野 仁，肥後陽介：掃流から浮遊への遷移を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション，土木学会論文集，Vol.82, No.16, 25-16200, 2026.

2) 室昂弥，肥後陽介，音田慎一郎：堤防越流時に堆積する砂礫群による洗掘抑制効果に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.82, No.16, 25-16124 , 2026.