

細粒分を含む堤体模型への浸潤状態に着目した河床変動解析の適用

埼玉大学 学生会員 ○小倉 睦

埼玉大学大学院 (兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター 正会員 八木澤 順治

1. 背景及び目的

2016年8月に台風10号に伴う記録的な大雨により、岩手県岩泉町の小本川、北海道の石狩川が氾濫し、周辺地域に甚大な被害を及ぼした。近年、局地的な大雨の増加による洪水氾濫被害が頻発している。また、河川氾濫において多くは河川堤防の破堤を伴っており、それにより堤内側地域のより広範囲に被害が及ぶこととなる。日本で発生する破堤原因の約7割が越流による堤体浸食が原因であるとされている。したがって、堤体における越流による破堤に対する強化対策、リスク評価及び管理は緊急の課題である。それらを行う上で、堤体の浸食過程及び浸食量を高精度に再現できる数値解析モデルの構築は必要である。

山岸ら¹⁾は、越流流れ解析と土砂輸送解析を組み合わせた河床変動解析を粘性土条件に適用し、検討を行っている。結果、解析では実験に比べて浸食量を過小評価してしまうこととなった。原因として、浸透流により河床内部の状態が変化したことを挙げている。

そこで、本研究では河床変動解析に浸透流計算過程を導入し、粘着性を有する砂質堤体における浸食現象・過程をより高精度に再現できる数値解析モデルの構築を目的とする。

2. 研究方法

数値解析に関して、越流流れ解析、浸透流解析、堤体の浸食解析、それぞれの検証を行い、妥当性を確認したうえで、小型堤体を用いた越流浸食実験を行い、構築した越流浸食解析モデルの検討をした。

当越流浸食解析モデルは、①越流流れ解析、②堤体内の浸透流解析、③堤体の浸食解析の3つの解析モデルから構成されている。

2.1 越流流れ解析

鉛直2次元鉛直流れ解析には、数値波動水路

CADMAS-SURF(鉛直2次元k-εモデル+VOF法)を使用した。以下に連続式(式(1))および流下方向(式(2))、鉛直方向(式(3))の運動方程式を示す。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v g \quad (3)$$

ここで、 t : 時間, x, z : 水平・鉛直成分, u, w : 流速の水平・鉛直成分, ρ : 密度, p : 圧力, ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, γ_x, γ_z : 水平・鉛直成分の面積透過率, λ_v : 慣性力に関する係数である。

2.2 堤体内の浸透流解析

非定常の飽和・不飽和浸透流解析は、次式のRichards式((4))を支配方程式としており、代表断面の鉛直2次元の解析を行う。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

ここで、 ψ : 圧力水頭, $C(\psi)$: 比水分容量(= $\partial \theta_w / \partial \psi$), θ_w : 体積含水率, K_x, K_z : 水平・鉛直方向透水係数である。また、Richards式を解くのに必要な圧力水頭と体積含水率及び圧力水頭と不飽和透水係数の関係式は以下のvan Genuchtenの式(式(5)~(7))を用いた。

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{(1 + |\alpha \psi|^\eta)^m} & \text{if } (\psi < 0) \\ 1 & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e \left[1 - (1 + S_e^{\frac{1}{m}}) \right]^2 & \text{if } (\psi < 0) \\ K_s & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$C = \begin{cases} m[1 - |\alpha\psi|^\eta]^{-m-1} \cdot \eta|\alpha\psi|^{\eta-1} \cdot \alpha(\theta_s - \theta_r) & \text{if } (\psi < 0) \\ 0 & \text{if } (\psi \geq 0) \end{cases} \dots(7)$$

ここで、 S_e :有効飽和度、 θ_s, θ_r :それぞれ飽和及び残留体積含水率、 α, η :保水性試験より与えられる保水性に関するパラメーター、 $m = 1 - \eta^{-1}$

2.3 堤体の浸食解析

堤体は河道内の河床砂に比べて小さい粒径の土で構成されているため、サクシオンによるせん断抵抗増加などの影響が見込まれる。したがって、河道の河床変動計算で用いられている pick-up rate 式をそのまま用いると、浸食量を過大評価してしまう可能性がある。このため、本研究では、奥田ら²⁾の研究と同様にサクシオンによるせん断抵抗の増加を考慮することを考え、pick-up rate 式にその効果を導入した。

各計算グリッドからの単位時間当たりの離脱土砂量は pick-up rate p_s を用いて次式(式(8))のように表せる。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (8)$$

ここで、 d :河床材料の粒径、 A_2, A_3 :砂粒の2次元、3次元の形状係数(= $\pi/4, \pi/6$)、 S_p :離脱地点の計算グリッドの鉛直方向への射影面積である。

pick-up rate は局所勾配の影響を考慮した式にサクシオンによるせん断抵抗増加を考慮した次式(式(9)~(11))により計算を行った。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \varphi \tau_{*c} + \tau_{*suc}}{\tau_*}\right)^{m_p} \quad (9)$$

$$G_* = \frac{\cos \Psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \Psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (11)$$

τ_* :無次元掃流力、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、 τ_{*suc} :無次元化したサクシオンによるせん断抵抗増分、 σ :河床材料の密度($\sigma/\rho = 2.65$)、 θ_b :河床最大傾斜方向の勾配角、 k_L :効力と揚力の比(=0.85)、 μ_s :砂の静止摩擦係数(=0.7)、 Ψ :河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度、 α :砂粒の移動方向と河床の最大傾斜角のなす角度である。定数については、 $F_0, m_p, k_p = 0.03, 3.0, 0.7$ を与えた。

サクシオンによるせん断抵抗増分(式(12))及び無次元化

した式(式(13))は、既往研究²⁾より次式で計算した。

$$\tau_{suc} = |u_a - u_w| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \tan \varphi = \rho g |\varphi| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \tan \varphi \quad (12)$$

$$\tau_{*suc} = \frac{2\tau_{suc}}{C_{DP}(\sigma/\rho-1)gd \left[\frac{u_b}{u^*}\right]^2} \quad (13)$$

また、本研究の実験では比較的透水係数の高い土で堤体を作成したため、数値解析において堤体表層のグリッドが飽和するまで、せん断抵抗増加が効くため、浸食量を過小評価することが予測される。よって、奥田ら²⁾の研究と同様に、堤体表層において浸透は常に進行して表層はわずかな飽和層が存在していると仮定して、次式(式(14))で浸食量を評価する。

$$D_s = U_s \Delta t = -K_z \Delta \psi \Delta t \quad (14)$$

ここで、 D_s :飽和層の厚さ、 U_s :飽和層の進行速度、 K_z :鉛直方向の透水係数、 Δt :浸食計算の1ステップ、飽和層厚さ D_s を用いて浸食速度式は次式(式(15)~(17))で表せる。

$$\Delta t_s = D_s / E_{rs} \quad (15)$$

$$\Delta t_u = \Delta t - \Delta t_s (\Delta t_u \geq 0) \quad (16)$$

$$E_r \Delta t = E_{rs} \Delta t_s + E_{ru} \Delta t_u \quad (17)$$

3. 各解析モデルの検証

3.1 越流流れ解析

堤体における浸食量・現象を再現するためには、前段階として、越流流れモデルの妥当性を確かめる必要がある。そこで、既往の正面越流に関する実験データ²⁾(圧力水頭(図-1)、断面平均流速(図-2))を用いて検証を行った。

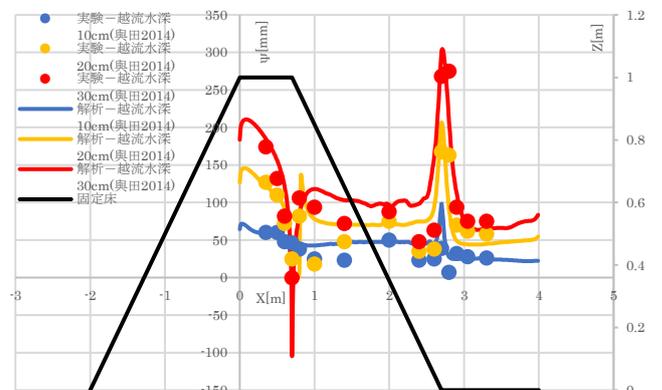


図-1 比較-圧力水頭

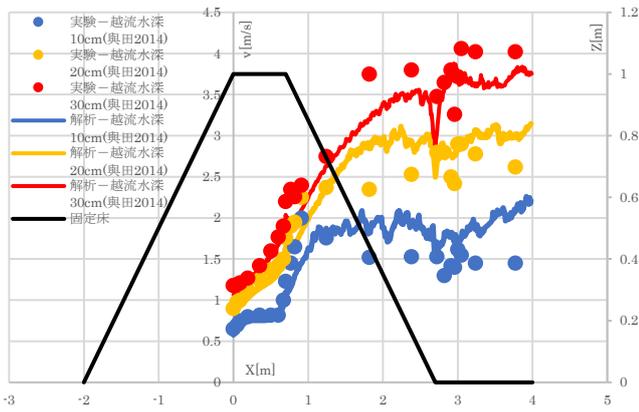


図-2 比較—断面平均流速

検証の結果、圧力水頭については越流水深 10cm のケースを除いて概ね良好な結果が得られている。断面平均流速についても同様に概ね良好な結果が得られた。

3.2 堤体の浸食解析

正面越流浸食解析を砂堤体条件に適応し、検証を行った。実験条件、結果は既往研究²⁾のデータを用いた。各堤体構成材料(珪砂 6号, 7号, 8号)について比較を行った。(図-3, 図-4, 図-5)

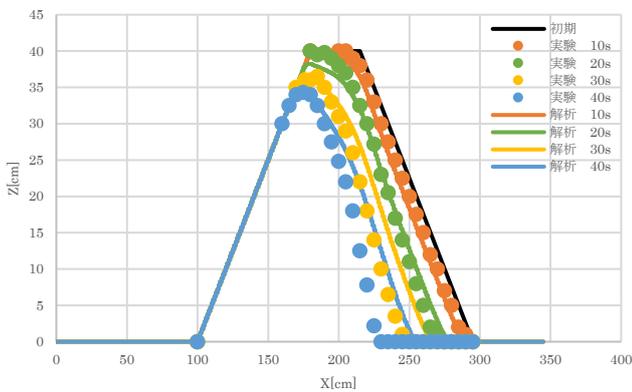


図-3 浸食比較(珪砂 6号)

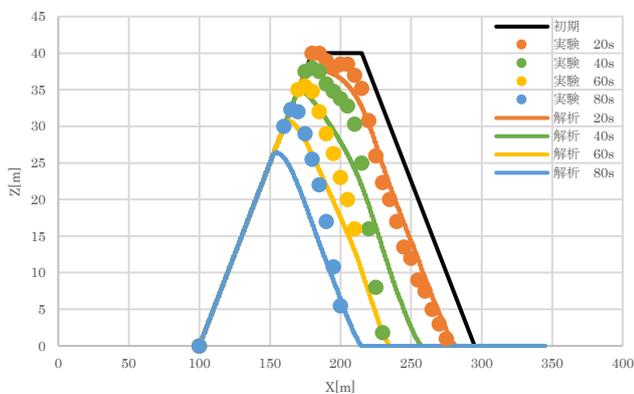


図-4 浸食比較(珪砂 7号)

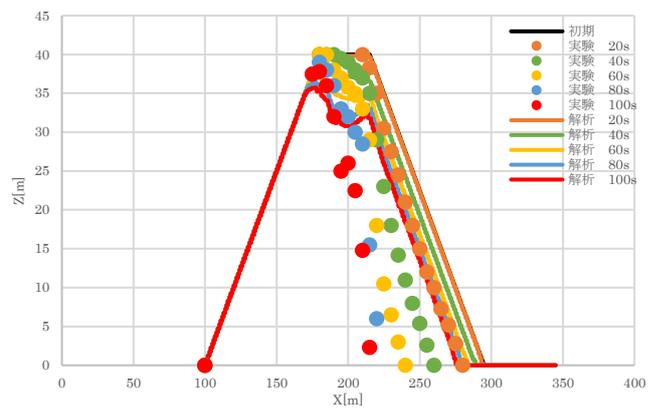


図-5 浸食比較(珪砂 8号)

図より、珪砂 6号については概ね良好な結果が得られている。珪砂 7, 8号については特に法面の浸食を過小評価していることが分かる。原因として考えられるのは、解析において地形変化後の法面におけるせん断力が表現されていないことと、ずり落ち計算を簡易的に設定していることが考えられる。

3.3 堤体内の浸透流解析

浸透現象、飽和・不飽和の観察しやすい砂堤体(珪砂 6号)を作成して、越流させた水理実験の動画と、数値解析より計算し表示したコンター図の重ね合わせにより検証を行った。コンター図中の青の実線は実験における浸潤線を表しており、橙色の領域は飽和域を表している。

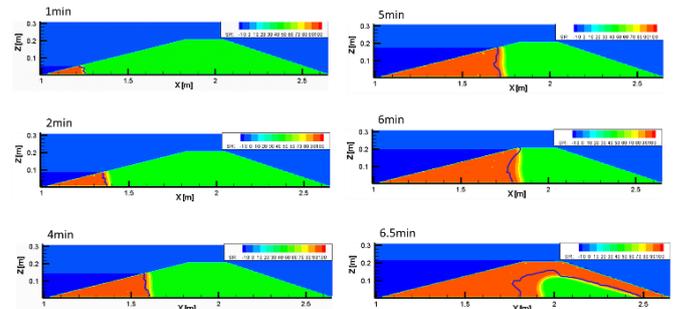


図-6 実験と解析コンター図の重ね合わせ

図から分かるように、1~6minにおいて、浸潤線と、飽和域の前線がほぼ一致していることが分かる。また、越流後の 6.5min については、解析結果の方が浸透の早く進んでいることが分かるが、実験においては飽和域と固定床に囲まれた領域に空気圧が存在し、浸透に影響を与えたことが原因として考えられる。

4. 粘着性を有する砂質堤体への適用・検証

3. 各解析モデルの検証により、各解析モデルが砂質堤体に適用できることを確かめたうえで、実際に堤体

の盛土工事などに用いられている建設改良土を実験・解析条件に適用し、検証を行った。実験に使用した土の土質試験結果表-1を示す。

表-1 試験項目(建設改良土)			
一般	土粒子密度 ρ_s	g/cm^3	2.476
	自然含水比 ω_n	%	28.0
粒度	石分	%	0.0
	礫分	%	21.0
	砂分	%	52.8
	シルト・粘土分	%	26.2
	最大粒径	%	19.0
	D_{60}	mm	0.3380
	D_{50}	mm	0.2451
分類	分類名	細粒分質 砂礫砂	
	分類記号	SFG	
縮固め	試験方法	B-b	
	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm^3	1.611
	最適含水比 ω_{opt}	%	17.4
透水試験	試験方法	定水位	
	飽和透水係数 k_s	cm/s	1.76E-03

さらに、土の保水性試験により得られた水分保持曲線を図-7に示す。保水性試験は吸引法、加圧法、吸着法の3つの方法により、排水過程を求めた。また、pF0~2の区間については吸水過程も求めた。

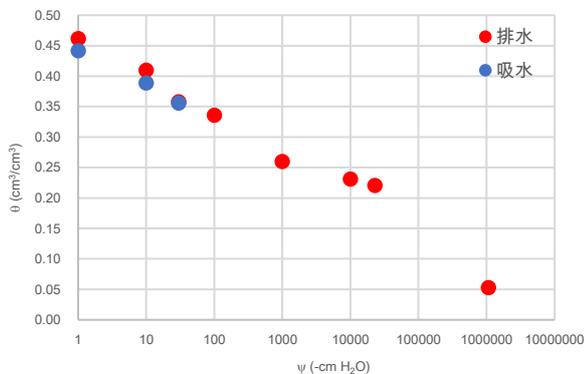


図-7 水分保持曲線(建設改良土)

図-7の各データを非線形回帰式プログラムに入力し、van Genuchten式の保水性パラメーターを求めた。

水路は長さ300cm、幅40cm、深さ50cmの直線水路を使用した。水路勾配を水平に設定し、水路下流部に模型堤体(図-8)を作成した。

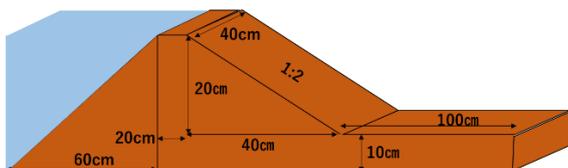


図-8 模型堤体

水理条件は、設定した流量(越流水深6cm)で水路内に

水がない状態から一気に越流するまで水位上昇させた。

越流開始時間から160s後について、堤体表法尻から、堤体裏法尻から40cmまでの区間において浸食比較(図-9)を行った。

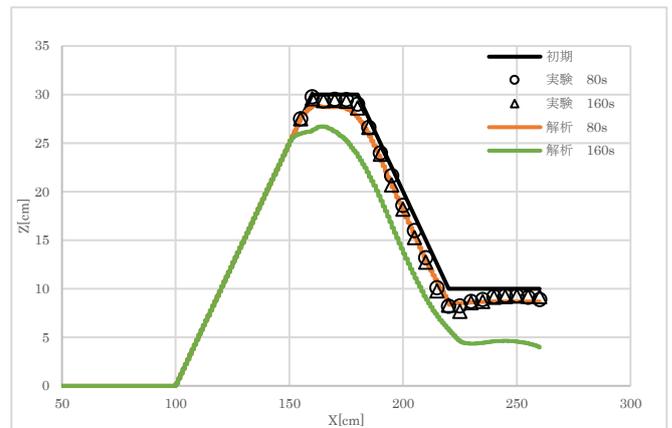


図-9 浸食比較

図より、時間経過とともに解析結果の方が浸食量を過大評価していることが分かる。浸食量を過大評価した原因として、解析においては平均粒径のみで浸食速度が決まるため、粒径幅をもつ材料で構成された堤体内部の締め固まった状態における浸食速度を表現できていないことが挙げられる。

5. 結論

本研究では、堤体内部の浸潤状態が越流時の浸食に及ぼす影響に着目し、数値解析を実施した。その結果、細粒分混じりの堤体材料に対しては、サクシオンによるせん断抵抗増分の効果を加えたとしても、浸食量を過大評価することが分かった。今後、その対策として、pick-up rate式と粘土・シルトに対応する浸食速度式をカップリングすることで、砂礫部分と粘土・シルト部分の浸食を区別することが必要であると考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 若手研究 A17H04936 (研究代表者：八木澤順治)の助成を受けて実施した。また、NPO 法人 ミサト改良土センターより実験に用いた改良土を提供して頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献：

- 1) 山岸玄弥, 八木澤順治: 粘性土が浸食限界に及ぼす影響を考慮した河床変動モデルの開発, 修士論文(埼玉大学), 2017
- 2) 奥田敏昭, 中川一, 水谷英朗, 川池健司, 張浩: 堤体飽和度に着目した堤防の越流浸食のメカニズムに関する研究, 自然災害科学 J. JSNDS 33-1 29-41, 2014.