

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18122

研究課題名(和文)3次元固気液混相流モデルを用いた堤防破堤に関する高精度安全性評価法の開発と体系化

研究課題名(英文)Development and verification of numerical model for dike breaching using 3D multi-phase flow model

研究代表者

音田 慎一郎(Onda, Shinichiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50402970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、局地的集中豪雨において河川堤防の破堤が発生しており、堤防の安全性評価手法の開発は極めて重要な課題であると考えられる。本研究では、水面変動を時間発展的に追跡できる密度関数法と、計算格子において水域・堤体内を容易に表現し、表面流と浸透流場を同時に予測できるポラスメディア法を適用することで、3次元固気液混相流モデルを開発した。この流れのモデルと土砂輸送モデルを組み合わせ、正面越流による堤防侵食に適用し、モデルの妥当性を検証した。さらに、砂の弾塑性構成式を基本とし、土の大変形解析に有利な粒子法の一つであるGIMP法を連成させ、堤防の浸透破壊を予測できる数値モデルの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：Dike failures recently occur during floods, and it is of great importance to predict the dike failure process accurately for disaster mitigation. In this study, a density function method and a porous media approach are applied for the three-dimensional flow model, to consider water surface variations in unsteady flow conditions and the filtration through the embankment. The simulation of the dike breaching process due to overtopping is carried out, by using the developed flow model and the bed deformation model. In addition, a numerical model to predict the dike failure process due to seepage flows is proposed, coupling the flow model with the soil deformation model based on GIMP method.

研究分野：河川工学

キーワード：破堤 予測モデル 越流 浸透流

1. 研究開始当初の背景

近年、局地的集中豪雨に伴う水災害・土砂災害によって河川堤防の越流、破堤が発生しており、人口と資産が集中する堤内地に甚大な被害をもたらしている。従って、既存堤防の安全性評価に関する技術開発は、減災対策を進めていく上で極めて重要な課題であると考えられる。

ここで、出水時における堤防の安全性を評価するには、表面越流における非定常流れ（水位や流速の時間変化）、堤体中の浸透過程を精度よく予測するとともに、越流による表面侵食や水の浸透に伴って土の有効応力が減少し、破壊に至るメカニズムを再現して対策を考えることが必要である。

しかし、これまで提案されてきた予測モデルでは、平面2次元モデルによって表面流場が計算されており、堤体近傍などの流れの再現性が低い。また、流れ場が空間的に変化し、それに伴って複雑な土砂輸送特性を示すにも関わらず、その土砂輸送プロセスも十分に考慮されていない。従って、河川堤防の破堤に対する安全性評価法について、高精度で実用的な技術開発は確立できていないと考えられる。

そこで本研究では、堤防の越流侵食、及び浸透破壊過程を精度よく予測できる数値モデルの開発とその応用について検討する。

2. 研究の目的

本研究では、堤防の表面越流と堤体内の浸透流を同時に予測できる高精度3次元流体解析モデルと、越流および浸透流から引き起こされる地盤の大変形解析モデルを構築するとともに、両者をカップリングすることで堤防の安全性を評価できる技術開発を検討するものである。

表面越流侵食に関する既往の研究をまとめると、堤防天端から裏法面に向かって流れが水平方向から鉛直方向に急激に変化し、複雑な流況を示すにも関わらず、水深平均した簡易な平面2次元モデル（3次元モデルを水深方向に積分することで次元を下げたモデル）によって平面的な流れ場が計算されており、堤体近傍の流れが十分再現されていない。また、流れ場が空間的に変化することによって複雑な土砂輸送特性を示すと考えられるが、一般的には平衡流砂モデルが適用されており、流砂の非平衡性が考慮されていない。一方、堤防の浸透破壊について整理してみると、水位一定の下での破壊挙動が検討されており、出水時において表面流から浸透流場を統一的に予測する流れのモデルは提案されていない。

そこで本研究では、水面変動を時間発展的に追跡できる密度関数法と、計算格子において水域・堤体内とその境界面を容易に表現し、表面流・浸透流場を同時に取り扱うことのできるポラスメディア法を適用することで、表面流と堤体内の浸透流を3次元的に予測

できる3次元固気液混相流モデルを開発した。この流れのモデルと非平衡流砂モデルを組み合わせ、正面越流による堤防侵食過程に適用し、モデルの妥当性を検証した。さらに、上記の流れのモデルと、砂の弾塑性構成式を基本とし、土の大変形解析に有利な粒子法の一つである GIMP 法を連成させ、堤防の浸透破壊を予測できる数値モデルの構築を行った。

3. 研究の方法

本研究では、堤防の表面越流侵食、及び浸透破壊現象を精度よく予測できる数値モデルの開発を行い、モデルの適用性について検証するとともに、3次元固気液混相流モデルの有用性を示すため、階段式魚道型水路における水面波発生の数値解析を行った。

ここでは数値解析モデルについて説明する。

(1) 流れのモデル

3次元流体解析モデルには、非定常流れの水面変動を考慮するため、密度関数法を用いるとともに、3次元数値解析の計算格子において水域、堤体内とその境界面を容易に表現し、堤体への浸透を考慮するためにポラスメディア法を適用した。基礎式は以下のとおりである。

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

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

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1-\Phi) \rho_{gas} \quad (3a)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1-\Phi) \mu_{gas} \quad (3b)$$

ここで、 x_i : デカルト座標系、 t : 時間、 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、 ρ_{liq} : 液相の密度、 ρ_{gas} : 気相の密度、 ν : 動粘性係数、 μ : 流体の粘性係数、 μ_{liq} : 液相の粘性係数、 μ_{gas} : 気相の粘性係数、 g_i : 重力加速度ベクトル、 K_d : 固有透水係数である。添え字 i, j は 1, 2, 3 の値をとり、1, 2, 3 はそれぞれ x, y, z 方向を表す。式(2)の右辺最終項は抵抗力であり、ここでは簡単のため Darcy 則を適用した。乱流モデルには、非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いる。

(2) 土砂輸送モデル

次に、表面越流侵食での土砂輸送モデルについて説明する。土砂輸送形態として掃流砂のみを取り扱い、pick-up rate と step length で

表現される非平衡流砂モデル¹⁾を適用する．

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \Gamma \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (4a)$$

$$G_* = \frac{\cos \Psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (4b)$$

$$\Gamma = \left(\frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \Psi + k_L \mu_s} \right) \left(\frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \right) \quad (4c)$$

ここで、 p_s : pick-up rate, d : 河床材料の粒径, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, σ : 河床材料の密度, θ_b : 最大傾斜方向の河床勾配角, k_L : 抗力と揚力の比, μ_s : 砂の静止摩擦係数, Ψ : 河床での流速と砂粒の移動方向のなす角, α : 砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角である．上記の pick-up rate を用いて単位時間あたりに各計算メッシュから pick-up する土砂堆積 V_p は次式のようになる．

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (5)$$

離脱後の砂粒群の移動経路は、砂粒の運動方程式を計算することで求め、砂粒の運動方程式から得られる砂粒の移動速度ベクトルを用いて砂粒群の位置と移動距離を次式により算出する．

$$\mathbf{p}_{sed(n)} = \mathbf{p}_{sed(n-1)} + \Delta t \cdot \mathbf{u}_{sed(n)} \quad (6a)$$

$$s_{(n)} = \sum \Delta t |\mathbf{u}_{sed(n)}| \quad (6b)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{sed(n)}$: pick-up された土砂が n ステップ計算時に存在する位置ベクトル, $\mathbf{u}_{sed(n)}$: 砂粒の移動速度ベクトル, $s_{(n)}$: pick-up した地点からの距離である．

式(6a)で計算された移動地点に堆積する土砂量を求める．pick-up 地点 j から出発した砂粒群が n ステップ後の移動地点に単位時間あたりに堆積する deposition 体積 $V_{d(j,n)}$ は pick-up 体積 $V_{p(j)}$, step length の確率密度関数 $f_s(s_{(n)})$ を用いて次式で示される．

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(s_{(n)}) \Delta t \cdot |\mathbf{u}_{sed}| \quad (7a)$$

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (7b)$$

以上より、得られる土砂量を用いて河床変動計算を行う．

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p)}{S_d} \quad (8)$$

ここで、 z_b : 河床高である．

(3) 土の変形モデル

最後に、浸透破壊における土の変形モデルについて記述する．土の変形解析には、砂質土の弾塑性構成式²⁾を構成則とし、粒子法の一つで、大変形にも適用できる Generalized Interpolation Material Point (GIMP)法³⁾を用いて離散化する．多相系混合体の支配方程式は、固体の変位と間隙水圧を未知数に取る u-p 法

によって定式化し、以下に示す全体相の運動方程式に流れのモデルから求められる間隙水圧を与え、固体の変位を求める．

$$\rho_m \dot{v}_i^s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_m b_i \quad (9a)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + P^F \delta_{ij} \quad (9b)$$

ここで、 ρ_m : 混合体の密度, v_i^s : 固体の速度ベクトル, b_i : 物体力ベクトル, σ'_{ij} : 骨格応力テンソル, σ_{ij} : 全応力テンソル, P^F : 平均間隙圧である．

GIMP 法により式(9a)の運動方程式の離散化を行い、初期状態からの変化を考えると、最終的に次式となる．

$$\Delta P_I = - \sum_{p=1}^{N_p} V_{pd} \left\{ \sigma'_p(x_p) - \sigma'_p(x_p) \right\}_{t=0} \nabla S_{Ip} \Delta t + \tau_I \Delta t \quad (10)$$

$$+ S_r \{K_v\}_I \left\{ p_E^f - p_{E|t=0}^f \right\} \Delta t$$

ここで、 ΔP_I : 運動量増分, S_{Ip} : 重み関数, S_r : 飽和度である．

4. 研究成果

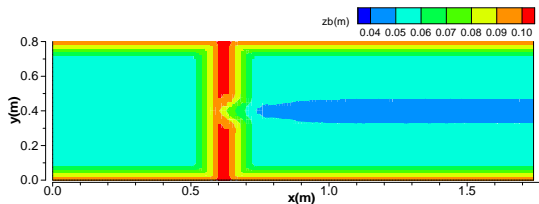
本研究では、上記で説明した流れのモデルと地盤変形モデルを組み合わせ、堤防の越流侵食、浸透破壊現象に関する数値解析を行い、モデルの妥当性を検証した．ここでは主に4つの研究成果について記述する．

(1) 正面越流による破堤口拡大過程の数値解析

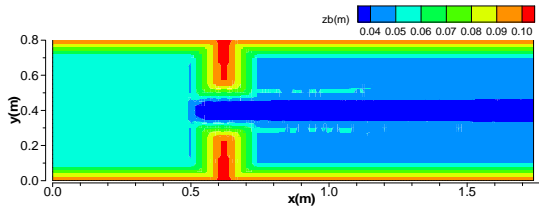
表面流と浸透流を同時に予測できる流体解析モデルと非平衡流砂モデルを用いて、渡邊らが行った越流破堤実験⁴⁾に適用した．河床勾配が 1/500, 基礎地盤の河床高が 0.05 (m) の水路中に高さ 0.05 (m), 天端幅 0.04 (m), 法面勾配 1:2 の堤体が造成されており、天端中央部には破堤のきっかけとなる切欠けが設けてある．

図1は堤体高および河床高の時間変化を示したものである．破堤開始から20秒後では、裏法肩から下流で澇筋が形成しており、その後、天端の切欠け部の侵食が表面面に到達している様子が確認できる．

図2は、天端高での拡幅の時間変化を比較したものである．図を見ると、破堤の初期段階では決壊口の拡幅速度が実験よりも若干早い、徐々に実験結果に漸近していく様子が確認できる．決壊口の拡幅は堤体の洗掘、側岸浸食を繰り返しながら進行していく．最終的に裏法尻での最大洗掘深がほぼ再現できたため、拡幅も漸近したと思われる．



(a) $t = 20$ (s)



(b) $t = 120$ (s)

図1 堤体高および河床高の時間変化

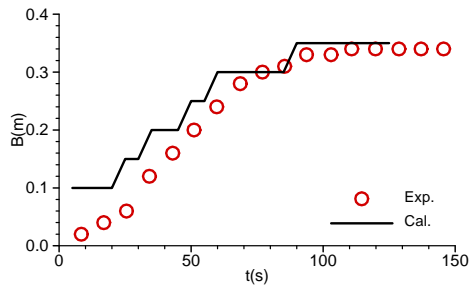


図2 拡幅の時間変化

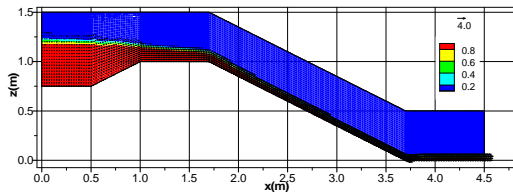


図3 水路中央断面での流況図

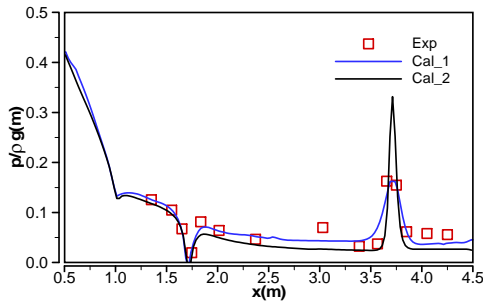


図4 底面での圧力分布

(2) 固定床上の越流に関する数値解析

式(1), (2)で表される流れのモデルを一般座標系での3次元モデルに発展させ、固定床上での越流⁵⁾に関する数値解析を行った。図3に水路中央断面の流況図を示す。図中のカラーカウンターは密度関数を表している。図をみると、上流から流入した水が堤体を越流し、堤防法面に沿って水が加速しながら流下している様子が確認できる。

図4は底面での圧力値について実験結果⁵⁾と計算結果を比較したものである。Cal_1がデカルト座標系での計算結果⁶⁾、Cal_2が一般座標系での計算結果である。デカルト座標系での結果に比べて再現性が十分ではないが、法肩近傍での圧力の急激な低下と法尻に

おける増加が一般座標系での結果でも捉えられている。

(3) 堤防浸透破壊の数値解析

次に、表面流と浸透流を同時に予測できる流体解析モデルと砂の弾塑性構成式を考慮した土の変形モデルを用いて、堤防浸透破壊の数値解析を行った。計算領域を図5に示す。上流端から2.0(m)の位置に堤体高さ0.12(m)、天端幅0.04(m)、のり面勾配が1:2の堤体を設置し、堤体より上流側の初期水深を0.02(m)、初期飽和度を0%として計算を開始した。流れの計算から得られる水路中央断面の間隙水圧を土の変形モデルに与え、土の変形について鉛直2次元計算を行った。図5に示すように、 $\Delta x=0.02$ (m)、 $\Delta z=0.02$ (m)の計算格子の中に最大4つの砂粒子を配置して表現し、地盤の初期応力解析にはLIQCA2D⁷⁾を用いた。

図6は堤体内の飽和度と堤体形状の時間変化を示したものであり、図中の実線は初期の堤体形状を表している。図をみると、浸透水が裏法尻に向かって流れていくことにより、間隙水圧の影響が土の変形モデルに反映され、裏法面が変形するという定性的な様子が再現できている。

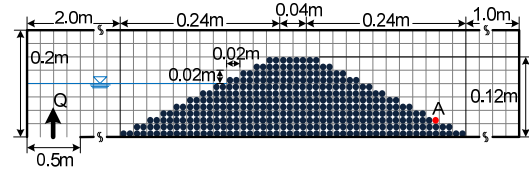
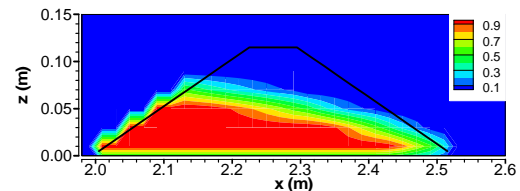
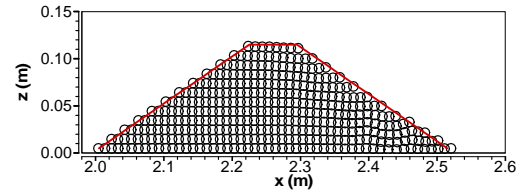


図5 計算領域



(a) $t = 45$ (s)



(b) $t = 60$ (s)

図6 堤体内の飽和度と堤体形状の時間変化

(4) 階段式魚道型水路における水面波発生 の数値解析

3次元気液混相流モデルの有用性を示すため、流体解析モデルを用い、階段式魚道型水路における水面波発生の数値解析を行った。ここでは大八木ら⁸⁾が行った水理模型実験を参考にして、10個のプールを有する階段式魚道型水路を対象に計算を行った。

図7は隔壁上における左右岸の水面変動について示したものであり、計算結果では9プール目の結果を用いた。なお、左右岸の水面変動における計測位置は、水路側壁から0.025(m)離れた場所である。図を見ると、実験結果に見られる⁸⁾ように、左右岸での水面変動が逆位相となっており、水路横断方向にねじれを伴った2次元波が発生していると考えられる。また、振動の周期を比較すると、実験結果⁸⁾、計算結果とも約0.45(s)であり、計算結果の振幅が若干小さいものの不安定波の発生を概ね再現できた。

一方、流量が大きい場合についても数値解析を行った。左右岸での水面変動の計算結果から、流量が大きい場合には明確な2次元波は確認できないという実験結果の特徴を定性的に再現できることを示した。

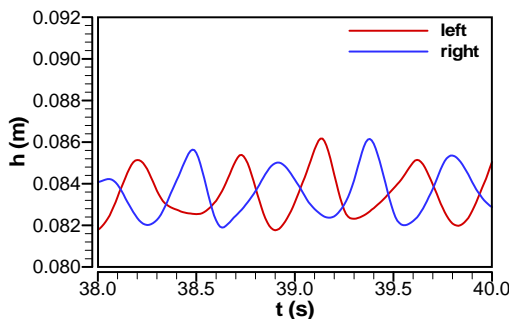


図7 左右岸での水面変動

<引用文献>

- 1) Nagata, N., Hosoda T., Nakato, T. and Muramoto, Y., Three-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Hydraulic Structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.131, No.12, 2005, pp.1074-1087.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, 1999, pp. 661-680.
- 3) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M.: The Generalized Interpolation Material Point Method, Computer Modelling in Engineering and Science, Vol.5, No.6, 2004, pp.477-495.
- 4) 渡邊康玄, 山本昌慧, 島田友典: 正面越流破堤の室内実験による再現性の検討, 水工学論文集, 第55巻, 2011,

pp.847-852.

- 5) 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久, 粒子法による河川堤防裏法侵食の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第52巻, 2008, pp.979-984.
- 6) 音田慎一郎, 細田 尚, Jacimovic, N., 木村一郎: 正面越流による堤防侵食過程の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, 2013, pp.1_1207-1_1212.
- 7) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D11(2011年公開版)資料, 2011.
- 8) 大八木美由起, 細田 尚, 音田慎一郎, 階段式魚道型水路における不安定波動の発生に関する2,3の検討, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, 2006, pp.591-600.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎, Jacimovic, N., 境界適合座標系での密度関数法を用いた開水路流れ解析法の開発とその検証について, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.72, No.4, 2016, pp.1_505-1_510.

https://doi.org/10.2208/jscejhe.72.1_505

Onda, S., Hosoda, T., Jacimovic, N. and Kimura, I., 3D numerical simulation of cross-levee breaching process due to overtopping flow, RIVER FLOW 2016, 査読有, 2016, pp.1764-1771.

Onda, S., Kitabayashi, M. and Hosoda, T., Some considerations of dike failures due to seepage flows, Proceeding of the 3rd Symposium on Two-phase Modelling for Sediment Dynamics in Geophysical Flows (THESIS-2016), 2016, pp.197-200.

音田慎一郎, 北林資也, 肥後陽介, 細田尚, 開水路流れと土の弾塑性変形連成解析の堤防浸透破壊への適用性, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.73, No.4, 2017, pp.1_811-1_816.

https://doi.org/10.2208/jscejhe.73.1_811

音田慎一郎, 村瀬仁士, 細田 尚, 階段式魚道型水路における不安定波発生に関する3次元数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.74, No.4, 2018, pp.1_739-1_744.

[学会発表](計4件)

音田慎一郎, 北林資也, 肥後陽介, 細田尚, 開水路流れと土の変形の連成解析を用いた堤防浸透破壊に関する数値シミュレーション, 第71回年次学術講演会講演概要集, II-042, 2016, pp.83-84.

村瀬仁士, 音田慎一郎, 細田 尚, 一般

座標系での3次元開水路流れモデルによる湾曲部流れの数値シミュレーション, 第71回年次学術講演会講演概要集, II-095, 2016, pp.189-190.

Onda, S., Higo, Y. and Hosoda, T., Numerical simulation of dike deformation due to seepage flows, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 2017, pp.1440-1446.

村瀬仁士, 音田慎一郎, 細田 尚, 密度関数法を用いた階段式魚道型水路における2次元不安定波発生の数値解析, 第31回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2017, B11-1.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

音田 慎一郎 (ONDA, Shinichiro)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50402970