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

京都大学大学院 助教　　正会員　　○音田　慎一郎
京都大学大学院　　　　学生員　　北林　資也
京都大学大学院 准教授　正会員　　肥後　陽介
京都大学大学院 教授　　フェロー　細田　尚

１．はじめに

近年，局地的集中豪雨による河川堤防の破堤が多発し，甚大な被害をもたらしている．こうした被害を低減するためには，出水時における非定常的な流れの変化と堤体への浸透，越流による表面浸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精度よく予測し，対策を考えることが必要である．こうした背景から，本研究では浸透による堤防破壊について再現性の高い解析手法を確立すること目的としている．そこで，堤体の越流と浸透を同時に予測できる開水路流れ解析モデル [1)] と粒子法の一種である Generalized Interpolation Material Point (GIMP)法 [2)] を用いた地盤変形解析モデル [3)] を連成させ，浸透破壊に関する数値シミュレーションを行った．

２．数値解析法

開水路流れ解析法として，非定常流れの水面変動と堤体における越流と浸透を同時に予測する流れ解析モデル [1)] を用いた．基礎式は以下の通りである．

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\{(1-c)u_i\} + \frac{\partial}{\partial x_j}\{(1-c)u_i u_j\} = (1-c)g_i - \frac{(1-c)}{\rho_f}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{-(1-c)\overline{u_i' u_j'}\right\} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(1-c)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right\} - \frac{\nu (1-c)^2 u_i}{K_d} \quad (2)$$

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

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

ここに，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_f：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．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-εモデルを用いた．基礎式の離散化には有限体積法を，運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキーム，Φの移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法を用いた．

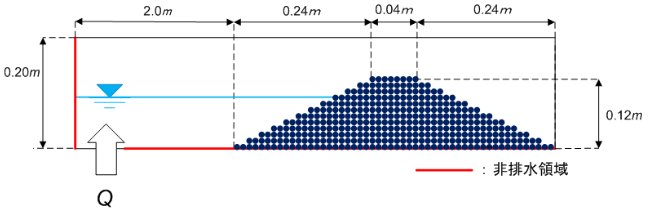


図-1　計算条件

一方，地盤変形モデルには，非線形移動硬化則を導入した砂の弾塑性構成式 [4)] を基本とし，計算格子内に配置した粒子を追跡することで地盤の変形を計算する GIMP 法 [2)] を用いた．固相，液相，気相の三相混合体の運動方程式は以下の通りである．

$$\rho \dot{v}_i^s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (4)$$

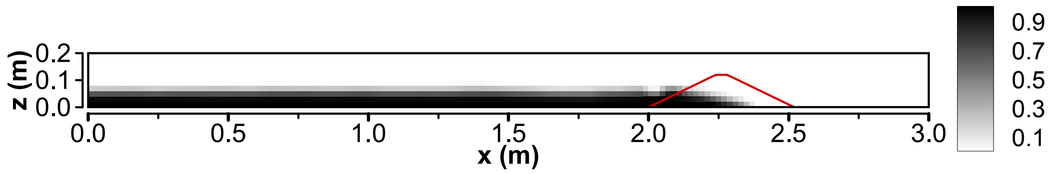
ここに，ρ：混合体全体相の密度，v_i^s：固体の速度ベクトル，σ_{ij}：全応力テンソル，b_i：物体力ベクトルである．GIMP 法を用いて式(4)を離散化すると式(5)が得られる．

$$\dot{P}_I = \int_{\partial\Omega_\tau} \tau \cdot S_I(x)\,dS - \sum_{p=1}^{N_p} \sigma'(x_p)\nabla S_{Ip} V_p - S_r \{K_v\}_I p_E^f + \sum_{p=1}^{N_p} m_p b S_{Ip} \quad (5)$$

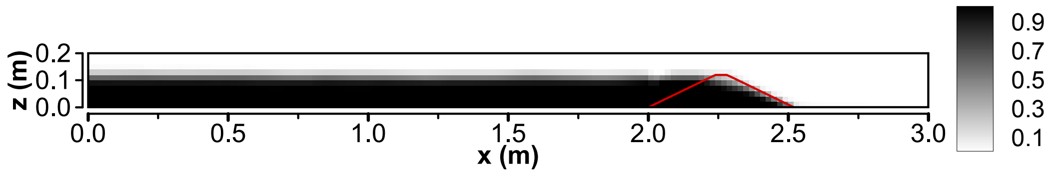
ここで，P_I：格子点上での運動量，N_p：粒子数，σ'：有効応力，V_p：粒子が占める領域の体積，S_r：液相の飽和度，p^f_E：間隙水圧，m_p：粒子質量，S_I：格子形状関数，S_{Ip}：補間関数である．

開水路流れと土の変形の連成については，開水路流

キーワード　開水路流れ，土の変形，連成解析，浸透破壊
連絡先　　〒615-8540　京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3　TEL075-383-3268

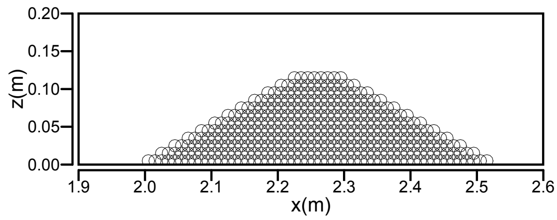


(a) t = 50 s

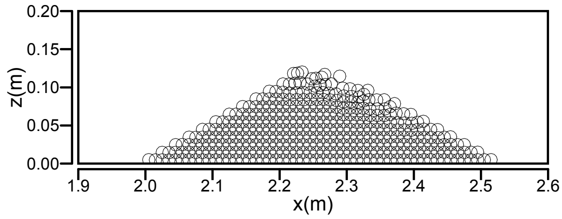


(b) t = 100 s

図-2　流れ場の時間変化



(a) t = 0 s



(b) t = 225 s

図-3　堤体形状の時間変化

れ解析において求めた間隙水圧を式(5)に代入して計算格子点上での運動量を求め，粒子の速度，座標，ひずみ増分を算出したのち構成則から応力の更新を行う．

３．計算結果と考察

以上の開水路流れと土の変形の連成解析を用いて堤防浸透破壊に関する数値解析を行った．計算条件を**図-1** に示す．水平直線水路上の上流端から 2 m の位置に堤体高さ 0.12 m，天端幅 0.04 m，法面勾配が 1:2 の堤体を設置し，上流側から流入流量 0.80 l/s の水を流入させた．境界条件として水路底面と上流側壁面を非排水境界とした．また，計算格子は水平，横断，鉛直方向にそれぞれΔx = 0.02 m，Δy = 0.03 m，Δz = 0.02 m とし，時間間隔はΔt = 0.0002 s とした．材料パラメータの値については紙面の都合上省略する．

計算領域全体の飽和度分布を**図-2** に示す．図中の赤線は堤体形状を表している．図をみると上流から流入した水が堤体内に浸透し，湿潤面が移動している様子が確認できる．**図-3** は粒子により表現した堤体形状の時間変化を示したものである．裏法面の崩壊が確認できるが，裏法尻の崩壊はほとんど生じていない．この点については，地盤の初期応力解析を行っていないことや材料パラメータの 影響が考えられるため，今後の検討課題としたい．

４．おわりに

本研究では，開水路流れと土の変形の連成解析用いて，堤防浸透破壊に関する数値シミュレーションを行った．今後，実験条件に合わせて数値解析を行うことで，モデルの妥当性を検証したい．

参考文献

1) 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，pp. I_1207-I_1212, 2013.

2) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M.: The Generalized Interpolation Material Point Method, *Computer Modelling in Engineering and Science*, Vol.5, No.6, pp.477-495, 2004.

3) Higo, Y., Nishimura, D. and Oka, F.: Dynamic analysis of unsaturated embankment considering the seepage flow by a GIMP-FDM coupled method, *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, pp.1761-1766, 2014.

4) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.