

堤防附属構造物周辺地盤の浸透-変形連成解析

東邦ガス(元京都大学大学院) 正会員
京都大学大学院 フェロー会員
京都大学大学院 正会員
京都大学大学院 学生員

○浅井良太
岡二三生
小高猛司 木元小百合
田中智太郎 山崎真也

1 研究の背景と目的

近年計画高水位を大幅に上回る洪水が多発し、これまでの堤防の安全性照査手法の見直しが求められている。本研究では、従来の浸透解析と円弧すべりのように、個別に検討するのではなく、多相系材料の変形解析法を用いて堤防の安全性を検討する手法を提案する。具体的には、混合体理論に基づいて、間隙が常に排気状態であると仮定した。不飽和問題を扱う方法として二相系の定式化を拡張する方法¹⁾もあるが、本研究では三相混合体として定式化した。これを用いて、樋門周辺堤防盛土の浸透変形破壊シミュレーションを行う。

2 支配方程式の定式化

用いたプログラムは液状化解析コード LIQCA3D²⁾ を不飽和浸透問題に拡張した LIQCA3D-SF である。混合体の密度 $\bar{\rho}$ を用いて、混合体に対する運動方程式は次のようになる。

$\bar{\rho} = (1-n)\rho^s + nSr\rho^f + n(1-Sr)\rho^a$ (1) $\bar{\rho}\ddot{u}_i^s - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \bar{\rho}b_i = 0$ (2)

ρ^s 、 ρ^f および ρ^a はそれぞれ、固相、液相、気相の真の密度、 n は間隙率および Sr は飽和度、 $\ddot{u}_i^s$ は固相の加速度ベクトル、 b_i は物体力、 σ_{ij} は全応力テンソルである。構成式として Oka らの繰返し弾塑性構成式³⁾を用いる。液相の連続式は次式となる。

$$\frac{k}{\gamma_w} \left(-\rho^f \ddot{\varepsilon}_{ii}^s - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} + \rho^f \frac{\partial b_i}{\partial x_i} \right) + S_r \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0$$
 (3)

ここに、 p は間隙水圧、 k は透水係数、 γ_w は液相の単位体積重量、 ε_{ii}^s は固相の体積ひずみである。 K^f は液相の見かけの体積弾性係数として次のように定義する。 K^f は液相の体積弾性係数である。

$$\frac{1}{K^f} = \frac{S_r}{K^f} + \frac{C}{n\gamma_w}$$
 (4)
$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m$$
 (5)

ここで ψ は負の圧力水頭であり α 、 n' 、 m は水分特性曲線の形状をきめるパラメータ、 S_e は有効飽和度、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和状態での体積含水率であり間隙率 n に等しい。また θ_r は高サクション条件下での体積含水率である。混合体に対する運動方程式と液相の連続式を支配方程式とする⁴⁾。運動方程式の空間離散化には有限要素法、連続式の空間離散化には赤井・田村の方法、時間離散化には Newmark の β 法を適用する。また、不飽和浸透特性として有効飽和度の概念を導入し汎用性が高いとされる Van Genuchten による不飽和浸透モデルを用いる。

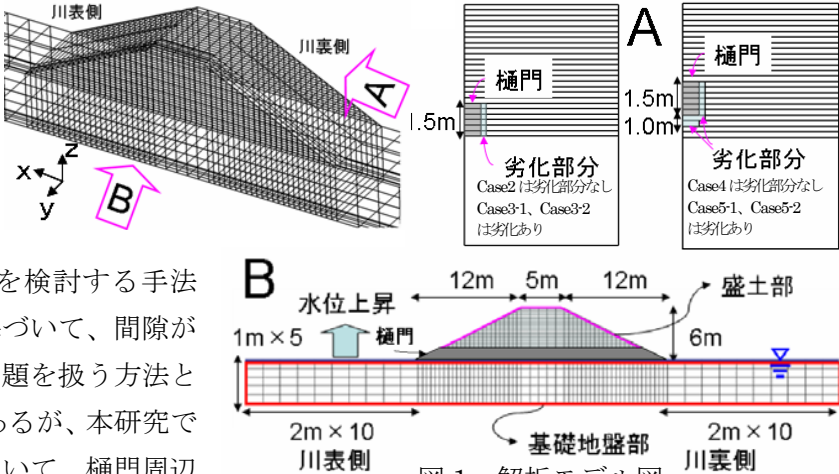


図1 解析モデル図
表1 材料パラメータ

パラメータ	盛土砂	やや劣化した砂
初期間隙比 e_0	0.923	0.99
圧縮指数 λ	0.014	0.014
膨潤指数 κ	0.009	0.009
初期せん断係数比 G_0/σ'_m	225.0	200.0
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
重力加速度 g (m/s ²)	9.8	9.8
破壊応力比 M^*	1.12	1.12
変相応力比 M_m^*	0.914	0.914
硬化関数中のパラメータ B_0^*	700	500
硬化関数中のパラメータ B_1^*	30	20
破化関数中のパラメータ C_r	700	700
水の体積弾性係数 K_f (kPa)	2.0×10^5	2.0×10^5
擬似過圧密比 OCR^*	1.0	1.0
異方性消失のパラメータ C_d	2000	2000
ダイレイタンス係数 D_0	1.0	1.0
ダイレイタンス係数 n	2.0	2.0
湿潤密度 ρ (g/cm ³)	1.911	1.911

	樋門部(弾性体)
Lameの定数 λ	31750
Lameの定数 μ	127000
密度 ρ (g/cm ³)	0.8

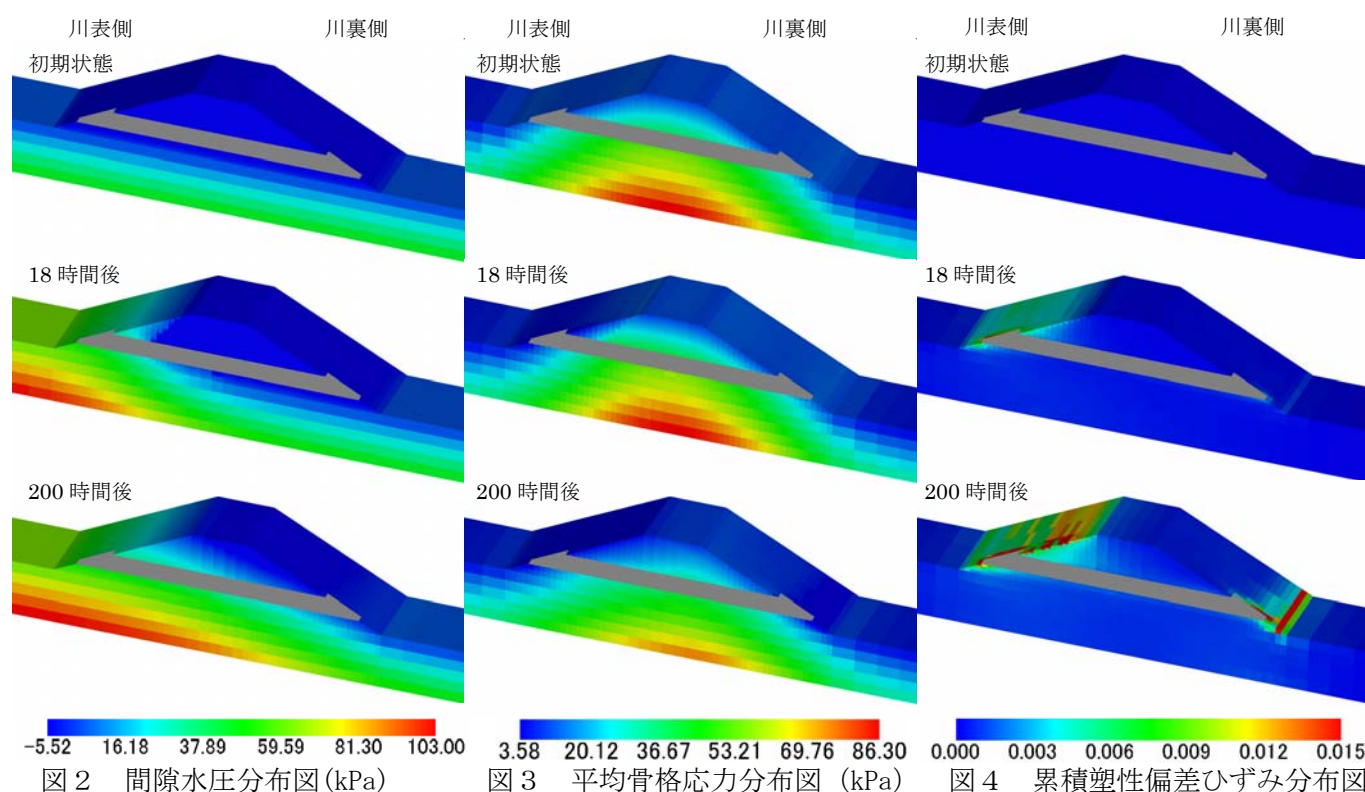


図2 間隙水圧分布図 (kPa)

図3 平均骨格応力分布図 (kPa)

図4 累積塑性偏差ひずみ分布図

3 解析結果

用いたパラメータは表1に示すものである。図1に用いたモデルを示す。水位を18時間で6m上昇させた後200時間後まで水位を一定に保つ。図2は基礎地盤部より1m上部に樋門が存在する場合 case5-1 の200時水位上昇停止の18時間後において川表側の法面に沿って間隙水圧の発生が見られ、時間経過とともに間隙水圧の発生は川表側から川裏側へ広がり、上昇していく様子が確認される。図3の平均骨格応力は、時間が経過するにつれ減少している様子が確認される。図4に塑性偏差ひずみ増分の第二不変量累積値（以下累積塑性偏差ひずみと呼ぶ）を示す。時間経過とともに樋門付近および法尻部にひずみが增大していく様子が確認される。

各ケースの最大偏差ひずみの値が1%、2%、3%、4%および5%に達した時間をグラフで表したものを図5に示す。樋門の無い場合では偏差ひずみが5%に達するまでの時間は191時間後であったのに対し、樋門が低い位置に存在する場合には145時間後に到達する。また樋門が基礎地盤部より1m上部に位置し側面および底面で劣化した部分が存在する場合には、150時間後に5%の偏差ひずみに達する。このように樋門が存在することで、法尻部におけるひずみの発生時間が大幅に短縮され堤防の安全性が損なわれることが明らかとなった。

4 まとめ

混合体理論に基づき三相混合体として運動方程式および連続式を定式化した。樋門周辺堤防盛土の浸透変形破壊シミュレーションを行った結果、洪水時に樋門側面および底面付近の地盤において、周辺よりも大きな塑性ひずみが発生すること、すなわち劣化が起こることが明らかとなった。

謝辞 本研究は平成17年度国土交通省の建設技術研究開発助成制度の補助を受けて実施している。記して謝意を表する。

参考文献(1) Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T.: Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering, John Wiley & Sons, pp.31-36, 1999. (2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04(2004 公開版)資料, 2004. (3) 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, pp.661-680, 1999. (4) 浅井良太, 岡二三生, 小高猛司, 木元小百合, 田中智太郎, 山崎真也: 樋門周辺堤防の浸透変形形成解析, 第41回地盤工学研究発表会概要集(投稿中)(5) 小高猛司, 岡二三生, 木元小百合, 角南進, 加藤亮輔: 不飽和浸透変形形成解析による河川堤防の安全性評価, 第50回地盤工学シンポジウム論文集, pp.347-354, 2005. (6) 岡岡良介, 久保哲夫, 八嶋厚, 張鋒: 不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析, 土木学会論文集, No.694III-57, pp.153-163, 2001.