

サクシオンによる強度変化を考慮した堤防の浸透-変形連成解析

株式会社 日建設計シビル 正会員
 京都大学大学院 フェロー会員
 京都大学大学院 国際会員

○加藤 亮輔
 岡 二三生
 木元 小百合・肥後 陽介

1. 研究の背景と目的

近年は計画高水位を上回る洪水が日本各地で多発している。地下水面より上の堤防は普段不飽和状態であるが、不飽和土はサクシオンの影響を強く受け、サクシオンが解放されると強度が低下することが知られている。本研究では飽和度の構成式にサクシオンによる強度変化の影響を導入することによって不飽和土を考慮した構成式を用い、浸透-変形連成解析を行った。

2. サクシオンによる強度変化を考慮した不飽和土の構成式

用いたプログラムは砂の弾塑性構成式¹⁾を組み込んだ液状化解析コード LIQCA2D²⁾を不飽和浸透問題に拡張した LIQCA2D-SF³⁾である。本研究では不飽和問題を扱う方法として、三相混合体を用い、気圧が常に大気圧であるとして定式化し(簡易三相系解析法)、以下の骨格応力の概念を導入している。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \{Sr p^f \delta_{ij} + (1 - Sr) p^a \delta_{ij}\} \quad (1)$$

ここに、 σ'_{ij} は骨格応力テンソル、 p^f は水圧、 p^a は気圧、 Sr は飽和度である。

不飽和土のサクシオンによる強度変化を表現するために、岡らによる砂の繰返し弾塑性構成式¹⁾の過圧密境界面 f_b 中の硬化パラメータ σ'_{mb} と、非線形移動硬化パラメータ χ_{ij}^* 中の移動硬化の速度を決めるパラメータである硬化パラメータ B^* にサクシオンによる影響を導入した。

過圧密境界面：正規圧密領域と過圧密領域を区別する曲面

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)} + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} v^p\right) \left[1 + S_1 \exp\left\{-s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\}\right] \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\eta}_{(0)} = \left\{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)\right\}^{1/2}$ であり、応力比テンソル $\eta_{ij}^* = S_{ij} / \sigma'_m$ 、 M_m^* は変相時の応力比の値である。 σ'_m は平均骨格応力、 σ'_{mbi} は σ'_{mb} の初期値である。 S_1 、 s_d はサクシオンによる強度変化を表すパラメータで、 P^C は現在のサクシオン、 P_i^C は初期サクシオンである。

降伏関数：弾性域と弾塑性域を区分する曲面

$$f = \left\{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\right\}^{1/2} - k = 0 \quad (4)$$

ここに、 k は弾性域を現す数値パラメータで、 χ_{ij}^* は非線形移動硬化パラメータである。 χ_{ij}^* は次式で与えられる。

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^p - \chi_{ij}^* d\gamma^{P*}) \quad (5)$$

ここに、 A^* 、 B^* は材料パラメータ、 de_{ij}^p は塑性偏差ひずみ増分テンソル、 $d\gamma^{P*} (= (de_{kl}^p de_{kl}^p)^{1/2})$ は塑性偏差ひずみ増分テンソルの第2不変量である。サクシオンによる影響として B^* の初期値である B_0^* について以下のように考慮した。 S_{IB} 、 s_{db} がサクシオンによる強度変化を表すパラメータである。

$$B_{suc}^* = B_0^* \left[1 + S_{IB} \exp\left\{-s_{db} \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\}\right] \quad (5)$$

3. 解析条件および解析ケース

土質パラメータとして表1に示す佐原砂のパラメータ⁴⁾を用い、図3に示すような堤防高6m、勾配1:2の堤防モデルに対して検討を行った。初期地下水面は地表面とし、水位上昇速度1/3(m/hour)として河川の水位上昇をシミュレートした。ただし、水位が堤防天端に到達した後は水位上昇せずに水位を一定に保つと仮定し、水位上昇開始から70時間後まで解析を実施した。堤防盛土部の初期飽和度を60%、水分特性曲線としてはvan Genuchtenの式を採用している。以上の条件を用い、サクシオンによる強度変化を表すパラメータを変更して解析を実施した。解析ケース一覧を表2に示す。ただし、Case0は構成式にサクシオンの効果を導入していないことと同等であり、Case1,3ではサクシオン減少に伴う地盤の劣化を考慮していない。

キーワード：不飽和浸透、変形、堤防

連絡先：〒541-8528 大阪市中央区高麗橋 4-6-2 日建設計シビル 地盤設計部 06-6229-6372

4. 解析条件および解析ケース

図2,図3に時間の経過に伴う Case0,Case2 の飽和度分布および塑性偏差ひずみ増分テンソルの第二不変量の蓄積 γ^p ($\gamma^p = \int dy^p$, $dy^p = (de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2}$ 以後、蓄積塑性偏差ひずみと呼ぶ) 分布を示す。

水位上昇により浸潤が川表側から川裏側へ進行していき、70 時間後には川裏側に浸潤が到達している様子が観察できる。Case0 と Case2 における飽和度分布には大きな違いがなく、サクシジョンの影響による地盤の強度変化は、水の浸潤に大きな影響を与えないと考えられる。蓄積塑性偏差ひずみ分布では、18 時間後には川表側からの水に流入に伴いひずみが発生し、その後浸潤面にそってひずみを生じ、最終的には川裏側法尻部において大きな蓄積塑性偏差ひずみが発生している。

各ケース 70 時間後の川裏側法尻部における蓄積塑性偏差ひずみを表1にまとめている。Case1 と Case2 を比較すると、蓄積塑性ひずみはそれぞれ 2.85%、2.91% となった。これは、Case2 ではサクシジョン解放に伴う過圧密境界面の縮小が生じるためと考えられ、今回の解析ケースの中では最も大きい蓄積塑性偏差ひずみとなった。また、同様に Case3 と Case4 を比較すると、サクシジョン解放に伴う硬化パラメータの低減を考慮した Case4 のほうが大きな塑性偏差ひずみを生じている。

過圧密境界面および硬化パラメータの両者におけるサクシジョンの影響を考慮した Case5 では、70 時間後の川裏側法尻部の蓄積塑性偏差ひずみは 2.22% となっており Case2 よりも小さいが、これは硬化パラメータの初期値が Case2 よりも大きいこと等が影響していると考えられる。

5. まとめ

岡らの弾塑性構成式にサクシジョンの影響を導入して堤防の不飽和浸透-変形連成解析を実施したところ、サクシジョン解放による地盤の劣化を考慮した場合は、劣化を考慮しない場合より川裏側法尻部における蓄積塑性偏差ひずみの発生量が大きくなった。

参考文献 (1) 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. (2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04(2004 公開版)資料, 2004. (3) 加藤他: 不飽和浸透-変形連成解析手法と河川堤防への適用, 土木学会論文集 C, Vol165, No. 1, 226-240, 2009. (4) 山崎他: サクシジョン解放による劣化を考慮した堤防の浸透変形解析, 第 41 回地盤工学研究発表会, p1241-1241, 2006.

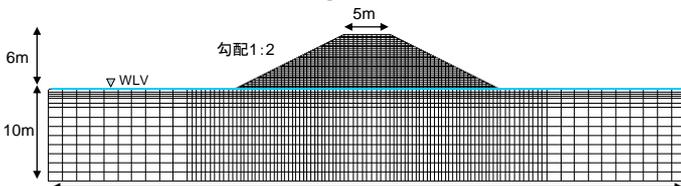


図1 解析モデル

川裏

川表

表1 地盤パラメータ

Initial void Ratio e_0	0.93
Compression index λ	0.0567
Swelling index κ	0.0091
Permeability k (m/s)	1.0E-05
Density ρ (kN/m ³)	19.0
Normalized Shear modulus $G0/\sigma'_m$	225.5
Quasi Over consolidation ratio (OCR*)	1.0
Phase transformation stress ratio M_m^*	1.15
Failure stress ratio M_f^*	1.19
Hardening parameter B_0^*	500
Hardening parameter B_1^*	3
Hardening parameter C_f	300
Dilatancy parameters: D^*, n	1.0, 2.0
Plastic, Elastic ref. strain $\gamma_{ref}^P, \gamma_{ref}^E$	0.001, 0.01
Initial degree of Saturation (S_r)	0.6
van Genuchten α and n'	4.0, 2.0

表2 解析ケース一覧

Case	サクシジョンパラメータ				70時間後の川裏法尻ひずみ
	SI	sd	SIB	sdb	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0236
1	0.50	0.00	0.00	0.00	0.0285
2	0.50	0.25	0.00	0.00	0.0291
3	0.00	0.00	0.50	0.00	0.0113
4	0.00	0.00	0.50	0.25	0.0226
5	0.50	0.25	0.50	0.25	0.0222

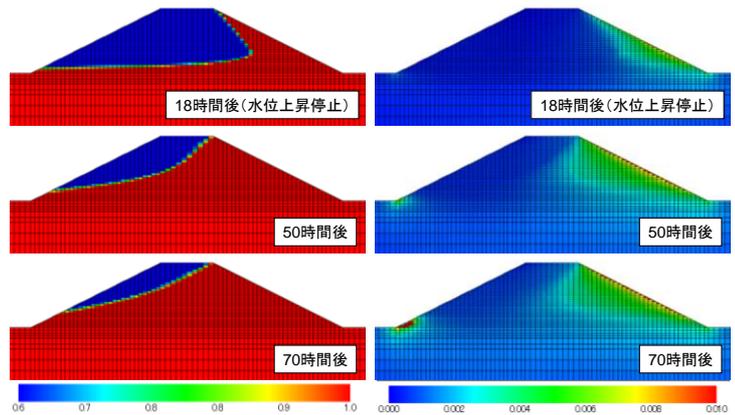


図2 Case1 飽和度分布(左)および蓄積塑性偏差ひずみ(右)

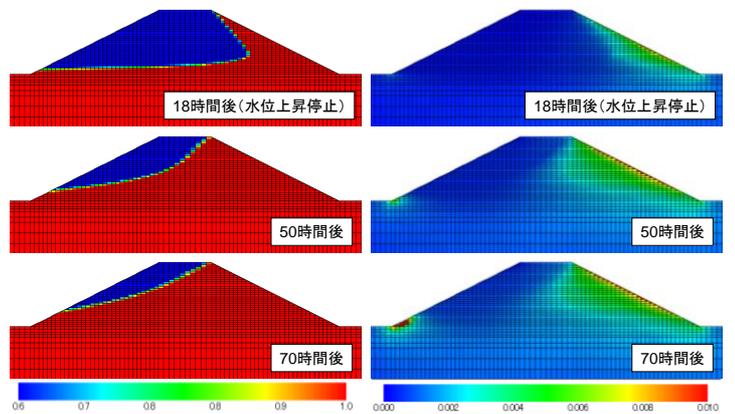


図3 Case2 飽和度分布(左)および蓄積塑性偏差ひずみ(右)