

第III部門

サクシヨン解放による劣化を考慮した堤防の浸透-変形連成解析

京都大学工学部	学生会員	○山崎 真也
京都大学大学院	フェロー会員	岡 二三生
京都大学大学院	正会員	小高 猛司、木元 小百合
京都大学大学院	学生会員	浅井 良太、高田 直明

1.はじめに

洪水時の堤防の変形・破壊を予測することは防災上重要である。堤防は通常不飽和状態にあり、不飽和土はサクシヨンの影響を強く受け、サクシヨンの解放により強度が低下することが知られている。本研究では、堤防の浸透変形解析を行うにあたり、飽和土の構成式にサクシヨンによる強度変化を考慮することで不飽和土の構成式に拡張し、堤防の浸透-変形連成解析を行った。

2.サクシヨンの影響を考慮した不飽和土の構成式

岡ら¹⁾による飽和砂の繰返し弾塑性構成式を不飽和砂の構成式に拡張するため、まず応力変数として平均化骨格応力(Average skeleton stress) σ'_{ij} を用いる。

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

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソル、 p^f は平均間隙圧力、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。平均間隙圧力は以下の式で表される。

$$p^f = S_r p^f + (1 - S_r) p^a \quad (2)$$

ここで S_r は飽和度、 p^f 、 p^a はそれぞれ液相、気相にはたらく圧力である。平均化骨格応力テンソルの第一不変量の1/3を平均骨格応力(Mean skeleton stress)と呼ぶ。サクシヨンによる強度増加を表現するために、過圧密境界曲面 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^* にサクシヨンによる影響を考慮した。

過圧密境界曲面…正規圧密領域と過圧密領域を区別する曲面

$$f_b = \bar{\eta}'_{(0)} + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma''_{mbi} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} v^p\right) \left[1 + S_l \exp\left\{-s_d \left(\frac{P_i^c}{P^c} - 1\right)\right\}\right] \quad (4)$$

$$\sigma''_{mbi} = (\sigma'_{mbi} - S_r P_i^c) \times OCR^* \quad (5)$$

ここに、 $\bar{\eta}'_{(0)} = \{(\eta'_{ij} - \eta'_{ij(0)})(\eta'_{ij} - \eta'_{ij(0)})\}^{1/2}$ で、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} は飽和土の場合の σ'_{mb} の初期値、 OCR^* は擬似過圧密比である。 S_l, s_d はサクシヨンによる強度変化を表すパラメータで、 P_i^c は初期サクシヨンである。

降伏関数…弾性域と弾塑性域を区分する曲面

$$f = \{(\eta'_{ij} - \chi'_{ij})(\eta'_{ij} - \chi'_{ij})\}^{1/2} - k = 0 \quad (6)$$

k は弾性域を表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。

$$d\chi'_{ij} = B^* (A^* de_{ij}^p - \chi'_{ij} d\gamma^{ps}) \quad (7)$$

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、 $d\gamma^{ps} (= (de_{kl}^p de_{kl}^p)^{1/2})$ は塑性偏差ひずみ増分テンソルの第2不変量である。 B^* の初期値である B_0^* にサクシヨンによる影響を考慮した。 S_{lb}, s_{ab} はサクシヨンによる強度変化を表すパラメータである。

$$B_{suc}^* = B_0^* \left[1 + S_{lb} \exp\left\{-s_{ab} \left(\frac{P_i^c}{P^c} - 1\right)\right\}\right] \quad (8)$$

3.堤防の浸透変形解析

解析に用いたプログラムは液状化解析コードLIQCA2D-04²⁾を不飽和浸透問題に拡張したLIQCA2D-SF³⁾である。解析に用いたパラメータを表1に示す。図1に用いた解析モデルを示す。天端5m、高さ6m、勾配1:2の堤体モデルである。初期地下水水位は地表面に一致しており、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。天端到達後は水位は上昇せず、水位を一定に保つと仮定した。ただし、降雨による堤防への浸透は考慮せずに、河川水位上昇のみを考慮して堤防の浸透変形解析を行った。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。サクシヨンパラメータを変えて解析を行った。この時の解析ケースと破壊までの時間を表2に示す。Case1は基本ケースでサクシヨンによる劣化を考慮していない。Case2とCase3はサクシヨンによる劣化を考慮するが、強度変

化の速度を調節するパラメータである s_d, s_{db} が異なる。本研究では液状化での基準を考慮し、偏差ひずみテンソルの第二不変量(以下偏差ひずみと呼ぶ)が 5%に到達した時点で浸透破壊が生じたと仮定した。

時間の経過にともなう Case1、Case2 の飽和度分布を図 2 に示す。水位上昇により、水が川表から川裏へと浸透していく様子が観察できる。Case1 が破壊に達する 93 時間後には川裏まで水が浸透し堤防内がほとんど飽和状態になっている。Case1 と Case2 とで飽和度には大きな違いはなく、サクシジョンによる劣化の考慮は水の浸透には大きな影響を与えないと考えられる。図 3 から図 6 に Case1 および Case2 の偏差ひずみ分布を示す。図 3,4 を見ると、どちらも浸潤面に沿って偏差ひずみが発生し、最終的には川裏法尻部分で偏差ひずみが大きく発生していることがわかる。また、サクシジョンの影響を考慮した Case2 のほうが浸潤面に沿ってより大きな偏差ひずみが発生していることが観察できる。しかし図 5,図 6 を見てみると、Case1 では川裏法尻部が破壊しているが、サクシジョン解放による劣化を考慮した Case2 では川表法面が早く破壊している。サクシジョン解放によって川表の強度が低下したためと考えられる。破壊時間を見てみると、劣化を考慮したことにより破壊到達時間が早くなり、また Case2 と Case3 ではサクシジョンパラメータ s_d, s_{db} の違いで破壊時間に大きな差が出ている。

4.まとめ

岡ら 1)による飽和砂の弾塑性構成式にサクシジョンの影響を考慮して不飽和砂の構成式を提案した。提案した構成式を用いて堤防の浸透変形シミュレーションを行った結果、サクシジョン解放による劣化を考慮することにより最大ひずみの生じる場所、時間が異なった。また、サクシジョンによる強度変化速度を調節するパラメータである s_d, s_{db} が大きいほど破壊に達する時間が早くなった。本研究で提案した方法は浸透変形に与えるサクシジョンの効果を表現することが可能であると考えられる。

[参考文献]

- 1)Oka et al.:*Geotechnique*, 49(5),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)加藤亮輔,岡二三生,小高猛司,角南進,木元小百合:河川堤防の不飽和浸透 - 変形連成解析,第 40 回地盤工学会概要集,pp.939-940, 2005.

[謝辞]

本研究費の一部は国土交通省の平成 17 年度建設技術

研究助成によった。記して謝意を表わす。

表 1 解析に用いたパラメータ

初期間隙比 e_0	0.93	硬化関数中のパラメータ C_c	300
圧縮指数 λ	0.0567	水の体積弾性係数 K_s (kPa)	2.0×10^6
膨張指数 κ	0.0091	異方性消失のパラメータ C_{α}	2000
初期せん断係数比 G_{cr}/σ'_{ve}	225.5	ダイラタシオン係数 D_{α}^* , n	10.20
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-5}	塑性基準ひずみ γ_{pl}^{*}	0.001
重力加速度 g (m/s ²)	9.8	弾性基準ひずみ γ_{el}^{*}	0.01
密度 ρ (t/m ³)	1.911	擬似過圧密比 OCR*	1
変相応力比 M_v^*	1.15	初期せん断係数に用いるパラメータ	
破壊応力比 M^*	1.19	ヤング係数 E (kPa)	2.65×10^6
硬化関数中のパラメータ B_0^*	500	ポアソン比 ν	0.258
硬化関数中のパラメータ B_1^*	3	内部摩擦角 Φ (deg)	35
		粘着力 c (kN/m ²)	10

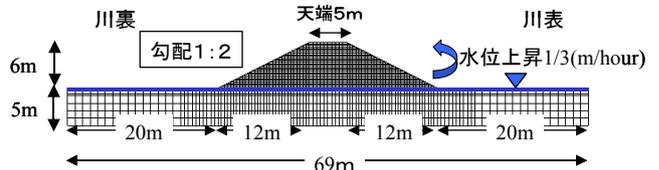


図 1 解析モデル

表 2 解析ケースと破壊までの時間

	S_d	S_{db}	s_d	s_{db}	破壊までの時間(hour)
Case1	3.0	3.0	0.0	0.0	93(川裏)
Case2	3.0	3.0	0.25	0.25	87(川表)
Case3	3.0	3.0	5.0	5.0	74(川表)

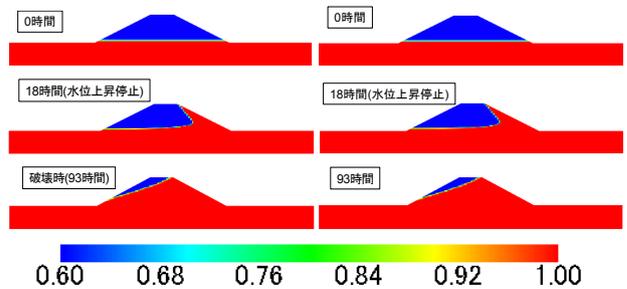


図 2 Case1(左)、Case2(右)飽和度分布

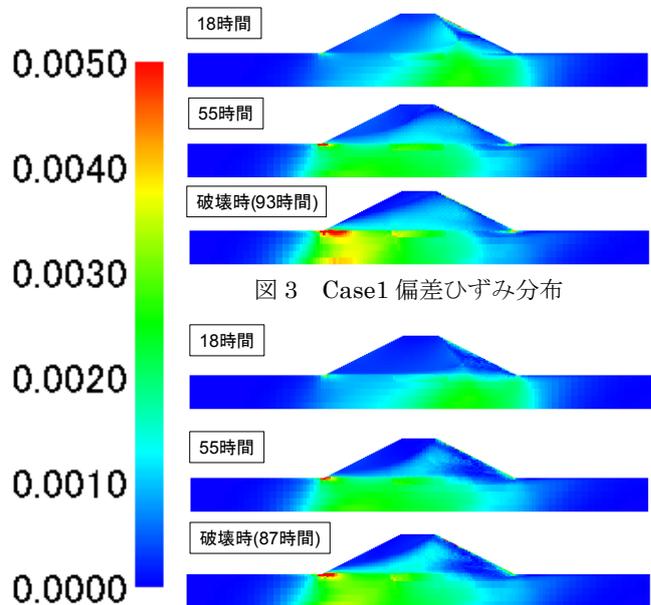


図 3 Case1 偏差ひずみ分布

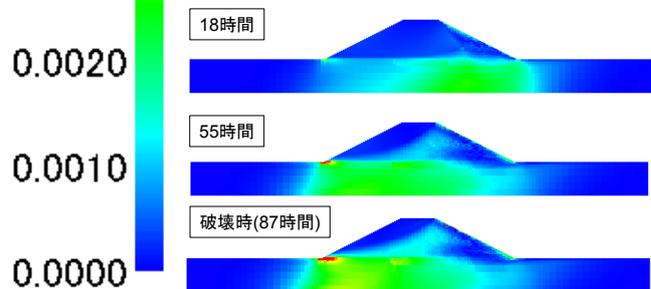


図 4 Case2 偏差ひずみ分布

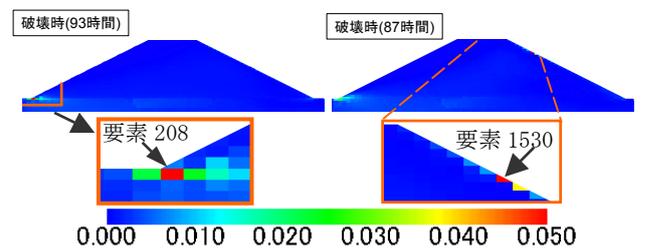


図 5 Case1 破壊時偏差ひずみ分布 図 6 Case2 破壊時偏差ひずみ分布