

水分特性曲線のヒステリシスを考慮した河川堤防の空気・水・土三相浸透変形連成解析

中日本高速道路 (元京都大学大学院)

京都大学大学院

京都大学大学院

京都大学大学院

京都大学大学院

正会員 田中 智太郎

フェロー会員 岡 二三生

正会員 木元 小百合

学生会員 ○山崎 真也

学生会員 森中 雄一

1. はじめに

近年、台風や局所的豪雨により河川堤防が決壊し、深刻な被害をもたらした事例が数多く報告されている。今後このような被害は多発すると考えられ、従来の堤防の安全性照査法の見直しが要求されている。本研究は、堤防を混合体理論に基づき、土、水、空気の三相からなる混合体としてモデル化し、河川堤防の浸透変形解析を行い、洪水時の堤防の安全性を検討する。

2. 応力変数

本研究では応力変数として、土骨格とその間隙を流れる流体の分応力から求められる平均間隙圧によって定義される骨格応力¹⁾(以下、骨格応力と呼ぶ)を用いる。

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

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソルで以下に示す分応力の和で表される。 P^F は平均間隙圧である。

$$\sigma^S = \sigma'_{ij} + n^S P^F \delta_{ij}, \quad \sigma^W = n^W P^W \delta_{ij}, \quad \sigma^G = n^G P^G \delta_{ij} \quad (2)$$

$$P^F = s^W P^W + s^G P^G \quad (3)$$

添え字 S, W, G はそれぞれ固相・液相・気相を表し、 n^S, n^W, n^G は各相の体積含有率を表す。 s^W, s^G はそれぞれ間隙水、間隙空気の飽和度を表す。また、式(1)で示した骨格応力とともにサクションの効果を構成式中で考慮する。

3. 不飽和土の弾粘塑性構成式

Oka ら²⁾ は、飽和土弾粘塑性構成式中の応力変数を骨格応力とし、さらにサクションによる強度変化を静的降伏関数および過圧密境界面に導入し不飽和土の構成式に拡張した。その拡張された構成式では、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は粘塑性流動則に従って以下のように書ける。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_{m'}}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (4)$$

ここで、 f_p は粘塑性ポテンシャル関数、 $\tilde{M}^*$ はダイレイタンシー係数、 C_{ijkl}, m' は粘塑性パラメータである。また、 σ'_{mb} は硬化パラメータで、この硬化パラメータにサクションの効果を考慮する²⁾。

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp \left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \epsilon_{kk}^{vp} \right) \left[1 + S_l \exp \left\{ -s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \quad (5)$$

P_i^C は初期サクション、 S_l, s_d はサクションに関するパラメータである。

4. 不飽和水分特性

飽和度とサクションの関係である水分特性曲線は、van Genuchten 式を用いる。

$$S_{re} = \left\{ 1 + (\alpha P^C)^n \right\}^{-m} \quad (6)$$

ここで、 α, n, m は形状パラメータである。また、透水係数及び透気係数も飽和度に依存するとする。

$$K_r^W = S_{re}^a \left\{ 1 - \left(1 - S_{re}^{1/m} \right)^n \right\} \quad (7)$$

$$K_r^G = (1 - S_{re})^b \left\{ 1 - \left(S_{re}^{1/m} \right)^n \right\} \quad (8)$$

ここで、 K_r^W, K_r^G はそれぞれ、透水・透気係数比で、飽和時の透水・透気係数 k_s^W, k_s^G に対する不飽和時の透水・透気係数の比である。 a, b は形状パラメータであり、 n, m は、水分特性曲線に用いた van Genuchten 式中のパラメータと同じものである。

5. 支配方程式

本研究における場の方程式は以下に示す、つり合い式、液相・気相の連続式である。

増分型つり合い式

$$\int_V (\dot{S}_{iji} + \dot{\rho}^F \bar{F}_i) dV = 0 \quad (\rho^F = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} n^{\alpha} \quad \alpha = S, W, G) \quad (9)$$

液相連続式

$$s \dot{\epsilon}_v + \dot{s} n = -V_{i,i}^W + \frac{Q_M^W}{\rho^W} \quad (10)$$

気相連続式

$$(1-s) \dot{\epsilon}_v - \dot{s} n + (1-s) n \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -\frac{(\rho^G V_i^G)_i}{\rho^G} + \frac{Q_M^G}{\rho^G} \quad (11)$$

S_{ij} は公称応力テンソル、 s は飽和度である。また、間隙水及び間隙空気は以下に示す Darcy 則に従うものとする。以上、式(9)～式(11)を updated Lagrangian 法を用いて有限要素定式化を行う。

6. 解析条件

解析モデルを図1に示す。解析モデルは横 49(m)、高さ 5(m)の基礎地盤上に、天端 5(m)、盛土高さ 6(m)、勾配 1:2 の堤体を考え、初期水面を堤防と基礎地盤の境界に設定する。モデル右側(川表側)の水位を 1/3 (m/s) の速度で天端まで上昇させ、その後 3 日間(72 時間)水位を天端で維持し、上昇時と同じ速度で水位を低下させる。その後さらに 5 日間(120 時間)その状態を保つ。なお、解析に用いたパラメータを表1に示す。Case1 は水分特性曲線のヒステリシスを考慮しないケース、Case2 は水分特性曲線のヒステリシスを考慮し、2つのケースの比較を行った。図2に本研究で用いた水分特性曲線を示す。なお、大気圧は 0kPa とする。

キーワード：不飽和、浸透、堤防

住所：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4 C クラスターC1 棟、 電話・FAX：075-383-3193

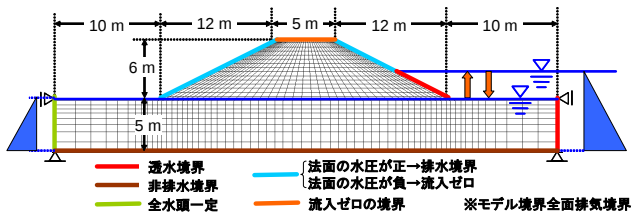


図1 解析モデル

表1 解析に用いたパラメータ

圧縮指数	λ	0.136
膨潤指数	κ	0.0175
初期間隙比	e_0	1.03
破壊応力比	M^*	1.01
基準となる初期せん断弾性係数	G_0	32400 (kPa)
基準となる初期平均骨格応力	σ'_{mi}	205 (kPa)
粘塑性パラメータ	C_1	1.0×10^{-11} (1/s)
粘塑性パラメータ	C_2	1.5×10^{-11} (1/s)
粘塑性パラメータ	m'	23.0
サクシオンパラメータ	S_l	0.2
サクシオンパラメータ	s_d	0.25
飽和透水係数	k^w_s	1.0×10^{-5} (m/s)
飽和透気係数	k^e_s	1.0×10^{-3} (m/s)
透水係数比形状パラメータ	a	3.0
透気係数比形状パラメータ	b	2.3
最大飽和度	Sr_{max}	0.99
最小飽和度	Sr_{min}	0.00
van Genuchtenパラメータ	α	0.20 (1/kPa)
van Genuchtenパラメータ	n	1.48

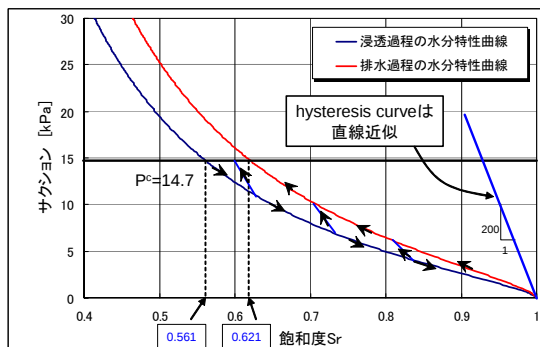


図2 水分特性曲線

7. 解析結果

Case1, Case2 の 230 時間後の飽和度分布を図 3 に示す。本報ではスペースの都合上省略するが、湿潤過程の水分特性曲線は同じであるため、Case1, Case2 ともに水位低下直前までの飽和度分布は同様の挙動を示す。また、水位上昇に伴い浸潤面が上昇し、一定時間経過後は定常状態になりそれ以上の浸潤面の上昇は見られなかった。また、水位低下とともに堤体内部の飽和度が川表側から徐々に低下し、230 時間後ではほぼ定常状態となったが、初期状態と同じ水面形には戻らず、凸レンズ状の水面形状となった。特に水分特性曲線のヒステリシスを考慮した Case2 では、サクシオンは初期サクシオンまでしか回復しないと仮定して解析したため、川表側で飽和度の低下が抑制されている (図 3)。

図 4 に Case1 と Case2 の蓄積粘塑性偏差ひずみの第二不変量(230 時間後)の分布図を示す。図 4 より、両ケースともに川表法面及び川裏法尻部で大きなひずみの発生が見られた。Case1 では特に川表法尻部分にひずみの発生が集中し、Case2 では川表法面全体に比較的大きなひずみの発生が観察された。

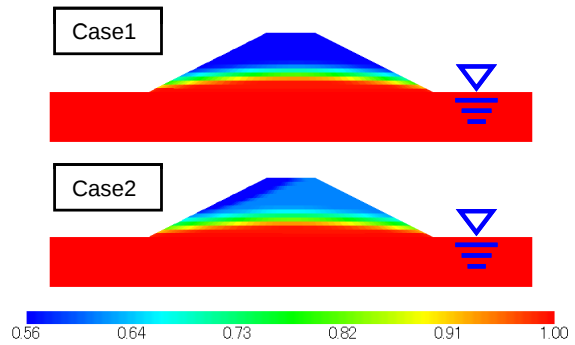


図3 飽和度分布図(230 時間後)

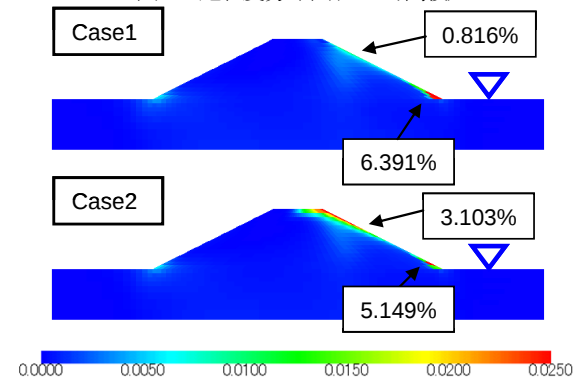


図4 蓄積粘塑性偏差ひずみの第二不変量分布(230時間後)

図5に水位上昇完了時と低下完了時の間隙空気圧分布を示す。水位の上昇が完了した 18 時間後には盛土内に大気圧より大きな気圧が発生している。また、低下が完了した108時間後には小さいが負圧が盛土内部に発生している。

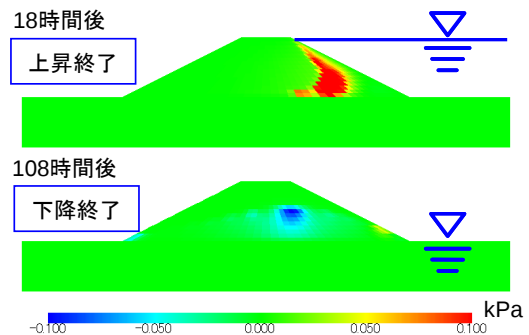


図5 間隙空気圧分布

8. まとめ

空気・水・土連成有限要素法を用いて水位低下・水分特性曲線のヒステリシスを考慮した堤防盛土の不飽和浸透変形連成解析を行った。その結果、水位の低下に伴って盛土内の気圧が下がり、川表側法面、法尻部、川裏法尻部でひずみが蓄積することが確認された。そして、その発生の仕方・発生量に違いが見られた。また、水位低下後、定常状態では浸潤面は凸レンズ型となった。Case2 では間隙水圧は低下するが飽和度が下がりにくく、川表側の堤体内に残存する水分量が多くなった。

参考文献

- 1) Jommi, C. : Remarks on the constitutive modeling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, pp.139-153, 2000.
- 2) Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Kim, Y.S. and Yamasaki, N.: A multi-phase coupled FE analysis using an elasto-viscoplastic model for unsaturated soil, Proc. of 2nd GI-JGS Workshop, 2005.
- 3) 山崎順弘: 弾粘塑性性土盤の多相連成変形解析法, 京都大学大学院修士論文, 2005.