

浸透時における河川堤防の多相浸透-変形連成解析と実験との比較

京都大学大学院 学生会員 ○森中 雄一
 元京都大学大学院 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 木元 小百合
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

飽和度とサクシヨ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ものとする。

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

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

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 式における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

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

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

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

S_{ij} は公称応力テンソル、 s は液相の飽和度である。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する。

6. 解析条件

上記の空気・水・土連成有限要素法を用いて河川堤防の浸透変形連成解析を行う。解析モデルを図1に示す。堤防模型実験に用いられた堤防模型は、基礎地盤の高さが0.5m、天端長さが0.7m、盛土の高さが1.0mで法面の勾配が1:2のモデルである。用いた土は淀川堤防用盛土砂である³⁾。模型実験の堤防断面図には、間隙水圧計の位置も示している。間隙水圧計は図に示すように、盛土内に10箇所、基礎地盤部に1箇所の計11箇所に設置されている。実験では堤防の模型の片方の水位を9分～30分(実験ケースによって異なる)かけて上昇させ、40～50時間湛水させ、堤体内の浸潤面をほぼ定常状態にしている。本解析では、初期水位は実験条件に合わせて基礎地盤の底部とする。また、9分(0.13時間)で天端まで上昇するとし、50時間湛水させた。解析に用いた地盤材料のパラメータを表1に示す。

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。今後も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。高精度の河川堤防安全性照査法の開発を目的として、多相浸透解析モデルの開発を行っている¹⁾。本研究は、洪水時の堤防の浸透・変形連成メカニズムの解明を目的としており、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ている。京都大学防災研究所宇治オープンラボラトリーで実施されている河川堤防浸透実験結果との比較を行った。

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)とサクシヨンをを用いる。

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

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。

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

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

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ヨンの効果を構成式中で考慮する。

3. 不飽和土における弾粘塑性構成式

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、さらにサクシヨ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。

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

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ヨンの効果を考慮する²⁾。

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

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

4. 不飽和特性

キーワード 堤防、不飽和土、シミュレーション

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1 棟 地盤力学研究室 TEL 075-383-3193

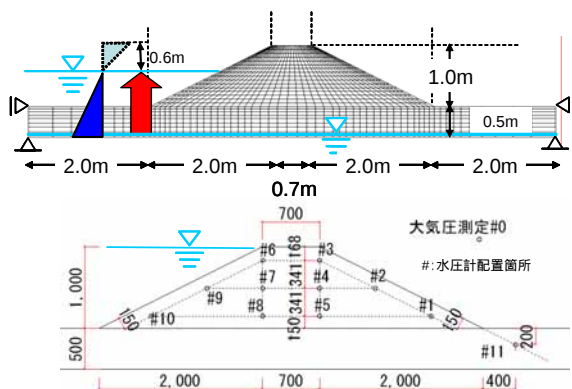


図1 解析モデルと堤防模型の断面図

表1 解析に用いた土質パラメータ

圧縮指数	λ	0.0136
膨潤指数	K	0.0055
初期間隙比	e_0	0.59
破壊応力比	M'	0.947
基準となる初期せん断弾性係数	G_0	4000(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^{-8} (1/s)
粘塑性パラメータ	C_2	1.0×10^{-8} (1/s)
粘塑性パラメータ	m'	23.0
サクシオンパラメータ	S_f	0.2
サクシオンパラメータ	S_d	0.25
飽和透気係数	k^0_s	1.00×10^{-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	2 (1/kPa)
van Genuchtenパラメータ	n	1.2
初期応力解析		
ヤング係数	E	7900 (kPa)
ポアソン比	ν	0.33
内部摩擦角	ϕ	30.0
粘着力	c	0.0

7.解析結果

室内透水試験による透水係数を用いた均質地盤モデルでは浸潤線の進行を説明できないため、堤防モデル作成に起因する地盤の不均一性を考慮に入れた。実験に用いられた堤防模型は土を10cmずつ積み、その後締固め、所定の堤防の形に成形されている。堤防模型の場所によって締固め度が異なっていると考えた。具体的には、図2のような解析モデルを設定した。透水係数を変えることで、材料の違いを考慮した。表2に解析条件を示す。

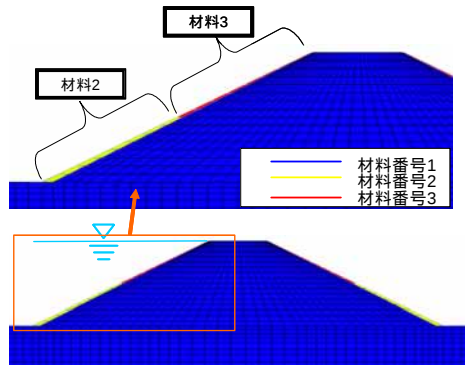


図2 解析モデルの材料設定

図3に実験結果の間隙水圧の時刻歴と解析結果の間隙水圧の時刻歴を示す。赤色の#10、青色の#8、紫色の#5

が間隙水圧の反応時間及び水圧の収束値が実験結果と非常に近い値であったと言える。全体的にみてこの解析結果は、実験結果を良好に再現している。また、図4に解析結果の飽和度分布図を示す。

表2. 解析条件

	水平透水係数	鉛直透水係数
材料1	1.83×10^{-5} (m/s)	1.83×10^{-6} (m/s)
材料2	1.83×10^{-7} (m/s)	1.83×10^{-7} (m/s)
材料3	1.83×10^{-8} (m/s)	1.83×10^{-8} (m/s)

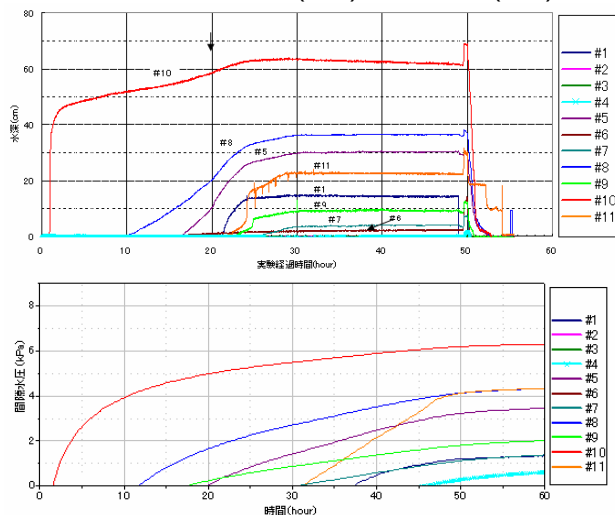


図3 間隙水圧の変化

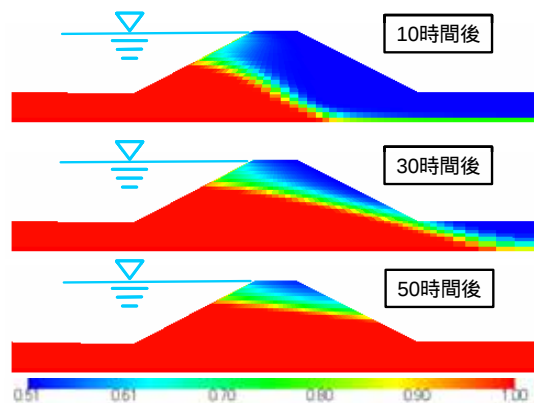


図4 飽和度分布解析結果図

8.まとめ

空気-水-土連成有限要素法を用いて越流時の堤防盛土の不飽和浸透変形連成解析を行った。京都大学防災研究所宇治オープンラボラトリーで実施されている河川堤防模型実験結果との比較を行った。その結果、浸透解析において解析モデルを不均一と見なした場合、概ね実験結果を再現できた。

9.謝辞

本研究の一部は平成19年度河川環境管理財団の助成によるります。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 高田・小高・岡・後藤・木元：堤防盛土の空気-水-土多相浸透変形連成解析、第42回地盤工学研究発表会、2006。
- 2) Jommi, C : Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, pp.139-153, 2000。
- 3) Oka, F. Kodaka, T. Kimoto, S. Kim, Y-S. and Yamasaki, N.: Proc. of 2nd GI-JGS Workshop, 2005。
- 3) 福谷ら：排気・排水及び非排気・非排水条件下における盛土砂の不飽和三軸試験、第43回地盤工学研究発表会