

京都大学大学院	学生員	西村 太佑
京都大学大学院	フェロー	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
元京都大学大学院	正会員	森中 雄一

### 1. 研究の背景と目的

近年、局所的豪雨などによる河川水位上昇により河川堤防が決壊し、甚大な被害をもたらした事例が数多く報告されている。そのため、洪水時等における堤防の安全性の検討及び効果的な補強方法が重要な課題となっている。そこで、より詳しい堤防安全性照査法の開発を目的として多相浸透 変形連成解析モデルの開発を行ってきた<sup>1)</sup>。本研究では、FEMを用いて堤防の浸透 変形連成解析を行った。また、京都大学防災研究所宇治オープンラボラトリーで行われている堤防模型浸透実験のシミュレーションを行い、実験結果と比較した。特に浸透による堤防の法尻近傍での変形に着目した。地盤材料のパラメータについては、模型実験で使用した土質材料の不飽和土試験より求められたものを用いた。

### 2. 分応力と骨格応力

本研究では、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テンソルを応力変数として用いる。

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

ここで、 $\sigma_{ij}$  は全応力で、各相の応力テンソルの和によって定義される。 $P^F$  は平均間隙圧である。

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

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。

### 3. 不飽和土の弾粘塑性構成式

岡らは、飽和土弾粘塑性構成式中の応力変数を平均骨格応力とし、さらにサクシオ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<sup>2)</sup>。拡張された構成式において、粘塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$  は粘塑性流動則を用いて以下のように表わされる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \sigma'_{m} \exp \left\{ m' \left( \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_{m}}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (3)$$

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、 $\sigma'_{mb}$  は硬化パラメータで、この硬化パラメータ  $\sigma'_{mb}$  によってサクシオンによるせん断強度の増加を考慮している<sup>1)</sup>。

### 4. 支配方程式

場の支配方程式は以下に示す、つりあい式、液相・気相の連

続式である。

#### 増分型つりあい式

$$\dot{S}_{ji,j} + \dot{\rho}^E \bar{F}_i = 0 \quad (\rho^E = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} n^{\alpha} \quad \alpha = S, W, G) \quad (4)$$

#### 液相の連続式

$$s \dot{\epsilon}_v + \dot{s} n = -V_{i,i}^W \quad (5)$$

#### 気相の連続式

$$(1-s) \dot{\epsilon}_v - \dot{s} n + (1-s) n \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -V_{i,i}^G \quad (6)$$

$S_{ij}$  は公称応力テンソル、 $\bar{F}_i$  は物体力、 $s$  は液相の飽和度である。また、間隙水および間隙空気はDarcy則に従うものとする。以上、式(4)~式(6)を updated Lagrangian 法により有限要素定式化し、浸透変形解析を行う。なお、未知数は、固相の変位・間隙水圧・間隙空気圧である。

### 5. 不飽和浸透特性

飽和度とサクシオンの関係である水分特性曲線は、van Genuchten 式を用いる。有効飽和度  $S_{re}$  は次のように表される。

$$S_{re} = \left\{ 1 + (\alpha P^C)^n \right\}^{-m} \quad (7)$$

ここで、 $\alpha, n', m$  は形状パラメータである。また、透水係数および透気係数も飽和度に依存するものとし、次式で表すものとする。

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

$$K_r^G = (1 - S_{re})^b \left\{ 1 - \left( S_{re}^{1/m} \right)^n \right\} \quad (9)$$

$K_r^W, K_r^G$  はそれぞれ透水・透気係数比で飽和時の透気・透水係数  $k_s^W, k_s^G$  に対する不飽和時の透水・透気係数の比であり、 $a, b$  は形状パラメータである。

### 6. 実験・解析条件

上記の三相連成有限要素法を用いて河川堤防模型実験の浸透変形連成解析を行う。解析モデル及び実験に用いられている堤防の断面図を図1に示す。実験の堤防模型図には、堤内に設置された間隙水圧計の位置も示している。間隙水圧計は図2に示すように、盛土内に5点設置している。また、川裏法面の法尻から法面に沿って法面中央部まで堤体奥行き中央部にて、等間隔に10点、レーザー変位計にて計測を行う。解析条件は、水位を9分間で基礎地盤底部から天端まで1.5m上昇させ、到達後は24時間水位を天端で維持する。これは、模型実験の実験条件に合わせている。今回用いた材料は前島ストックヤードから搬入された淀川堤防砂であり、締固め度は90%である。表1に示す解析に用いたパラメータは矢吹ら(2008)による同堤防砂の不飽和三軸試験により決定した。

### 7. 解析結果

透水試験により得られた透水係数が地盤全体で一様であるとして解析を行うと、実験結果よりも法面からの流入量が多く、また堤体内部の水平方向の浸潤速度が小さいなど、浸潤の様子が再現できなかった。そこで、川表法面の間隙空気圧による水の流入し難さ、堤体模型作成に起因する不均一性等を考慮し、堤体全体の透水係数が不均一であると仮定し、解析モデルを設定した。具体的には図2のように5つの材料に分け、個別に透水係数を設定できるようにした。設定した透水係数は表2に示す。図3に間隙水圧の時刻歴について、実験結果と解析結果をそれぞれ示す。両者を比べてみると、それぞれの計測地点について、水圧反応時刻及び水圧の収束値ともに実験結果を概ね良好に再現している。また図4に川裏法面の変位時刻歴を示す。両者を比較すると、法面中央付近の変位については定量的にも良く再現できており、法尻付近については、実験結果では膨張傾向を示しているのに対し、解析結果では沈下傾向が見られる。

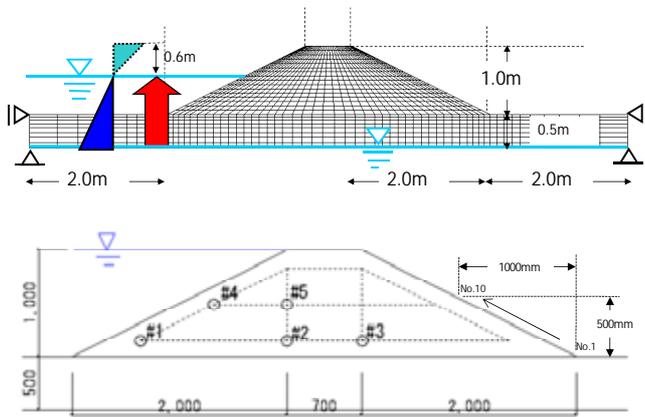


図1.解析モデルと堤防模型断面図

表1. 解析に用いた材料パラメータ

圧縮指数	0.0804	飽和透水係数	$k_{vs}^*$	$4.79 \times 10^{-6}$ (m/s)
膨潤指数	0.0090	飽和透気係数	$k_{vg}^*$	$1.00 \times 10^{-3}$ (m/s)
初期空隙比	$e_0$	透水係数比形状パラメータ	$a$	3.0
破壊応力比	$M'$	透気係数比形状パラメータ	$b$	2.3
基準となる初期せん断弾性係数	$G_0$	最大飽和度	$Sr_{max}$	0.99
基準となる初期平均骨格応力	$m$	最小飽和度	$Sr_{min}$	0.00
粘塑性パラメータ	$C_1$	van Genuchten/パラメータ	$n'$	2 (1/kPa)
粘塑性パラメータ	$C_2$	van Genuchten/パラメータ	$n''$	1.2
粘塑性パラメータ	$m'$	サクシオンパラメータ	$S_s$	0.2
		サクシオンパラメータ	$S_g$	0.2

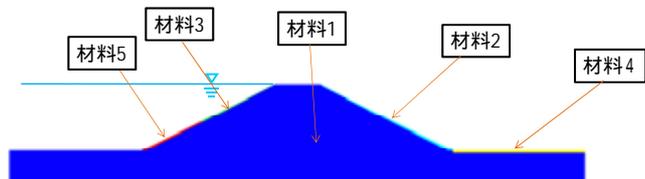


図2. 解析モデルの設定

表2. 透水係数の設定

材料	水平透水係数	鉛直透水係数
材料1	$8.79 \times 10^{-5}$ (m/s)	$6.79 \times 10^{-6}$ (m/s)
材料2	$4.79 \times 10^{-5}$ (m/s)	$4.79 \times 10^{-6}$ (m/s)
材料3	$3.79 \times 10^{-7}$ (m/s)	$3.79 \times 10^{-7}$ (m/s)
材料4	$4.79 \times 10^{-6}$ (m/s)	$4.79 \times 10^{-6}$ (m/s)
材料5	$5.79 \times 10^{-7}$ (m/s)	$5.79 \times 10^{-7}$ (m/s)

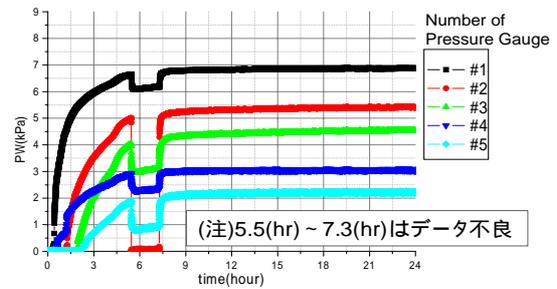


図3.a 間隙水圧時刻歴 (実験結果)

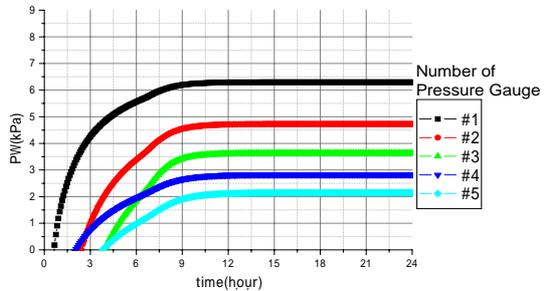


図3.b 間隙水圧時刻歴 (解析結果)

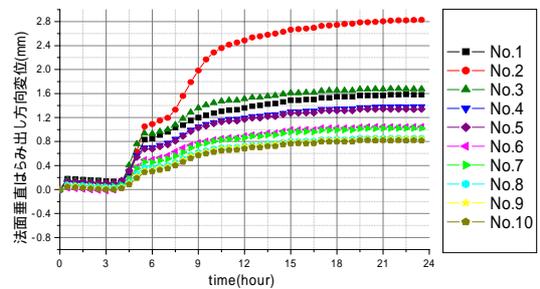


図4.a 川裏法面変位時刻歴 (実験結果)

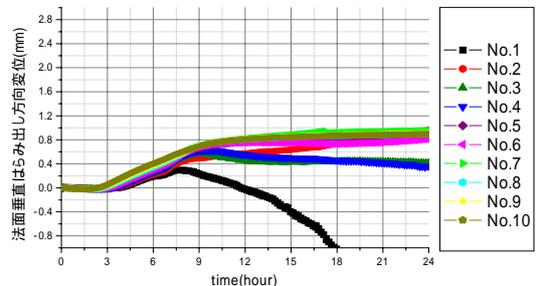


図4.b 川裏法面変位時刻歴 (解析結果)

### 8. まとめ

三相連成有限要素法を用いて浸透時の堤防模型実験の浸透-変形連成解析を行った。京都大学防災研究所中書島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との比較を行ったが、その結果、堤体の透水係数が不均一であるとみなした場合、実験結果を再現し得ることが明らかになった。

### 参考文献

- 1) 山崎真也: 多相浸透 連成変形解析を用いた浸透及び越流時の河川堤防の解析, 京都大学大学院修士論文, 2007.
- 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, Sep. 8-10, 2005, Osaka, Japan.
- 3) Oka, F., Yamashita, 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.