越流を考慮した堤防盛土の多相浸透 - 変形連成解析

ジェイアール西日本コンサルタンツ	(元 京都大学大学院)	正会員	○高田 直明
	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	後藤 仁志
	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	小髙 猛司

し、次式で表すものとする。

5. 支配方程式

増分型つり合い式

液相連続式

気相連続式

6. 解析条件

5m

V

 $\left[ (\dot{S}_{ii,i} + \dot{\rho}^{E} \overline{F}) dV = 0 \right]$ 

 $s\dot{\varepsilon}_v + \dot{s}n = -V_{i,i}^w + \frac{Q_M}{c^W}$ 

 $(1-s)\dot{\varepsilon}_{v} - \dot{s}n + (1-s)n\frac{\dot{\rho}^{G}}{\rho^{G}} = -$ 

堤防の浸透変形連成解析を行う。

<u>12m</u>

$$\begin{split} K_{r}^{W} &= S_{re}^{a} \left\{ 1 - \left( 1 - S_{re}^{-1/m} \right)^{n} \right\} \\ K_{r}^{G} &= (1 - S_{re})^{b} \left\{ 1 - \left( S_{re}^{-1/m} \right)^{n} \right\} \end{split}$$

ここで、K<sup>W</sup>,K<sup>G</sup>はそれぞれ、透水・透気係数比で、

飽和時の透水・透気係数k<sup>w</sup>,k<sup>c</sup>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

本研究における場の方程式は以下に示す、つり

S. 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

上記の空気‐水‐土連成有限要素法を用いて河川

<u>5m</u>

49m

図1 解析モデル

解析モデルは図1に示すように、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。川表側水位が天端へと到達した後、越流

水深まで上昇させ越流を発生させる。越流発生時刻 および越流継続時間を変更して堤防の挙動を考察し

た(表1)。なお、越流水深は0.305(m)とし、天端か

ら越流水深までの水位上昇速度はそれぞれ1/3 (m/

hour)、-1/3(m/hour)とした。また、越流の境界条 件の設定方法は、後藤によって、MPS (Moving Part icle Semi-implicit)法により求められた越流水に

よる壁面鉛直衝突圧4<sup>4</sup>を、FEMにおいて、境界の水

6m

Lagrangian 法を用いて有限要素定式化する<sup>3)</sup>。

 $(\rho^{E} = \sum \rho^{\alpha} n^{\alpha} \quad \alpha = S, W, G)$ 

式におけるパラメータと同じものである。

合い式、液相・気相の連続式である。

(7)

(8)

(9)

(10)

(11)

10m

## 1. <u>はじめに</u>

2004年、2005年は国内外で台風、ハリケーン、集 中豪雨による堤防被害が多数発生した。その結果従 来の堤防の安全性照査の見直しが要求されている。 また、堤防は越流を伴うと容易に破堤する傾向があ る。本研究は、越流を伴う堤防の浸透変形メカニズ ムの解明を目的とする。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、越流時の浸透変形解析を行った。

# 2. <u>応力変数</u>

本研究では応力変数として、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 て定義される平均化骨格応力<sup>1)</sup>(以下、骨格応力と呼 ぶ)を用いる。

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

ここで、 $\sigma_{ij}$ 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、 $n^{s}, n^{w}, n^{c}$ は各相の間隙率を表す。 $s^{w}, s^{c}$ 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. 不飽和土における弾粘塑性構成式

**Oka**ら<sup>2)</sup> によって不飽和領域にまで拡張された構成式では、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{ij}$ は粘塑性流動則に従って以下のように書ける。

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

ここで、 $f_p$ は粘塑性ポテンシャル関数、 $M^*$ 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、ここにサ クションの効果を考慮する<sup>2)</sup>。

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

 $P_i^c$ は初期サクション、 $S_1, s_d$ はサクションに関する パラメータである。

### 4. <u>不飽和特性</u>

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。

$$S_{re} = \{1 + (\alpha P^{c})^{n}\}^{m}$$
(6)  
ここで、 $\alpha, n, m$ 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

キーワード 堤防,多相系,越流

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学研究室 075-753-5086







図3 間隙空気圧分布(kPa) (CASE1) CASE1の間隙空気圧分布を図3に示す。水位上昇 とともに間隙空気圧が発生し、浸潤とともに発生し た間隙空気圧が堤体外へと排出される。また、間隙 空気圧は浸潤面に沿って発生しており、水位が一定 となり急激に浸透が始まる18時間後に他の時間よ りも大きな空気圧が発生している。



CASE2の飽和度分布を図3に示す。水位上昇とと もに堤体内に水が浸潤して行き、18時間後に水位が 天端に達し、越流が始まる。越流が始まってからは 天端および川裏法面からも越流水によって堤体内に 水が浸潤していく。越流が終了する21時間後以降は、 裏法面の浸透水は堤体底部に移動していく。



図5 蓄積粘塑性偏差ひずみ分布(76時間後) CASE1~CASE4の76時間後の粘塑性偏差ひず みテンソルの第二不変量の蓄積量分布を図5に示す。 どのケースも川裏側に偏差ひずみが集中して発生して いるが、越流を伴うケースは伴わないケースと比較して ひずみの発生量が増加している。越流を伴うケースに おいても、CASE2よりも越流継続時間が長いCASE3の 方が大きなひずみが発生している。また、同じ越流継続 時間のCASE2とCASE4においても越流発生時刻の違 いによりひずみの発生量が異なる。越流の発生時刻と 堤体内の浸潤面の位置との関係は、堤防においてひ ずみの発生量や発生箇所、越流終了後の堤防の挙動 に深く関わっていると言える。

### 8. <u>まとめ</u>

越流時の浸透変形解析を行った結果、越流が発生 すると川裏法尻部の偏差ひずみの発生量が増大する 結果となった。また、越流の発生時刻と堤体内の浸 潤面の位置は、ひずみの発生量や発生箇所に深く関 わっていることが分かった。そのため、越流時にお ける堤防の変形挙動を考える際には、いつどのよう な状況で越流が発生するかに留意して検討を行うこ とが重要であると言える。なお、本研究は河川環境 管理財団の河川整備基金助成事業及び国土交通省建 設技術研究開発助成事業の助成を受けて実施したもの で、記して謝意を表する。

#### 参考文献

 Jommi, C.: Remarks on the constitutive modeling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, pp.139-153, 2000.
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, (to be published).
山崎順弘:弾粘塑性地盤の 多相連成変形解析法,京都大学大学院修士論文,2005.4) 岡二三生,小高 猛司,後藤仁志,木元小百合:平成17年度建設技術研究開発助成報告書, 掲載予定, 2006.