

第 部門

越流水圧を考慮した河川堤防の多相浸透-変形連成解析

京都大学工学部	学生員	野間 健介
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
京都大学大学院	学生員	西村 太佑

1. 研究の背景と目的

近年、局所豪雨などによる河川の氾濫事例が急激に増加している。そのため、河川堤防の役割は以前にも増して重要になっており、精度の高い解析技術の開発が必要となる。従来の安全性照査法では浸透と円弧すべりについて別々に解析を行い、また越流する場合については想定外である。しかし浸透と変形は相互に関係し、破堤の多くは越流が関係している。本研究では浸透-変形連成解析を用いて、越流模型実験<sup>1)</sup>のシミュレーションを行った。また堤体高さを変えたモデルについて解析を行い比較した。

2. 多相連成有限要素法の支配方程式

本研究では式(1)のように、つりあい式を増分型境界値問題として定式化した。

$$\dot{S}_{ij,j} + \rho^E \bar{F}_i = 0 \quad (\rho^E = \sum \rho^\alpha n^\alpha \quad \alpha = S, W, G) \quad \dots \quad (1)$$

$S_{ij}$  は公称応力速度テンソル、 $\rho$  は各相の密度、 $\bar{F}_i$  は物体力、 $n$  は各相の体積含有率を表す。また添字の  $S, W, G$  はそれぞれ固相、液相、気相としている。また液相、気相の連続式を式(2)、(3)に、骨格応力テンソル  $\sigma_{ij}$  は引張りを正として式(4)に示す。

$$s \dot{\epsilon}_v + \dot{s}n = -V_{i,i}^w \quad \dots \quad (2) \quad , \quad (1-s)\dot{\epsilon}_v - \dot{s}n + (1-s)n \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -V_{i,i}^G \quad \dots \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad \dots \quad (4) \quad , \quad P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad \dots \quad (5)$$

$s$  は飽和度、 $\dot{\epsilon}_v$  は体積ひずみ速度、 $V_i^\alpha$  は  $\alpha$  相の  $S$  相に対する相対速度ベクトルとし、また  $\sigma_{ij}$  は全応力テンソルで、 $P^F$  は流体の平均間隙圧とし、 $P^\alpha$  は  $\alpha$  相に働く圧力である。また間隙流体は Darcy 型相互作用関係式に従うものとする。

3. 不飽和土における弾粘塑性構成式

岡らは、飽和度弾粘塑性構成式中の応力変数を骨格応力テンソルとし、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、粘塑性ひずみ速度テンソル  $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$  は粘塑性流動則に従って式(6)となる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \sigma'_m \exp \left\{ m' \left( \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad \dots \quad (6)$$

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、これによりサクシオンによるせん断強度の増加を考慮している<sup>3)</sup>。

4. 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 式を用いて式(7)のように表した。

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

$S_{re}$  は有効飽和度、 $P^C$  はサクシオンであり、 $\alpha, n, m$  は形状パラメータである。また透水係数比、透気係数比は飽和度に依存するものとしている。

5. 解析モデル及び条件

上記の三相連成有限要素法を用いて、堤体高さが 1m、3m、5m のそれぞれの河川堤防で越流を考慮した浸

透-変形連成解析を行った。越流模型実験にて用いられた堤体をモデル化した。堤体高さ 1m の解析モデルを図 1 に示す。より実堤防に近い高さのモデルについて検討するため、高さ 3m、5m のケースについても、解析を行い、解析モデルは相似形になるように設定した。基礎地盤部底部から 1/6(m/min) の速さで水位を上昇させており、水位が天端まで到達後 40 時間浸透させた後、川裏側に越流水圧を与えている。越流水圧については、別途後藤(2006)により粒子法の一つである MPS 法を用いて求められた越流水圧が 30cm の時の水圧を法面の節点に与え、越流を模擬している<sup>4)</sup>。また表 1 に本解析で用いた材料パラメータを示す。

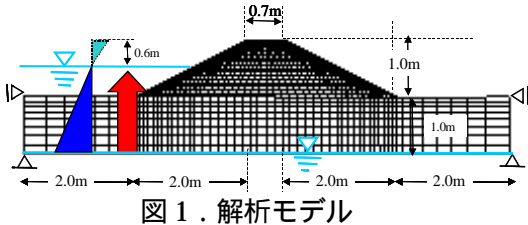


図 1 . 解析モデル

表 1 . 材料パラメータ

圧縮指数		0.0804	飽和透水係数	$k_s$	$1.0 \times 10^{-1}(1/s)$
膨潤指数		0.009	透水係数比形状パラメータ	$a$	3
初期間隙比	$e_0$	0.535	透気係数比形状パラメータ	$b$	2.3
破壊応力比	$M^*$	1.27	最大飽和度	$S_{rmax}$	0.99
基準となる初期せん断弾性係数	$G_0$	25000(kPa)	最小飽和度	$S_{rmin}$	0
圧密降伏応力	$\sigma_{vm}$	130(kPa)	van Genuchten パラメータ		$2(1/kPa)$
粘塑性パラメータ	$C_1$	$1.0 \times 10^{-2}(1/s)$	van Genuchten パラメータ	$n'$	1.2
粘塑性パラメータ	$C_2$	$2.0 \times 10^{-2}(1/s)$	サクシオンパラメータ	$S_s$	0.2
粘塑性パラメータ	$m'$	40	サクシオンパラメータ	$s_s$	0.2
			構造パラメータ		5

## 6. 解析結果

図 2 に堤防高さ 1m、3m、5m のそれぞれの飽和度分布図を示す。水が川表から徐々に浸潤する様子が確認される。2 時間後の図を見ると、堤体高さが高くなるにつれて、飽和している領域が少ない事がわかる。堤防高さが 1m、3m の堤防では越流時において浸潤面が川裏法尻部に到達しており、また越流前には堤防上部において飽和していなかった部分が、越流後には完全に飽和している。堤体高さ 5m の堤防では越流前に浸潤面が川裏法尻部に到達しておらず、越流後には川裏から飽和度が上昇して、水が浸入していることが確認できる。図 3 はそれぞれの蓄積粘塑性偏差ひずみ分布図である。堤体高さ 1m、3m の堤防では川裏法尻部周辺においてすべり面のようなモードが見られた。これは実験結果とも対応している。ひずみの分布も類似していたが、ひずみの発生量を比較すると、堤防高さが 1m のほうがひずみの発生量は大きくなった。また堤体高さ 5m の堤防では 50 時間後にはひずみがほとんど発生していないが、70 時間後では川裏側法尻先の基礎地盤表面に大きなひずみが発生した。川表側においては堤防が高くなるにつれて、ひずみが大きく発生している。

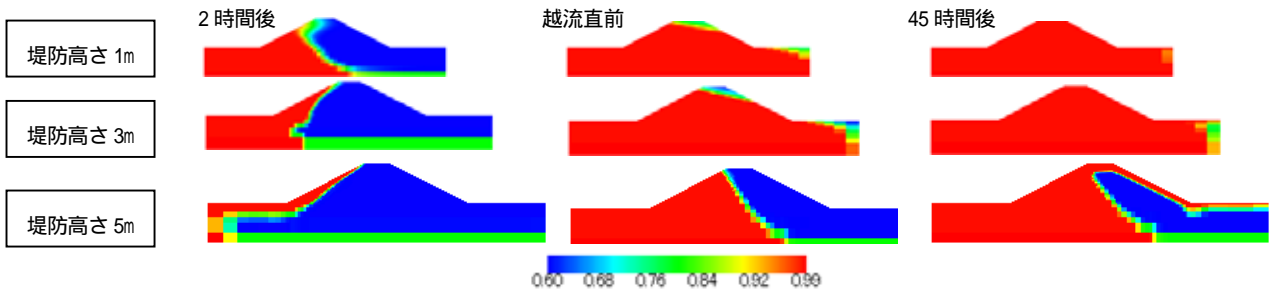


図 2 . 飽和度分布図

## 7. まとめ

堤体高さが異なった堤防に対して越流を考慮した浸透-変形連成解析を行った。その結果、堤体高さが高くなるにつれて、堤体の飽和する速度が遅くなった。また川表側ではひずみの発生量は大きくなったが、川裏側では発生量は少なくなった。このため堤防の大きさが大きくなると越流時の安全性が向上することがわかった。

## 参考文献

1)西村, 岡, 木元, 肥後, 森中: 三相連成有限要素法を用いた河川堤防模型実験の浸透-変形連成解析, 第 44 回地盤工学研究発表会, 横浜, 2009. 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)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. 4)後藤仁志: 粒子法による河川堤防越流過程の数値シミュレーション, 平成 18 年度研究成果報告, 2007.

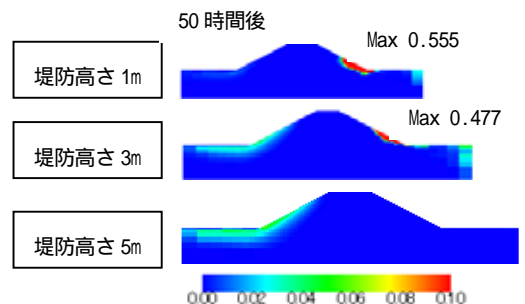


図 3 . 蓄積粘塑性偏差ひずみ