越流水圧を考慮した高さの異なる不飽和河川堤防の浸透-変形連成解析

京都大学大学院	学生会員	野間健介
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
京都大学大学院	正会員	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。本研究では不飽和浸透-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。

$$\dot{S}_{ji,j} + \dot{\rho}^E \overline{F}_i = 0$$
  $(\rho^E = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} n^{\alpha} \quad \alpha = S, W, G)$   $\cdot \cdot \cdot$  (1)

ここで、 $S_{ij}$ は公称応力速度テンソル、 $\rho$ は各相の密度、 $\overline{F_i}$ 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。

$$s\dot{\varepsilon}_{v} + \dot{s}n = -V_{i,i}^{w} \cdot \cdot \cdot (2) , \quad (1-s)\dot{\varepsilon}_{v} - \dot{s}n + (1-s)n\frac{\rho}{\rho^{G}} = -V_{i,i}^{G} \cdot \cdot \cdot (3)$$
  
$$\sigma_{ii} = \sigma'_{ii} - P^{F}\delta_{ii} \cdot \cdot \cdot (4) , \quad P^{F} = sP^{W} + (1-s)P^{G} \cdot \cdot \cdot (5)$$

*ここで、s* は飽和度、 $\hat{\epsilon}_i$ 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 $\alpha$ 相の圧力である。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<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 ミング は粘塑性流動則に従って式(6)となる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl}\sigma'_{m} \exp\left\{m'\left(\overline{\eta}_{(0)}^{*} + \widetilde{M}^{*}\ln\frac{\sigma'_{m}}{\sigma'_{mb}}\right)\right\}\frac{\partial f_{p}}{\partial \sigma'_{kl}} \qquad (6)$$

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, これによりサクショ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

飽和度とサクションの関係である水分特性曲線としては式(7)のような van Genuchten 式を用いた。

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

ここで、 $S_{re}$ は有効飽和度、 $P^{e}$ はサクションであり、 $\alpha, n, m$ 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のそれぞれのモデルについて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のケースにおいても解析を行った。 解析モデルは基礎地盤部を含めすべて相似形になるように堤体高さが3m、5mにおいて、それぞれの天端幅は2.1m、 3.5mとし、基礎地盤部左右の幅は6m、10m、また基礎地盤部深さは3m、5mと設定した。基礎地盤底部から 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(2008)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

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都桂 C クラスターC1-4 棟 TEL 075-383-3193

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。



# 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。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。間隙空気圧の分布図を図 3 に示す。この図 は堤体高さ 3m で 41 時間 30 分経過後の図であり、堤体内部から川裏上部にかけて間隙空気圧が発生しているこ とが分かる。これは越流により川裏側から水が浸入したため、堤体内部で空気が圧縮され、間隙空気圧が最大 で 1.066kPa と大きく発生したと考えることができる。図 4 は水平局所動水勾配であり、堤体高さ 1m と 3m では 川裏法尻部周辺に大きくなっていることが確認される。図 5(a)はそれぞれの 50 時間経過後の蓄積粘塑性偏差ひ ずみ分布図である。蓄積粘塑性偏差ひずみは粘塑性偏差ひずみの第二不変量の増分の蓄積量のことである。堤 防高さ 1m と 3m では、川裏法尻部周辺ですべり面のようなモードが発生していることが分かる。また堤防高さ 1m のときの最大値は 0.555、3m のときは 0.477 であり、堤体高さ 1m の方がひずみの発生量は大きくなっている ことがわかる。また川表側では全体的に堤体高さが高くなると、ひずみの発生量は大きくなっている。堤体高 さ 5m の堤防では 50 時間後では川裏側にひずみは発生していない。しかし図 5(b)は 70 時間後には川裏法尻部か ら基礎地盤部上部にかけて大きなひずみが発生していることを示している。



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、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、また小規模実験についてスケール効果を考慮す る必要があることがわかった。



# 参考文献

1) 西村,岡,木元,肥後,森中:第44回地盤工学研発表会,横浜,pp1469-1470,2009.2)0ka,F. Kodaka,T. Kimoto,S. Kim, Y-S. and Yamasaki, N., Proc. of 2<sup>nd</sup> US-Japan workshop on Geowechanics, p.124-131,2006.3)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 堤防裏法浸食の数値シミュレーション,水工学論文集,52,164,pp979-984,2008.