

越流を考慮した河川堤防模型実験の多相浸透 - 変形連成解析

京都大学大学院
三菱商事株式会社(元京都大学大学院)
京都大学大学院
京都大学大学院
京都大学大学院

学生会員
正会員
フェロー会員
正会員
正会員

○西村 太佑
森中 雄一
岡 二三生
木元 小百合
肥後 陽介

1. 研究の背景と目的

近年,局所的豪雨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¹⁾.本研究では,FEMを用いて京都大学防災研究所中書島オープンラボラトリーで行われている河川堤防模型の越流実験結果との比較を行うことにより,より精度の高い解析手法の確立を目指す.

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.

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

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

$$P^F = s^W P^W + s^G P^G$$

ここで応力は引っ張りを正とし, σ_{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.また, P^F は平均間隙圧であり,添え字 S, W, G はそれぞれ固相・液相・気相を表し, P^W, P^G はそれぞれの相の圧力を, 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. 不飽和土における弾粘塑性構成式

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³⁾.拡張された構成式において,粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は粘塑性流動則に従って以下となる.

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

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, σ'_{mb} は硬化パラメータで,この硬化パラメータ σ'_{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¹⁾.

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

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

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,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.

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

α, 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,次式で表される.

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

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

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. 解析条件及び結果

上記の三相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.解析モデル及び実験に用いた堤防の断面図を図1に示す.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

キーワード 越流, 堤防, 有限要素法

連絡先 〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂CクラスターC1-4棟 TEL 075-383-3193

40 時間水位を天端で維持し、その後越流水深 30cm で越流させた．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．解析に用いたパラメータは矢吹ら⁵⁾による同堤防砂の不飽和三軸試験により決定した(表 1)．本研究では越流については、越流時に堤体面にかかる水压を堤体法面及び地盤にかけることでモデル化している．図 2 に越流水深 30cm 時の越流水圧を示す．越流水圧については MPS 法を用いて後藤仁志らによって求められた値を用いている⁶⁾．

レーザー変位計によって計測された実験時の堤体の形状を図 3 に示す．図 3 より越流初期では川裏法尻が洗掘される．その後、基礎地盤部及び堤体法面中央部まで侵食され、約 1 時間後には堤防川裏法面全体が侵食された．次に解析結果を示す．図 4 に蓄積粘塑性偏差ひずみ分布図を示す．図 4 より、川裏法面中央部から法尻にかけて大きな蓄積粘塑性ひずみの発生が見られる．図 5 に変位を 5 倍にした変形図を示す．図 5 より、川裏法尻部は沈下方向に変形し、川裏法尻から法面中央付近にかけて大きな変形が見られる．実験においても法面中央部から法尻にかけて大きく変形している様子が確認されており、変形モードは解析によって再現できている．図 6 に示す流速ベクトル図では、天端及び川裏法面から越流水の流入が確認されるが、これは実験でも同様の現象が見られた．

7. まとめ

多相浸透-変形連成有限要素法を用いて、河川堤防の浸透越流解析を行い、堤防模型越流実験との比較を行った．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．その結果、蓄積粘塑性ひずみの分布や変形図から実験と同様に、川裏法尻付近から変形が卓越し、川裏法面にまで変形が拡大していく変形傾向が確認された．

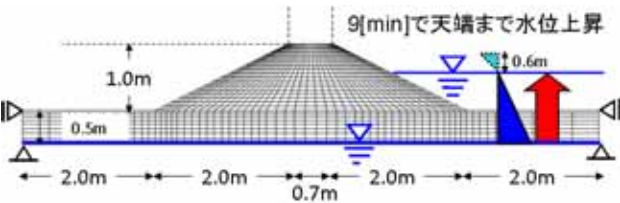


図1.解析モデル

表1.不飽和土パラメータ

圧縮指数	λ	0.0804	飽和透水係数	k^s	4.79×10^{-6} (m/s)
膨脹指数	κ	0.0090	飽和透気係数	k^g	1.00×10^{-7} (m/s)
初期間隙比	e_0	0.535	透水係数形状パラメータ	a	3.0
破壊応力比	M^*	1.27	透気係数形状パラメータ	b	2.3
基準となる初期せん断弾性係数	G_0	25000 (kPa)	最大飽和度	Sr_{max}	0.99
基準となる初期平均骨格応力	σ'_m	100 (kPa)	最小飽和度	Sr_{min}	0.00
粘塑性パラメータ	C_p	1.0×10^{-20} (1/s)	van Genuchtenパラメータ	α	2 (1/kPa)
粘塑性パラメータ	C_p	2.0×10^{-20} (1/s)	van Genuchtenパラメータ	n'	1.2
粘塑性パラメータ	m'	40.0	サクシオンパラメータ	S_l	0.2
			サクシオンパラメータ	S_g	0.2

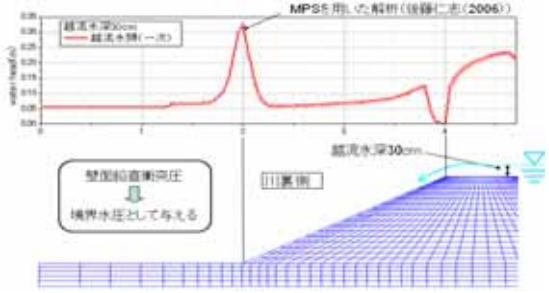


図2.越流水深30cm時の越流水圧

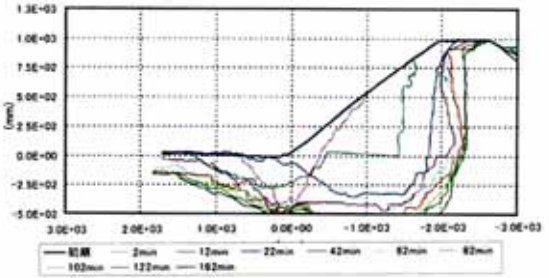


図3.実験計測結果

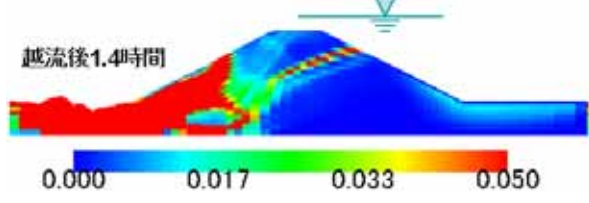


図4.蓄積粘塑性偏差ひずみ分布図

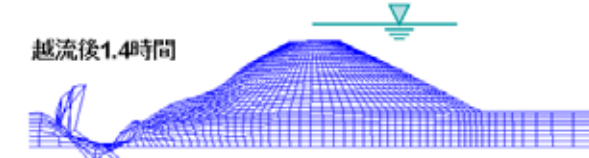


図5.変形図(変位5倍)

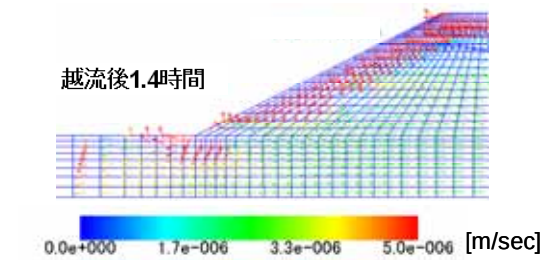


図6.流速ベクトル図

参考文献

1)山崎真也：京都大学大学院修士論文，2008. 2) Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Kim, Y.-S. and Yamasaki, N.: Proc. of 2nd GI-JGS Workshop, Sep. 8-10, 2005, Osaka, Japan. 3) Oka, F., Yamashita, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., and Yamashita, S.: *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999. 4)液化化解析手法 LIQCA 開発グループ(代表 岡二三生): LIQCA2D07(2007 年公開版)資料 5)矢吹太一：京都大学大学院修士論文，2009. 6)森中雄一：京都大学大学院修士論文，2009.