河川堤防模型実験の不飽和浸透の死形連成解析

京都大学大学院(日建設計シビル)	正会員		加藤亮輔
京都大学大学院	フェロー会員		岡二三生
	正会員	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。本研究では、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¹⁾のシミュレーションを行い、実験結果と比較した。

2.支配方程式の定式化

用いたプログラムは砂の弾塑性構成式²⁾を組み込んだ液状化解析コード LIQCA2D³⁾を不飽和浸透問題に拡張した LIQCA2D-SF⁴⁾である。本研究では不飽和問題を扱う方法として、三相混合体を用い、気圧が常に大気圧であるとして定式化した(簡易三相系解析法)。簡易三相系解析法では以下の骨格応力概念を導入する。

$$\sigma_{ii} = \sigma_{ii}'' - \left\{ Srp^f \delta_{ii} + (1 - Sr)p^a \delta_{ii} \right\}$$
⁽¹⁾

ここに、 $\sigma_{1}^{"}$ は骨格応力テンソル、 p^{f} は水圧、 p^{a} は気圧、Srは飽和度である。また、混合体の密度 \overline{p} は次式のように表せる。

$$\overline{\rho} = (1-n)\rho^s + nSr\rho^f + n(1-Sr)\rho^a$$
⁽²⁾

 ρ^s 、 ρ^f および ρ^a はそれぞれ、固相の真の密度、液相の真の密度、気相の真の密度、n は混合体の間隙率および Sr は飽和度 である。混合体に対する運動方程式は以下のようになる。

$$\overline{\rho}\overline{u}_{i}^{s} - \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_{i}} - \overline{\rho}b_{i} = 0$$
(3)

ここに、 \ddot{u}_{i}^{s} は固相の加速度ベクトル、 b_{i} は物体力、 σ_{ij} は全応力テンソルである。運動方程式を解くのにあたり、構成式として Okaらの繰り返し弾塑性構成式を用いる¹⁾。一方液相の連続式は、固相と液相の質量保存則と液相の運動量保存則を用いること により次式のように表される。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{k}{\gamma_w} \left(\rho^f \ddot{u}_{ii}^s + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho^f b_i \right) \right] + S_r \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{\overline{K}^f} \dot{p} = 0$$
(4)

ここに、 p は間隙水圧、 k は透水係数、 γ_w は液相の単位体積重量、 ε_{ii}^s は固相の体積ひずみである。 \overline{K}^f は液相の見かけの体 積弾性係数として次のように定義する。 K^f は液相の体積弾性係数である。

$$\frac{1}{\overline{K}^f} = \frac{S_r}{K^f} + \frac{C}{n\gamma_w}$$
(5)

ここで、(3)式の右辺最終項は、飽和度の時間変化について、飽和度が圧力水頭の関数であるから比水分容量*C*(後ほど詳述する) を用いて次のように変形したものである。

$$n\dot{S}r = n\frac{dSr}{d\theta}\frac{d\theta}{d\psi}\frac{d\psi}{dp}\dot{p} = n\frac{1}{n}C\frac{1}{\gamma_{w}}\dot{p} = \frac{C}{\gamma_{w}}\dot{p}$$
(6)

また、気体を弾性体とみなし、その圧縮性は非常に高いと仮定すると、常に p^a=0 ということができ、液相の連続式のみを考慮 すれば気相についても連続式を満たしていることとなる。本研究では、上記の仮定を行い、混合体に対する運動方程式と液相の 連続式を支配方程式とする。運動方程式の空間離散化には有限要素法、連続式の空間離散化には差分法、時間離散化には Newmark の 法を適用する。

3. 不飽和浸透特性

不飽和浸透特性としては van Genuchten の式を用いて水分特性曲線を表している。

$$S_e = \left(1 + \left|\alpha\psi\right|^{n'}\right)^{-m} \quad m = 1 - \frac{1}{n'} \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{nS_r - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{7}$$

ここで ψ は負の圧力水頭であり α 、n'、m は水分特性曲線の形状をきめるパラメータ S_e は有効飽和度である。ここで θ は体積 含水率、 θ_s は飽和状態での体積含水率であり間隙率n に等しい。また θ_r は高サクション条件下での体積含水率であり、粒子間 に付着して残留し続ける水分量を表す。この有効飽和度を用いて比水分容量および比透水係数を次のようにして算定する。

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \alpha (n-1) (\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \qquad k_r = S_e^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m \right\}^2$$
(8)

以上の不飽和浸透特性を用いて間隙水の見かけの体積弾性係数および透水係数を逐次更新する。

4.解析条件および解析ケース

上記の浸透-変形連成解析手法を用いて河川堤防模型実験¹⁾⁵⁾の再現解析を行う。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 1 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

キーワード:不飽和,浸透,堤防

連絡先:〒541-8528 大阪市中央区高麗橋 4-6-2 日建設計シビル 地盤調査設計部 06-6229-6372

10 点、接触型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を示す。

5.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堤内の浸潤の様子が再現できなかったた め、川表法面の締固め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 一であると仮定した。具体的には、川表法面要素の透水係数 は水平・鉛直ともに 8.79×10⁻⁷(m/s)、川表法面要素以外では、 水平透水係数を 4.79×10⁻⁵(m/s)、鉛直透水係数を 4.79× 10⁻⁶(m/s)とした。

図2 に実験結果と解析結果の間隙水圧の時刻歴を示す。両 者を比べてみると、実験結果と概ね同様の順序で正の水圧が 発生しており、また、24 時間後の水圧についても、解析結果 は実験結果を良好に再現している。

図3に実験において観測された川裏側法面の垂直方向変位 と解析結果を示す。実験結果、解析結果ともに約5時間後よ り変形が生じ始め、実験では最大約2.8mm、解析では最大約 2.4mmのはらみ出しが見られた。実験では各測点において変 位量にばらつきがあり、解析ではどの測点でもほぼ同じ変位 になった違いはあるものの、解析結果は概ね実験結果の変形 を再現することができている。

6.まとめ

混合体理論に基づいて土骨格、間隙水、間隙空気からなる 三相混合体として運動方程式および連続式を定式化した浸透 -変形連成解析手法を用いて、堤防模型実験の再現を実施した。 この結果、本解析手法は間隙水圧だけでなく、堤防の変形に ついても妥当な再現結果を得られることが明らかになった。

7.謝辞

本研究を行うにあたって、淀川堤防強化研究会のお世話に なった。記して謝意を表する。

参考文献 (1) 與田敏昭, 中川一, 関口秀雄, 岡二三生, 後藤仁志, 小俣篤: 越流侵食・浸透のメカニズムを把握するため の小型堤防による越流侵食実験, 河川技術論文集, 土木学会, 第 16 巻, pp.347-352, 2010. (2) Oka, F., Yashima, 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. (3) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04(2004 公開版)資料, 2004. (4) 加藤他:不飽和浸透 -変形連成解析手法と河川堤防への適用, 土木学会論文集 C, Vol65, No.1, 226-240, 2009. (5) 国土交通省近畿地方整備局, 淀川河川事務所, 淀川堤防強化研究会ワーキング: 浸透およ び越水に対する堤防強化に関する研究報告書, 2010



表1 解析パラメータ

Soil	yodo	
Method	2	
Initial void ratio e ₀	0.535	
Compression index	0.0804	
Swelling index	0.009	
Normalized Ini. shear modulus G ₀ / m ₀	250.0	
Density (t/m ³)	1.9	
Stress ratio at phase transformation M _m *	1.270	
Stress ratio at failure M _f *	1.270	
Hardening parameter B ₀ *	800	
Hardening parameter B ₁ *	20	
Hardening parameter C _f	600	
Quasi-OCR OCR*	1.3	
Anisotoropy parameter C _d	2000	
Dilatancy parameters D ₀ [*] ,n	2.0, 2.0	
Plastic ref. strain ref	0.008	
Elastic ref. strain	0.08	



図2 実験結果と解析結果の間隙水圧比較



図3 実験結果と解析結果の川裏側変位比較