

不飽和を考慮した堤防盛土の液状化解析

日建設シビル
元京都大学大学院
京都大学大学院

正会員
学生会員
フェロー会員
正会員

○加藤亮輔
Ana Paula Heitor
岡二三生
木元小百合 肥後陽介

1. 研究の背景と目的

地盤の液状化については地下水位以深について考えられることが一般的であるが、実際の地盤では地下水面以浅の地盤は不飽和状態になっており、直下の液状化の影響を受ける。本研究では、液状化地盤上にある盛土構造物に対し地下水位（GWL）を変更することにより、液状化層直上の不飽和層の変形特性がどのように盛土構造物の変形量に影響を及ぼすかについて検討を行った。

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¹⁾を組み込んだ液状化解析コード LIQCA2D²⁾を不飽和浸透問題に拡張した LIQCA2D-SF³⁾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。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}'' - \{Sr p^f \delta_{ij} + (1 - Sr) p^a \delta_{ij}\} \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij}'' 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 $\bar{\rho}$ は次式のように表せる。

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

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になる。

$$\bar{\rho} \ddot{u}_i^s - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \bar{\rho} b_i = 0 \quad (3)$$

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。

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

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。 $\bar{K}^f$ 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。

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

ここで、(3)式の右辺最終項は、飽和度の時間変化について、飽和度が圧力水頭関数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。

$$n \dot{S}r = n \frac{dS_r}{d\theta} \frac{d\theta}{d\psi} \frac{d\psi}{dp} \dot{p} = n \frac{1}{n} C \frac{1}{\gamma_w} \dot{p} = \frac{C}{\gamma_w} \dot{p} \quad (6)$$

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 β 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。

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

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 は高サクシオ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。

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

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

図1に解析に用いたモデルおよび境界条件を示す。境界条件として側面は鉛直ローラー、底面は水平鉛直固定とする。入力波としては図2に示す最大加速度 200gal の周波数 1 Hz のサイン波を 20 秒間与えた。また、土質パラメータとしては表1に示すものを用いた。このとき、GWL が GL-0.0m、GL-3.0m、GL-5.0m の3通りについて検討した。

キーワード：不飽和、液状化、堤防

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

5. 解析結果

図3に各ケースの加振終了後の堤防盛土天端における沈下量を示す。地下水位が低いほど沈下量が減少している。これは地下水が低下すると液状化層厚が小さくなる影響に一致する。また、それぞれのケースの堤防盛土天端における最大応答加速度は、GWLがGL-0.0m、GL-3.0m、GL-5.0mでそれぞれ35gal、44gal、69galとなっており、液状化層厚が厚いほど加速度が減衰している。

ここで、下式に示される相対有効応力減少比(ESDR)の分布図を図4に示す。

$$ESDR = 1 - \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \right) \tag{9}$$

σ'_m は骨格応力、 σ'_{m0} は初期骨格応力である。堤防盛土直下では一部液状化していない部分も見られるが、地下水位以下ではほぼ液状化が生じている。また、堤防盛土の影響により液状化を生じない領域は、地下水位が低いほど小さくなっている。地下水位が不飽和層である堤防盛土に与える影響では、GWLがGL-3.0m、GL-5.0mでは大きな影響は見られないが、GWLがGL-0.0mの場合では、堤防盛土自体の相対有効応力減少比が大きくなっている。

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、堤防盛土に対して不飽和を考慮した液状化解析を行った。この結果、地下水位が低いほど堤防天端の沈下量は小さく、また、堤防盛土に与える不飽和の影響も小さいことが分かった。今後の予定として、サクシジョンの影響を構成式に導入した検討を行う予定である。

参考文献 (1) 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. (2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04(2004 公開版)資料, 2004. (3) 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. (4) Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T.: *Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering*, John Wiley & Sons, pp.31-36, 1999.

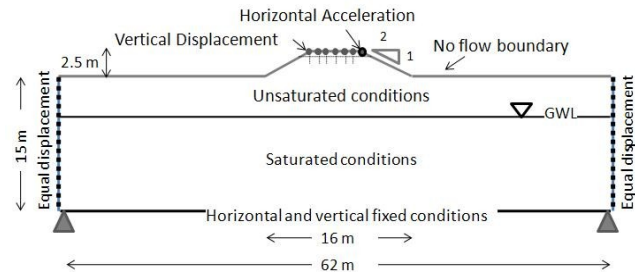


図1 解析モデル図

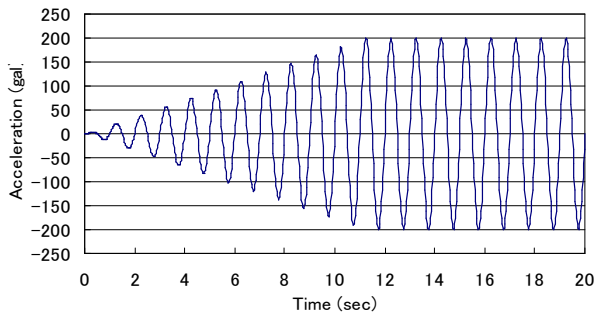


図2 入力地震動(サイン波)

表1 解析パラメータ

Initial void Ratio e_0	0.85
Swelling index κ	0.0018
Compression index λ	0.006
Permeability k (m/s)	2.5E-05
Density ρ (kN/m ³)	19.0
Normalized Shear modulus G_0/σ'_m	873.28
Quasi Over consolidation ratio (OCR*)	1.2
Phase transformation stress ratio M_m^*	0.91
Failure stress ratio M_f^*	1.12
Hardening parameter B_0^*	2200
Hardening parameter B_1^*	30
Dilatancy parameters: D^*, n	5.1, 1.5
Plastic, Elastic ref. strain $\gamma_{ref}^{P*}, \gamma_{ref}^{E*}$	0.005; 0.001
Initial degree of Saturation (S_r)	0.6
van Genuchten α and n'	1.8, 3.2

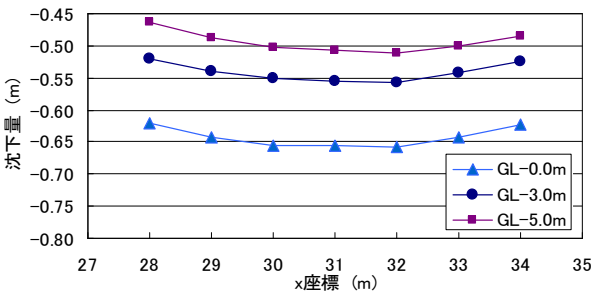


図3 盛土天端の沈下量

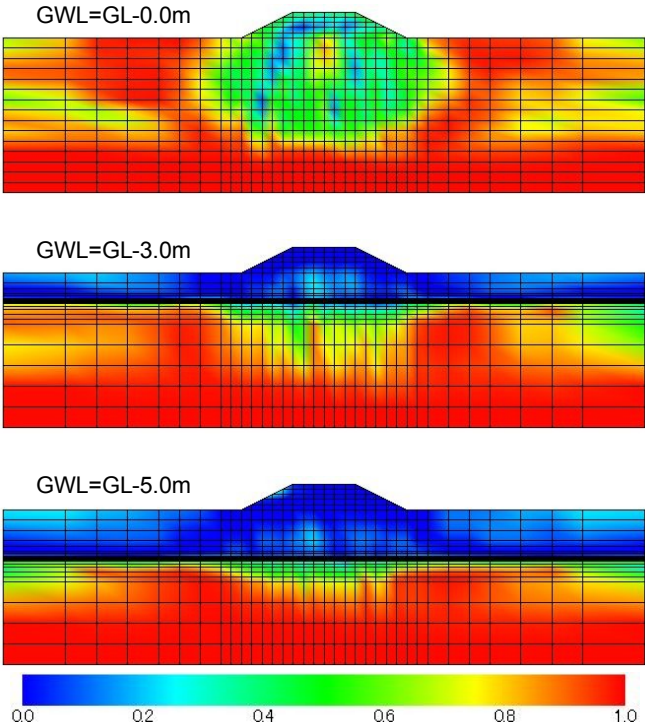


図4 相対有効応力減少比分布図(20秒後)