

不飽和・飽和地盤の有効応力解析手法と地中構造物への適用（その1）

—基礎式および不飽和浸透特性の検証—

大林組 正会員 伊藤 浩二
 同 上 正会員 佐々木智大
 同 上 正会員 ○樋口 俊一

1. 目的

地盤の塑性化や構造物の損傷を許容した部材変形を耐震性評価の指標とすることは、合理的な靱性指向型の設計に繋がる。本研究では、降雨と地震、あるいは地震と津波等の複合自然災害を念頭に、地盤の飽和度に応じた地震時および地震後の地盤挙動に着目して、不飽和土から飽和土に至る地盤挙動を統一的に表現する拡張有効応力基礎式を有限要素法へ実装し、例題として、地中構造物の安全性評価に及ぼす影響を検証した。

本報では、初めに液状化を対象とした有効応力解析において用いられる、飽和多孔質体の基礎式の不飽和土への拡張について述べた。次に、その手法を有限要素法に実装し、既往の非定常浸透模型実験結果のシミュレーションにより、不飽和土での浸透特性の再現性を検証した。（その2）では、地中構造物と周辺地盤の非線形地震応答解析に本手法を適用し、地中構造物の地震時挙動に及ぼす不飽和土の影響を検討する。

2. 基礎式

不飽和土の基礎式(釣合い式と連続式)では、飽和土の Biot の多次元圧密式を援用し、有限要素法の定式化では間隙水の変位を用いる $u-U$ 形式とした。式(1)に飽和土の連続式を示す。

$$\dot{p} = -Q\{(\alpha - n)\varepsilon_{ii}^u + n\varepsilon_{ii}^U\} \quad (1.1)$$

$$Q = \frac{1}{\left(\frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_f}\right)}, \alpha = 1 - \frac{K_T}{K_s} \quad (1.2)$$

ここに、 ε_{ii}^u と ε_{ii}^U は骨格と間隙水の体積ひずみ、 K_s と K_f は土粒子と間隙水の体積弾性係数、 K_T は土粒子骨格の体積弾性係数、 n は間隙率、 p は過剰間隙水圧、 Q は飽和土の間隙水の剛性、 α は土粒子骨格の体積弾性係数と土粒子の体積弾性係数の比から得られる係数である。式(2)に不飽和土の連続式を示す。

$$\dot{p} = -Q^*\{(\alpha - n)\varepsilon_{ii}^u + n\varepsilon_{ii}^U\} \quad (2.1)$$

$$Q^* = \frac{1}{\left\{ \frac{(\alpha - n)S_r \left(S_r + \frac{C_s p}{n\gamma_w} \right)}{K_s} \right\} + \frac{nS_r}{K_f} + \frac{C_s}{\gamma_w}} \quad (2.2)$$

$$C_s(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (2.3)$$

$$\psi = h_w - h + \frac{p}{\gamma_w} \quad (2.4)$$

ここに、 Q^* は不飽和土の間隙水の剛性、 C_s は比水分容量、 θ は体積含水率、 ψ は圧力水頭、 S_r は飽和度、 γ_w は間隙水の単位体積重量、 h_w は初期全水頭、 h は位置水頭である。式(1)、(2)で $K_s = \infty$ を仮定すると、不飽和土の Q^* では、飽和土の Q に飽和度 S_r 、比水分容量 C_s の効果が付加される。

3. 不飽和浸透特性

圧力水頭と飽和度の関係(水分特性曲線)では、文献 1)と同様に、van Genuchten の不飽和浸透特性モデル²⁾、

キーワード 不飽和、不飽和浸透特性、液状化、地中構造物、有効応力解析

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株)大林組技術研究所 TEL 042-495-1013

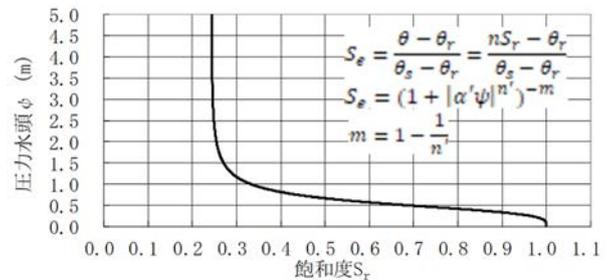


図1 圧力水頭と飽和度

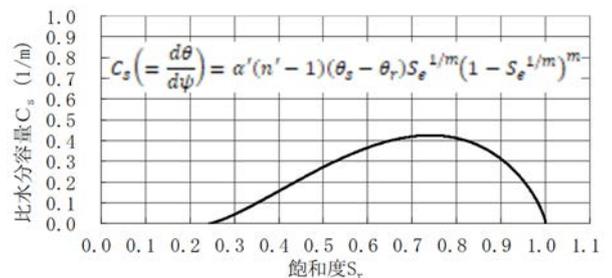


図2 比水分容量と飽和度

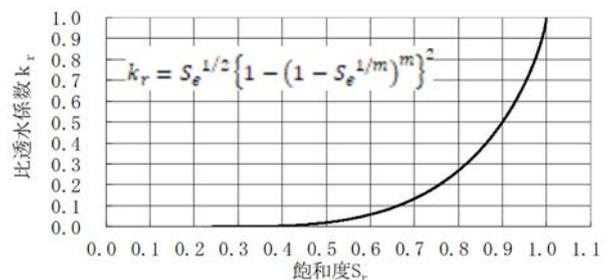


図3 比透水係数と飽和度

比透水係数と飽和度の関係を用いた。図1~3に、文献3)を参考にシルト質砂を想定して設定した表1の定数で得られる圧力水頭、比水分容量、比透水係数と飽和度との関係を示す。

4. 検証解析

大規模高速化非線形 FEM 解析プログラム「FINAL-GEO®」⁴⁾に前述の不飽和土の基礎式と不飽和浸透特性を新たに導入して、広範な飽和度を有する不飽和土、飽和土を統一的に表現する有効応力解析手法を構築した。

4.1 均等砂を用いた不飽和浸透実験¹⁾ 図4に解析モデルを示す。実験は、左端の水位を底面から0.3m、右端の水位を底面から0.1mに維持し、底面の水圧を測定し模型地盤の非定常浸透過程を追跡している。解析では、実験で得られた模型地盤の不飽和浸透特性の定数、模型地盤の物理定数と線形弾性の力学定数および境界条件は文献1)と同様とした。図4の別途実施した不飽和浸透流解析および本手法で得られた底面での圧力水頭の経時変化と実験結果との比較より、本手法で実験および不飽和浸透流解析を概ね再現できることを確認した。

4.2 不飽和砂の透水実験⁵⁾ 図5に解析モデルを示す。

実験は、高さ1.0mの砂柱の上端から下端に一定速度で水を流し、上端からの水の供給を止めた時点からの砂柱中のサクションを計測している。解析では、実験で得られた不飽和浸透特性の定数、模型地盤の物理定数と線形弾性の力学定数および境界条件を文献5)と同様とした。図5の本手法で得られた間隙水圧の経時変化と実験結果との比較より、本手法で実験結果を概ね再現できることを確認した。

5. まとめ

広範な飽和度を有する不飽和・飽和地盤を統一的に表現する有効応力解析手法を構築した。線形弾性を仮定した不飽和地盤の検証解析により模型実験で得られた不飽和浸透特性の再現性を示した。これにより、地盤内の飽和度に応じた強度特性変化を反映した地盤挙動を評価できる、非線形地震応答解析が可能となった。

5. まとめ

広範な飽和度を有する不飽和・飽和地盤を統一的に表現する有効応力解析手法を構築した。線形弾性を仮定した不飽和地盤の検証解析により模型実験で得られた不飽和浸透特性の再現性を示した。これにより、地盤内の飽和度に応じた強度特性変化を反映した地盤挙動を評価できる、非線形地震応答解析が可能となった。

参考文献

- 1) 渦岡良介、久保哲夫、八嶋厚、張鋒：不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析、土木学会論文集、No.694/III-57、pp.153-163、2001.12.
- 2) Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- 3) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)、2012.2.
- 4) 米澤健次、穴吹拓也、江尻讓嗣：大規模・高速化非線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」、大林組技術研究所報、No. 75、2011.
- 5) Liakopoulos, AC.: Transient flow through unsaturated porous media, PhD Thesis, University of California Berkley, 1965.

間隙率	n	0.309
飽和水分量	θ_s	0.309
高サクション時に残留する水分量	θ_r	0.075
スケールリングパラメータ	α'	2
水分特性曲線の形を決める形状パラメータ	n'	4
	m	0.75

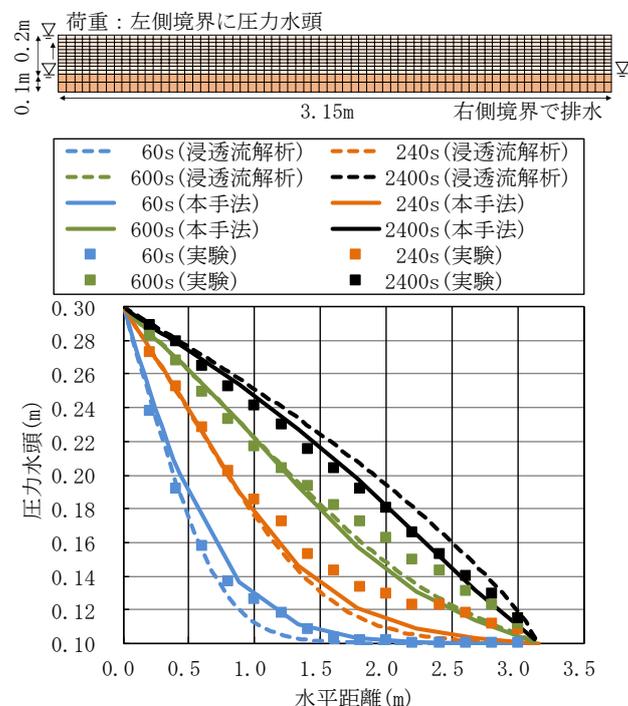


図4 圧力水頭の経時変化

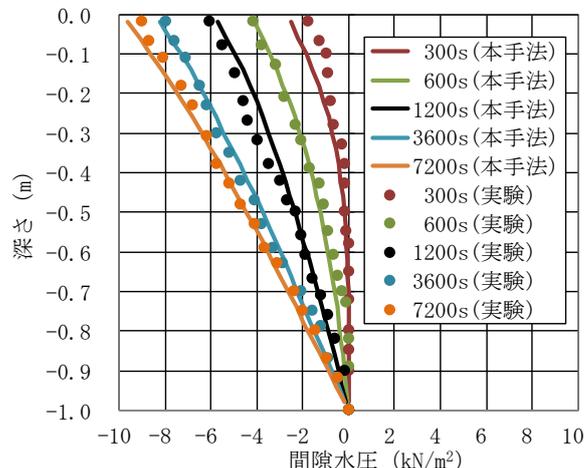


図5 間隙水圧の経時変化