

不飽和土の弾塑性構成関係とサクシオン載荷・除荷過程のシミュレーション

不飽和土 構成式,サクシオン

茨城大学 学生会員 満山 聖
 茨城大学 国際会員 村上 哲
 茨城大学 国際会員 安原一哉
 茨城大学 国際会員 小峯秀雄

1. はじめに

戦後の経済復興に伴い、地下水の需要が急増し、大都市における地盤沈下が社会的問題となった。地盤沈下対策として、地下水の採取を規制する法律が整備されたことで、地下水位は回復してきている。そのため、地下水位の低かった時期に建設された構造物が、復水した地下水により浮き上がりや沈下等の影響を受けている。

そこで、どのような構造物、地盤が上記のような地下水位上昇による影響を受けやすいのか検討する手法の1つに有限要素法(FEM)を用いた数値シミュレーションがある。有限要素法による解析結果は、そこに用いる地盤材料の力学モデルに大きく依存する。不飽和土の代表的な弾塑性構成モデルは、Alonsoら¹⁾、軽部ら²⁾、向後ら³⁾などにより定式化されている。これらのモデルはサクシオン応力の捉え方に特徴があるが、必要となるパラメータの数や非関連流動則を仮定していること、荷重基準の規定が不十分であるなど問題を含んでいる。そこで本研究ではこれらに着目し、さらに地下水位が上昇することで不飽和状態の地盤が水浸(飽和化)されていく過程における、不飽和土の力学特性の変化を考慮した弾塑性構成モデルの構築を試みた。

2. 不飽和土の弾塑性構成式

2.1 不飽和土の有効応力

不飽和土の弾塑性構成モデルの誘導を目指す上で必要なことは、不飽和土特有の性質を構成モデルで表現することである。特に、間隙空気圧と間隙水圧の圧力差を表すサクシオンと、水浸によりサクシオンが解放され急激な圧縮変形が生じるコラプス現象、せん断変形により生じる大きな負のダイレイタンシー特性、これら3点を不飽和土の代表的な力学特性と考える。本研究では、サクシオンによる効果を、有効応力の増加、土骨格の剛性の増大と仮定した。さらに、不飽和状態により作用する応力を、サクシオンと飽和度に関する内部拘束応力 p_m と仮定し、有効応力空間で議論した。これに外力によって作用する応力 s'_{ij} と合わせて式(1)で示される有効応力 s'_j を定義した。

$$s'_j = s'_{ij} + p_m d_{ij} \quad (1)$$

ここに、

$$p_m = \frac{Sr}{100} s \quad (2)$$

s'_{ij} はクロネッカのデルタ、 Sr は飽和度(%), s はサクシオン応力である。

2.2 不飽和土の弾塑性構成式の誘導

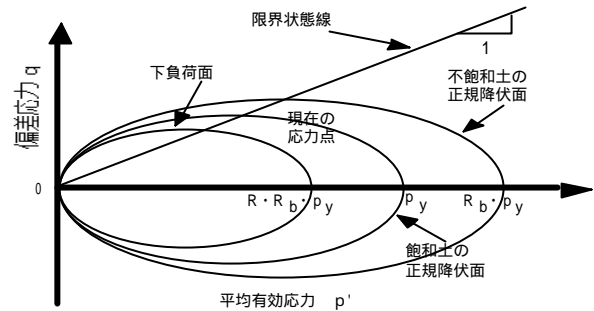


図 - 1 下負荷面の概念図

本研究で確立した弾塑性構成モデルでは、下負荷面(図 - 1 参照)の概念⁴⁾を取り入れることで、従来の弾塑性構成モデルの問題点であった弾性領域から弾塑性領域への滑らかな推移を表現できるとともに、荷重基準を簡潔に表現できるところに特徴がある。

不飽和土の正規降伏面を式(3)のように定義すると下負荷面は式(4)のように表せる。

$$f(s') - R_b \cdot F(H) = 0 \quad (3)$$

$$f(s') = R \cdot R_b \cdot F(H) \quad (4)$$

式(1)で定義した応力において降伏関数は修正カムクレイモデルを、塑性履歴関数 F は圧密降伏応力で仮定すると次式で表される。

$$f(s') = p' (M^2 + H^2) \quad (5)$$

$$F(H) = p'_y \quad (6)$$

下負荷面を表す式(4)に対して物質時間微分を施し、若干の計算を経て次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial s'_{ij}} s'_{ij} - \frac{\partial f}{\partial s'_{ij}} s'_{ij} \left[\frac{\dot{F}}{F} + \frac{\dot{R}}{R} \right] = 0 \quad (7)$$

$$n_{ij} = \frac{\partial f}{\partial s'_{ij}} \left/ \left\| \frac{\partial f}{\partial s'} \right\| \right. \quad (8)$$

さらに \dot{R} の発展則として式(9)、塑性体積ひずみ速度として式(10)を仮定する。

$$\dot{R} = U \left\| \dot{\epsilon}^p \right\| \quad U = -m_R \ln R \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_v^p = \frac{I_c - K_c}{1 + e_0} \frac{\dot{p}'_y}{p'_y} \quad (10)$$

ここで I_c は圧縮指数 K_c は膨潤指数で材料定数である。関連流動則式(11)を仮定し、応力速度 ~ 弾性ひずみ速度関係式(12)を表す \dot{R}_b を定式化するために式(13)を仮定すると、応力速度 ~ ひずみ速度関係式(14)を得る。

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij}^p = \dot{\mathbf{I}} n_{ij} \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{s}}'_{ij} = E_{ijkl} \dot{\mathbf{e}}_{kl}^e = E_{ijkl} (\dot{\mathbf{e}}_{kl} - \dot{\mathbf{e}}_{kl}^p) = E_{ijkl} (\dot{\mathbf{e}}_{kl} - \dot{\mathbf{I}} n_{kl}) \quad (12)$$

$$R_b = \exp(\mathbf{m}_s p_m) \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{s}}'_{ij} = \left[E_{ijkl} - \frac{E_{ijmn} n_{mn} n_{pq} E_{pqkl}}{n_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + n_{ij} \mathbf{s}'_{ij} \left(\frac{n_{kk}}{D_c} + \frac{U}{R} \right)} \right] \dot{\mathbf{e}}_{kl} + \frac{E_{ijmn} n_{mn} \mathbf{m}_s n_{kl} \mathbf{s}'_{kl}}{n_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + n_{ij} \mathbf{s}'_{ij} \left(\frac{n_{kk}}{D_c} + \frac{U}{R} \right)} \dot{p}_m \quad (14)$$

負荷基準は、式(11) $\dot{\mathbf{I}}$ の正值性より判定され、 $\dot{\mathbf{I}} > 0$ のとき塑性負荷状態、 $\dot{\mathbf{I}} < 0$ のとき弾性除荷状態であることより次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} n_{ij} E_{ijkl} \dot{\mathbf{e}}_{kl} - \mathbf{m}_s \dot{p}_m n_{ij} &> 0 \quad (\text{弾塑性負荷状態}) \\ n_{ij} E_{ijkl} \dot{\mathbf{e}}_{kl} - \mathbf{m}_s \dot{p}_m n_{ij} &< 0 \quad (\text{弾性除荷状態}) \end{aligned} \right\} (15)$$

3. 弾塑性構成モデルの検証

本田，軽部ら⁵⁾⁶⁾によって行われた，不飽和土の挙動に及ぼすサクシオン応力の影響を調べた三軸圧縮試験結果を用いて，弾塑性構成モデルの検証を行った。

実験に用いられた試料は市販の No.5 クレーと呼ばれるシルト質土であり，日本統一土質分類法では低塑性指数のシルト(ML)に分類される。物理的性質は，土粒子密度 $\rho_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ，粘土分 38%，シルト分 56%，砂分 6%， $W_L = 43.0\%$ ， $I_p = 13.4$ である。三軸圧縮試験の応力経路を図-2，解析に用いた材料定数を表-1に示す。

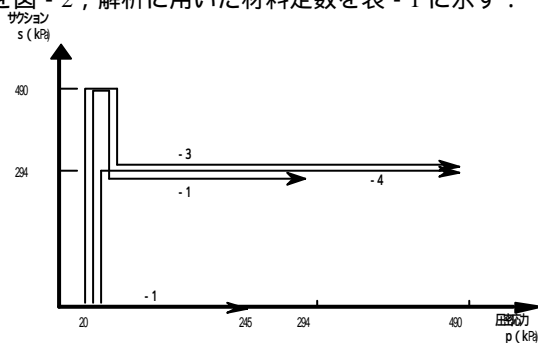


図-2 各供試体の応力経路

等方応力状態におけるサクシオン載荷・除荷による間隙比変化を図-3，圧密過程における間隙比の変化を図-4に示す。実験結果と比較するとサクシオン増加，圧密応力増加による体積減少を定量的・定性的に表現できている。図-5にサクシオン除荷(水浸過程)におけるコラプス沈下挙動を示す。小さな圧密応力では膨張挙動を示し，圧密応力が増加するにつれ，沈下挙動(コラプス沈下)を示し，不飽和土の力学特性を表現できていると考えられる。

表-1 数値解析に用いた材料パラメータ

圧縮指数 =0.0459	膨潤指数 =0.0036
限界状態応力比 =1.333	過圧密比 OCR=2.10
ポアソン比 =0.300	不飽和降伏係数 $\mu_s = 0.0001$
下負荷面パラメータ $\mu_R = 15.0$	

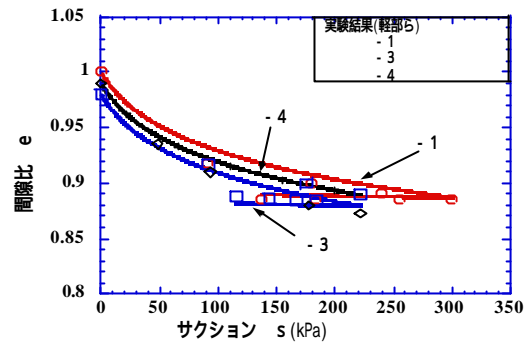


図-3 サクシオン載荷・除荷による間隙比の変化

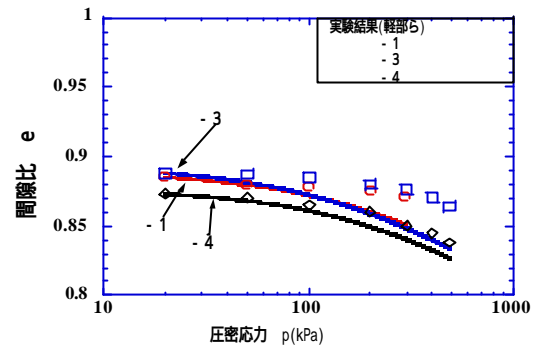


図-4 圧密過程における間隙比の変化

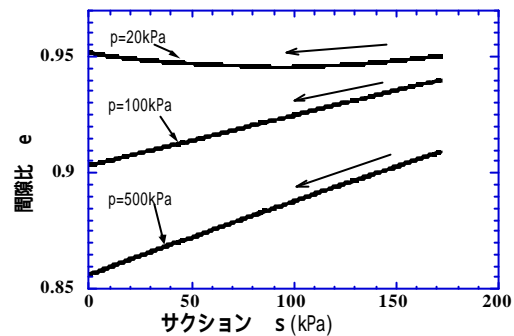


図-5 コラプス沈下挙動

4. まとめ

本研究では，下負荷面の概念と関連流動則を仮定して不飽和土の弾塑性構成モデルを確立した。本構成モデルは，不飽和土の力学特性であるサクシオン載荷・除荷による体積変化やコラプス沈下を表現することが可能である。

<参考・引用文献>

- Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique, Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹波尚人: 不飽和土の三軸圧縮状態における降伏関数, 土木学会論文集, No.406/ -11, pp.205-211, 1989.
- 向後雄二: 不飽和土の土質力学的特性と土質構造物の安定性の解析について, 農業工学研究所報告, No.34, pp.39-162, 1995.
- 橋口公一: 下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.547/ -36, pp.127-144.
- 加藤正司, 軽部大蔵, 本田道識, 藤原照幸: 不飽和土の圧縮特性に及ぼす間隙水分分布の影響に関する研究, 土木学会論文集, No.554/ -37, pp.57-69, 1996.
- 軽部大蔵, 本田道識, 加藤正司, 鶴ヶ崎和博: 不飽和土のせん断挙動と間隙水の状態の関係について, 土木学会論文集, No.575/ -40, pp.49-58, 1997.