

# 不飽和土のせん断挙動シミュレーション

茨城大学 学生会員 満山 聖  
 茨城大学 正会員 村上 哲  
 茨城大学 フェロー会員 安原一哉  
 茨城大学 正会員 小峯秀雄

## 1.はじめに

大都市部における地盤沈下対策として、地下水の揚水が規制されたことにより、地下水位が急激に回復し、構造物が復水した地下水によって浮き上がりや沈下等の影響を受けている。このような影響を有限要素解析により検討するためには、地下水位が上昇し、不飽和状態の地盤が飽和化されるときに生じる力学特性を考慮した弾塑性構成モデルの確立が必要である。本研究では、不飽和状態により土骨格に作用する応力を、サクシオンと飽和度に関する内部拘束応力で考え、有効応力空間で議論した。弾塑性構成モデルは、下負荷面の概念を取り入れ、関連流動則を仮定したモデルを確立し、等方応力状態におけるサクシオン載荷・除荷過程の挙動を表現できることを確認した<sup>1)</sup>。

そこで本文では、本構成モデルのせん断挙動について検証を行った結果を報告する。

## 2. 等方硬化型の弾塑性構成モデルにおけるせん断挙動

確立した不飽和土の弾塑性構成式は、下負荷面の概念を導入し、関連流動則を適用して誘導した、式(1)に示す応力速度～ひずみ速度関係式である。

$$\dot{s}'_{ij} = \left[ E_{ijkl} - \frac{E_{ijmn} n_{mn} n_{pq} E_{pqkl}}{n_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + n_{ij} s'_{ij} \left( \frac{n_{kk}}{D_c} + \frac{U}{R} \right)} \right] \dot{e}_{kl} + \frac{E_{ijmn} n_{mn} m_s n_{kl} s'_{kl}}{n_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + n_{ij} s'_{ij} \left( \frac{n_{kk}}{D_c} + \frac{U}{R} \right)} \dot{p}_m \quad (1)$$

ここで、

$$n_{ij} = \frac{\partial f}{\partial s'_{ij}} \Big/ \left\| \frac{\partial f}{\partial s'} \right\|$$

$$D_c = \frac{\mathbf{I}_c - \mathbf{k}_c}{1+e}$$

$p_m$  は内部拘束応力、 $\mathbf{I}_c$  は圧縮指数、 $\mathbf{k}_c$  は膨潤指数、

$\mu_s$  は不飽和降伏係数で材料定数である。

軽部ら<sup>2)3)</sup>によって行われた不飽和土のせん断挙動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う。実験に用いられた試料は、No.5 クレーと呼ばれるシルト質土である。解析に用いる材料定数を表-1に示す。

表-1 解析に用いた材料定数

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 $\mu_R=15.0$	

サクシオン履歴(0 490 294(kPa))を与え、圧密(20 294(kPa))させた不飽和土と、圧密(20 245(kPa))させた飽和土のせん断過程における応力～ひずみ関係と体積変化を図-1に示す。なお、せん断中はサクシオン一定条件とした。

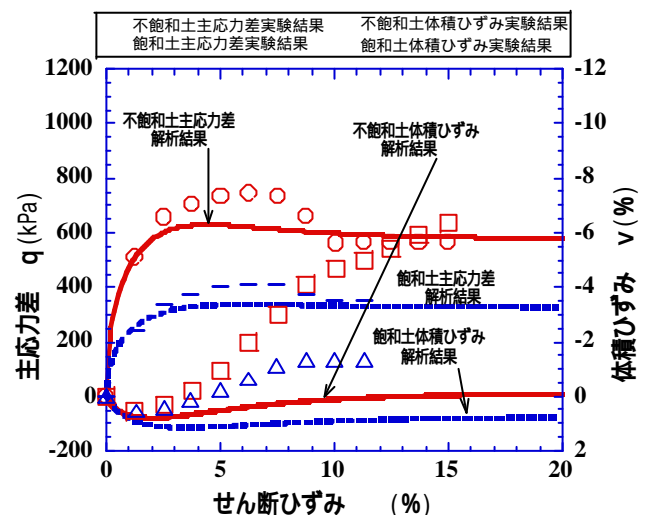


図-1 不飽和土と飽和土のせん断挙動の比較

図-1からわかるように、実験結果において体積ひずみが増分0となるまではうまく表現できている

キーワード 不飽和土 構成式 サクシオン せん断変形

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部都市システム工学科 0294-38-5174

が、それ以降はほとんど一致していない。これは、限界状態線近傍の挙動が、本構成モデルではうまく表現できていないためと考える。村上<sup>4)</sup>は、応力誘導異方性を表現した弾塑性構成モデルにより、飽和土の限界状態線近傍の挙動について数値的な検討を行った。これによれば、応力誘導異方性の生じ易さが、限界状態線近傍の挙動に影響を与えているとしている。本研究においても、応力誘導異方性を導入することにより、体積ひずみ挙動が表現できると考え、その適用を試みた。

### 3. 応力誘導異方性を考慮した弾塑性モデルにおけるせん断挙動

「応力誘導異方性」とは、せん断方向や主応力回転方向、つまり異方的な初期応力によって引き起こされる性質である。構成モデルは、橋口<sup>5)</sup>を参考に、新たに回転硬化の概念を加えた弾塑性構成モデルに修正した。

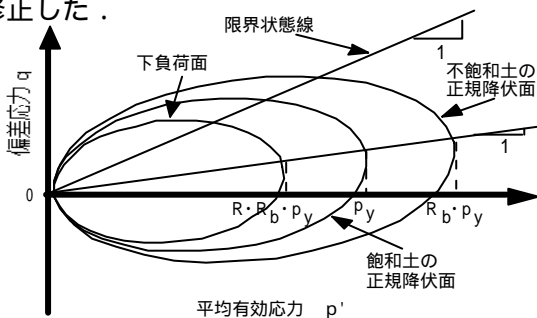


図 - 2 構成モデルの概念図

内部拘束応力一定条件に限定した場合に得られる応力速度～ひずみ速度関係は以下に示す通りである。

$$\dot{s}'_{ij} = (E_{ijkl} - D_{ijkl}^p) \dot{\epsilon}_{kl} \quad (2)$$

ここで、

$$D_{ijkl}^p = \frac{E_{ijmn} \hat{m}_{mn} \hat{m}_{rs} E_{rskl}}{\hat{m}_{pq} E_{pqrs} \hat{m}_{rs} + D \|\hat{m}\|}$$

$$D = 3Ap \left\{ \mathbf{h}_j - \frac{\mathbf{h}^2}{M_a} \mathbf{a}_j \right\}_{ij} + f(\hat{s}, M_a) \left( \frac{1}{D_c} n_{ij} \mathbf{d}_{ij} - L \mathbf{a}_j \hat{l}_{ij} + \frac{U}{R} \right)$$

$$\hat{m}_{ij} = \frac{\partial f}{\partial s'_{ij}} - \frac{1}{3} \frac{\partial f}{\partial s'_{kl}} \mathbf{a}_{kl} \mathbf{d}_{ij} \quad L = \frac{3 D_d}{2 D_c} \frac{A}{h_a}$$

$$\mathbf{h}_a = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j} \quad D_d = \frac{m_d}{1 + e_0} \quad A = (M_L - h_a) \hat{h}$$

$E_{ijkl}$  は弾性定数テンソル、 $\hat{m}_{kl}$  は誘導異方性を表現する塑性履歴によって変化する変数、 $\mu_d$  は応力誘導異方性に起因する体積変化に関する係数である。

応力誘導異方性を考慮した弾塑性構成モデルの検証を、上の実験条件と同じ条件で行う。解析に用いる材料定数は、以下に示す応力誘導異方性に関する

パラメータを新たに加えた。

誘導異方性パラメータ(1)  $m = 3.8$

誘導異方性パラメータ(2)  $\mu_d = -0.1388, -0.011$   
 解析結果と実験結果の比較を図 - 3 に示す。

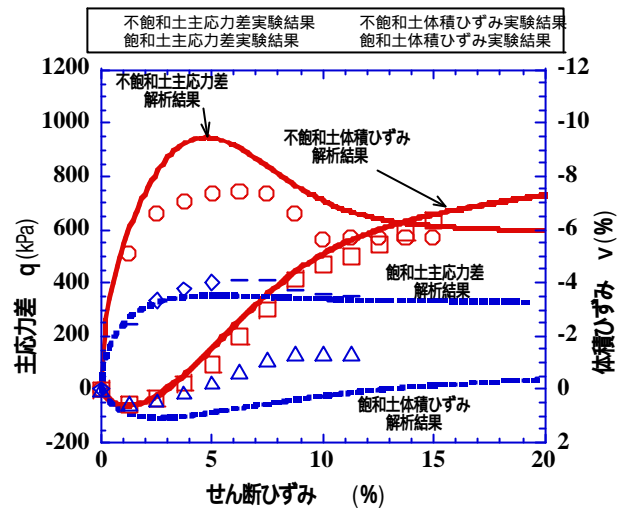


図 - 3 不飽和土と飽和土のせん断挙動の比較

このように、不飽和土の体積変化量は飽和土より大きな負のダイレイタンス(膨張)が生じるが、提案した応力誘導異方性を考慮した弾塑性構成モデルは、このことを定量的にも定性的にも表現できていると考えられる。

### 4. まとめ

不飽和土のせん断挙動では、応力誘導異方性の概念を導入した弾塑性構成モデルにより、変形挙動を表現できることが分かった。今後、室内試験により応力誘導異方性に着目し、不飽和土の力学特性を検討していく予定である。

#### < 参考・引用文献 >

- 1) 満山聖, 村上哲, 安原一哉, 小峯秀雄: 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, 第37回地盤工学会(投稿中), 2002.
- 2) 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布の影響に関する研究, 土木学会論文集, No. 554/ -37, pp.57-69, 1996.
- 3) 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.
- 4) 村上哲: 応力誘導異方性を考慮した弾塑性構成モデルによる限界状態線近傍の挙動解析, 第33回地盤工学研究発表会, pp.541-542, 1998.
- 5) 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.