

下負荷面と回転硬化の概念を用いた不飽和土の弾塑性構成モデル

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

不飽和土の代表的な弾塑性構成モデルとして、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決定方法が複雑であること、非関連流動則を仮定していることなど課題を残していると考えられる。本研究ではこれらの課題を解決し、さらに、現在大都市部において地下水位が上昇し、構造物や基礎地盤の不安定性への影響が懸念されており、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

本研究では、不飽和土の代表的な力学特性としてサクシオンの作用、コラプス沈下現象、せん断時の大きなダイレイタンスの3つと考えて構成式を構築している。これまでシルト質粘土の圧密、せん断挙動を表現可能な弾塑性構成モデルを構築してきた⁴⁾。サクシオンの増加による効果を、有効応力の増加と剛性の増加と仮定し、サクシオンと飽和度に関する内部拘束応力 p_m で与えている。本報告では、粘性土より粒径の大きい非塑性シルト(DL クレーン)について、構成モデルの妥当性を検討した。

向後ら⁵⁾は、粘性土と砂質及びシルト質土では、サクシオンの効果が異なり、体積変化挙動を表現するために、異なる状態面をモデル化し弾塑性構成モデルを修正している。本研究では、この現象を降伏曲面の回転硬化の概念により解決している。村上ら⁶⁾は回転硬化と下負荷面の概念を用いて、飽和土の応力誘導異方性が表現できる弾塑性構成モデルを提案している。このモデルを拡張し、不飽和土の力学特性が表現可能な弾塑性構成モデルを構築した。

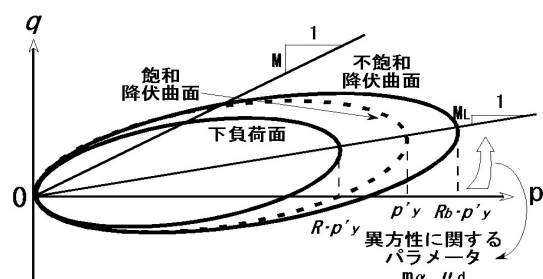


図 - 1 構成モデルの概念図

不飽和土はサクシオンの効果によって飽和土よりも高い剛性を示すため、モデルではこれを降伏曲面の拡大により表現している。下負荷面の飽和土正規降伏曲面に対する大きさの比 R と飽和土及び不飽和土の正規降伏曲面の大きさの比 R_b の積により下負荷面を規定している。

$$f(s') = R \cdot R_b \cdot \dot{p}_y \quad (1) \quad R_b = \exp(m_s p_m) \quad (2)$$

ここで p_y は圧密降伏応力、 μ_s は不飽和土の降伏曲面の大きさを決める係数である。誘導異方性に起因する体積変化に関する係数 μ_d を、不飽和土ではサクシオンの変化に起因する体積変化に関する係数と捉え、サクシオン項として定式化する。構築した構成モデルの概念図を図 - 1、応力速度～ひずみ速度関係は以下になる。構成式に用いる材料定数を表 - 1 に示す。

$$\dot{s}'_{ij} = (E_{ijkl} - D_{ijkl}^p) \dot{e}_{kl} + \frac{E_{ijmn} n_{mn} m_s f(\hat{s}', M_a)}{\hat{m}_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + D} \dot{p}_m - \frac{\frac{h_y}{l_c - k_c} E_{ijmn} n_{mn} f(\hat{s}', M_a)}{\hat{m}_{ij} E_{ijkl} n_{kl} + D} \dot{m}_d \quad (3)$$

パラメータ μ_d をサクシオン項で定式化するために、異なるサクシオンを与えた三軸圧縮試験を実施した。含水比 17% で締固めたシルト質土(初期間隙比 0.6907)を高さ 10cm、直径 5cm に成形し、サクシオンを 0(飽和)、30、60、120kPa の状態で、拘束圧 98kPa で等方圧密し、ひずみ速度 0.01%/min、排水・排気状

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

表 - 1 材料定数

材料パラメータ	実施試験	結果
圧縮指数: λ	飽和三軸試験 (圧密試験)	0.0425
膨潤指数: κ		0.0040
下負荷面パラメータ: μ_R		100.0
ポアソン比: ν	K_0 圧密試験	0.333
限界状態線の傾き: M (圧縮及び伸張)	飽和三軸	1.25, 0.70
回転硬化パラメータ: m_a	圧縮伸張試験	480.0
回転硬化パラメータ: μ_d	不飽和三軸試験	式(*)参照
サクシヨンパラメータ: μ_s	不飽和三軸試験	0.01

態でせん断した。図 - 2(左)に各せん断試験の限界状態を $e \sim \log p'$ 平面で示す。飽和土と同様に不飽和土においても正規圧密曲線と平行な限界状態線が得られると仮定し、この曲線より各サクシヨンの μ_d を算出した。得られた μ_d とサクシヨンの関係を求めるため、内部拘束応力 p_m を平均有効応力 p' で正規化し、整理したものが図 - 2(右)で、次式のように近似した。

$$m_d = -1.1912(p_m/p')^2 + 0.02 \tag{4}$$

3. 弾塑性構成モデルの適用

図 - 3 は、実験と計算結果を比較したものである。ピーク強度と限界状態における体積ひずみで若干異なる計算結果となっているが、不飽和土の力学特性をうまく表現できていることが分かる。地下水位上昇を想定した要素シミュレーションを図 - 4 に示す。水浸に伴う圧縮挙動を定性的に表現できている。

4. まとめ

下負荷面と回転硬化の概念を導入した弾塑性構成モデルにより、(不飽和シルトの)サクシヨンの大きさの違いによるせん断挙動の違い、地下水位上昇を想定した水浸挙動を表現できることが分かった。

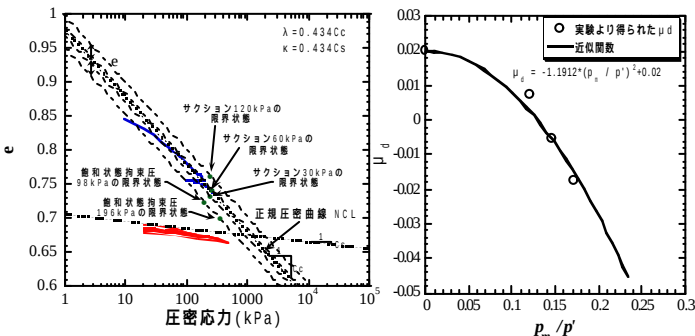


図 - 2 パラメータ μ_d について結果の整理

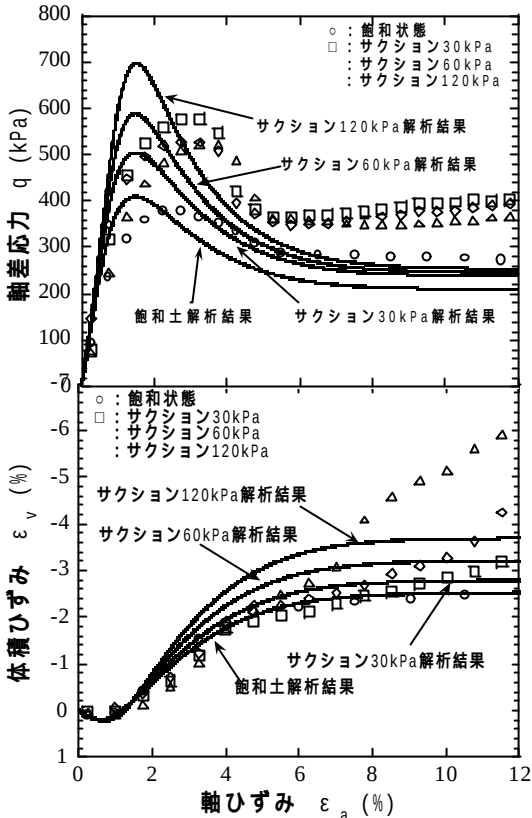


図 - 3 せん断過程における実験と計算結果の比較

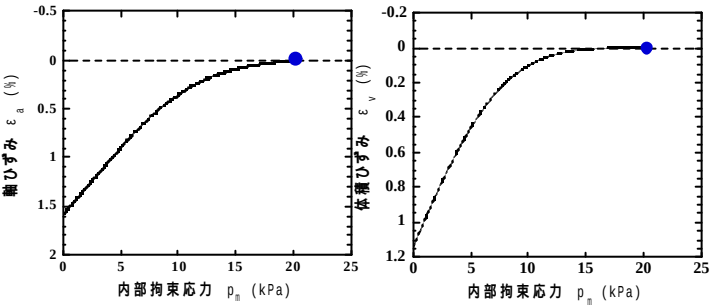


図 - 4 地下水位上昇を想定した要素解析

< 参考・引用文献 >

1)Alonso,E.E.,Gens,A.,and Josa,A.:A constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique,Vol.40, No.3, pp.405-430,1990. 2)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. 3)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. 4)満山聖,村上哲,安原一哉,小峯秀雄:不飽和土のせん断挙動シミュレーション,第 57 回年次学術講演会講演概要集,pp.677-678.2002. 5)向後雄二,浅野勇,林田洋一:二つのサクシヨン効果を考慮した修正弾塑性モデル,農業土木学会論文集,No.217,pp.9-18, 2002. 6)村上哲,安原一哉,小峯秀雄,満山聖,酒井康德:シルトの三軸せん断挙動に対する応力誘導異方性を考慮した弾塑性構成モデルの適用,第 39 回地盤工学研究発表会(投稿中),2004.