

不飽和土の圧縮・せん断・浸水特性とそのモデル化

学籍番号 23413546 氏名 塚本 晃平

指導教員名 張 鋒 ホサヒン・シャヒン

1 はじめに

本研究の目的は、乾燥～不飽和～飽和状態を統一的に表現できる精緻な構成モデルの開発である。本稿では定式化で用いるべき応力成分の検討、および不飽和土の弾塑性構成式の定式化について述べる。

2 山土を用いた要素試験と応力成分の考察

定式化で用いる応力について詳細に検討するため、様々な応力経路でサクシオン一定三軸圧縮試験を行った。試料は粒度調整を施した山土($G_s = 2.635\text{g/cm}^3$, $w_L = 44.8\%$, $w_P = 28.0\%$)を含水比 $w = 15\%$ 程度に調節し突固めにより供試体($e \approx 0.8$)を作製した。Fig.1に各試験のせん断開始点を示す。試験は $s = u_a - u_w = 49.0\text{kPa}$, 78.4kPa に対し、それぞれ異なる拘束圧下($p^{net} = p - u_a = 49.0, 98.0\text{kPa}$)で実施した三軸圧縮試験(Case1, Case2)と、浸水後の飽和状態($s=0.0\text{kPa}$)での三軸圧縮試験(Case3)および Case1 に対して背圧を作用させた三軸圧縮試験(Case4)の計7パターンを行った。すべての試験で基底応力 $p^{net} = 19.6\text{kPa}$ を載荷した状態(A 点)を起点として、所定の応力を載荷後、ひずみ制御(ひずみ速度 $0.0017\% / \text{min}$)でせん断を行った。なお、Case3 は C_1 点からサクシオン除荷により浸水させ、せん断を行った。Case4 では、 B_1 点で基底応力・サクシオン一定を保ち、背圧を増加させた。

Fig.2(a), (b)に基底応力、Bishop の有効応力($p'' = p^{net} + sS_r$)により正規化した応力比・ひずみ関係を示す。Case1,

Case4 を比較すると、両者に差異が見られないことから、基底応力・サクシオンが同じであれば、間隙水圧はせん断挙動に影響しないといえる。また、基底応力による正規化では挙動にばらつきが見られるのに対し、Bishop の有効応力では概ね一致し、不飽和土の強度を表す有効応力として、Bishop の有効応力は合理的であると考えられる。

次に Fig.3(a), (b)に両応力成分を修正応力 t_{ij} に変換して求めた応力比-ひずみ増分関係を示し、定式化で用いる応力成分について考察する。両図より、基底応力による整理では、各試験の挙動が概ね一致するが、Bishop の有効応力に関しては差異が生じている。この要因として、試験条件に依らず、有効応力比が概ね一致しているのに対し、ダイレイタンスー挙動がそれぞれ異なるため、Fig.3(b)で挙動に差異が生じたと考えられる。今回の試験結果および過去に行ったカオリンクレーの結果から、明確な傾向は示されないため、本検討に関して試験データを蓄積するなどさらなる検討が必要であるといえる。

3 不飽和土の応力ひずみ特性を考慮した弾塑性構成式とそのパフォーマンスの検証

3.1 不飽和土の弾塑性構成式の定式化

Bishop の有効応力式を応力成分として、土の含水量に起因する毛管力の作用をボンディング効果と捉え、中井らが提案するボンディング特性を考慮した弾塑性モデルに基づいて、不飽和土のモデルへと拡張する。ここに、

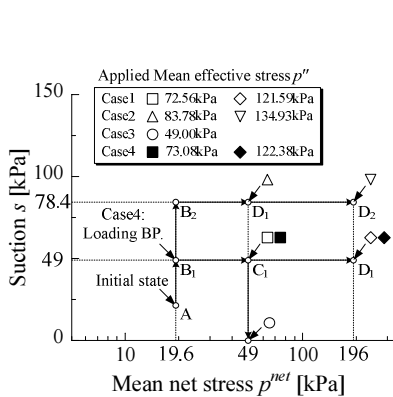
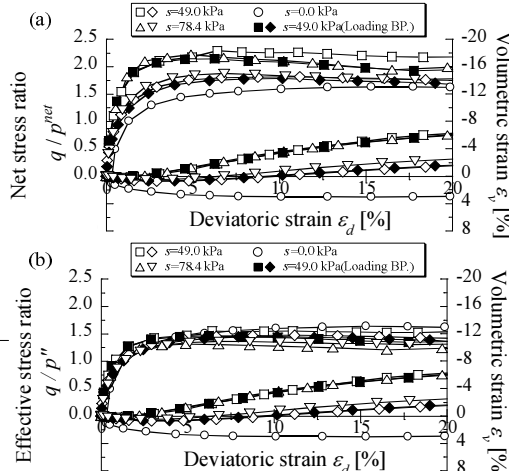
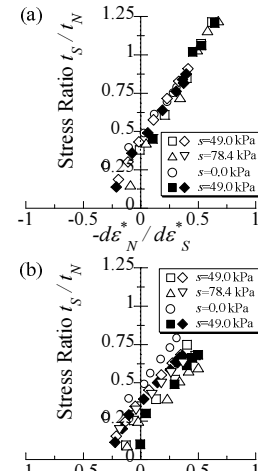


Fig.1 応力経路(せん断開始点)



(a) q/p^{net} - ϵ_d - ϵ_v 関係, (b) q/p'' - ϵ_d - ϵ_v 関係

Fig.2 応力比-ひずみ関係



(a) p^{net} による整理, (b) p'' による整理

Fig.3 応力比-ひずみ増分関係

状態変数 $\omega_u = sS_r$ を定義し、 ω_u の発展則を、van Genuchten 式を用いた水分特性曲線で規定し、飽和度の変化に応じてボンディングの発達/消散を表現する。また、3 次元応力条件を考慮できる修正応力 t_{ij} を用い、応力パラメータ関数 F は修正応力 t_{ij} のパラメータ t_N, X で与える。

$$f = F - \{H + (\rho_0 - \rho)\} = 0$$

$$\left(F = (\lambda - \kappa) \left\{ \ln \frac{t_N}{t_{N_0}} - \zeta(X) \right\}, H = (-\Delta e)^p = (1 + e_0) \cdot \varepsilon_v^p \right)$$

塑性ひずみ増分は修正応力 t_{ij} 空間で関連流れ則 ($de_{ij}^p = \Lambda dF / \partial t_{ij}$) を仮定する。塑性係数 Λ は適応条件 ($df = 0$) より、

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}^*}{(1 + e_0) \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \frac{G(\rho) + Q(\omega_u)}{t_N} \right\}} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}^*}{h_p}$$

と表される。定式化の詳細は文献を参照されたい。

3.2 提案モデルを用いたパラメトリックスタディ

サクシオン一定せん断試験をシミュレートし、提案モデルの妥当性を検証する。混合土(豊浦砂と藤の森粘土を重量比 1 : 1 で混合)を基本パラメータとして与え、砂・粘土材料を想定した水分特性パラメータを設定した。

Fig.4 に砂・粘土材料の水分特性曲線を示す。解析は、過圧密飽和供試体 ($e_{i0} = 0.80, S_r = 100\%$) に対し、Fig.5(a), (b) の応力経路に示す通り、平均基底応力一定 ($p^{net} = 49.0 \text{ kPa}$) で所定のサクシオンを载荷後、せん断を行った。

Fig.6(a), (b) に砂・粘土材料の有効応力比 - ひずみ関係を示す。両図を比較すると、砂材料では飽和度に依らずせん断挙動が概ね一致していることがわかる。一方、粘土材料では飽和度毎に差異が見られ、一般的に指摘される、サクシオン増加に伴う初期剛性、ピーク強度の増加や、ダイレイタンシー挙動が膨張側へと移行する傾向を提案モデルはよく表現できている。

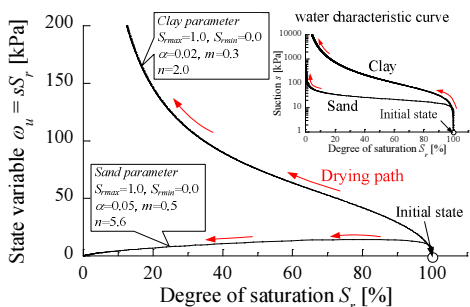


Fig.4 砂・粘土材料の水分特性曲線

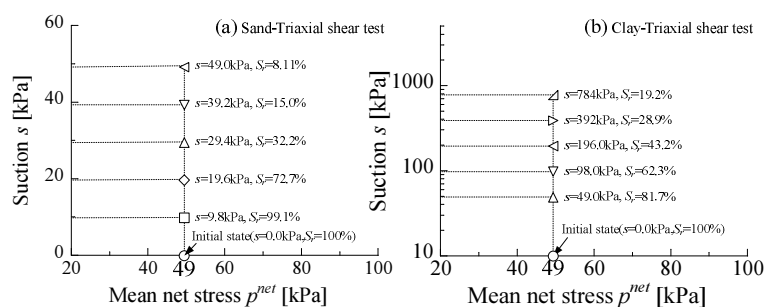


Fig.5 砂・粘土材料のせん断開始点 - (a)砂材料、(b)粘土材料

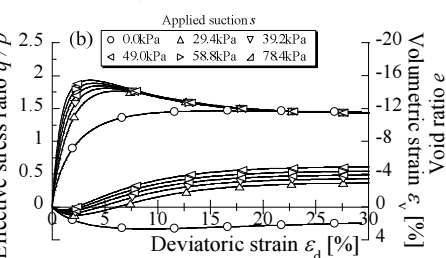
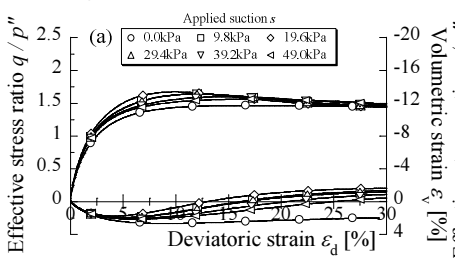


Fig.6 砂・粘土材料の $q/p'' - \epsilon_d - \epsilon_v$ 関係 - (a)砂材料、(b)粘土材料

次に、Fig.7 に粘土材料におけるせん断開始前後の $e - \ln p''$ 関係を示す。なお、Fig.5(b)のせん断点に対し $s=9.8, 24.5, 156.8 \text{ kPa}$ の試験を追加し、せん断前：白抜きプロット、せん断後：黒塗りプロットで示している。また、数字は飽和度を表す。図より、サクシオン载荷に伴う有効応力 p'' の増加により体積圧縮挙動が生じている。間隙比は正規圧密線 (NCL) に近づき、過圧密の影響 (図中の ρ) が消散することで相対的に緩い状態となるが、Fig.6 (a) ではサクシオン载荷に伴い初期剛性やピーク強度は増加傾向を示している。これは、過圧密の消散よりも飽和度の減少によるボンディング効果 (ω_u) の方が卓越するためである。不飽和土は一般的に低飽和度で緩い間隙状態を保持し高い剛性を示すが、提案モデルは過圧密の影響 (ρ) と飽和度の変化によるボンディングの発達/消散 (ω_u) のバランスにより、これらの傾向を表現することができる。また、既往の研究により、不飽和土の限界状態での間隙比は、飽和土のそれよりも大きく、サクシオン増加に伴いより緩い状態を示す。今回の解析では、この傾向の内、不飽和土の限界状態における間隙比が飽和土より緩い状態で存在する傾向を捉えることができた。サクシオン増加により限界状態での間隙比がより緩い状態へ推移する傾向を表現するには、異なる拘束圧での検討が必要であり、密度増加による飽和度の変化を考慮した水分特性曲線モデルの定式化が求められる。

まとめ

定式化で用いる応力成分の検討では、今後さらなる検証が必要である。また、解析結果より、間隙比の影響は今後検討する必要があるが、不飽和化による剛性の増加やダイレイタンシーの推移など不飽和土の典型的な挙動を表現することができた。

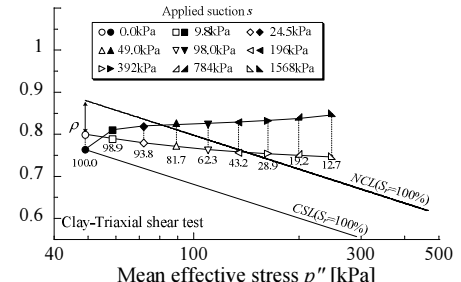


Fig.7 粘土材料にせん断開始前後の $e - \ln p''$ 関係