

山土を用いた不飽和土三軸試験に基づく基底応力および有効応力の考察

名古屋工業大学 学生会員 塚本晃平, 山口卓洋

名古屋工業大学 正会員 張 鋒, Hossain Md. Shahin, 中井照夫

1. はじめに

不飽和土は粒子間のメニスカス作用により、飽和土とは違い複雑な挙動を呈する。その挙動を記述する構成式の定式化では、サクシオンを考慮した有効応力をベースにするか、あるいはサクシオンと基底応力を独立に扱いモデルに取り入れるかのいずれかにおおよそ大別される。本稿ではその妥当性を検討するため、様々な応力経路で三軸圧縮試験を行った。シルト等を用いた従来の不飽和土要素試験ではサクシオン制御に伴う試験時間の長期化が課題となるが、本試験では透水性の高い山土(市販の化粧真砂)を用いることで試験時間を短縮し、系統的な試験結果の蓄積を図った。同試験結果から基底応力・サクシオンの違いが不飽和土の力学特性に与える影響を検討するとともに、構成式の定式化で考えるべき応力について考察を行う。

2. 試験方法

試験は二重セル方式で体積変化を計測する不飽和土用三軸試験機を用いて実施した。供試体上端から間隙空気圧 u_a を作用させ、同時に二重管ビュレットから背圧を载荷し、セラミックディスク(AEV:98.0[kPa])を介して供試体下端に間隙水圧 u_w として作用させることでサクシオン $s = u_a - u_w$ を制御する。試料は粒度調整を施した山土($\rho_s = 2.635[\text{g}/\text{cm}^3]$, $w_L = 44.80[\%]$, $w_P = 28.00[\%]$)を含水比 $w = 15[\%]$ 程度に調節し用いた。供試体は突固めにより間隙比 $e = 0.8$, 飽和度 $S_r = 45[\%]$ 程度となるよう作製した。Table1に試験条件を、Fig.1(a), (b)に応力経路図に示す。試験はサクシオン一定の三軸圧縮試験(Case1: $s = 49.0[\text{kPa}]$, Case2: $s = 78.4[\text{kPa}]$, Case3: $s = 0.0[\text{kPa}]$)と、Case1の応力経路に対して背圧($u_w = 29.4[\text{kPa}]$)を作用させた三軸圧縮試験(Case4)の4ケースから成る。Case1, 2, 4では二種類の基底応力($p^{net} = p - u_a = 49.0, 98.0[\text{kPa}]$)で、Case3は基底応力 $p^{net} = 49.0[\text{kPa}]$ のみ実施した。すべての試験で基底応力 $p^{net} = 19.6[\text{kPa}]$ を载荷した状態(A点)を起点として、所定のサクシオン($s = 49.0, 78.4[\text{kPa}]$)を载荷後、サクシオン一定で圧密を行い、各基底応力下($p^{net} = 49.0, 98.0[\text{kPa}]$)でせん断を行った。なお、背圧を载荷する試験(Case4)では、応力状態 B_1' において、基底応力およびサクシオンが一定となるよう背圧と軸圧、セル圧及び空気圧とを同時に増加させた。また、サクシオン $s = 0.0[\text{kPa}]$ の試験(Case3)のみ応力状態 C_1 から基底応力一定の下、背圧を増加させることでサクシオンを減少させ、浸水後にせん断を行った。せん断過程は排気・排水条件の下、基底応力・サクシオン一定でひずみ制御(ひずみ速度 $0.0017\% / \text{min}$)により行った。

Table1 各試験の応力経路とせん断開始時の供試体の状態

Test case	Plot	$s[\text{kPa}]$	$p^{net}[\text{kPa}]$	BP $u_w[\text{kPa}]$	e	$S_r[\%]$	$p'[\text{kPa}]$	Consolidation Path
Case1	□	49.0	49.0	0.0	0.732	48.09	72.52	A→B ₁ →C ₁
	◇		98.0		0.724	48.14	121.62	A→B ₁ →D ₁
Case2	△	78.4	49.0		0.747	44.36	83.79	A→B ₂ →C ₂
	▽		98.0		0.709	47.11	134.95	A→B ₂ →D ₂
Case3	○	0.0	49.0		0.715	76.16	49.00	A→B ₁ →C ₁ →C ₃
Case4	■	49.0	49.0		0.725	49.15	73.11	A→B ₁ '→C ₁ '
	◆		98.0	0.703	49.76	122.40	A→B ₁ '→D ₁ '	

調整を施した山土($\rho_s = 2.635[\text{g}/\text{cm}^3]$, $w_L = 44.80[\%]$, $w_P = 28.00[\%]$)を含水比 $w = 15[\%]$ 程度に調節し用いた。供試体は突固めにより間隙比 $e = 0.8$, 飽和度 $S_r = 45[\%]$ 程度となるよう作製した。Table1に試験条件を、Fig.1(a), (b)に応力経路図に示す。試験はサクシオン一定の三軸圧縮試験(Case1: $s = 49.0[\text{kPa}]$, Case2: $s = 78.4[\text{kPa}]$, Case3: $s = 0.0[\text{kPa}]$)と、Case1の応力経路に対して背圧($u_w = 29.4[\text{kPa}]$)を作用させた三軸圧縮試験(Case4)の4ケースから成る。Case1, 2, 4では二種類の基底応力($p^{net} = p - u_a = 49.0, 98.0[\text{kPa}]$)で、Case3は基底応力 $p^{net} = 49.0[\text{kPa}]$ のみ実施した。すべての試験で基底応力 $p^{net} = 19.6[\text{kPa}]$ を载荷した状態(A点)を起点として、所定のサクシオン($s = 49.0, 78.4[\text{kPa}]$)を载荷後、サクシオン一定で圧密を行い、各基底応力下($p^{net} = 49.0, 98.0[\text{kPa}]$)でせん断を行った。なお、背圧を载荷する試験(Case4)では、応力状態 B_1' において、基底応力およびサクシオンが一定となるよう背圧と軸圧、セル圧及び空気圧とを同時に増加させた。また、サクシオン $s = 0.0[\text{kPa}]$ の試験(Case3)のみ応力状態 C_1 から基底応力一定の下、背圧を増加させることでサクシオンを減少させ、浸水後にせん断を行った。せん断過程は排気・排水条件の下、基底応力・サクシオン一定でひずみ制御(ひずみ速度 $0.0017\% / \text{min}$)により行った。

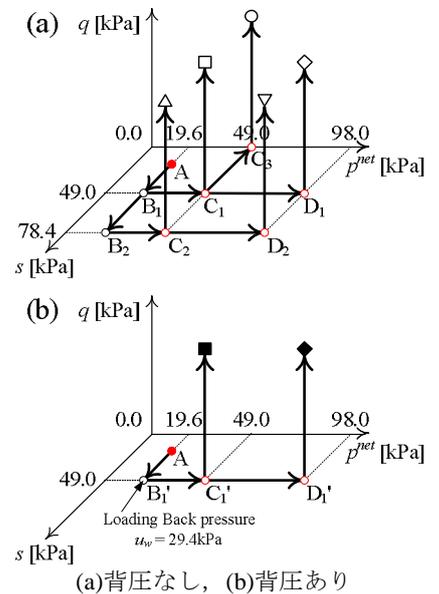


Fig.1 応力経路図

3. 試験結果と考察

Fig.2に各試験の応力-ひずみ関係を示す。なお、不飽和土の有効応力には、有効応力パラメータ χ を飽和度 S_r とした Bishop の有効応力式¹⁾($p'' = p^{net} + sS_r$)を用い整理を行った。Case1, Case2より基底応力の違いに着目すると、基底応力 $p^{net} = 98.0[\text{kPa}]$ (◇, ▽プロット)の方が基底応力 $p^{net} = 49.0[\text{kPa}]$ (□, △プロット)よりもせん断強度は大きく、ダイレイタンスー挙動はより圧縮側にある。また、Case1(□, ◇プロット), Case4(■, ◆

◆プロット)より背圧の有無を見ると、いずれも明瞭な差が見られないことから、基底応力やサクシオンが同じであれば、飽和土と同様に間隙水圧はせん断挙動に影響しないといえる。

次に、サクシオンの違いに着目すると、基底応力の違いに依らず、Case1とCase2において両者の挙動は概ね一致しており、せん断挙動に与えるサクシオンの影響は非常に小さい結果となった。これは Bishop の有効応力式($p'' = p^{net} + sS_r$)のうち、サクシオンに関する項(sS_r)が基底応力 p^{net} に比べて小さいためだと考えられる。一方、サクシオン $s = 0.0$ [kPa] にすることで飽和度が増加した Case3(○プロット)のせん断強度を見ると、同一基底応力下の試験(□, △プロット)よりも小さく、一般的に指摘される飽和度の違いによる強度差が確認できる。また、ダイレイタンシー挙動に関しては、飽和度の増加に伴い圧縮側へと移行する傾向が見られた。

最後に、構成式の定式化で用いる応力について考察する。まず、Fig.3(a), (b)に基底応力、Bishop の有効応力で正規化した応力比・ひずみ関係を示す。両図より、基底応力による正規化では挙動にばらつきが見られるが、Bishop の有効応力に関しては概ね一致していることがわかる。このことから Bishop の有効応力($p'' = p^{net} + sS_r$)は、不飽和土の強度を表す有効応力として合理的であると考えられる。次に Fig.4(a), (b)に基底応力、Bishop の有効応力を修正応力 t_{ij} で変換して求めた応力比-ひずみ増分比関係を示す。上述した通り、サクシオンがせん断挙動に及ぼす影響は小さいことから、Fig.4(a)より基底応力による整理では応力比-ひずみ増分関係に差異が見られない。一方、Fig.4(b)より Bishop の有効応力による整理では、サクシオンの違いを有効応力に換算しているため、応力比-ひずみ増分関係にばらつきが見られる。したがって、定式化で用いる応力の妥当性に関しては、より低い基底応力(サクシオンに関する項(sS_r)の影響が大きくなる)で試験を実施し、サクシオンの影響を詳細に検討する必要があると考える。

4. まとめ

山土を用いた不飽和土三軸試験により、構成式を定式化するにあたってふさわしい応力成分について検討を行った。同試験結果から、サクシオンが低い(高飽和度)ほど、せん断強度は小さくなり、ダイレイタンシーは圧縮側へ移行する傾向が見られた。構成式の定式化で用いる応力に関しては、せん断挙動に与える基底応力の影響が相対的に大きいため、より低い基底応力で試験を行いせん断挙動に及ぼすサクシオンの影響を把握することで、妥当性を検討していきたい。

謝辞：試料の作成に当たり、ジオラボ中部の加藤雅也氏より貴重なご助言を頂いた。

参考文献：1) *Tecnisk Ukeblad* 39, 859-863, 1959. 2) 立松ら第46回地盤工学研究発表会、講演集(CD-ROM)-338

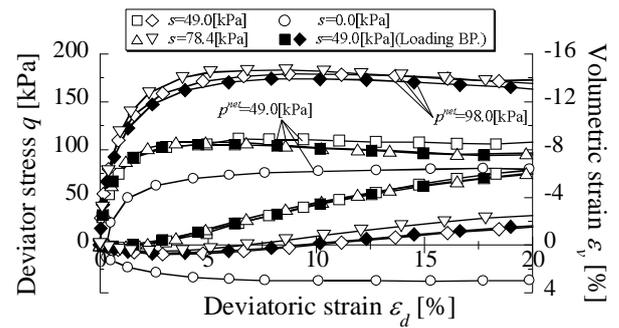
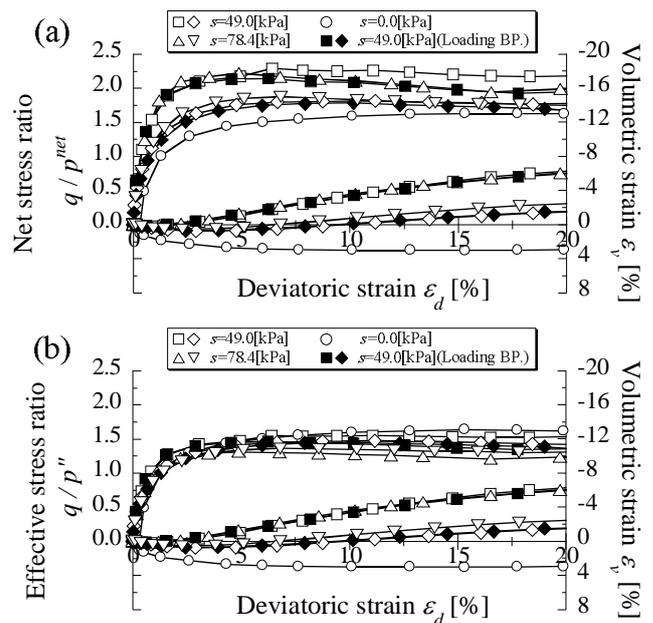
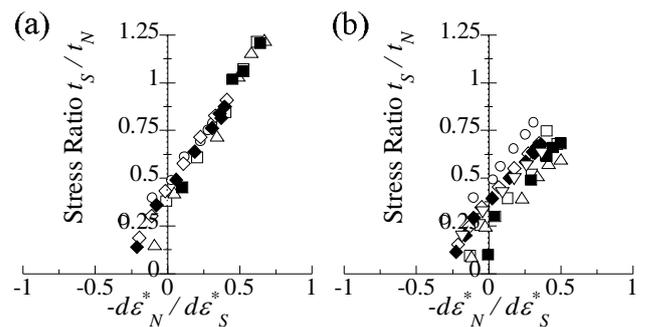


Fig.2 各試験の応力ひずみ関係



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

Fig.3 正規化した応力比・ひずみ関係



(a)基底応力による整理, (b)有効応力による整理

Fig.4 ストレス-ダイレイタンシー関係