

軸対称応力状態における不飽和粘性土のせん断挙動の解析

加藤正司*・松岡 元**

不飽和土として締固めたカオリン粘土を用い、サクシオン一定の三軸圧縮・三軸伸張試験を行った。そして、得られた結果を「拡張された空間滑動面 (Extended SMP)」に基づいて整理した。その結果、せん断時の変形挙動について応力状態によらないユニークな関係が得られた。これによりサクシオン一定の軸対称応力条件下における不飽和土のせん断挙動に対する拡張 SMP 理論の適用性が確認された。

Key Words: axisymmetric stress state, constant suction, unsaturated soil, constitutive law

1. まえがき

Bishop¹⁾による不飽和土に関する研究は、飽和土の強度と変形挙動を説明することができる有効応力原理を不飽和土にまで拡張しようとするものであった。このため不飽和土の破壊強度を同じ構造を持つ飽和土と比較し、その挙動の違いをサクシオンの影響と考え、作用しているサクシオンを有効応力に換算している。しかし、水浸時のコラプス挙動が示すようにサクシオンが土質定数にも影響を及ぼすため、不飽和土の変形挙動を Bishop 式により予測することは困難である。このサクシオンのもつ「有効応力への寄与」と「土質定数への影響」の2つの作用を評価するために、サクシオンを独立した応力変数として取り扱う考え方^{2),3)}が提案された。現在ではこの考え方を基にして、Cam Clay モデルに代表される弾塑性モデルを取り入れた研究^{4),5)}が行われている。しかし、これらの研究は主に三軸圧縮条件を対象としていると考えられる。一方、実地盤の多くは平面ひずみ状態に代表される相異なる3主応力状態にある。このことを考えれば、不飽和土の挙動を予測するためには、その応力条件下での挙動を表現できる手法が必要となる。本論文は、不飽和土の相異なる3主応力下での挙動を表現できる手法を確立しようとする研究の一部をなしている。このため、粘着成分を有する摩擦性材料の相異なる3主応力下の変形・破壊挙動を表現できる拡張 SMP 理論^{6),7)}の不飽和粘性土への適用性を検討する。そして、その第一段階としてサクシオン一定の三軸圧縮・三軸伸張試験を行い、実験結果に検討を加えている。なお、以下では有効応力は次式で定義する⁸⁾。

$$\sigma = \sigma_i - u_a \dots \dots \dots (1)$$

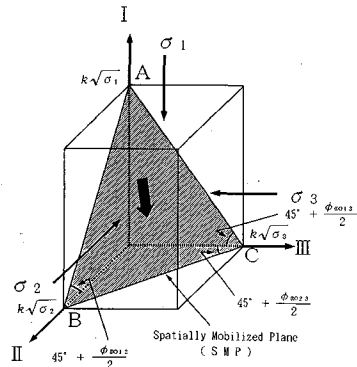


図-1 空間滑動面 (SMP)

ここに、 σ : 有効応力

σ_i : 全応力

u_a : 間隙空気圧

また、サクシオンおよび平均有効主応力を次の記号を用いて表すものとする。

$$S = u_a - u_w \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 S : サクシオン

u_w : 間隙水圧

$$p = (\sigma_a + 2\sigma_r) / 3 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 p : 平均有効主応力

σ_a : 有効応力表示の軸圧

σ_r : 有効応力表示の側圧

2. 拡張 SMP 理論について

従来の SMP 理論⁹⁾は、土粒子の3次元応力下の平均的な滑動面であると考えられる空間滑動面 (Spatially Mobilized Plane; 以後 SMP と略す、図-1 参照) をもとにせん断時の ϕ 材料の挙動を表現しようとするものであった。しかし、この方法では粘着成分を有する c 、 ϕ 材料の挙動を表現することは難しい。そこで、図-2

* 正会員 工修 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科

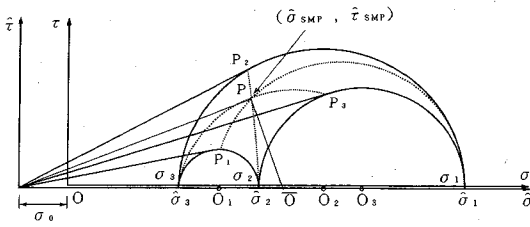


図-2 破壊時のモール円とボンド応力の関係

に示すように破壊時のモール円により決定される粘着成分を σ 軸上のボンド応力 $\sigma_0 (=c \cdot \cot \phi)$ で表現し、次式による新たな応力を定義する。

$$\hat{\sigma}_i = \sigma_i + \sigma_0 \quad (i=1, 2 \text{ and } 3) \quad (4)$$

ここに、
 $\hat{\sigma}_i$: 新たに定義する有効主応力
 σ_i : 有効主応力
 σ_0 : ボンド応力

そして、この $\hat{\sigma}_i$ をもとに滑動面を考えれば、従来の SMP に関する座標軸を σ_0 ずらした状態で、拡張された空間滑動面 (Extended SMP ; 以後、拡張 SMP と呼ぶ、図-3 参照) が定義される。拡張 SMP 理論はこの面をもとに c, ϕ 材料のせん断挙動を見ようとするものである。なお、拡張 SMP 上の垂直応力 $\hat{\sigma}_{SMP}$ とせん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$ は従来の SMP の場合と同じ形の次式で示される。

$$\hat{\sigma}_{SMP} = \hat{\sigma}_1 \hat{a}_1^2 + \hat{\sigma}_2 \hat{a}_2^2 + \hat{\sigma}_3 \hat{a}_3^2 \quad (5)$$

$$\hat{\tau}_{SMP} = \frac{\sqrt{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 \hat{a}_1^2 \hat{a}_2^2 + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 \hat{a}_2^2 \hat{a}_3^2 + (\hat{\sigma}_3 - \hat{\sigma}_1)^2 \hat{a}_3^2 \hat{a}_1^2}}{2} \quad (6)$$

ここに、

$$\hat{a}_i = \sqrt{J_3 / (\hat{\sigma}_i J_2)} \quad (7)$$

ただし、

$$\hat{J}_2 = \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 + \hat{\sigma}_3 \hat{\sigma}_1 \quad (8)$$

$$\hat{J}_3 = \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 \quad (9)$$

また、ひずみに相当する成分¹⁰⁾として、次式で示される主ひずみ増分ベクトルの拡張 SMP に対する垂直な成分 $d\hat{\epsilon}_{SMP}^*$ および平行な成分 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ を用いるものとする (図-4 参照)。

$$d\hat{\epsilon}_{SMP}^* = d\epsilon_1 \hat{a}_1 + d\epsilon_2 \hat{a}_2 + d\epsilon_3 \hat{a}_3 \quad (10)$$

$$d\hat{\gamma}_{SMP}^* = \frac{\sqrt{(d\epsilon_1 \hat{a}_2 - d\epsilon_2 \hat{a}_1)^2 + (d\epsilon_2 \hat{a}_3 - d\epsilon_3 \hat{a}_2)^2 + (d\epsilon_3 \hat{a}_1 - d\epsilon_1 \hat{a}_3)^2}}{2} \quad (11)$$

ただし、 $d\epsilon_i$; 主ひずみ増分 ($i=1, 2 \text{ and } 3$)

ここに定義したボンド応力 σ_0 のような、「粘着成分を σ 軸上の応力成分 (等方応力成分) に換算する」考え方は、ソコロフスキー¹¹⁾、橋口¹²⁾ や大楨¹³⁾ によっても提案されている。しかし、それらの研究は主に破壊条件を対象としており、

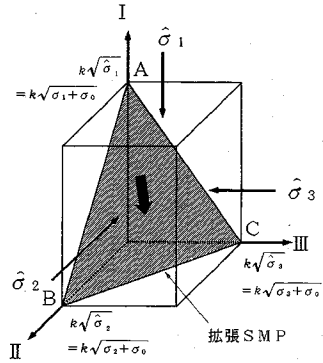


図-3 拡張された空間滑動面 (Extended SMP)

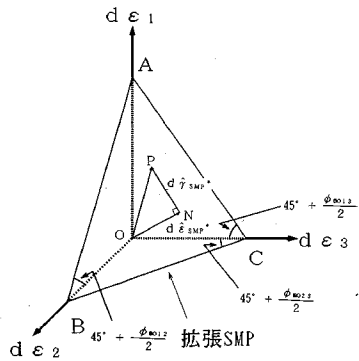


図-4 拡張 SMP に対するひずみ相当成分

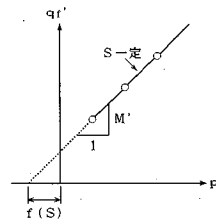


図-5 軽部によるサクシオン応力 $f(S)$ の定義

変形挙動を予測したものではない。

不飽和土について、サクシオンにより生ずる「粘着成分」をこのように評価した研究としては軽部による研究¹⁴⁾が挙げられる。軽部は、サクシオンにより生じた土塊に作用するサクシオン応力 $f(S)$ を、三軸圧縮試験より得られるエネルギー補正をした破壊時のせん断強度 q_f' と平均有効主応力 p の関係から図-5 に示すように定義している。さらに軽部¹⁵⁾は、サクシオン応力は飽和土における等方有効応力と同等の作用をする成分と、土の骨格を有効応力に抗して保持しようとする成分の2つから成るとした。また、与えられたサクシオンの大きさが同じで供試体の含水比すなわち間隙水の分布状況が異なる条件 (図-6 参照) で等方圧密試験を行い、吸排水量および変形挙動の違いを検討している。

なお、サクシオン応力 $f(S)$ は図-5 に示すようにエネルギー

表一 供試体諸元

サクシオン S (kPa)	応力 条件	せん断時の P (kPa)	記号	供試体作製時			S = 49 kPa 載荷時			サクシオン圧縮終了時			p 圧縮終了時				
				e ₀	w ₀ (%)	Sr ₀ (%)	e	w(%)	Sr(%)	応力点	e	w(%)	Sr(%)	応力点	e	w(%)	Sr(%)
147	Comp.	196	○	1.338	25.78	52.19	1.335	28.18	57.22	B	1.326	26.28	53.72	C1	1.182	25.74	59.01
		392	△	1.341	25.73	51.99	1.323	28.21	57.79		1.310	26.35	54.51	C2	1.079	25.47	63.94
	Ext.	196	●	1.378	26.66	52.43	1.375	29.43	57.99		1.364	27.07	53.81	C1	1.234	26.38	57.92
		196	■	1.363	26.39	52.48	1.353	29.39	58.88		1.343	27.24	54.95	C1	1.204	26.98	60.72
		392	▲	1.278	25.16	53.67	1.265	27.11	58.10		1.259	25.52	54.94	C2	1.031	24.79	65.17
245	Comp.	196	○	1.271	24.94	53.20	1.249	27.01	58.59	D	1.228	24.63	54.36	E1	1.062	24.07	61.43
		196	□	1.243	25.52	55.65	1.356	29.01	57.98		1.228	25.17	55.53	E1	1.197	23.60	53.43
		392	△	1.369	25.50	50.47	1.250	29.59	64.16		1.348	26.34	52.96	E2	1.048	23.95	61.90
	Ext.	196	●	1.256	25.29	54.57	1.252	29.52	63.93		1.231	24.66	54.28	E1	1.139	23.99	57.09
		392	▲	1.274	25.77	54.84	1.280	29.46	62.38		1.260	24.95	53.65	E2	1.087	23.86	59.51

ギー補正をしたせん断強度 q_f' と平均有効主応力 p の関係から得られるものであり、ボンド応力 σ_0 は図-2 に示すようにエネルギー補正をしない通常の破壊時のモール円から得られるものであって、両者には密接な対応関係がある。

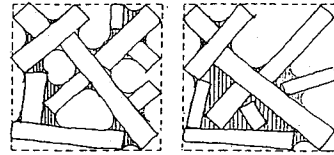
さて、Bishop¹⁾ は次式で示される有効応力 σ を提案している。

$$\sigma = (\sigma_1 - u_a) + \chi(u_a - u_w) \dots\dots\dots (12)$$

ここに示す係数 χ は、不飽和土と飽和土の挙動を比較することにより決定される。さらに、Blight¹⁶⁾ は応力状態のわずかに異なる2つの不飽和土の挙動を比較して、不飽和土のみの実験から係数 χ を決定する方法を提案している。これらの研究は、上記2種の土の変形または強度の比較に基づいて式(12)より有効応力を決定し、その有効応力により不飽和土の挙動を説明しようとするものである。このため、変形中の χ が変わることであり、サクシオンの有効応力 σ への寄与分 $\chi(u_a - u_w)$ は、サクシオンが一定であっても挙動にともない変化することとなる。一方、式(4)中のボンド応力 σ_0 は、図-2 や図-15 (後掲) に示すようにサクシオン一定条件下では一定の値と見なしている。つまり、式(4)と式(12)の右辺を比較するならば、形式上 σ_0 と $\chi(u_a - u_w)$ の項が対応しているように見えるが、Bishopらの方法と本論文での考え方は異なったものである。

3. 試料および供試体作製方法

実験に用いた試料は土粒子の比重2.71、液性限界40%、塑性指数12.3のカオリン粘土である。この試料を含水比調整後、突き棒と四割りモールドを用いて締固め、端面を成形して供試体(直径3.5cm、高さ8cm)とした。なお、締固め方法は5層に分け、各層15回ずつ314kPaの応力で締固めている。この方法による締固め試験結果を図-7に示している。図中のゼロ空気間隙曲線付近の結果から推測して、最適含水比は35%程度と考えられる。また、供試体作製時の試料は含水比約26%に調整している。供試体作製時の諸元を表-1に示す。



(a) 接点に集中 (b) 空隙を占める

図-6 空隙内の水の分布の概念図¹⁴⁾

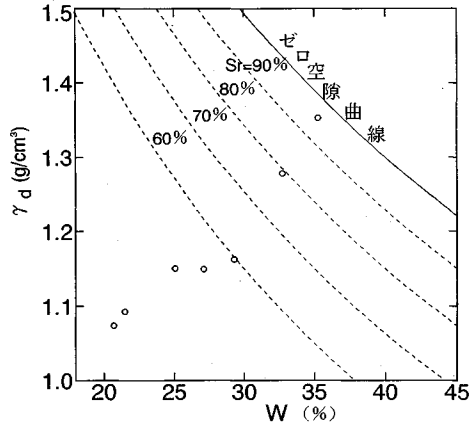


図-7 カオリン粘土の締め固め試験結果

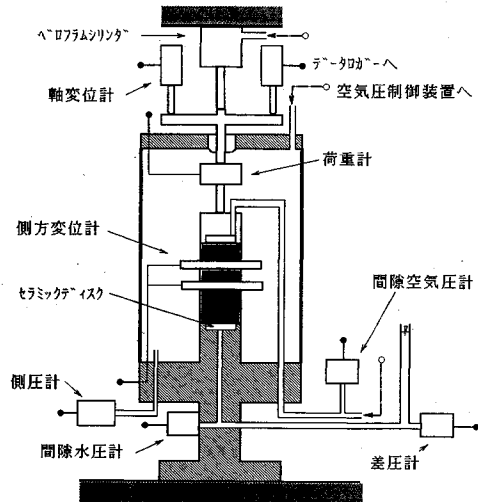


図-8 不飽和土用三軸セル概要図

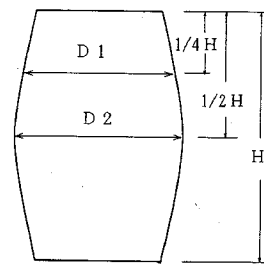
4. 実験装置および実験方法

実験に用いた不飽和土用三軸セルの概要を図-8に示す。通常の飽和土用三軸セルと異なる点は、エアークロージャーバリュー 275 kPa のセラミックディスクをベDESTAL に埋め込んでいることが挙げられる。そして、間隙水圧はセラミックディスクを通じてビュレットより大気圧に解放され供試体内に間隙空気圧を与えることによりサクシオンを载荷している。また、供試体体積は側方変位計を用いて測定している。その測定方法は、供試体高さの 1/4 と 1/2 の点に取り付けた側方変位計により図-9に示すように直径 D_1 、 D_2 を測定し、それをもとに供試体の変形形状を二次放物線で近似して体積を求めるものである。実験の応力経路を図-10に示す。サクシオン S の载荷過程 (図-10 A→B, A→D) の後、平均有効主応力 p の载荷過程 (図-10 B→C1, B→C2, D→E1, D→E2) を経て、 p 、 S 一定で三軸圧縮・三軸伸張排水せん断試験を行った。せん断方法は、応力制御法で一段階 8 時間の段階载荷で行った。なお、この試験方法によれば約 8 日間の試験時間を要する。またその間に、セル内の空気がメンブレンを透過して供試体を乾燥させる量は、含水比で最大約 1% 程度であることを試験後の含水比測定結果より確認している。このため、供試体の乾燥に対する特別な処置はとらずに試験を実施した。

5. 実験結果および考察

(1) サクシオンによる等方圧縮過程

図-11はサクシオン载荷時 (図-10, A→B, A→D の経路) の $\log S$ ~間隙比変化 (de) 関係を示している。図中の実線は $S=147$ kPa まで载荷した場合、破線は $S=245$ kPa まで载荷した場合の結果である。間隙比の変化はかなり小さいが、 $S=98\sim 147$ kPa 付近からサクシオンによる圧縮に対し正規圧縮状態となっているようである。なお、図-11のプロットがほぼ平行であることからわかるように、 S 载荷時の間隙比変化には $S=49$ kPa 载荷時の間隙比 (表-1 参照) の大きさの影響はあまりないようである。図-12はサクシオン载荷時の S ~含水比変化 (dw) 関係を示している。供試体は $S=49$ kPa 载荷時には吸水している。つづいて $S=98$ kPa を载荷すると排水していることが分かる。なお、その後の含水比変化量には図中の勾配の違いからわかるように $S=49$ kPa 载荷時の含水比の大きさ (表-1 参照) が影響し、含水比の小さいものほど排水量が小さく勾配がゆるくなる傾向を示している。また、 $S=49$ kPa 载荷時の含水比の大きさには、供試体作製時の初期サクシオンが影響していると考えられる。



二次放物線近似

図-9 供試体体積の二次放物線近似

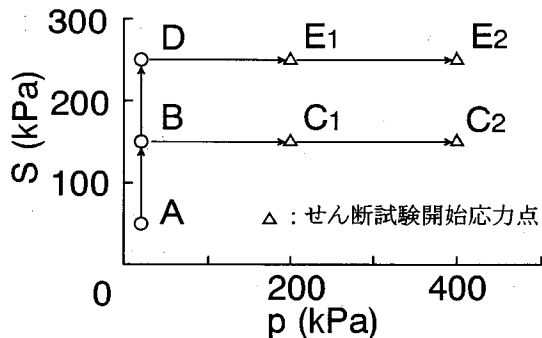


図-10 実験の応力経路

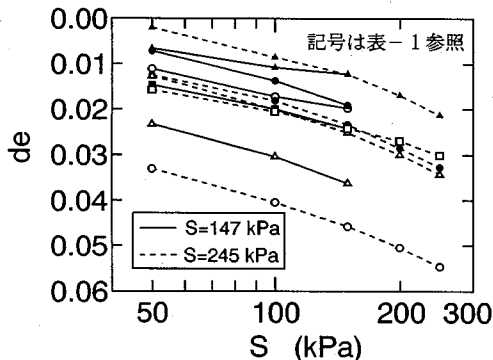


図-11 $\log S$ ~間隙比変化関係

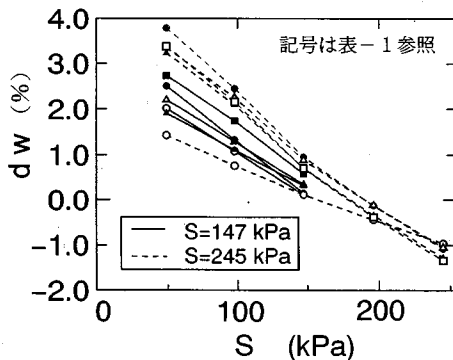


図-12 S ~含水比変化関係

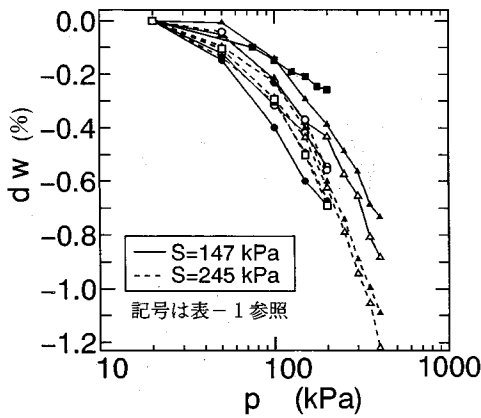


図-13 logS~ 含水比変化関係

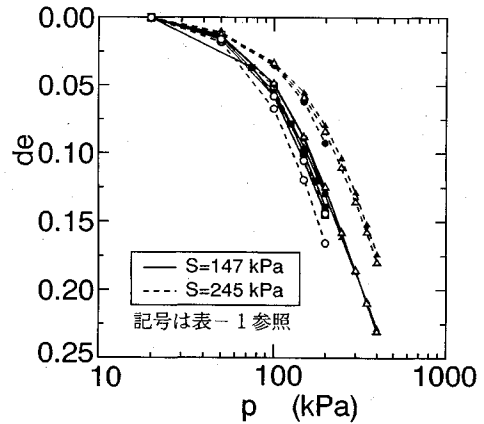


図-14 log b~ 間隙比変化関係

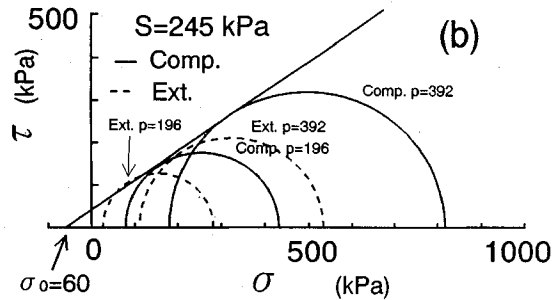
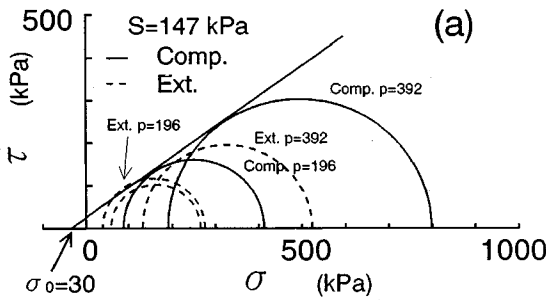


図-15 破壊時のモール円とボンド応力

(2) 平均有効主応力による等方圧縮過程

図-13は、平均有効主応力による圧縮過程（図-10, B→C1, B→C2, D→E1, D→E2の経路）中の含水比変化を示している。図中の実線はS=147 kPa, 破線はS=245 kPaの結果である。S=147 kPaの結果がばらついているのは、载荷されたサクシオンが供試体のエア-エントリーバリューを越えていても初期サクシオンの影響が現れているためであろう。また、表-1に示すサクシオンによる圧縮過程終了時の含水比が大きいS=147 kPaの方が、予想に反してpが大きくなった時の排水量が小さいのが見られる。これは、次のように考えられる⁸⁾。体積圧縮にともない粒子接点が増加するが、サクシオンが小さい場合は粒子接点に生じるメニスカスの曲率が大きくなるため、メニスカスの形成に必要な水量が増加し、吸水挙動が生じる。このために供試体圧縮による排水挙動が相殺されるのであろう。図-14は、平均有効主応力による圧縮過程（図-10, B→C1, B→C2, D→E1, D→E2の経路）中の間隙比変化を示している。図中の破線で示されるS=245 kPaのデータの内、白丸印の結果を除いてS=245 kPaの方が先行圧縮応力が大きくなっていることが分かる。これはサクシオンにより土骨格構造の剛性が大きくなったためである。表-2はこの結果をもとに求めた先行圧縮応力 p_r と圧縮指

表-2 p_r, λ, κ の比較

	S (kPa)	p_r (kPa)	λ	κ
de~log p 関係による場合	147	98	0.142	0.015
	245	137	0.148	0.013
de~log(p+sigma_0) 関係による場合	147	88	0.163	0.030
	245	137	0.163	0.035

数 λ および膨潤指数 κ を示している。サクシオンの大きさの違いによる λ, κ の差は余りないようである。また表中には、同じ試験結果に対する間隙比変化~log(p+sigma_0) 関係 (sigma_0; 次節参照) から得られた先行圧縮応力 p_r と圧縮指数 λ および膨潤指数 κ を示している。この場合も、サクシオンの大きさによる違いはあまりないことがわかる。また、両整理法による p_r, λ, κ の値をサクシオンごとに比較しても大きさの違いはあまり見られない。

(3) 拡張 SMP に基づくせん断時の変形挙動の解析

ここでは、せん断過程における変形挙動について、拡張 SMP をもとに考察を加える。図-15 (a), (b) は、せん断時のサクシオンをS=147 kPaとS=245 kPaに一定に保った場合の破壊時のモール円を示している。この図からボンド応力 σ_0 の大きさはそれぞれ $\sigma_0=30, 60$ kPaと決定される。図-16はS=147 kPaの場合につ

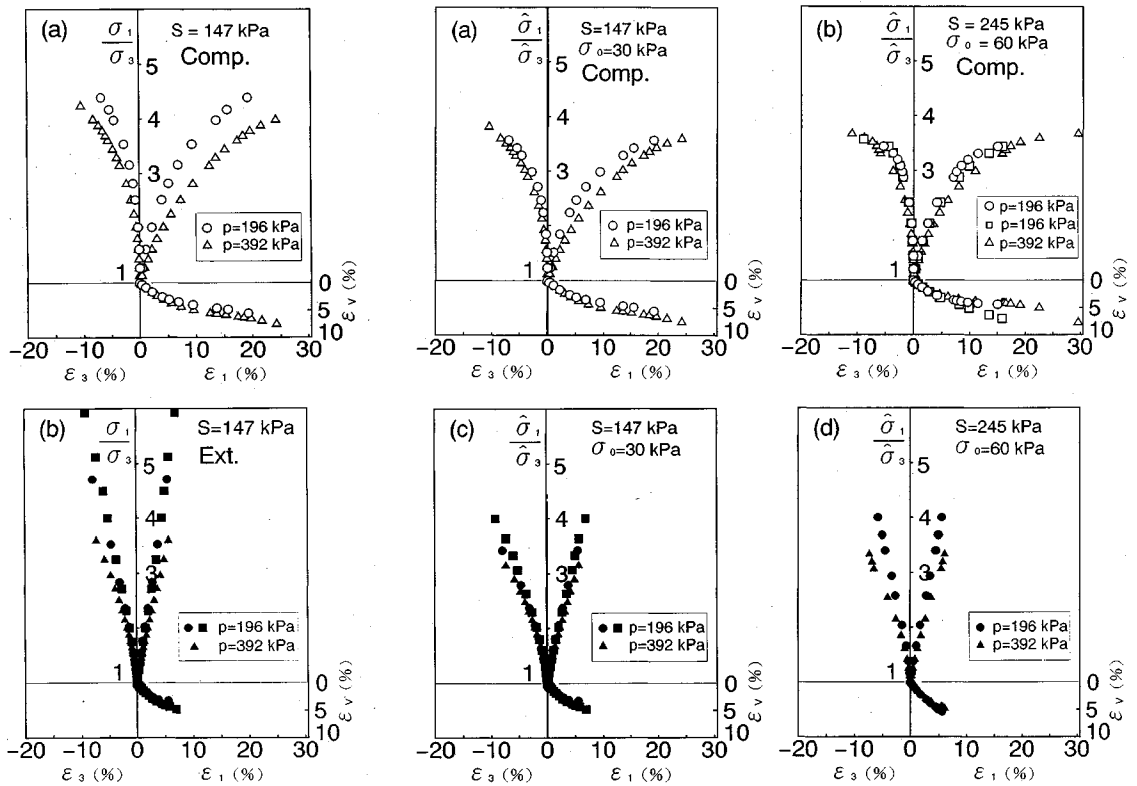


図-16 $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1, \epsilon_3 \sim \epsilon_v$ 関係

図-17 $\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_3 \sim \epsilon_1, \epsilon_3 \sim \epsilon_v$ 関係

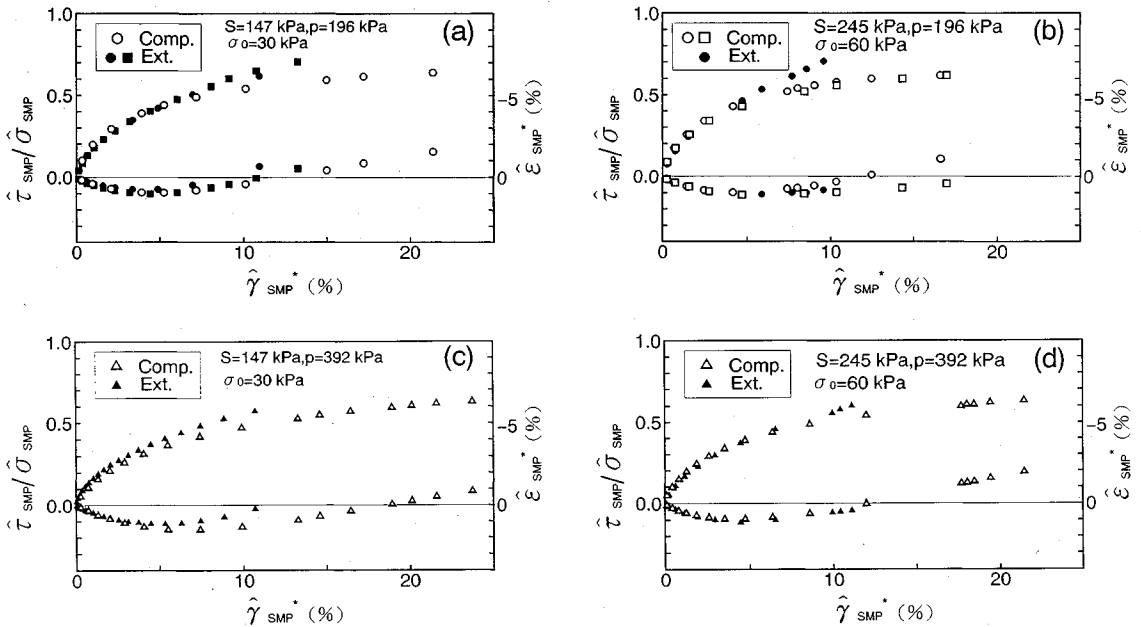


図-18 $\tau_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^* \sim \hat{\epsilon}_{SMP}^*$ 関係

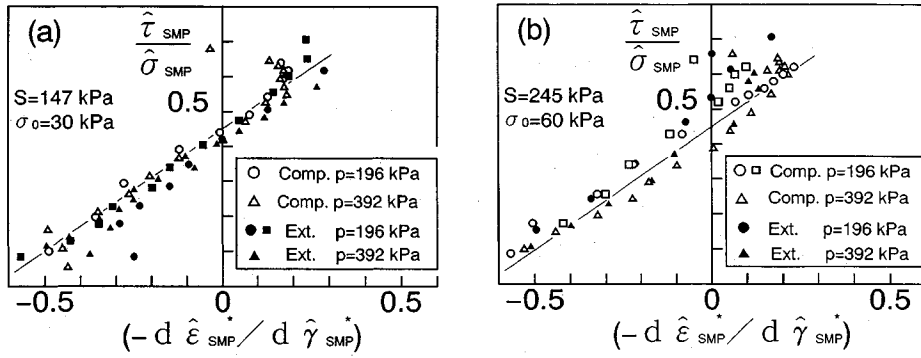


図-19 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim (-d\hat{\epsilon}_{SMP}^*/d\hat{\gamma}_{SMP}^*)$ 関係

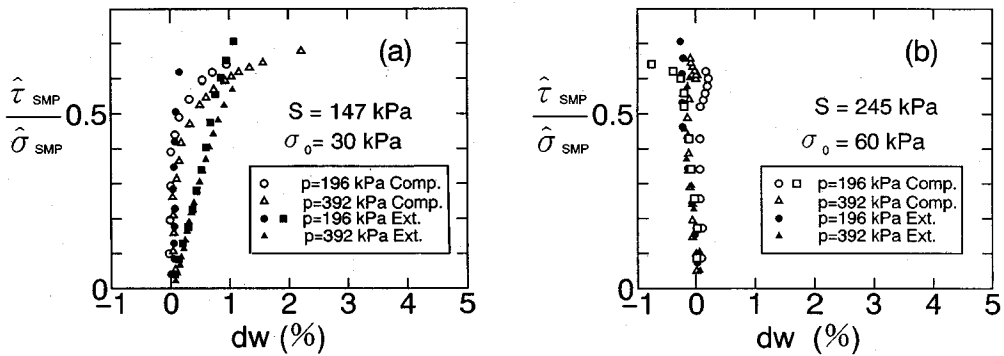


図-20 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim$ 含水比変化関係

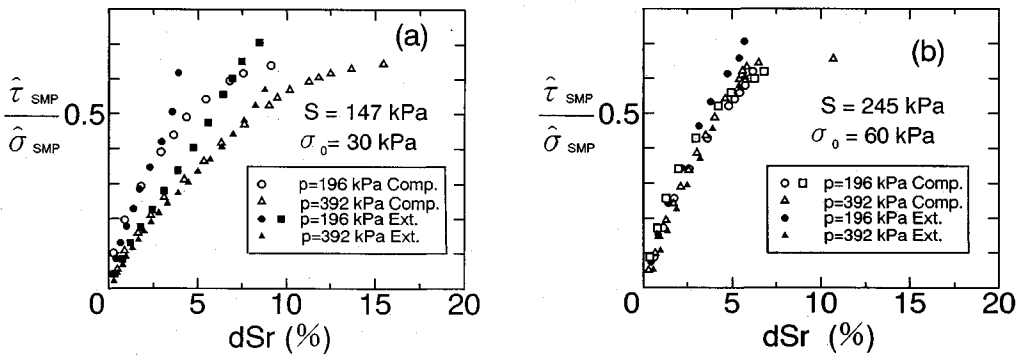


図-21 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim$ 飽和度変化関係

いての $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1$, $\epsilon_3 \sim \epsilon_v$ 関係を整理したもので、(a) は三軸圧縮せん断 (Comp.; $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 時の、(b) は三軸伸張せん断 (Ext.; $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) 時の結果を示している。図-17 (a), (b) は三軸圧縮せん断時の、(c), (d) は三軸伸張せん断時の $\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_3 \sim \epsilon_1$, $\epsilon_3 \sim \epsilon_v$ 関係の整理を示している。図-16 (a) と図-17 (a) および図-16 (b) と図-17 (c) をそれぞれ比較すると、 $\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_3$ に基づく整理結果では、せん断時の有効拘束圧の大きさの影響が小さくなる傾向を示している。また、試験中の体積は三軸圧縮、三軸伸張試験ともに圧縮している。図-18 (a), (b), (c), (d) は拡張 SMP に基づく $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP}^*$

$\sim \hat{\epsilon}_{SMP}^*$ 関係を試験条件ごとに整理した結果を示している。応力比 $\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP}$ が大きくなると三軸伸張試験の $\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の方が三軸圧縮試験時のものより小さくなる傾向が見られるが、概ね飽和土に対する従来の SMP 理論と同様、せん断時の応力状態にかかわらず結果がほぼユニークに整理される。図-19 (a), (b) は拡張 SMP に基づく $(\hat{\tau}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP}) \sim (-d\hat{\epsilon}_{SMP}^*/d\hat{\gamma}_{SMP}^*)$ 関係をサクションごとに示したものである。図中のプロットは実験結果を、実線は傾き $\lambda^* = 0.7$, 縦切片 $e^* = 0.45$ の直線を示している。実験結果は直線付近に分布しており、従来の SMP 理論と同様なユニークな関係が得られるよう

ある。図—20 (a), (b) はせん断時の $\bar{\tau}_{SMP}/\bar{\sigma}_{SMP}$ ~ 含水比変化関係を示している。(a) の $S=147$ kPa の場合は、せん断中の体積が圧縮しているにもかかわらず $\bar{\tau}_{SMP}/\bar{\sigma}_{SMP}$ が大きくなると吸水する傾向を示している。一方、 $S=245$ kPa の場合は圧縮・伸張試験ともに $\bar{\tau}_{SMP}/\bar{\sigma}_{SMP}$ が大きくなるとわずかに排水しているのがわかる。このような挙動は、土粒子の移動により生じる粒子接点でのメニスカス形成に必要な水量が影響しているものと推察される。すなわち、前述のようにサクションが小さいとメニスカス形成に必要な水量が大きいため吸水し、サクションが大きいとメニスカス形成に必要な水量が小さいため、全体の体積圧縮により排水するのであろう。図—21 (a), (b) はせん断時の $\bar{\tau}_{SMP}/\bar{\sigma}_{SMP}$ ~ 飽和度変化関係を示したものである。(a) 図の $S=147$ kPa のときには、 $p=196$ kPa の *Ext.* のデータ (黒四角印) を除いて、 $p=196$ kPa の *Comp.* (白丸印) と *Ext.* (黒丸印)、および $p=392$ kPa の *Comp.* (白三角印) と *Ext.* (黒三角印) のプロットが近づく傾向を示している。また、(b) 図の $S=245$ kPa のときは、*Comp.*, *Ext.* にかかわらず、また p の値にかかわらず、すべてのプロットがほぼ同一の線上に集まる傾向を示しており、興味深い。

4. まとめ

締固めたカオリン粘土供試体を用いて、サクションおよび平均有効主応力一定の三軸圧縮・三軸伸張せん断試験を行った。その結果、せん断時の変形挙動を拡張SMPに基づいて整理すれば、従来のSMP理論と同様せん断時の応力状態にかかわらずほぼユニークに整理されることが検証された。つまり、拡張SMPを用いればせん断時の不飽和土の変形挙動を予測することが可能であると考えられる。このことは、 c , ϕ 材料であるセメント混合砂の実験結果⁷⁾と同様である。また、せん断時の吸排水挙動および飽和度変化はサクションおよび応力状態により異なる傾向を示した。これは、土粒子の移動とそれともなう粒子接点でのメニスカスの形成が影響しているものと考えられる。本研究の実験条件が三軸圧縮・三軸伸張条件のみであるため、以上のことは相異なる三主応力下に対しても確かめる必要がある。また、不飽和土に特有なコラプス挙動を含めたサクションが変化する場合については今後の検討が必要であろう。

謝辞 本論文について御指導頂いた神戸大学 軽部 大蔵教授に深く感謝致します。また、実験に協力頂いた本学卒業生の伊沢 開次郎氏 (現 (株) フジタ)、上田 直稔氏 (現 (株) ハザマ)、川田 善久氏、滝脇 泰将氏、解

析に協力頂いた孫 徳安氏 (現名古屋工業大学大学院生)、および日頃御助言頂いている名古屋工業大学 中井 照夫教授に感謝致します。

参考文献

- 1) Bishop, A.W. et al.: Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils, Proceedings of Conference of Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, Colorado, pp.503~532, 1960.
- 2) Coleman, D.J.: Correspondence, Geotechnique, Vol.12, No.4, pp.348~350, 1962.
- 3) Fredlund, D.G.: Stress state variables for unsaturated soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No.GT5, pp.447~466, 1977.
- 4) 軽部大蔵ほか: 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, 第406号, III-11, pp.205~212, 1989.
- 5) Alonso, E.E. et al.: A constitutive model for partly saturated soils, Geotechnique, Vol.40, No.3, pp.405~430, 1990.
- 6) Matsuoka, H. et al.: A general failure criterion and stress-strain relation for granular materials to metals, S. & F., Vol.30, No.2, pp.119~127, 1990.
- 7) Matsuoka, H. and Sun, D.A.: A constitutive law covering granular materials to metals, Proc. of 9th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Bangkok, Vol.1, pp.55~58, 1991.
- 8) 軽部大蔵・加藤正司・勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, 第370号, III-5, pp.179~188, 1986.
- 9) Matsuoka, H. and Nakai, T.: Relationship among Mohr-Coulomb and Matsuoka-Nakai failure criteria, S. & F., Vol.25, No.4, pp.123~128, 1985.
- 10) 中井照夫: 土の変形特性と地盤の変形解析への適用に関する研究, 京都大学学位論文, p.16, 1980.
- 11) Sokolovskii, V.V.: Statics of Granular Media, Pergamon Press, p.2, 1965.
- 12) 橋口公一: 硬, 軟化特性を考慮した土の構成方程式, 東京工業大学学位論文, pp.179~184, 1975.
- 13) Ohmaki, S.: Strength and deformation characteristics of overconsolidated cohesive soil, 3rd Int. Conf. on Numerical Method in Geomech., Aachen, pp.465~474, 1979.
- 14) 軽部大蔵: ビショップの有効応力を含む不飽和土の応力・ひずみ式, 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.137~144, 1991.
- 15) Karube, D. and Kato, S.: An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil, Proc. of 13th I.C.S.M.F.E., New Delhi, 1994.
- 16) Blight, G.E.: Effective stress evaluation for unsaturated soil, Proc. A.S.C.E., No.SM2, Vol.93, pp.125~148.

(1993.6.30 受付)

ANALYSIS OF SHEAR DEFORMATION BEHAVIOR OF UNSATURATED SOIL UNDER AXISYMMETRIC STRESS STATES

Shoji KATO and Hajime MATSUOKA

This paper presents the results of triaxial compression and extension tests on compacted Kaolin clays under two kinds of constant confining pressures and suction. The test results are uniquely arranged on "Extended Spatially Mobilized Plane (Extended SMP)" with a parameter of $\sigma_0 (=c \cdot \cot\phi)$. These are the same results when the test results of sands and normally consolidated clays are arranged on the original SMP. And it is concluded from these results that the concept of "Extended SMP" can be applied to the shear behavior of unsaturated soil with constant suction under axisymmetric stress states. The applicability of this concept is the same to the other frictional and cohesive materials like cemented sands and overconsolidated clays.
