

不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF
AN UNSATURATED SOIL

軽部大蔵* 点村康造**・森田 登***・岩崎哲雄****
By Daizo KARUBE, Kouzo NAMURA, Noboru MORITA
and Tetsuo IWASAKI

1. まえがき

土は通常、固相、液相、気相の三相からなるが、わが国においては湿潤な気候のために自然地盤は水で飽和している場合が多い。しかし、盛土や地下水位以上の地盤など実際に土木工事の対象となる土は不飽和状態にあることも少なくない。不飽和土のひずみや強度は全応力 σ 、間隙水圧 U_w のみならず間隙空気圧 U_a にも支配されている。間隙空気圧と間隙水圧の差 ($U_a - U_w$) をサクシオンといい、これが不飽和土の挙動に大きな影響を及ぼしているのである。

テルツァギーが飽和土に対する有効応力原理を確立して以来、土を扱う技術者にとって、有効応力式は貴重な公式となった。その後、この有効応力原理を不飽和土にまで拡張しようとする研究がなされてきた。1960 年の国際会議において、不飽和土の有効応力式が確立されたかに見えたが、その後の研究によれば、この式は不飽和土のすべての挙動を説明できるものでないことが明らかとなった。

現在、不飽和土の力学的性質の研究は、いきづまりの状態にあるように思われる。そのため、著者らはもう一度原点に立ちもどり、不飽和土を骨格構造レベル・粒子間レベルの視野より見なおすこととした。 $(\sigma - U_a)$ とサクシオン ($U_a - U_w$) を独立な応力成分と考え、サクシオンを表わす球状モデルを提起し、サクシオンと他の要因との理論曲線を求めた。また、これまでの研究は圧密またはせん断の一方に注目していたが、本研究においては圧密とせん断の両現象を一連の現象ととらえ、サクシオンの挙動を構造レベル・粒子間レベルで分離説明するため、一連の実験を行った。

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 不動建設(株)中央研究所

*** 正会員 工修 日本道路公団福岡管理局

**** 神戸大学大学院工学研究科

2. 従来の研究

Bishop & Blight (1963) は、締固めた不飽和土に対して三軸圧縮試験を行った。図-1(a)の④は、飽和土に対して一般に使用する目の粗いポーラスストーンを使用して間隙圧を測定し、有効応力式としてはテルツァギーの式、

$$\sigma' = \sigma - U_w \dots (1)$$

を使用してモールの破壊包絡線を求めたものである。図-1(b)の⑤はポーラスストーンを目の細かい親水性の材質に変え、間隙圧を水圧と空気圧とに分離して測定し、有効応力式としては、次の式を使用して包絡線を求めたものである。

$$\sigma' = \sigma - U_a \dots (2)$$

図の包絡線④、⑤が近接していることから、飽和土用の粗いポーラスストーンを使用して測定した間隙圧は間隙水圧 U_w ではなく、間隙空気圧 U_a であることがわかる。一方、図-2は分離測定された水圧をテルツァギーの有効応力式(1)に代入して求めた破壊包絡線である。図のように、粘着力は負となってしまう、不飽和土ではこの有効応力式は成り立たないことがわかる。

前述のように、不飽和土の特徴は、土塊が土粒子・水・空気三相より成り立っており、空隙における空気と水は、表面張力により異なる圧力で平衡状態にあることである。この空気と水をどのように表わすかにより、

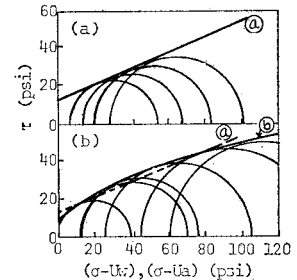


図-1 間隙圧と破壊線の関係
(Bishopら: 1963)

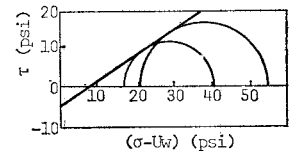


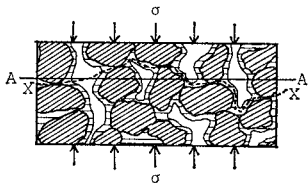
図-2 テルツァギーの有効
応力による表示

多くの研究者が多くの有効応力方式を提案したが、1960年の時点においてはビショップの式(3)が一般的であるとされた(1960年, International Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworth, London)：

$$\sigma' = (\sigma - U_a) + \chi(U_a - U_w) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- σ' : 有効応力 σ : 全応力
- U_a : 間隙空気圧 U_w : 間隙水圧
- χ : 飽和度, 土のタイプ, 応力径路などに関する係数



- 全面積: A
- 土粒子接触面積: #A
- 空気と水のしめる面積: A - #A
- 空気と水のうちの: $\chi(A - \#A)$
- 水のしめる面積: $(1 - \chi)(A - \#A)$
- 空気と水のしめる面積

図-3 不飽和土内の力のつり合い

式(3)は、土粒子で構成された骨格と、水と空気とで満たされた間隙から成る土塊におけるつり合い方程式より導かれる。すなわち、図-3の土粒子接点ばかりを通る断面 X-X を通じて働く力の σ 方向のつり合い方程式は、

$$\sigma = \sigma' + (1 - k)\{\chi(U_w - U_a) + U_a\} \dots\dots\dots(4)$$

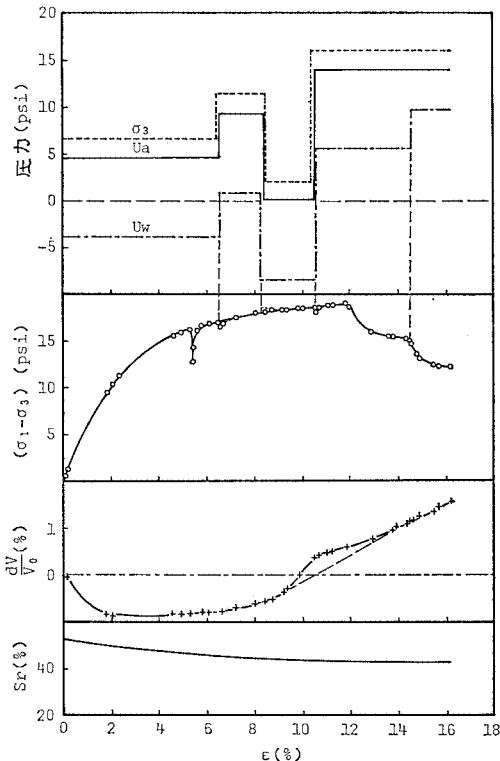


図-4 ビショップの有効応力一定試験

ここで $k=0$ とすると、ビショップの有効応力式(3)となり、 $\chi=1$ とするとテルツァギーの有効応力式(1)となる。

Bishop & Donald (1961) は、不飽和土の排水三軸圧縮試験を行い、図-4に示すように側圧 σ_3 、間隙水圧 U_w 、間隙空気圧 U_a を試験中 $(\sigma_3 - U_a)$ と $(U_a - U_w)$ が一定となるように変化させても、応力~ひずみ曲線はなんら影響を受けないこと、逆に $(\sigma_3 - U_a)$ または $(U_a - U_w)$ の一方だけの变化は、応力~ひずみ曲線に著しい影響があらわれることを見出した。このことより彼らは式(3)の形が正しく、土の挙動は σ 、 U_w 、 U_a の独立した値には無関係であると主張した。また、 χ の値についても、不飽和土において有効応力原理を暗黙のうちに仮定しながら、せん断については飽和土のせん断試験との比較より、圧密については圧密試験の結果よりそれぞれ求め、両者に著しい差がないとした。

これに対して Jennings & Burland (1962) は以下のように述べている。すなわち、有効応力原理の正当性を立証するには土の挙動が $(\sigma - U_a)$ と $\chi(U_a - U_w)$ との和 (σ') が一定となるように $(\sigma - U_a)$ と $\chi(U_a - U_w)$ とを変化させても応力~ひずみ曲線に影響を受けないことを示す必要がある。しかし、これは不可能なことである。なぜならば、 χ の値は有効応力原理を仮定してはじめて求まるからである。

また、 χ を求める際、外部応力による飽和土の有効応力とサクシオン $(U_a - U_w)$ の荷重されている一すなわち内部応力のある一不飽和土の有効応力とを直接的に比較しようかという問題も提起している。

さらに、不飽和土を水浸させた場合、ビショップの式(3)ではサクシオンの解放に伴い有効応力が減少し体積膨張するはずであるが、実際には図-5に示すように著しい体積減少を生じる場合がある。このコラプスとよばれる体積減少は、式(3)では説明できないのである。コラプスはサクシオンに起因したものである。図-6に

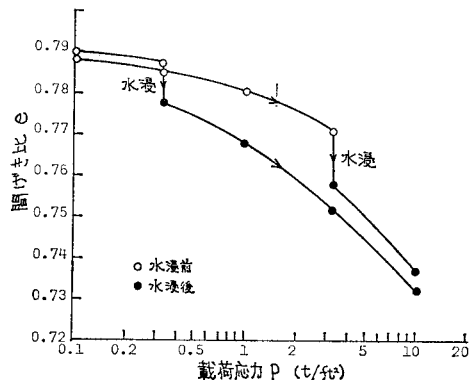


図-5 コラプス現象 (Jenningsら: 1962)

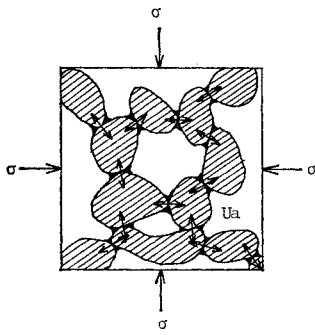


図-6 サクションによる粒子間力

示すようにサクシオンは粒子接点の高い曲率のメニスカスから生じ、単に粒子接点に垂直力だけを引き起こして粒子間の相対的な安定性を増加させ、外部の載荷応力によるせん断力に抵抗を示す。一方、外部載荷応力は、それが仮りに土塊全体

として見ると等方応力であっても、個々の粒子接点においてはせん断力と垂直力の両方を発生させる。そのため、不飽和土が載荷状態で水浸されるとサクシオンの消失とともに粒子間内力は取り除かれ、土は外部応力と平衡すべくコラプスするのである。以上のことより、ビショップの有効応力式 (3) は等価粒子間応力と表現されるべきであり、 $(\sigma-U_a)$ と (U_a-U_w) の2つの要素はくっつけてひとつにするよりは分けて取り扱うべきであると提案している。

Coleman (1962) は軸対称応力状態の式として、 $(d\sigma_m - dU_a)$ 、 $(dU_a - dU_w)$ 、 $(d\sigma_1 - d\sigma_3)$ を独立変数とした式 (5) を提案した。

$$-\frac{dV_w}{V} = C_{11}(dU_a - dU_w) + C_{12}(d\sigma_m - dU_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots\dots\dots(5 \cdot a)$$

$$-\frac{dV}{V} = C_{21}(dU_a - dU_w) + C_{22}(d\sigma_m - dU_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots\dots\dots(5 \cdot b)$$

$$-(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) = C_{31}(dU_a - dU_w) + C_{32}(d\sigma_m - dU_a) + C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots\dots\dots(5 \cdot c)$$

ここで、

V : 土要素のその時点での体積

V_w : 土に含まれる水の体積

ε_1 : 軸方向自然ひずみ

ε_3 : 横方向自然ひずみ

σ_m : 平均主応力

σ_1 : 最大主応力 σ_3 : 最小主応力

U_w : 間隙水圧 U_a : 間隙空気圧

$C_{ij} (i=1, 2, 3, j=1, 2, 3)$: 土の応力履歴とその時点での応力に関する係数

また、Barden & Sides (1969) はスカラー量に基づき一次元圧縮状態の式として式 (6) を提案した。そして、 $d(\sigma-U_a)$ および $d(U_a-U_w)$ が増加する方向における式 (6) の正当性を実験的に確かめている。

$$-\frac{dV}{V} = C_1 d(\sigma-U_a) + C_2 d(U_a-U_w) \dots\dots(6)$$

式 (5), (6) は、3つの応力成分によるひずみに重ね合わせが成立するという仮定をあらわしている。しかし、現在のところ係数の性質は何も明らかにされていない。

わが国における不飽和土の研究を見ると、間隙空気圧と間隙水圧を分離測定したのは、柴田・安田 (1964)、川上・峰村 (1968) らが最初であり、その後は川上らによる研究が続けられている。今後とも不飽和土に関する多くのデータの蓄積が必要である。

3. サクションと含水比

(1) 不飽和土の接点モデル

不飽和状態の土が従来の飽和状態の土と最も異なるのは、土塊内に気水境界面を持つことである。気水境界面の存在がサクシオンの存在につながっているのであるが、この間の事情を考えるために、接点の2粒子モデルを考える (図-7)。従来、足立・日比谷 (1975) がこれと似たモデルについて考察を行ったが、このモデルでは含水比が現実の値とかけはなれるため、著者らのモデルでは粒子の周囲に拘束水膜を考えた。また、土粒子は直接に接しているのではなく、土粒子の持つ拘束水を間に介して接しており、それに対して自由水のメニスカスが存在しているとした。

単純化と将来の骨格構造への組み立てを考え、以下球状粒子の中心間の円柱形部分について考えていくことにする。拘束水を導入することにより考えている部分の体積は、図-8 のように変化する。まず、サクシオンによ

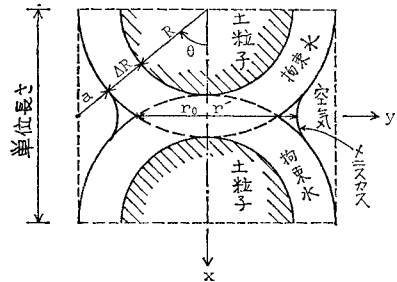


図-7 2粒子モデル

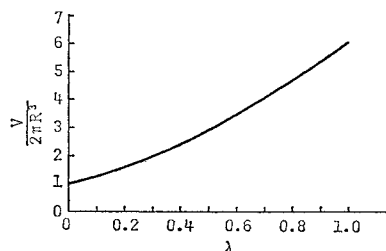


図-8 拘束水膜厚さ λ とモデルの体積

り生じる粒子間力 F を求めるために、図-7 の y 軸を含み x 軸に垂直な断面つまり接平面上の力のつり合いを考える。ここで、

$$S = (U_a - U_w) \dots \dots \dots (7)$$

T : 表面張力

とすると、

$$F = 2\pi r' T + \pi r'^2 S \dots \dots \dots (8)$$

次に、気水境界面での力のつりあいは、

$$S = T(1/a - 1/r') \dots \dots \dots (9)$$

a, r' を $\lambda (= \Delta R/R)$, θ で表わし、 $Q = S \cdot R/T$ とお

て式 (9) を変形すれば、

$$\sin \theta = \frac{\left\{ \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) - (1 + \lambda) \cos \theta \right\}}{\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) \left[\{1 + Q(1 + \lambda)\} \right]} \times \frac{\left[\{2 + Q(1 + \lambda)\} \cos \theta - \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) Q \right]}{\cos \theta - Q \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)} \dots \dots \dots (10)$$

これらを式 (8) に代入すると、 F が次式のように求まる。

$$\begin{aligned} \frac{F}{R^2} = & \frac{2\pi(T/R) \left\{ \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) - (1 + \lambda) \cos \theta \right\}}{\{1 + Q(1 + \lambda)\} \cos \theta - Q \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)} + \pi S \left[\left\{ Q(1 + \lambda) \left(\frac{\lambda^2}{2} - \lambda + 2 \right) + \left(\frac{\lambda^2}{2} + 2 \right) \right\} (1 + \lambda) \cos^2 \theta \right. \\ & + \left\{ \left(\frac{\lambda^2}{2} + 5\lambda + 2 \right) + Q\lambda(1 + \lambda) \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) \left(\frac{\lambda}{2} + 6 \right) \right\} \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta - Q \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) (\lambda^2 + 4\lambda + 2) \left. \right] \\ & + \left[3\{1 + Q(1 + \lambda)\} \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta - \{2 + Q(1 + \lambda)\} (1 + \lambda) \cos^2 \theta - 2Q \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \right] \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

また、含水比 w , 飽和度 S_r は次のように求まる。

$$w = \frac{3 \left\{ (1 - \cos \theta) + \frac{\lambda}{2} (1 - 2 \cos \theta) \right\}^2 \left\{ 1 - \tan \theta \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right\} \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) + \frac{3}{2} \left(4\lambda + \frac{7}{2} \lambda^2 + \frac{11}{12} \lambda^3 \right) \cos^2 \theta}{2 G_s \cos^2 \theta} \dots \dots \dots (12)$$

$$S_r = \frac{\left\{ (1 - \cos \theta) + \frac{\lambda}{2} (1 - 2 \cos \theta) \right\}^2 \left\{ 1 - \tan \theta \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right\} (2 + \lambda) + \left(4\lambda + \frac{7}{2} \lambda^2 + \frac{11}{12} \lambda^3 \right)}{\frac{2}{3} + 5\lambda + 4\lambda^2 + \lambda^3} \dots \dots \dots (13)$$

また、接平面における全面積と水面積との比 f は、

$$f = \frac{\pi r'^2}{\pi (R + \Delta R)^2} = \frac{2(1 - \cos \theta) + \lambda(3 + \sin \theta - 3 \cos \theta) + \frac{\lambda^2}{4} (5 + 3 \sin \theta - 4 \cos \theta)}{(1 + \sin \theta) (1 + 2\lambda + \lambda^2)} \dots \dots \dots (14)$$

以上得られた式は、式中にいずれも θ を含んでいる。したがって、式 (10) の $\sin \theta$ を $\sqrt{1 - \cos^2 \theta}$ とおいて θ を求める。求める式は、

$$\begin{aligned} & \left[Q^2 (1 + \lambda)^2 \left\{ (1 + \lambda)^2 + \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \right\} + Q(1 + \lambda) \left\{ 4(1 + \lambda)^2 + 2 \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \right\} + \left\{ \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 + 4(1 + \lambda)^2 \right\} \right] \cos^4 \theta \\ & - 2 \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) \cdot \{ Q(1 + \lambda) + 1 \} \left[Q \left\{ 2(1 + \lambda)^2 + \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \right\} + 4(1 + \lambda) \right] \cos^3 \theta \\ & + \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \left[Q^2 \left\{ 5(1 + \lambda)^2 + \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \right\} + 10Q(1 + \lambda) + 3 \right] \cos^2 \theta - 2Q \left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)^3 \{ 1 + Q(1 + \lambda) \} \cos \theta = 0 \end{aligned} \dots \dots \dots (15)$$

となる。この式より θ を求め、式 (11)~(14) に代入す

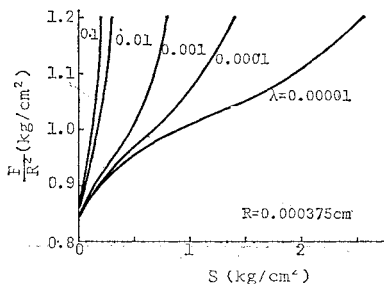


図-9 サクションと内部応力の関係

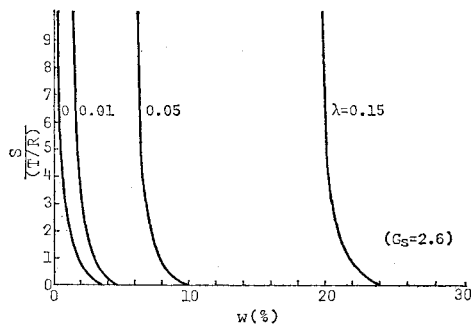


図-10 サクションと含水比の関係

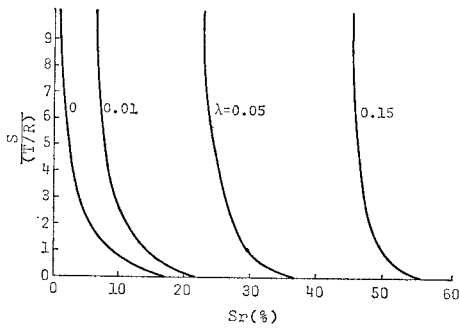


図-11 サクションと飽和度の関係

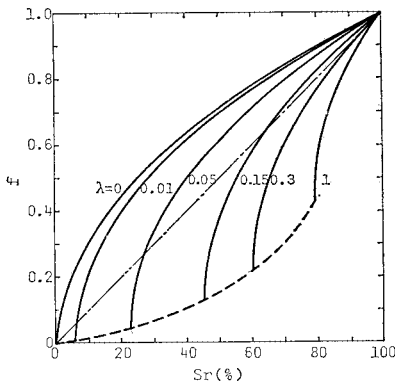


図-12 飽和度と気水断面率の関係

ると粒子間内力や飽和度などが図-9~12のように求められる。

図-8によれば、接平面に垂直な内力 F は、粒径、拘束水厚さに強く影響を受け、サクシヨンの値により複雑な変化を示している。サクシヨンの減少すると、メニスカスがふくらむため、式(8)の r' が大きくなり、結果的に内力 F があまり減少しない区間があらわれる。

また、図-9~11に示されたサクシオンと含水比あるいは飽和度の関係を見ると、これらが拘束水厚さとサクシヨンの値によって決まるものであることがわかる。

一方、ここで計算した f は、ビショップの λ に相当すると考えられるが、図-12の $f-S_r$ 曲線群が従来発表されている実験データの $\lambda-S_r$ プロットと非常に似かよっていることは、このモデルの正しさある程度示していると考えられる。

われわれが導入した拘束水の厚さというのは粒径によりおよそ規定できるものであると考えられるから、このモデルは砂から粘土まで一応網らできるものと思われる。

(2) サクシヨンの働き

モデルをはなれて、一般の土塊を考えると、ここでも土粒子接点につづみ状に発達したメニスカスに起因する

力は粒子接平面に垂直な成分が卓越していると考えられ、土の骨格構造を保持する方向の内力である。同じ内力でも、クーロン力やファン・デル・ワルス力などはいずれも粒子間距離に関係する力であって、サクシヨンの力が水のつき方による力であるとは、性質を異にする。また、土塊に作用する有効応力 $(\sigma - U_a)$ は、たとえ等方的であっても、粒子接点においては内力的せん断力をも発生する外力であり、土粒子構造をより安定な方向へすべらそうとする力である。

不飽和状態の土の水分は、大部分粒子の接点付近に存在する。したがって粒子接点レベルの構造(粒子同士的位置関係)によって水分の配置は異なるであろう。一方、接点モデルからも示されるように、サクシオンと含水比は粒径が決まれば、一義的関係があるはずである。

図-13に Bishopら(1963)および Blight(1967)の一定含水比のもとにおける圧縮試験の結果を示す。サ

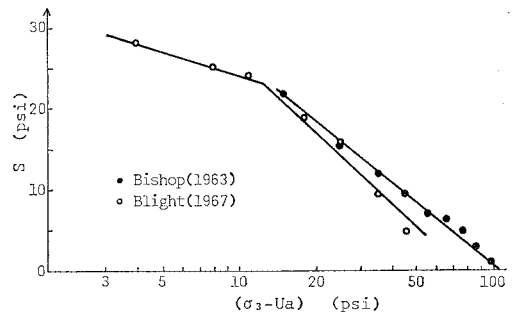


図-13 定含水比圧縮におけるサクシオン

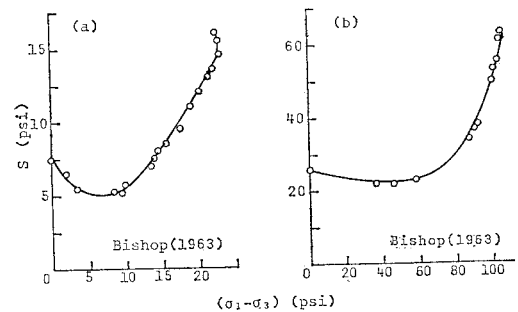


図-14 定含水比せん断におけるサクシオン

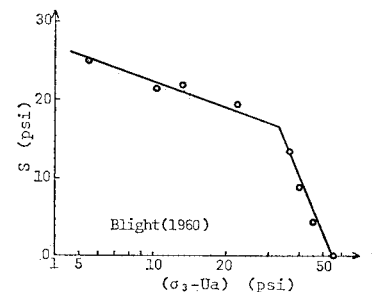


図-15 破壊時のサクシオンと拘束圧の関係

クシオンと間隙比の役割の類似性を考えると、形が飽和土の $e-\log p$ 関係とよく似ていることがわかる。図-14 に Bishop & Blight (1963) のせん断試験結果を示す。これらも同様な考え方でいけば、砂のせん断試験の際に起こるダイレイタンシーとよく似ている。Blight (1960) の実験による破壊時のサクシオンと拘束圧の図も、再プロットすれば 図-15 のような結果をうる。

以上の事項を考えあわせれば、ちょうど飽和土の非排水試験の場合のように、不飽和土の定含水比試験の場合はサクシオン変化が粒子接点レベルの構造変化を反映していると考えられる。しかも注意すべきは、サクシオンの変化は土塊全体の間隙比変化とは直接的な関係が見い出せない点である。したがって、不飽和な状態の土に特有なサクシオンというものは、土粒子間に働く内力を生み出すと同時に、粒子間レベルの構造変化をも表わすという2つの面を持つことがわかる。このように粒子間レベルの構造変化を考えれば、飽和土においてはそれほど意味を持ちえなかった含水比が、変形の独立変数となりうることを予想させ、従来あまり注目されていなかった含水比変化を測定することの重要性を認識させる。

4. 実験方法

予備的な考察によって得た不飽和土の定性的な力学的挙動を定量的にとらえ、さらに考察を進展させるために実験を行った。その成果の一部は、すでに報告している^{10),12)}。実験装置は、図-16 に略図で示した二重セル型の三軸試験機である。内セルの内部はグリセリンの50%水溶液で、外部は空気で満されている。供試体の体積変化量は、この液面の変動量からピストンの貫入分

をさし引いて求めるが、さらにゴムスリーブの貫入や内セル内の残留空気の圧縮による液面の変動を補正する必要がある。セラミックディスクは、目の細かい親水性の透水板で、あらかじめ水で飽和されているので、空気が透過しようとする、ディスクの細孔の管壁と水の間に働く表面張力でこれに対抗する。この空気の透過に対抗する最大の圧力差(空気圧-水圧)をエアーエントリーバリューという。供試体をディスクの上に直接置くと、供試体の細孔にある水とディスクのそれが連絡され、したがって、ディスクを通じて間隙水の動きが測定できる。本実験で用いたセラミックディスクは、日本化学陶業製特殊耐火物素地記号 F で、エアーエントリーバリュー、 2.0 kg/cm^2 、透水係数 $2 \sim 3 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ のものである。上部載荷板に組み込んだフィルターは撈水性のガラスフィルターで、供試体の水を吸収することなく、供試体内外の空気を連絡する働きをする。二重ビューレットは、間隙水圧 U_w を与えながら吸排水量を測定するのに用いる。

実験は、2つのシリーズから成っている。試料は両シリーズとも、表-1 に示す物性の締固め信楽陶土であ

表-1 試料の物性

	G_s	コンシステンシー (%)			粒度組成 (%)		
		W_L	W_P	I_P	砂分	シルト分	粘土分
実験 I	2.56	58.0	22.6	35.4	6.8	47.7	45.5
実験 II	2.56	44.4	22.7	21.7	8.8	54.0	37.2

表-2 実験の種類

	サクシオン (U_a, U_w)	等方圧縮 ($\sigma_m = U_a$) _{max}	せん断
			(圧 or 伸張)
実験 I	1 0 (飽和)	3	圧縮
	2 0.2 ($U_a=1.7, U_w=1.5$)	1.3	"
	3a 0.7 ($U_a=1.3, U_w=0.6$)	1.7	"
	3b 0.7 ($U_a=1.7, U_w=1.0$)	1.3	"
	4 1.2 ($U_a=1.7, U_w=0.5$)	1.3	"
	5 非排水で U_w 測定 ($U_a=1.7$)	1.3	"
	6 非排水で U_w 測定 ($U_a=1.7$)	2.3	"
	7 0 (飽和)	3	伸張
	8 0.2 ($U_a=1.7, U_w=1.5$)	1.3	"
	9 0.7 ($U_a=1.7, U_w=1.0$)	1.3	"
	10 1.2 ($U_a=1.7, U_w=0.5$)	1.3	"
11 非排水で U_w 測定 ($U_a=1.7$)	1.4	"	
実験 II	1 0 (飽和)	1	圧縮
	2 0 (飽和)	3	"
	3 0.5 ($U_a=0.5, U_w=0$)	1	"
	4 0.5 ($U_a=0.5, U_w=0$)	3	"
	5 0.5 ($U_a=0.5, U_w=0$)	4	"
	6 1.0 ($U_a=1.0, U_w=0$)	1	"
	7 1.0 ($U_a=1.0, U_w=0$)	3	"
	8 変化 (U_a 変化, $U_w=0$)*	1	"
	9 0.5 ($U_a=1.0, U_w=0.5$)	3	"
	10 0.5 ($U_a=0.5, U_w=0$)	3	伸張

(単位は kg/cm^2)

* サクシオンによる圧縮・膨張のうちサクシオン $1.0 (U_a=1.0, U_w=0)$ 一定状態で等方圧縮、せん断を行う。

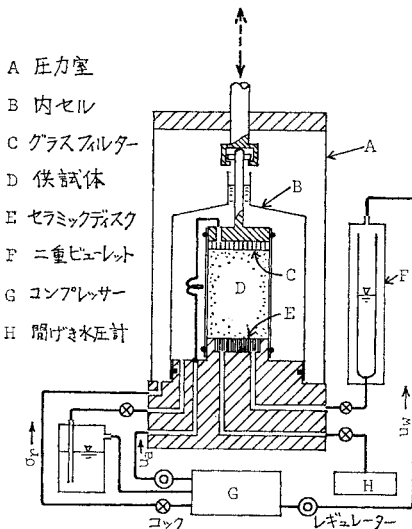


図-16 実験装置

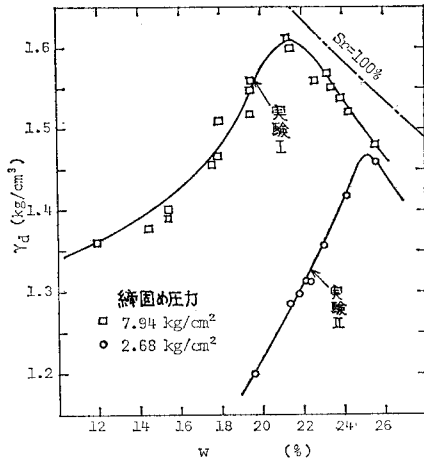


図-17 締固め曲線

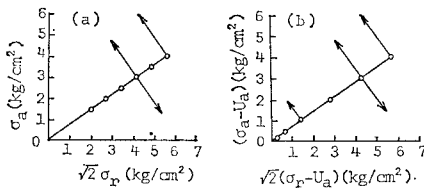


図-18 (a) 実験I, (b) 実験IIの载荷径路
(σ_a : 軸圧, σ_r : 側圧)

る。自然乾燥状態の粉末陶土に、あらかじめ予定した含水比になるまで霧吹きで水分を与え、保存した。締固めは、四つ割モールドと突き棒で行った。保存試料を5層に分けてモールドに入れ、各層15回ずつ一定圧力で締固めて、高さ8cm、直径3.5cmの供試体に成形した。

各供試体の試験条件は、表-2のとおりであり、これらの応力径路は、図-18に示すように、すべて等方圧密後、軸方向圧縮あるいは軸方向伸張破壊させた。各試験段階における試験時間は、まず供試体をセラミックディスク上に設置して、側圧0.2kg/cm²のもので非排水状態で12時間放置した。その後は、圧密過程、軸方向圧縮(伸張)過程とも1段階6時間の段階载荷を行った。ただし、破壊応力付近では、後に述べるように、ほとんどの場合ひずみ制御法に切り換えた。試験中の間隙空気圧は、外部から既知圧力として作用させたが、空気の入出力は測定していない。

両シリーズの試験方法は、細部において異なっている。まず、試料土の締固め曲線は図-17に示すとおりであるが、シリーズIでは締固め圧力を約8kg/cm²(最適含水比21.6%)とし、試料の含水比は最適含水比の約2%乾燥側とした。この条件で得られた供試体は、使用した三軸試験機の最高圧力(7kg/cm²)に比べて硬すぎるようであったので、シリーズIIでは締固め圧力を約3kg/cm²(最適含水比25.2%)に下げ、含水比は約

3%乾燥側とした。いずれにしても、両シリーズの供試体の初期飽和度は57~68%の範囲に入っている。

次に、比較のために行う飽和状態の試験に用いる供試体の作製方法は、シリーズIでは不飽和供試体を三軸試験機に設置してから、供試体底面から0.5kg/cm²の間隙水圧を作用させたが、シリーズIIではバックプレッシャーをかけず、自然吸水させた。また、破壊付近の载荷方法は、シリーズIの伸張試験では段階载荷法のままであるが、圧縮試験では毎時0.6%のひずみ制御法とした。一方、シリーズIIでは破壊応力付近はすべてひずみ制御とし、その速さは、不飽和供試体について毎時1.2%、飽和供試体について毎時0.6%とした。

測定項目としては、シリーズIの排水試験(サクション一定)において排水量を測定しなかった。実験はすべて21°C±1°Cの室内で行った。

5. 等方圧縮過程

まず、間隙比変化を検討する。サクションを一定に保ち、($\sigma_m - U_a$)を増加させた場合の例を図-19に示す。両者の関係は、いずれも急曲部を1つ持ち、その前後で直線状となる。急曲部がサクションの大きいほど右へずれているのは、サクションが構造を保持する力であることを示している。また、急曲部より応力の小さい部分では、曲線群は平行と見なし得る。したがって、サクションの変動がなければ、間隙比と载荷応力の関係は飽和土の場合と同様に取り扱えるものと考えられる。

一方、この間の含水比変化(排水量で示す)は図-20のようである。曲線はやはり屈折点を持ち、その前後ではほぼ直線と考えられる。間隙比で整理した場合と異なる点は、ほぼ平行とみなせるのが一般に正規圧密状態とされる部分であることと、過圧密状態とされる部分のカーブの傾きがサクションごとに異なり、しかもサクションが小さいものの方が含水比が変化しにくいことである。図中の鎖線は、拘束応力を($\sigma_m - U_a$)=0.2kg/cm²

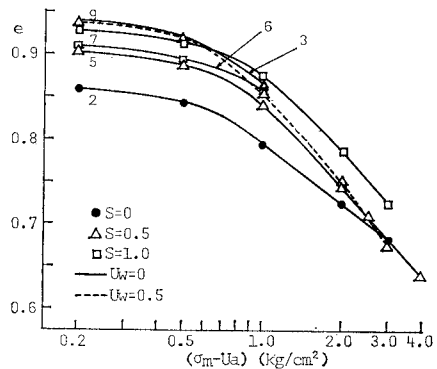


図-19 拘束圧力と間隙比(実験II)

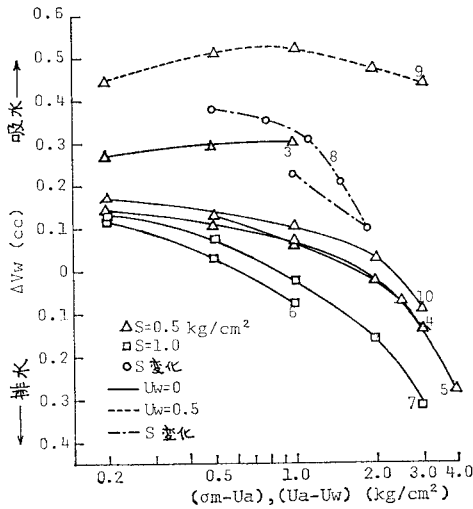


図-20 圧力と吸排水量(実験II)

の一定値に保ち、サクシオンを変化させた場合を示している(横軸目盛はサクシオンとする)。一定サクシオン下の等方圧縮の場合の傾きと、このカーブの同じサクシオンの点の傾きがほぼ一致している。また、含水比変化に及ぼすサクシオンの働きは、 $(\sigma_m - U_a)$ に比してはるかに大きく非常に弾性的であり、サクシオンが粒子レベルの変形を支配する内力の一つであることを示してい

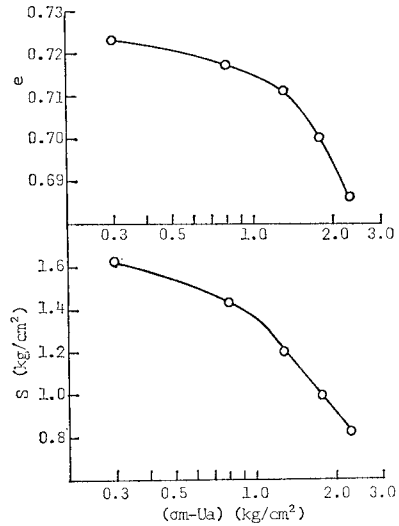


図-22 定含水比試験中の間隙比と含水比(実験I)

る。不飽和土の自由水は大部分の場合、粒子接点にメニスカスとして存在すると考えられるので、含水比変化が粒子レベルの構造を表わしていると考えられる。したがって、粘土が等方応力を受けた場合、過圧密領域では粒子レベルの構造で挙動し、正規圧密領域に入って初めて、土塊全体の骨格構造で挙動することがわかる。両領域の境界として考えられる先行圧密圧力は、S字カーブを描く間隙比-含水比プロット(図-21)から想像されるであろう。

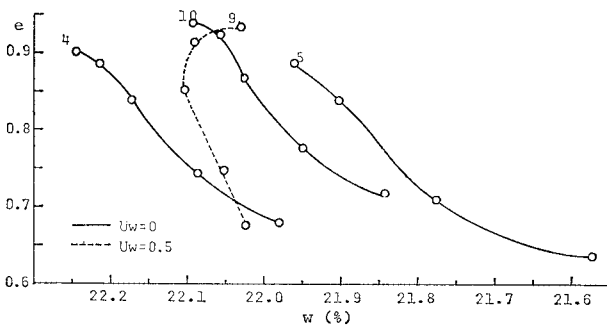


図-21 間隙比と含水比(実験II, 例)

また、供試体3, 9は、サクシオン一定の圧縮中(間隙比減少中)にもかかわらず吸水しているのは注目に値する。これらはもともと初期サクシオンが比較的高いものであり、しかも吸水時期は粒子間内力的過圧密比が大きい低応力時点である。したがって、この現象が粒子間レベルでダイレイタンスーが起っていることを示すものとするれば、圧密過程の本質はせん断現象であると考えられないこともない。

一定含水比での圧縮試験の間隙比とサクシオンの変化を 図-22 に示す。ピシヨップらの 図-13

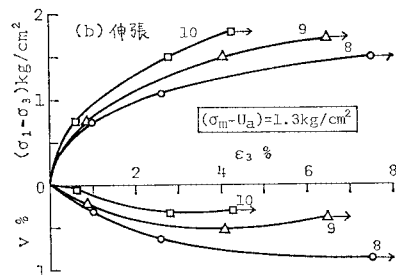
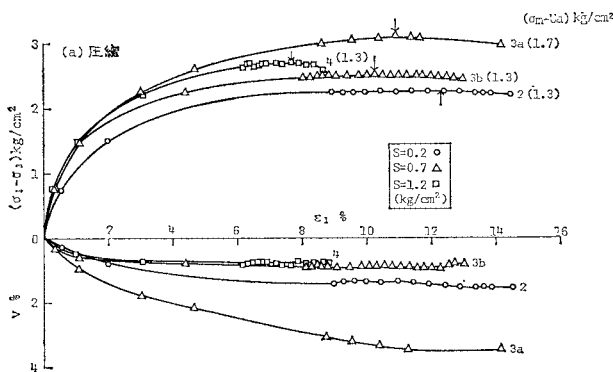


図-23 排水せん断(実験I) (a) 圧縮, (b) 伸張試験

と同様な傾向を示している。先行圧密圧力の値が間隙比とサクシオンで明らかに異なる。また、ここでも载荷応力に対する直線性は間隙比よりサクシオンの方がよく、粒子レベルの構造がより本質的であることを思わせる。

6. せん断過程

(1) 応力-ひずみ-サクシオン関係

a) 試験結果

せん断過程は前述のように、供試体に作用する平均主応力 ($\sigma_m - U_a$) を一定に保ちながら、主応力差を段階載荷法で増加させていき、破壊に近くとひずみ制御法に切り換えて破壊応力を確認する方法をとった(ただし、実験Ⅰの伸張試験は段階載荷のみ)。

試験中の応力-ひずみ関係は 図-23~25 に示すとおりである。図-23 は実験Ⅰの排水試験(サクシオン S = 一定試験)の結果、図-24 は実験Ⅱの排水試験の結果、図-25 は実験Ⅰの非排水試験(含水比 w = 一定)の結果である。

① 主応力差と主ひずみ差

図-24 (a) より、平均主応力 ($\sigma_m - U_a$) が大きいものほど、同じ主応力差に対するひずみは小さい。また、同じ平均主応力の供試体間では、サクシオンの大きいものほどひずみは小さい。

② 主応力差と体積ひずみ

図-24 (b) より、主応力差が増加すると体積ひずみは増加(収縮)する。一定の主応力差のもとにおける体積ひずみは、平均主応力が大きいものほど小さいが、破壊時の体積ひずみが平均主応力の影響を受けるかどうかは、測定値が不安定であるため明確でない。

③ 主応力差と吸排水量

図-24 (c) より、平均主応力の大きい供試体は破壊直前まで排水を続け、破壊時に吸水するが、平均主応力の小さい供試体は早くから吸水をはじめ。吸水傾向は、サクシオンの小さいものほど強い。供試体 8 のせん断条件は供試体 6 と同じであるが、圧縮過程で大きなサクシオンを受けたものである。両者を比較すれば、サクシオンの履歴はせん断中の吸水傾向を助長することがわかる。

一定サクシオンのもとでも体積収縮と含水比増加が同時に進行することがあるのは注目値する。

④ 非排水試験中のサクシオンと体積ひずみ

図-25 より、体積ひずみは軸ひずみが 5% 前後に達

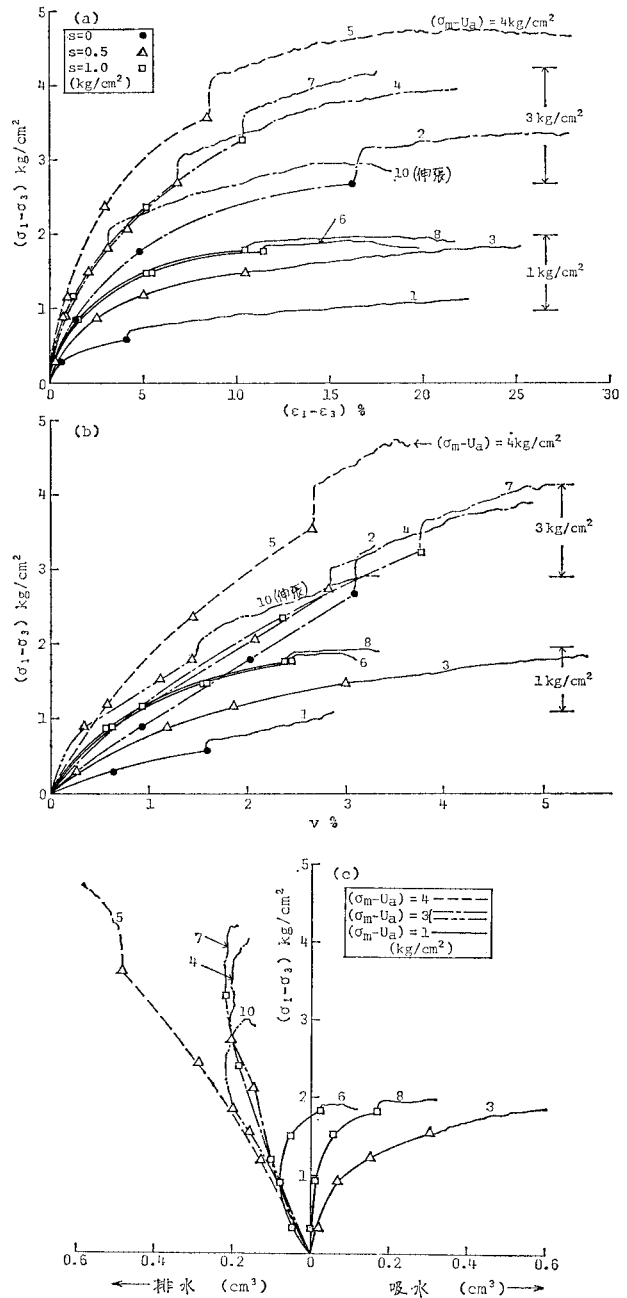


図-24 排水せん断(実験Ⅱ) (a) 主ひずみ差, (b) 体積ひずみ, (c) 吸排水量

するまでは収縮側であるが、やがて膨脹方向に向かっていく。一方、サクシオンはせん断のごく初期に低下するが、その後は増加する。このように、サクシオンが増加しはじめる時期と体積が増加しはじめる時期がずれるのは、先の排水試験中の体積ひずみと含水比変化がずれる現象と表裏をなすと思われる。

b) せん断中の土粒子の動き

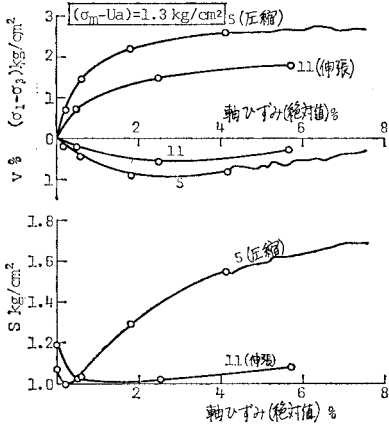


図-25 非排水せん断 (実験 I)

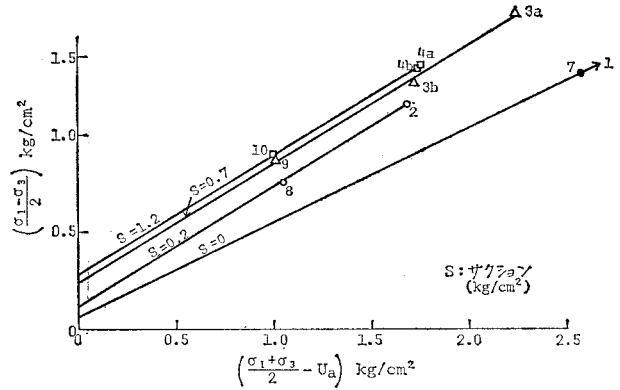


図-26 破壊応力 (実験 I)

表-3 サクシオンによるせん断強度増加 (実験 I)

S (kg/cm ²)	φ _e (°)	C _e (kg/cm ²)	Δ(σ-U _a) (kg/cm ²)	χ
0	28.7	0.086	0	—
0.2	37.6	0.101	0.105	0.53
0.7	37.6	0.303	0.367	0.52
1.2	37.6	0.379	0.466	0.39

$$\left. \begin{aligned} \phi_e &= \sin^{-1} m \\ C_e &= \frac{C^*}{\sqrt{1-m^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、φ_e、C_e はそれぞれポシュレフの有効せん断抵抗角および有効粘着力である。

式 (16) によってポシュレフの強度定数を求めた結果は表-3 に示すとおりである。有効粘着力に占めるサクシオンの寄与分は、次のようにして推定できる。まず、飽和土の有効粘着力は経験的に次式であらわされる。

$$C_e = \kappa \sigma_e \dots\dots\dots (17)$$

ここに、κ は粘着係数、σ_e は等価圧密応力である。この実験では、飽和供試体の平均主応力 (σ_m-U_a) は不飽和供試体群の約 2.3 倍、また、等価圧密応力はコラプスのために約 5.6 倍に達する。したがって、不飽和供試体群の C_e に比較するべき飽和供試体の C_e は表-3 の値の 1/4 程度 ≈ 0.02 kg/cm² と推定される。したがって、不飽和供試体群の C_e に占めるサクシオンの寄与分は表-3 の値から 0.02 kg/cm² を減じた値としてよいであろう。

せん断強さに与えるサクシオンの寄与を表現する方法の 1 つは、いうまでもなくポシュレフの有効応力式 (3) を仮定する方法である。この場合、係数 χ はサクシオンを応力成分 (σ-U_a) に換算する係数であるから、まず、換算値 Δ(σ-U_a) を次のように計算し (応力の単位は kg/cm²)、

$$\Delta(\sigma-U_a) = (C_e - 0.02) \times \cot \phi_e \dots\dots\dots (18)$$

前項で見たところをまとめると、i) サクシオンはひずみや含水比変化を抑制する方向に働く、ii) 体積ひずみの方向と含水比変化の方向、あるいはサクシオン変化の方向が一致しないことがある。i) は、サクシオンが、その時々における土の骨格構造を保持する働きを示していること、現象的にはビショッパの有効応力式を正当化している。

一方、ii) は、大きな空隙を含む骨格構造が全体として体積収縮しているときでも粒子接点付近は膨張し得ることを示している。この現象をもう少し詳しく見ると、等方圧密過程における応力 (σ_m-U_a) と体積ひずみ v の関係 (図-19) から、この試料の先行圧縮応力は 0.8 kg/cm² 程度である。ところが、図-20 より含水比 w の先行圧縮応力 (いふならば、先行サクシオン) は 2 kg/cm² 程度である。したがって、せん断中の (σ_m-U_a) が 2 つの先行応力、0.8 kg/cm² と 2 kg/cm² の間にあれば、両者が逆の動きを示しても不思議はない。いずれにせよ、飽和土の力学試験の場合は体積ひずみは 1 成分しか測定できないが、不飽和土の場合は 2 成分が測定されるので、せん断中の土粒子の動きをより微視的に推定できるであろう。飽和土においても膨張と収縮が同時に進行しているのではあるまいか。

(2) せん断強さ

図-26 は実験 I の破壊応力を示している。等しいサクシオンを持つ供試体の破壊点を通る直線は、飽和供試体を除いて平行となった。実験 I では締め固め圧力が大きいので、不飽和供試体群の破壊時の含水比や間隙比はあまりちらばっていないから、有効応力を (σ-U_a) と仮定すると、図中の線群はポシュレフの破壊線と見なし得る。このことは飽和供試体についても同様である。したがって、直線の勾配を m、切片を C* とすると

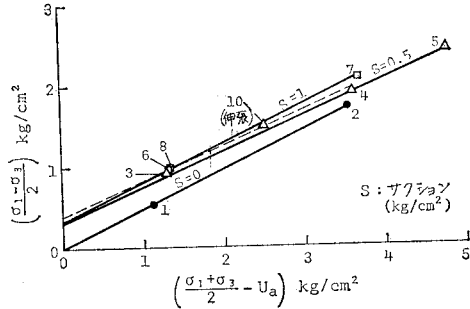


図-27 破壊応力 (実験II)

これとサクシオンとの比をとって χ とすると,

$$\chi = \frac{4(\sigma - U_a)}{U_a - U_w} = \frac{(C_e - 0.02) \times \cot \phi_e}{(U_a - U_w)} \dots (19)$$

実験IIの破壊応力は 図-27 のプロットであらわされている。実験IIでは、飽和供試体は自然吸水で得られたので、著しい体積変化を起こすことはなかった。図中の実線は、それぞれサクシオン $S=0, 0.5, 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の供試体の破壊応力(ただし、II-10を除く)を通る破壊線である。これらの実線の意味が、図-26 に示した実験Iのものとは異なる点は、実験IIでは締め固め応力が小さかったために、正規圧密粘土のように各実線上で間隙比が変動しており、これらをボシユレフの破壊線と見なせないことである。一方、図中の破線は伸張試験 II-10 を通るボシユレフの破壊線である (II-10 の間隙比は II-4 と II-3 の中間であるので、破壊線も両供試体の中間を通してある)。

実験Iでは、ほぼ同じ間隙比を持つ伸張供試体と圧縮供試体が対をなしていたので、せん断強度に及ぼすサクシオンの影響をボシユレフの理論を通じて求めることができた。しかし、実験IIはほとんどが圧縮試験であり、しかも、各サクシオンごとに引いた破壊線上で間隙比が変動しているので、ビショップが χ を逆算する時に用いた仮定——土のせん断抵抗角は飽和条件に影響されない——を用いなければサクシオンの影響を評価できない。

ビショップの仮定を用いて求められたサクシオンの換算量および換算係数 χ は表-4のとおりである。表-3および表-4を图示すると

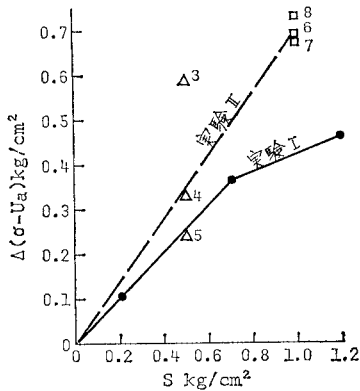


図-28 サクシオンの拘束応力への換算量

図-28 および

表-4 サクシオンによるせん断強度増加 (実験II)

No.	S (kg/cm ²)	(S _p) _f (%)	Δ(σ-U _a) (kg/cm ²)	χ
3	0.5	72.5	0.59	1.19
4	0.5	90.9	0.33	0.66
5	0.5	92.1	0.24	0.47
6	1.0	67.1	0.69	0.69
7	1.0	79.8	0.68	0.68
8	1.0	63.6	0.73	0.73

図-29 が得られる。前述のように実験IとIIで χ の計算方法が違うので、両者の比較はできない。図-29において、実験IIの χ が飽和度の増加とともに減少する傾向がうかがわれるが、これは従来の研究や

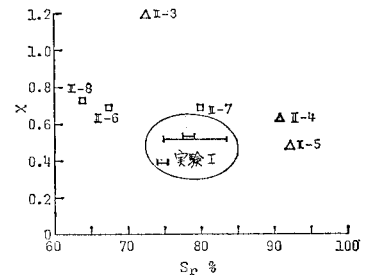


図-29 換算係数 χ と飽和度の関係

図-12 の二球モデルによる予測に反することになる。

7. ビショップの χ の適用性

ビショップが提案した有効応力式 (3) では、係数 χ が重要な役割を演ずる。ビショップは χ の物理的意味について詳しくは述べていないが、彼の不飽和土のモデル (図-3) からみて、 χ は 0 と 1 の間にあると考えられる。

このビショップの有効応力式に対する批判は、2. で紹介したように、i) χ は実験結果から仮定にもとずいて逆算される係数であり、この存在を証明できない、ii) コラプスを説明できない—このとき $\chi < 0$ となる、iii) 粒子間内力と外力は元来別物である、などである。しかし、 χ の物理的意味はさておき、不飽和土の応力—ひずみ式を得たいという立場に立てば、これらの批判とはいささか趣を異にする χ の検討がなされなければならない。そもそも、ビショップの有効応力は、図-30 の概念図に示すように、土の強度やひずみ、あるいは含水比などを応力成分 $(\sigma - U_a)$ に対してプロットするとき、不飽和状態のひずみ等が飽和状態のそれと異なるのは不飽和土内にサクシオンによる見かけの付加応力 $\Delta(\sigma - U_a)$ が働くためと考え

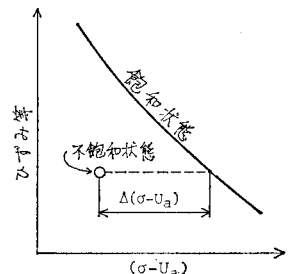


図-30 ビショップの有効応力

るものである。したがって、係数 χ の大きさや符号、あるいは実用上の価値などは、ビショップの有効応力式の本質ではなく、むしろ、ある応力 ($\sigma-U_a$) のもとにおかれた、ある土塊のすべてのひずみ (3つの主ひずみと含水比) を同一の χ で表わせるような χ の式を決定できるかどうかを批判の中心でなければならない。

このことは、ビショップの有効応力式より以前に意識されるべきであったコールマンの式 (5) を次のように変形すればいっそう明らかとなる。

$$-\frac{dV_w}{V} = C_{12} \left\{ (d\sigma_m - dU_a) + \left(\frac{C_{11}}{C_{12}} \right) (dU_a - dU_w) \right\} + C_{13} (d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots (20 \cdot a)$$

$$-\frac{dV}{V} = C_{22} \left\{ (d\sigma_m - dU_a) + \left(\frac{C_{21}}{C_{22}} \right) (dU_a - dU_w) \right\} + C_{23} (d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots (20 \cdot b)$$

$$-(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) = C_{32} \left\{ (d\sigma_m - dU_a) + \left(\frac{C_{31}}{C_{32}} \right) (dU_a - dU_w) \right\} + C_{33} (d\sigma_1 - d\sigma_3) \dots (20 \cdot c)$$

ここに、記号は式 (5) と同じであるが、両式とも、ひずみの符号は膨張を正としている。

式 (20) の { } 内はビショップの有効応力式と同じ形をしているから、もし係数の間に次の式、

$$\left(\frac{C_{11}}{C_{12}} \right) \equiv \left(\frac{C_{21}}{C_{22}} \right) \equiv \left(\frac{C_{31}}{C_{32}} \right) \dots (21)$$

が成立すれば、これらを χ とおくことができる。というよりも、不飽和土の研究が通るべき道すじとしては、はじめにコールマンの式 (5) の係数式が実験に基づいて求められ、その結果として式 (21) が成立していることがわかれば、ビショップの式 (3) へと発展するものであろう。以下に、著者らの実験結果が式 (21) を満足するかを検討するが、当初の実験計画には式 (21) の検討が入っていなかったために、これを行うのに利用できる実験個数は限られてしまい、十分な作業ができなかったことをお断りしなければならない。

(1) 等方圧縮過程

本論文の 5. に示した実験結果より、 $(\sigma_m - U_a)$ と $S = (U_a - U_w)$ を単調に増加させるときは、 C_{i1} 、 C_{i2} ($i=1, 2, 3$) とともに正値をとることは明らかである。ところが、 $(U_a - U_w)$ を減少させるとコラプスを起こすことがある。この場合は、 C_{i1} は負となる。したがって、係数 C_{i1} は応力の方向によって符号を変え、このため C_{i1} と C_{i2} の比で定義される χ も負となることがあるが、 χ の物

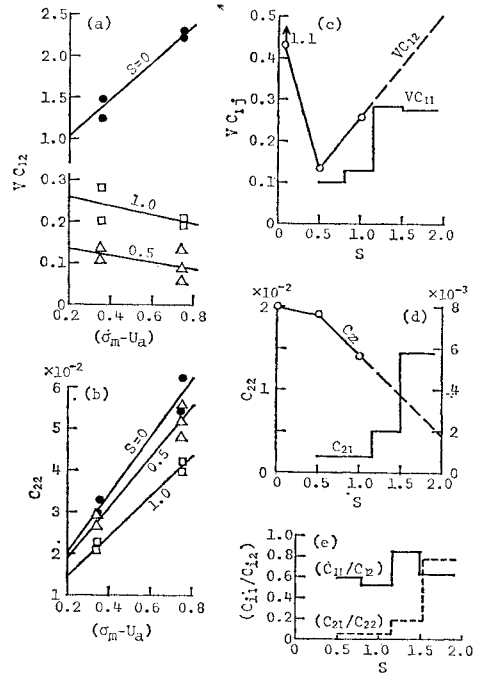


図-31 等方圧縮中の χ の検討

(a), (b) サクシヨン一定試験中の C_{i2} , (c), (d) $(\sigma_m - U_a)$ 一定試験中の C_{i1} と、 $(\sigma_m - U_a) = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ における C_{i2} , (e) 式 (20) の係数比 (図中の記号の単位は、 $(\sigma_m - U_a) : \text{kg/cm}^2$, $S = (U_a - U_w) : \text{kg/cm}^2$, $C_{ij} : (\text{kg/cm}^2)^{-1}$, $V : \text{cm}^3$)

理的意味にこだわらなければ、係数の不連続な変化は容認されてもよいであろう。飽和土の応力-ひずみ特性を抽象化する場合でも、弾塑性仮定などがなされ、係数式の不連続な変化は受け入れられているのである。

さて、実験によって χ を検討するには、まずサクシオンを一定に保ち、 $(\sigma_m - U_a)$ を変化させると、式 (20) より、

$$VC_{12} = \frac{-dV_w}{d(\sigma_m - U_a)} \dots (22 \cdot a)$$

$$C_{22} = \frac{-(dV/V)}{d(\sigma_m - U_a)} \dots (22 \cdot b)$$

図-31 (a), (b) は実験 II No. 1, 2, 4~7, 10 の測定値から求めた C_{i2} を示している。

次に、 $(\sigma_m - U_a)$ を一定に保ち、サクシオンを変化させれば、式 (20) より、

$$VC_{11} = \frac{-dV_w}{d(U_a - U_w)} \dots (23 \cdot a)$$

$$C_{21} = \frac{-(dV/V)}{d(U_a - U_w)} \dots (23 \cdot b)$$

図-31 (c), (d) は供試体 No. 8 の測定値から求めた C_{i1} を示している。ところで、 C_{i1} は実験条件により $(\sigma_m - U_a) = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ における値である。そこで、 C_{i2} も図-31 (a), (b) に示すようにわずかの区間外挿して 0.2

kg/cm²における値を求めると、図-31 (c), (d) のプロットのようになるので、サクシオンと C_{i2} の関係を図中の実線あるいは破線のように仮定しておく。このようにして求められた C_{i1} と C_{i2} の比をとると、図-31 (e) が得られる。実線は、式 (20・a) の含水比に関する係数比、破線は式 (20・b) の体積ひずみに関する係数比をあらわしている。図からわかるように、サクシオンが 1.5 kg/cm² 以下の範囲では前者は後者の 5~10 倍に達する。サクシオンが 1.5 kg/cm² を越えると、 C_{i2} が完全に外挿範囲に入るので断定はできないが、両係数比はほぼ等しくなるため、式 (21) が成立して α が定義できるように見える。不飽和土では、締固め時に土塊の外部から加えられる先行応力のほかに、内部には初期サクシオンによる、いわば先行サクシオンがあるので、式 (20・a, b) の係数比が一致する範囲は限られたものとなるものと思われる。したがって、今後、もっと大きな拘束圧とサクシオンのもとで係数比を求めるならば、図-31 (e) とは違った値が得られることも十分考えられる。

(2) せん断過程

せん断中に $(\sigma_m - U_a)$ およびサクシオンを一定に保てば、式 (20) より、

$$C_{13} = \frac{-d(V_w/V)}{d(\sigma_1 - \sigma_3)} \dots\dots\dots (24 \cdot a)$$

$$C_{23} = \frac{-d(V/V)}{d(\sigma_1 - \sigma_3)} \dots\dots\dots (24 \cdot b)$$

$$C_{33} = \frac{-d(\epsilon_1 - d\epsilon_3)}{d(\sigma_1 - \sigma_3)} \dots\dots\dots (24 \cdot c)$$

実験 I の $(\sigma_m - U_a) = 1.3 \text{ kg/cm}^2$ における 3 個の試験 (No. 2, 3b, 4) 結果から上式を用いて C_{23} , C_{33} を求めると 図-32, 33 のとおりである。ただし、 C_{13} は、実験 I では試験後含水比のほかは含水比が測定されていないので求められない。また、図中に破線で示した $(U_a - U_w) = 1.4, 1.6 \text{ kg/cm}^2$ のものは外挿である。

次に、同じく $(\sigma_m - U_a) = 1.3 \text{ kg/cm}^2$ であるが、非排水状態 (等含水比状態) で行われた試験 (No. 5) の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と $(U_a - U_w)$ の関係を 図-32, 33 に記入すると図中の点線のようになる。これより非排水試験中の C_{i3} を読みとることができる。一方、式 (20) より、

$$\left. \begin{aligned} C_{21} &= \frac{-d(V/V) - C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3)}{d(U_a - U_w)} \\ C_{31} &= \frac{-(d\epsilon_1 - d\epsilon_3) - C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3)}{d(U_a - U_w)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

が成立するから、上式の右辺に非排水試験中の諸値を代入すれば、このときの C_{i1} を計算できる。図-34 はその結果を示している。

ビショップの α が定義できるかどうかは、式 (21) の成立にかかっていた。しかし、式 (21) を計算するには少なくとも比 $C_{12} : C_{22} : C_{32}$ が与えられなければならない。これらの比は主応力差を一定とする試験から求められるはずであるが、本研究では行っていないので、これ以上実証的に議論を進めることは不可能である。ここで

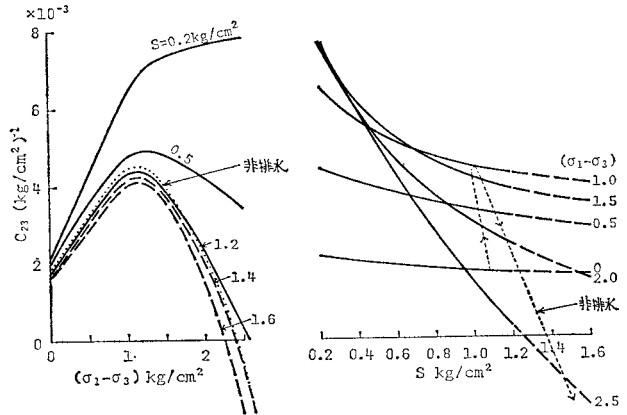


図-32 C_{23} の実験値 (実線) から非排水試験中の C_{23} (破線) を求める。

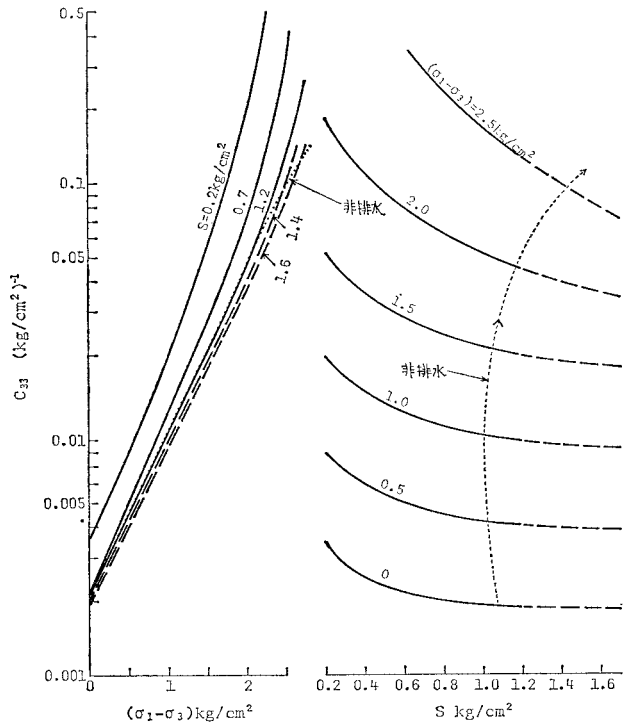


図-33 C_{33} の実験値 (実線) から非排水試験中の C_{33} (破線) を求める。

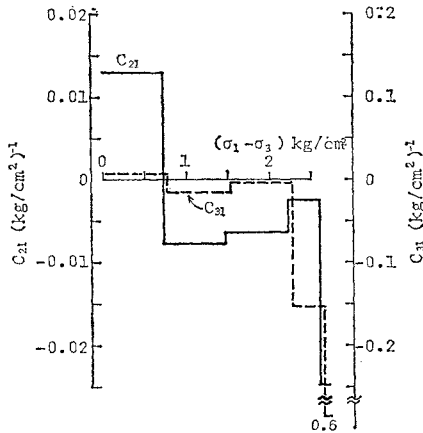


図-34 C₂₁と主応力差の関係

は、検討作業を経験しておくために、飽和土の異方圧密中のひずみ増分比に関する実験式を導入して計算を先へ進めることにする。飽和した正規圧密粘土のうちで異方圧密中に膨張を起こさないもののひずみ増分比式はいくつか提案されているが、いずれも似ているので、一例として軽部の式(軽部, 1974)を用いることにすると、

$$\left\{ \frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3}{dv} \right\}_{d\eta=0} = -\frac{1.25}{M^2} \ln \left(1 - \frac{\eta}{M} \right) \dots \dots \dots (26)$$

ここに、 $\eta = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ 、 M は η の最大値である。

式(24)にならって、一定主応力差試験中の C_{32} と C_{22} の比を次のように仮定してみる。

$$\left(\frac{C_{32}}{C_{22}} \right) = \left\{ \frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3}{dv} \right\} = a \ln \left[1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}} \right] = \frac{1}{\alpha} \dots \dots \dots (27)$$

ここに、 a は定数であり、 α はその右辺で定義されるとおりとする。したがって、

$$\frac{C_{31}}{C_{32}} = \alpha \frac{C_{31}}{C_{22}}$$

これを式(21)に代入すると、

$$C_{21} = \alpha C_{31} \dots \dots \dots (28)$$

ここに、 α は式(25)で定義されている。

結局、 α の成立は式(28)の成立にかかることになる。図-35は、 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 0 \sim 0.75 \text{ kg/cm}^2$ の間で式(28)が成立す

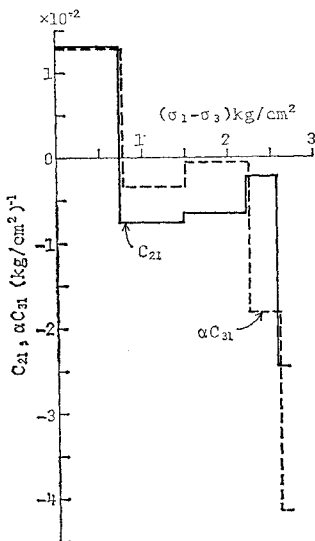


図-35 C₂₁と αC_{31} の相対的变化

るように α に含まれる定数 a を決め、その後の両辺の相対的な動きを見たものである。はたして両辺は等しいといえるか。もちろん、不飽和土では証明されていない式(27)を通じて導かれた結論であるから、厳密な判断を下すことはできないが、 α の成立は微妙なところではなからうか。

8. ま と め

不飽和土の力学的性質に関する研究の今後の方向性を探ることを目的として、主としてサクシジョンの作用について若干の理論的考察を加えながら、実験結果を述べた。論文の性格上、得られた結論は確定的なものではないが、次のようにまとめられる。

i) 不飽和土の含水比・飽和度・サクシジョン・粒子間力・ α 等の間の関係は、粒子表面に拘束水をつけた等しい大きさの2つの球状粒子の接触模型で表現しうる(図-7)。

ii) 非排水等方圧縮状態あるいは破壊状態におけるサクシジョンと「側圧-空気圧」(対数目盛)の関係は、直線関係、あるいは明確な折点を持つ2つの直線であらわされる(図-13, 15, 22)。この間、間隙比も変化するが、この変化はサクシジョンの変化には必ずしも対応しない(図-22)。

iii) 排水状態(サクシジョンを一定に保つ)における等方圧縮試験中の間隙比と「側圧-空気圧」(対数目盛)の関係は、飽和土の $e \sim \log p$ 関係と類似の形となる。先行荷重に相当する急曲部の応力は、サクシジョンが大きいほど大きい。急曲部より小さい応力範囲における曲線は、サクシジョンの大きさにかかわらず平行となる(図-19)。一方、含水比は載荷応力の増加に伴い増加する場合もある(図-20)。

iv) 非排水状態で軸方向圧縮(あるいは伸張)を行えば、サクシジョンは主応力差とともに変化するが(図-14)、この変化は必ずしも間隙比変化の方向と一致しない(図-25)。

v) 排水状態で軸方向圧縮を行えば、主応力差とともに間隙比と含水比は変化するが、両者の変化は必ずしも対応しない(図-24)。

ii)~v)を要約すれば、不飽和土の構造は、骨格を構成する土粒子の密集部分(この空隙には水がある)と、骨格にとりまかれた大きな空隙(空気がある)から成っており、したがって、サクシジョンや含水比の変化は骨格そのものの変形(隣り合う土粒子の相対変位)を直接に反映しているものと考えられる。このため、サクシジョンが「全応力-間隙空気圧」とは独立した応力成分であることはもとより、含水比も間隙比とは独立したひずみ成

分として扱う方がよいであろう。

vi) 有効応力を「全応力-空気圧」であらわしてポシュレフの破壊線を求めると、サクシジョンが大きいものほど粘着成分が大きくなる(図-26)。この関係を利用すると、ビショッポの「不飽和状態における ϕ' は飽和状態のそれと同じである」という暗黙の仮定を用いなくても α を逆算することができる。このようにして求められた α は飽和度約 80% のとき 0.5 程度であった。一方、上述のビショッポの仮定に基づいて求められた α は 1 を越えることもあり、また、一般にいわれているように飽和度の増加とともに α が大きくなる傾向は見られなかった(図-29)。

vii) サクシジョンを独立の応力成分と考える立場に立てば、不飽和土の応力~ひずみ関係の一般式はコールマンの提案式(5)であらわされる。もし、ビショッポの α が存在するとすれば、式(5)の係数間に式(21)が成立しなければならない。式(21)はビショッポの考え方とコールマンらの考え方の接点であると考えられるから、この式の成立範囲を調べることは、今後の不飽和土の研究に一つの方向を与えるであろう。しかし、この論文の実験条件は、式(21)の検討に十分でなかったもので、ここでは限られた場合についてしか計算できなかった。得られた結果は α の存在を全面的に否定するものではなかった。

この論文の実験部分は、昭和 49・50 年度に神戸大学において実施されたものであるが、実験をはじめにあって、信州大学 川上 浩教授にご指導いただいた。また、北村八郎氏(現、大阪ガス)をはじめ、当時の在学生諸氏は困難な実験にとともに取り組んでくれた。筆をお

くにあたり、感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Barden, L. and G.R. Sides. : Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, Proc. ASCE, Vol. 95, No. SM 1, pp. 33~51, 1969.
- 2) Bishop, A.W. and I.B. Donald. : The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus, Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 13~21, 1961.
- 3) Bishop, A.W. and G.E. Blight. : Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, Géotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 177~197, 1963.
- 4) Blight, G.E. : Discussion by Bishop, Proc. Pore Pressure and Suction in Soils, p. 65, Fig. 6, 1960.
- 5) Blight, G.E. : Effective Stress Evaluation for Unsaturated Soils, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM 3, pp. 125~148, 1967.
- 6) Coleman, J.D. : Stress/Strain Relations for Partly Saturated Soil, Correspondence to Géotechnique, Vol. 12, No. 4, pp. 348~350, 1962.
- 7) Jennings, J.E. and J.B. Burland. : Limitation to the Use of Effective Stress in Partly Saturated Soils, Géotechnique, Vol. 12, No. 2, pp. 125~144, 1962.
- 8) 足立・日比谷：不飽和土の変形機構に関する一考察，第 10 回土質工学研究発表会講演集，pp. 209~212, 1975.
- 9) 軽部大蔵：ヤング率とポアソン比を用いた土の応力~ヒズミ式について，第 9 回土質工学研究発表会講演集，pp. 259~262. 1974.
- 10) 軽部・苗村・北村：不飽和土の有効応力について，第 30 回土木学会年次講演会概要集，III-114, 1975.
- 11) 川上・峰村：不飽和土の有効応力について，第 23 回土木学会年次講演会概要集，III-33, 1968.
- 12) 森田・岩崎・軽部：不飽和土の有効応力について(2)，第 11 回土質工学研究発表会講演集，pp. 279~282, 1976.
- 13) 柴田・安田：不飽和土の圧縮とせん断性について，第 19 回土木学会年次講演会概要集，III-31, 1964.

(1977.5.26・受付)