

不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼす サクシヨンの影響

加藤正司¹・吉村優治²・河井克之³・寸田 亘⁴

¹正会員 博士(工学) 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 博士(工学) 岐阜工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒501-0495岐阜県本巣郡真正町)

³正会員 博士(工学) 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁴正会員 修士(工学) 京都府港湾事務所 (〒624-0945 舞鶴市宇喜多 1105-1)

一定エネルギーで締固めた、さまざまな飽和度のシルト質土供試体を用いて、サクシヨンおよび体積変化を測定した一軸圧縮試験を行った。得られた応力～ひずみ関係は初期飽和度に依存した傾向を示した。また、破壊時のサクシヨン応力～サクシヨン関係の実測値は水分特性曲線より得られる予測値に近い傾向を示した。この結果はサクシヨン～粘着力関係を一軸圧縮試験により予測できる可能性を示している。さらに、破壊時の応力状態は、破壊時のサクシヨン応力を拘束応力とした場合、Fredlund, Morgenstern & Widger により提案されている不飽和土の破壊規準に従うことが判明した。このことは、非排水状態で得られる一軸圧縮試験の強度が、排水試験に基づいて得られた破壊規準に従うことを意味している。

Key Words: *unsaturated soil, suction, unconfined compressive strength, cohesion, failure criteria*

1. はじめに

盛土を構築する場合、通常は締固め試験より得られる最大乾燥密度の90～95%程度に乾燥密度を保つように施工管理を行う。そして、締固め試験時に最大乾燥密度が得られる飽和度は通常80～90%程度であることを考えると、施工管理された盛土は80%以下の飽和度となっていることが多い。また切土を施工する場合でも、応力開放や乾燥により施工後の飽和度は低下する。よって、盛土あるいは切土に荷重が急激に載荷される場合、不飽和状態における非排水強度が問題となる。

不飽和土における非排水強度に関する研究は、現在いくつかの実験結果^{1), 2), 3)}が示されているだけで、理論的にはほとんど解明されていない。この理由としては、不飽和土の研究において現在まで、供試体に与えるサクシヨンを一定とした排水試験が中心となり研究が進められてきたことが挙げられる。そして、排水試験に基づいてFredlund, Morgenstern & Widger⁴⁾により提案されている強度理論についても、非排水条件下における適用性に関してはほとんど検討されていないのが現状である。

本研究では、一定エネルギーで締固めたシルト質

土供試体を用いて、サクシヨンおよび供試体体積変化を測定した一軸圧縮試験を行った。そして、得られた一軸圧縮強度に対して、Fredlund, Morgenstern & Widgerによる強度理論の適用性について検討した。あわせて、サクシヨン増加に伴う粘着力増分(せん断強度の増加)を一軸圧縮試験に基づき推定する方法について検討を行った。自然斜面において発生する表層崩壊などの斜面崩壊は、降雨により土の持つ粘着力が消失することが誘因の一つと考えられる。このため、あるサクシヨンのもとで不飽和状態にある土塊が発揮する粘着力を何らかの方法で知ることができれば、地盤の安定度を判断することが容易になる。そして、一軸圧縮試験のような簡便な試験方法に基づいた、サクシヨン～粘着力増分関係の推定方法が確立されることは、工学的に有益であると考えられる。

2. 既往の研究

(1) サクシヨンが飽和土の一軸圧縮強度に与える影響に関する研究

一軸圧縮試験は、非排水せん断強度を求める簡便

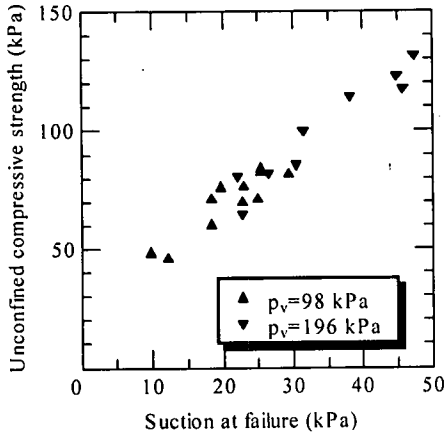


図-1 破壊時サクシオン～一軸圧縮強度関係
(文献1を修正したもの。図中の p_v は、予圧密
試料の圧密圧力を示す。)

な試験方法としてわが国において広く用いられている。しかし、試料の採取、運搬、およびその保存の際に発生する機械的乱れにより強度低下を生じるため、測定された非排水せん断強度にばらつきが生じることが知られている⁵⁾。このような機械的乱れが発生しない、完全なサンプリングがされた試料中には、負の間隙水圧(サクシオン)が有効拘束圧として作用している。一方、試料が乱れを受けた場合には、試料中の土骨格の状態が変化し、サクシオンの大きさは低下する。

しかし、低下したサクシオンは、乱れを受ける以前と同様に有効拘束圧として試料に作用している。そこで、一軸圧縮試験を行う際に試料中のサクシオン(負の間隙水圧)の大きさを測定することにより、試験時に試料に作用している有効拘束圧を知ることができる。Shogaki⁶⁾および三田地・工藤⁷⁾は、乱れの影響を受けている供試体に作用するサクシオンを測定し、有効拘束圧として応力成分に取り入れることにより、従来、乱れとして考えられていた一軸圧縮強度の低下とそのばらつきを評価する方法を提案している。

また、一軸圧縮試験を行った場合、試料のせん断変形に伴いサクシオンの大きさは変化する。もし、飽和度が高い状態において、サクシオンが常に有効応力として作用するならば、それを有効応力として取り扱うことによって、従来の有効応力に基づく強度理論と矛盾しない結果が得られることが予想される。Shimizu & Tabuchi⁸⁾は飽和シルト試料を用い、サクシオンを測定した一軸圧縮試験を行った。そし

て、サクシオンを有効応力として取り入れたことにより得られる有効応力経路における破壊点が、同じ飽和試料を用いて三軸圧縮試験を行うことにより得られる破壊線上に分布することを確認している。この結果は、高飽和度状態におけるサクシオン(負の間隙水圧)が、一軸圧縮試験時の破壊挙動に対して有効応力として作用することを確認したものである。

さらに阿部¹⁾は、採取した粘土をスラリーにして再圧密して得られた試料を用いて、さまざまな人為的乱れを与えた後にサクシオンを測定した一軸圧縮試験を行った。そして、種々の乱れは試料内に発生している初期サクシオンに影響を及ぼすが、破壊強度は軸圧縮過程で生じるサクシオンの影響を受けること、さらに、破壊時サクシオンが一軸圧縮強度に影響を与えていることを示している(図-1)。

以上に述べた研究は、飽和度が飽和状態に近い領域を対象として、一軸圧縮強度に及ぼすサクシオンの影響を取り扱ったものである。このような高飽和度領域においては、サクシオンは負の間隙水圧と同様に、有効応力として作用する。しかし、これらの研究結果を、低飽和度領域における不飽和土の挙動に対してそのまま適用することは難しい。そして、前章で取りあげた、不飽和土に対し急速載荷する問題を取り扱うには、本研究において検討されているような、低飽和度状態を含む領域においてサクシオンが非排水強度に与える影響を解明しなければならない。

(2) サクシオンが不飽和土の強度定数に与える影響

不飽和状態にある土の間隙には、水と空気が存在している。そして、水の表面張力の影響により、間隙空気圧と間隙水圧には圧力差を生じている。この圧力差はサクシオンと呼ばれ、次式で定義される。

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

ここに、 s : サクシオン、

u_a , u_w : 間隙空気圧および間隙水圧。

不飽和土の変形・強度特性に関しては、現在までサクシオンを制御した三軸圧縮試験により研究が進められてきた^{1),2)}。しかしながら、試験方法の難しさからそのデータ数はかなり少なく、得られた結果についても確立された解釈がなされていないのが現状である。

不飽和土では、サクシオンにより生じる粒子間付着力の影響により粒子接点でのすべりに対する抵抗が増大する。このため、不飽和土の強度は飽和状態

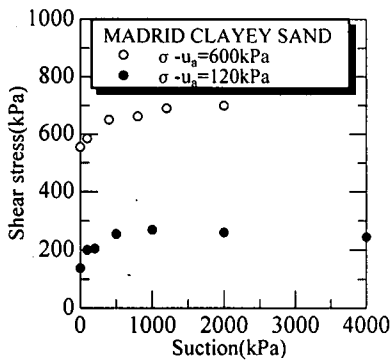


図-2 せん断強度～サクシオン関係の測定例²⁾

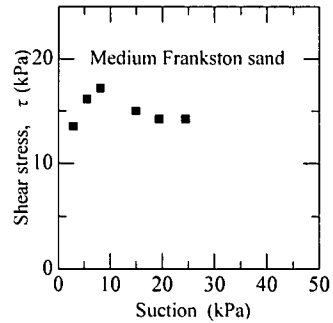


図-3 せん断強度～サクシオン関係の測定例¹⁰⁾

に比べて大きくなる。Fredlund, Morgenstern & Widger¹⁾は、不飽和土の強度が次式で与えられるとしている。

$$\tau_f = c_{snt} + (\sigma - u_a) \tan \phi_{snt} + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

ここに、 τ_f ：破壊面上のせん断応力、
 σ ：全応力表示の破壊面上の垂直応力、
 c_{snt} ：飽和状態における粘着力、
 ϕ_{snt} ：飽和状態における内部摩擦角、
 ϕ^b ：サクシオンの増加に伴うせん断強度の増加を表すパラメーター。

上式は、サクシオンが増加しても内部摩擦角は飽和状態のものから変化しないことを意味している。また、右辺第3項はサクシオン増加による粘着力増分を示している。一方、軽部ら⁹⁾は、サクシオン一定条件下において締め固めた粘性土を用いて三軸圧縮試験を行った。そしてその結果に基づき、サクシオンの増加に伴い内部摩擦角はわずかに増加すると報告している。

上に述べた Fredlund, Morgenstern & Widger¹⁾および軽部ら⁹⁾の例に示されるように、サクシオンが不飽和土の内部摩擦角に与える影響に関して現状では異なる結果が示されており、結論は得られていない。

また、サクシオンが不飽和土の粘着力に与える影響に関しても、次節でのべるような研究が進められているが、統一的な見解は得られていない。

不飽和土のサクシオン一定条件下でのせん断試験より得られるサクシオンとせん断強度の関係は、図-2²⁾に示されているように、サクシオンの増加に対してせん断強度が単調に増加する結果が多く報告されている。この場合、せん断強度の増分は、主に粘着力が増加したものと考えられる。一方、サクシオンの増加に対し、せん断強度が増加後に減少す

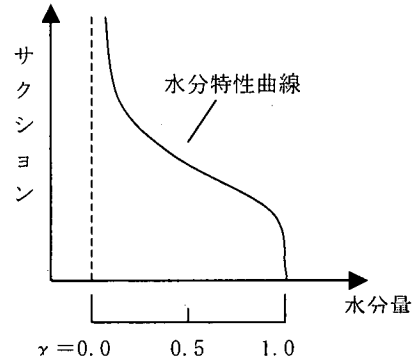


図-4 阿部によるパラメーター χ の決定方法¹⁾

るといふ図-3¹⁰⁾に示すような測定結果も報告されており、常に図-2に示されるような、サクシオンの増加に対してせん断強度が単調に増加する傾向が得られるものとは限らない。

以上のように、サクシオンが不飽和土の強度定数に与える影響に関しては、いくつかの実験結果が示されている。しかし、その多くが排水条件下の試験に基づいており、本研究で行われているような非排水条件下における式(2)の適用性に関してはほとんど検討されていないのが現状である。

(3) サクシオンと粘着力増分の関係の推定に関する研究

現在までの不飽和土の研究は、いくつかの構成モデル^{11), 12), 13)}が提案される段階にまで達している。これらの構成モデルにおいては、サクシオンの影響を粘着力増分、あるいは粘着力増分に対応した応力成分として取り入れており、これらの構成モデルを用いて不飽和地盤の挙動を予測する際には、サクシオンと粘着力増分の関係をあらかじめ知ることが必要となる。

ある大きさのサクシオンが作用している状態にお

いて発揮される粘着力を求めるには、そのサクシ
ョンのもとで、基底応力の異なる複数個の三軸圧縮試
験を行い、その破壊時の応力状態から粘着力を決定
することが通常行われる。そして、サクシジョンと粘
着力増分との関係を求めるためには、このような実
験をいくつかのサクシジョン条件下で行う必要があり、
それに要する時間と費用は、多大なものとなり実務
に適した方法とはいえない。このため、以下に述べ
るような、サクシジョンと粘着力増分の関係を水分特
性曲線に基づき推定する方法がいくつか提案されて
いる。

a) 阿部および Vanapalli らの研究

阿部¹⁾は、水分特性曲線に基づいて、次式で示さ
れる Bishop の有効応力式¹⁰⁾におけるパラメータ χ
を決定する方法を提案した。

$$\sigma' = (\sigma - u_n) + \chi (u_n - u_w) \quad (3)$$

ここに、 σ' : 有効応力,
 χ : 履歴等で決定されるパラメータ。

サクシジョンがゼロの状態は飽和状態である。この時、
 $\chi = 1$ となり、上式で定義される σ' は飽和土にお
ける有効応力と等しくなる。さらに阿部は、サク
シジョンが大きくなり、サクシジョンの増加に対し水分
量の変化がほとんど生じなくなった状態（残留状
態）において、 $\chi = 0$ となると仮定した。そして、
図-4に示されるように、これらの飽和状態および残
留状態におけるパラメータ χ の値を基準にして、
水分特性曲線上でのサクシジョンの値を用いて、 χ の
値を相対的に決定する方法を提案した。

ところで、飽和土の有効応力に基づくせん断強度
式に式(3)を代入することにより、次式が得られる。

$$\tau = c' + (\sigma - u_n) \tan \phi' + \chi (u_n - u_w) \tan \phi' \quad (4)$$

ここに、 τ : せん断強度,
 c' : 有効応力に基づく粘着力,
 ϕ' : 有効応力に基づく内部摩擦角。

式(2)と式(4)を比較すると、式(4)の右辺第3項は、
式(2)の右辺第3項のサクシジョンによる粘着力増分
に対応することがわかる。よって、残留状態で $\chi = 0$
となることを仮定した、阿部によるパラメータ χ の
決定方法は、後掲式(6)に示される水分特性曲線に
基づく粘着力増分の推定方法と本質的に同じ意味を
もつものと考えられる。

Vanapalli ら²⁾は、式(2)の右辺第3項を、以下に

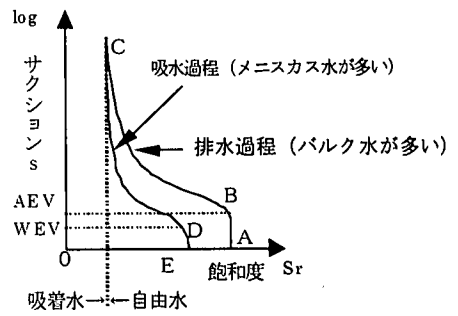


図-5 水分特性曲線の概念図

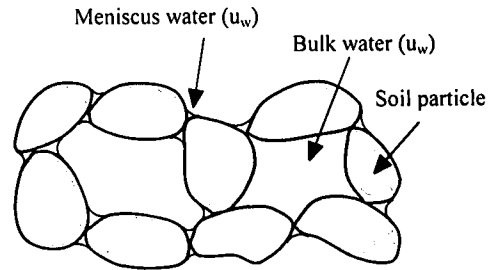


図-6 バルク水とメニスカス水の概念図

述べる水分特性曲線に基づく方法により推定するこ
とを提案している。彼らはその論文の中で、サク
シジョンによる粘着力増分が、次式で表されるよう
に正規化された体積含水率に関連するものとした。

$$\tau = [c' + (\sigma - u_n) \tan \phi'] + (u_n - u_w) [(\Theta^*) (\tan \phi')] \quad (5)$$

ここに、 $\Theta = \theta / \theta_s$: 正規化された体積含水率、
ただし、 θ : 体積含水率、
 θ_s : 飽和状態における体積含水率、
 κ : 材料パラメーター。

さらに、式(5)の誘導過程の考え方を拡張すること
により、次式が得られると述べている。

$$\tau = [c' + (\sigma - u_n) \tan \phi'] + (u_n - u_w) [(\tan \phi') (Sr - Sr_0) / (100 - Sr)] \quad (6)$$

ここに、 Sr_0 : 水分特性曲線に基づいて推定され
る、残留状態における飽和度（以後、
残留飽和度と呼ぶ）。

式(6)が式(5)の誘導過程における考え方に基づきど

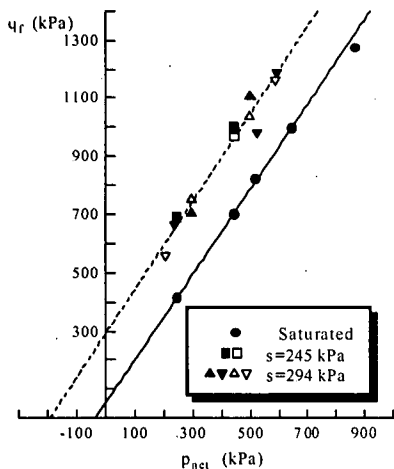


図-7 サクシオン一定の三軸圧縮試験結果における破壊時のせん断応力～ p_{net} 関係

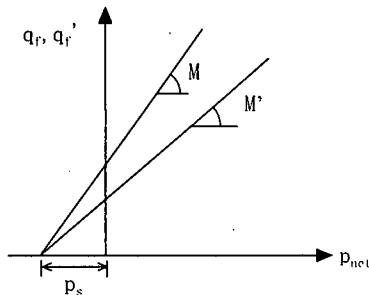


図-8 ダイレイタンスー補正されたせん断応力に基づく破壊線と式(11)の関係

のように導かれるのかは、その論文の中では明らかにされていない。なお、Vanapalli ら²⁾はその論文の中で、サクシオン一定条件での排水条件下における三軸圧縮試験と一面せん断試験結果、および非排水条件下における三軸圧縮試験結果について、式(5)および式(6)の適用性を検討している。

b) 軽部らの研究

図-5は、排水過程および吸水過程における水分特性曲線の概念図である。点BおよびD点のような、排水過程で排水が急激に生じ始める点、あるいは、吸水過程で水が急激に侵入する点におけるサクシオンの値は、それぞれ空気侵入値 (Air Entry Value : AEVと略す) および水侵入値 (Water Entry Value) と呼ばれている。この図に示されるように、水分特性曲線は排水過程と吸水過程とで異なる曲線を描き、ヒステリシスの性質を示す。よって、同じサクシオンのもとでも異なる水分量の状態が存在す

る。そして、同じサクシオンのもとでも水分量が違う場合には、それぞれの間隙水の分布状態は異なったものとなる。その傾向としては、排水過程にある土では間隙を占めるバルク水が多く存在し、吸水過程にある土では土粒子接点を取り巻くメニスカス水が多く存在すると考えられる¹³⁾ (図-6参照)。

一方、このようなサクシオンの変化が不飽和土の変形・強度特性にどのような影響を及ぼすかについては、メニスカス水やバルク水による土粒子骨格への影響を考慮する必要がある。すなわち、メニスカス水とバルク水は、土粒子骨格に対してそれぞれ独自の働きをすると考えられる。まず、メニスカス水はサクシオンの増加に伴い土粒子間の圧縮力を増加させ、土塊の剛性を高める働きをする。これに対して、バルク水は土粒子間の圧縮力を増加させて骨格剛性を高めるだけでなく、土粒子接点においてせん断力を発生させ、土粒子同士を滑らせ体積圧縮を引き起こす。

軽部ら¹³⁾は、前者の影響で生じる応力成分をメニスカス応力 (p_m)、後者の影響で生じる応力成分をバルク応力 (p_b) と呼んでいる。さらに、サクシオンによって生じる等方圧縮応力をサクシオン応力 (p_s) と呼び、これらの応力関係が次式で与えられるものとした。

$$p_s = p_m + p_b \quad (7)$$

また軽部らは、あるサクシオン状態におけるバルク水、メニスカス水および吸着水の各水量を、水分特性曲線および最乾燥水分線に基づいて決定する方法を提案した¹³⁾。なお、最乾燥水分線とは試料がバルク水を失った状態で描く水分特性曲線として定義されている。最乾燥水分線を用いることにより決定される、ある大きさのサクシオン状態でのバルク水量およびメニスカス水量に基づき、バルク応力およびメニスカス応力はそれぞれ次式のように与えられる。

$$p_b = \frac{S_{rb}}{100 - S_{r0}} = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} \cdot s \quad (8a)$$

$$p_m = \frac{S_{rm}}{100 - S_{r0}} = \frac{(100 - S_r)(S_{rd} - S_{r0})}{(100 - S_{r0})(100 - S_{rd})} \cdot s \quad (8b)$$

ここに、 S_{rb} 、 S_{rm} : 飽和度により表したバルク

水量およびメニスカス水量,

$S_{r,d}$: 最乾燥水分線上での, あるサク
ションに対応した水分量.

そして, サクション応力がバルク応力およびメ
ニスカス応力の和として, 次式のように表されるもの
としている.

$$p_s = p_m + p_b = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s \quad (9)$$

さらに軽部ら¹⁶⁾は, サクション一定条件下における
不飽和土の三軸圧縮試験結果をサクション応力に基づ
き整理することにより, 式(9)で与えられるサク
ション応力 p_s は, せん断応力 q ($=\sigma_1 - \sigma_3$, こ
こに, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は全応力表示の主応力) ~ 平均基
底応力 p_{net} ($=(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 - u_a$) 面上に描かれ
た, ダイレイタンシー補正された破壊時(ピーク時)
のせん断応力に基づく破壊線の p_{net} 軸切片とな
ることを示した. この破壊線は次式で与えられる.

$$q_f' = M' (p_{net} + p_s) \quad (10)$$

ここに, $q_f' = q_f + \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s}\right)_f \cdot p_{net}$: ダイレイタン

シー補正された破壊時のせん断応力,

q_f : 破壊時のせん断応力, $\left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s}\right)_f$:

破壊時のダイレイタンシー係数

p_{net} : 破壊時の平均基底応力,

M' : ダイレイタンシー補正された破壊時の
せん断応力に基づくせん断抵抗係数.

式(10)と破壊時(ピーク時)のせん断応力に基づく
破壊線の関係については, 実験データ数が限られて
いるために明らかにされていない. しかし, 図-7¹⁶⁾
に示すサクション一定条件下における不飽和土の三
軸圧縮試験結果における破壊時のせん断応力~平均
基底応力関係から, データにばらつきは見られるも
の, 次式を仮定することができる. すなわち,

$$q_f = M (p_{net} + p_s) \quad (11)$$

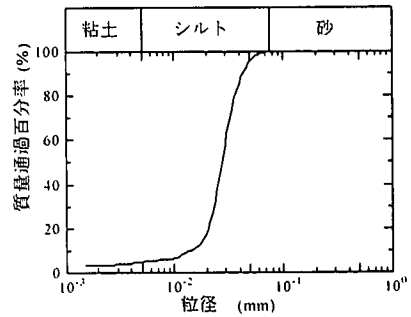


図-9 DLクレーの粒径加積曲線

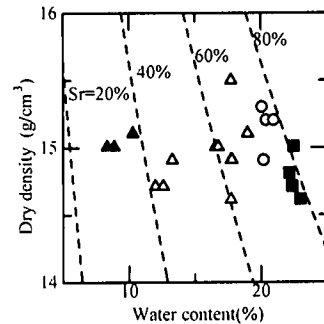


図-10 乾燥密度~供試体含水比関係

ここに, q_f : 破壊時のせん断応力,

M : 破壊時のせん断応力に基づくせん断
抵抗係数.

式(10)によるダイレイタンシー補正された破壊時の
せん断応力に基づく破壊線と, 仮定された式(11)の
幾何的關係は図-8に示される. もし, 式(11)の関
係が成り立つならば, サクション応力とサクシ
ョンにより生じる粘着力 c との關係は, 次式で与えら
れる.

$$c = p_s \cdot \tan \phi_{net} \quad (12)$$

ここで, ϕ_{net} : 基底応力に基づく内部摩擦角. 実
用上は, 不飽和状態の試料を飽和
化して試験したときに得られる,
'有効応力に基づく内部摩擦角 ϕ'
とほぼ等しい⁹⁾. なお, ϕ_{net} と図-
8中の M の間には, $M = 6 \sin \phi_{net} /$
 $(3 - \sin \phi_{net})$ の關係がある.

式(12)および式(9)から, ある飽和度のもとでサク
ションと粘着力の關係を求めることができる. また,
式(9)の關係を考慮すると, 式(12)の關係が

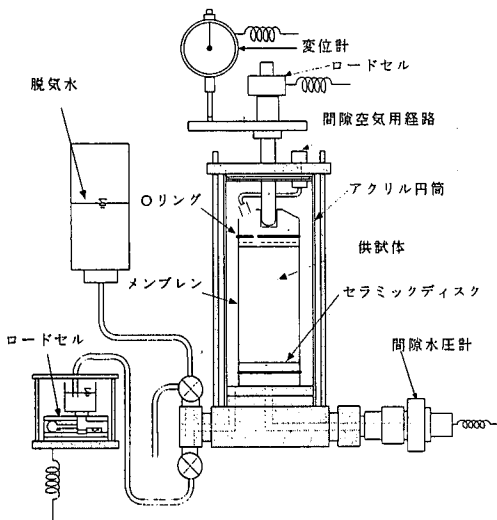


図-11 一軸圧縮試験装置の概要

Vanapalli らの提案式²⁾である式(6)の右辺第3項と対応することがわかる。

以上のようにいくつかのサクシオン～粘着力増分関係の予測方法が提案されているが、それらはいずれも水分特性曲線に基づいている。水分特性曲線を得るための保水性試験には、多大な時間を必要とするので、それらの予測方法を実務に用いることは、現状では難しい。よって、本研究で示すような、一軸圧縮試験に基づく、サクシオン～粘着力増分関係の予測方法が確立されれば、工学的な意義が大きいと考えられる。

3. 試料および実験方法

本研究で用いた試料、供試体作製方法および一軸圧縮試験方法は、平成4年度に実施された「不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験」¹⁷⁾における試験規定に準じている。本研究の試験方法が異なる主な点は、以下に述べるように一軸圧縮試験時に供試体の体積変化測定を行ったこと、および締固め時の試料の含水比を17%だけでなく変化させて、異なる乾燥密度および飽和度の供試体を作製して用いたことである。さらに本研究においては、水分特性曲線に基づいてサクシオン～サクシオン応力関係を検討するために、17%に含水比調整して締固めた試料を用いて保水性試験を行った。

(1) 締固め試料の作成方法

試料は、非塑性で土粒子の密度 $\rho_s = 2.68 \text{g/cm}^3$ のシルト質粘土(商品名: DLクレー)を用いた。その

粒径加積曲線を図-9に示す。気乾状態で粉末状の試料に、霧吹きで蒸留水を加えて目標含水比に調整し、乾燥しないように密閉した容器に一昼夜以上保管した。その後、締固め試験 JSF T 711-1990, A-a法(10cmモールドと2.5kgランマーによる3層25回の締固め)に従い締固め、円柱型のブロックサンプルを作成した。このブロックサンプルをラップでシールし、さらにラップの周りを湿った布で覆った後に密閉容器に入れ、恒温室内で一昼夜以上保管した。このようにして保管したブロックサンプルを、試験直前に各試験に応じた供試体寸法に成形して用いた。

図-10は、この供試体の含水比～乾燥密度関係を示している。図より、本締固め方法により得られる供試体の最適含水比は約20%であると考えられる。なお図中のプロットは、△印が最適含水比よりも乾燥側の結果、○印が最適含水比付近の結果、■印が最適含水比よりも湿潤側の結果を示している。また、▲印のデータは、含水比17%で作製した後、自然乾燥させた場合のデータである。この凡例の形式は、以後に示されるいくつかの図において採用されている。なお、この図に示されている供試体については、すべて一軸圧縮試験を実施した。

(2) サクシオンを測定した一軸圧縮試験

供試体は、前節で述べた方法により締固めて作製したブロックサンプルを、トリマーとワイヤーソーにより直径50mm、高さ100mmの円柱供試体に成形したものを用いた。なお、ブロックサンプルを締固めた時の試料の含水比は約11～23%であった。

一軸圧縮試験装置の概要を図-11に示す。ポーラストーンの代わりにセラミックディスク(AEV=490kPa)をペダスタルに装着した三軸セルタイプの装置である。供試体内部の間隙空気は、間隙空気用経路を通じて大気に開放されている。試験時にはセラミックディスクに通じた水管路端部に取り付けた間隙水圧計により、セラミックディスクを通じて土中の負圧を測定した。供試体のサクシオンの大きさは、測定された間隙水圧の大きさと等しいものとした。

間隙空気用経路と供試体上面の接する部分にはポーラストーンが埋め込まれている。なお、供試体内部の間隙水の間隙空気用経路への流出に関しては配慮はなされていない。しかし、せん断試験中の観察により、供試体の飽和度が高くともそのような流出は生じなかったことが確認されている。よって、試験時の非排水条件は満足されているものと考えられる。

ペDESTAL部分は毎回試験前に取り外し、約24時間脱気水槽の中に入れ、約98 kPaの負圧を与えてセラミックディスクを脱気した。その後、ペDESTALを底盤に取り付ける作業は脱気水を入れた水槽中に沈めた状態で行った。そして、セラミックディスクに通じる、底盤内の水回路内部を脱気水で十分フラッシングした後にペDESTALを装着した。この後、間隙水圧計を脱気水を入れた水槽中で十分フラッシングした後、取り付けて試験を行った。なお、セラミックディスクおよび間隙水圧計に続く水回路の飽和状態は、文献17における試験方法で指定されているように、供試体設置前にセラミックディスク表面をティッシュペーパーで拭い、約30kPaの負圧が発生するのを確かめることにより確認した。

供試体をペDESTALに設置してメンブレンを被せ、載荷キャップとOリングでシールした状態で、供試体の初期サクシジョンの測定を行った。初期サクシジョン測定後にセルを組み立て、セル内部に水を満たした。せん断中は、セル水の吸排水量を測定し、それに対してピストン貫入体積を補正することにより、軸圧縮過程での供試体の体積変化量を求めた。なお、せん断時のひずみ速度は0.2%/分とした。

本研究で行われているような非排水（排気非排水）試験においては、供試体内部の間隙水圧を精度良く測定するためにせん断時のひずみ速度の設定が問題となる。阿部・畠山¹⁷⁾は、本試験と同じ試料を用い、同様な試験方法（せん断時のひずみ速度は0.1%/分）により全国の数ヶ所の研究機関において行われた一斉一軸圧縮試験結果について示している。そして、測定を行った研究機関の違いにもかかわらず、得られた破壊時のサクシジョン～含水比関係は同じ傾向を示したこと、また、一軸圧縮試験時の破壊時のせん断応力のプロットが、飽和化試料を用いた三軸圧縮試験結果から求めた破壊包絡線付近に分布したことを報告している。本試験においてはひずみ速度0.2%/分を用いているが、一斉一軸圧縮試験と同じ含水比（17%）で作製された供試体は、一斉一軸圧縮試験と同様な応力～ひずみ曲線と一軸圧縮強度を示すことが確認された。以上の結果から判断して、本試験方法において用いたひずみ速度により得られるサクシジョンおよび一軸圧縮強度の精度については、一斉一軸圧縮試験と同等の信頼性があるものと判断される。

(3) 保水性試験

含水比を17%に調整した試料を3。(1)節で述べた方法により締め固めて作製したブロックサンプルを、カッターリングおよびワイヤソーを用いて直径

60mm、高さ20mmの圧密リングに挿入し、上下端面を削って成形したものを供試体として用いた。保水性試験での試験装置には、ピストンの自重が相殺される機構を有したベロフラムタイプの三軸セル内部に、標準圧密試験と同じサイズの圧密リングが設置できるようペDESTAL部分を改造したものを用いた¹⁸⁾。試験前のペDESTALの脱気方法およびその装着は、前節に述べた一軸圧縮試験に準じて行った。

ペDESTALにはポーラスストーンの代わりにセラミックディスク（AEV=490kPa）が埋め込まれており、圧密リングを装着することができる。載荷板にはポーラスメタルが埋め込まれており、それに続く空気経路がセル内部へ解放されている。また、セラミックに通じるペDESTAL内部の排水経路は、セル外部のビュレットに連結されている。このため、供試体の間隙水圧はセラミックディスクを通じて大気圧へ開放されている。このような構造により、セル内部に加えた空気圧が供試体内部の間隙空気圧と等しくなり、サクシジョンとして作用する。

供試体からの排水量はセラミックに通じる排水経路に連結した、セル外部のビュレットにより測定した。また、セル外部でピストンの変位を変位計を用いて計測することにより供試体高さの変化を測定し、その変化量に供試体断面積を乗じたものを供試体体積変化とした。

排水バルブを閉じた状態でペDESTALに供試体が入った圧密リングを設置し、セルを組み立てた。その後、サクシジョンの載荷を加圧法によって行った。一定のサクシジョン（セル圧）を与えた状態で、供試体からの排水量と経時変化の関係が平衡状態に到達すれば、次の載荷段階に順次移行した。なお、保水性試験では、サクシジョンが300kPaになるまでの排水過程での載荷を行った。各載荷段階に要した時間は、長い場合で2～3日を要した。このような場合、供試体上面からの乾燥が水分量に影響すると考えられるので、セル内部には供試体に影響がないような低い水位で水を張り、乾燥の影響が少なくなるように配慮した。

4. 試験結果および考察

(1) 一軸圧縮強度および応力～ひずみ～サクシジョン関係

図-12は、一軸圧縮強度 q_u ～供試体の初期乾燥密度 ρ_{d0} 関係を示している。データの傾向としては乾燥密度が大きいほど一軸圧縮強度は大きくなる傾向を示している。しかし、同じ一軸圧縮強度を示す乾

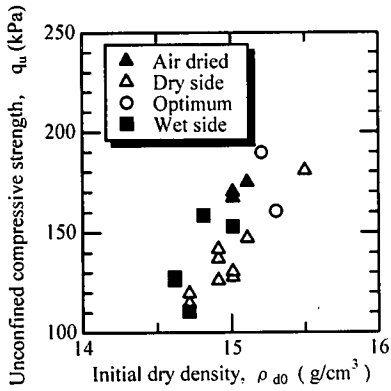


図-12 一軸圧縮強度～初期乾燥密度関係

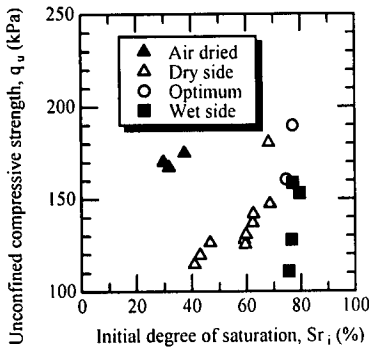


図-14 一軸圧縮強度～初期飽和度関係

乾燥密度の大きさには、ある範囲が存在しており、乾燥密度のみが一軸圧縮強度に影響を与えているものではないと考えられる。図-13は、一軸圧縮試験において得られた一軸圧縮強度～破壊時サクシオン関係を示している。あまり明確とはいえないが、わずかな破壊時サクシオンの増加に対して一軸圧縮強度が増加する傾向を示しているものと思われる。図-14は、供試体の一軸圧縮強度～初期飽和度 S_r 関係を示している。なお、初期飽和度とは供試体成形時の飽和度を意味している。この定義は、以後に示される図においても同様である。△印で示されている乾燥側のデータについては、▲で示された供試体を締め固め後に自然乾燥した場合のデータを除くと、他の10個のデータにおいて初期飽和度の増加とともに一軸圧縮強度も増加する傾向を示している。○印で示される最適含水比付近のデータおよび■印で示される湿潤側のデータに関しても、初期飽和度の増加に対し、一軸圧縮強度が増加する傾向を示している。ただし、これらのデータについては、その増加割合の傾向は、乾燥側のデータとは異なっている。図-12、13および14の結果から、一軸圧縮強度には乾燥密度のみならず、破壊時サクシオンや飽和度も

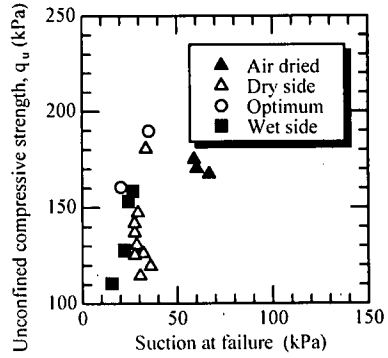
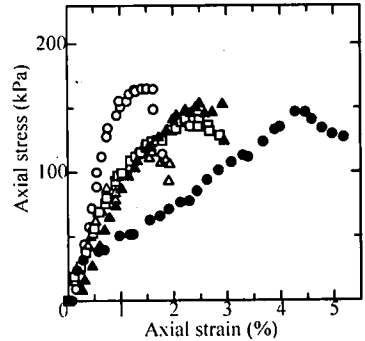
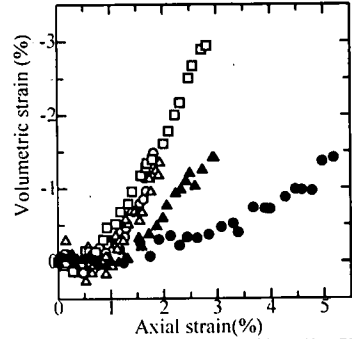


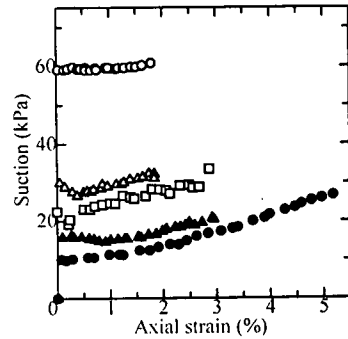
図-13 一軸圧縮強度～破壊時サクシオン関係



(a) 圧縮応力～圧縮ひずみ関係



(b) 体積ひずみ～圧縮ひずみ関係



(c) サクシオン～圧縮ひずみ関係

図-15 一軸圧縮試験時の圧縮応力～圧縮ひずみ関係、体積ひずみ～圧縮ひずみ関係およびサクシオン～圧縮ひずみ関係

表-1 代表例の初期状態とプロット記号

記号	乾燥密度 (g/m^3)	含水比 (%)	間隙比	飽和度 (%)
○	15.009	8.35	0.753	29.71
△	14.911	13.29	0.764	46.62
□	15.107	18.99	0.741	68.66
▲	15.304	20.06	0.719	74.76
●	15.009	22.47	0.755	79.69

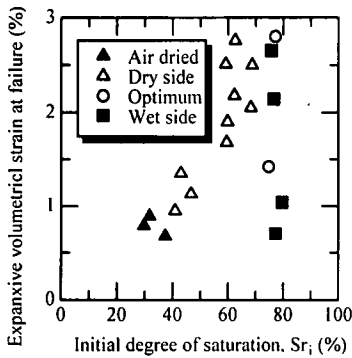


図-17 破壊時体積ひずみ～初期飽和度関係

影響を与えているものと考えられる。

図-15(a), (b), (c)はそれぞれ、一軸圧縮試験時の圧縮応力～圧縮ひずみ関係、体積ひずみ～圧縮ひずみ関係およびサクシオン～圧縮ひずみ関係の代表例をそれぞれ示している。また、表-1は、図-15中の記号と各供試体の初期状態を示している。表-1に示されるように、代表例は約30%の低飽和度状態から約80%の高飽和度状態までの供試体の結果を示している。図-15(a)に示す圧縮応力～圧縮ひずみ関係においては、初期飽和度の小さなものほど立ち上がり急になり、脆性的な応力～ひずみ関係を示していることがわかる。図-16は、破壊時圧縮ひずみ～初期飽和度関係を示している。飽和度が大きくなるほど破壊時圧縮ひずみは大きくなる傾向を示しており、図-15(a)の結果と対応しているものと考えられる。図-15(b)の体積ひずみ～圧縮ひずみ関係においては、初期飽和度の大きなものほど、せん断時の体積膨張が小さくなる傾向を示している。図-17は破壊時体積ひずみ～初期飽和度関係を示している。この図によると、破壊時体積ひずみ(膨張を正)は最適含水比付近で最大となり、供試体初期の乾燥密度と対応しているものと考えられる。図-15(c)の圧縮ひずみ～サクシオン関係においては、飽和度が低いほど

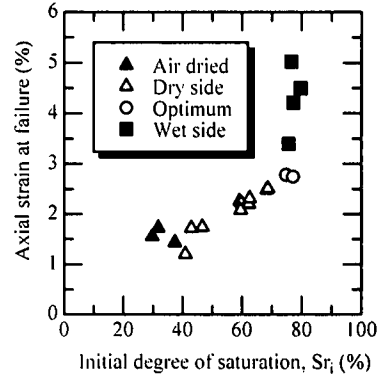


図-16 破壊時圧縮ひずみ～初期飽和度関係

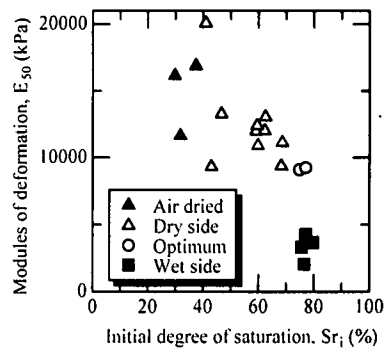


図-18 変形係数 E_{50} ～初期飽和度関係

高い初期サクシオンが生じていることがわかる。また、せん断中のサクシオンの変化は、初期飽和度が高く、初期サクシオンが低いものほど大きくなる傾向を示している。

図-18は、変形係数 E_{50} ～初期飽和度関係を示している。初期飽和度が大きくなると変形係数が小さくなる傾向を示している。後掲の図-20に示す破壊時サクシオン～初期飽和度関係と合わせて考えると、変形係数にはサクシオンの影響が現れており、その結果、図-15(a)に示した圧縮応力～圧縮ひずみ関係に示されるような、初期飽和度に依存した傾向が見られるものと考えられる。

(2) せん断時のサクシオン変化に与える間隙水分布の影響

図-19および20は、初期サクシオン～初期飽和度関係および破壊時サクシオン～初期飽和度関係を示している。両図において、初期飽和度の減少とともにサクシオンが増加する傾向が顕著に現れている。図-21は、サクシオン増加量～初期飽和度関係を示している。図から、初期飽和度の増加とともにサク

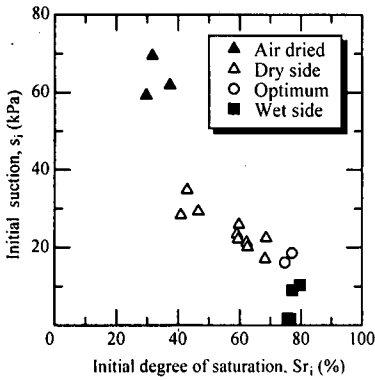


図-19 初期サクシオン～初期飽和度関係

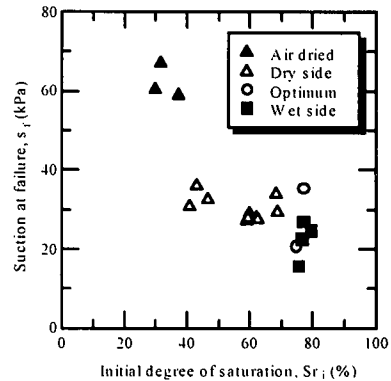


図-20 破壊時サクシオン～初期飽和度関係

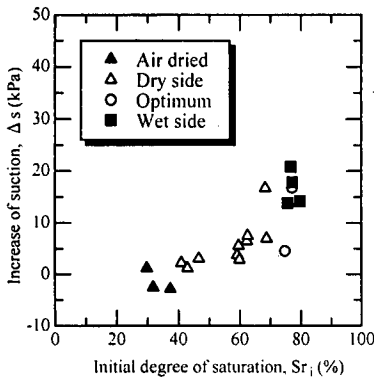


図-21 サクシオン増加量～初期飽和度関係

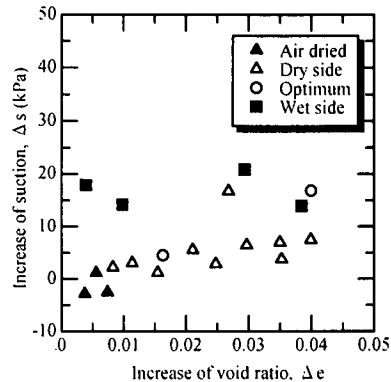


図-22 サクシオン増加量～間隙比膨張量 Δe 関係

シオン増加量も増加する傾向がうかがわれる。以上の結果から、せん断時に生じる供試体の体積膨張にともないサクシオンが増加していることがわかる。しかし、その増加傾向は、図-17に示した破壊時体積ひずみ～初期飽和度関係を考慮すると、必ずしも体積変化挙動と対応しているとはいえないものと考えられる。図-22は、せん断時のサクシオン増加量～間隙比膨張量 Δe 関係を示している。△印および▲印で示される乾燥側のデータは、間隙比膨張量の増加に対してサクシオンの増加がわずかであるのに対して、○印印で示される最適含水比付近のデータおよび□印で示される湿潤側のデータは大きなサクシオンの増加を示していることがわかる。このような傾向の違いは、乾燥側の供試体では間隙水がメニスカス水として保持されている状態（図-6参照）が多いのに対して、最適含水比付近および湿潤側の供試体では、間隙水がバルク水の状態（図-6参照）で保持されているものが多いためであると考えられる。このため、乾燥側供試体では、せん断時の体積変化が間隙水圧変化として反映されないのに対し、最適

含水比付近および湿潤側供試体では、せん断時の体積変化が間隙水圧変化として反映されているものと考えられる。

軽部ら¹⁵⁾によるバルク水およびメニスカス水の概念を、実際の間隙に保持されている間隙水に適用し、個々の間隙水をそれぞれに区別することは難しい。このため、彼らはその論文の中で「最乾燥水分線」を提案し、それに基づきバルク水およびメニスカス水の水分量を推定する方法を述べている。しかし、その考え方は単に概念上のものではなく、実際の不飽和土の挙動を説明するための重要な考え方である。図-22に示されている結果は、その考え方により実際の挙動が説明される一例であると考えられる。

(3) 一軸圧縮試験に基づくサクシオン～サクシオン応力関係の推定

a) 水分特性曲線に基づくサクシオン～サクシオン応力関係の誘導

土の水分量とサクシオンの関係を表す水分特性曲線には、様々な関数に基づく表現方法が提案されて

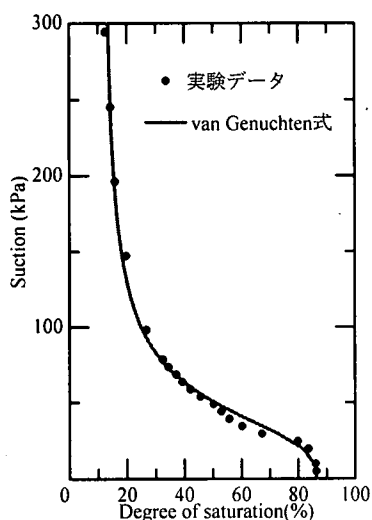


図-23 含水比17%の締めめ試料に対する保水性試験結果

いる。本研究においては比較的簡単にパラメータ推定が可能で、砂から粘土まで広範囲の土質に対して水分特性曲線を近似することができる van Genuchtenモデル¹⁹⁾を用いて、17%含水比で締めめた供試体を用いて得られた水分特性曲線を近似した。van Genuchtenモデルは次のような関数で表される。

$$Se(\theta) = \left\{ 1 + (\alpha \cdot s)^n \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad (13)$$

ここで、 α 、 n ：水分特性曲線から推定される材料定数である。また、 $Se(\theta)$ は相対飽和度であり、次式により定義される。

$$Se(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (14)$$

ここに、 θ_r ：残留状態における体積含水率、
 θ_{sat} ：飽和体積含水率、
 θ ：体積含水率。

実際には、保水性試験により得られたサクシオン～水分量関係の実測値に対して、 θ_{sat} 、 θ_r 、 α 、 n をパラメータとして式(13)および式(14)より得られる予測曲線をフィッティングし、最適な状態が得られるパラメータにより θ_{sat} 、 θ_r 、 α 、 n を決定する。

保水性試験中の間隙比の変化が無視できるほど微小なとき、体積含水率を飽和度に置き換えることに

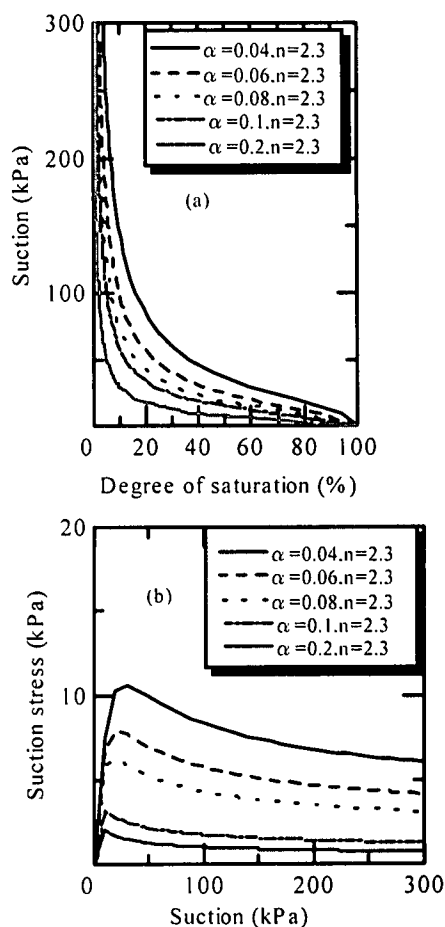


図-24 パラメータを仮定した場合に得られる水分特性曲線ならびサクシオン応力～サクシオン関係 (n を固定した場合)

より、相対飽和度は次式のように表現することができる。

$$Se(\theta) = \frac{Sr - Sr_0}{100 - Sr_0} \quad (15)$$

図-23は、今回行った含水比17%の締めめ試料に対する保水性試験の結果（プロットで表示されている）と式(13)および式(15)に基づく予測曲線を示している。なお、予測曲線を得たパラメータの値は、 $\alpha = 0.0239$ 、 $n = 2.95$ 、 $Sr_0 = 12\%$ であった。

図-24および図-25における(a)、(b)図は、パラメータを仮定した場合に式(13)および式(15)より得られる水分特性曲線、ならびに式(9)、式(13)および式(15)に基づき得られるサクシオン応力～サクシオン関係をそれぞれ示している。図-24は n を固

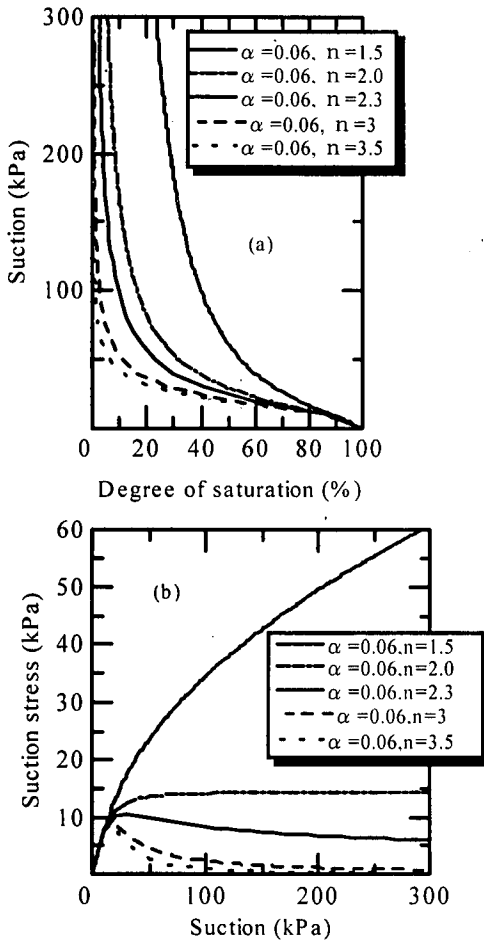


図-25 パラメータを仮定した場合に得られる水分特性曲線ならびサクシヨン応力～サクシヨン関係 (α を固定した場合)

定して α を変化させた場合、図-25は α を固定して n を変化させた場合をそれぞれ示しており、両図において仮定した残留飽和度は共通 ($Sr_0=12\%$) している。

図-24(a)の結果から、 n が一定で α が変化した場合、排水過程の水分特性曲線における空気侵入値に対応する点の値が変化する傾向が見られる。また、図-25(a)の結果から、 α が一定で n が変化した場合、サクシヨン増加に対する残留飽和度へ漸近のしかたが異なってくるのがわかる。この図における $\alpha=0.06$, $n=1.5$ のケースに見られるように、同じサクシヨンの増加に対して飽和度の減少割合が小さいような水分特性曲線が得られる場合には、供試体内部ではバルク水が維持されやすい状態にあると考えられる。このためサクシヨンの増加が負の間隙水圧として作用する領域が多く、サクシヨンの増加に対し

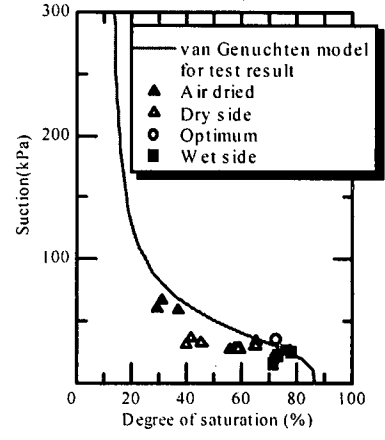


図-26 破壊時サクシヨン～飽和度関係と含水比17%の締固め試料の水分特性曲線との比較

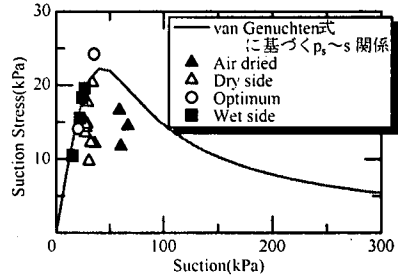


図-27 サクシヨン応力～サクシヨン関係

て、サクシヨン応力(粘着力)の増加割合も多くなる。よって、このような場合のサクシヨン応力～サクシヨン関係も、図-25(b)に示されるようにサクシヨンの増加に対してサクシヨン応力が増加する傾向を示すものと考えられる。

また、図-25(b)に示される結果では、サクシヨンの増加に対してサクシヨン応力が増加してピーク値を示した後に減少する結果と、サクシヨン応力が単調に増加する結果が見られる。このような傾向は、図-2および図-3に示したせん断強度～サクシヨン関係の実測結果に見られる傾向とも対応している。すなわち、図-25(b)に示される結果から判断すると、せん断強度～サクシヨン関係において得られている傾向には、土の保持しているバルク水の保水能力が関連しているものと考えられる。

b) 一軸圧縮試験および水分特性曲線より得られるサクシヨン応力～サクシヨン関係の比較

図-26は、図-20に示した一軸圧縮試験の破壊時サクシヨン～初期飽和度関係と図-23に示した含水比

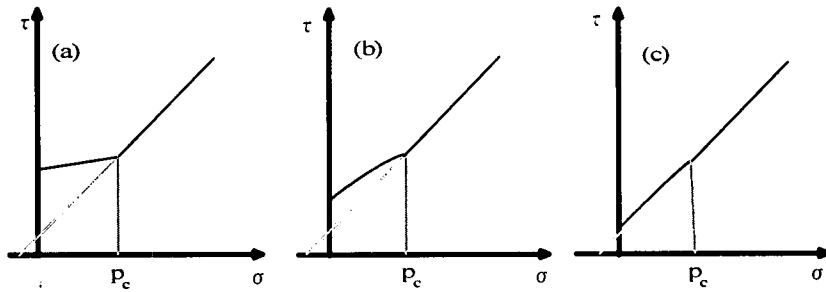


図-28 粒子間力を持つ粒状材料の破壊強度線の概念図

17%の締固め試料を用いた保水性試験より得られた水分特性曲線を合わせて示したものである。破壊時サクシオン～初期飽和度の関係は、得られた水分特性曲線に沿って分布していることが分かる。

異なる含水比状態において一定のエネルギーで締固められた試料より得られる水分特性曲線は、乾燥密度の違いにより間隙径分布も異なるものと考えられる。この結果、各試料の水分特性曲線も異なることが予想される。しかし、図-27に示されている結果は、一軸圧縮試験における破壊時のサクシオンと飽和度の関係が、一つの試料より得られる水分特性曲線と対応する可能性を示している。

サクシオン応力とサクシオンの関係は、式(9)、式(13)および式(15)から、次式のように与えられる。

$$p_s = \frac{Sr - Sr_0}{100 - Sr_0} \cdot s = \left\{ 1 + (\alpha \cdot s)^n \right\}^{-(1-\frac{1}{n})} \cdot s \quad (16)$$

図-27中の実線は、式(16)に今回の保水試験から得られた実験値 ($\alpha = 0.0239$, $n = 2.95$, $Sr_0 = 12\%$) を代入して得られるサクシオン応力とサクシオンの関係を示している。この実線で示される関係は、水分特性曲線に基づくサクシオン～サクシオン応力関係の予測を示しているものと考えられる。その傾向としては、サクシオン応力はサクシオンの増加とともに増加し、サクシオンが50kPa付近でピークとなり、以後、サクシオンの増加とともに減少している。

また、図中のプロットは、今回行った一軸圧縮試験時において測定された、供試体破壊時の飽和度とサクシオンから、残留飽和度を $Sr_0 = 12\%$ と仮定して式(9)に基づき求めたサクシオン応力～サクシオン関係を示している。プロットの存在範囲はサクシオンが80 kPa程度までの限られた範囲であるが、プ

ロットは予測結果(実線)においてサクシオン応力がピーク値を示す50kPa付近まで実線付近に分布し、ピーク以後は予測結果よりもやや小さな値を示していることが分かる。この結果は、一軸圧縮試験を行うことにより、サクシオン～サクシオン応力関係の予測が可能であることを示している。そして、式(12)の関係を考慮すれば、一軸圧縮試験を行うことにより式(9)に基づいて飽和状態に近い低サクシオン領域におけるサクシオン～粘着力増分関係の予測が可能であることを意味している。

(4) サクシオン応力が一軸圧縮強度に及ぼす影響

a) 粒子間力が破壊線の形状に与える影響

サクシオンが空気侵入値よりも大きくなると、空気が間隙内に侵入するため間隙水はメニスカスを形成する。このメニスカスを形成する水量はサクシオンの増加とともに増大する。このような状況では、メニスカスにより生じる粒子間圧縮力が不飽和土の強度に影響を与える。さらに、締固め土のような不飽和土の場合、サクシオンとは別に土粒子間に作用する引力(粒子間引力)が強度に影響を与えるものと考えられる。この影響は、過圧密比が大きくなるほど顕著となる。この粒子間引力の影響により土骨格には構造が発達し、圧縮時の先行圧縮応力が増大するなどの現象が生じる。

粒子間力を有する他の材料としては、セメント改良土のように粒子間に存在する結合材により粒子間付着力を生じる材料が挙げられる。セメントなどの結合材により生じる粒子間付着力に比べると、サクシオンにより生じる粒子間圧縮力の影響は小さいものと考えられる。このことは、サクシオン一定条件下の不飽和土の三軸圧縮試験より得られる破壊線に基づく粘着力の大きさと、セメント改良土の三軸圧縮試験より得られる破壊線⁽³⁰⁾に基づく粘着力の大き

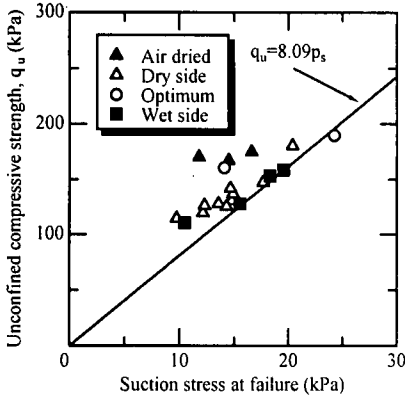


図-29 一軸圧縮強度～破壊時サクシオン応力関係

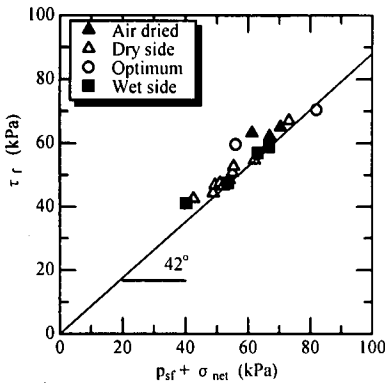


図-31 仮定に基づく破壊時応力点と飽和状態での破壊線との比較

さを比較した場合、通常、後者の値の方が大きいことから推測される。

粒子間引力や粒子間付着力が生じる原因にはいくつかの種類が考えられるが、このような粒子間力が材料の圧縮特性や強度特性に与える影響には共通した傾向が見られる。Leroueil & Vaughan²¹⁾は、過去に行われた堆積粘土や軟岩に関する三軸圧縮試験結果を整理し、その共通した傾向について報告している。

彼らの報告および阿部による不飽和粘土の一軸圧縮試験結果¹⁾に基づけば、粒子間力を持つ粒状材料の破壊強度線は、図-28(a)、(b)および(c)に示される3つのパターンに分かれるものと考えられる。各図中の“ p_c ”は、等方応力状態で得られる先行圧縮応力を示している。まず粒子間力の影響が大きい場合には、(a)図のような形状を示す。この場合、先行圧縮応力以下の領域での破壊線はほぼ直線となり、

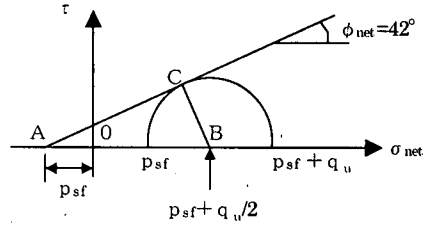


図-30 一軸圧縮試験における破壊時のモール円と破壊規準線の関係

その傾きは先行圧縮応力以上における破壊線の傾きよりも小さなものとなる。このような破壊線の形状は、過圧密粘土において見られる。次に粒子間力の影響がやや小さな場合には、(b)図のような形状を示す。この場合、先行圧縮応力よりも小さな領域での破壊線は、先行圧縮応力よりも大きな領域での破壊線よりもやや膨らんだ形状を示す。このような傾向は、Leroueil & Vaughan²¹⁾により自然堆積粘土について報告されている。最後に、粒子間力の影響がさほど大きくない場合は、(c)図のような形状を示す。この場合、先行圧縮応力よりも小さな領域での破壊線は、先行圧縮応力よりも大きな領域での破壊線とほとんど変わらないものとなる。このような結果は、阿部¹⁾やShimizu & Tabuchi³⁾が行った高飽和度状態の不飽和土を用いた一軸圧縮試験結果において報告されている。

b) サクシオン応力と一軸圧縮強度の関係

図-29中のプロットは、一軸圧縮強度と破壊時のサクシオンに基づいたサクシオン応力の関係を示している。プロットで示される実験結果はほぼ直線状に分布し、サクシオン応力が一軸圧縮強度に影響を与えていることがわかる。図-13に示した一軸圧縮強度～破壊時サクシオン関係と比較すると、一軸圧縮強度～破壊時サクシオン関係では明確な傾向は見られないが、図-29の結果では、一軸圧縮強度～破壊時サクシオン応力関係に明確な傾向が見られることがわかる。

ここで、一軸圧縮強度と破壊時サクシオン応力との関係は以下のように導くことができる。まず、一軸圧縮試験時にはサクシオン応力が拘束圧として作用すると仮定する。次に破壊時のモール円は、破壊時のサクシオンに対応した破壊規準線に接しており、その規準線の σ_{net} 軸切片の大きさは、その時のサクシオン応力の大きさに等しいと仮定する。この仮定は、図-28(c)に示されるように、サクシオンによる

粒子間付着力や締固めにより生じる粒子間引力が破壊線の形状に与える影響は小さいものと仮定していることになる。

以上の仮定に基づくと、一軸圧縮試験における破壊時のモール円と破壊規準線の関係は、図-30のように示される。図中の q_u は一軸圧縮強度、 p_s はサクシオン応力を示している。図中の $\triangle ABC$ に関する幾何学的関係から、一軸圧縮強度 q_u とサクシオン応力 p_s の関係は次式のように与えられる。

$$q_u = \frac{4 \sin \phi_{net}}{1 - \sin \phi_{net}} \cdot p_s \quad (17)$$

ここに、 ϕ_{net} ：基底応力に基づく内部摩擦角。
実用上は、不飽和状態の試料を飽和化して試験したときに得られる、有効応力に基づく内部摩擦角 ϕ' とほぼ等しい⁹⁾。

阿部・畠山¹⁷⁾は、本試験と同じ試料を用いて同じ締固め方法により作製した供試体を飽和化し、排水三軸圧縮試験を行った結果、有効応力に基づく内部摩擦角 ϕ' が 42° であったと報告している。この ϕ' の値を式(19)に代入すると次式が得られる。

$$q_u = 8.09 \cdot p_s \quad (18)$$

式(17)及び式(18)は、上で述べた仮定を満足する場合のサクシオン応力と一軸圧縮強度の関係を示していると考えられる。図-30中の実線で示される直線は、式(18)で示される q_u と p_s との関係を示している。実測値であるプロットが直線近傍に分布する傾向を示していることがわかる。さらに、図-31は、実測値に基づく破壊時のサクシオン応力、および有効応力に基づく内部摩擦角 $\phi' = 42^\circ$ を用いることにより得られる、図-30における破壊面上の応力点Cの実測値をプロットしたものである。図中の実線は $\phi' = 42^\circ$ 線を示している。

図-29および図-31に示される結果は、非排水試験である一軸圧縮試験において得られる一軸圧縮強度も、排水試験結果に基づき提案されている、式(2)で示したFredlund, Morgenstern & Widgerによる破壊強度式⁹⁾を満たすことを示しているものと考えられる。さらに、今回の供試体作製方法で得られた供試体については、前項で述べた過圧密土に顕著

である粒子間引力による破壊線の形状への影響が少なかったこと、また、一軸圧縮試験のような拘束外応力がない場合には、サクシオン応力は有効拘束基底応力として作用していることを意味しているものと考えられる。

現在までサクシオン一定の三軸圧縮試験が行われているが、それらの実験は先行圧縮応力以上の拘束応力条件のもとで行われている。このような拘束応力条件においては、サクシオン応力の大きさが拘束応力に比べかなり小さいため、サクシオン応力の拘束応力としての作用が確認されなかった可能性が考えられる。あるいは、先行圧縮応力以上の拘束応力ではサクシオン応力による影響は消失する可能性も考えられる。現在まで、サクシオン応力の拘束応力としての作用がサクシオン一定の三軸圧縮試験結果より指摘されなかった理由として、以上のような可能性が考えられる。

5. 結論

不飽和状態の土に作用しているサクシオンは、強度に対して粘着力を増加することが、三軸圧縮試験結果より知られている。その事実は排水条件下の試験結果に基づいており、非排水条件下において発揮される強度に対するサクシオンの影響に関しては、実験データも少なく未解明な状態にあると考えられる。本論文においては、一定エネルギーで締固めた供試体を用いてサクシオンおよび体積変化を測定した一軸圧縮試験を行い、サクシオンの影響について検討した。得られた結論は以下のようにまとめられる。

1. 破壊時サクシオンと飽和度の関係は、供試体の初期飽和度の大きさにかかわらず、含水比17%で締固めて作製した供試体より得られる水分特性曲線付近に分布した。
2. 式(9)により定義されるサクシオン応力と破壊時サクシオン関係の実測値は、水分特性曲線に基づく同じ関係の予測値と近い傾向を示した。サクシオン応力が粘着力と関連することを考慮すると、この結果は、サクシオンと体積変化を測定する一軸圧縮試験を行うことにより、サクシオン～粘着力関係が予測できることを示している。
3. 式(9)により定義されるサクシオン応力を拘束基底応力とする場合、一軸圧縮強度～サクシオン応力関係は、Fredlund, Morgenstern & Widger

の提案する式(2)で示される不飽和土の強度式の関係を満たすことが確認された。このことは、非排水条件で発揮される強度が、排水条件下の試験結果より得られた強度式により評価できることを示している。

4. 実験で得られた一軸圧縮強度～サクシオン応力関係から判断すると、今回の供試体作製方法で得られた締め固め供試体については、過圧密土に顕著である粒子間引力による破壊線の形状への影響が少なかったものと考えられる。さらにこの結果は、一軸圧縮試験のような拘束外応力がない場合には、サクシオン応力は拘束応力として作用していることを意味しているものと考えられる。なお、現在まで、サクシオン応力の拘束応力としての作用がサクシオン一定の三軸圧縮試験結果より指摘されなかった理由として、三軸圧縮試験が先行圧縮応力以上の拘束応力条件のもとで行われていること、あるいは、先行圧縮応力以上の拘束応力ではサクシオン応力による影響は消失する可能性が考えられることが挙げられる。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、著者らが常に御助言いただいている神戸大学名誉教授 軽部大蔵 先生および神戸大学工学部 飯塚 敦 助教授、ならびに長岡工業高等専門学校学校長 小川正二 教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 阿部廣史：不飽和土の力学特性の評価方法に関する実験的研究，東京大学学位論文，1994.
- 2) Vanapalli.S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, M.D. and Clifton, A.W.: Model for prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can. Geotech. Journal*. Vol.33. No.3 pp379-392. 1996.
- 3) 河井克之：水分特性曲線のモデル化および不飽和土における土骨格と土中水の練成問題，神戸大学学位論文，2001.
- 4) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated. *Can. Geotech. Journal*. Vol.15. pp.313- 321. 1978.
- 5) Bjerrum, L.:Problems of soil mechanics and construction on soft clay and structurally unstable soils. *Proc.8th ICSMFE*. Vol.3. pp.111-159. 1973.
- 6) Shogaki, T.: Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests. *Soils and Foundations*. Vol.35. No.1. pp.169-171. 1995.

- 7) 三田地利之，工藤 豊：サクシオンと一軸圧縮強度に基づく粘非排水強度推定法，土木学会論文集，No.541/III-35, pp.147-158, 1996.
- 8) Shimizu, M. and Tabuchi, T.:Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests. *Soils and Foundations*. Vol.33. No.3. pp.28-39. 1993.
- 9) 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，No.370/III-5, pp.179-188, 1986.
- 10) Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons. pp.220. 1993.
- 11) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*. Vol.40. No. 3. pp.405-430. 1990.
- 12) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils. *Soils and Foundations*. Vol.33. No.4. pp.49-63. 1993.
- 13) Kato,S.: A constitutive model for unsaturated soil based on Modified ISMP, *Proc. 14th ICSMFE*. Vol.1, pp.691-694. 1997.
- 14) Bishop, A.W.: The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad*. Vol.39. pp.859-863. 1959.
- 15) 軽部大蔵，加藤正司，浜田耕一，本田道識：不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について，土木学会論文集，No.535/III-34, pp.83-92, 1996.
- 16) 軽部大蔵，本田道識，加藤正司，鶴ヶ崎和博：不飽和土のせん断挙動と間隙水状態の関係について，土木学会論文集，Vol.575/III-40, pp.49-58,1997.
- 17) 阿部廣史，畠山正則：不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験の結果について，不飽和地盤の調査・設計・施工に関するシンポジウム発表論文集，pp.23-58, 1993.
- 18) 寸田 亘：平成 10 年度神戸大学工学部卒業論文，1999.
- 19) van Genuchten, M. Th.:A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.44. pp.892-898. 1980.
- 20) 孫 徳安：粘着成分を有する摩擦性粒状材料の変形・強度特性に関する研究，名古屋工業大学学位論文，1993.
- 21) Leroueil, S. and Vaughan, P.R.:The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique*. Vol.40 No.3. pp.467-488. 1990.

(2000. 10. 18 受付)

EFFECTS OF SUCTION ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF UNCONFINED COMPRESSION TEST FOR A COMPACTED SILTY CLAY

Shoji KATO, Yuji YOSHIMURA, Katsuyuki KAWAI and Wataru SUNDEN

Using the silty clay specimens that were compacted in the constant energy under various water contents, unconfined compression test, in which suction and volume change of specimen were measured, was carried out. The obtained stress-strain relations showed the tendency that depends on the initial degrees of saturation of the specimens. The measured relation between the suction stress and suction at failure showed similar tendency with the predicted ones based on the water content characteristic curve. This result means the possibility of estimating the suction vs. the adhesive force relation by unconfined compression test. And, when the suction stress was taken into account as a confining net stress, the stress state at failure followed the failure criterion for unsaturated soil proposed by Fredlund, Morgenstern & Widger. This result of silty clay means that the undrained strength follows the failure criterion based on the test results test under drained condition.