

不飽和土の圧縮特性に及ぼす 間隙水分布の影響に関する研究

加藤正司¹・軽部大蔵²・本田道識³・藤原照幸⁴

¹ 正会員	工修	神戸大学大学院助手	自然科学研究科	(〒657兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
² 正会員	工博	神戸大学教授	工学部建設学科	(〒657兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
³ 正会員	工修	株式会社日建設計	土木設計事務所調査部	(〒112東京都文京区後楽1-4-27)
⁴ 正会員	工修	神戸大学助手	工学部建設学科	(〒657兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

水分特性曲線におけるヒステリシスに示されるように、不飽和土の含水状態はそのサクシオンと対応していない。本論文ではこのような間隙水分布の違いが不飽和土の圧縮特性に及ぼす影響について述べている。まず、簡単な粒子モデルに基づき間隙水分布と粒子間力の関係について検討し、続いて、その粒子間力に基づき定義されるサクシオン応力について考察を加えた。また、間隙水分布がサクシオン応力に与える影響の違いを考慮した塑性体積ひずみ式を提案した。そして、間隙水分布の異なる不飽和供試体を用いてサクシオン一定の等方圧縮試験を実施し、体積変化挙動や含水比挙動の違いを実証した。

Key Words : *unsaturated soil, water content, hysteresis, isotropic compression*

1. まえがき

不飽和土は気相、液相、固相の3相から成っている。そして、気相と液相の境界面の存在により、間隙空気圧と間隙水圧に圧力差、すなわちサクシオンを生じている。このサクシオンの影響により、不飽和土の力学的挙動はコラプス（水浸沈下）に示されるように飽和土に比べて複雑なものとなっている。

サクシオンと含水量（含水比や飽和度）の関係は水分特性曲線と呼ばれ、脱水過程（サクシオン増加過程）と吸水過程（サクシオン減少過程）の間に大きなヒステリシスを生じることが知られている。ヒステリシスには土の間隙径が影響しており、脱水過程では大きな間隙中の間隙水（バルク水と呼ぶ）から順に排水され、土中水は粒子接点にメニスカス水を残して排出されていく。一方、吸水過程では、このメニスカスが徐々に大きくなる。このように脱水過程と吸水過程においては吸排水パターンが異なっていると考えられ¹⁾、土が脱水過程にある場合はバルク水が多く存在し、吸水過程にある場合にはメニスカス水が多く存在することになる。

本論文は、このようなサクシオン履歴を受けた場合に生じる間隙水分布の違いが不飽和土の圧縮特性に与える影響を明らかにすることを目的としている。このためにまず単純化された粒子モデルに基づいて間隙水分布による粒子間に作用する力の違いについて考察を加えた。次に間隙水分布の異なる場合に

ける等方応力条件下での塑性ひずみ式を提案した。最後に、間隙水分布が異なった不飽和土供試体についてサクシオン一定の等方圧縮試験を行い、圧縮特性や吸排水挙動に与える間隙水分布の影響について検討を加えた。

なお、以下では次の記号を用いるものとする。

- σ ; 全応力表示の垂直応力
- p_T ; 全応力表示の平均主応力
- u_a ; 間隙空気圧
- u_w ; 間隙水圧
- p ; net stress ($p = p_T - u_a$)
- s ; サクシオン ($s = u_a - u_w$)

2. 間隙水分布の違いがサクシオンの効果へ与える影響

間隙水分布と粒子間力の大きさの関係について考察するために、図-1(a)、(b)に示すような間隙水分布の異なる3粒子モデル²⁾を考える。ただし、簡単のために粒子として等大径の円柱(2次元モデル)を考える。図-1(a)ではメニスカス水は互いに独立した状態にある。ここで番号1の粒子(上段の粒子)と他の粒子との2つの接点では、粒子接平面に垂直な方向にメニスカスによる圧縮内力 p_2 、 p_3 がそれぞれ作用しているから、結局粒子1にはそれらの合力 f_1 が作用することになる。一方、図-1(b)では

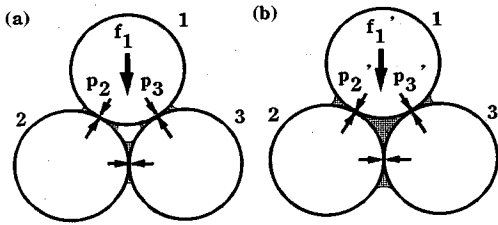


図-1 3粒子モデルでの間隙水分布と圧縮内力

3粒子がつくる間隙（バルク）を水（バルク水）が満たしている。この場合、粒子1に付着している左右のメニスカスを結ぶ線に垂直な方向に内力 f_1' が作用する。したがって、粒子1と他の粒子との2つの接点では、合力 f_1' の分力が圧縮内力 p_2' 、 p_3' としてそれぞれ作用することになる。図-2は、図-1(a), (b)のそれぞれの場合について、粒子1の接点に作用する圧縮内力を粒子直径で除した力とサクシジョンの関係を示している。（計算手順は付録-1を参照のこと。）この計算ではサクシジョンの大きさにかかわらず間隙水の分布状態は不変としている。このためサクシジョンが0となっても、メニスカスの方向に作用する表面張力のため、圧縮内力は0とはならない。しかし、実際にはバルク水はサクシジョンが増加していくと、突然に消失してメニスカスが独立する（図-1(a)）と考えられる。すなわち、図-2中のサクシジョン増加過程（実線）では、水分特性曲線に示される空気侵入値に対応するサクシジョンの大きさ（B点）になると実線（A→B）から点線へと乗り移る（B→C）と考えられる。そして、サクシジョン減少過程では破線にそって変化する（D→E）というヒステリシスを示すと考えられる。さらに、サクシジョンが減少すると、水分特性曲線に示される水侵入値に対応するサクシジョンの大きさ（E点）になると点線から実線へと乗り移り（E→F）、間隙が水に満たされると考えられる。（B点、E点でのサクシジョン値は、図-2のモデルからは求められない。）結局、図-1の3粒子モデルから次の結論が得られる。①サクシジョンがある程度以上大きくなると、バルク水を持つ方が粒子間力は大きい、②粒子間力は、いずれの場合も接点を通る垂直力となる。しかし、②は一般的結論ではない。例えば図-3は、上下粒子の間にわずかな隙間がある4粒子モデルである。このような場合でも、図-3(a)のように間隙水がメニスカス水だけである場合は、粒子間力は垂直力のみで剛性を付与している。ところが図-3(b)のようにバルク水が存在すると、各接点にせん断力

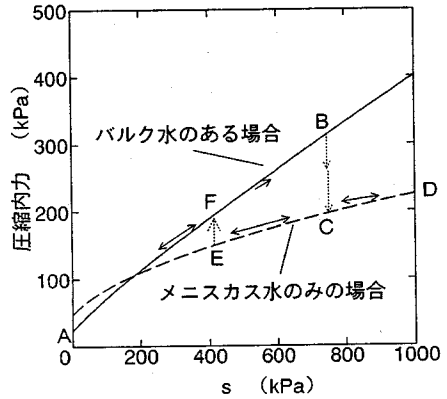


図-2 サクシジョンと圧縮内力の関係

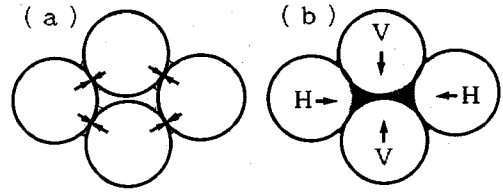


図-3 4粒子モデルの粒子間力

が発生するためにモデルは不安定となる。たとえば、メニスカスの先端の位置と土粒子接点が粒子の中心に対して 30° を成す場合粒子はモデルの中心に向かって $H = \sqrt{3}(R \cdot s + T)$ の水平力を受け、上下の粒子は $V = 2(R \cdot s + T)$ の鉛直力を受ける（ただし、 R ：粒子の半径、 T ：水の表面張力。水平力 H および垂直力 V の誘導は付録-2参照のこと）。このために、接点には垂直力 $N = (1/2)(R \cdot s + T)$ 、せん断力 $F = (\sqrt{3}/2)(R \cdot s + T)$ が作用することになる。したがって粒子表面の摩擦角が $\phi \geq 60^\circ$ でないと、上下の粒子は接触してしまい、コラプスを起こす。このようにバルク水は粒子間力を増大させるが、必ずしも土粒子骨格を保持するように作用するわけではない。

3. 等方応力下の体積ひずみに関する理論

(1) 従来の研究

Bishop³⁾ は不飽和土と飽和土の破壊強度の違いが、サクシジョンの有効応力への影響に起因すると考え、次の有効応力式を提案した。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

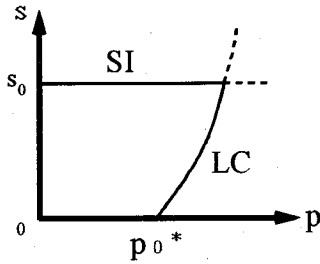


図-4 アロンソら⁹⁾の降伏線

ここに、 σ' ; 有効応力

α ; 飽和度と土のタイプに依存する係数

この式は、土骨格の断面に作用する垂直応力を表しているが、土の塑性的な体積圧縮を表現できないことが明らかとなった⁴⁾。そこで、式(1)の右辺の2つの応力項 ($\sigma - u_a$) と ($u_a - u_w$) を独立応力成分として扱うことがColeman⁵⁾によって提案され、Matyasら⁹⁾によって一次元圧縮試験の解析に適用されて以来、今日に至るまで主流となっている⁷⁾。

不飽和土を弾塑性体近似する試みは、軽部⁸⁾によって始められた。ここでは、すべての間隙水を土粒子接点を取巻くメニスカス水として扱うという限界はあったが、しかし、土骨格を圧縮する応力成分として ($\sigma - u_a$) を位置付け、同時に、せん断強度と土の剛性を表す応力成分として式(1)を位置付けて両成分を使い分けるといふ、本論文に繋がる方法を提起していた。

一方、Alonsoらは⁹⁾、上述の主流を発展させて飽和状態も含む土の力学モデルを提案した。すなわち、不飽和土に作用する等方応力成分を $p = p_T - u_a$ とサクシオン s そのものの2成分とし、 $p \sim s$ 応力面上に降伏線を仮定した。そして、弾塑性状態における f (体積比) $\sim \log_e p$ 線の勾配 λ を s の減少関数、また、降伏応力 p_0 を s の増加関数とし、一方、弾性領域内で p と s にそれぞれ対応する膨張指数 κ と κ_s (各一定値) を定義して、図-4に示す降伏線 LCを得た。さらに、サクシオンの増加によって生じる塑性降伏に対しても、図-4にSIで示す降伏線 $s = s_0$ (過去に受けた最大のサクシオン) を設定した。そして、これら2つの降伏線の位置は塑性体積ひずみをパラメータとして連動するとしたが、塑性体積ひずみに対する連動の割合については予測していない。

向後ら¹⁰⁾は、等価間隙圧を定義して、これを全応力から差し引いて有効応力とした。ここで、等価間隙圧はサクシオン \sim せん断強度増分関係に関する

経験式を含んでおり、したがって、この有効応力は本質的にはBishopの式(1)と同じになる。しかし、Bishopの式は前述のように塑性体積ひずみの説明に用いられない、それを補うために、向後らは新たに状態境界面 (SBS) をサクシオンと有効応力の経験式として定義した。向後らの理論は、このようにサクシオンを変数とする2つの経験式を含んでいるが、これらに水分特性曲線のヒステリシスは考慮されていない。なお、SBSの経験式において、圧縮指数 λ がサクシオンの減少関数とされているのは、本論文の図-21(a)に示した著者らの試験結果と一致しない。

軽部ら¹¹⁾は、飽和状態を含む土の応力 \sim ひずみ式を導くために、サクシオンによって発生する等方圧縮応力 = サクシオン応力 p_s をバルク応力 p_b とメニスカス応力 p_m に分け、これらを用いて土のひずみを記述する等方応力として次の2つを定義した：

$$\begin{aligned} \text{骨格載荷応力} : p' &= p + p_b \\ &= (p_T - u_a) + p_b \quad (2) \\ \text{骨格断面応力} : p' + p_m &= p + p_s \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、 p_b : 土粒子骨格の空間を占める間隙水 (バルク水) による応力

p_m : 土粒子接点の周りのメニスカス水による応力

なお、当時は式(3)の名称はなく単にBishopの有効応力に相当する応力として扱っていた。また、 p_s は与えられた試料の破壊線の p 軸切片から求めることとし、その内訳を表すために次の R を定義したが、 R の決定方法は未開発であった。

$$p_b = R \cdot p_s \quad (4)$$

$$p_m = (1 - R) p_s \quad (5)$$

軽部らが、サクシオンに起因するこれら3つの応力と水分特性曲線を定量的に関係付けたのは1995年である⁷⁾。続いて、水分特性曲線と力学的挙動の関係の概略を述べた論文 (本論文では「第1論文」と呼んでいる) が本論文に先行して発表された¹²⁾。

(2) 間隙水分布を考慮した場合の塑性体積ひずみの考え方

飽和土が弾塑性状態にある場合の間隙比 e と平均有効応力 p' の関係は、経験的に次式で与えられる。

$$e = e_1 - C \log_{10}(p' / p'_1) \quad (6)$$

ここに、 C_c : 圧縮指数

e_1 : 任意の基準平均有効応力 p'_1 における間隙比.

式(6)を p' で微分すると

$$-\frac{dp'}{de} = \frac{2.303}{C_c} p' \quad (7)$$

上式は、土の硬さ ($-dp'/de$) が、作用有効応力 p' に比例することを示している。つまり、 p' は土に対する作用圧力として土を圧縮させるとともに、土の硬さの源泉ともなっているわけである。

不飽和土の場合、土の骨格を圧縮する応力成分は $p' = p + p_b$ であり、また、骨格の硬さは土粒子接点における垂直応力 $p' + p_m = p + p_b + p_m = p + p_s$ に比例するであろう。したがって、

$$-\frac{\partial p'}{\partial e} = \frac{2.303}{C_c} (p' + p_m) \quad (8)$$

従来、不飽和土の圧縮挙動を調べるために、圧密リングや三軸圧縮試験機を用いた圧密水浸試験が数多く行われてきたが、これらの結論の一つに、「水浸後の間隙比と作用応力の関係は、水浸以前の応力履歴によらず一致する」がある⁴⁾。そこで、不飽和土の塑性体積ひずみは、 $p' \sim p_m$ 応力面上で応力経路によらず状態量として与えられると仮定すると、式(8)は次のように書き直される。

$$\frac{dv^p}{dp'} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{p' + p_m} \quad (9)$$

ここに、 dv^p : 塑性体積ひずみ増分、

λ と κ : 自然対数表示時の圧縮指数と膨潤指数 ($\lambda = 0.4343 C_c$, $\kappa = 0.4343 C_s$),

e_0 : 体積ひずみゼロにおける間隙比.

状態量を求める計算であるから、 p_m を一定値として積分すると、

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \log_e(p' + p_m) + B \quad (10)$$

積分定数 B は土の初期降伏条件によって決定される。今、初期降伏線が $p' \sim p_m$ 面上で次式のように定義

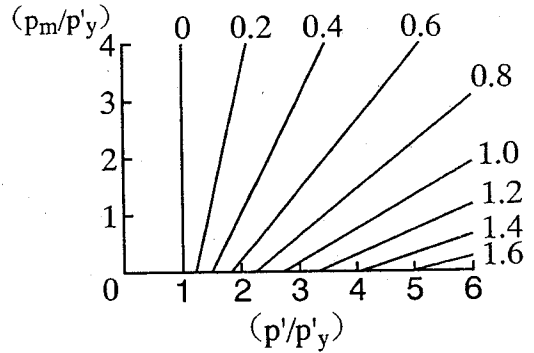


図-5 $p' \sim p_m$ 面上の等塑性ひずみ線
(図中の数値は式(13)の [] 内の値)

されたとする。

$$p' = p'_{y0} + a p_m \quad (11)$$

ここに、 p'_{y0} と a は試料によって決まる正の実験定数

したがって、式(10)は次式となる。

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \log_e \frac{p' + p_m}{p'_{y0} + (a+1)p_m} \quad (12)$$

上式において注意すべきは、式中の p_m は v^p を求める時点の p_m であって、初期降伏時の値とは係わりがないことである。

さて、式(12)を $p' \sim p_m$ 面上の等塑性ひずみ線として表してみる。簡単のために、次のひずみ指標 H を導入する：

$$H = \exp\left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \cdot v^p\right) = \frac{p' + p_m}{p'_{y0} + (a+1)p_m} \quad (13)$$

$$\therefore p_m = \left(\frac{1}{H(a+1) - 1}\right) p' - \left(\frac{H}{H(a+1) - 1}\right) p'_{y0} \quad (14)$$

図-5は、簡単のために $a = 0$ のときの式(14)を表している。このとき、初期降伏線は次式となる。

$$p' = p'_{y0} \quad (11a)$$

ここに、 p'_{y0} : 初期降伏応力

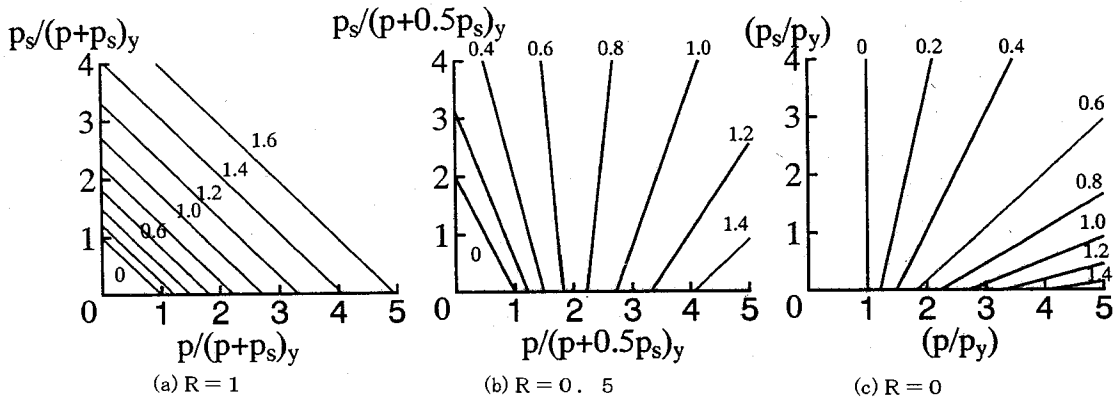


図-6 間隙水分布が塑性ひずみに与える影響
(図中の数値は式(13)の〔 〕内の値)

また、式(4)、(5)で定義したRを用いて式(13)を書き直すと、 $a = 0$ の場合、

$$p_s = \frac{1}{H(1-R)-1} p - \frac{H}{H(1-R)} (p + R \cdot p_s) \quad (15)$$

ただし、 $(p + R \cdot p_s)_y$ は、初期降伏時における $(p + R \cdot p_s)$ である。図-5や式(15)において、 $a = 0$ の場合を例示した理由は、後に5.(3)に示すように、実測した圧縮曲線から逆算した降伏応力の値が $a = 0$ とにおいても不自然ではないためである(表-2参照)。

図-6は、式(15)にRの代表的な値を代入して得られた $p \sim p_s$ 面上の等塑性体積ひずみ線を示している。(a)はサクシオン応力 p_s が外部作用応力 p と同質の場合であって、サクシオンの減少は膨脹を引き起こす。間隙空気が気泡状に存在する場合に相当する。(c)は、サクシオンの減少が直ちにコラプスを引き起こす場合である。間隙水が吸着水とメニスカス水のみから成る場合に相当する。(b)は、両者の中間的な場合であって、 p が大きい範囲でコラプスが発生し得る。軽部ら¹³⁾は、(a)がビショップの有効応力の概念に一致することから、この状態を「ビショップの不飽和土」、(c)を理想不飽和土と呼んでいる。

4. 締固め試料とスラリー試料の比較試験

サクシオン応力 p_s に占めるバルク応力 p_o の割合を表すRが土の圧縮挙動に与える影響を実証するために、Rが小さいと思われる締固め試料と $R \approx 1$ と思われるスラリー試料を同一の応力経路で等方荷荷し、これに伴う体積および含水比の変化を測定した。

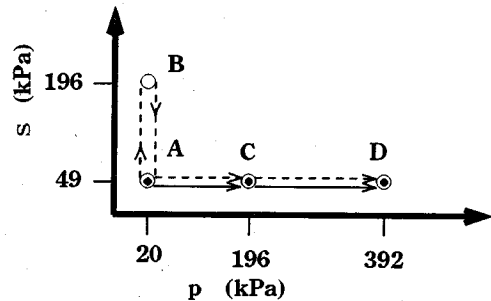


図-7 試験応力経路

(1) 試験方法

スラリー試料は、先行する「第1論文¹²⁾」で用いたものと同じであり、市販の乾燥粉末土「No.5クレイ」をスラリー化したものである。一方、締固め試料は、同じ原材料に霧吹きで含水比 $w = 26\%$ ($w < w_{opt}$)になるまで加湿した後、四つ割モールドに5層に分けて入れ、断面積 1.23cm^2 の突き棒で40Nの力を各層15回ずつ加えた。供試体寸法は、両者とも高さ80mm、直径35mmである。これらの供試体を、文献12) Fig.1に示した不飽和土用三軸圧縮試験機に設置し、図-7に示す応力経路で試験した。初期応力状態は点A ($p = 20\text{kPa}$, $s = 49\text{kPa}$)であり、すべての供試体を $s = 49\text{kPa}$ に保って、 p を点CまたはDまで増加させた。ただし、一部の供試体については、これに先立って、 $A \rightarrow B$ ($p = 20\text{kPa}$, $s = 196\text{kPa}$) $\rightarrow A$ の先行サクシオン履歴を与えた。なお各段階の荷重時間としては、スラリー試料の場合は排水量が落ち着くのを待って次の段階へ移った。締固めた供試体の場合は、各荷重段階を排水量が落ち着くのに十分な時間である8時間とした。

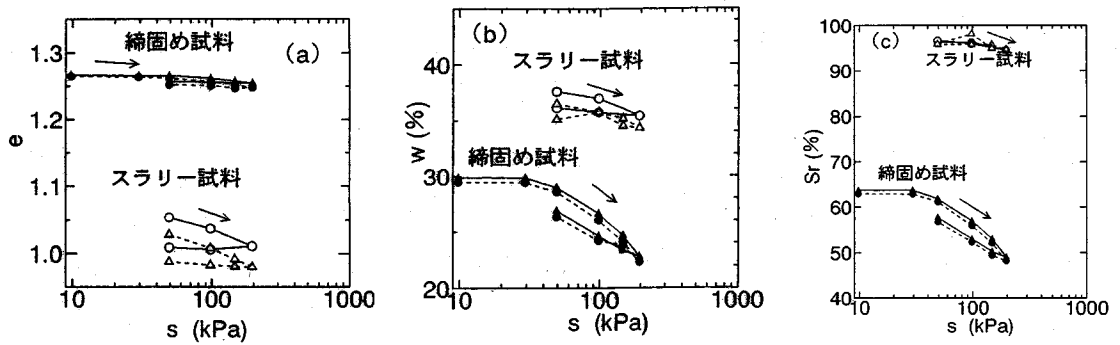


図-8 サクション荷重過程における (a)間隙比 (b)含水比 (c)飽和度

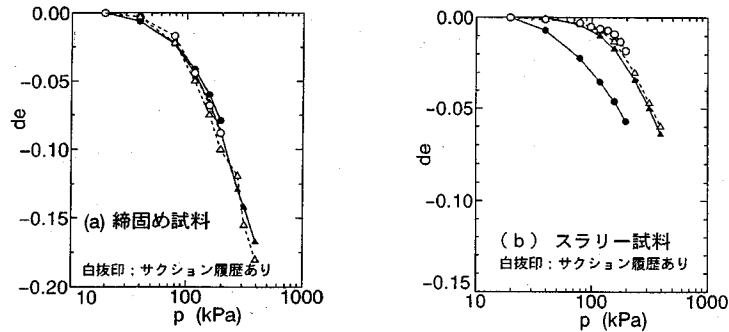


図-9 p 荷重過程における間隙比変化

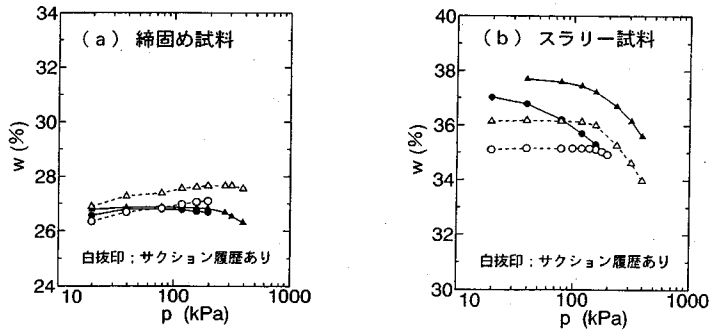


図-10 p 荷重過程における含水比変化

(2) 試験結果

図-8は、一部の供試体（締固め、スラリー各2個）に与えた先行サクシジョン履歴中の(a)間隙比 e 、(b)含水比 w 、(c)飽和度 S_r を表している。図-8(c)によれば、スラリー供試体の飽和度は、 $s=196$ kPaを作用させても $S_r \approx 95\%$ に留まってしまった。一方、締固め供試体の飽和度はかなり変化しているが、可逆性が強い。図-8(a)によればスラリー供試体はかなり圧密を起こしている。これは、飽和に近いために s がほぼ完全に p' に換算されるためであろう。一方、締固め供試体の間隙比は初期間隙比が $e \approx 1.25$ と大きいにも拘わらずサクシジョンの変化にほとんど反応していない。図-8(b)に示されるスラリー供試体の含水比は変化は、図-8(c)に示

すように飽和度が100%に近いことから、飽和土の間隙比変化に見合っていると考えられる。一方、締固め供試体の含水比はかなり変化しているが可逆成分が目立っている。図-9は、図-7に示す応力経路のA点から発する p 荷重経路A→C→Dにおける間隙比変化を表している。（白抜印：先行サクシジョン履歴のあるもの。黒塗印：履歴のないもの。）図-9(a)に示す締固め試料では、先行サクシジョン履歴は圧密曲線に影響していない。また降伏応力は不明瞭であるが、100kPa付近であると思われる。一方、(b)のスラリー試料では、先行サクシジョン履歴のある供試体（白抜印）が $p=100 \sim 200$ kPaの間で明確な急曲点を示している。しかし、サクシジョン履歴のないもの（黒塗印）では、試料作製時の推定平均主

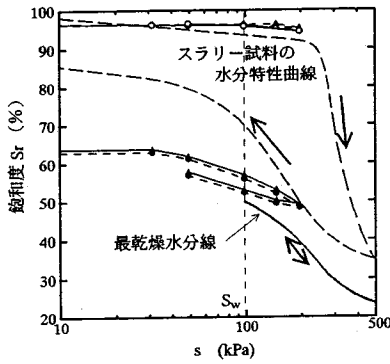


図-11 水分特性曲線の検討

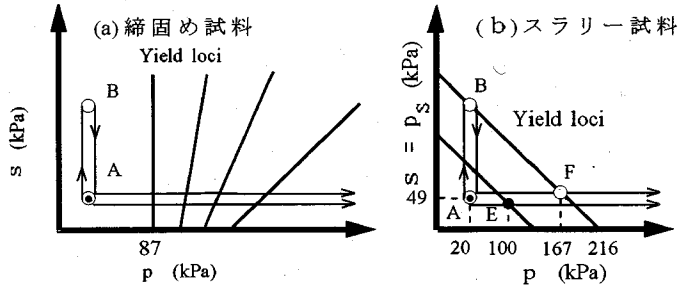


図-12 実験の応力経路と等塑性ひずみ線

表-1 試験条件

試験番号	サクシオン過程終了時					圧密圧力 p
	s	e	w(%)	S_r (%)		
シリーズ I	I-1	294*	0.885	15.56	47.48	294
	I-2	294	0.853	24.13	76.37	294
	I-3	294*	0.888	12.75	38.77	490
	I-4	294	0.873	24.14	74.68	490
	I-5	294	0.915	23.69	70.07	196
シリーズ II	II-1	245	0.931	28.79	83.46	245
	II-2	245*	0.869	14.57	45.24	441
	II-3	245	0.916	29.12	85.81	441
	II-4	245	0.938	28.84	83.05	441
シリーズ III	III-1	0	0.961	35.61	100.00	245
	III-2	0	1.005	36.04	96.82	441
	III-3	0	1.033	36.61	95.70	637
	III-4	0	1.010	37.39	100.00	245
	III-5	0	1.017	36.59	97.18	441

*applied max. $s=490\text{kPa}$, unit of s & p : kPa

応力が $p=209\text{kPa}$ であるにも拘わらず、曲線の形から降伏応力を判定するのは困難である。図-10は p 載荷試験中の含水比 w を表している。(a)の締固め供試体では、 w は殆ど変化していない。したがって飽和度は、この間の間隙比の減少により 5~6% 増加することとなる。一方、スラリー供試体の含水比は、図-10(b)に示すように図-9(b)の間隙比挙動と同様になったので、飽和度の変化量は 0~+1% に留まっている。

(3) 試験結果の検討

図-11は図-9(c)に、スラリー試料の水分特性曲線と最乾燥水分線を記入したものであって、文献12)のFig. 4を転記した。最乾燥水分線はバルク水を持たない ($R=0$) 水分特性曲線であって、水侵入値 ($\approx 100\text{kPa}$) までしか定義されていない。図-11より、スラリー供試体 (白抜印) が、ほぼ飽和状態を保った理由は、先行サクシオン $s=196\text{kPa}$ が供試体の A. E. V ($s_A \approx 245\text{kPa}$) に達しなかったためと

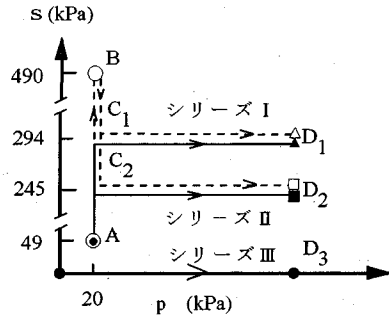


図-13 高サクシオン下の実験経路

わかる。したがって $R=1$ である。つぎに、締固め供試体 (黒塗印) は、最乾燥水分線の近くにあり従って $R \approx 0$ と仮定できると考えられる。つぎに、試験結果と間隙水分分布の影響を考慮した場合に理論的に誘導される等塑性ひずみ線 (図-6) との比較を行う。締固め試料の場合、同じ方法で作製した供試体の初期降伏応力は $p'_y=87\text{kPa}$ と推定されている¹⁴⁾。したがって、図-7の応力経路図に等塑性ひずみ線を記入すると図-12(a)の概念図のようになる。先行サクシオン履歴 (A→B→A) は弾性領域内にあったことがわかる。したがって、サクシオン履歴がひずみに影響しないという図-9(a)が支持される。一方、スラリー試料の場合、初期降伏線の位置が不明確であるが、仮に図-9(b)において先行サクシオンのない供試体 (黒塗印) の降伏応力が $p_y=100\text{kPa}$ とすると、図-12(b)の概念図が得られる。図中、Eは先行サクシオン履歴のない供試体の仮定降伏点、Fは履歴のある供試体 (白抜印) の降伏点 ($p=167\text{kPa}$, $p_s=49\text{kPa}$) であり、したがって図-9(b)の白抜印の挙動が支持される。

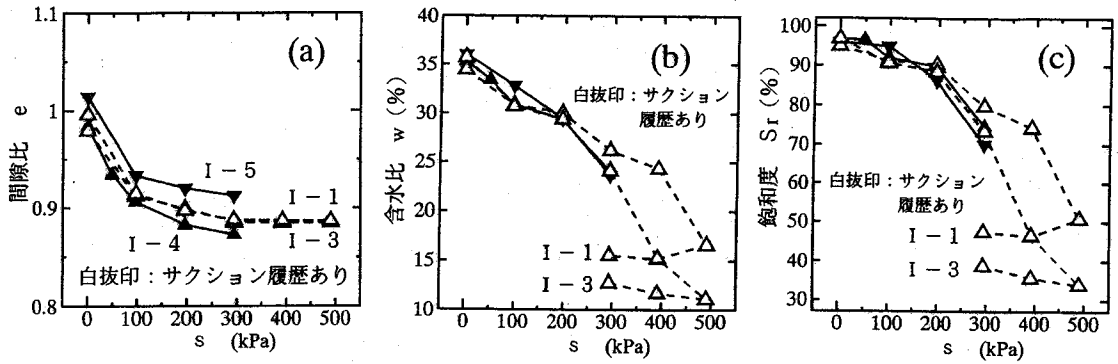


図-14 サクシオン荷重過程における (a)間隙比 (b)含水比 (c)飽和度 (シリーズI)

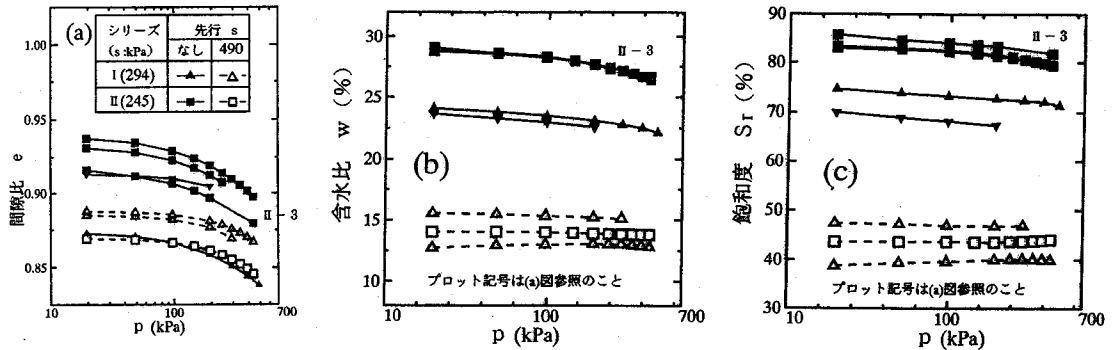


図-15 p 荷重過程における (a)間隙比 (b)含水比 (c)飽和度 (シリーズII)

5. スラリー試料の等方圧縮試験

(1) 試験方法

図-11に示した水分特性曲線より、スラリー試料の空気侵入値 (A. E. V.) が $s_A = 245 \text{ kPa}$ 付近と判明したので、それ以上のサクシオンの下で等方応力 p を荷重する試験を行った。試験条件は、表-1 (文献12) Table 1を再掲) に示す通りであって、図-13に示す3種類の応力経路の異なる試験シリーズから成っている。試験シリーズI, IIの初期応力条件は、図中の点A ($p = 20, s = 49 \text{ kPa}$) であり、この点を起点に、まず、サクシオン荷重過程として、 s を試験シリーズIでは $s = 294 \text{ kPa}$, IIでは $s = 245 \text{ kPa}$ まで作用させ (A → C_i)、続いて p 荷重過程として、 p を両シリーズとも $p = 196 \sim 490 \text{ kPa}$ まで段階的に増加させた (C_i → D_i)。ただし、一部の供試体に対してはサクシオン荷重過程において、先行サクシオン履歴を与えるために点Aから点B ($p = 20, s = 490 \text{ kPa}$) まで荷重し、その後C_iあるいはC₂まで戻した。また試験シリーズIIIは、サクシオンを作用させない飽和土に対する通常の等方圧縮試験である。

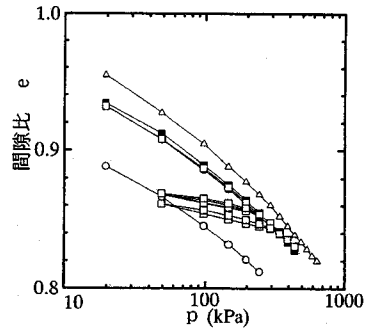


図-16 飽和状態における $e \sim \log p$ 関係

(2) 試験結果

サクシオン過程終了時 (点C_i) における間隙比 e , 含水比 w , 飽和度 S_r は表-1に示す通りである。図-14は s 荷重過程における測定例として試験シリーズIを示している。供試体I-3では、水分特性曲線を得るために各サクシオン段階に十分な時間をかけたが、他の供試体の途中段階では、落ち着く兆しが見えると次の段階へ進んだ。供試体I-3の s 増加過程 (脱水曲線) にBrooks & Coreyの経験式¹⁵⁾を適合させたところ、残留飽和度 $S_{r0} = 13\%$ とな

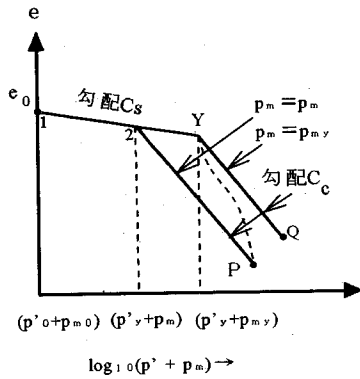


図-17 p 載荷過程の理論関係

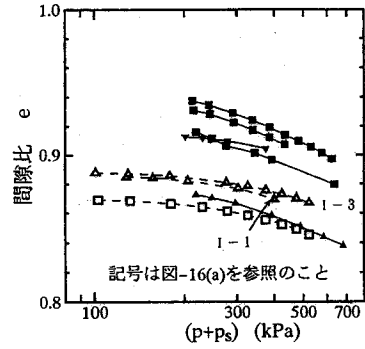


図-18 e ~ log (p + p s) 関係

った。

続く p 載荷過程 (C_i → D_i) における測定値は図-15に示す通りである。ただし、表-1中の供試体 I-2は試験中の制御が乱れて滑らかなデータが得られなかったため、図から省いた。また、II-3は最終段階の441kPaでも変化量はやや少ないようである。図-15(a)の e ~ log p 曲線は終始上に凸の曲線である。また、(b), (c)によれば、含水比と飽和度は先行サクシオン履歴のある供試体では殆ど変化しないのに対して、履歴のない供試体は含水比、飽和度ともに減少している。図-16は、試験シリーズIII (飽和供試体) の e ~ log p 関係である。図上で圧密降伏応力 p_yを決めることは困難であるが少なくとも p が300kPaに達すると直線関係を示している。

(3) 試験結果の検討

弾性体積ひずみ v^e は、次式で与えられるとする

$$v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \log_e \frac{p'+p_m}{p'_0+p_{m0}} \quad (16)$$

ここに、(p' ₀ , p_{m0}) は、ひずみ測定原点 (e = e₀) における (p' , p_m) である。

したがって、弾塑性状態における体積ひずみ v は、式(12)と式(16)の和として式(17)で、間隙比表示では式(18)で与えられることになる：

$$v = \frac{\kappa}{1+e_0} \log_e \frac{p'+p_m}{p'_0+p_{m0}} + \frac{\lambda}{1+e_0} \log_e \frac{p'+p_m}{p'+p_m} \quad (17)$$

$$e = e_0 - C_s \log_{10} \frac{p'+p_m}{p'_0+p_{m0}} - C_c \log_{10} \frac{p'+p_m}{p'+p_m} \quad (18)$$

ただし、 p' ≥ p' _y ≥ p' ₀

図-17は、式(18)を表している。もし、初期降伏点以後もメニスカス応力が一定値 p_{my}を保つならば、供試体の状態経路は 1 → Y → Q で表され、Y → Q 間の勾配は -C_c となる。一方、初期降伏点以後に p_m が変化して現在の応力状態が (p' , p_m) である場合は、その状態点は P で表され、状態経路は 1 → Y → P となる。ところで、p_m は文献12)において式(4.12)の通り仮定されている：

$$p_m = \frac{(100-S_r)(S_{rd}-S_{r0})}{(100-S_{r0})(100-S_{rd})} \times s \quad (4.12)$$

式中、S_{rd}は「最乾燥水分線」の飽和度であって、図-11のように設定されており、s が s_Aより十分大きい場合は文献12)式(3.5)で与えられるから、

$$S_{rd} = (100-S_{r0}) \left(\frac{s_w}{s} \right)^\lambda + S_{r0} \quad (19)$$

ここに、s_w：水侵入値 (本論文では s_w = 98kPa)
λ：吸水曲線の形状を表す指数 (本論文では λ = 1.9)

式(19)を文献12)の式(4.12)に代入すると

$$p_m = \frac{(100-S_r)(s_w/s)^\lambda \times s}{(100-S_{r0})\{1-(s_w/s)^\lambda\}} \quad (20)$$

シリーズ I は s = 294kPa, シリーズ II は s = 245kPa で行われたので、s > s_Aであって式(20)を用いることができる：

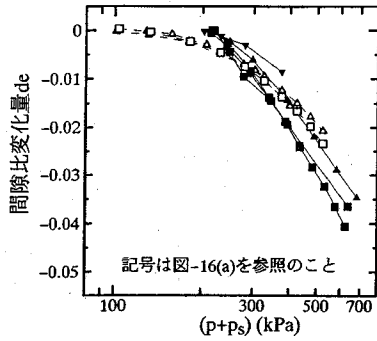


図-19 $\Delta e \sim \log(p + p_s)$ 関係

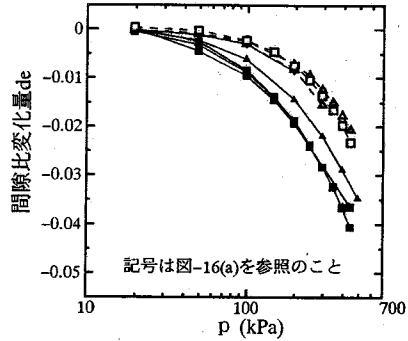


図-20 $\Delta e \sim \log p$ 関係の実測値

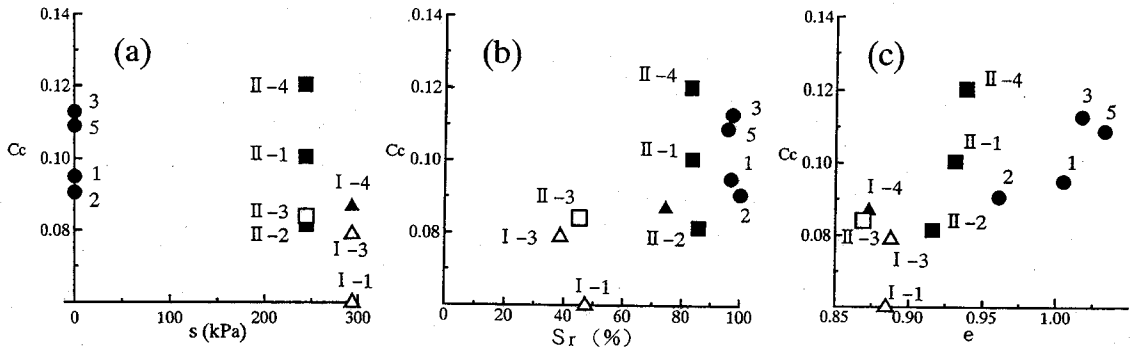


図-21 圧縮指数と (a) サクシオン, (b) 飽和度, (c) 間隙比の関係

$$\text{シリーズ I } p_m = \frac{100 - S_r}{100 - S_{r0}} \times 41.6 \text{ kPa} \quad (21a)$$

$$\text{シリーズ II } p_m = \frac{100 - S_r}{100 - S_{r0}} \times 52.1 \text{ kPa} \quad (22b)$$

また、 S_{r0} は文献12)で論じた水分特性曲線の残留含水比と、本論文供試体 I-3の残留含水比の平均値 $\bar{w}_0 = 5.484\%$ より

$$S_{r0} = \frac{\bar{w}_0}{e} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) = \frac{14.81}{e} (\%) \quad (22)$$

シリーズ I, IIとも p 载荷過程中的の S_r の変化量は +1% ~ -4% と小さいので、 p_m の変動は式 (2.1 a, b) によれば最大 4 kPa であった。したがって、 p_m の変動が $e \sim \log(p' + p_m)$ 関係に及ぼす影響は非常に小さいと思われる。図-18は、 $(p' + p_m) = (p + p_s)$ と e の関係を表している。ただし、 p_s は文献12)の式 (4.15) により供試体の飽和度から算定した。すなわち、

表-2 初期降伏応力の逆算

供試体	$(p' + p_m)_y$	$S_r(\%)$	p_{my}	p'_y
I-1	—	47.3	26	—
I-3	300	39.6	30	270
I-4	280	73.3	13	267
I-5	—	68.2	16	—
II-1	250	82.7	11	239
II-2	300	45.2	34	266
II-3	220	84.2	10	210
II-4	290	82.3	11	279

注) 応力単位: kPa

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \times s \quad (23)$$

図-19は、縦軸を $p = 20 \text{ kPa}$ における間隙比からの変化量にとったものである。白抜印で表した先行サクシオンのある供試体がやや右にずれてはいるが、全曲線がかなり集中しており、また、曲線の形は応力の大きいところで明らかに直線となっている。これらの特徴は、図-15(a)の $e \sim \log p$ をやはり縦軸を間隙比変化量にとって描き直した図-20と比較

すれば明らかである。

図-21は、縦軸に $e \sim \log(p + p_s)$ 関係の直線部の圧縮指数 C_c をとり、横軸を p 増加過程の始点における (a) サクシオン s , (b) 飽和度 S_r , (c) 間隙比 e としたものである。図において供試体 I-1 の C_c が小さい理由は、図-18 からわかるように、最終圧密応力が小さいためである。同じ応力経路の供試体 I-3 に比べると圧縮性はむしろ大きい。全体的に見て、 C_c は (c) の間隙比の影響を受けていると思われる。Alonso ら⁹⁾ や向後ら¹⁰⁾ は、 C_c をサクシオンの関数と見なした理論を提案している。この点、応力を $(p + p_s)$ にとることにより、 C_c はサクシオンの関数でなくなったから仮定を減らすことができた。また、サクシオンの作用下では $e \sim \log p$ 関係は図-20 に示すように直線になりにくいのが、Alonso ら⁹⁾ はこれを直線と見なしている。したがって、実験結果から精度よく C_c を決定することは困難といえる。この点、 $e \sim \log(p + p_s)$ 関係はより直線に近いので好都合である。

最後に、供試体の初期降伏応力 p'_v を $e \sim \log(p + p_s)$ 曲線から求めてみる。まず、シリーズ III (飽和供試体) は、前述のように p'_v は求められない。次に、シリーズ I, II は $s_A = 245 \text{ kPa}$ 付近であるので、 p'_v もこの付近に存在すると推論される。表-2 は図-18 の $e \sim \log(p + p_s)$ 曲線が、図-17 の理論線に内接するとして p'_v を求めた計算表である。表中、 p_{m_v} は各供試体の飽和度から式 (21a) (21b) により計算した。結果は p_m の値に拘わらず $p'_v = 210 \sim 279 \text{ kPa}$ の間に分布しており妥当と思われる。

6. 結論

不飽和土が弾塑性体と見なせる場合の等方圧縮挙動について、理論関係を導き、実験によってそれを検証した。本論文の特徴は、不飽和状態に関する状態面 (SBS) の形状を仮定せず、応力のみによって理論を終始させている点である。本理論によって不飽和状態における $e \sim p$ 関係を予測するためには、飽和状態における $e \sim p$ 関係と、水分特性曲線 (排水・吸水過程における $s \sim S_r$ 関係) が必要である。しかし、従来の研究で指摘したように、Alonso ら⁹⁾ や向後ら¹⁰⁾ の理論において必要されるサクシオン～せん断強度増分関係は不要である。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 水分特性曲線が示す大きなヒステリシスは、バルク水量のヒステリシスによってもたらされる。
- (2) 同一サクシオンの下でも、バルク水 (骨格間の大空隙を占める水) が多い程、骨格に作用する

圧縮力が大きくなる。

- (3) しかし、バルク水がもたらす粒子間圧縮力は、必ずしも現在の骨格を維持する様には作用しない。この点、メニスカス水 (粒子接点の全周を取り巻くメニスカスを構成する間隙水) は現在の骨格構造を維持する様に働く。
- (4) 不飽和土の塑性体積ひずみを、 $p' \sim p_m$ 面上で表した。これによれば、コラプスはサクシオン応力の中のメニスカス応力 (p_m) の減少により引き起こされる。
- (5) バルク応力が卓越する試料とメニスカス応力が卓越する試料のサクシオン載荷及び外力載荷試験を行い、それらのひずみ挙動が理論予測に合致することを示した。
- (6) 本研究で定義した応力を用いることによりサクシオン履歴によらず共通の圧縮ひずみ～圧縮応力関係が得られる可能性がある。圧縮指数 C_c はややばらつくが、初期間隙比と対応するようである。つまり応力を $(p + p_s)$ と定義すれば C_c はサクシオンと無関係な定値をとる可能性がある。

付録-1 図-2 の計算方法について

付図-A1 に示すように等大円柱の 2 粒子モデルにおいて粒子間に水のメニスカスが生じている場合、粒子間に作用する圧縮内力 p_i (単位奥行き当たり) は、力の釣合い式より次式で与えられる。

$$p_i = 2T \cos\{90^\circ - (\alpha + \delta)\} + (u_a - u_w) 2R \sin \alpha \quad (\text{A1})$$

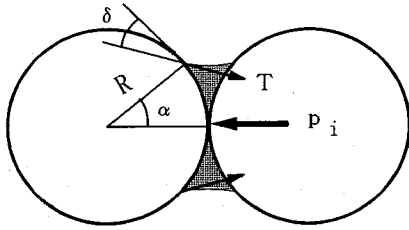
ここに、

- T : 水の表面張力、(水温 20°C で 72.8 dyn/cm)
- α : 粒子接点からメニスカスまでの水の付着角、
- δ : メニスカスの接触角、
- u_a, u_w : 空気圧および水圧、
- R : 粒子半径、

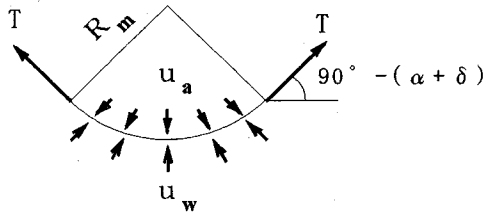
ここで付図-A2 に示すようなメニスカス断面方向の力の釣合いを考えると、空気圧と水圧の圧力差は次式で与えられる。

$$u_a - u_w = \frac{T}{R_m} \quad (\text{A2})$$

ここに、 R_m : メニスカス半径、



付図-A1 2粒子モデルの圧縮内力



付図-A2 メニスカス断面に作用する力

また、メニスカス半径 R_m は幾何学的関係から次式で与えられる。

$$R_m = \frac{r(1-\cos\alpha)}{\cos(\alpha+\delta)} \quad (A3)$$

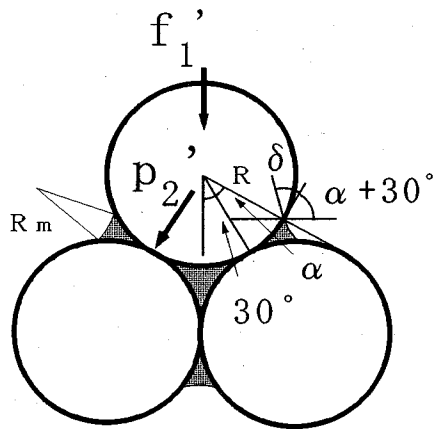
図-1に示す3粒子モデルにおいて、図(a)のメニスカス水のみ場合では圧縮内力 p_2 および p_3 は、式(A1)で示される圧縮内力 p_i に等しい。付図-A3に示すようなバルク水が存在する場合は、合力 f_1' は力の釣り合いから次式で与えられる。(ただし、記号は付図-A2と同様である。)

$$f_1' = 2T\cos\{90^\circ - (\alpha+30^\circ + \delta)\} + (u_a - u_w)2R \sin(\alpha+30^\circ) \quad (A4)$$

この時、圧縮内力 p_2' および p_3' は合力 f_1' を用いて次式により表される。

$$p_2' = p_3' = \frac{f_1'}{2 \cos 30^\circ} \quad (A5)$$

よって、水の付着角 α をパラメータとして、式(A2)からメニスカス水のみの場合の圧縮内力が、式(A4)、(A5)からバルク水のある場合の圧縮内力が求めら



付図-A3 バルク水を持つ3粒子モデルにおける圧縮内力

れ、それぞれ式(A3)で示されるサクシオン ($u_a - u_w$) と関連づけることができる。図-2はこのようにして求めた圧縮内力を粒子直径で除した力とサクシオンの関係を描いたものである。

(なお、図-2の計算においては、 $\phi 3\text{mm}$ のアルミ棒により実測されたメニスカスの接触角 $\delta = 60^\circ$ を用いた。) 図-1の3粒子モデルにおいては式(A3)のサクシオンが0となる角度 α の場合でも、式(A2)、(A4)の第2項は0とならず圧縮内力は存在することになる。

付録-2 水平力Hおよび垂直力Nの誘導

簡単のためにメニスカスの接触角 $\delta = 0^\circ$ とする。上下粒子間の隙間がわずかである場合は、上下方向の2粒子を含む3粒子間の幾何学的形状は付図-A3の粒子配置により近似される。よって、水平力Hは式(A4)において $\alpha = 30^\circ$ とした場合の圧縮内力 p_i で与えられる。また、垂直力Nについては式(A4)において $\alpha = 30^\circ$ とし、さらに右边第2項および第3項中の角度 30° を 60° に置き換えた場合の圧縮内力 p_i と等しくなる。

参考文献

- 1) 土壌物理研究会編：土の物理学，森北出版，pp.222-225，1979.
- 2) 松岡 元，加藤正司：水の表面張力によるアルミ棒積層対の粘着力の微視的考察，粒状体の力学シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.25-28，1993.
- 3) Bishop, A.W. et al.: Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils, *Proc. Colorado Conf.*, pp.503-532, 1960.

- 4) Jennings, J.E. and Burland, J.B.: Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 5) Coleman, J.D.: Stress strain relations for partly saturated soil, *Correspondence to Geotechnique*, Vol.12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 6) Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S.: Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.
- 7) Wheeler, S.J. and Karube, D.: State of the Art Report- Constitutive Modelling, *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.3, 33 pages, 1995.
- 8) Karube, D.: Basic stress-strain relations of unsaturated soil, *Proc. 8th Asian Conf. SMFE*, Vol.1, pp.49-52, 1987.
- 9) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.40, pp.405-430, 1990.
- 10) Kohgo Y., Nakano M. and Miyazaki T.: Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, *Soils & Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 11) 軽部大蔵, 加藤卓彦: サクションと外部載荷応力の繰返し効果について, 繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム論文集, 土質工学会, pp. 35-40, 1990.
- 12) 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.
- 13) Karube D. and Kato S.: An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil, *Proc. of 13th ICSMFE*, Vol.1, pp.43-46, 1994.
- 14) 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹羽尚人: 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, No. 406/III-11, pp. 205-212, 1989.
- 15) Brooks R.H. and Corey A.T.: Property of porous media affecting fluid flow, *ASCE*, IR(92), pp.61-88, 1966.

(1995. 8. 4 受付)

INFLUENCE OF WATER DISTRIBUTION ON THE COMPRESSION BEHAVIOR OF UNSATURATED SOIL

Shoji KATO, Daizo KARUBE, Michinori HONDA
and Teruyuki FUJIWARA

The water content of unsaturated soil does not always correspond to its suction, which results in the extreme hysteresis loop of water characteristic curve. In this paper the influence of different water distribution on the compression behavior of unsaturated soil is examined. On this account, the influence on intergranular forces are examined based on a particle model, and added consideration are given to the effect of suction stress. The isotropic compression tests on specimens of different water distribution under constant suctions were carried out, and the difference of volume change behavior and water content behavior between each specimen were made clear.