

# 締固めた粘性土の等方応力条件下におけるコラプス時の変形特性とコラプス後のせん断特性

加藤正司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 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)

本論文ではコラプス現象を実験的に把握するために、供試体に与えるサクシオンおよび外部載荷応力が明確な不飽和土三軸試験装置を用いて、締固めた粘性土の等方応力条件下の水浸試験を行った。その実験結果を従来の一次元圧縮装置による水浸試験の傾向と比較した。さらに、水浸時の吸水特性および変形特性、ならびに水浸試験より得られる等方応力面上の降伏曲線および水浸後の圧縮せん断挙動について検討を加えた。

**Key Words :** compacted clay, collapse, deformation, isotropic stress state

## 1. はじめに

水浸時に生じる体積圧縮現象（以後、コラプスと呼ぶ）は、不飽和土に特有な現象である。不飽和土の研究はコラプスと深く関わりを持っている。不飽和土の有効応力式として提案された Bishop の有効応力式<sup>1)</sup>は Jennings & Burland<sup>2)</sup> よってコラプスを説明できないとの批判を受け、以後の不飽和土の研究は Bishop 式とコラプスの関係をめぐる議論がその中心となっていたと見ることができる。

軽部<sup>3)</sup>はその論文の中で飽和土における有効応力原理が内力一定条件の限界のもとで成立していることを指摘し、不飽和土における有効応力の考え方とサクシオンの力学定数への影響について述べている。そして、Bishop 式を Coleman の応力～ひずみ関係式<sup>4)</sup>の一部としてを解釈して、その妥当性をサクシオン一定条件下の三軸圧縮試験データに基づいて検討している。その結果、破壊近傍において Bishop 式が成立することを示した。

コラプスに関する研究では、供試体に与えるサクシオンを制御しない一次元圧密試験装置を用いた水浸試験が主流をなしている。その中で Barden ら<sup>5)</sup>は、供試体に与えるサクシオンを制御できる一次元圧縮試験装置により水浸試験を行い、コラプス時の体積ひずみが応力経路に依存せずに発生することを示した。これらの研究では、外応力の一部（側方応力）あるいはサクシオンが未知な状態となっている。このため、そのデータの解釈あるいは解析に当たっ

ては経験的な手法がとられる場合が多い。

一方、三軸試験装置を用いたコラプスに関する研究もいくつかなされている。Lawton ら<sup>6)</sup>は、締固め土を用いた三軸試験装置による異方圧縮状態での水浸試験を行い、一次元圧密試験装置を用いた場合の水浸試験結果<sup>7)</sup>との比較を行った。これらの試験では供試体に与えるサクシオンは制御されていない。また Matyas ら<sup>8)</sup>は、等方応力条件下および  $K_0$  条件下における水浸試験を、サクシオン制御が可能な三軸試験装置により行った。そして、間隙比に関する水浸経路における状態面の存在を示した。さらに、阿部・川上<sup>9)</sup>は、コラプスが生じる水浸時の応力状態について、サクシオン制御が可能な三軸試験装置を用いて検討を行った。そして、実験条件のもとで得られる Bishop 式による有効応力が、挙動を説明できないことを実証した。また、Maswoswe<sup>10)</sup>は、コラプスが生じる水浸時の応力状態について、サクシオン制御が可能な三軸試験装置を用いて詳細に検討した。

近年では以上の研究成果に基づいた、コラプスを含めた変形挙動を説明することのできる不飽和土の構成モデル<sup>11), 12), 13)</sup>が提案されている。しかし、応力およびサクシオンが明確な三軸試験装置により得られたコラプスに関する実験データは上述のように限られている。このため、現在提案されている構成モデルも、コラプス時の挙動をすべて予測できるかは、実証されていない。よって、応力およびサクシオンが明確な条件のもとでの、さらに多くのデー

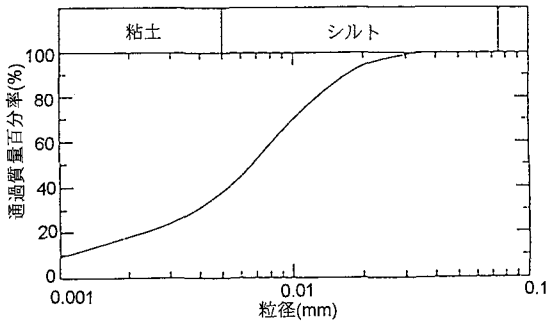


図-1 試料の粒径加積曲線

タの蓄積が必要であると考えられる。

本論文では、三軸試験装置を用いて応力および供試体に与えるサクシオンが既知な等方応力条件での水浸試験を行った。そして、実験結果をもとにコラプス時の変形ならびに吸水特性について検討を加えた。そして、その実験結果を従来の一次元圧縮装置による水浸試験の傾向と比較し、さらに、水浸試験より得られる降伏曲線および水浸後のせん断挙動について検討を行った。

本論文での主な応力については、以下に定義される記号を用いている。

- $\sigma_{ti}$  ; 全応力表示の主応力 ( $i=1, 2$  and  $3$ ),
- $u_a$  ; 間隙空気圧,
- $u_w$  ; 間隙水圧,
- $\sigma_{net\ i} = \sigma_{ti} - u_a$  ; 基底応力 ( $i=1, 2$  and  $3$ ),
- $p = (\sigma_{net\ 1} + \sigma_{net\ 2} + \sigma_{net\ 3})/3$ ; 平均基底応力,
- $s = u_a - u_w$  ; サクシオン.

## 2. 実験装置および実験方法

### (1) 試料および供試体作製方法

不飽和土の実験においてサクシオンの効果を定量的に把握するためには、試料は粒径が小さく粘性の少ないものが望ましい。この点を考慮して、本実験では低塑性な粉末粘土を用いた。この試料は土粒子の密度  $\rho_s = 2.71\text{ g/cm}^3$ 、液性限界  $w_L = 40\%$ 、塑性指数  $I_p = 12.3$  の物理的性質を有する。また、試料の粒径加積曲線を図-1に示す。

約 10 個の供試体作製に必要な量の気乾試料 (約 1.5kg) を大型トレイの上に薄く散布し、目標含水比 26%とするのに必要な量の水を霧吹きで徐々に吹き付けながら試料を攪拌した。加える水は薬剤用純水を使用した。気乾状態の試料に加湿しながら攪

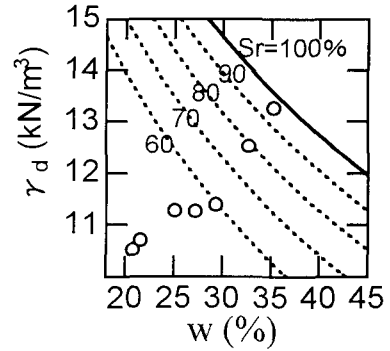


図-2 締固め試験結果

拌すると、塊状の固まりができ始める。この塊状となった試料は砕いて粉状としながら加湿し、試料中の含水比分布ができるだけ均一になるように注意した。このようにして含水比調整された試料を恒温室 (室温  $20^\circ\text{C}$ ) 内の保管用密閉容器の中に保存した。そして、供試体作製時に必要量 (約 150 g) を取り出して使用した。なお試料は、最初の含水比調整を行った翌日に再び含水比を測定し、含水比が目標値と大きく異なる場合は再び同じ方法で含水比調整を行った。

含水比調整した試料を、突き棒 (断面積  $2\text{ cm}^2$ ) と四割りモールドを用いて締固めて、直径  $3.5\text{ cm}$ 、高さ約  $10\text{ cm}$  の円柱供試体を作製した。そして、両端面を成形して高さ  $8\text{ cm}$  の供試体とした。なお、締固めは5層に分けて行い、1層目では約  $40\text{ g}$ 、2層から5層目では約  $25\text{ g}$  の試料をモールド内に投入して、各層 15 回ずつ一定の力 (締固め応力  $= 314\text{ kPa}$ ) を加えて締固めた。各層 15 回の突き棒の締固め位置は、試料断面に様に締固め応力が与えられるように注意した。

このように締固め時の試料の含水比と締固め方法を一定にすることにより、供試体作製時の間隙比および飽和度のばらつきが少なくなるように工夫した。なお、同じ試料を用いた同様な締固め方法で作製された供試体は、過去の研究<sup>14)</sup>から異方性が少ないことが確認されている。以上の供試体作製の作業は、恒温室 ( $20^\circ\text{C}$ ) 内で行われた。図-2は、この方法による締固め試験結果を示している。図中に示した  $S_r = 100\%$  曲線を含めて推測すると、最適含水比は 35%程度となることがわかる。

### (2) 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-3

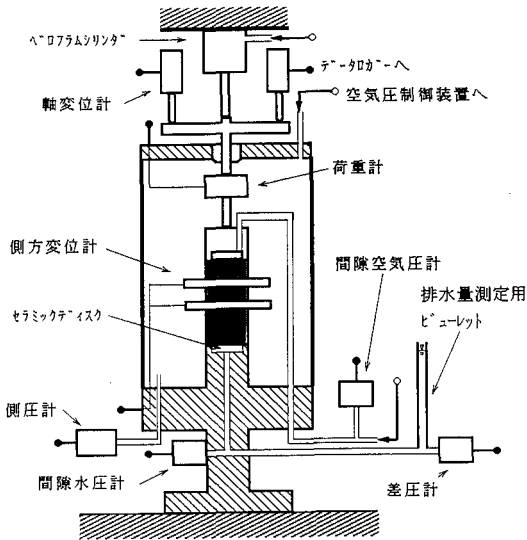
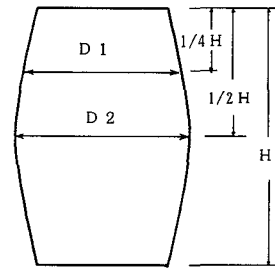


図-3 不飽和土用三軸セルの概要

に示す。不飽和土用三軸セルは、ポーラスストーン  
の代わりに Air Entry Value (空気侵入値) が 275  
kPa のセラミックディスクをペダスタルに埋め込ん  
でいる。

セル内に設置した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に解放され、間隙空気圧は  
載荷キャップに接続したチューブを通して一定空気  
圧を与えることにより制御される。これにより一定  
のサクション (間隙空気圧と間隙水圧の圧力差) を  
供試体に与えることが可能となる。そして、供試体  
に加えられた軸力をロードセルにより測定し、側圧  
をセル圧 (空気圧) としてひずみゲージ式圧力変換  
器により測定した。供試体高さはピストンを通して  
セル外部のひずみゲージ式変位変換器により測定し  
た。また、供試体の吸排水量は排水経路に接続した  
ガラス製ビューレット (容量 5 ml) の液面高さの変  
化として現れる。そして、そのときの液面高さ  
と大気圧との差圧をビューレットに接続された微差  
圧計により測定し、供試体の吸排水量を求めた。

不飽和土の実験で問題となる供試体体積を、本試  
験装置では側方変位計を用いて測定した。側方変位  
計は、供試体の直径方向に取り付ける 2 つのアク  
リル部材と、その部材の両端同士をつなぐ、りん  
青銅の板バネから構成されている。供試体直径の  
変化は、アクリル部材間の距離変化として、りん  
青銅の板バネの曲率変化に現れる。2 枚の板バ  
ネにはひずみゲージが張り付けてあり、この曲率  
変化をひずみ値として出力する。そして、あらか  
じめ求めておいた



二次放物線近似

図-4 側方変位計を用いた供試体体積近似

供試体直径変化～出力ひずみ値関係より、その  
時の供試体直径の変化を知ることができる。この  
直径変化から、測定時の供試体直径を決定する。  
側方変位計による体積測定方法は、供試体高さ  
の 1/4 と 1/2 の点に側方変位計を取り付けて  
供試体直径を測定し、その測定値をもとに供試  
体の変形形状を二次放物線で近似して供試体  
体積を求めるものである。図-4 はその体積近  
似方法の概要を示している。

堤<sup>15)</sup>は、側方変位計を用い、供試体高さの 1/3  
と 2/3 の点に取り付けた場合の供試体体積の  
近似方法について、飽和した豊浦砂の三軸圧縮  
試験により検討を行った。そして、ビューレ  
ット法による供試体体積変化と、側方変位計  
を用いた近似法に基づく供試体体積変化とを  
比較し、その精度を確認した。今回の測定方  
法における側方変位計の取り付け位置は堤<sup>15)</sup>  
の場合と異なっているが、供試体の体積近似  
曲線として両者とも二次放物線を採用してい  
る。よって、今回の測定方法も、同等の測定  
精度を有するものと考えられる。

測定データおよび所定の応力とサクションを  
与えるのに必要な空気圧は、パソコンによ  
り自動計測・制御された。

等方応力条件下の水浸試験の応力経路が図-5  
に示されている。また、表-1 は水浸前の供  
試体作成時の緒元と応力経路を示している。ま  
ず、図中の点 A ( $p=20\text{kPa}$ ,  $s=50\text{kPa}$ ) から  $s$   
を 245 kPa まで増加した後、 $p$  を増加して  
から  $s$  を減少する経路 (図中の  $A \rightarrow C \rightarrow C_0 \rightarrow D_0$ ,  
 $A \rightarrow C \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ ,  $A \rightarrow C \rightarrow C_2 \rightarrow D_2$   
の経路)、および  $s$  を増加した後、 $s$  を減  
少する経路 (図中の  $A \rightarrow C \rightarrow D$  の経路) の  
試験を行った。次に、点 A から  $s=0\text{kPa}$  まで  
 $s$  を減少した後、 $p$  を増加する経路 (図中の  
 $A \rightarrow D \rightarrow D_1$ ,  $D_2$  の経路) の試験を行  
った。後述する 3 節においては、この経路を  
経た試料を初期水浸試料と呼んでいる。これ  
らの経路を経た試料について、 $D_0$  点および  
2 種類の応力経路を経た後の同じ応力点である  
 $D_1$ ,  $D_2$  点においてそれぞれ、

表-1 供試体作成時の緒元と応力経路

応力経路	間隙比	含水比 (%)	飽和度 (%)
A→C→C <sub>0</sub> →D <sub>0</sub>	1.303	25.15	52.32
A→C→C <sub>1</sub> →D <sub>1</sub>	1.261	25.22	54.32
A→C→C <sub>2</sub> →D <sub>2</sub>	1.257	25.40	54.75
A→C→D	1.280	25.26	53.49
A→D→D <sub>1</sub>	1.269	25.27	53.97
A→D→D <sub>2</sub>	1.327	25.40	51.86

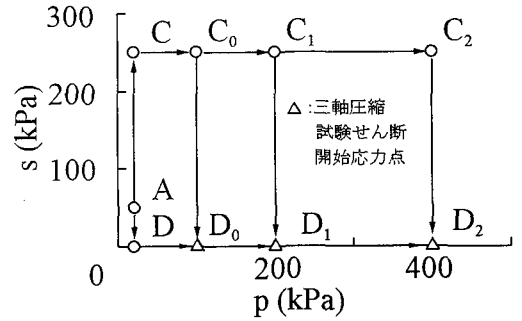


図-5 水浸試験の等方応力経路

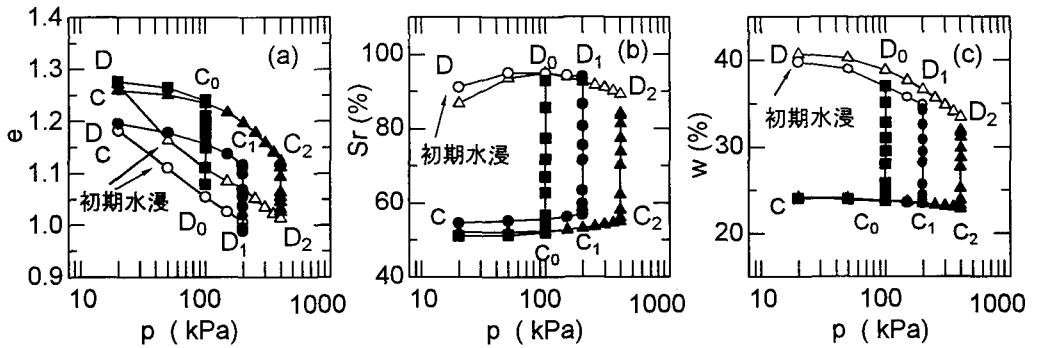


図-6 圧縮および水浸過程における間隙比、飽和度、含水比と p の関係

p, s 一定の排気排水条件下で応力制御による三軸圧縮試験を行った。なお、各載荷段階での載荷時間は、一段階につき8時間を基準とした。この時間は排水量が落ち着くのに十分な時間であった。また、サクシオン減少過程での  $s = 0 \text{ kPa}$  の段階のみ24時間の載荷時間とした。このような載荷時間で実験を行った場合、1供試体につき約2週間の試験時間を要した。この時、側圧を与えている空気が供試体周りのメンブレンを透気して供試体内を通るため供試体は乾燥する。しかし、その乾燥による水分蒸発量は含水比で約2%程度であることを実験後に確認した。そして、乾燥に対する処置をせずに実験を行った。

### 3. 初期水浸試料と水浸試料との比較

従来、一次元圧密試験装置を用いて行われている Double oedmeter test<sup>16)</sup>は、水浸試料と非水浸試料との間隙比差から目標とする載荷応力下での水浸時の沈下量を予測するものである。この場合、非水浸試料の供試体内部のサクシオンは未知である。ここ

では、今回行った三軸圧縮試験装置を用いた等方応力条件下の水浸試験を、供試体内部のサクシオンおよび応力が既知な Double oedmeter test としてとらえ、得られた結果について従来の一次元圧密試験装置を用いた場合の傾向との比較を行う。

図-6(a), (b), (c)は初期水浸試料の圧縮過程(図-5中の  $D \rightarrow D_1$ ,  $D \rightarrow D_2$  経路)と、水浸試料の圧縮・水浸過程(図-5中の  $C \rightarrow C_0 \rightarrow D_0$ ,  $C \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ ,  $C \rightarrow C_2 \rightarrow D_2$  経路)における間隙比  $e$ 、飽和度  $S_r$  と含水比  $w$  の  $p$  に対する変化をそれぞれ示している。従来 Double oedmeter test で行われている水浸試験では、水浸後の供試体は飽和していると考えられていた。しかし、図-6(b)からわかるように初期水浸試料の圧縮過程では飽和度は90%程度になっており完全には飽和していない状態である。そして、今回の水浸試料は、水浸後に間隙比、飽和度および含水比がそれぞれ、初期水浸試料の不完全な飽和状態に一致する傾向を示している。従来の一次元圧縮試験装置を用いた水浸試験では、水浸時の吸水量が確認できないため、飽和度や含水比がどのように変化したのかは確認されていない。しかし、今回の試験結果から水浸後の飽和度や含水比が応力経路に依存

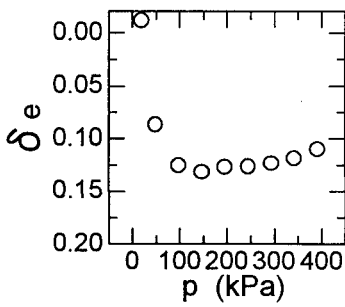


図-7 間隙比差～p 関係

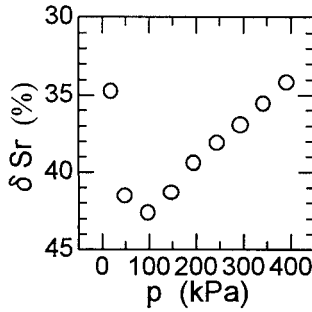


図-8 飽和度差～p 関係

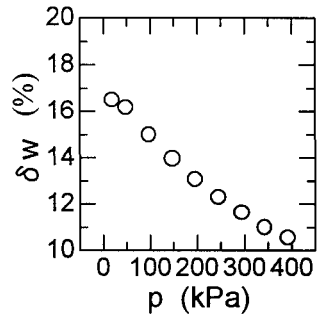


図-9 含水比差～p 関係

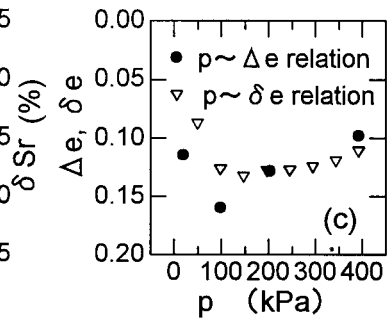
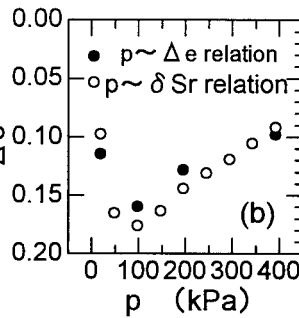
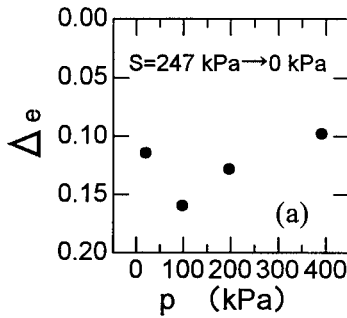


図-10 圧縮量～p 関係と飽和度差～p 関係 ならびに含水比差～p 関係との比較

しないことが確認された。また、等方圧縮条件下における水浸時の圧縮量についても、Barden ら<sup>5)</sup>による一次元圧縮試験装置を用いた  $K_0$  条件下における結果と同様に、応力経路に依存しないことが確認された。これらの結果は、Matyas ら<sup>9)</sup>の結果とおなじ傾向を示している

図-7 は、水浸試料(図-6 中の▲印のプロット)の圧縮過程( $C \rightarrow C_2$  経路)の間隙比と、初期水浸試料(図-6 中の△印のプロット)の圧縮過程( $D \rightarrow D_2$  経路)での間隙比との間隙比差  $\delta e$  を、また、図-8 と図-9 は同じ2つの経路の飽和度差  $\delta Sr$  および含水比差  $\delta w$  をそれぞれ  $p$  に対してプロットしたものである。図-7 の  $\delta e \sim p$  関係では、 $p = 150$  kPa あたりに  $\delta e$  のピークが現れている。そして、 $p = 150$  kPa から  $p$  が大きくなると  $\delta e$  はわずかに減少する傾向を示している。図-8 の  $\delta Sr \sim p$  関係では、 $p = 100$  kPa あたりにピークが現れ、以後  $p$  の増加とともに  $\delta Sr$  は減少する傾向を示している。これは、図-6 (b) に示されるように水浸試料の飽和度が圧縮にともない上昇しているためである。図-9 の  $\delta w \sim p$  関係では、 $p$  の増加とともに  $\delta w$  が減少する傾向を示している。これは、図-6 (c) に示すように水浸試料の含水比が圧縮時にわず

かに減少し、初期水浸試料の含水比が圧縮により減少しているためである。

図-10 (a) は水浸試料の水浸時に生じた圧縮量  $\Delta e$  と  $p$  との関係を示している。圧縮量  $\Delta e$  は  $p = 100$  kPa 付近で最大となっていることがわかる。図-10 (b), (c) は、前述の  $\delta e \sim p$  関係および  $\delta Sr \sim p$  関係を、 $\Delta e \sim p$  関係とそれぞれ比較したものである。水浸時の圧縮量  $\Delta e$  の  $p$  に対する傾向は、 $\delta e \sim p$  関係よりも  $\delta Sr \sim p$  関係に対応していることがわかる。従来の Double oedometer test における結果では、最大圧縮量が生じるのは圧縮曲線における先行圧縮応力付近である<sup>17)</sup>とされているが、今回の等方応力条件下においてある一定のサクシオン状態から水浸した試験結果では、初期水浸試料と水浸試料の飽和度差が最大となる  $p$  において最大圧縮量が生じていることがわかる。

Lawton ら<sup>7)</sup>は一次元圧縮試験装置を用いた水浸試験から、上載圧  $\sigma_v$  と水浸時の沈下量との関係が図-11 に示すように上載圧  $\sigma_v$  の増加とともに沈下量が増加し、ピークを示した後に減少する結果を示している。今回の等方応力条件下でのサクシオン一定条件からの水浸試験においても、 $p$  と圧縮量の関係は、図-10 (a) に示すように同じ傾向を示した。

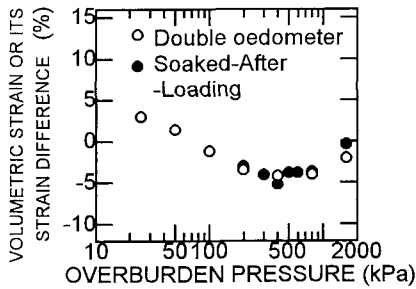


図-1 1 上載圧と圧縮量の関係<sup>7)</sup>

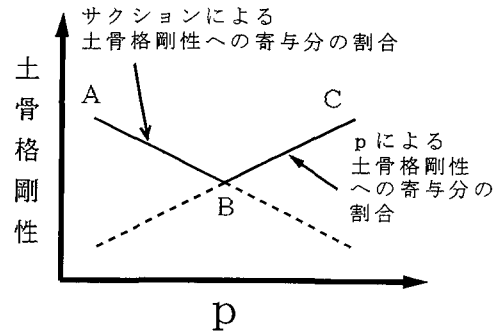


図-1 2 サクシオンと p の土骨格剛性への寄与

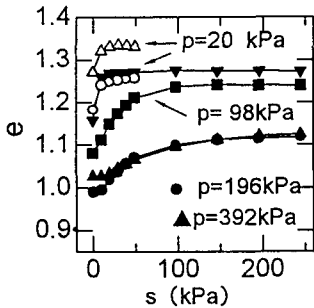


図-1 3 水浸試料の間隙比～サクシオン関係

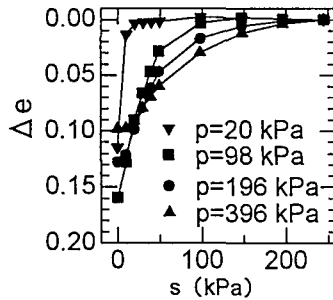


図-1 4 水浸試料の間隙比変化～サクシオン関係

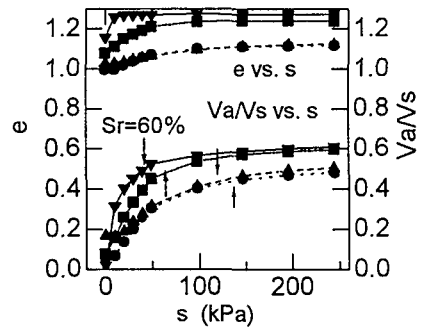


図-1 5 間隙比,  $V_a/V_s$ ～サクシオン関係

このような水浸時の圧縮量の傾向は、図-12 に示すように、サクシオンによる土骨格構造への剛性の寄与分と、 $p$  による土骨格構造への剛性の寄与分という2つの要素が影響を与えているものと考えられる。すなわち、 $p$  が小さい場合はサクシオンの寄与分が支配的であるが、その割合は、 $p$  が大きくなるにつれて減少してゆく。また、 $p$  が大きくなると  $p$  の寄与分が増加してゆくと考えられる。この「 $p$  による土骨格構造の剛性への影響」は後述する図-14 に示すデータにも現れている。

#### 4. 水浸時の変形・吸水特性

図-13 は水浸試料の水浸時の間隙比～サクシオン関係を示している。水浸時の  $p$  は、20, 98, 196, 392 kPa の4種類である。また、図-14 は、図-13 における水浸試料のデータのみについて、 $s = 245$  kPa の水浸開始時からの間隙比変化  $\Delta e$  ～サクシオン関係を示している。図-14 において水浸時の  $p$  が大きい場合は、サクシオンの減少開始とともに圧縮が始まっていることがわかる。しかし、▼印で示されている  $p = 20$  kPa の場合、 $s = 245$  kPa  $\rightarrow$  10

kPa のサクシオン減少過程ではほとんど圧縮せず、 $s = 10$  kPa  $\rightarrow$  0 kPa のサクシオン減少過程で大きな圧縮を生じている。また、●印で示されている  $p = 196$  kPa、および▲印で示されている  $p = 392$  kPa のデータは、図-13 に示すように水浸前の間隙比はほぼ等しい。そして、後掲の図-17(a) に示すように水浸前の飽和度もほぼ等しい。しかし、水浸時の  $p$  の大きさが違っているため、 $p = 392$  kPa の場合は水浸時の最終圧縮量が小さくなっていると考えられる。

図-15 は、図-14 のデータについて水浸時の間隙比～サクシオン関係と  $V_a/V_s$ ～サクシオン関係 ( $V_a$ : 気相の体積,  $V_s$ : 土粒子体積) を比較したものである。 $V_a/V_s$  で定義される量は単位土粒子体積当たりの空隙量を表している。この量は、試料が低含水比であることから単位土粒子体積当たりのメニスカス水の量に関連しているものと考えられる。図-15 から水浸前の間隙比の大きなものほど  $V_a/V_s$  が大きいことがわかる。図中の  $V_a/V_s$ ～ $s$  関係に示す矢印の位置は、後述の図-17(a) における飽和度～サクシオン関係から、飽和度  $S_r = 60\%$  に該当する点を内挿により求めたサクシオンの大きさを示している。よって、サクシオンがこの矢印の点よ

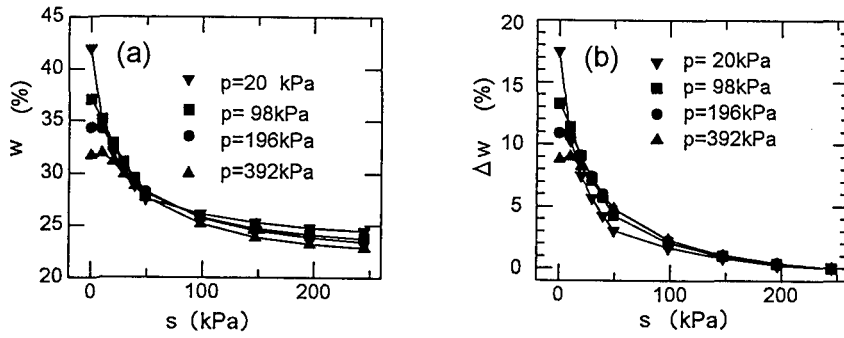


図-16 水浸時の含水比, 含水比変化~サクシヨン関係

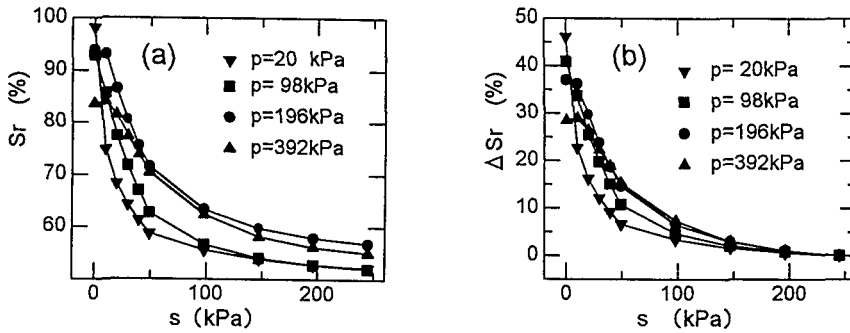


図-17 水浸時の飽和度, 飽和度変化~サクシヨン関係

りも小さな範囲では 60%以上の状態である。間隙比の変化と  $V_a/V_s$  の変化を比較すると、矢印で示される飽和度 60%あたりからメニスカス量に関連する  $V_a/V_s$  が減少し、間隙比の減少が顕著になっている。

図-16(a), (b)は、図-14 のデータに関する水浸時の含水比~サクシヨン関係と含水比変化~サクシヨンをそれぞれ示している。また、図-17(a), (b)は、同じデータに関する水浸時の飽和度~サクシヨン関係と飽和度変化~サクシヨンをそれぞれ示している。なお、図-16(a), 図-17(a)は水分特性曲線の吸水曲線を示している。図-16(a), (b)から、 $p$  の小さなものほど水浸前の含水比は高いが吸水量は大きくなっていることがわかる。これは、吸水量に対して前述のメニスカス量  $V_a/V_s$  が影響しているものと考えられる。図-16(b)と図-17(b)を比較すると、含水比変化~サクシヨン関係の方が吸水曲線の形状に対する拘束応力  $p$  の影響が少ないことがわかる。従来、水分特性曲線に対する拘束応力の影響は明らかにされていない。拘束応力が大きくなると土塊全体が圧縮し、間隙径分布も変化する。このため、水分特性曲線も変化すると考えられる。今回の吸水曲線のデータに限って述べると、 $w \sim s$  関係に関しては図-16(a)に示すように、土塊全体で圧

縮しているにもかかわらず拘束応力の影響は少ないことがわかる。また、図-16(b)に示されている結果では、吸水曲線における水侵入値に対応する点は拘束応力である  $p$  の大きなものほど明確に現れる傾向が見られる。図-15 に示されているように、 $p$  が大きい場合には  $s = 10$  kPa 付近でのメニスカス水量が少ないと考えられる。よって、吸水曲線において水侵入値に対応する点が明確に現れるかどうかは、間隙内のメニスカス水量が一つの影響因子である可能性が考えられる。

図-18 は水浸開始時からの含水比変化と間隙比変化の関係を示している。図-18 において、▼印で示される  $p = 20$  kPa の場合は吸水してもすぐには圧縮せず、図-14 で示されているのと同様に  $s = 10$  kPa  $\rightarrow$  0 kPa の段階で圧縮を生じている。このような低拘束応力下の場合、供試体内部のメニスカスによる土骨格剛性への影響が支配的であり、吸水によりメニスカスの土骨格剛性への影響が低下しないと、圧縮しないものと考えられる。一方、他のデータでは吸水とともに圧縮しており、その圧縮量 ( $\Delta e$ ) は吸水量 ( $\Delta w$ ) とともに比例的に増加している。そして、その増加傾向は拘束応力にかかわらず同じ傾向を示している。なお、▼印で示されている  $p = 20$  kPa のデータにおいても、 $s = 10$  kPa

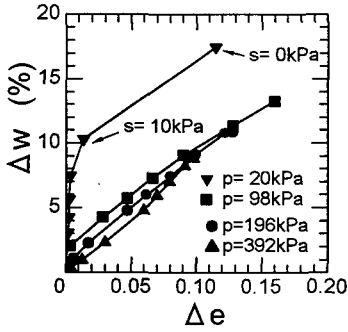


図-18 含水比変化～間隙比変化関係

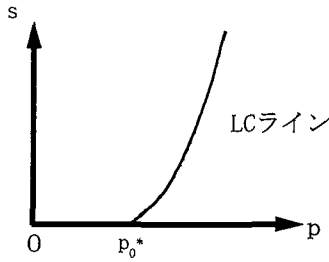


図-19 Alonso らのLCライン<sup>11)</sup>

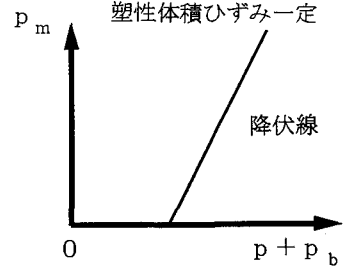


図-20 加藤らの降伏線<sup>18)</sup>

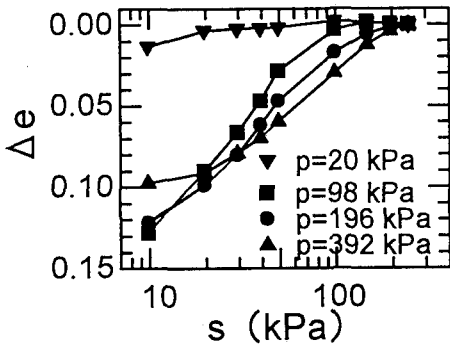


図-21 水浸試料の間隙比～log s 関係

→0 kPa の段階で圧縮を生じている部分では  $\Delta w \sim \Delta e$  関係が他のデータに近い傾きを示している。このデータについては  $s = 10 \text{ kPa} \rightarrow 0 \text{ kPa}$  の段階を対象として他のデータの傾向とともに考えると、最終的な圧縮量は吸水量が大きいほど大きい。このことから、等方応力条件下のコラプス時の圧縮量には吸水量が影響を与えていることがわかる。

## 5. 等方応力面上の降伏線および水浸後の圧縮せん断挙動に関する考察

$p \sim s$  応力面上の降伏線に関して Alonso ら<sup>11)</sup>は、降伏線上の2つの応力点間での間隙比変化を考慮することにより、図-19 に示すように、 $p \sim s$  応力面上で下に凸の形状をもつ降伏線 (LC ライン) を提案している。一方、加藤ら<sup>18)</sup>はサクシオン一定条件下の等方圧縮試験結果からサクシオン応力  $p_s$  を考慮した  $e \sim \log(p + p_b)$  関係式を提案した。そしてその関係をもとに、図-20 に示すようなメニスカス応力  $p_m$  とバルク応力  $p_b$  を取り入れた応力

面上に直線で示される降伏線を提案している。なお、メニスカス応力とバルク応力はそれぞれ、サクシオンにより生じるせん断強度増分に対する、メニスカス水とバルク水の寄与分として定義される。ここでは、今回の水浸試験結果に基づいて等方応力面上の降伏点を求め、これらの理論による降伏線との比較を行うものである。

図-21 は図-14 の水浸試料のデータを、横軸を  $\log s$  として整理し直したものである。(なお、横軸に対数目盛を用いているため、データは  $s = 245 \text{ kPa} \rightarrow 10 \text{ kPa}$  の間について表示している。) ▼印の  $p = 20 \text{ kPa}$  のデータ以外は、 $\Delta e \sim \log s$  関係は飽和土を試料として用いた標準圧密試験で観察される  $e \sim \log p$  関係と似た逆S字形状を示している。そして、先行圧縮応力に対応するサクシオンの大きさが、水浸時の  $p$  が大きくなるほど大きくなる傾向を示している。この先行圧縮応力に対応するサクシオンの大きさを求めるため、図-21 に示した  $\Delta e \sim \log s$  関係において  $s = 245 \text{ kPa}$  付近の直線部分を延長し、次に  $s$  がそれより小さくなって現れる最も長い直線部分を延長した。そして、2本の延長線の交点を求め、その交点でのサクシオンの大きさを先行圧縮応力に対応するものとした。そのサクシオンとその時の  $p$  により決定される点を  $p \sim s$  応力面上に示したものが図-22 である。図-21 の結果から、水浸時に先行圧縮応力に対応するサクシオンの大きさよりもサクシオンが小さくなると、塑性ひずみが生じているものと考えることができる。つまり、この  $p \sim s$  平面上の応力点は降伏点を示していると考えられる。なお、 $p = 20 \text{ kPa}$  の場合は、 $s = 10 \text{ kPa} \rightarrow 0 \text{ kPa}$  の間に大きな圧縮を生じているので、 $s = 10 \text{ kPa}$  を降伏点としている。図-22 から、降伏点は図中に点線で示す直線付近に分布していることがわかる。そしてこの直線は、締固めにより作製された供試体をもつ等方応力面上の初期降



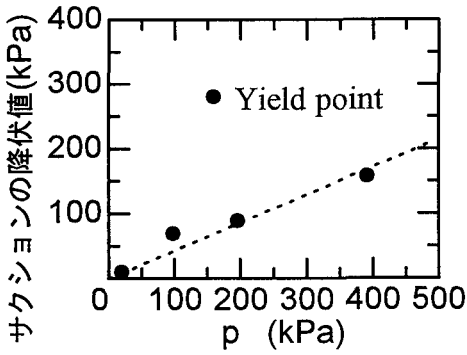


図-22 p～サクシヨンの降伏点

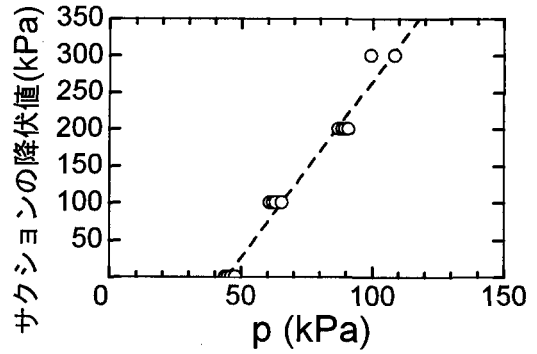


図-23 Wheelerら<sup>19)</sup>の降伏点

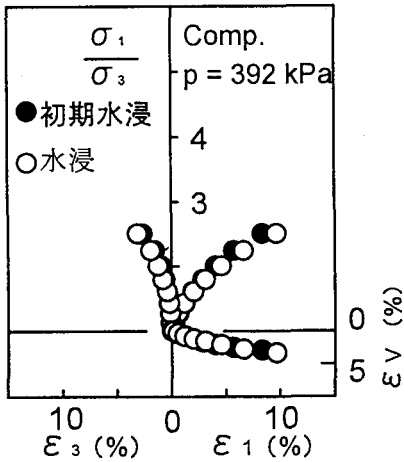


図-24 三軸圧縮試験時の主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係

伏線を示していると考えられる。この降伏線の形状は、加藤ら<sup>18)</sup>の提案する降伏線に似た直線分布を示している。

Wheelerら<sup>19)</sup>は、その論文の中で締固めたカオリン粘土供試体の水浸試験の結果から求めた降伏点を  $p \sim s$  応力面上に示している。そして、Alonsoら<sup>11)</sup>の提案する LC ラインを決めるパラメーターがサクシヨンの影響を受けることを指摘している。なお、Wheelerら<sup>19)</sup>の求めた降伏点は図-23に示すように、図中に示す点線付近に分布していると見ることができる。

次に、等方応力面上のサクシヨンの値が0である、同じ応力点より行った初期水浸試料と水浸試料の三軸圧縮せん断試験について変形・強度特性を比較し、等方応力条件下の水浸時の応力経路がせん断挙動に与える影響について考察する。

図-24 は水浸試料と初期水浸試料について、図-5中の同じ応力点である  $D_2$  点より、 $s=0$  kPa、

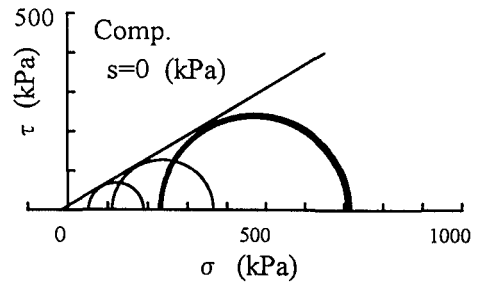


図-25 三軸圧縮試験による破壊時のモール円

$p=392$  kPa 一定条件で行った三軸圧縮試験のせん断中の主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係を示している。水浸試料と初期水浸試料の主応力比～主ひずみ関係がそれぞれほぼ一致する傾向を示している。また、両者の破壊時の主応力比の大きさもほぼ等しいことがわかる。なお、2種類の応力経路を経て同じ応力点である  $D_1$  点より、 $s, p$  一定条件で行った三軸圧縮試験結果においても、水浸試料と初期水浸試料の主応力比～主ひずみ関係がそれぞれほぼ一致する傾向を示した。図-25 は  $D_0, D_1, D_2$  点より行った水浸試料と初期水浸試料の三軸圧縮試験における破壊時のモール円を示している。図-24, 25に示される結果より、同じ応力点である  $D_1, D_2$  点において、両者の圧縮せん断時の変形・強度特性がほぼ等しいことが確認された。

このような水浸試料と初期水浸試料の変形挙動は、Alonsoら<sup>11)</sup>により提案されている不飽和土の変形に関する構成モデルに基づいて考えると、次のように定性的に説明される。すなわち、水浸試料の応力経路において水浸時にコラプスを生じた場合、水浸後の応力点  $D_1, D_2$  点は、ある降伏線(図-26(a)中の実線で示される)上に存在する。一方、初期水浸試料における応力経路では、 $D_1, D_2$  点において水浸

試料と同じ降伏線（図-26(b)中の実線で示される）をもつことになる。よって、 $D_1$ 、 $D_2$ 点からの三軸圧縮せん断試験時の変形挙動は、初期水浸試料と水浸試料では同じになることが予測される。今回の結果は、このような予測を支持していると考えられる。

## 6. まとめ

不飽和土のコラプスに関する研究は、一次元圧縮試験装置に基づいて従来数多く行われている。このような装置では供試体に与えるサクシオンを制御する形式がとられているが、供試体内の応力として上載圧以外は未知な状態にあり、また、供試体への吸排水量は不明である。このため、コラプスの本質をとらえることは難しいものと考えられる。

本論文においては、不飽和土のコラプス時の変形挙動について三軸試験装置を用いた実験を行った。そして、等方応力条件下での平均基底応力を一定とした水浸試験を行い、実験結果について初期水浸試料の結果との比較も含めて検討を加えた。実験結果について検討を加えた。以下に得られた知見を示す。

1. 平均基底応力载荷段階の初期に水浸し、その後圧縮した試料（以下、初期水浸試料と呼ぶ）は水浸直後に飽和度が約90%程度になり、サクシオン一定で圧縮後に水浸する（以下、水浸試料と呼ぶ）と、水浸試料と初期水浸試料は同じサクシオンが0の等方応力下において間隙比だけでなく飽和度・含水比も一致する傾向を示した。
2. 水浸試料の水浸時における圧縮量はその時の平均基底応力に依存し、また、水浸試料と初期水浸試料との飽和度差（ $\delta Sr$ ）の変化に対応した関係を示した。そして、水浸時の最大圧縮量は $\delta Sr$ が最大となる平均基底応力のもとで生じた。なお、このような水浸時の圧縮特性が見られるのは、サクシオンおよび平均基底応力という2つの要因が土の骨格剛性に影響を与えているためであると考えられる。
3. サクシオン～含水比関係の方がサクシオン～飽和度関係よりサクシオン減少過程における水分特性曲線（吸水曲線）の形状のばらつきが少なくなる傾向を示した。また、水侵入値が吸水曲線上に明確に現れるかどうかは、サクシオンが0となる状態付近での間隙内部の間隙空気の量が影響を与えている。

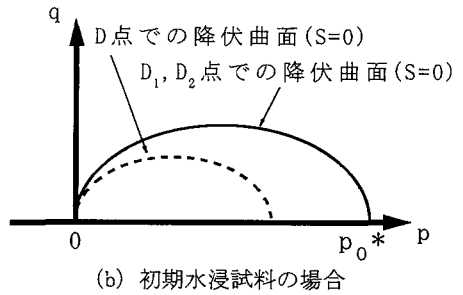
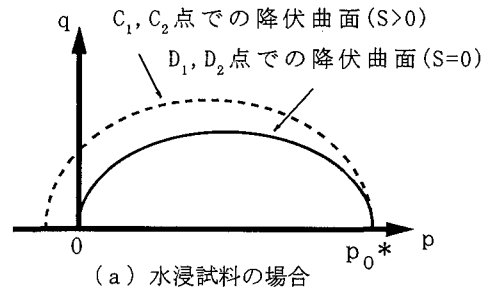


図-26 構成モデルに基づく水浸試料と初期水浸試料の $D_1$ 、 $D_2$ 点における降伏曲面

4. コラプス時の間隙比変化量（圧縮量）は、含水比変化量（吸水量）に対し比例的に増加する傾向を示した。このことは、コラプス時に吸水して間隙内へ水が侵入した間隙で圧縮が生じていることを示している。
5. コラプス時の  $\log s \sim$  圧縮量関係から決定された降伏点は、サクシオン～平均基底応力面上で直線上に分布した。この直線は締固めた粘性土のもつ初期降伏線を示している。また、初期降伏線の形状は Wheeler らの試験結果<sup>19)</sup>においても直線と見なすことができる。そして、これらの降伏線の形状は、Alonso ら<sup>11)</sup>の提案する曲線的な LC ラインよりも、むしろ加藤ら<sup>18)</sup>の提案する直線的な降伏線に近いものと考えられる。
6. 初期水浸試料をせん断した場合と水浸試料を水浸後に同じ応力点からせん断した場合を比較すると、せん断強度だけでなく変形特性もほぼ同じであることが確認された。このことは、Alonso ら<sup>11)</sup>により提案されている構成モデルに基づく予測と一致している。

謝辞: 本論文におけるすべての実験は、著者が名古屋工業大学に在職中に行われた。実験に際し御助言いただいた名古屋工業大学工学部社会開発工学科、松岡元教授ならびに孫徳安助手に末尾ながら

感謝いたします。また、実験に御協力いただいた当時の大学院生である川田喜久氏（現(株)建設技術研究所）ならびに滝脇泰将氏（現(株)北陸電力）に深く感謝致します。最後に、不飽和土の研究において常に御指導頂いている神戸大学大学院自然科学研究科、軽部 大蔵 教授ならびに御助言頂いた神戸大学工学部建設学科、飯塚 敦 助教授に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Bishop, A.W.: The principle of effective stress, *Teknisk Ukeblad*, Vol.39, pp.859-863, 1959.
- 2) Jennings, J.E. and Brnland, J.B.: Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils, *Geotechnique* Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 3) 軽部大蔵：不飽和土の応力・ひずみ式と有効応力，土と基礎，Vol.29, No.6, pp.13-18, 1981.
- 4) Coleman, J.D.: Stress/strain relations for partly saturated soil, correspondence, *Geotechnique*, Vol.12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 5) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R.: Volume change characteristics of unsaturated clay, *Proc. ASCE*, Vol.95, No.SM1, pp.33-51, 1969.
- 6) Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hardcastle J.H.: Stress Ratio Effects on Collapse of Compacted Clayey sand, *Jour. of Geotech. Eng.*, Vol.117, No.5, pp.714-73, 1991.
- 7) Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hardcastle, J.H.: Collapse of compacted clayey sand, *Proc. ASCE*, Vol.115, No. GT9, pp.1252-1267, 1989.
- 8) Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S.: Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.
- 9) 阿部廣史，川上 浩：不飽和土の負の間隙水圧とコラプス現象，不飽和土の工学的性質の現状シンポジウム発表論文集，(社)土質工学会，pp.45-54, 1987.
- 10) Maswoswe, J.: Stress paths for a compacted soil during collapse due to wetting, *Ph. D. Thesis*, University of London, 1-485, 1985.
- 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.: Verification of the generalized elastoplastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-75, 1993.
- 13) Karube, D. and Kato, S.: An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil, *Proc. 13th ICSMFE*, Vol.1, pp.43-46, 1994.
- 14) 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, pp. 179-188, 1986.
- 15) 堤 肇：不飽和土のストレス・プローブ試験，神戸大学修士論文，1984.
- 16) Jennings, J.E. and Knight K.: The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting, *Proc. 4th ICSMFE*. Vol.1, pp.316-319, 1957.
- 17) Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hetherington M.D.: Review of wetting-induced collapse in compacted soil, *J. Geotech. Eng.*, Vol.118, No.9, pp.1376-1394, 1992.
- 18) 加藤正司，軽部大蔵，浜田耕一，本田道識：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，土木学会論文集，No.535/III-34, pp.57-69, 1997.
- 19) Wheeler, S.J. and Sivakumar, V.: Critical state concepts for unsaturated soil, *Proc. 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, Vol. 1, pp.167-172, 1992.

(1997. 9. 5 受付)

## DEFORMATION CHARACTERISTICS OF A COMPACTED CLAY IN COLLAPSE UNDER ISOTROPIC STRESS STATE AND ITS SHEAR DEFORMATION AFTER COLLAPSE

Shoji KATO

Deformation in collapse has been studied with a triaxial test apparatus modified for unsaturated soil. Wetting tests, in which the condition of suction and stresses were known, were conducted under isotropic stress state for compacted clay specimens. Deformation, absorption and applicability of the ordinary constitutive model for unsaturated soils are discussed for the test results. It was found out that collapse, which occurred under isotropic stress state, has similar tendency with that measured with oedmeter type test apparatus in past, and that shear deformation after collapse in different stress paths agrees with expectation by the ordinary constitutive model.