

名古屋工業大学 加藤 正司
 神戸大学 軽部 大蔵
 (株)日建設計 本田 道識

1. まえがき

不飽和土は気相、液相、固相の3相から構成されている。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（サクシオンと呼ぶ）が生じている。このサクシオンの影響により、不飽和土はコラプス（水浸沈下）に示されるような複雑な挙動を示す。この不飽和土の変形・強度特性に関する研究においては現在サクシオンを独立した応力成分とした弾塑性モデルが提案されており^{1)、2)}、コラプスを含めた変形挙動の予測が可能となっている。一方、サクシオンは土の含水量の主な支配要因でもある。この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して知られている。そして、水分特性曲線は脱水過程（サクシオン増加過程）と吸水過程（サクシオン減少過程）では異なったものとなりヒステリシスを生じる。このサクシオン履歴（サクシオンによる脱水およびそれに続く吸水過程）を受けた時に生じるヒステリシスには土の間隙径の違いが影響している³⁾。そして、脱水過程では大きな間隙中の間隙水（バルク水と呼ぶ）から排水され、土中水は粒子接点にメニスカスを形成する。また、吸水過程ではこのメニスカスを形成する水（メニスカス水と呼ぶ）が徐々に大きくと考えられる。したがって、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。そして、現在提案されている弾塑性モデルではこのような間隙水分分布の違いが挙動に与える影響が考慮されているとは言えない。本論文では、サクシオン履歴を受けた場合に生じる間隙水分分布の違いが不飽和土の圧縮時の挙動に与える影響を過去に行われた実験結果^{4)、5)、6)}に基づいて明らかにすることを目的としている。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_r ；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 ；平均有効主応力（ $p = p_r - u_a$ ）、 s ；サクシオン（ $s = u_a - u_w$ ）。

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は市販の粉末粘土である。その物理的性質は土粒子の比重 $G_s = 2.70$ 、液性限界 $w_L = 43\%$ 、塑性指数 $I_p = 13.4$ である。この試料を用いて次の2種類の方法で供試体を作製した。第一の方法では気乾状態の試料を含水比26%に調整した。そして、この含水比調整された試料を四割りモールド内で突き棒で一定応力により5層に分けて締固めて供試体とした。供試体作製時の間隙比は約1.31、飽和度は約53%となった。第2の方法では、気乾試料を液性限界の約2倍の含水比に調整した。そして、このスラリー試料を大型モールドで圧密して得られたブロックサンプル（ $p_c = 314 \text{ kPa}$ ）をトリミングして供試体とした。供試体作製時の間隙比は約1.00、飽和度は約97%となった。作製した供試体の寸法は2種類の方法ともに高さ80 mm、直径35 mmである。使用した実験装置は既報⁷⁾の不飽和土用に改良された三軸試験装置である。この装置はペDESTAL部にセラミックディスク（エア-エントリーバリュ-274または490 kPa）を埋め込んでいる。実験時の応力経路は次のとおりである。締め固め供試体の場合、 $p = 20 \text{ kPa}$ 、 $s = 49 \text{ kPa}$ の初期状態とした後、次の2種類の経路で実験を行った。まず、 $s = 49 \text{ kPa}$ を保ちながら $p = 196$ または 392 kPa まで圧縮した。また、 $p = 20 \text{ kPa}$ を保ちながら $s = 196 \text{ kPa}$ までのサクシオン履歴を与えた後、 $s = 49 \text{ kPa}$ を保ちながら同じように圧縮した（図-1(a)）。ブロックサンプルを用いた供試体の場合、一つのシリーズでは締め固め供試体と同じ応

Influence of moisture distribution on compression behavior of partly saturated soil,
 Shoji Kato(Nagoya Institute of Technology), Daizo Karube(Kobe University) and
 Michinori Honda(Nikken Sekkei Co. Ltd.).

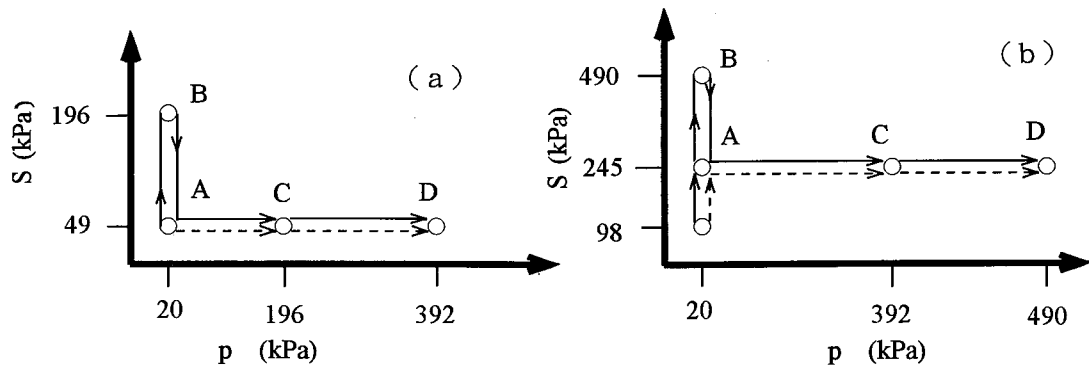


図-1 実験の応力経路

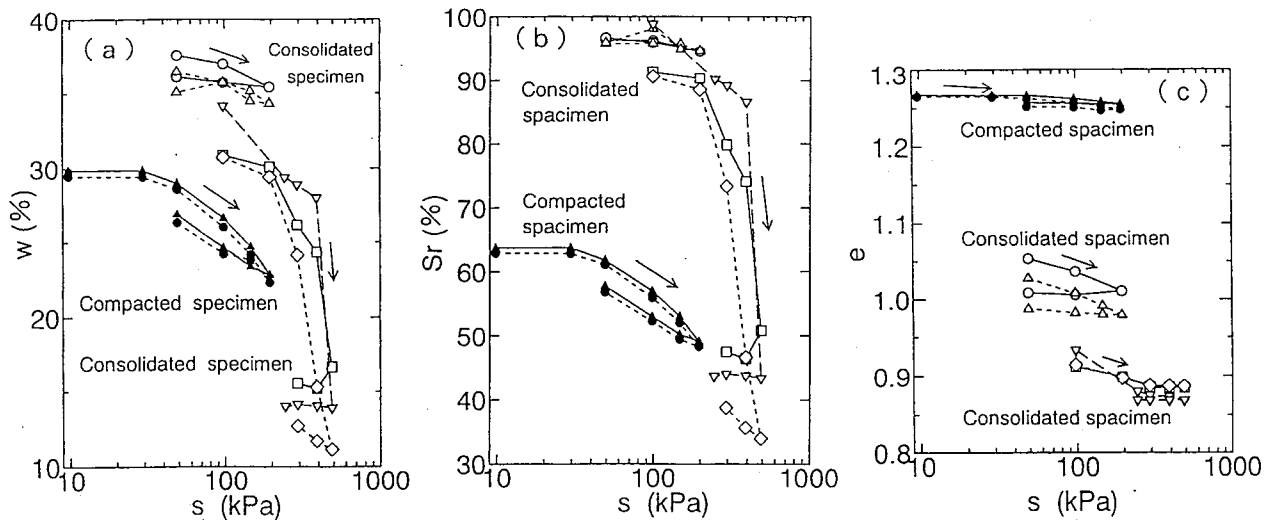


図-2 サクション載荷過程における含水比、飽和度、間隙比の挙動 ($p = 20\text{kPa}$)

じ応力経路で実験を行った(図-1(a))。別のシリーズでは、 $p = 20\text{kPa}$ 、 $s = 98\text{kPa}$ の初期状態とした後、次の2種類の経路で実験を行った。まず、 $s = 245\text{kPa}$ まで増加後、 s を保ちながら $p = 245$ または 441kPa まで圧縮した。次に、 $p = 20\text{kPa}$ を保ちながら $s = 490\text{kPa}$ までのサクシジョン履歴を与えて $s = 245\text{kPa}$ まで減少し、その後同じように圧縮した(図-1(b))。載荷方法は段階載荷により行い、載荷時間は締固め供試体の場合1段階8時間とし、ブロックサンプルの場合は排水量変化が落ち着くのを確認して次の載荷段階へと移った。

3. サクション載荷過程における変形挙動に対する間隙水分布の影響

図-2(a)、(b)、(c)は、平均有効主応力 $p = 20\text{kPa}$ 一定でサクシジョン s を増加・減少させる応力経路(サクシジョン履歴過程)での、 $s \sim$ 含水比関係、 $s \sim$ 飽和度関係(これらの関係は、水分特性曲線を示している)、および $s \sim$ 間隙比関係をそれぞれ示している。図中の黒いプロット(●および▲記号)は締固め供試体の結果を示し、他の白いプロット(○、△、▽、□および◇記号)はブロックサンプル供試体による結果を示している。図-2(a)、(b)において締固め供試体の $s \sim$ 含水比関係、 $s \sim$ 飽和度関係(●および▲記号)はサクシジョンの載荷・除荷に対してヒステリシスの少ない弾性的な挙動を示している。一方、ブロックサンプル供試体の場合では、サクシジョンの最大値が供試体の空気進入値(図から $196 \sim 294\text{kPa}$ と考えられる)を越えない場合(○、△記号)は $s \sim$ 含水比関係、 $s \sim$ 飽和度関係が弾性的な挙動を示し、空気進入値を越える場合(□、◇、▽記号)は $s \sim$ 含水比関係、 $s \sim$ 飽和度関係がサクシジョンの載荷・除荷に対してヒステリシスの大きな塑性的な挙動を示している。図-2(c)において締固め供試体(●および▲記号)の $s \sim$ 間隙比関係は、サクシジョンの載荷・除荷に対して飽和度・含水比と同様にヒステリシスの少ない弾性的な挙動を示し

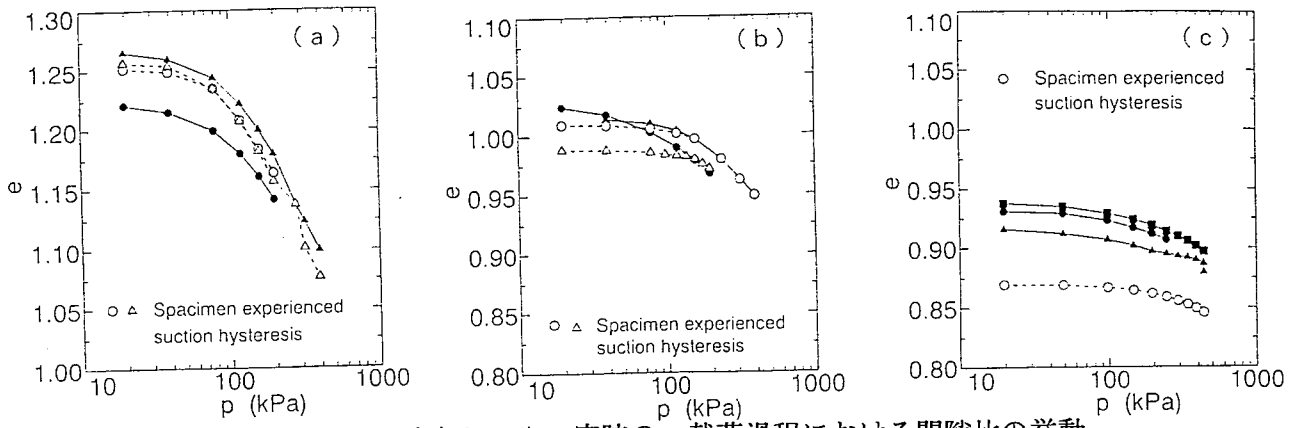


図-3 サクシヨン一定時の p 荷重過程における間隙比の挙動

(a) 締固め供試体 (b) ブロックサンプル供試体 ($s = 49\text{kPa}$) (c) ブロックサンプル供試体 ($s = 245\text{kPa}$)

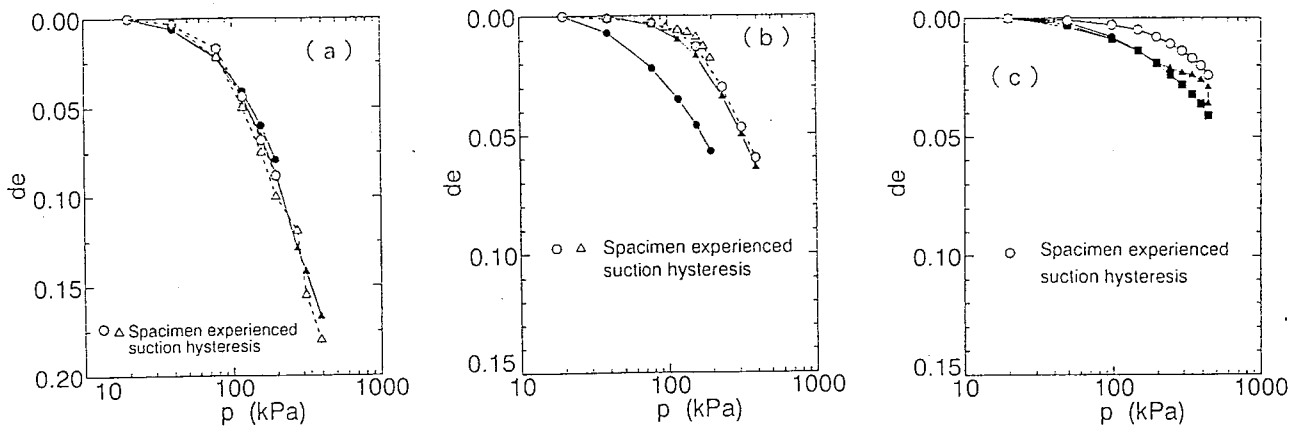


図-4 サクシヨン一定時の p 荷重過程における間隙比変化の挙動

(a) 締固め供試体 (b) ブロックサンプル供試体 ($s = 49\text{kPa}$) (c) ブロックサンプル供試体 ($s = 245\text{kPa}$)

ている。一方、ブロックサンプル供試体の場合では、サクシヨンの最大値が供試体の空気進入値を越えない場合 (○、△記号) は $s \sim$ 含水比関係、 $s \sim$ 飽和度関係が弾性的な挙動を示し、空気進入値を越える場合 (□、◇、▽記号) はヒステリシスの大きな塑性的な挙動を示している。以上に述べたような締固め供試体とブロックサンプル供試体のサクシヨン荷重・除荷に対する間隙比変化挙動の違いには、間隙水の分布が影響しているものと考えられる。つまり、締固め供試体の場合は粒子接点の周囲に集まるメニスカス水が多いため、サクシヨンの増加・減少に対してはメニスカス水量が増減して土骨格剛性が変化が生じ、体積変化はほとんど生じないものと考えられる。一方、ブロックサンプル供試体の場合では粒子接点の周囲にはメニスカス水とともにバルク水が存在する。そしてサクシヨンが増加しても空気進入値を越えない場合は、間隙水と間隙空気が間隙流体として一様な状態となっている。よってその変形挙動は飽和土の場合と同様なものとなる (この点については、4. (2) 節において検討する)。サクシヨンが増加して空気進入値を越える場合は、間隙中に存在するバルク水が急激に排水され、メニスカス水が集まった接点が多くなる。このような状態になると締固め供試体と同様にサクシヨンの荷重・除荷に対して弾的に挙動すると考えられる。

4. サクシヨン一定条件下での平均有効主応力による圧縮過程

(1) 間隙水分布の変形挙動に与える影響

図-3 (a) は締固め供試体の、図-3 (b)、(c) はブロックサンプル供試体のサクシヨン一定条件下での p 荷重過程における間隙比 $e \sim \log p$ 関係をそれぞれ示している。また、図-4 (a)、(b)、(c) はそれぞれ図-3 (a)、(b)、(c) の結果を間隙比変化 $de \sim \log p$ 関係でそれぞれ示したものである。図中の黒いプロット (●、▲および■記号) はサクシヨン荷重過程で履歴を受けなかった場合の結果であり、白いプロット (○、△記号) はサクシヨン荷重過程で履歴を受けた場合の結果を示している。図-4 (a) を見ると締固め供試体の場合は、間隙比変化 $\sim \log p$ 関係がサクシヨン履歴の有無にかかわらずほぼ同じ傾向を示すことが分かる。図-

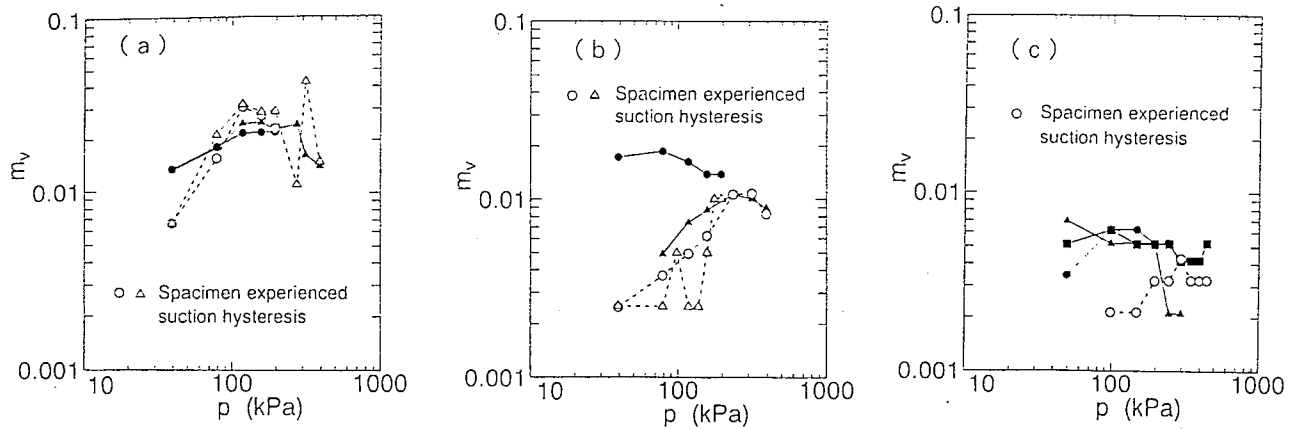


図-5 サクシオン一定時の p 荷重過程における体積圧縮係数の変化

(a) 締め固め供試体 (b) ブロックサンプル供試体 ($s = 49\text{kPa}$) (c) ブロックサンプル供試体 ($s = 245\text{kPa}$)

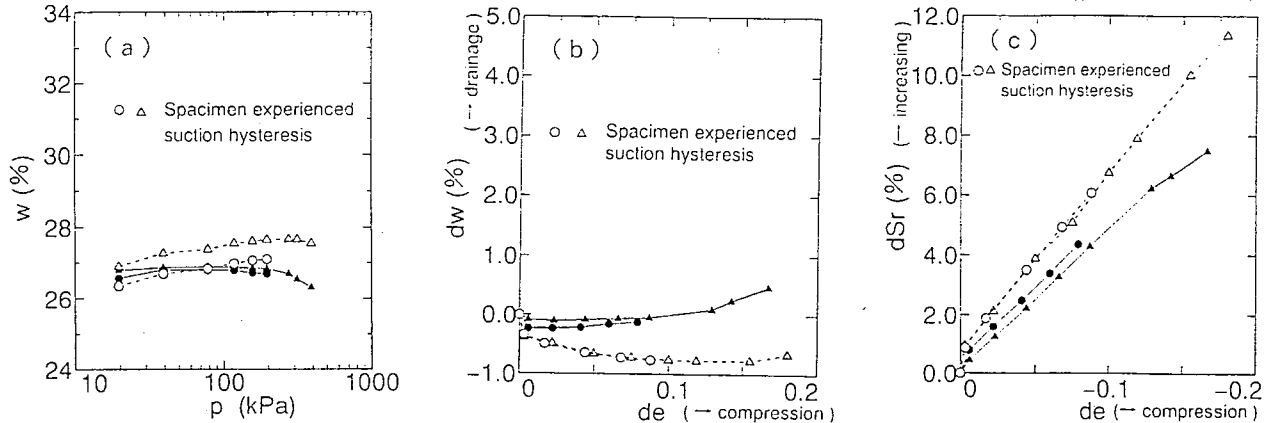


図-6 締め固め供試体の p 荷重過程における $w \sim p$ 、 $dw \sim de$ 、 $dSr \sim de$ 関係

4(b)は同じ応力経路(図-1(a))で行ったブロックサンプル供試体の結果を示している。この場合サクシオンの大きさは空気進入値を越えていないため、サクシオン履歴による挙動の違いは明確でない。一方、図-4(c)はサクシオン履歴過程でサクシオンの大きさが空気進入値を越えた場合(図-1(b))の間隙比変化 $de \sim \log p$ 関係を示している。図からサクシオン履歴を受けた場合の白いプロットの方が、先行圧縮応力が大きくなる傾向を示していることが分かる。この先行圧縮応力の増大は、間隙水分布の違いにより荷重されているサクシオンが同じでも粒子間に作用する付着力の大きさが異なり、サクシオン履歴を受けメニスカス水が多くなった場合の方が粒子のすべりが遅れるために生じると考えられる。図-5(a)、(b)、(c)は図-4(a)、(b)、(c)の結果から得られるサクシオン一定条件下での p 荷重過程における体積圧縮係数 $m_v \sim \log p$ 関係をそれぞれ示している。図中の白いプロット(○、△記号)はサクシオン荷重過程で履歴を与えた場合の結果を、黒いプロット(●、▲および■記号)はサクシオン荷重過程で履歴を与えなかった場合の結果をそれぞれ示している。図-5(a)に示される締め固め供試体の場合は、黒いプロットと白いプロットの傾向が一致し、サクシオン履歴の影響があまりないと考えられる。一方、図-5(b)、(c)に示されるブロックサンプル供試体の場合は、白いプロットで示されるサクシオン履歴を受けた場合の体積圧縮係数が黒いプロットで示されるサクシオン履歴のない場合よりも小さくなる傾向を示している。この結果からサクシオン履歴を与えた場合の方が土骨格の剛性が高いことがわかる。そして、ブロックサンプルの場合はサクシオン履歴の有無にかかわらず p 荷重開始前の間隙比がほぼ等しいこと(図-3(b)、(c))を考えると、このような剛性の違いには間隙水分布の違いにより生ずる粒子間力の影響が影響していると考えられる。

(2) 間隙水分布の吸排水挙動に与える影響

間隙水の分布状態としてメニスカス水の多い場合とバルク水の多い場合のそれぞれにおいて、サクシオン一定条件の等方圧縮にともなう吸排水挙動がどのように異なるかを考察する。図-6(a)は締め固め供試体の $s = 49\text{kPa}$ 一定条件で p により圧縮した場合の含水比 $w \sim \log p$ 関係を示している。また、図-6(b)、(c)は同じ

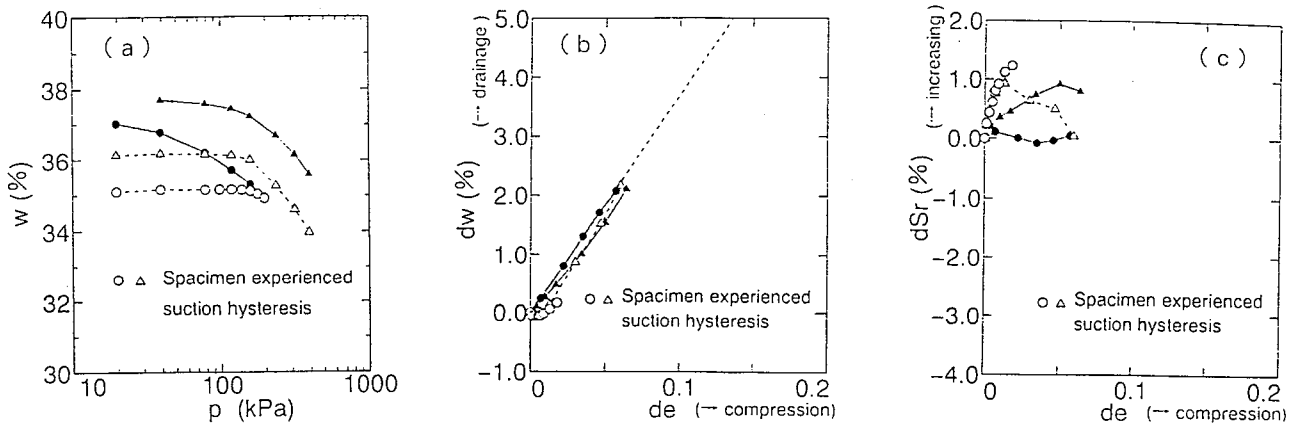


図-7 ブロックサンプル供試体の p 荷重過程における $w \sim p$ 、 $dw \sim de$ 、 $dSr \sim de$ 関係 ($s = 49\text{kPa}$)

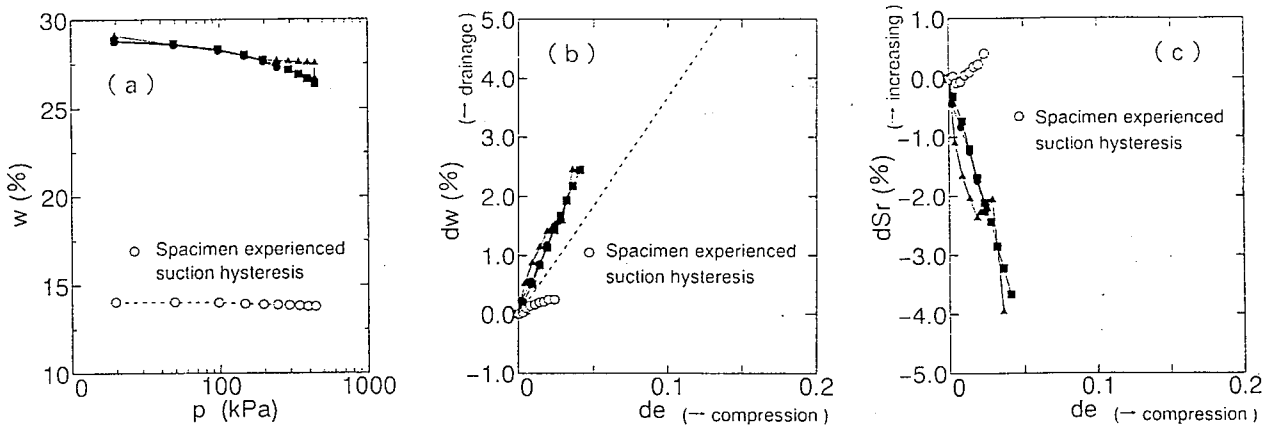


図-8 ブロックサンプル供試体の p 荷重過程における $w \sim p$ 、 $dw \sim de$ 、 $dSr \sim de$ 関係 ($s = 245\text{kPa}$)

実験結果の間隙比変化 $de \sim$ 含水比変化 dw 関係および間隙比変化 $de \sim$ 飽和度変化 dSr 関係をそれぞれ示している。なお、以下では含水比、飽和度、間隙比の各変化量は p による圧縮開始前の状態を基準とする。また、図中の白印 (○、△記号) のプロットはサクシオン荷重過程で履歴を与えた場合の、黒印 (●、▲記号) のプロットはサクシオン荷重過程で履歴を与えない場合の結果をそれぞれ示している。図-6(a)に示される締固め供試体の圧縮にともなう含水比の変化は、後述するブロックサンプルの結果に比べわずかである。そして、図-6(b)よりサクシオン履歴をうけた場合 (○、△記号)、吸水傾向を示すことがわかる。また、間隙比減少量が大きくかつ含水比変化が少ないため、図-6(c)に示されるように締固め供試体の場合は飽和度が圧縮にともない増加している。なお、この場合の飽和度の増加量は間隙比変化量に比例する傾向を示すことが特徴的である。図-7(a)は $s = 49\text{kPa}$ 一定条件で p により圧縮した場合のブロックサンプル供試体 (図-1(a))の含水比 $w \sim \log p$ 関係を示している。また、図-7(b)、(c)は同じ実験結果の間隙比変化 $de \sim$ 含水比変化 dw 関係および間隙比変化 $de \sim$ 飽和度変化 dSr 関係をそれぞれ示している。なお、図中の白印 (○、△記号) のプロットはサクシオン荷重過程で履歴を与えた場合の、黒印 (●、▲記号) のプロットはサクシオン荷重過程で履歴を与えない場合の結果を示している。図-7(a)の含水比 $\sim \log p$ 関係は図-4(b)の $e \sim \log p$ 関係に示される先行圧縮応力付近で含水比が減少し始めており、 $e \sim \log p$ 関係と対応した挙動を示していることが分かる。図-7(b)の図中の点線は、 $Sr = 100\%$ (飽和) とした場合の関係を示している。この図からサクシオンの履歴の有無にかかわらずプロットが点線付近に位置し、空気進入値を越えないサクシオン ($s = 49\text{kPa}$) が荷重された状態での実験結果が飽和土の間隙比変化 \sim 含水比変化関係とほぼ一致することが分かる。また、図-7(c)に示されるようにこのような状態では圧縮にともなう飽和度変化はほとんど生じないことが分かる。図-8(a)は $s = 245\text{kPa}$ 一定条件で p により圧縮した場合 (図-1(b)) のブロックサンプル供試体の含水比 $w \sim \log p$ 関係を示している。また、図-8(b)、(c)は同じ実験結果の間隙比変化 $de \sim$ 含水比変化

dw関係および間隙比変化 $d e$ ～飽和度変化 $d S_r$ 関係をそれぞれ示している。なお、各図中の白印(○記号)のプロットはサクシオン載荷過程で空気進入値を越えるサクシオン履歴を与えた場合の、黒印(●、▲、■記号)のプロットはサクシオン載荷過程で履歴を与えない場合の結果(サクシオンが空気進入値を越えない場合)をそれぞれ示している。ブロックサンプル供試体の場合、供試体作製時には間隙の多くにバルク水が存在する状態と考えられる。しかし、図-2(a)、(b)の水分特性曲線に示されるようなエア-エントリバリューを越えるサクシオン履歴を与えた場合は、バルク水が排水されてメニスカス水が多く存在する状態となるものと考えられる。図-8(a)の含水比～ $\log p$ 関係では、バルク水の多い状態であると考えられる黒印の結果では圧縮にともない排水していることが分かる。一方、サクシオン履歴が与えられメニスカス水の多い状態であると考えられる白印の結果では、圧縮にともなう吸排水挙動がわずかにしか生じていない。また、図-8(b)の図中の点線は、 $S_r = 100\%$ (飽和)とした場合の関係を示している。図に示されるように、黒印のプロットが点線よりわずかに大きい傾きを示していることが分かる。このことは、バルク水が多いと考えられる供試体では間隙の圧縮量よりもわずかに多い排水を生じることを示している。このため図-8(c)に示されるように間隙比圧縮にともない飽和度が減少している。一方、メニスカス水が多いと考えられる白印の結果では、間隙の圧縮に対してもほとんど吸排水挙動を生じないことがわかる。このため間隙の圧縮にともない飽和度がわずかに増加している。これらの結果に示されるように、供試体の吸排水挙動に対して間隙水分分布は大きな影響を与える。

5. まとめ

本論文では、間隙に間隙水(バルク水)が多く存在する場合と粒子接点にメニスカス水が多く存在する場合に、不飽和土の圧縮特性がどのように異なるかについて実験結果に基づいて検討を加えた。サクシオンの増加・減少に対する挙動は間隙水の分布状況により異なり、バルク水が多く存在する場合はサクシオン増加により塑性的な変形を生じるが、メニスカス水が多く存在する場合は弾性的な変形を生じることが確認された。また、サクシオン履歴を受けた後の圧縮挙動としては、メニスカス水が多く存在する場合はサクシオン履歴により先行圧縮応力は増大しないが、バルク水が多く存在する場合は、サクシオンが空気進入値を越え塑性的な変形が生じた場合に先行圧縮応力が増大することが確認された。このような間隙水分分布が異なる場合のサクシオン載荷に対する変形挙動の違いは、不飽和土の弾塑性モデルにおいて考慮されるべき点であると考えられる。さらに、間隙水分分布の違いは圧縮時の吸排水挙動にも影響を与え、メニスカス水が多くなると間隙の圧縮量とは独立した吸排水挙動を示すことが確認された。

6. 参考文献

- 1)Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol. 40, pp. 405-430, 1990.
- 2)Kohgo, Y., Masashi, N. and Miyazaki, T.: Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 49-63, 1993.
- 3)土壌物理研究会編:土の物理学, 森北出版, 1979.
- 4)篠原雅樹, 神戸大学大学院卒業論文, 1989.
- 5)浜田耕一, 神戸大学大学院修士論文, 1993.
- 6)本田道識, 神戸大学大学院修士論文, 1994.
- 7)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.