

間隙比および応力経路が不飽和砂質土の土壌水分特性曲線に及ぼす影響

Influence of void ratio and stress-path to the soil-water characteristic curve of unsaturated sandy soil

笹原克夫^{a)*}・小山内信智^{b)}・田村圭司^{c)}

Katsuo SASAHARA, Nobutomo OSANAI and Keiji TAMURA

Abstract

In order to examine the influence of void ratio and stress-path to the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) of unsaturated sandy soil, suction loading and unloading tests on the specimen with different stress-path and void ratio were implemented. As results, following facts can be made clear. Hysteresis of SWCC for initially dry specimen during suction-unloading and loading can be negligible. SWCC, the relationship between void ratio and suction, and the relationship between void ratio and the degree of saturation during suction-unloading, are not influenced by the stress-path of the specimen. Void ratio seems to give no influence to the slope of SWCC, while the minimum volumetric water content of SWCC seems to be constant.

Key words : void ratio, stress-path, unsaturated sandy soil, soil-water characteristic curve

和文要旨

間隙比および応力経路が不飽和砂質土の土壌水分特性曲線に及ぼす影響を検討するために、サクシオン載荷・除荷試験を行った。その結果初期に乾燥状態でその後吸水させる場合は、土壌水分特性曲線のヒステリシスが無視しうることが判明した。またサクシオン除荷過程における土壌水分特性曲線、間隙比とサクシオンの関係、そして間隙比と飽和度の関係も応力条件に影響されることが分かった。そして土壌水分特性曲線は間隙比が変わっても勾配が同一であるように見えるが、同時に最小体積含水率が等しいようにも見える。間隙比が土壌水分特性曲線に与える影響についてはさらなる検討が必要である。

キーワード：間隙比、応力経路、不飽和土、土壌水分特性曲線

1. はじめに

降雨による斜面崩壊発生予測のためには、土層を構成する土の体積含水率と土壌水分吸引水頭（ないしはサクシオン）の関係を正確に把握して、土壌水分特性曲線を求め、それをvan Genuchten式¹⁾などによりモデル化して、飽和-不飽和浸透流解析を行うことで、降雨浸透過程を予測する必要がある。しかし「降雨浸透に伴う砂質土斜面のせん断変形挙動」²⁾を考えると、降雨浸透に伴う土の飽和度上昇により、土の自重が増加して鉛直方向の応力が変化することによって、せん断や圧縮・膨張が起こり、土の間隙比が変化する。また降雨と無降雨の繰り返しにより、土の乾湿が繰り返されるが、これはサクシオンが繰り返し載荷されることを意味する。このような応力や間隙比の変化が降雨浸透に影響をどれだけ与えるかを知るために、応力や間隙比の変化が土壌水分特性曲線に与える影響を把握する必要がある。またサクシオンの繰り返し載荷の影響も考える必要がある。これまで土壌水分特性曲線への土質特性の影響については、粒度分布の影響が検討されており、粒度が小さいほど同一の体積含水率に対してサクシオンが高くなること、そして体積含水率の変化に対するサクシオンの変化が小さくなること³⁾などの傾向が知られている。また粒度分布を考慮し

た土壌水分特性曲線のモデル化^{4)~6)}も試みられている。次にサクシオン載荷（脱水）の後にサクシオン除荷（吸水）させた時の両過程の体積含水率（ないしは飽和度）と土壌水分吸引水頭（ないしはサクシオン）の関係をみると、後者の曲線の方が同一の体積含水率（飽和度）に対する土壌水分吸引水頭（サクシオン）が低いことが知られ、土壌水分特性曲線のヒステリシス⁷⁾と呼ばれている。このヒステリシスは複数の降雨イベントを考慮した際のサクシオンの繰り返し載荷および除荷を考える際に重要である。ヒステリシスを考慮した土壌水分特性曲線のモデル化^{5),6)}も行われている。

これまで降雨浸透過程のモデル化に間隙比の影響を考慮した事例は、ほとんどが飽和透水係数の間隙比依存性を検討した例^{8)~10)}であり、土の体積含水率と土壌水分吸引水頭の関係である土壌水分特性曲線に、間隙比の影響を考慮した例^{11)~13)}は少ない。

一方粘性土の土壌水分特性曲線に応力条件が与える影響については、河井ら¹¹⁾が供試体の間隙比が等しければ、異なる拘束圧での等方圧縮条件下では、脱水時および吸水時の飽和度及び含水比とサクシオンの関係は等しいとして、拘束圧が土壌水分特性曲線に与える影響はないとしている。そして粘性土の土壌水分特性曲線に間隙比が与える影響については、サクシオン制御式次元圧密試験機と三軸圧縮試験装置を用いて、初期間隙比および拘束圧の異なるシルト質粘土の供試体にサクシオンを段階載荷および除荷した事例がある。この研究では間隙比が小さくなると、次元圧密条件下でのサクシオン載荷時

* 連絡著者 / corresponding author

a) 高知大学農学部

Faculty of Agriculture, Kochi University
〒783-8502 高知県南国市物部乙200

200, Monobeotsu, Nangoku-shi, 783-8502, Kochi, Japan

b) 国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室

National Institute for Land and Infrastructure Management

c) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ

Public Works Research Institute

(脱水時)の空気侵入値およびサクシオン除荷時(吸水時)の水侵入値が小さくなるが,サクシオン載荷時の脱水曲線は間隙比に影響されない吸着水間隙比に収束するため,間隙比は土壌水分特性曲線の形状(曲率)に影響を与えるとしている。それに対して孫ら¹²⁾は,初期間隙比が異なる供試体の脱水時および吸水時のサクシオンと飽和度の関係を表す曲線は,初期間隙比が小さいほどサクシオンの大きい方に平行移動するが,曲線の勾配はほぼ一定であること,そして供試体の圧縮時およびせん断時の間隙比と飽和度の関係は,サクシオンが異なってもほぼ同一勾配の曲線であり,飽和度の変化は間隙比の変化と線形関係であるとしている。つまり孫らの結果は,河井ら¹¹⁾の間隙比の影響は土壌水分特性曲線の曲率にも影響するという結果と相反している。また杉井ら¹³⁾は加圧法により間隙比別のシルト質土の土壌水分特性曲線を求めているが,上記の2事例^{11),12)}のようなはっきりした傾向は認められない。

以上のように間隙比が土壌水分特性曲線に与える影響については研究事例も少ないが,土壌水分特性曲線の勾配に影響を与えるというものと,与えないというものがあり,結論は出ていないと考える。その上いずれの研究も粘性土を対象としたものであり,自然斜面の表層を構成する砂質土の研究事例がない。次に拘束応力が土壌水分特性曲線に与える影響についても研究事例が少ないが,等方応力条件での検討例のみであり,自然斜面で多いと考えられる異方応力条件下での検討事例がない。

このため本研究では,いくつかの攪乱,不攪乱砂質土の供試体に対する,サクシオン制御式三軸圧縮試験装置を用いた,等方圧縮ないしは異方圧縮条件下の供試体のサクシオン載荷・除荷試験を行い,間隙比,応力経路が不飽和砂質土の土壌水分特性曲線に及ぼす影響を検討する。

2. 検討方法

2.1 試験装置

本研究で使用した試験装置は不飽和三軸圧縮試験用に改良したサクシオン制御可能な三軸圧縮試験装置(図-1)である。上部キャップには撥水性のガラスフィルターを用いて間隙水が排出されるのを防ぎ,間隙空気圧を載荷する。下部ペダスタルには空気侵入値が196(kPa)であるセラミックディスクを用いて空気の侵入を不可能にし,水のみ出入りできるようにして間隙水圧を載荷するが,今回は間隙水圧を大気圧に解放している。このようにして供試体の間隙空気圧と間隙水圧を制御して下式によってサクシオンを与えた。

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

ここでsはサクシオン(kPa), u_a は間隙空気圧(kPa), u_w は間隙水圧(kPa)である。

そして不飽和供試体の体積変化を計測するために二重

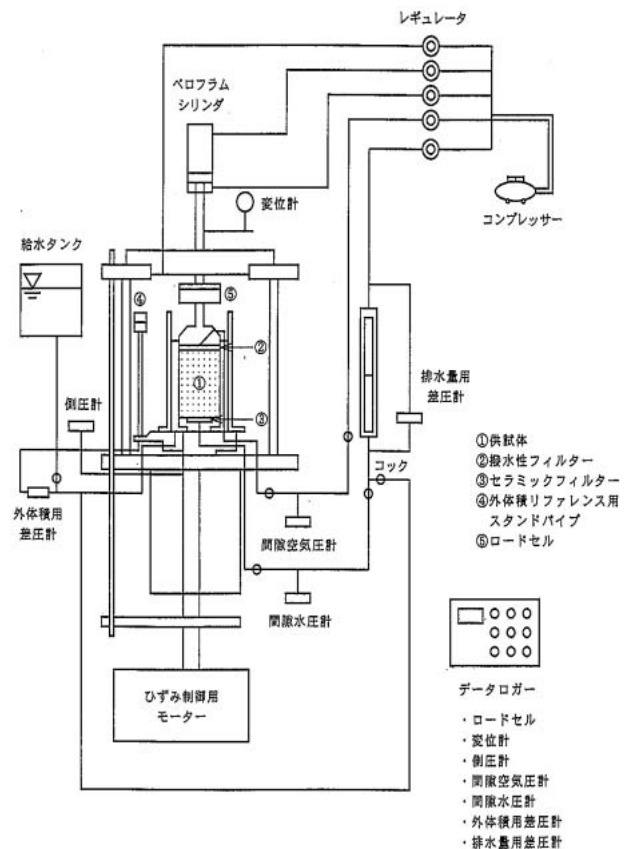


図-1 サクシオン制御型不飽和三軸圧縮試験装置
Fig.1 Conventional Triaxial Compression Apparatus with suction control

セルとし,レファレンスパイプの水位(一定)とセルの水面高の差分を差圧計により計測することにより供試体の体積変化を求めている。

供試体の寸法は直径5cmおよび高さ10cmを標準として作成した。不攪乱供試体は砂質土であるため壊れやすいので凍結させて整形し,セル内に設置した。攪乱供試体はまず目標含水比を,各々の試験条件でサクシオンの初期値である78~88(kPa)に対応する含水比を定め,それを目安に試料と水を混ぜ合わせ,静的締固め(JIS 0812-2000)¹⁴⁾により目標の間隙比になるように締固めた。

2.2 試料

以下の4種類の試料を用いた。なお各々の試料は後述するように,別々の条件の試験に用いた。

①吉浦東1~3(不攪乱)

平成11年6月29日に崩壊した広島県吉浦東地区の斜面¹⁵⁾で採取した不攪乱試料である。中生代白亜紀後期に生成された広島花崗岩類異花崗岩の粗粒-中粒黒雲母花崗岩が風化したまさ土である。

②混合土

川砂(利根川砂),粘土1(商品名DLクレイ),粘土2(商品名MCカオリン)を15:3:2の重量比で混合した。この重量比は予備実験よりサクシオンによるせん断強度の増加ができるだけ大きくなる配合として求めた。

各々の試料の土質特性を表-1に, 粒度分布を図-2, 3に示す。

2.3 試験方法と条件

以下のシリーズの試験を行った。ここでサクシオン載荷(排水)およびサクシオン除荷(吸水)は, 上記の試験装置を用いて, 供試体にサクシオンを段階的に載荷・除荷して行った。供試体の各サクシオン載荷時の体積含水率は, 各段階の体積変化と給排水が収束した時点の体積と給排水量を求めておき, 試験終了後の供試体の体積含水率から逆算して求めた。なお応力は以下のように供

表-1 試料の土質特性
Table 1 Soil properties of the tested soil

試料	攪乱/不攪乱	土粒子密度 (g/cm ³)	自然含水比(%)	d ₅₀ (mm)
吉浦東1	不攪乱	2.636	11.99	0.0058
吉浦東2	不攪乱	2.63	9.95	0.0284
吉浦東3	不攪乱	2.644	10.74	0.0472
混合土	攪乱	2.698	—	0.1517

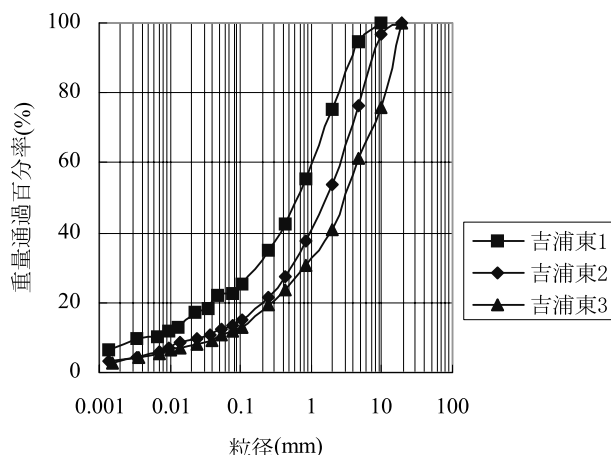


図-2 吉浦東1~3の粒度分布

Fig. 2 Grain size distribution of Granite soil at the Yoshiurahigashi 1 ~ 3

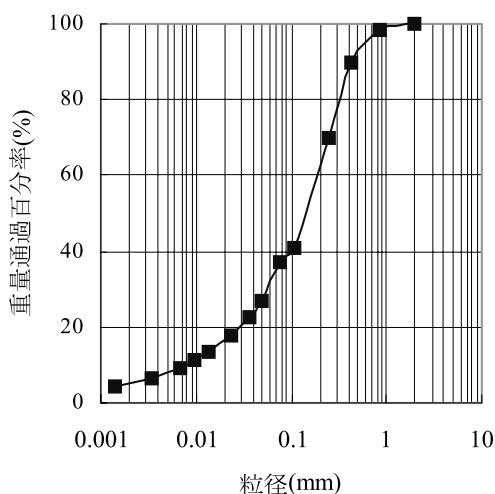


図-3 混合土の粒度分布

Fig. 3 Grain size distribution of the mixed soil

試体に載荷した全応力 σ から, 供試体内部の間隙空気圧 u_a を差し引いた基底応力 σ_{net} で示す。これは不飽和土の変形・強度特性は, サクシオンと共に, 基底応力表示の応力に支配されるといわれているためである。

$$\sigma_{net} = \sigma - u_a \dots\dots\dots(2)$$

(1) 等方圧縮条件下でのサクシオン載荷・除荷

サクシオン載荷時(排水時)および除荷時(吸水時)の供試体の土壌水分特性や体積変化を比較検討するために, 広島まき土である吉浦東1~3の不攪乱試料を用いて行った。同一供試体に対してサクシオンを段階的に載荷・除荷し, 各サクシオン段階でのサクシオンと含水比, そして間隙比を求めた。試験の手順は以下の通りである。試験の種類と条件は表-2に示す。

- ① 不攪乱供試体を三軸セル内にセットする。
- ② 基底平均主応力 $\sigma_{mnet} = 9.8$ (kPa) を載荷し, 等方圧縮。

圧縮終了後を初期状態とする。

- ③ 段階的にサクシオン載荷ないしは除荷を行う。

(2) 応力経路の異なる異方圧縮条件下でのサクシオン除荷

応力経路の相違が供試体の土壌水分特性や体積変化に与える影響を検討するために, 混合土を用いて, 基底平均主応力や基底主応力比の異なる異方圧縮条件下でのサクシオン除荷試験を行った。試験の種類と条件を表-3に示す。また試験の手順は以下の通りである。

- ① 含水比および間隙比を調整した供試体を三軸セルにセット。
- ② 基底平均主応力 $\sigma_{mnet} = 58.9$ (kPa) およびサクシオン 78.5 (kPa) を載荷し, 等方圧縮。
- ③ 所定の基底平均主応力と基底主応力比を載荷。
- ④ サクシオンを段階的に除荷。

(3) 異なる間隙比および含水比の供試体のサクシオン測定

異なる間隙比の試料の土壌水分特性曲線を比較するために, 異なる間隙比および含水比の供試体を作成し, サクシオンを測定した。その後同じ間隙比の供試体についてサクシオンと飽和度, 体積含水率, 含水比の関係を整理し, 所定の間隙比の試料の土壌水分特性曲線とした。異なる間隙比における土壌水分特性曲線を求めるには, 本来同一の供試体に対してサクシオン載荷・除荷を行う必要があるが, 今回は含水比調整して作成した供試体でも, 間隙比がほぼ等しければ土中の水分保持状態が等しいと見なし, それらから土壌水分特性曲線を得ることとした。これが妥当であるとする理由は後述する。供試体作成には混合土を用い, 表-4に示すような間隙比の供試体を作成し, サクシオン測定を行った。

表-2 等方圧縮条件下での吉浦東1-3のサクシオン載荷・除荷試験の種類と条件

Table 2 Test condition of suction loading and unloading tests of the granite soil at Yoshiurahigashi 1 ~ 3 site under isotropic compression conditions

供試体	初期間隙比 e_0	初期含水比 $w_0(\%)$	初期サクシオン $s_0(\text{kPa})$	基底平均主応力 $\sigma_{mnet}(\text{kPa})$	サクシオン $s(\text{kPa})$
吉浦東1	0.78	9.2	0.08	9.8	0.08→0→2.0→3.9→5.9→7.8→9.8→19.6→39.2→58.8→78.4→58.8→39.2→19.6→9.8→7.8→5.9→3.9→2.0→0
吉浦東2	0.881	10.0	8.2	9.8	8.2→78.4→58.8→39.2→19.6→9.8→7.8→5.9→3.9→2.0→0
吉浦東3	0.781	10.2	8.2	9.8	8.2→78.4→58.8→39.2→19.6→9.8→7.8→5.9→3.9→2.0→0

表-3 応力経路の異なる異方圧縮条件下での混合土のサクシオン除荷試験の種類と条件

Table 3 Test condition of suction loading and unloading tests of mixed soil under different stress paths with isotropic compression conditions

ケース	初期間隙比 e_0	初期含水比 $w_0(\%)$	初期サクシオン $s_0(\text{kPa})$	基底平均主応力 $\sigma_{mnet}(\text{kPa})$	基底主応力比 $\sigma_{net1}/\sigma_{net3}$	サクシオン $s(\text{kPa})$
No. 1	0.654	5.2	86.9	180	3.5	86.9→79.9→58.9→39.2→19.6→9.8
No. 2	0.669	5.5	79.8	164	3.0	79.8→79.9→58.9→39.2→19.6→9.8
No. 3	0.664	4.9	84.7	108	3.5	84.7→79.9→58.9→39.2→19.6→9.8
No. 4	0.658	5.0	83.4	180	2.1	83.4→79.9→58.9→39.2→19.6→9.8

表-4 サクシオン測定する供試体の間隙比と含水比

Table 4 Void ratio and water content of specimen for suction measurement

初期間隙比 e_0	基底平均主応力 $\sigma_{mnet}(\text{kPa})$	基底平均主応力載荷後の間隙比 e_c	含水比 $w(\%)$
0.607	98.1	0.599~0.610	4.9, 6.2, 6.7, 8.0, 9.0, 10.1, 10.9, 11.3, 12.0
0.760	98.1	0.698~0.748	4.7, 6.2, 7.1, 8.2, 9.3, 9.8, 10.7, 11.4, 11.6, 12.2
0.914	98.1	0.811~0.845	5.3, 5.7, 7.0, 8.0, 9.1, 9.8, 11.2, 11.8, 11.9, 12.4
1.068	98.1	0.913~0.955	4.9, 6.0, 6.8, 8.1, 8.9, 10.0, 11.1, 11.3, 11.5, 11.8

3. 間隙比及び応力経路が土壌水分特性曲線に及ぼす影響

3.1 異なる応力経路下での土壌水分特性曲線

(1) 等方圧縮条件下でのサクシオン載荷・除荷

図-4~6に各々吉浦東1, 吉浦東2, そして吉浦東3の等方圧縮条件下でのサクシオン載荷・除荷試験の結果を示す。それぞれの図において, (a)体積含水率 θ -サクシオン s , (b)間隙比 e -サクシオン s , (c)間隙比 e -含水比 w , の関係を示す。

まず図-4(a)より吉浦東1のサクシオン載荷時および除荷時の, 体積含水率 θ -サクシオン s の関係を比較する。まずサクシオンを載荷する排水過程と, サクシオンを除荷する吸水過程を比較すると, 排水過程より吸水過程の方が同一サクシオンに対する体積含水率がやや小さい。つまり吸水過程の方が乾燥側にある。これは土壌水分特性曲線の吸排水過程におけるヒステリシス¹⁶⁾として知られ, 初期にサクシオンの高い領域で乾燥していた供試体が吸水する時には, 土粒子間に形成されるメニスカスのみに水が存在する(メニスカス水¹⁷⁾)ため, 単位体積当たりの土中水の含有量は小さいのに対して, 飽和した供試体が排水される時には, ある程度大きなサクシオンが載荷されるまでは土粒子間のメニスカス水のみでな

く, 空隙にもボンド水¹⁸⁾が残留するため, 体積含水率が大きくなる。土壌水分特性曲線のヒステリシスは粘性土において顕著であることが知られている。しかし今回の砂質土の場合に排水過程と吸水過程の差異は, 体積含水率が高く, サクシオンの変化に対して急激に体積含水率の変化する領域(以降高飽和度領域と呼ぶ)では明瞭だが, $s \geq 20$ (kPa) で $\theta < 10$ (%) 程度と, サクシオンが高く乾燥している領域(以降低飽和度領域と呼ぶ)では, サクシオンの変化に対して体積含水率の変化の小さい領域(以降低飽和度領域と呼ぶ)では両者の差異は小さくなる。これは $s \geq 20$ (kPa) となると, 排水過程においても土粒子間の空隙に残留するボンド水が少なくなり, ほとんどの土中水が土粒子間のメニスカス水として存在し, 吸水過程における土中水の存在形態と変わらなくなるためと考えられる。よってこの供試体の場合, 低飽和度領域では排水曲線と吸水曲線はほぼ同一と見なしてしまっても実用的には差し支えないと考えられる。また試験当初に初期状態の供試体を吸水させて飽和させたが, この時の初期吸水曲線と, 供試体の飽和後に再びサクシオンを載荷した時の排水曲線はほぼ同一曲線上にあるとみなせる。このことから始めに供試体に吸水させた場合, 吸水された水は大部分が土粒子間のメニスカス水と

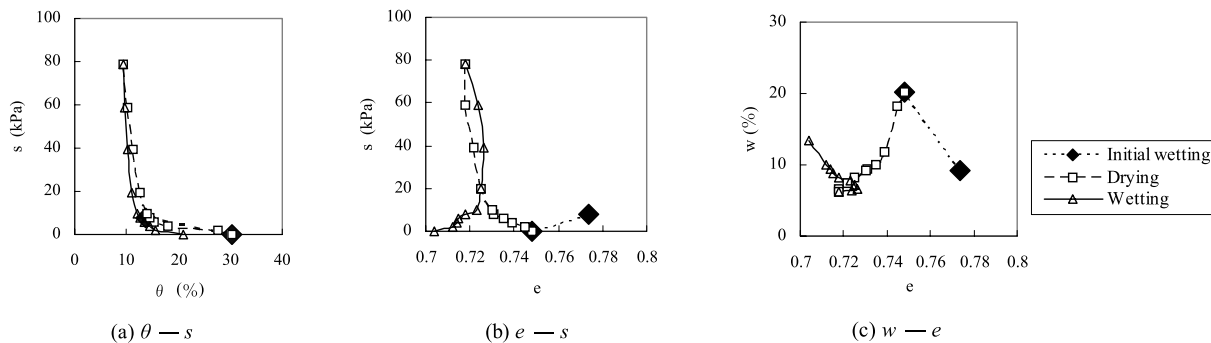


図-4 吉浦東1のサクシオン・除荷時における体積および含水状況の変化

Fig. 4 The volumetric and water content change of granite soil at the Yoshiurahigashi 1 site during suction loading and unloading

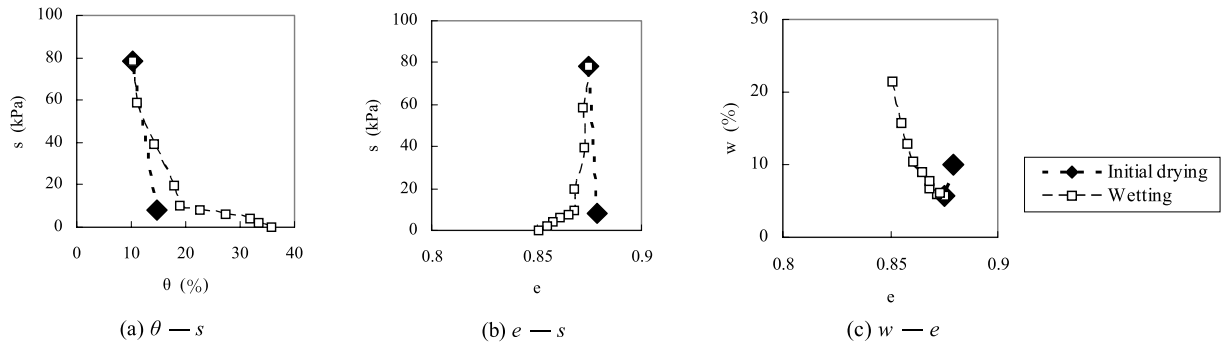
なるため、排水過程でもメニスカス水が脱水されていると考えられる。そしてその後の吸水過程でも、吸水された水はメニスカス水として蓄積されていったと考えられる。よって排水過程でも、供試体の初期吸水時と同様な体積含水率 θ とサクシオン s の関係を示すと考えられる。現実の自然斜面を考えると、給排水過程の繰り返しによりこのようなメニスカス水が卓越する水分保持状態をしていると考えられる。よって自然斜面を構成する土の土壌水分特性曲線は、給水（降雨）時と無降雨（排水）時のヒステリシスは小さいものと考えられる。

次に図-4(b)に示された吉浦東1の $e-s$ 曲線を見ると、高飽和度領域では排水時も吸水時も圧縮が大きいが、低飽和度領域ではほとんど間隙比が変化しないことがわかる。粘性土でも同様な間隙比変化が観察されている。高飽和度領域における吸水時の圧縮はコラプス¹⁹⁾と呼ばれ、浸水による体積圧縮と考えられる。また同じく排水時の圧縮は負の間隙水圧が有効応力として作用し、サクシオンの増加が有効応力の増加として作用したため、圧縮したものと考えられる。つまり排水時における高飽和度領域の供試体では、土粒子間の空隙のかなりの部分に水が侵入し、土の空隙において土中水が連続した状態である「疑似飽和状態」である空隙が多いと考えられ、サクシオンはこの連続した土中水を伝播すると考えられる。また供試体の初期状態からの吸水過程と、排水過程の後の吸水過程における $e-s$ がほぼ同様な傾きの直線であることも特徴の一つといえる。両者とも高飽和度領域で間隙比の変化が大きい領域であり、この領域においては繰り返し吸水（サクシオン除荷）を行っても、サクシオンの減少に伴う間隙比減少量はほぼ等しく、曲線形状は等しい。

また図-4(c)の吉浦東1の $e-w$ 曲線の排水過程および吸水過程をみると、先の $\theta-s$ や $e-s$ の関係において、曲線勾配の異なる高飽和度領域と、低飽和度領域が、滑らかにつながり、ほぼ同一の曲線で表されると見させる。この事実は孫¹²⁾らにより粘土でも確認されたことであるが、砂質土でも同様であることが本研究により確認された。 $\theta-s$ 曲線や $e-s$ 曲線については、排水過程および

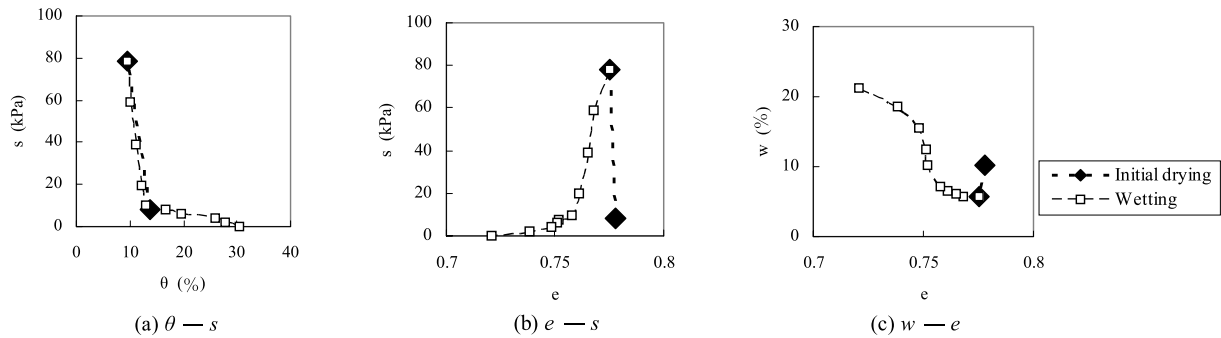
吸水過程のいずれにおいても、高飽和度領域と低飽和度領域で傾きが異なり、別々の曲線であるように見えるのに対して、 $e-w$ 曲線が高飽和度領域でも低飽和度領域でも同一の曲線で表されることは特記すべきことである。特に吸水過程については、供試体の初期状態からの吸水による圧縮過程と、その後排水過程を経て再び吸水する時の $e-w$ 直線の傾きはほぼ同一である。これは上記 $e-s$ 関係における吸水過程の繰り返しにおいて、サクシオン減少に対する間隙比減少量が等しいことと同様に、吸水過程における特徴の一つである。以上より繰り返し降雨がある場合でも、吸水過程における $e-s$ 、 $e-w$ 関係を示す圧縮曲線は同一であると見なしうるのである。

次に図-5, 6より吉浦東2および3の供試体の特性を見る。これらの供試体においては、供試体の初期状態から一気に $s=80$ (kPa) までサクシオン・除荷により排水させ、その後サクシオン除荷を行って飽和状態まで吸水させている。よって排水過程と吸水過程のヒステリシスについては厳密には検討できない。しかし供試体の初期状態からの排水過程とその後の吸水過程の $\theta-s$ 関係（図-5, 6(a)）は、吉浦東2でやや異なるものの、吉浦東3ではほぼ同一の曲線上に存在すると見なせ、少なくとも体積含水率の変化に対してサクシオンが急激に変化する低飽和度領域においては、排水過程とその後の吸水過程における $\theta-s$ 関係が等しいという吉浦東1と同様な結果となった。次に両者の $e-s$ 関係（図-5, 6(b)）を見ると、供試体の初期排水過程ではサクシオンの増加に伴う間隙比の減少は非常に小さく、ほとんど圧縮がないのに対して、吸水過程では低飽和度領域でのサクシオン減少に伴う圧縮が少なく、高飽和度領域で急激に圧縮するコラプスが発生している。つまり $e-s$ 関係においては、吉浦東1と同様に、吸水過程においては低飽和度領域と高飽和度領域でサクシオン減少に伴う間隙比減少量が異なる。しかし $e-w$ 関係（図-5, 6(c)）を見ると、吉浦東2では、低飽和度領域も、コラプスの発生した高飽和度領域もほぼ同一の線形関係で表されると見なせ、吉浦東1と同様な関係を示している。ここで吉浦東3では間隙比0.75付近で急激な含水比の上昇が認められるものの、



図一五 吉浦東2のサクシオン・除荷時における体積および含水状況の変化

Fig. 5 The volumetric and water content change of granite soil at the Yoshiurahigashi 2 site during suction loading and unloading



図一六 吉浦東3のサクシオン・除荷時における体積および含水状況の変化

Fig. 6 The volumetric and water content change of granite soil at the Yoshiurahigashi 3 site during suction loading and unloading

その前後の含水比上昇に対する間隙比減少量はそれほど変わらないことから、間隙比0.75付近で突発的に含水比上昇したものの、基本的には吸水過程を通じて含水比上昇に対する間隙比減少量はほぼ一定であることが示唆される。このことから吉浦東2, 3も吉浦東1と同様に、低飽和度領域でも、そして高飽和度領域においても、 $e-w$ 関係は同一の線形関係で示せることになる。

(2) 応力経路の異なる異方圧縮条件下でのサクシオン除荷

図一七に混合土のサクシオン除荷時における主応力比、ないしは基底平均主応力の異なる供試体の $s-\theta$ (図一七(a)), $e-s$ (図一七(b)), $e-w$ (図一七(c))の比較を示す。ここで主応力比は、実際の斜面内の土の応力状態を考慮し、基底最大主応力が基底最小主応力より大きい異方応力状態とする。

まず図一七(a)の主応力比、基底平均主応力の異なる供試体のサクシオン除荷時の $s-\theta$ の関係を見る。これを見ると主応力比および基底平均主応力などの応力状態が異なっても、それに関わりなく、サクシオン除荷過程における $s-\theta$ の関係は一定であることがわかる。ただし供試体の初期状態から等方圧縮、そして基底平均主応力載荷に至る過程ではやや供試体の応力条件によってばらつきが見られ、そしてその後のサクシオン除荷過程と曲線の傾きが異なっていることがわかる。河井¹¹⁾らが等方圧縮条件下の粘性土の土壌水分特性曲線が応力条件に影響

されないことを示したが、本研究では等方圧縮条件のみならず異方圧縮条件でも同様であることが示された。

次に図一七(b)の $e-s$ の関係を見る。供試体の初期状態から等方圧縮、そして等方圧縮から基底平均主応力を載荷する過程では、供試体の応力条件毎にサクシオン減少量に対する間隙比変化量も異なることがわかる。しかしその後のサクシオン除荷時の吸水曲線は、供試体の応力条件が異なってもサクシオン減少量に対する間隙比変化量はほぼ同様であり、サクシオンが減少するほど(飽和度が高くなるほど)、サクシオン減少量に対する間隙比減少量が大きくなる傾向がある。しかしサクシオン除荷に伴う圧縮曲線の傾きは、今回検討した応力条件の範囲ではほぼ同一である。

図一七(c)の $e-w$ の関係からは、いずれの供試体も初期条件から等方圧縮、基底平均主応力載荷後のサクシオン除荷第1段階 ($s=78.5$ (kPa)) までは含水比 $w=5.5$ (%) とほぼ一定の条件下で間隙比 e が変化している。ただしケース2~4の供試体はいずれも初期状態から間隙比が単調減少するのに対して、主応力比および基底平均主応力が全ケースの中で最大であるケース1では、サクシオン除荷段階の途中までは間隙比が増加することもあり、その後単調に減少していることが異なる。つまりケース1ではサクシオンの大きな領域ではサクシオン除荷に伴って膨張している。しかしいずれのケースにおいても、

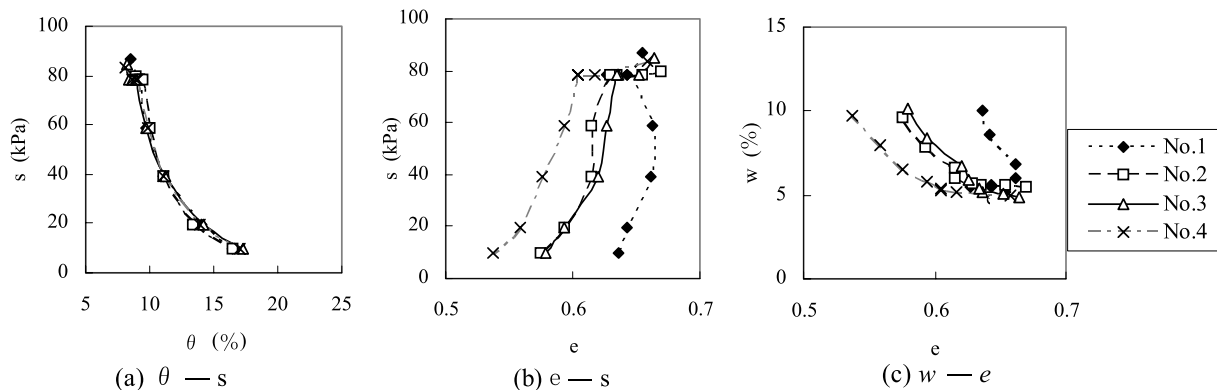


図-7 混合土の異方圧縮条件でのサクシオン除荷過程における体積および含水状況の変化

Fig.7 The volumetric and water content change of mixed soil during suction loading and unloading under anisotropic compression condition

サクシオン除荷第一段階以降は単調に圧縮し、かつ含水比増加に対する圧縮量（曲線の勾配）はほぼ同様である。つまりサクシオン除荷過程での含水比増加に対する圧縮量には供試体の応力条件は無関係である。これはサクシオン除荷過程における $s-\theta$ 及び $e-s$ が供試体の載荷応力条件の影響を受けないことも調和的な結論である。

3.2 異なる間隙比および含水比の供試体のサクシオン測定

次に間隙比および初期含水比を変えて作成した供試体の、同じ初期間隙比の供試体の $s-S_r$, $s-\theta$, $s-w$ を、図-8(a)~(c)に示す。本来初期間隙比が異なる供試体の土壌水分特性の検討のためには、同一供試体に対してサクシオン載荷・除荷を行うのだが、今回用いた試験装置では5 (kPa) より小さいサクシオンを長期間安定的に載荷することが不可能であったこと、そして前述の「3.1 異なる応力経路下での土壌水分特性曲線」において特にサクシオンが20 (kPa) より高い領域では土中水のほとんどが土粒子間にメニスカス水として存在すると考えられることから、含水比調整して作成した供試体でも土中水がメニスカス水として存在し、サクシオン載荷・除荷中の供試体と同様な水分保持形態であると考えることにより、間隙比および含水比がほぼ等しい別々の供試体の

土壌水分特性は同一であると見なした。

図-8(a)の間隙比が異なる供試体の $s-S_r$ の比較を見ると、間隙比が小さい供試体の土壌水分特性曲線ほど、飽和度の大きな右方に存在するが、全体的に曲線の勾配はほぼ等しいように見える。ただしサクシオンが大きくなると間隙比の小さな供試体の土壌水分特性曲線の傾きはやや小さくなり、特に70 (kPa) 以上の領域では、サクシオンの増加に伴って土壌水分特性曲線がある一点に収束していくようにも見える。つまり最大飽和度は間隙比が小さくなるほど大きい、最小飽和度は間隙比が小さくなるにつれて大きくなるようにも、間隙比が異なってもある一点に収束するようにも見える。最小飽和度に対する間隙比の影響についてはさらなる検討が必要である。

次に図-8(b)の間隙比が異なる供試体の $s-\theta$ の比較を見ると、基本的に $s-S_r$ の比較と同様なことがわかる。つまり最大体積含水率は間隙比の小さな供試体ほど大きい、曲線の傾きは間隙比の大小に関わらずほぼ等しいように見える。しかしサクシオンが高い領域では、間隙比の小さな供試体の土壌水分特性曲線ほど傾きが小さくなり、間隙比に影響されないある一点に収束しているようにも見える。

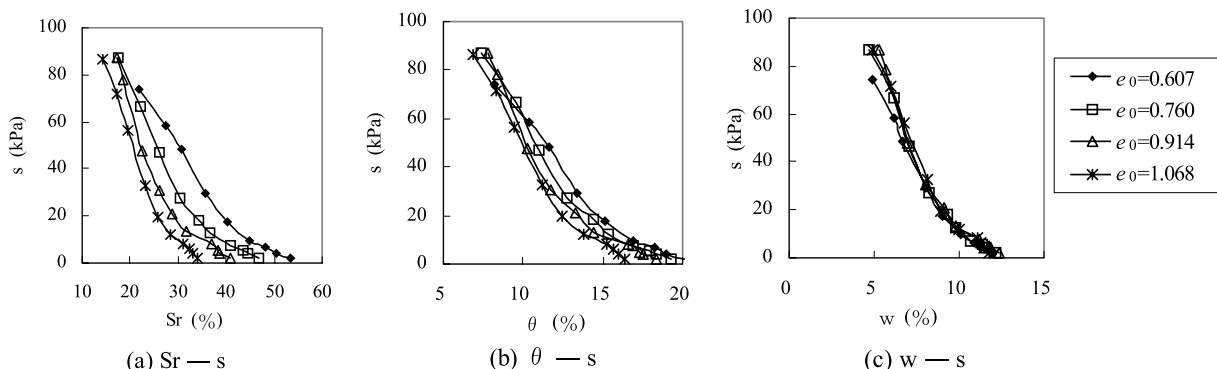


図-8 間隙比の異なる混合土のサクシオンと飽和度, 体積含水率, 含水比の関係

Fig.8 Suction s —degree of saturation S_r , Volumetric water content θ , water content w of mixed soil specimen with different void ratio

そして図-8(c)の間隙比が異なる $s-w$ の比較を見ると、間隙比の大小に関わらずほぼ同一の曲線で両者の関係が表されるように見える。ただしサクシオンが40 (kPa) より高い領域では間隙比0.607と最小の供試体の土壌水分特性曲線の傾きが小さくなり、同一のサクシオンに対して、他の供試体よりやや小さな含水比となっている。これが $s-S_r$ および $s-\theta$ が、サクシオンの大きな領域で間隙比の小さな供試体の曲線の傾きが小さくなっている原因である。しかしこれは実験誤差であるかもしれない、間隙比の異なる供試体ではサクシオンが大きくなると同一の含水比に曲線が収束するのか、それとも間隙比の小さな供試体ほど最小の含水率が大きくなるのかについては、今後さらに精度の良い測定を行う必要がある。

4. まとめ

応力条件や間隙比の異なる砂質土供試体を用いたサクシオン・除荷試験を行い、それらが土壌水分特性曲線に与える影響について検討した。その結果以下のような結果が判明した。

- (1)今回用いた砂質土の場合、特にサクシオンが20 (kPa) より大きい乾燥領域では、排水過程と吸水過程の土壌水分特性曲線の差異が小さい。また始めに吸水させた供試体に対してサクシオン・除荷試験を行い、排水させた場合は飽和付近でも土壌水分特性曲線がほぼ同一となり、この場合給排水過程で土壌水分特性曲線のヒステリシスが無視しうる。これより実斜面において繰り返し降雨がある場合でも、土壌水分特性が変化しないものと扱いうる。
- (2)サクシオン・除荷過程においても、また除荷過程においても、サクシオンが20 (kPa) 以下と小さい場合は急激な圧縮が発生する。また繰り返し吸水させる場合、このサクシオンの低い領域でのサクシオンの減少に伴う間隙比減少量はほぼ等しい。また繰り返し降雨がある場合の、吸水過程における、サクシオン減少に対する圧縮量を示す圧縮曲線も同一である。
- (3)サクシオン・除荷・載荷過程における間隙比と含水比の関係は、急激な圧縮の発生するサクシオン20 (kPa) 以下の高飽和度領域と、ほとんど体積変化のない低飽和度領域で連続した同一の曲線で表現される。また繰り返し吸水させた時の曲線の勾配は等しい。
- (4)異なる応力状態の異方圧縮条件下でサクシオン・除荷を行っても、サクシオン・除荷過程での土壌水分特性曲線は同一である。つまり応力条件は土壌水分特性曲線に影響しない。またサクシオン・除荷過程における間隙比とサクシオンの関係、そして間隙比と含水比の関係も応力条件

に影響されない。

- (5)間隙比の異なる供試体の土壌水分特性曲線の勾配は間隙比に影響されないように見える。が、逆にサクシオン・除荷に伴って土壌水分特性曲線がある最小飽和度（ないしは体積含水率）に収束しているようにも見える。最小飽和度に対する間隙比の影響についてはさらなる検討が必要である。

引用文献

- 1) van Genuchten, M. Th. : A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. of American Jour., 44., pp. 892-898, 1980.
- 2) 笹原克夫: 地形及び降雨要因が急勾配砂質土斜面のせん断変形に与える影響, 地すべり (日本地すべり学会誌), Vol. 38, No. 3, pp. 204-212, 2001.
- 3) 社地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, p. 27, 2004.
- 4) Fredlund, D. G. and Xing, A. : Equations for the soil-water characteristic curve, Can. Geotech. J., 31, pp. 521-530, 1994.
- 5) Eduardo R. and Fernando R. : Modeling hysteresis of the soil-water characteristic curve, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 3, pp. 135-145, 2005.
- 6) Yazhou Z. : A hysteresis model for the soil-water characteristic curves of simple granular soils, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 2, pp. 337-348, 2007.
- 7) Fredlund, D. G. and Raharjo, H. : Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley and Sons, pp. 116-117, 1993.
- 8) 山口柏樹: 全改訂土質力学, 技報堂出版, p. 56, 1984.
- 9) 宇野尚雄・杉井俊夫・神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No. 469/III-23, pp. 25-34, 1993.
- 10) 福田光治・宇野尚雄: 透水係数に関係する粒度分布と間隙指標, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 193-204, 1997.
- 11) 河井克之・軽部大蔵・芦田渉・嘉戸善胤: 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会論文集, No. 666/III-53, pp. 291-302, 2000.
- 12) D. A. Sun, H. B. Cui, Hajime Matsuoka and D. C. Sheng : A Three-Dimensional elastoplastic model for unsaturated compacted soils with hydraulic hysteresis, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 2, pp. 253-264, 2007.
- 13) 杉井俊夫・山田公夫・近藤智美: シルト質土の間隙を考慮した水分特性曲線, 第36回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp. 905-906, 2001.
- 14) 社地盤工学会: 土質試験の方法と解説-第一回改訂版-, 2000.
- 15) 笹原克夫・南哲行: 6. 29広島県土砂災害における山崩壊発生に関する土質力学的検討, 土木技術資料, Vol. 42, No. 6, pp. 50-55, 2000.
- 16) 土壌物理研究会: 土の物理学, 森北出版, p. 222-225, 1979.
- 17) 社地盤工学会: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, pp. 35-36, 2006.
- 18) 軽部大蔵・加藤正司・浜田耕一・本田道織: 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.
- 19) 社地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, pp. 108-110, 2004. (原稿受付2008年1月17日, 原稿受理2008年5月9日)