

間隙比の影響を考慮した 水分特性曲線モデル

河井克之¹・軽部大蔵²・芦田 渉³・嘉戸善胤⁴

¹正会員 工修 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)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³正会員 工修 兵庫県洲本土木事務所 (〒656-0021 洲本市塩屋 2-4-5)

⁴正会員 工修 (株)クボタ (〒660-0095 尼崎市大浜町 2-26)

本論文では、水分特性曲線に与える要因の検討を行うために、3種類の試験方法でサクシオンによる脱水曲線と吸水曲線を得た。一つ目は、初期状態(含水比、間隙比、飽和度)の異なる水分特性曲線、二つ目に、サクシオン履歴の異なる水分特性曲線、そして、拘束圧条件の異なる水分特性曲線である。得られた水分特性曲線は、その形状を定量的に評価するために、Brooks and Corey式で近似し、算出されたフィッティングパラメーターの値を比較した。その結果、水分特性曲線は間隙比に大きく依存することが分かった。その効果は空気侵入値、水侵入値に現れ、それぞれ間隙比の関数で表される。この関係を Toll の提案するサクシオン～間隙比/等価間隙比面に適用した新しいモデルを提案する。このモデルによって、任意の初期状態から描く脱水曲線、吸水曲線を予測することができる。

Key Words: water retention curve, hysteresis, air entry value / water entry value, void ratio / equivalent void ratio, Brooks and Corey equation

1. はじめに

人工の土構造物の多くは、不飽和土を材料として用いる。特に締固めた不飽和土は一般的に飽和土に比べて圧縮しにくくせん断抵抗力も大きいいため、施工過程での変状は小さくあまり問題とならない。しかし、施工が長期に及ぶ場合、降雨に見舞われ、当初の品質を保持できないまま施工が進むことや、施工計画が大幅に変更される場合もある。さらに施工後の構造物に対して、長い年月にわたって湿潤と乾燥を繰り返した土の土質定数の評価方法や維持管理手法が、確立されておらず、問題が発生してからの事後処理となることが多い。近年このような問題をふまえて、不飽和土の力学体系の整備に目が向けられている。

不飽和土に関する研究は大きく2つに分けることができる。ひとつは不飽和浸透問題、もうひとつは破壊強度と変形問題を扱った分野である。前者は、土の水分保持特性より不飽和土の透水係数を算出するものであり、多くは浸透中の土の体積変化を考慮しない。後者は不飽和土の力学挙動を特徴付けるサクシオンを、有効応力に換算するか、または土の骨格剛性を強める係数として土骨格の構成モデルに組

み込むことにより対処される。この場合は主に定常状態が扱われ、土中の水分移動は考慮されない。このように、不飽和土では、土中水の移動と土骨格の変形特性は、本来相互作用を及ぼし合うものの、それぞれ個別に表現されてきた。この2つの表現(支配方程式)を結び付け、互いに連成させる橋渡しをするのが水分特性曲線であると言えよう。しかし、水分特性曲線はそれぞれの問題を解く手段として用いられるに過ぎず、その基本性質に関する研究は少ない。さらに、水分特性曲線は試料によって異なるだけでなく、同一試料であっても脱水過程と吸水過程においてヒステリシスを呈する。このヒステリシスの存在は認められているものの、その定量的な評価方法は確立していないというのが現状である。本論文では、同一試料について水分特性曲線の形状に及ぼす要因を実験的に求め、ヒステリシスを表現し得る水分特性曲線モデルの構築を目指す。

2. 既往の研究

(1) 水分特性曲線の概要

サクシオンと体積含水率もしくは飽和度の関係を表したものが、水分特性曲線である。水分特性曲線

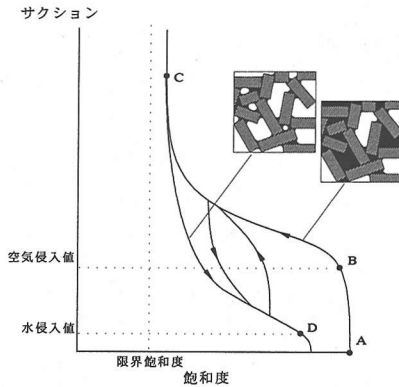


図-1 水分特性曲線のヒステリシス(a)

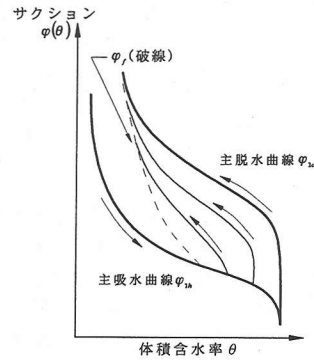


図-2 Vachaudらの研究⁵⁾

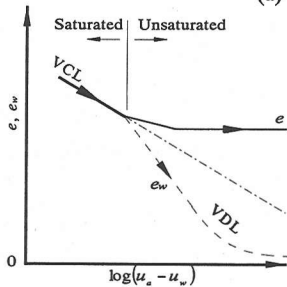
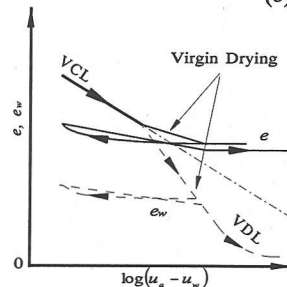


図-3 Tollの水分特性モデル⁶⁾



は、土のコンシステンシーと密接な関係があり、試料によって異なる曲線となる。この曲線形状は、土粒子の表面活性度や粒度分布に依存することが実験的に検証されている(田中・高橋¹⁾)。また、粒度分布から水分特性曲線を求める試みもなされており(宇野ら²⁾)、土性を手がかりにした水分特性曲線の定量化が盛んに行われてきた。しかしながら、同一試料における水分特性曲線の応力経路依存性についてはほとんど研究がなされていない。

図-1に水分特性曲線のヒステリシスの一例を示す。飽和状態(点 A)にある土にサクシオンを作用させると、初期にはほとんど飽和度は変化せず、あるサクシオン値(点 B)を超えると急激に不飽和化が進む。このサクシオン値を空気侵入値と呼ぶ。やがて曲線は、サクシオン増加に対しある飽和度に収束していく。この状態では、土粒子近傍に存在する水が吸着水(非自由水)として土粒子表面に固定される。土中の間隙は複雑な構造をしており、吸水過程と脱水過程では異なる水分特性曲線となる。吸水過程においても変曲点(点 D)が現れ、便宜上、水侵入値と呼ぶ。そしてサクシオンがゼロになっても元の飽和状態には戻らないことが多い。これは飽和化の過程で間隙水内に気泡が封入されるためである。脱水曲線と吸水曲線のヒステリシスの原因は、土中の間隙が微細で複雑なことから生じるインクピン効果や、土中水

のメニスカスが間隙を前進するときと後退するときとの曲率の違いなどが挙げられるが、その定量的表現には至っていない。

(2)水分特性曲線のヒステリシスに関する研究

中野^{3),4)}は、土中の間隙分布に統計的性質の概念を導入し、間隙構造を2つの極限間隙モデルで表すことでヒステリシスを解析的に表した。しかしながら、パラメーターの設定は試行錯誤に依らねばならず、得られた水分特性曲線が適切である保証がない。

同時に、Vachaud and Thony⁵⁾は、初期の含水状態が異なる砂質土を用いて一次元土槽実験を行い、実験結果より主脱水曲線と主吸水曲線の存在を明らかにした。さらに同一の試料が取り得るサクシオンと含水状態の範囲を規定し、ヒステリシスはこの2曲線間に現れるとした(図-2)。

Toll⁶⁾は、ヒステリシスの定量的表現を行うために、次式で表す等価間隙比を提案している。

$$e_w = V_w/V_s = S'_r \cdot e = G_s \cdot w' \quad (1)$$

ここで、 e_w は等価間隙比、 V_s と V_w はそれぞれ土中の固相と液相の体積、 S'_r は $S_r/100$ (S_r は飽和度)、 e は間隙比、 G_s は土粒子比重、 w' は $w/100$ (w は含水比)。等価間隙比は無次元量であり、間隙比と同じ空間で比較できる。また、間隙比と等値であれば、飽

和状態であることを示している。図-3は、Tollにより提案された水分特性モデルである。正規粘土のサクシオン増加による飽和状態からの脱水過程を、間隙比の変化VCL(初期圧縮曲線)と等価間隙比の変化VDL(初期乾燥曲線)で表している。このVDLが、等価間隙比の上限を示す状態線となっており、VDLからサクシオンを減じ再載荷した場合、図-3(b)に示すように間隙比、等価間隙比とも状態線であるVCL、VDLに収束するとしている。このVDLはVachaud and Thonyにより提案された主脱水曲線と一致し、新たに再脱水曲線に関する構成則を与えた。また、間隙比変化を水分特性に組み込んだ最初の研究といえる。彼の研究は、体積変化と排水量が独立関係にある不飽和土の性質を表すために、同次元のパラメーターを適用したことに意義がある。しかしながら、水分特性曲線を定性的に表現したに留まっており、間隙比の影響を考慮しているにも拘わらずその物理的意味には触れていない。また、過圧密粘土および初期に不飽和状態にある土に関する説明は十分ではない。

3. 水分特性曲線の形状に及ぼす要因の実験的検討

水分特性曲線に及ぼす要因を検討するために3つのシリーズの試験を行った。試験には透水性の高い2種類のシルト質粘土を用いた。その際、土粒子表面の界面作用が等しくなるように塑性指数がほぼ同じ試料を選定した。その物性値を表-1に示す。

(1) 水分特性曲線に対する初期状態の影響

a) 試験装置および試験方法

初期状態の違いによる水分特性曲線の形状の違いを検討した。不飽和土用一次元圧密容器(図-4、内径60mm)に含水比調整された粉末のNo.5クレ-を一定量(湿潤状態の質量70g)入れ、所定の高さ(14~24mm)まで静的に全断面を一次元圧縮で締固め、目標の間隙比の供試体を作製した。その後、上載圧を19.6(kPa)に減じ一定に保ち、加圧板法により水分特性曲線の脱水曲線と吸水曲線を得た。表-2に供試体の初期状態を示す。これらの供試体は比較対照実験であり、間隙比に関して供試体bとc、含水に関して供試体aとdおよびbとe、飽和度に関してaとcおよびbとdが対応している。

b) 試験結果

図-5(a), (b), (c)に与えられたサクシオンと定常状

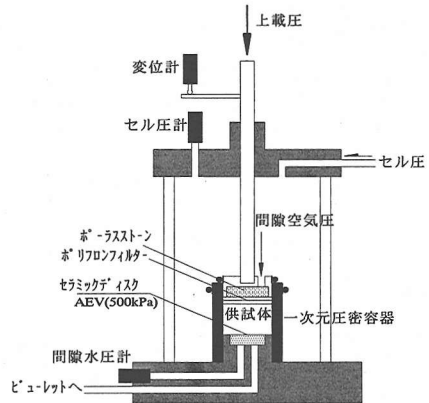


図-4 不飽和土用一次元圧密試験機

表-1 試料の物理化学的性質

	G_s	w_L (%)	w_P (%)	I_P
No.5 クレ-	2.70	43.0	29.6	13.4
カタルボ クレ-	2.71	33.5	20.3	13.2

表-2 締固め供試体の初期状態 (No.5 クレ-)

供試体番号	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)
a	2.11	23.2	29.7
b	1.62	30.2	50.5
c	1.59	17.5	29.7
d	1.20	23.1	52.0
e	0.99	30.4	82.9

態の飽和度,含水比,間隙比それぞれの関係を示す。供試体 a, d に関しては供試体作製時のサクシオン値を測定できなかったため、グラフ上では、サクシオン200(kPa)の状態から脱水曲線が描かれている。水分特性曲線は、一般的にサクシオンと飽和度で表した図-5(a)であるが、同一試料でありながら供試体の初期状態によりその曲線形状にかなり違いがあるのが分かる。これに比べて図-5(b)のサクシオンと含水比の関係においては、初期の含水比に関係なく、脱水曲線がサクシオンの増加にしたがって、ある一定値に収束している。水分特性曲線の高サクシオン域での収束値は土粒子表面の吸着水量を表すと言われている。吸着水量は比表面積に支配されるため、乾土重量を基準とした含水比で表した場合、高サクシオン域での収束値は土固有の値になるはずである。図-5(b)に見られる含水比の収束値は、この吸着水による含水比に対応していると考えられる。供試体はすべて初期に不飽和状態にあり、サクシオンによる間隙比変化はわずかである(図-5(c))ことを考えると、飽和度の高サクシオン域での収束値は(図-5(a))は吸着水分を表す含水比と間隙比の大きさに依存すると言える。また、図-5(a)から間隙比の小さい供試体の

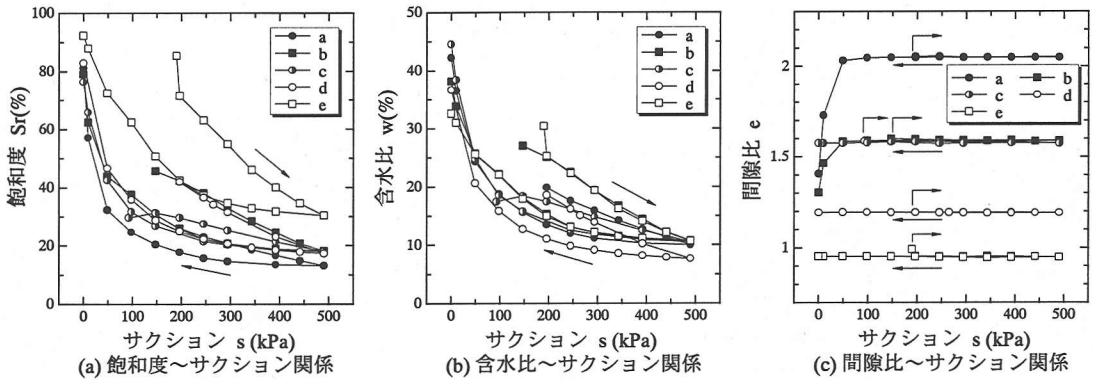


図-5 初期状態の異なる水分特性曲線

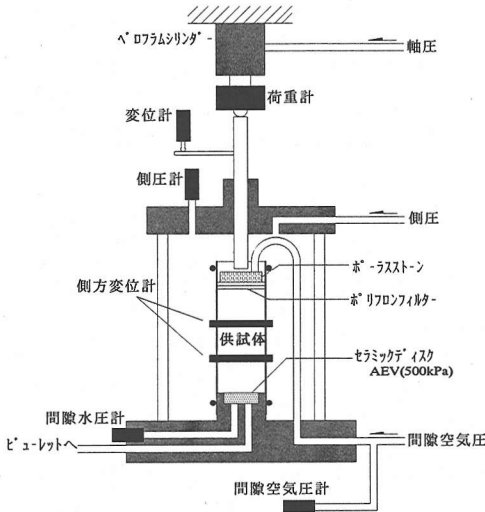


図-6 不飽和土用三軸試験機

表-3 飽和供試体へのサクシオン載荷経路 (No.5 クレ-)

	拘束圧 p (kPa)	サクシオン s (kPa)
A	19.6	0→490→0
B	19.6	0→392→49
C	19.6	0→294→49

脱水曲線は、総じてこの試験条件ではまだ排水途上であり、間隙水が排出され始めるサクシオン値、つまり空気侵入値が高いと考えられ、間隙比が水分特性曲線の形状に大きく影響を及ぼすことが分かる。

一方、吸水曲線に関しては、間隙比の小さい供試体 d, e は他のものに比べて、高サクシオン域でのヒステリシスが小さい、比較的、脱水曲線に近い傾きで飽和度が回復している。また、間隙比の大きい供試体ほど吸水曲線が水分特性曲線特有の S 字型にはならず、飽和度は加速度的な増加を示す。これは図-5(c)から分かるように、サクシオンの減少によりコラプスが生じ、間隙比が大きく減少するからである。骨格が圧縮し間隙が小さくなれば、土中水のメニスカス同士が接近し合同することによって、間隙比の大きいものと比べて、同じサクシオン値でも間隙水を多く含有することができる。この場合、水分特性曲線はサクシオンの減少量だけでなく骨格の圧縮に

も依存しているため、コラプスが生じ始めるサクシオン値以下の領域に関して、他の吸水曲線と同等に比較検討することはできない。

(2) 水分特性曲線に対するサクシオン履歴の影響

サクシオン履歴が供試体の水分特性曲線に与える影響を検討した。ここでは供試体の初期状態を等しくすることを試みた。

a) 試験装置および試験方法

液性限界の 2 倍の含水比に調整したスラリー状態の No.5 クレーを一次元圧密容器 (内径 140mm) で予圧密したブロックサンプルより、直径 35mm、高さ 80mm に成形された飽和供試体を、不飽和土用三軸試験機 (図-6) に設置した。この不飽和土用三軸試験機は、軸圧とセル圧および間隙空気圧を独立に制御することができる。ここでは、拘束圧を一定に保ち、段階载荷によってサクシオンを载荷し、それぞれ異

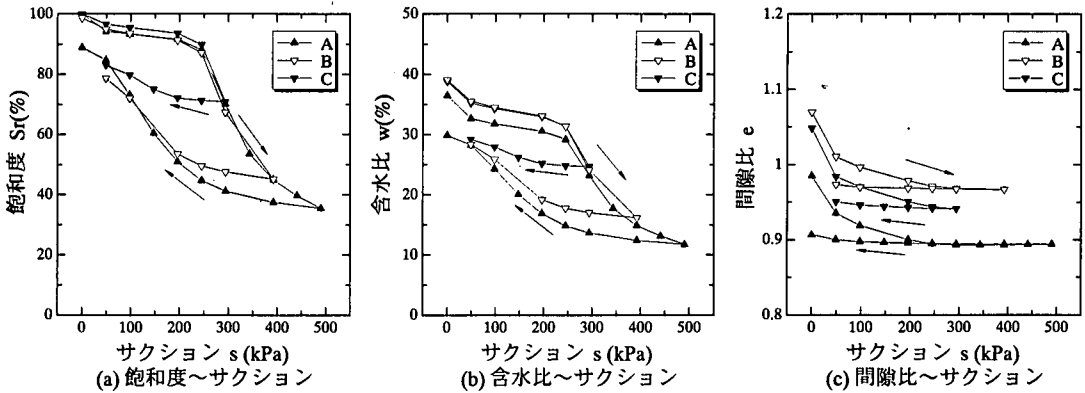


図-7 サクシヨン履歴の異なる水分特性曲線

表-4 異なる拘束圧下でのサクシヨン履歴

	試料	拘束圧 p (kPa)	サクシヨン s (kPa)
A	No.5	19.6	0→490→49
D	No.5	98	0→490→49
E	カタル	19.6	0→490→0
F	カタル	196	0→490→0

なるサクシヨン値からの吸水曲線を得た。表-3に供試体に与えたサクシヨン経路を示す。

b) 試験結果

図-7(a),(b)および(c)に、サクシヨンと飽和度、含水比および間隙比の関係を示す。図-5に示される不飽和供試体の結果と異なり、空気侵入値に相当する変曲点が明確に現れている。図-7(a)と(c)を比較すると、空気侵入値に至るまでは飽和度はほとんど変化しないが、間隙比は大きく変化していることが分かる。これは、サクシヨンが飽和状態における負の間隙水圧として有効応力を増加させるように作用しているためである。間隙比のほぼ等しい3つの供試体は、脱水過程でのサクシヨンの最大値が異なるため吸水開始時の飽和度が異なる。しかし、吸水開始時の飽和度の大きさに拘わらず、吸水開始時はほとんど飽和度が回復せず、吸水開始時のサクシヨン値が小さく、飽和度が高いほど、飽和度の回復が低サクシヨン域まで現れない。

この理由は以下のように考えられる。一般的に、小さな間隙の方が、高いサクシヨン値まで間隙水を保持することができる。水分特性曲線の脱水過程では、間隙水が排出されていく過程であるため、あるサクシヨン値での保持間隙水量は、小さな間隙の分布に依存する。一方、吸水過程ではインクピン効果があるため、保持間隙水量は大きな間隙の分布に依存する。間隙孔の分布を考える場合、大きな間隙孔ほど密度が小さいということを考慮すれば、吸水曲

線に現れる履歴の効果を説明できる。にも拘わらず、3つの供試体はひとつの吸水曲線に収束している(図-7(a)参照)。これは、間隙比が等しければ、吸水曲線がある値に収束することを示しており、吸水曲線においても、間隙比への依存性を示唆していると考えられる。

(3) 水分特性曲線に対する拘束応力条件の影響

供試体に作用する拘束応力が水分特性曲線へ与える影響について検討を行った。

a) 試験装置および試験方法

ここでは、先に述べた間隙比の影響も併せて検討するため2種類の試料を用いた。表-4は応力経路を表す。供試体DはNo.5クレイ、供試体E、Fはカタルボクレーである。どちらも一次元圧密容器で予圧密された飽和供試体であるが、試料の静止土圧係数および圧縮特性が異なるため、三軸試験機で等方応力を载荷したときの挙動が異なる。予圧密における上載圧は、No.5クレイとカタルボクレーでそれぞれ313.6、156.8(kPa)であり、No.5クレイの方が先行応力が大きい。しかしながら、成形後三軸セル内で等方応力を载荷した試験では、カタルボクレーの方が降伏応力が大きくなった。これは試料によって静止土圧係数が異なるためである。また、表-4における拘束圧条件では、供試体A,Dについては正規圧密領域にあるが、供試体E,Fは過圧密領域にあるものと考えられる。

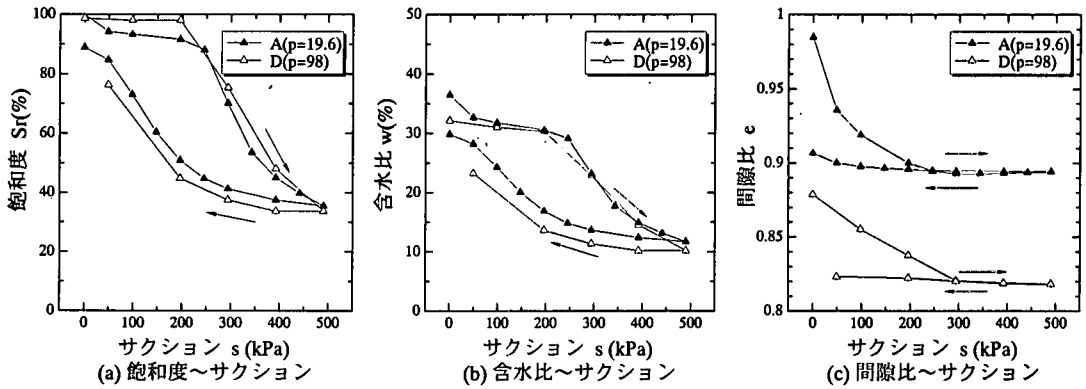


図-8 拘束圧の異なる水分特性曲線(No.5クレー)

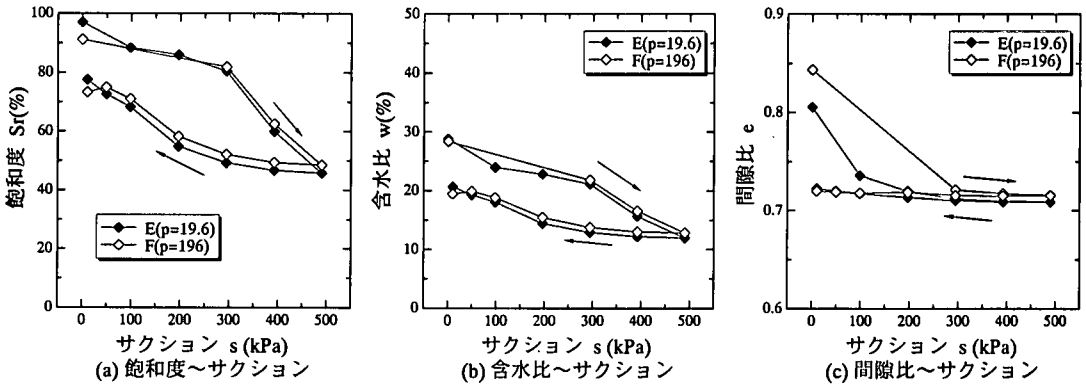


図-9 拘束圧の異なる水分特性曲線(カタルポクレー)

b) 試験結果

図-8(a),(b),(c)では、拘束圧が異なりサクシオン履歴が同じである供試体 A と供試体 D について、サクシオンと飽和度、含水比および間隙比の関係を比較している。図-8(a)の脱水過程において、供試体 A の方が細かく応力段階を設定しているため、図から空気侵入値を比較することはできないが、同じサクシオン値でも供試体 D の方が飽和度が高く、空気侵入値が高くなっていると考えられる。これは、先に述べたように、水分特性曲線が初期状態での間隙比に依存するためである。間隙が小さくなれば、間隙水メニスカスの曲率半径は小さくなり、間隙水を排出するために高いサクシオンが必要となる。図-8(b)のサクシオンと含水比の関係においては、飽和度で表した(図-8(a))場合と比較して、脱水曲線の差が少なく、特に高サクシオン域では拘束圧の大きさに曲線形状が依存していないのが分かる。

図-8 に示した No.5 クレーの試験結果には、間隙比による影響と拘束圧による影響が含まれているため、間隙比が同じで拘束圧の異なるカタルポクレーの供試体 E, F の水分特性曲線を得た。図-9 は供試体 E, F のサクシオンと飽和度、含水比および間隙比の関係

を比較したものである。得られた結果に拘束圧の影響は見られない。この結果より、拘束圧などの外応力条件は土骨格の間隙を圧縮し、間接的に水分特性曲線に影響を及ぼすが、直接的な要因とはなり得ないと考える。また、吸水過程に起こり得るコラプス量は拘束圧に大きく依存するが、図-5 でも見られるようにコラプスが生じると、間隙比が変化しない場合に比べて飽和度が高くなるため、骨格変形による吸水量とサクシオンの変化によるそれは独立に考慮しなければならず、本論文の趣旨には当てはまらない。

4. 水分特性曲線の形状の定量的評価

水分特性曲線の形状を評価するためには、実験から得られた離散的なデータを補完し連続的な曲線とする必要がある。古くから、水分特性曲線の経験式が提案されてきた。不飽和浸透を扱う場合、水分特性曲線の形状を低サクシオン域から高サクシオン域まで表すために、s 字型の曲線を表し得る経験式(Van Genuchten⁷⁾, Fredlund ら⁸⁾, 杉井・宇野⁹⁾が良く用いられる。しかしながら、これらの式はフィッティ

ングの際にパラメーターを試行錯誤から求めねばならず、得られた数式を客観的に評価することができない。また、それぞれのパラメーターの物理的意味付けが難しい。そこで、低サクシオン域での連続性にかけるが、パラメーターが曲線形状に与える影響が分かりやすい Brooks and Corey¹⁰⁾式(式(2))を用いた。

$$S_e = \frac{S_r - S_{ra}}{S_r - S_{ra}} = \left(\frac{s_b}{s}\right)^\lambda \quad (2)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 S_r は飽和度、 s はサクシオン、 S_{ra} は水分特性曲線の下限值であり、 $s \rightarrow \infty$ のときの飽和度を示す。 S_r は水分特性曲線の上限值であり、一般的に100(%)として用いる。 λ 、 s_b は形状パラメーターである。

客観的に再現性のあるフィッティングを行うために以下の方法でパラメーターを決定した。まず、任意の S_{ra} を代入して、有効飽和度とサクシオンを両対数面上にプロットし、最小二乗法を用いてフィッティングし相関係数を得る。次に異なる S_{ra} を代入し同様の作業を行う。これを繰り返すと、相関係数は S_{ra} に対して極大値を持つため、このときの S_{ra} を適値とし形状パラメーター λ 、 s_b を得る。

図-10 にフィッティング例を示す。低サクシオン域の水分特性曲線を表すことはできないが、脱水曲線での s_b の値を空気侵入値、吸水曲線での s_b の値を水侵入値とみなすことができ、図-10 中では、それぞれ s_A 、 s_W で表している。

式(2)中の λ は曲線の曲率を表し、値が大きいほど曲率半径の小さい曲線となる。Brooks and Corey 式では、空気侵入値または水侵入値よりも高いサクシオン域での水分特性曲線を表しており、この領域では間隙比変化がわずかであることを考えると式(2)左辺の有効飽和度は、Toll の等価間隙比を用いて、式(3)のように表すことができる。

$$S_e = \frac{e_w - e_{wo}}{e - e_{wo}} = \left(\frac{s_b}{s}\right)^\lambda \quad (3)$$

$$e_{wo} = \frac{S_{ra}}{100} \cdot e \quad (4)$$

ここで、注目すべきことは式(2)、(3)中の有効飽和度が同じであるため、式(3)中の形状パラメーター λ は飽和度で表した場合と同じ値となることである。図-10 を間隙比、等価間隙比について整理したものが図-11 である。図中の実線は、式(3)を用いたフィッティング結果である。前述したように脱水曲線の収束が唯一の吸着水含水比に依存して収束する。Toll の構成モデルへ適用する利点は、脱水曲線の e_{wo} は、吸着水含水比 w_c を用いて式(5)から算出することが

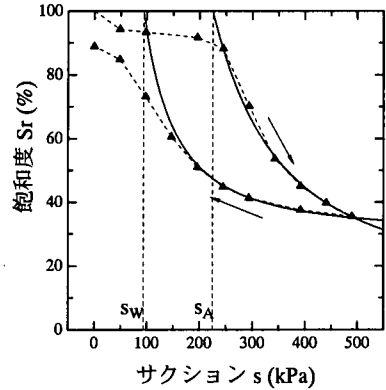


図-10 Brooks and Corey 式によるフィッティング例

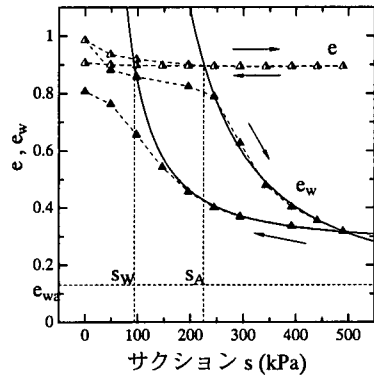


図-11 等価間隙比で表した Brooks and Corey 式でのフィッティング例

できることである。このときの e_{wo} を限界等価間隙比 e_{wc} として表す。

$$e_{wc} = G_s \cdot w_c \quad (5)$$

吸着水含水比に関しては遠心力载荷試験などから求める方法が提案されている(久野・阿部¹¹⁾)¹¹⁾が、本論文では実験結果へのフィッティングにより得られた $w_0 = 3.5(\%)$ を用いる。ただし、吸水曲線に関しては、吸水開始時のサクシオン・飽和度によって、 e_{wo} が異なるため、種々の e_{wo} を設定し最適な値を算出する必要がある。その導出法に関しては次の章で述べる。以上のような方法でNo.5クレーを用いて得られた脱水曲線および吸水曲線のパラメーターを求めた。

図-12, 13 は、得られた空気侵入値 s_A および水侵入値 s_W と間隙比の関係を示す。式(2)から式(3)への変換の際に間隙比の変化がほとんどないことを前提としているので、ここでの間隙比はサクシオンが294(kPa)のときの値である。空気侵入値、水侵入値とも間隙比の関数となっており、間隙比が大きくなるほどその値を減じている。この関数を理論的に求めることは難しく、図中の破線はべき関数で近似した

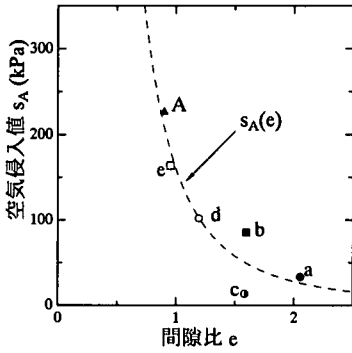


図-12 間隙比～空気侵入値関係

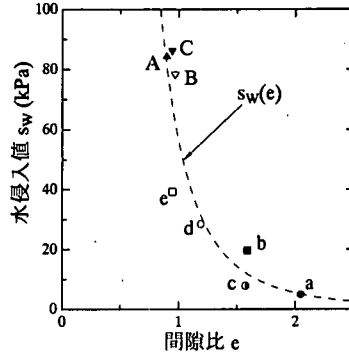


図-13 間隙比～水侵入値関係

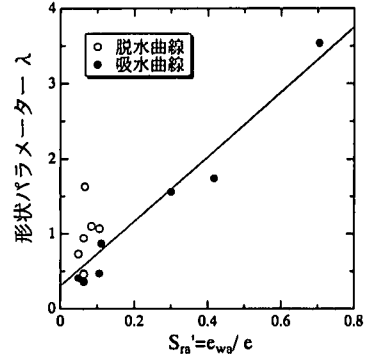


図-14 $S'_{ra} \sim \lambda$ 関係

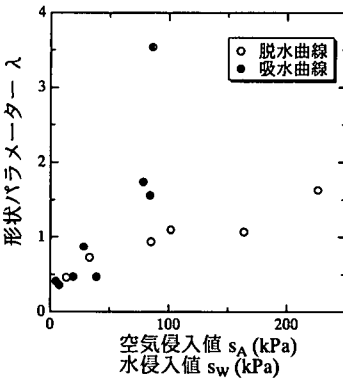
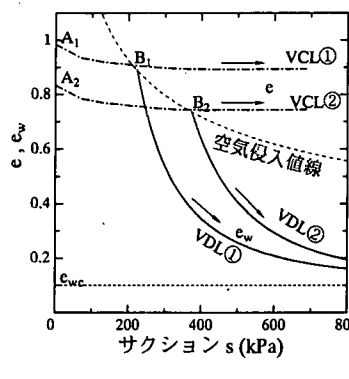
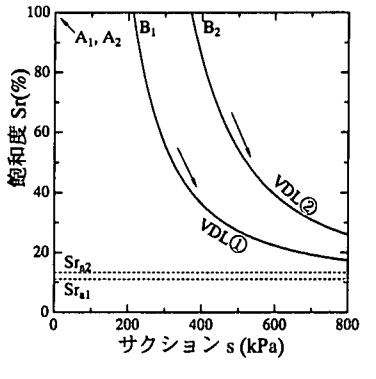


図-15 $s_A, s_w \sim \lambda$ 関係



(a)等価間隙比で表した脱水曲線



(b)飽和度で表した脱水曲線

図-16 飽和状態からの脱水曲線のモデル化

ものである。

図-14,15 はパラメーター間の相関を表したものである。図-14 は脱水曲線または吸水曲線の下限值 ($s \rightarrow \infty$ での漸近飽和度)と形状パラメーター λ の関係であり、曲線の下限値が高飽和度にあった場合、曲線の曲率が大きくなるということを意味している。図-15 は、脱水曲線または吸水曲線の飽和度 100%の切片と形状パラメーター λ の関係であり、切片が高いサクシオン値にあるほど曲率が大きくなることを意味している。曲線の曲率は他のパラメーターで決まり、曲線形状に与える影響は少ないといえる。特に、脱水曲線を例にとると $e_{w0} = e_{w1}$ で唯一の値であるため、図-14,15 とも横軸は間隙比に反比例するパラメーターで、互いに従属関係にある。そこで、本論文では曲率を表す λ は水分特性曲線の下限値に依存するとして図-14 の関係を用いる。

5. 間隙比が与える影響を考慮した水分特性曲線モデル

前章で示した試験結果から得られた結論をまとめると以下ようになる：

- (a) 水分特性曲線は間隙比により形状を異にする。その影響は空気侵入値および水侵入値に現れる。
- (b) 土粒子表面にはサクシオンによって分離不可能な吸着水層があり、脱水曲線は間隙比に関係なく、すべてこの吸着水含水比に対して収束する。
- (c) 間隙比が等しい場合、あるサクシオン、飽和度状態から描く脱水曲線および吸水曲線は唯一である。また、飽和状態から描く脱水曲線を上限とし、吸着水のみ存在する状態からの吸水曲線を下限とした領域内に存在する。

以上のことに留意して水分特性曲線のモデル化を行う。

(1) 脱水曲線

図-16 は、飽和状態からの脱水曲線のモデル化である。図-16(a)中の点線は、図-12 から得られた空気侵入値と間隙比の関係を空気侵入値線として表したものである。点 A_1, A_2 で示される初期に異なる間隙比を持つ飽和供試体は、等価間隙比も点 A_1, A_2 にある。サクシオンが増加すると、空気侵入値(点 B_1, B_2)に至るまでは、飽和状態を保ち間隙比と等価間隙比は一致する。この間、サクシオンは負の間隙水圧と

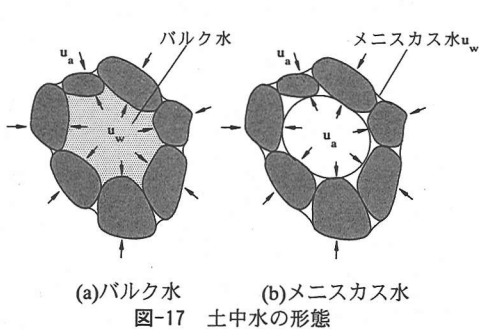
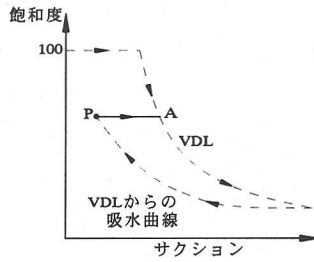
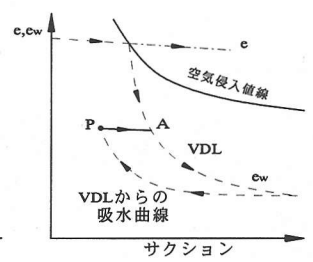


図-17 土中水の形態

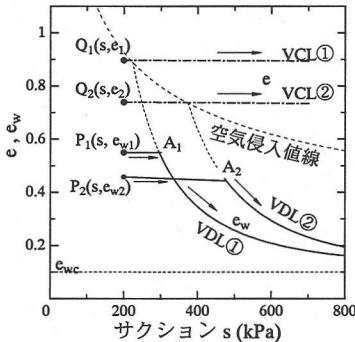


(a)飽和度で表した場合

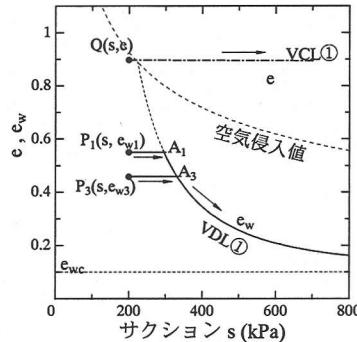


(b)等価間隙比で表した場合

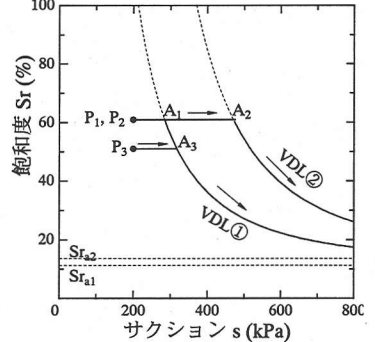
図-18 不飽和状態にある土



(a)間隙比の異なる脱水曲線



(b)飽和度の異なる脱水曲線



(c)飽和度で表した脱水曲線

図-19 不飽和状態からの脱水曲線のモデル化

して作用し、Terzaghiの有効応力を増加させ、間隙比変化は飽和土の圧密理論に従う。サクシオンがさらに増加し、間隙比が空気侵入値線を越えると、等価間隙比は間隙比の線から逸脱する。そして、最終的に等価間隙比は、吸着水含水比から得られる唯一の値である吸着水等価間隙比 e_{wc} に収束する。このときの等価間隙比が描く線をTollはVDLと呼んでいるが、このVDLは間隙比によって異なる軌跡を描く。間隙比の小さい A_2 にあった供試体は、空気侵入値が A_1 に比べて大きくなり、その後同じ吸着水等価間隙比に収束する。この間隙比の異なる供試体のVDLをサクシオン～飽和度面で表したものが、図-16(b)である。このとき、吸着水含水比から得られる残留飽和度 S_{ra} も間隙比によって異なる。

次に初期に不飽和状態にある供試体を考える。不飽和土の間隙水は図-17に示すバルク水とメニスカス水に分類することができる。土中の小さな間隙では土骨格を占めるバルク水(図-17(a))が存在し、このバルク水膜の表面張力がサクシオンに抗う。大きな間隙では、サクシオン増加によってバルク水膜が破られ、図-17(b)に示すメニスカス水で間隙が構成されている。先に述べたようにメニスカス水は脱水か吸水によって、すなわち前進・後退によって曲率が異なる。初期に不飽和状態にある供試体の脱水曲線は、

3章で示した供試体b, cの様にS字型になるものもあれば、いきなり飽和度が減少するものもある。これは、図-17の間隙水の形態から説明できる。サクシオンおよび飽和度が与えられたときに、その状態から始まる脱水曲線および吸水曲線が唯一に決まるとすると、逆に任意の不飽和状態は、飽和状態から始まる脱水曲線VDLからの吸水曲線上にあると考えられる(図-18)。VDLは、土中の大きな間隙から順にバルク水膜が破られ、バルク水を排出していく過程であり、現在の含水状態(点P)と同じ飽和度でより高いサクシオン状態(点A)を経験している。吸水過程ではバルク水が排出された間隙のメニスカスが大きくなり、隣り合うメニスカスと接触してバルク水となっていくが、インクピン効果およびメニスカスの前進・後退による曲率の違いが生じるため、同じ飽和度まで回復するのは脱水曲線のサクシオン値より低いサクシオン値である。これが現在の含水状態(点P)であるとするとき、サクシオンが増加するときに、再びバルク水膜を破るためには、過去に受けた同じサクシオン値(点A)に達しない限り、バルク水の排出は起こり得ない。メニスカス水の膨張・収縮はあるものの飽和度に大きく影響するのはバルク水なので、VDLに達するまでは飽和度は変化しないものとして不飽和状態からの脱水過程についてモ

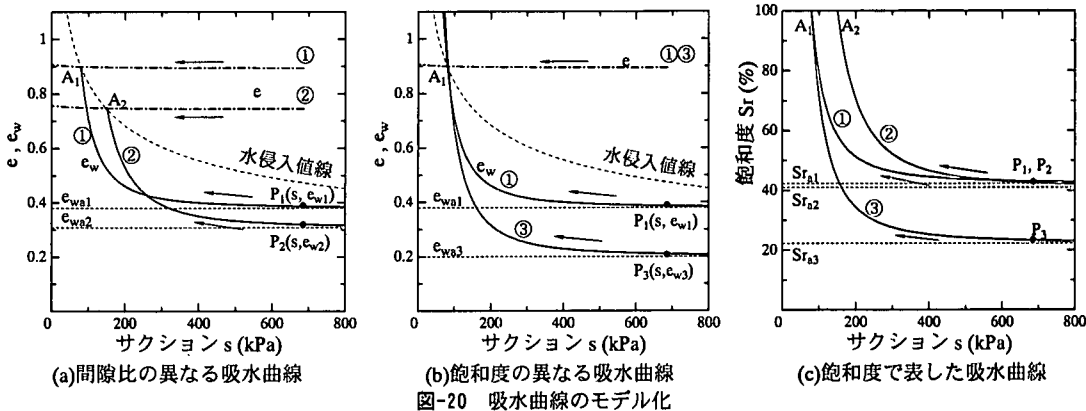


図-20 吸水曲線のモデル化

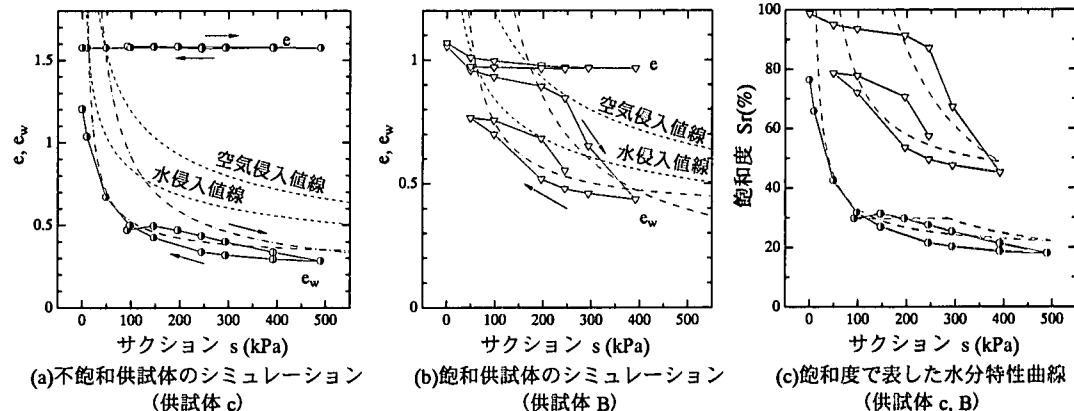


図-21 モデルの適用性の検証

デル化を行う。

図-19は、初期に不飽和状態にある供試体の脱水曲線のモデル化である。図-19(a)は初期の飽和度、サクシオンが等しく、間隙比の異なる供試体である。間隙比の違いは、異なるVDLが存在することを示す。図-19(b)は、同じ間隙比の供試体中の脱水曲線であり、VDLが等しく、サクシオン増加によりVDLに達した後は同じ脱水曲線となる。図-19(a), (b)を飽和度で表したものが図-19(c)である。

(2) 吸水曲線

図-20は吸水曲線のモデルを表している。脱水過程と同じように水侵入値が間隙比に依存することから、Tollの間隙比/等価間隙比面に図-13で表される間隙比~水侵入値関係を適用した。ただし、吸水曲線の場合、脱水曲線のように高サクシオン域での漸近線が唯一の値を持たないため、次に現在の含水状態を代入し、漸近等価間隙比 e_{w0} を求める必要がある。

$$\frac{e_w^* - e_{w0}}{e^* - e_{w0}} = \left(\frac{s_w(e)}{s^*} \right)^{\lambda'} \quad (6)$$

ここで、 $s_w(e)$ は間隙比の関数で表される水侵入値、 λ' は吸水曲線の材料パラメータ、上添え字の*は供試体の初期状態を表している。ここで、土の初期状態として式(6)に (s^*, e^*, e_w^*) を代入し、 $s_w(e)$ と λ' を図-13、図-14より算出すれば、 e_{w0} を求めることができる。図-20(a)は、飽和度が等しく間隙比の異なる供試体の吸水曲線を表している。図-20(b)は、間隙比が等しく飽和度の異なる供試体の吸水曲線を表している。この場合、同じ水侵入値を持つ。不飽和状態にある供試体はコラプスを起こさない範囲でのサクシオン変化によってほとんど体積変化はなく、同一試料のヒステリシスループは、図-19(b)と図-20(b)によって表すことができる。図-20(c)は図-20(a),(b)を飽和度で表したものである。

(3) モデルの適用

以上のモデルを実験値に適用した。図-21は、供試体の初期値よりそれぞれの脱水過程および吸水過程をシミュレーションした結果である。脱水曲線において曲率を表す λ の差異が、続く吸水曲線にまで影響を及ぼしているため、実験値と若干の隔たりを生じているが、不飽和土の力学挙動は飽和度に依存

することを考えると、図-21(c)より実用上十分な精度である。ただし、実験から得られる吸水曲線は低サクシオン域での挙動が明確ではなく、實際上、水侵入値以下の含水状態を予測するのは困難である。これは、吸水過程において封入され気相が外気と不連続になるため、生じる現象であり、間隙空気の状態方程式まで考慮する必要がある。本論文は、複雑な土の保水状態を簡略化することを目的としているため、この水侵入値以下の低サクシオン領域については今後の課題とする。

6. 結論

同一材料における水分特性曲線が呈する形状の違いおよびヒステリシスについて検討した。同一材料において、同じ飽和度およびサクシオン状態から描く脱水曲線および吸水曲線が、間隙比に大きく依存することが明らかとなった。その効果は空気侵入値および水侵入値に表れ、それぞれを間隙比の関数として与えれば、Tollの間隙比/等価間隙比空間で、任意の状態から描く脱水曲線・吸水曲線を予測できることを示した。高サクシオン域での検証は、実験値がないため行うことが出来なかったが、工学上のサクシオン領域で十分適用可能であることが示された。

近年、水分特性曲線を用いた不飽和土構成モデルがいくつか提案されている。そのため、これまでほとんど考慮されなかった水分特性曲線のヒステリシスが重要な役割を占めるようになり、走査曲線を予測する手法が要求されるようになった。本研究で提案している水分特性曲線モデルでは、従来の飽和度または体積含水率で描かれる水分特性曲線の空気侵入値および水侵入値が間隙比の関数となっていることから、Tollの間隙比/等価間隙比空間を適用した。その結果、土の材料物性である空気侵入値および水侵入値線を与えれば、任意のサクシオンおよび飽和度状態から描く脱水曲線および吸水曲線を予測することが可能となり、不飽和土構成モデルの実地盤への適用に寄与するものと考えらる。

参考文献

- 1) 田中弥寿男, 高橋悟: 比表面積を尺度としたまさ土の風化度と水分特性について, 第17回土質工学研究発表会, pp.73-76, 1982.
- 2) 宇野尚雄, 神谷浩二, 田中宏路: 「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp.35-44, 1998.
- 3) Nakano, M.: Pore volume distribution and curve of water content versus suction of porous body: 1. Two boundary drying curves, *Soil Science*, Vol.122, No.1, pp.5-14, 1976.
- 4) Nakano, M.: Pore volume distribution and curve of water content versus suction of porous body: 2. Two boundary wetting curves, *Soil Science*, Vol.122, No.2, pp.100-106, 1976.
- 5) Vachaud, G. and Thony, J. L.: Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents, *Water Resources Research*, Vol.7, No.1, pp.111-127, 1971.
- 6) Toll, D. G.: A conceptual model for the drying and wetting of soil, *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.2, pp.805-810, 1995.
- 7) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 8) Fredlund, D. G., Vanapalli, S. K., Xing, A. and Pufahl, D. E.: Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, Vol.32, pp.440-448, 1995.
- 9) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp.130-131, 1995
- 10) Brooks, R. H. and Corey, A. T.: Properties of porous media affecting fluid flow. *Proc. ASCE92. IR(92)* pp.61-88, 1966.
- 11) 久野吾郎, 阿部博: こね返しによる土の性質の変化について, 第7回土質工学研究発表会, pp.109-112, 1972.

(2000. 4. 14 受付)

MODELING OF WATER RETENTION CURVES WITH EFFECTS OF VOID RATIO

Katsuyuki KAWAI, Daizo KARUBE, Wataru ASHIDA and Yoshitane KADO

The water retention curve, which represents the relation of water content and suction value of soils, cannot be uniquely specified even in the same material. It shows the hysteresis loops between the drying and the wetting process. And also it varies depending on initial conditions. In this paper, the dependency of the water retention curve on void ratio is examined. The void ratio dependency dominantly influences the air and the water entry characteristics of unsaturated soils. Finally an attempt to quantitatively express the water retention curve is made considering the void ratio dependency. The model proposed in this paper can be applied to prediction of unsaturated soil behaviors.