

水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化

The expression of hysteresis appearing on water characteristic curves and the change of stresses in unsaturated soils

河井克之¹, 汪偉川², 飯塚敦³

Katsuyuki KAWAI, Weichuan WANG, Atsushi IIZUKA

¹ 工博, 神戸大学助手, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 工修, 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ 工博, 神戸大学助教授, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

The mechanical behavior of unsaturated soils strongly depends on the pore water distribution as well as the suction. The water characteristic curve (W.C.C) specifying the pore water content and the suction value plays a very important role in describing the mechanical modeling for unsaturated soils. However, the W.R.C shows the hysteresis loop in the wetting/drying processes. This paper emphasizes the importance of considering the hysteresis of W.C.C in the modeling. The accumulation of irreversible strains in the soil structures caused by rainfalls cannot be explained well without considering the hysteresis of W.C.C. An existing model of W.C.C is modified so as to express the accumulation of irreversible strains as the cyclic suction loading. Finally, it is shown that the modified model well explains the experimental results.

Key Words: Unsaturated soils, Water characteristic curve, Hysteresis, Logistic curve

キーワード: 不飽和土, 水分特性曲線, ヒステリシス, ロジスティック曲線

1. はじめに

人工, 自然を問わず土構造物は, 多くの場合, 土中間隙に空気相を含んだ不飽和状態に晒されている。近年, 構造物の維持・補修が重要視されているが, 乾湿による地下水位変動や降雨・降雪に起因するひずみの蓄積は, 土構造物の品質を著しく損なう可能性があり, 技術的取り扱い方法の確立が求められている。このひずみの蓄積を表現するためには, 不飽和土の構成モデルの確立のみならず, 土中の水分状態を的確に表現する手段が必要となる。これまで不飽和土の力学挙動に大きく影響を及ぼす要因としてサクシジョンの存在が明らかにされてきたが, サクシジョンが土中の含水状態によりその作用が異なることが指摘されている。そのため, 近年ではサクシジョンだけでなく含水状態も考慮した構成モデルがいくつか提案されている。特に, 軽部ら¹⁾の不飽和土構成モデルは, 応力成分が水分特性曲線(サクシジョン~含水状態関係)を考慮したものとなっており, 構成モデルと水分特性曲線モデルを独立に与えることができるようになっている。本論文は, 不飽和状態の土構造物の長期挙動予測手法の確立を目指し, 解析を行

う上で必要なヒステリシスを表現し得る水分特性曲線のモデル化, それによって発揮されるサクシジョンの効果について考察を加えている。

2. 水分特性曲線

サクシジョン($s = u_a - u_w$: u_a は間隙空気圧, u_w は間隙水圧)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。砂質土では, 比表面積が小さく土粒子の表面活性度も低いのが一般的であり, 土粒子の表面保水量が卓越している粘性土とは全く異なる水分特性曲線となる。田中・高橋²⁾は, まさ土が風化によって粒度分布が変化し, 比表面積が大きくなることによって, 水分特性曲線が異なることを示している。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³⁾, 土の物理化学的特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, 一方で, 同一の試料であっても初期状態や応力経路への依存性が指摘されており, これまでの試験結果から得られた知見もあ

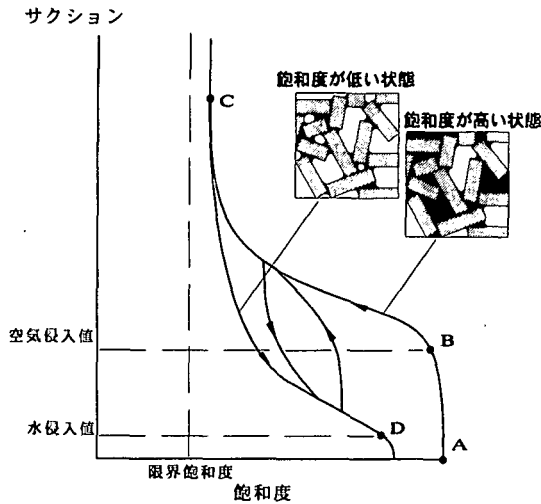


図-1 水分特性曲線概念図

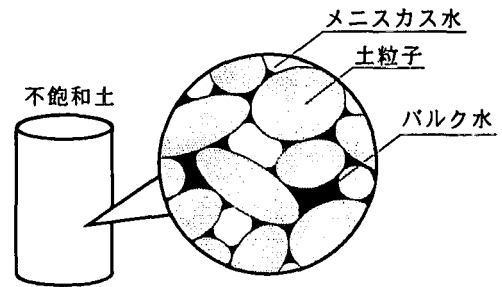


図-2 不飽和土中の間隙水の種類

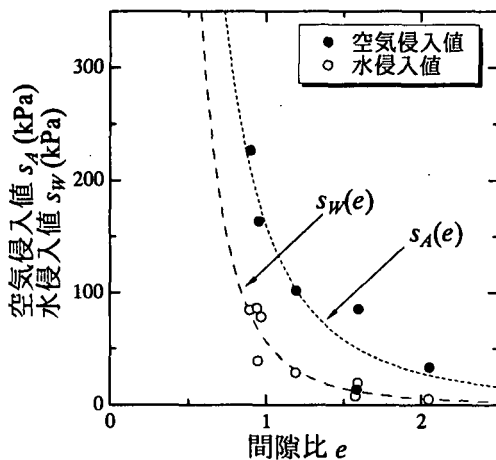


図-3 空気侵入値および水侵入値に及ぼす 間隙比の影響

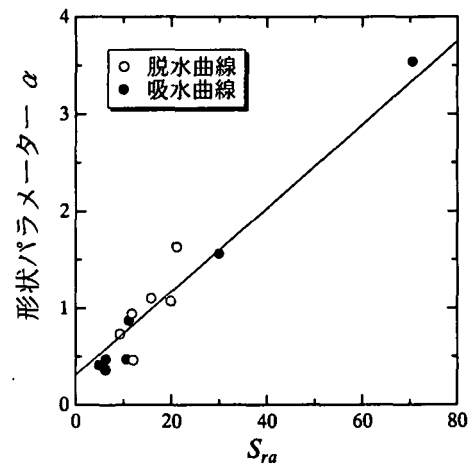


図-4 水分特性曲線曲率に及ぼす漸近飽和度の影響

る限定された条件下でのものであることに留意しなければならない。ここで扱うのは同一試料における水分特性曲線ヒステリシスである(以下、元となる実験結果は $w_L = 43.0$, $w_p = 29.6$, $I_p = 13.4$ のシルト質粘土試料によるものである)。

図-1に水分特性曲線のヒステリシスの一例を示す。図中では間隙水状態を飽和度として表している。浸透問題を扱う場合、体積変化を考慮しないことから、体積含水率を用いることが多いが、構成モデルへの適用性を考慮すれば、独立変数である飽和度で水分特性曲線を表す方が有益である。飽和状態にある供試体(A点)にサクションを作用させると、土中水によって空気の侵入が妨げられるため飽和度変化はあまり見られない。しかし、あるサクション値まで達すると(B点)、急激に不飽和化が進む。これは、水圧と空気圧の差であるサクションに対して、表面張力で侵入を妨げていた水膜が破れ、空気の侵入を許すために生じ、このときのサクション値を、空気侵入値という。不飽和化は、土中の大きな間隙部のバルク水(間隙を占める間隙水)の排出から始まり、やが

てほとんどのバルク水がなくなり、メニスカス水(土粒子接点に形成される間隙水)のみが存在するようになるため、一定の残留状態に至る。このときの飽和度を限界飽和度と呼ぶ。脱水曲線のある一点(C点)からサクションを減じていくと、脱水曲線とはヒステリシスを呈する吸水曲線を描く。この原因としては、インクピン効果や間隙水メニスカスの進行方向による土粒子との接触角の違いなどが挙げられる。また、サクションをゼロまで減じて、間隙に空気が封入されるため、飽和度は100%まで回復しない。このため、吸水曲線でもD点のような変曲点が現れる。この点でのサクション値は、脱水曲線との相関から便宜上、水侵入値と呼ばれる。等粒径の試料であれば、水侵入値は空気侵入値にほぼ半分になると言われている(Gupsta and Larson⁴⁾, Bouwer⁵⁾)⁴⁾が、物理的な説明は難しい。

3. 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル

河井ら⁶⁾は、供試体初期状態および応力条件の異

なる水分特性曲線の測定結果を次式で表される Brooks and Corey 式⁷⁾で近似した。

$$S_e = \frac{S_r - S_{ra}}{100 - S_{ra}} = \left(\frac{s_b}{s} \right)^\alpha \quad (s \geq s_b) \quad (1)$$

$$S_r = 100 \quad (s < s_b)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 S_r は飽和度(%), S_{ra}, α, s_b は形状パラメーターである。 S_{ra} は $s \rightarrow \infty$ のときの漸近飽和度(%), α は曲線の曲率を表し、 s_b は $S_r = 100$ のときのサクシオン値を表し、脱水曲線においては空気侵入値 s_A 、吸水曲線においては水侵入値 s_W に相当する。これによって得られたパラメーターを以下のように解析した。

- ① 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(図-3)。
- ② 土粒子表面にはマトリックサクシオンによって分離不可能な吸着水相があり、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。また、吸水曲線の $s \rightarrow \infty$ での漸近線は同一試料であっても吸水過程によって異なり、その漸近線によって曲率の異なる曲線となる(図-4)。
- ③ 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(主脱水曲線)を上限とし、吸着水のみ存在する状態からの吸水曲線(主吸水曲線)を下限とした領域内に存在する(図-5)。

さらに、河井⁸⁾は以上のことに留意して Toll⁹⁾の提案している等価間隙比を用いて、水分特性曲線のモデル化を行っている。

(1) 飽和状態からの脱水曲線

図-6 は、飽和状態からの脱水曲線のモデル化である。Toll は、飽和状態から描く脱水曲線を VDL(Virgin Drying Line: 初期脱水曲線)と呼んでおり、本質的に主脱水曲線と同じである。図中 VDL①②はそれぞれ間隙比の異なる VDL を表している(VDL①の方が間隙比が大きい)。同様にサクシオンがゼロのとき飽和状態にあり(A_1, A_2)、空気侵入値までは飽和状態を保つ。しかし、間隙比の異なる2つの脱水曲線は、図-3 より異なる空気侵入値を持つ(B_1, B_2)。空気侵入値を超えると、不飽和化が進行するがある残留値(s_{ra1}, s_{ra2})に向かって収束していく。この残留値は物理的に除去不可能な吸着水を表している。吸着水の量は土粒子表面の活性度によって決定されたと考えると、その量は土粒子表面積に依存し、吸着水の含水比は土固有の値である。そのため、吸着水の占める飽和

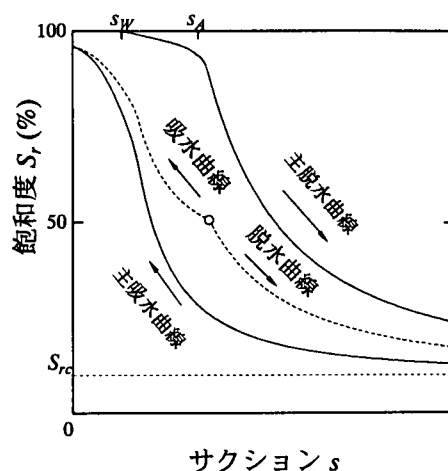


図-5 走査曲線の唯一性

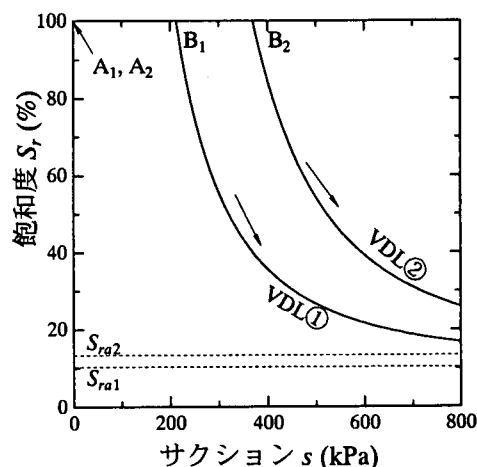


図-6 飽和状態からの脱水曲線のモデル化

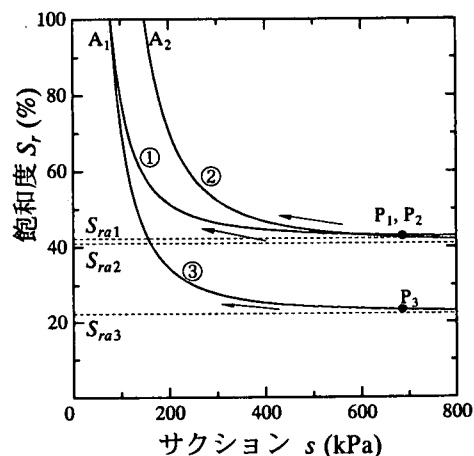


図-7 吸水曲線のモデル化

度は間隙比によって決まる値である。このように $s \rightarrow \infty$ のときの残留値 s_{ra} が定まれば、図-4 より残りのパラメーター α が算出できる。

(2) 吸水曲線

図-7 は吸水曲線のモデルである。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(図-3)、供試体の持つ水侵入値を算出できる。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 s_{ra} が唯一の値を持たないため⁹⁾, (1)式に現在の含水状態(s, e, s_r)を代入し, 漸近等価間隙比 s_{ra} を求める必要がある. このとき, $\alpha = \alpha(s_{ra})$, $s_b = s_w(e)$ に留意すれば, s_{ra} を求めることが出来る. 図-7中①②は, 飽和度が等しく間隙比の異なる2つの供試体の吸水曲線を表している. このとき, 異なる水侵入値を持つため, 吸水曲線(サクシオン~飽和度関係)が異なる. 図-7①③は, 間隙比が等しく飽和度の異なる2つの供試体の吸水曲線を表している. 同じ水侵入値を持つ吸水曲線のひとつの吸水曲線に収束していく.

(3) 不飽和状態からの脱水曲線

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, 先に示したように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. 不飽和状態では, 土間隙中で比較的大きなバルクから水膜が破られ, その部分ではメニスカス水で間隙が保持されている. 初期に不飽和状態にある供試体の脱水曲線は, 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, 間隙水の形態(バルク水/メニスカス水)から説明できる. 間隙水の形態がサクシオン履歴に依らず, 現在のサクシオンと飽和度で決まるとすると, 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-8). つまり, 現在の含水状態(点P)では過去により高いサクシオン状態(点A)を経験している. 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, インクビン効果およびメニスカスの進行方向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過程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. 再脱水過程では2通りの考え方ができる. ひとつは, 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とする考え方である. 点Pから点Aまで, メニスカス水の曲率の変化はあるものの飽和度変化に大きく影響するバルク水の変化が少ないと考えると, VDLに達するまでは飽和度は変化しないとしてモデル化することができる. もうひとつは, 吸水過程でバルク水が回復していく速度と再脱水過程でバルク水が減少していく速度が等しいとする考え方であり, VDLに達する(点B)までは吸水曲線と再脱水曲線が一致する. この考え方は, Tollの再脱水曲線を定量的に表したものである. この2つの概

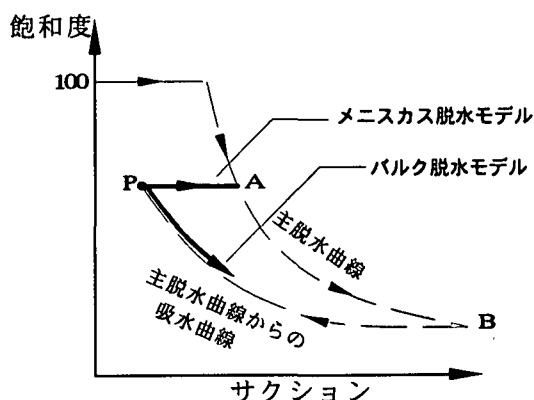
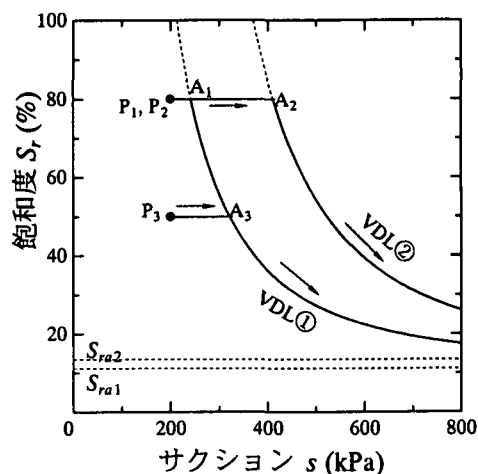
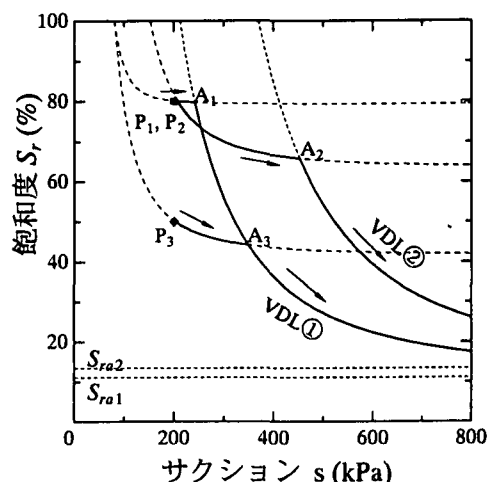


図-8 不飽和状態の表し方



(a) 飽和度で表した脱水曲線(メニスカス)



(b) 飽和度で表した脱水曲線(バルク)

図-9 不飽和状態からの脱水曲線のモデル化

念に基づいてモデル化を行うが, 区別のため, 前者をメニスカス脱水モデル, 後者をバルク脱水モデルと呼ぶ.

図-9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-9(a)(b)中①②は初期の飽和度, サクシオンが等しく, 間隙比の異なる2つの供試体のVDLである. 点 P_1 で表されている供試体は, 同じ飽和度を持つ点 P_2 で表された供試体よりも

間隙比が大きいためより小さな空気侵入値(点 A_1)を示す。そのため、互いに異なる VDL を持つ。いずれも初期に VDL 下に等価間隙比が存在するため、VDL に到達するまでは、サクシオン増加による飽和度変化は大きくない。そして、さらにサクシオンが大きくなり、VDL に到達すると VDL に沿って推移する。(a)のメニスカス脱水モデルと(b)のバルク脱水モデルでは、VDL に達するまでの再脱水曲線が異なる。メニスカス脱水モデルでは飽和度変化を考慮しておらず、バルク脱水モデルでは吸水曲線と一致すると仮定している。

図-9 中の、同じ間隙比の2つの供試体(P_1, P_3)の脱水曲線は、同じ VDL からの吸水曲線上にあり、サクシオン载荷によって VDL に達した後は同じ脱水曲線となる。実際の試験結果はバルク脱水モデルに近い挙動を示すことが確認されているが、厳密には再脱水曲線が吸水曲線とのヒステリシスループを描くため、2つのモデルの間に再脱水曲線が存在する。

4. 連続性を重視したヒステリシス表現モデル

3節で述べたように水分特性曲線は間隙比に大きく依存するが、解析を行う際に3節のモデルを用いると、応力を受け時々刻々と体積変化する土材料について水分特性曲線も変化させねばならず、計算が煩雑になるという弊害が生じる。実用上、この間隙比による水分特性曲線の違いは土質の違いであるとし、計算過程での入力パラメータを変えることによって対応することが出来る。また、3節のモデルは Brooks and Corey 式を用いているため空気侵入値のところで特異点を持った曲線となる。不飽和土の解析に用いられる構成モデルは、水分特性曲線に強く拘束されているため、このような特異点が大きな誤差を生むことになる。解析には特異点を持たない連続関数であることが望まれる。そこで、杉井・宇

野⁸⁾によって提案されているロジスティック曲線式を用いる。ロジスティック曲線式は、水分特性曲線のS形状を連続関数として表すことのできるモデルの中で、唯一実測値に対して線形近似できる。水分特性曲線式のパラメーターが多くなると、客観性が希薄になり、同一の実測値に対して無数のパラメーターが算出されることになる。ロジスティック曲線は次式で与えられる。

$$S_e = \frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e s)} \quad (2)$$

ここで、 S_{rf} は $s=0$ での飽和度を表す。 A, B は、水分特性曲線のパラメーターである。飽和状態から始まる脱水曲線に関しては $S_{rf} = 100$ とし、吸水曲線に関しては $s=0$ のときの飽和度を S_{rf} として、種々の S_{ra} を設定、次式を用いて線形近似することができるため、最も相関係数の高くなるときの S_{ra} を求めればよい。

$$\log_e \left(\frac{S_{rf} - S_r}{S_r - S_{ra}} \right) = A + B \log_e s \quad (3)$$

ここで、水分特性曲線の形状を決める空気侵入値および水侵入値は、ロジスティック曲線式では変曲点と考えることができる。その変曲点はパラメーター A, B 両方の影響を受けるため、間隙比への依存性を無視すればこの2つのパラメーターを脱水曲線および吸水曲線における土質定数として用いる。この脱水曲線、吸水曲線でのパラメーターを、それぞれ $A^{(D)}, B^{(D)}$ および $A^{(W)}, B^{(W)}$ とし、上添え字で区別する。この際、2つの形状パラメーターを固定するため曲率も脱水曲線、吸水曲線でそれぞれ一定になってしまうが、空気侵入値、水侵入値に比べてその影響は小さい。

任意の(サクシオン、飽和度)の供試体状態を表す点(s_1, S_{r1})を通過する脱水曲線は以下のように求める。脱水曲線は $s \rightarrow \infty$ で必ず残留含水比 w_c に収束し、間隙比の影響を無視すれば $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度は

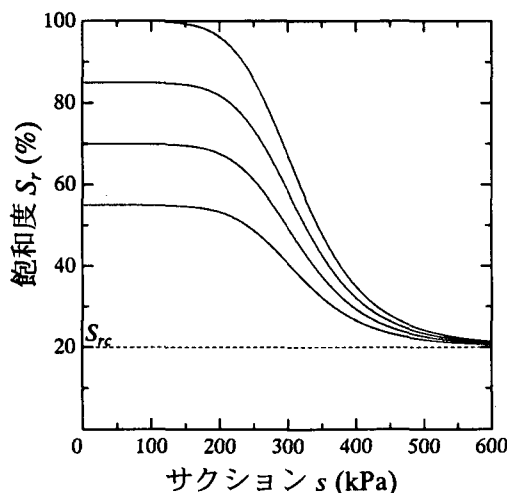


図-10 脱水曲線の表現

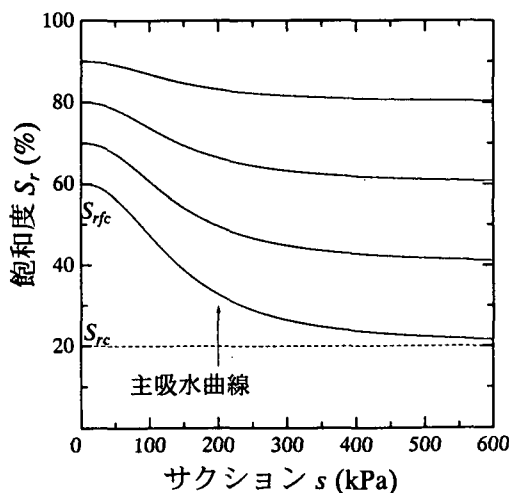


図-11 吸水曲線の表現

唯一の値 $S_{rc} = G_s \cdot w_c / e$ となる。ここで、 G_s は土粒子比重。つまり、次式を満足する S_{rf}^* を求めればよいことになる。

$$\frac{S_{r1} - S_{rc}}{S_{rf}^* - S_{rc}} = \frac{1}{1 + \exp\left(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s_1\right)} \quad (4)$$

これによって、求められた S_{rf}^* を用いて、脱水曲線が次式で与えられる。

$$S_r = \frac{S_{rf}^* - S_{rc}}{1 + \exp\left(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s\right)} + S_{rc} \quad (5)$$

一方、(サクシオン, 飽和度)の供試体状態を表す点 (s_1, S_{r1}) を通過する吸水曲線は以下のように求める。前節で示したように吸水曲線に関しては、ロジスティック曲線式が示す $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度 S_{ra} が唯一とはならず、 S_{rf} , S_{ra} の2つのパラメータを決めなければならない。そこで、 S_{rf} , S_{ra} の関係を次式で与える。

$$\frac{S_{ra} - S_{rc}}{100 - S_{rc}} = \frac{S_{rf} - S_{rfc}}{100 - S_{rfc}} \quad (6)$$

$$S_{rf}(S_{ra}) = \frac{(100 - S_{rfc})(S_{ra} - S_{rc})}{100 - S_{rc}} + S_{rfc} \quad (7)$$

ここで、 S_{rfc} は $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度が限界飽和度に一致する吸水曲線(主吸水曲線)が、 $s = 0$ で示す飽和度である。実際に、このときの吸水曲線は最も乾燥側の吸水曲線であり、この吸水曲線より下の飽和度は存在しない。この吸水曲線を求めることはできないが、実測の吸水曲線から得られた S_{rf1} , S_{ra1} を式(6)に代入することで次式により求めることができる。

$$S_{rfc} = \frac{100S_{rf1} - 100S_{ra1} + 100S_{rc} - S_{rf1}S_{rc}}{100 - S_{ra1}} \quad (8)$$

つまり、次式を満足する S_{ra}^* を求めればよい。

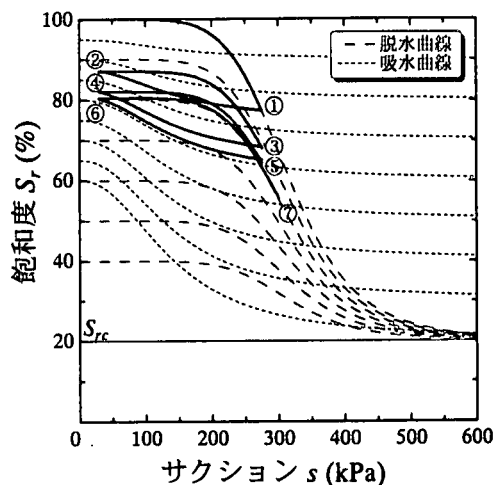
$$\frac{S_{r1} - S_{ra}}{S_{rf}(S_{ra}^*) - S_{ra}^*} = \frac{1}{1 + \exp\left(A^{(W)} + B^{(W)} \log_e s_1\right)} \quad (9)$$

この方法により、図-10, 11 のように脱水曲線、吸水曲線が求められる。図-12 は図-10, 11 を重ねたものである。図中の破線は脱水曲線を、点線は吸水曲線を表している。実線は、サクシオンの繰り返し載荷(図中番号順)による飽和度の変化を表している。

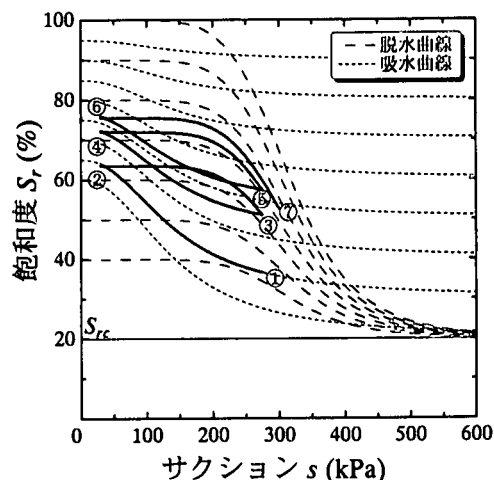
(a), (b) は、それぞれ同振幅のサクシオン履歴に対する高飽和度、低飽和度の供試体変化であり、サクシオン繰り返しに対してある飽和度に収束していくのが分かる。この変化は、主脱水曲線、主吸水曲線の存在を認めると、現実的である。図-13 は、Ray and Morris¹¹⁾が行った試験結果にモデルを適用した結果であるが、良い一致が見られる。

5. 不飽和土の挙動に影響を及ぼす応力成分

軽部ら¹¹⁾は、不飽和土の力学挙動がサクシオンの



(a) 高飽和度域でのヒステリシス



(b) 低飽和度域でのヒステリシス

図-12 水分特性曲線のヒステリシス表現

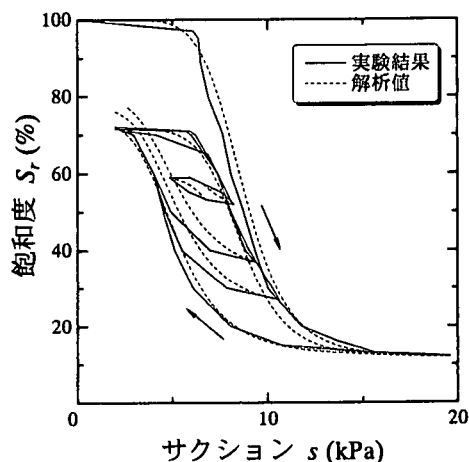
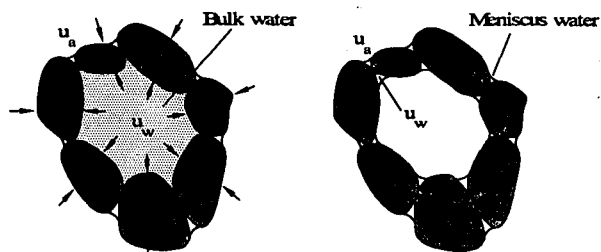


図-13 新しい水分特性曲線モデルの適用結果

大きさだけでなく間隙水分布にも依存することを明らかにした。そして、図-2 に示すバルク水、メニスカス水に作用するサクシオン(図中 u_a, u_w は、それぞれ間隙空気圧、間隙水圧)の効果をそれぞれバルク応力 p_b 、メニスカス応力 p_m として表した。バルク応力は土骨格を圧縮し、その結果骨格を剛にする効果が



(a) バルク水に作用するサクション (b) メニスカス水に作用するサクション

図-14 不飽和土中のサクションの効果

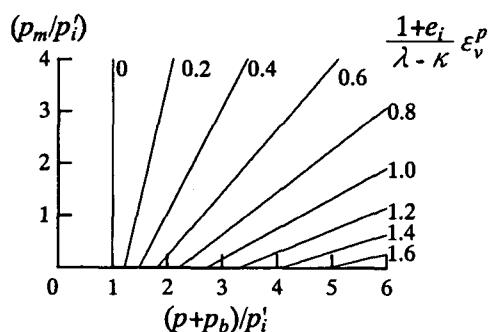
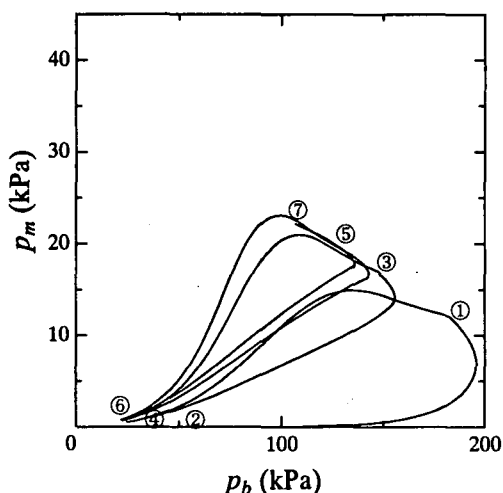
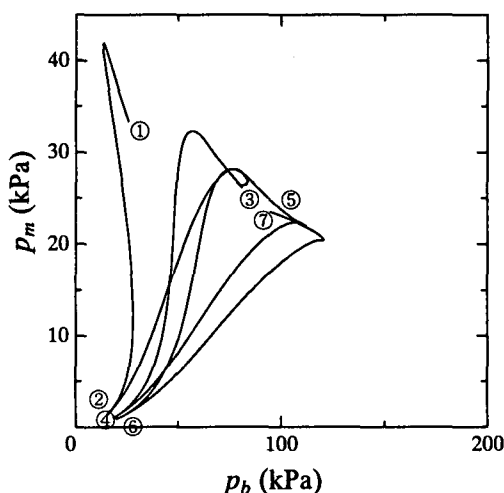


図-15 不飽和土の等方応力状態での降伏線群

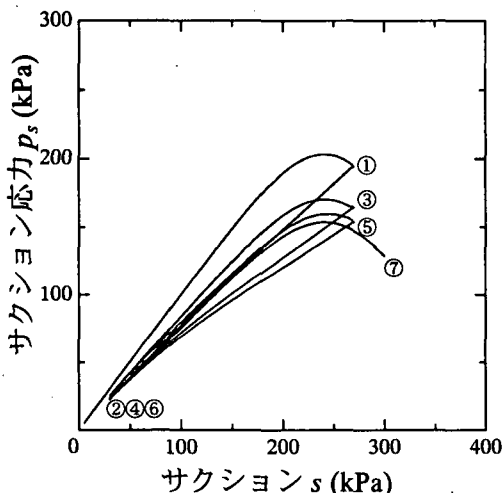


(a) 高飽和度域での応力ヒステリシス

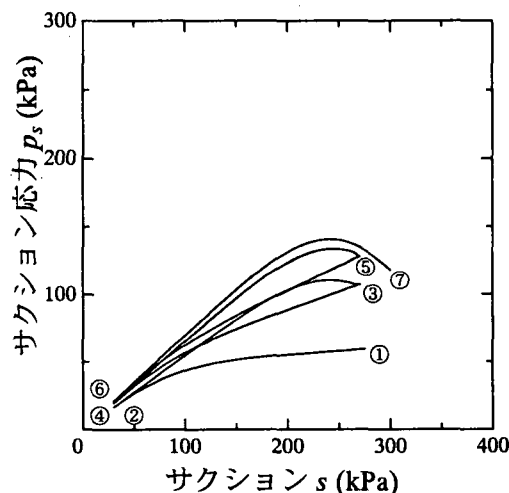


(b) 低飽和度域での応力ヒステリシス

図-16 水分特性曲線のヒステリシスによる応力経路変化



(a) 高飽和度域でのサクション応力変化



(b) 低飽和度域でのサクション応力変化

図-17 水分特性曲線のヒステリシスによる不飽和土の強度変化

ある。一方、メニスカス応力は土骨格に対して圧縮作用はなく、単に土粒子同士の接点で粘着力として作用する(図-14)。図-15はそれらの作用に留意した等方応力状態での降伏線群である。図中 p_i' は $p_m = 0$ のときの降伏応力、 p は基底応力であり全応力と間隙空気圧の差である。メニスカス応力 p_m が大きいほど同じ体積ひずみまで圧縮するために大きな

$(p+p_b)$ が必要であることを表している。 p_b, p_m は次式で表される¹⁾。

$$p_b = \frac{S_{rb}}{100 - S_{rc}} s = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} s \quad (10)$$

$$p_m = \frac{S_{rm}}{100 - S_{rc}} s = \frac{(100 - S_r)(S_{rd} - S_{rc})}{(100 - S_{rc})(100 - S_{rd})} s \quad (11)$$

ここで、 S_{rb}, S_{rm} はそれぞれバルク水、メニスカス水

の占める飽和度分, s_{rd} は最乾燥水分線上の飽和度を表す。最乾燥水分線はバルク水がない状態を表す水分特性曲線であり、軽部らは次式で表している。

$$s \geq s_A \quad S_e = \frac{S_{rd} - S_{rc}}{100 - S_{rc}} = \left(\frac{s_w}{s} \right)^a \quad (12)$$

$$s \leq s_A \quad S_e = \left(\frac{s_w}{s_A} \right)^a \left\{ -(\alpha+1) \left(\frac{s}{s_A} \right)^2 + (\alpha+2) \left(\frac{s}{s_A} \right) \right\} \quad (13)$$

ここで, s_A, s_w は空気侵入値, 水侵入値, α は吸水曲線を Brooks and Corey 式で近似した場合に得られるパラメーターである。このように, p_b, p_m は独立な応力成分ではなく, 供試体のサクシジョン, 飽和度によって唯一に求められる。つまり水分特性曲線によって定まる値であると言える。また, 不飽和土のせん断破壊強度は p_b, p_m の和であるサクシジョン応力 p_s に依存する。サクシジョン応力 p_s は次式で表される。

$$p_s = p_b + p_m = \frac{S_r - S_{rc}}{100 - S_{rc}} s \quad (14)$$

サクシジョン応力の増大とともに強度が増加する。図-16 は, 図-12 で示した水分特性曲線が与えられたときの p_b, p_m の変化を表している。図中の番号は図-12 中の番号に対応している。グラフの左下方が降伏面の拡大を表す。高飽和度域でのサクシジョン繰り返し载荷は, 初期に降伏面の拡大があるものの, その後は弾性域への応力変化である。一方, 低飽和度域でのサクシジョン繰り返しは降伏面の拡大を表している。これは, 不飽和土構造物が長期の乾燥・湿潤の繰り返しにより, ひずみが蓄積していくことを表しており, 構造物の維持管理において深刻な問題である。図-17 は同じサクシジョン履歴を受けたときのサクシジョン応力の変化である。一般的に, 現場の土の含水状態を測定することは困難であり, 土構造物の計測管理には水圧計を用いる。不飽和土の場合, 負の水圧が測定され, 間隙空気圧を大気圧と考えると, この負圧の絶対値がサクシジョンとなる。図-17 の結果は, 測定されたサクシジョンから強度を推定しようとしても内部の飽和度によってその大きさが異なることに留意しなければならないことが分かる。特に, 図-17(a) の場合のように, 初期には高い強度を発揮していたものが同じサクシジョンで乾燥・湿潤を繰り返すうちに, 強度減少していく場合がある。

6. まとめ

水分特性曲線の性質を簡単な連続関数で表し, ヒステリシスを表現できるモデルを提案した。その結果, 不飽和土の挙動に影響を及ぼす応力成分の, 水分特性曲線への依存性を表現することができた。これによって, 土構造物の計測管理手法について, 検討の余地があることが分かった。

参考文献

- 1) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Gupta, S. C. and W. E. Larson : A model for predicting packing density of soils using particle size distribution, *Soil Science Society American Journal*, Vol.43, pp.758-764, 1979.
- 5) Bouwer, H. : Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis, *Water Resources Research*, Vol.2, No.4, pp.729-738, 1966.
- 6) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤: 間隙比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.
- 7) Brooks, R. H. and A. T. Corey : Properties of porous media affecting fluid flow, *Proc. ASCE* 92. IR(92) pp.61-88, 1966.
- 8) 河井克之: 水分特性曲線のモデル化および不飽和土における土骨格と土中水の連成問題, 神戸大学学位論文, 2001.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Ray, R. P. and B. Morris : Automated laboratory testing for soil/water characteristic curves, *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris*, pp.547-552, 1995.

(2002年4月19日 受付)