



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

河井, 克之

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-03-13

(Date of Publication)

2007-09-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2500

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002500>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

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

平成13年 1 月

河 井 克 之

目 次

序 章	1
a. 研究の背景	1
b. 研究の目的	2
c. 本論文の構成	4
参考文献	5
第1章 不飽和土の構成モデル	7
1.1 Alonsoらのモデル	12
1.2 向後らのモデル	15
1.3 軽部らのモデル	19
参考文献	31
第2章 水分特性曲線の定量化に関する研究	33
2.1 概説	33
2.2 水分特性曲線に関する既往の研究	37
(1) 水分特性曲線の経験式	38
(2) 土の物理化学的性質と水分特性曲線の定量化	43
(3) 水分特性曲線のヒステリシスに関する研究	48
2.3 水分特性曲線の形状に及ぼす要因の検討	53
(1) 初期状態の異なる水分特性曲線	53
(2) サクシオン履歴の異なる水分特性曲線	57
(3) 拘束圧条件の異なる水分特性曲線	59
2.4 新しい水分特性曲線モデル	62
(1) 水分特性曲線の形状に影響を及ぼす要因の定量化	62
(2) 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル	67
(3) モデルの適用	71
2.5 水分特性曲線の浸透問題への適用について	75
参考文献	78
第3章 不飽和土の強度特性とサクシオン応力 p_s	81
3.1 不飽和土の排気・非排水三軸圧縮試験	84
(1) 試料および試験方法	84
(2) 試験結果および考察	85

(3) まとめ	95
3.2 不飽和土の一軸圧縮試験の評価法	96
(1) 試料および試験方法	96
(2) 水分特性試験の結果	100
(3) 一軸圧縮試験の結果	101
参考文献	112
第4章 不飽和土の分応力とバルク応力 p_b	113
4.1 定サクション下での不飽和土の異方圧密挙動	113
(1) 試料および試験方法	116
(2) 試験結果	118
4.2 不飽和土の排気・非排水等方圧縮試験	128
(1) 試料および試験方法	129
(2) 試験結果	130
4.3 まとめ	137
参考文献	138
第5章 水分特性曲線を考慮した不飽和土構成モデルによる土／水連成解析 に必要なパラメーター	139
5.1 解析への水分特性曲線ヒステリシスの導入	142
5.2 水分特性曲線に関わるパラメーターの決定	146
参考文献	153
第6章 結論	155
記号表	159

序 章

a. 研究の背景

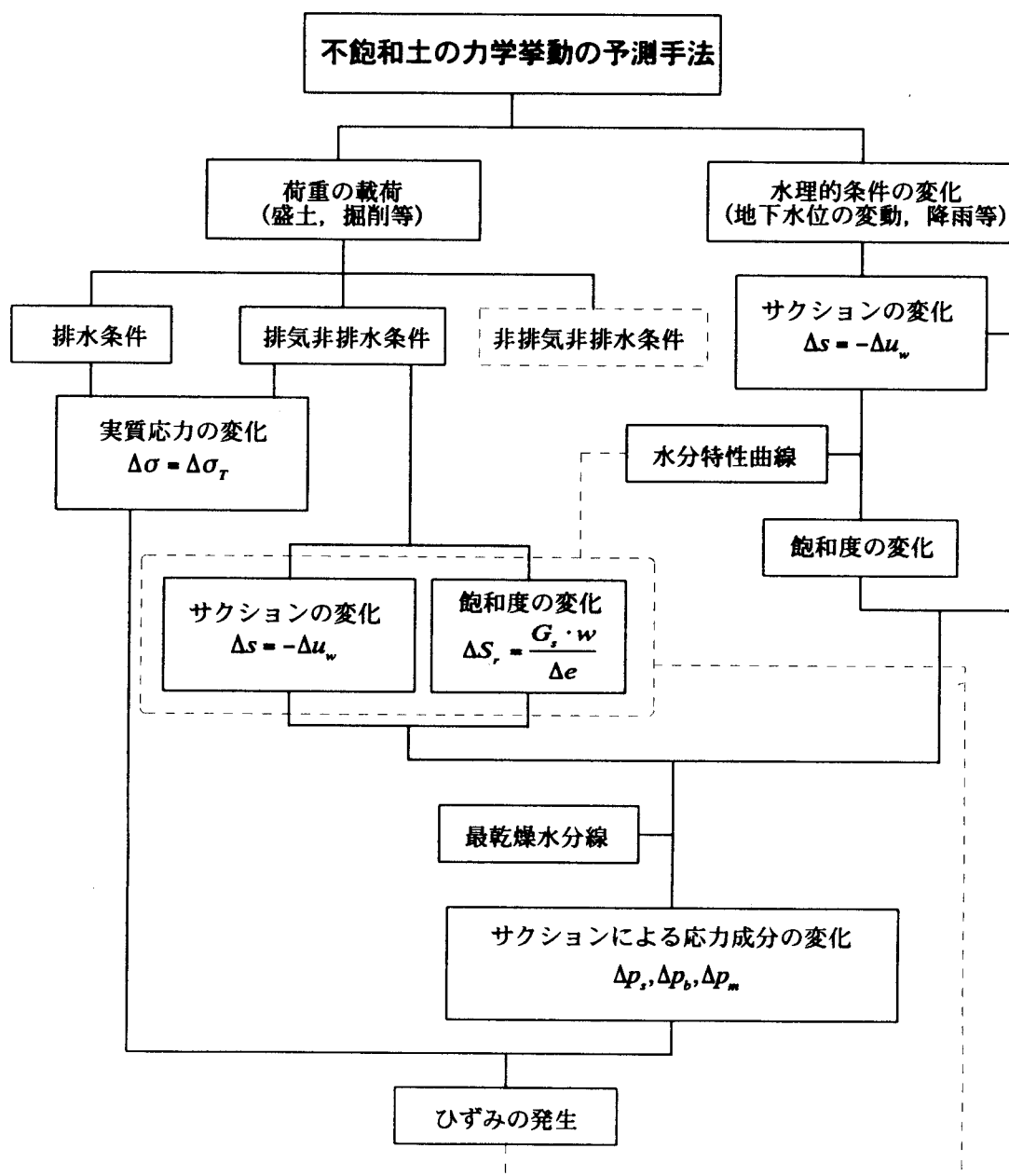
都市の拡大とともに居住空間が平地から山間部へと移行し、防災への関心が強まっている。しかしながら、集中豪雨などによる土砂災害で甚大な被害が発生している昨今、新規の構造物の安全性評価もさることながら、既存構造物また自然斜面の安全評価および保守が重要になってくる。このような現存の土構造物、自然斜面は、不飽和状態で安定状態にあると考えられる。これらの長い年月を経た土構造物は、降雨による浸潤・乾燥を繰り返し、ひずみが蓄積していると考えられ、現在の応力状態および変状を把握するとともに将来への安全性評価が必要となる。しかしながら、これまで地盤工学の礎となってきた Terzaghi の有効応力¹⁾理論は、不飽和土の特別な一側面である飽和土にしか適用できないのが現状であり、不飽和土の力学体系の整備が求められるようになった。

Bishop²⁾は土塊内の空気と水の界面作用によって生じるサクシオンが不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼすことから、サクシオンを独立変数とした有効応力式を提案している。しかし、この有効応力式は、強度特性に関して適用できることが確かめられているものの、不飽和土特有のコラプス変形に対しては、有効応力の減少が体積を減少させるという矛盾を生じさせる。結局、サクシオンの効果を有効応力として取り扱うことは難しく、構成モデルとしてサクシオンの効果を評価する必要がある。

近年、不飽和土の研究が進み、いくつかの不飽和土構成モデルが提案されており(Alonso ら³⁾⁴⁾、向後ら⁵⁾⁶⁾、軽部ら⁷⁾⁸⁾、初期値・境界値問題として定式化されるまでに発展を遂げている(Alonso ら⁹⁾、向後ら¹⁰⁾、飯塚ら¹¹⁾)。しかしながら、一方で不飽和土の浸透特性に関する研究が力学的安定性とは独立に研究が進められ、本来相互作用を及ぼし合う土中水の移動と土骨格の変形特性が個別に表現されてきた。不飽和土の土/水連成解析を行うためには、この2つの挙動を矛盾なく橋渡しする道具が必要となる。本研究は、この橋渡しの役割をする水分特性曲線の定量化とともに、土骨格と土中水の相互作用を解明することにある。

b. 研究の目的

下の図は、不飽和土の力学挙動を予測する流れ図である。不飽和土の力学挙動は実質応力 σ ($=\sigma_T - u_a$; σ_T は外部応力, u_a は間隙空気圧)とサクション s ($=u_a - u_w$; u_w は間隙水圧)によって決定される。しかしながら、サクションの効果は間隙水分布によって異なり、サクション変化とともに飽和度変化が重要となってくる。このサクションと飽和度(または体積含水率)の関係を表したものが、水分特性曲線であり、土の保水性を表現する。水分特性曲線の研究は、農学や土壌学の分野で古くより行われており、土の保水能より土中水の移動を導くために用いられてきた。



しかしながら、水分特性曲線の形状は、粒度分布や土粒子の吸着水膜厚など、土の物性によって異なるだけでなく、同一の土質でも練り返し度などの間隙構造によって異なることが分かっている。また、土の乾燥過程を表す脱水曲線と湿潤過程を表す吸水曲線でもヒステリシスを呈する。本研究は、同一の土質に対する水分特性曲線の定量化を第一の目的としており、水分特性曲線の形状に影響を及ぼす要因を明確にし、新しい水分特性曲線モデルの構築を目指す。

また、飽和土の力学では間隙水が土骨格の変形を拘束しており、排水条件と非排水条件が有効応力原理を仲立ちとした対応関係にあるが、不飽和土においては間隙空気の圧縮性のため非排水条件下ではサクシオンが変化し、それとともに飽和度変化が生じる(排水条件下でも飽和度変化それに伴うサクシオンの変化が生じるが微小なものである)。そこで、水分特性曲線を拘束条件としてサクシオンおよび飽和度が決まるとするならば、土骨格の変形と土中水の移動の連成関係を与えることができる。ここでは、不飽和土の非排水圧縮・せん断試験を行い、土/水の相互作用を検討する。そして、軽部の構成モデルの中で表現されている不飽和土の力学挙動に影響を及ぼすサクシオンの効果を定量化する。軽部らの構成モデルは、飽和土の力学挙動を包含したものであり、力学的な土質定数は飽和土の試験方法より得ることができる。これに水分特性曲線を導入すると、各応力成分が決定される。特に、せん断抵抗力に寄与するサクシオン応力、土骨格の圧縮変形に寄与するバルク応力の適用範囲に関して考察を加える。

c. 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第1章では既存の不飽和土構成モデルを紹介する。その中で、サクションと飽和度により応力成分を決定している軽部らの構成モデルは、飽和土の力学体系を包含しており、水分特性に関する規則性を与えるだけで不飽和土の挙動を表現できるものとなっている。しかしながら、逆に水分特性に強く依存するため、的確な水分特性曲線モデルが必要であることが確認された。第2章では、同一試料に現れる水分特性曲線の形状の違いを考察し、それに及ぼす要因を検討した。まず、種々の初期状態、応力条件下で供試体の水分特性を測定し、その形状に及ぼす要因を検討している。次に、既存の経験式中に物理的解釈を加え、そのパラメーターを影響因子による関数とし、新しい水分特性曲線モデルを構築するとともに、不飽和浸透問題に対する水分特性曲線のヒステリシスの導入法に関して考察を加えた。第3章は、不飽和土の非排水三軸圧縮および一軸圧縮試験を通して、不飽和土の強度特性に及ぼすサクションの効果を検討している。結果、強度特性に関しては最乾燥水分線に依存しないサクション応力を導入することで、飽和土と同じ破壊基準が適用できることが分かった。同時に、現場のサクションを強度試験より間接的に得る方法を提案し、その適用範囲について考察を加えた。第4章は、不飽和土中の骨格伝達応力として寄与するバルク応力の算定法を検討した。試験には定サクション下での不飽和土の異方圧密試験および非排水等方圧縮試験を行った。第5章は、解析への水分特性曲線モデルの適用に関して考察を加えるとともに、実際の地盤の湿潤・乾燥履歴によるひずみの蓄積を説明している。また、近年汎用的になってきた水分特性に関するデータベースの適用範囲について検討した。第6章は、各章より得られた知見をまとめた結論である。

本論文は、不飽和土の土/水連成解析を行う上での、水分特性曲線の重要性を問うものであり、不飽和土の力学体系を実際の地盤へ適用する際の道具立てとして十分に機能し得るものと考えられる。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. : Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen, *Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Part II a*, Vol.132, pp.125-138, 1923.
- 2) Bishop, A. W. : The principal of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
- 3) Alonso, E. E., A. Gens and D. W. Hight : Special problem soils. General Report., Proc. 9th European RC-SMFE, pp.1087-1146, 1987.
- 4) Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa : A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 5) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 6) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 7) 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.
- 8) 加藤正司, 軽部大蔵, 本田道識, 藤原照幸 : 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.554/III-37, pp.57-69, 1996.
- 9) Alonso, E.E., F. Batle, A. Gens and A. Lloret : Consolidation analysis of partially soils-application to earthdam construction, *Proc. International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.1303-1308, 1988.
- 10) Kohgo, Y. : A consolidation analysis method for unsaturated soils coupled with an elastoplastic model, *Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils*, pp.1085-1093, 1995.
- 11) 飯塚敦, 本田道識, 西田博文, 河井克之, 軽部大蔵 : 間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土/水連成解析, *土木学会論文集*, No.659/III-52, pp.165-178, 2000.

第1章 不飽和土の構成モデル

土を構成するものは、土粒子(鉱物、有機物など)、液体(自由水、吸着水など)、気体(空気、水蒸気、溶存空気など)の3相である。地盤工学分野で地下水位以下の土は、内部に気体が存在せず、このような土を飽和土と呼び区別している。逆に気体を含んだ土を不飽和土と呼ぶ。土質力学の体系は、まず飽和土の挙動を表すことに始まった。Terzaghi¹⁾が有効応力を提唱して以来、飽和土においては有効応力の原理が土質力学の発展の原動力となってきた。飽和土におけるTerzaghiの有効応力は、次式で定義されている。

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1.1)$$

ここで、 σ は全応力、 σ' は有効応力、 u_w は間隙水圧である。Terzaghiは第1回土質基礎工学会議において有効応力原理を次のように表現している。

「土の任意断面上の点の応力は、その点に働く全主応力から計算される。もし、土の間隙が圧力 u_w の水で満たされているとすると、全主応力は二つの部分からなっている。一つは、水にも固体部分にも等しい強さで作用する圧力 u_w であり、中立応力または間隙水圧と呼ばれる。全応力と間隙水圧の差は中立応力からの超過であり、固体部分にのみ作用する。中立応力の変化は実際体積変化を起こさないし、破壊に対する応力の条件に影響を与えない。圧縮、せん断やせん断抵抗の変化のようなすべての応力変化の計測可能な効果は有効応力のみによる。」

Terzaghiは、間隙水圧 u_w が微小時間 dt 中に du_w だけ減少すると有効圧は $d\sigma' = -du_w (>0)$ だけ増加し、これに対応する間隙比の減少は $de = a_v d\sigma'$ (a_v は圧縮係数)であると

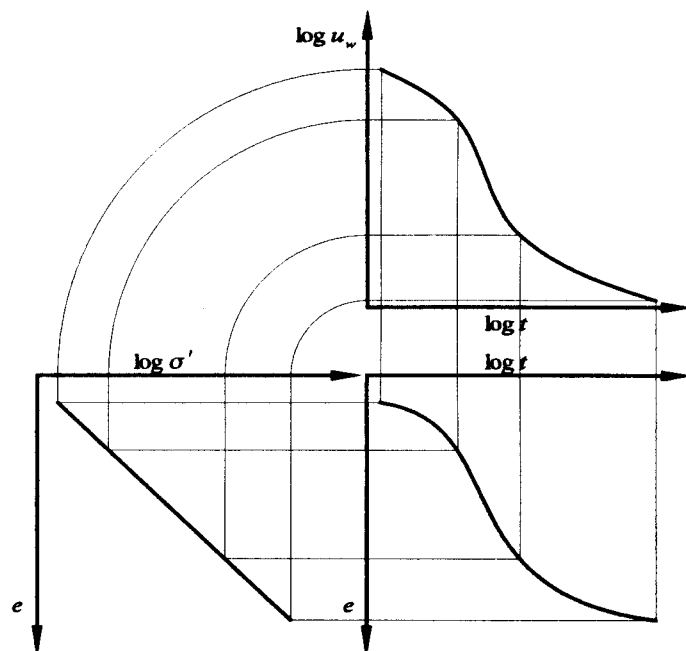


図-1.1 圧密における有効応力

述べており、有効応力を圧密理論の構築に用いて一次元圧密理論を確立することに成功した(図-1.1)。Rendulic²⁾は飽和したシルト質粘土の非排水、排水せん断を圧縮と伸張の応力条件で行い、非排水時の有効応力経路や排水時の有効応力～間隙比曲線を求め、Terzaghiの有効応力がせん断現象にも適用できることを示した(図-1.2)。

岡³⁾はTerzaghiの有効応力を図-1.3のように説明している。飽和した土に等方応力として σ_0 が作用し、水圧が作用していない場合は、骨格に作用する全応力は σ_0 であり、これが有効応力に等しい。この土を圧力室に入れ、水圧 u を作用させたとき、水を非圧縮性と考え、土の変形は土粒子の圧縮のみによって生じるが、土粒子の圧縮性は土のそれに比べて無視できるほど小さいため、水圧による骨格構造の変化は無視できる。土の間隙率を n とすると、液相に作用している平均応力は nu 、固相に作用する応力は $\{\sigma_0 + (1-n)u\}$ となる。つまり土に作用する全応力は、

$$\sigma = \sigma_0 + (1-n)u + nu = \sigma_0 + u \quad (1.2)$$

となり、全応力に水圧 u が付加されただけで、有効応力が変化しないため土骨格に変形を生じない。次に、土骨格を不透水のメンブレンで覆い、圧力室に $\Delta\sigma$ を作用させ、内部の間隙水圧 u が生じたときを考えると、2相混合体理論より、

$$\Delta\sigma = mu$$

$$m = \frac{C_b - C_s + n(C_w - C_s)}{C_b - C_s} \quad (1.3)$$

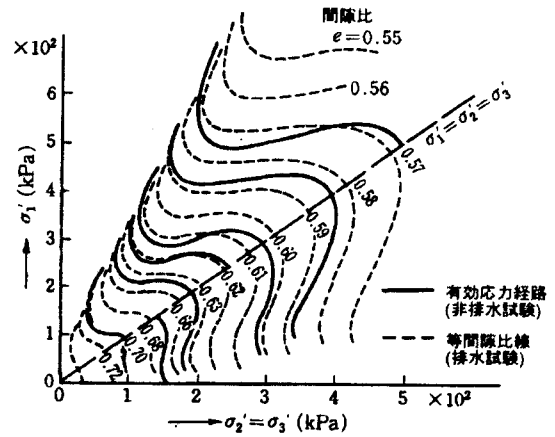


図-1.2 Rendulicの研究

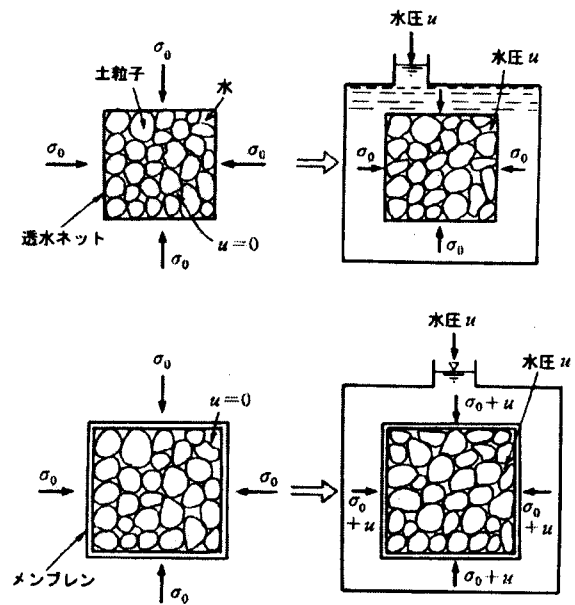


図-1.3 有効応力の概念図

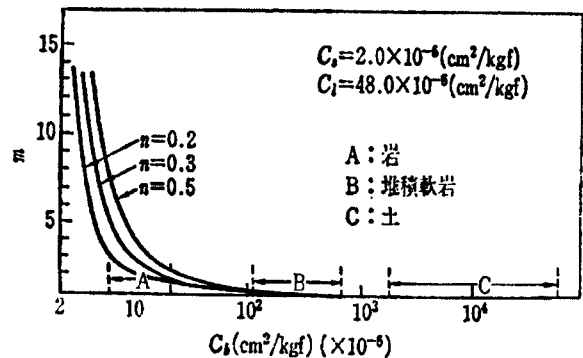


図-1.4 m と C_b の関係

ここで、 C_s, C_w, C_s はそれぞれ土骨格、液相、固相の圧縮性である。このとき、全応力は

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma = \sigma_0 + mu \quad (1.4)$$

となる。図-1.4 は式(1.3)を図示したものであり、土ではほぼ $m=1$ となり、結局有効応力は σ_0 となる。

近年、不飽和土の力学体系が広く受け入れられ、工学の現場への適用が試みられるようになってきた。しかし、土の不飽和化は飽和土の力学と不飽和土の力学を本質的に異なるものとしている。それがこの有効応力という考え方である。不飽和土の研究は、有効応力の概念を不飽和土へ拡張することから始まった。

Bishop⁴⁾らは不飽和土の有効応力として次式を提案している。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) = \sigma_{net} + \chi s \quad (1.5)$$

ここで、 σ は全応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 σ_{net} は実質応力 (net stress)、 s はサクシオンを表す。 χ は 0~1 の値を取るパラメーターである。式(1.5)は間隙空気圧 u_a を中立応力とし、間隙水圧 u_w の超過分 ($u_a - u_w$) をサクシオン、全応力 σ の超過分 ($\sigma - u_a$) を実質応力として、独立応力成分としているところに大きな意義があると言える。Bishop and Donald⁵⁾は、不飽和シルトの排水三軸試験を行い、図-1.5の結果を得た。図より求まる結論は第一に側圧 σ_3 、間隙水圧 u_w 、間隙空気圧 u_a を $(\sigma_3 - u_a)$ と $(u_a - u_w)$ が一定になるように変化させても応力~ひずみ関係に何ら影響を与えないということである。第二に $(\sigma_3 - u_a)$ あるいは $(u_a - u_w)$ の一方だけを変化させると、応力~ひずみ関係は影響を受けることである。この結果に基づき、彼らは、土の力学挙動は σ, u_w, u_a の個々の値とは無関係で、有効応力式(1.5)によって支配されると主張した。Skempton⁶⁾

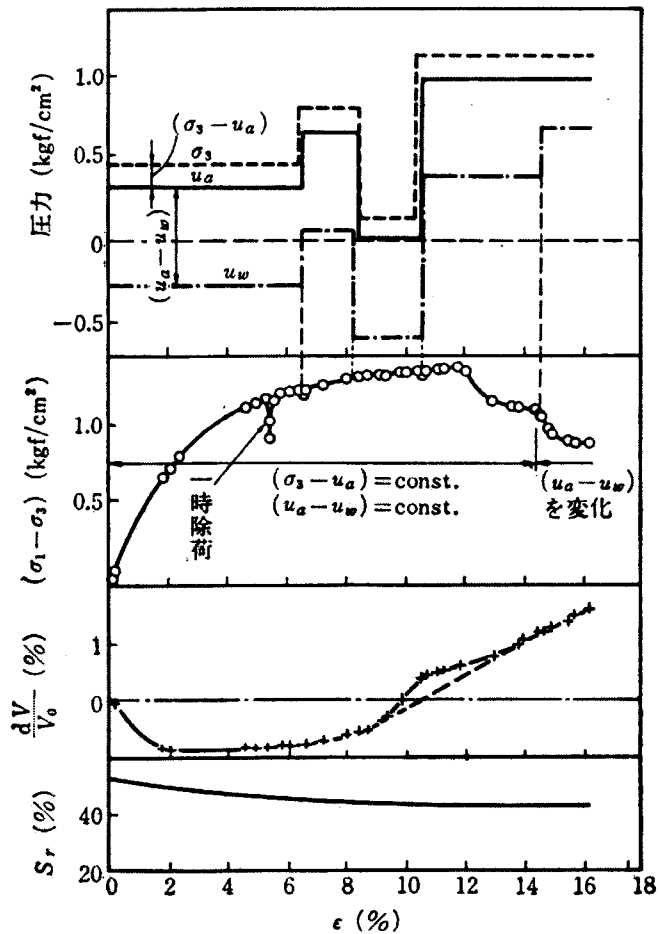


図-1.5 Bishop・Donaldの研究

は、図-1.6 に示す土粒子の接点モデルから、式(1.5)中のパラメーター χ が空隙に占める空隙水の面積割合に相当するとし、式(1.5)を説明した. Bishop and Blight⁷⁾は、飽和土と不飽和土の破壊線から図-1.7のように χ を算出している.

Bishop の有効応力式に対して, Jennings and Burland⁸⁾は不飽和シルトの一次元圧密試験を行い、式(1.5)が有効応力として適当でないと指摘した. 不飽和土を水浸させたとき、有効応力式(1.5)では、サクシオン($u_a - u_w$)の解放により有効応力が減少するため、当然体積膨張が予測されるにも拘わらず、実際には図-1.8のように体積の減少いわゆるコラプス現象が生じ、有効応力の定義を満たしていない. 不飽和土中では、粒子間接点に存在する空隙水メニスカスが引き起こすサクシオン($u_a - u_w$)によって、粒子間接点に垂直力が作用し、粒子間の安定性が増加しており、サクシオンが解放されることによって内部抵抗力が減少しコラプスが生じる. Jennings and Burland は、この意味で($\sigma_3 - u_a$)は外力、($u_a - u_w$)は内力であり、本質的に異なる応力成分を同一に扱うべきでないと指摘している.

Matyas and Radhakrisna⁹⁾はカオリンと蛭石の混合物で不飽和三軸、 K_0 圧縮試験を行い、図-1.9のような等塑性体積ひずみ線を得た. 図-1.10 で表される Bishop の有効応力式が示す等塑性体積ひずみ線とは異なることが分かる.

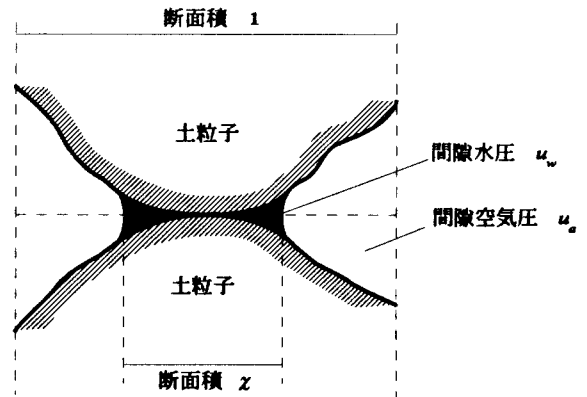


図-1.6 Skempton のモデル

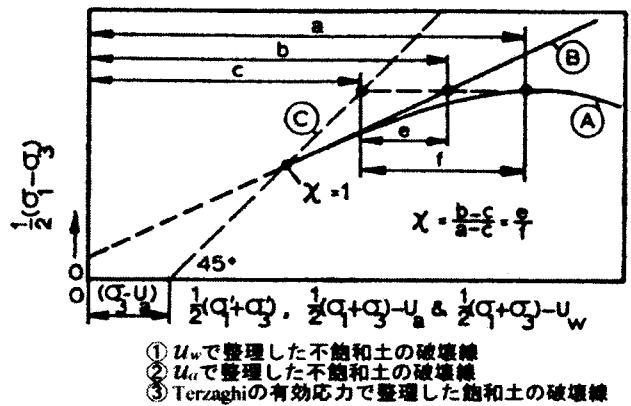


図-1.7 χ の算出方法

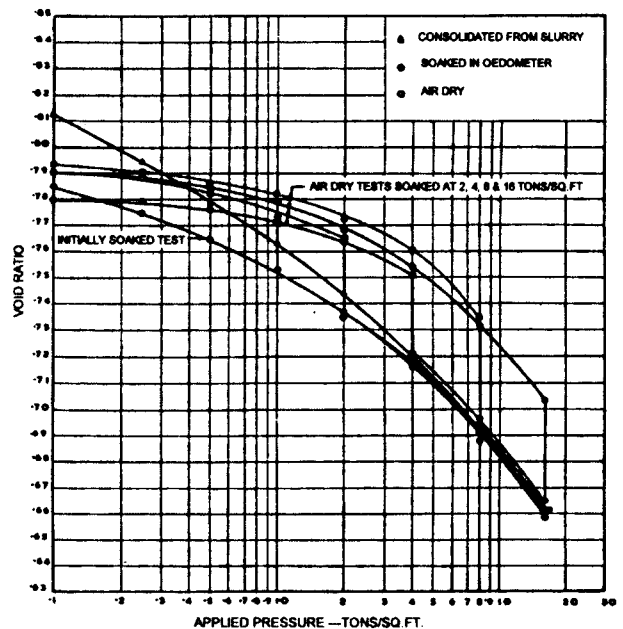


図-1.8 Jennings and Burland の研究

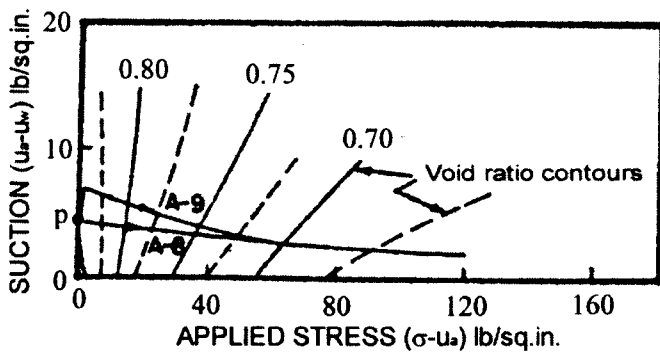


図-1.9 Matyas and Radhakrisna の研究

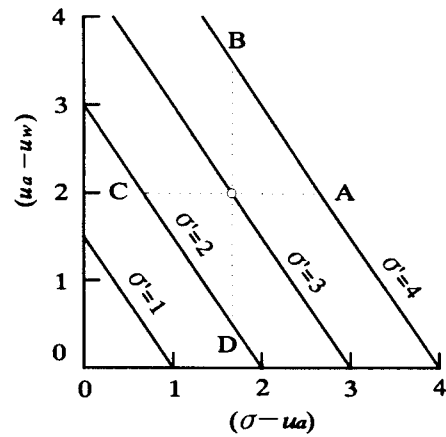


図-1.10 Bishop 式で示す
等塑性体積ひずみ線

Coleman¹⁰⁾は、Jennings and Burland の指摘どおり、 $(u_a - u_w)$ を有効応力に導入して扱うよりはむしろ構成式に取り入れるべき量であるとの考え方より、軸対称応力状態において $(d\sigma_m - du_a)$ 、 $(du_a - du_w)$ 、 $(d\sigma_1 - d\sigma_3)$ を独立変数とし、次式を与えた。

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dV_w}{V} &= C_{11}(du_a - du_w) + C_{12}(d\sigma_m - du_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \\ -\frac{dV}{V} &= C_{21}(du_a - du_w) + C_{22}(d\sigma_m - du_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \\ -(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) &= C_{31}(du_a - du_w) + C_{32}(d\sigma_m - du_a) + C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

ここで、 V は土要素の体積、 V_w は間隙水の体積、 ε_1 は軸方向ひずみ、 ε_3 は側方ひずみ、 σ_m は平均応力、 σ_1 は軸方向応力、 σ_3 は側方応力、 u_w は間隙水圧、 u_a は間隙空気圧、 C_{ij} は土の応力履歴と応力に関する係数である。しかしながら、式に含まれる C_{ij} の性質については明らかにされていない。

現在、この Coleman の与えた構成式の係数も含めて、コラプスを表現できる構成モデルの研究が進んでいる。本章では、これらの構成モデルを紹介し考察を加える。

1.1 Alonso ら^{11),12)}のモデル

Alonso らは、不飽和土の弾塑性構成モデルを構築するにあたり、まず等方応力状態での体積圧縮特性を図-1.11 で表し、任意の定サクション下での圧縮挙動を次式で与えた。

$$v = (1+e) = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p_0}{p_0^c} \quad (1.7)$$

ここで、 v は比体積、 e は間隙比、 p_0 は実質応力、 p_0^c は単位実質応力、 $\lambda(s)$ は v と $\ln(p_0/p_0^c)$ の傾き、 $N(s)$ は $s = s$ で $p_0 = p_0^c$ のときの比体積 v である。等方応力状態では図-1.11(b)のように、 (p, s) 面内に降伏線が描け、その降伏線上の点1(p_0, s_1)から定サクション下での p の除荷(点2)、続くサクション s の除荷(点3)を図-1.11(a)上で説明した。点1→点2→点3は弾性領域内での応力変化であり、次式で表した。

$$dv = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (1.8)$$

ここで、 κ は膨潤指数。また、点2→点3のサクション除荷による吸水膨張を次式で表した。

$$dv = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{at}} \quad (1.9)$$

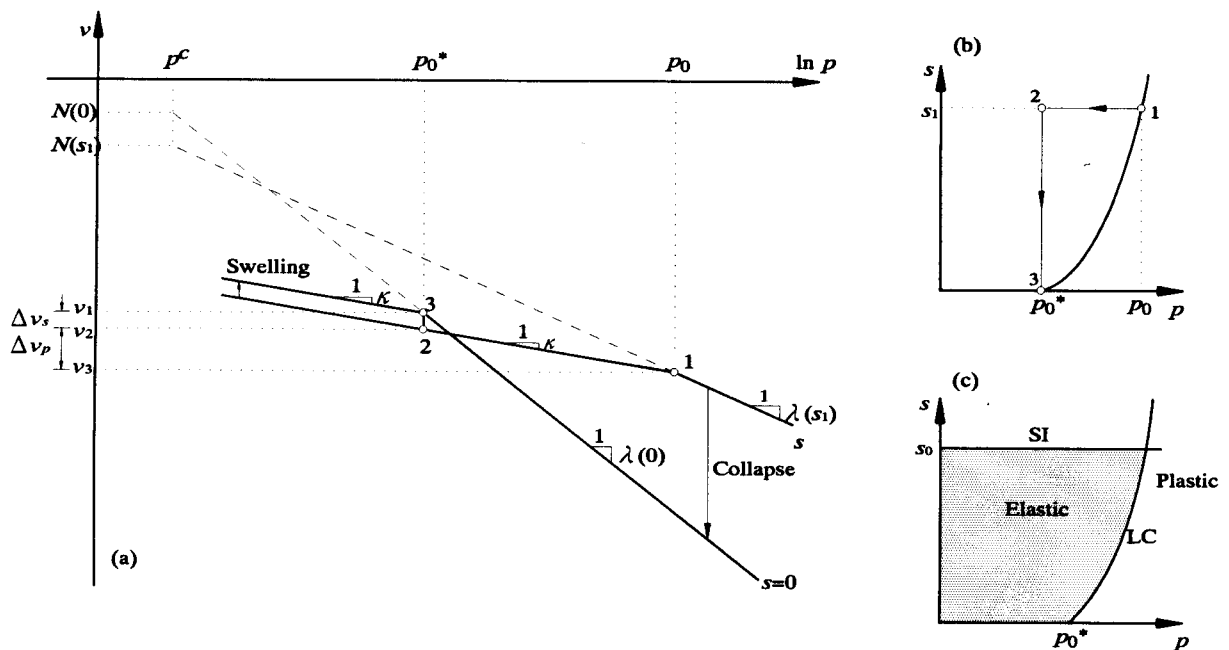


図-1.11 等方応力状態の構成モデル

ここで、 κ_s はサクシオン s に関する土骨格の膨潤指数、 p_{at} は大気圧である。式(1.7)、(1.8)、(1.9)を用いて、図-1.11(a)中の点1→点2→点3を表すと、

$$N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p_0}{p^c} + \kappa \ln \frac{p_0}{p_0^*} + \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{p_0}{p^c} \quad (1.10)$$

ここで、 $(p_0^*, 0), (p_0, s_1)$ は (p, s) 面内で同一の降伏線上の応力点であり、 $p_0 = p^c$ で、

$$N(0) - N(s) = \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} \quad (1.11)$$

を与えると、次式が得られる。

$$\left(\frac{p_0}{p^c} \right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \quad (1.12)$$

このようにして得られた降伏線を LC 降伏線とした(図-1.11(c))。また、サクシオン増加による塑性変形も考慮して

$$s = s_0 \quad (1.13)$$

で表される SI 降伏線を定義した(図-1.11(c))。 s_0 は過去に受けた最大のサクシオン値を表す。Alonso は、これらの2つの降伏線が互いに独立したものではなく、 s_0 と p_0^* が関連し合っているというカップリング効果について述べているが具体的な予測手法については触れていない。また、式(1.7)中のパラメーターについて以下のように述べている。

$$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r) \exp(-\beta s) + r \right] \quad (1.8)$$

ここで、 $\lambda(0)$ は $s = 0$ の飽和状態での傾きを表す。 r, β はともにサクシオンが土骨格の剛性に寄与することを表すパラメーターであり、 r は、

$$r = [\lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)] \quad (1.9)$$

で表される材料パラメーターであり、 β は飽和度によって影響を受けるパラメーターである。つまり $\lambda(s)$ はサクシオンの関数であるとともに、飽和度の関数となっている。後述するが、サクシオンと飽和度は唯一の関係とはならないため、これらの値を特定することは難しい。

次に、Alonso らは、異方応力状態での降伏線を修正 Cam-Clay モデルを用いて次式のように表

した。

降伏面

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (1.10)$$

限界状態線

$$q = M(p + p_s) \quad (1.11)$$

$$p_s = ks \quad (1.12)$$

ここで、 p_s はせん断試験より求まるサクシオン応力、 k はサクシオンに関する定数。 図-1.12 は異方応力状態での降伏線を表している。 図-1.13 は、 (p, q, s) 空間で表した Alonso らの降伏基準である。

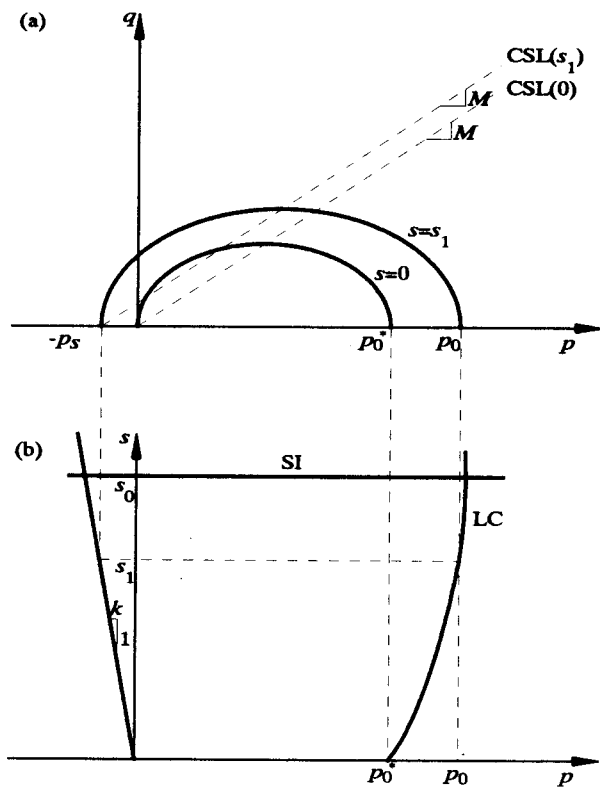


図-1.12 異方応力状態の構成モデル

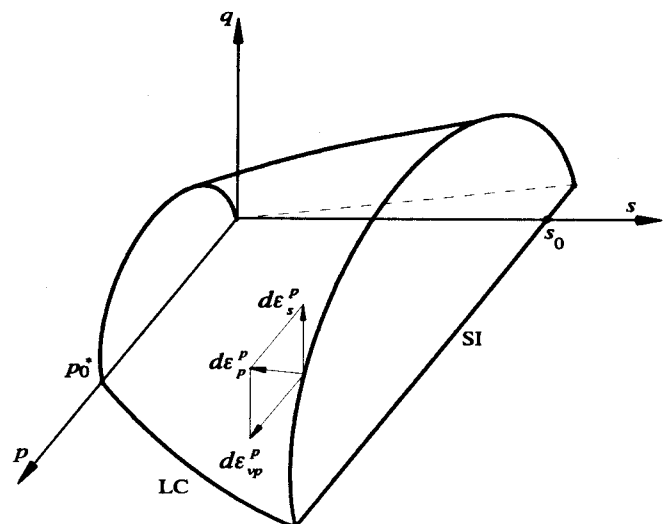


図-1.13 Alonso らの降伏基準

1.2 向後ら^{13),14)}のモデル

向後らは、不飽和土の内部の間隙水状態を図-1.14に示す3つの形態で表し、サクシヨン増加の効果を2つに分類した。ひとつは有効応力の増加であり、もうひとつは降伏応力と土骨格の剛性の増大である。(a)の封入不飽和状態では、間隙空気が間隙水に封入もしくは溶解しており、この状態では飽和土と同じ力学挙動を示すとしている。つまり、サクシヨンが示す間隙水の負圧はそのまま Terzaghi の有効応力として扱い、サクシヨンの効果は有効応力を増加させるのみである。(c)の懸垂水不飽和状態ではサクシヨンが有効応力を増加させる効果は小さく、降伏応力を増大させ、剛性を高める効果が支配的となる。(b)の過渡的不飽和状態は、(a)から(c)へと移行するときの不飽和状態である。これらの不飽和状態を(d)のように水分特性曲線上で表した。そして、せん断試験から得られるサクシヨンのせん断強度への寄与分より有効応力を次式で与えた(図-1.14)。

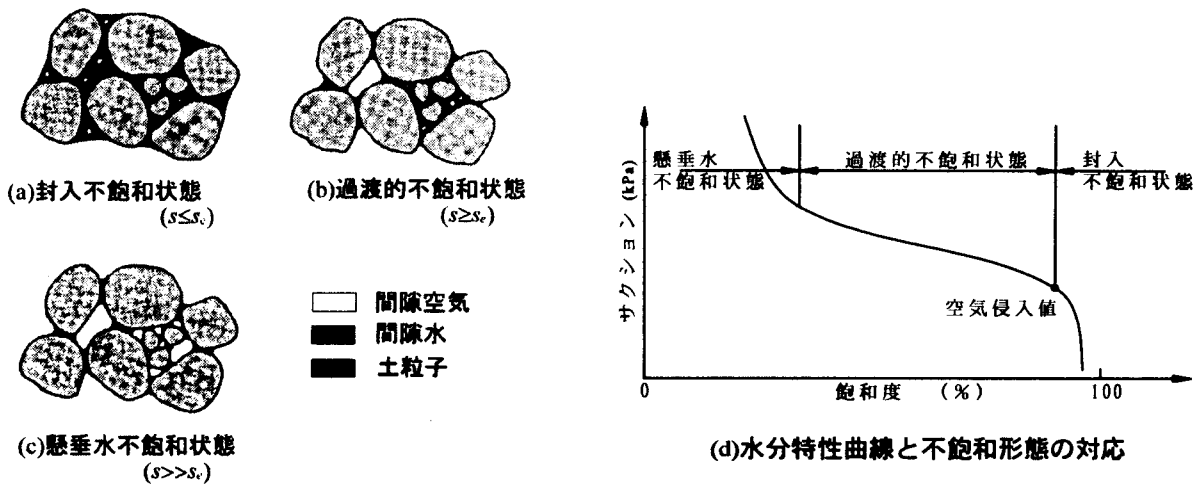


図-1.13 向後の間隙水モデル

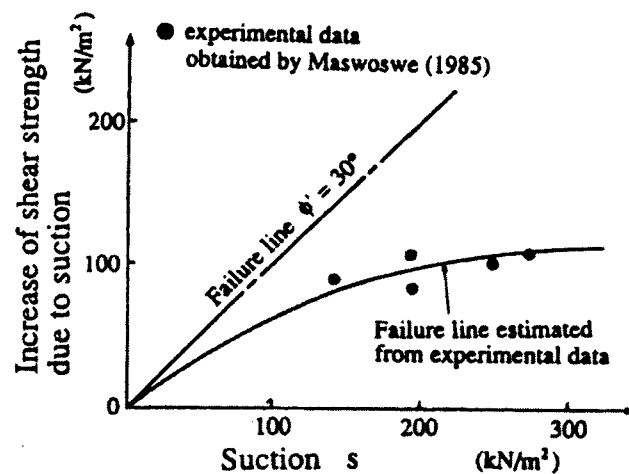


図-1.14 サクシヨンによるせん断抵抗力の増加

$$\sigma' = \sigma - u_{eq} \quad (1.13)$$

$$u_{eq} = u_a - s \quad (s \leq s_c) \quad (1.14)$$

$$u_{eq} = u_a - \left(s_c - \frac{s_c - s_e}{s^* + a_e} s^* \right) \quad (s \geq s_c) \quad (1.15)$$

$$s^* = 0 \quad (s \leq s_c) \quad (1.16)$$

$$s^* = s - s_e \quad (s \geq s_c) \quad (1.17)$$

ここで、 u_{eq} は等価間隙圧、 a_e は材料パラメーター、 s_c は限界サクシオン、 s_e は空気侵入値、 s^* はサクシオンの空気侵入値に対する超過分であり有効サクシオンと呼ぶ。また、Matyas and Radhakrisna⁹⁾が実験によって求めた状態面(図-1.15)に基づいて、有効応力の平均主応力 p' と有効サクシオン s^* に対する間隙比 e の状態面を図-1.16(a)で表した。図-1.16(b)(c)は、それぞれ図-1.16(a)を s^* 一定面、 p' 一定面に投影したものである。向後らは、 $e \sim \log p'$ 関係を線形関数として式(1.18)、 $s^* \sim e$ 曲線を双曲線関数として式(1.21)を定義している。

$$e = -\lambda^* \log p' + \Gamma^* \quad (1.18)$$

飽和状態で $\lambda^* = \lambda, \Gamma^* = \Gamma$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+y} \quad (1.19)$$

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma + e_0^0 y}{1+y} \quad (1.20)$$

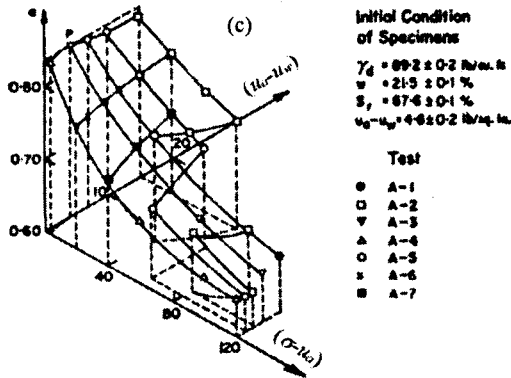
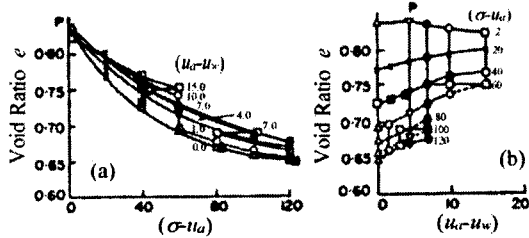


図-1.15 Matyas and Radhakrisna の状態面

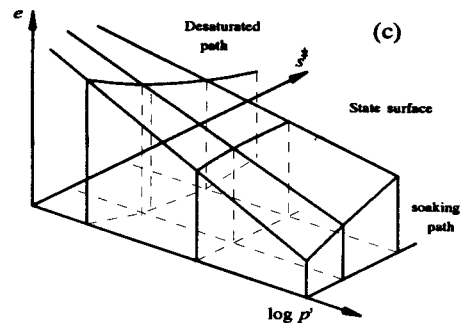
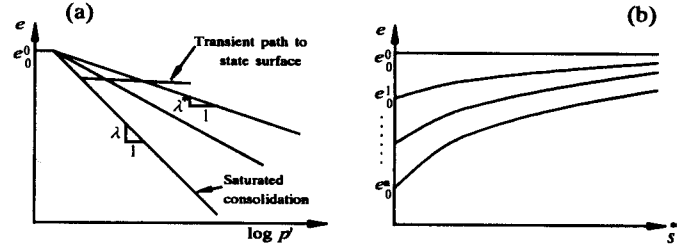


図-1.16 向後らの状態面

$$y = \frac{e^n - e_0^n}{e_0^n - e^n} = \left(\frac{s^*}{a_s} \right)^{n_s} \quad (1.21)$$

ここで、 e_0^n, \dots, e_0^n は飽和時の間隙比、 a_s, n_s は材料パラメーター。

さらに、修正 Cam-Clay モデルを拡張した異方応力空間での降伏関数を次式で定義した。

$$f_1 = M^2(p' - P_0)^2 + q^2 - (MP_0)^2 = 0 \quad (1.22)$$

$$P_0 = \frac{P_c}{2} \quad (1.23)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'_{cs}}{3 - \sin \phi'_{cs}} \quad (1.24)$$

ここで、 ϕ'_{cs} は限界状態での内部摩擦角、 P_0, P_c は図-1.17 で定義される値である。また、降伏応力 P_c を塑性体積ひずみ ε_v^p と有効サクシオン s^* の関数であるとして、図-1.16 の状態面から、次式を与えた。

$$P_c = \exp\left(\frac{B^* + \varepsilon_v^p}{A^*}\right) \quad (1.25)$$

$$A^* = \frac{\lambda^* - \kappa}{2.3(1 + e_0)} \quad (1.26)$$

$$B^* = \frac{\lambda_0^* - \kappa}{2.3(1 + e_0)} \ln p'_0 - \frac{\Gamma_0^* - \Gamma^*}{(1 + e_0)} \quad (1.27)$$

ここで、 κ は $e \sim \log p'$ 面の除荷曲線の傾き、 e_0 は初期間隙比、 p'_0 は初期平均有効応力である。 λ_0^*, Γ_0^* はそれぞれ λ^*, Γ^* の初期値である。このモデルにおけるサクシオンの効果の概念図を、緩詰め供試体、密詰め供試体についてそれぞれ図-1.18、図-1.19 に表す。(a) は封入不飽和状態、(b) は懸垂水不飽和状態を表している。封入不飽和状態ではサクシオンによって有効応力のみ

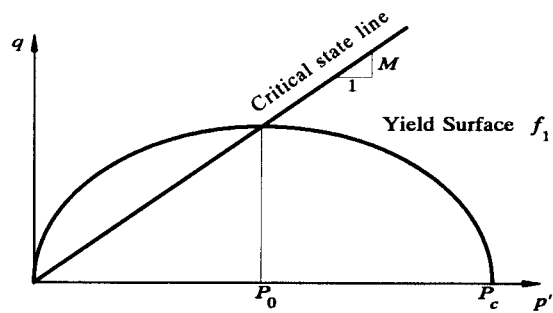


図-1.17 (p', q) 面での降伏関数

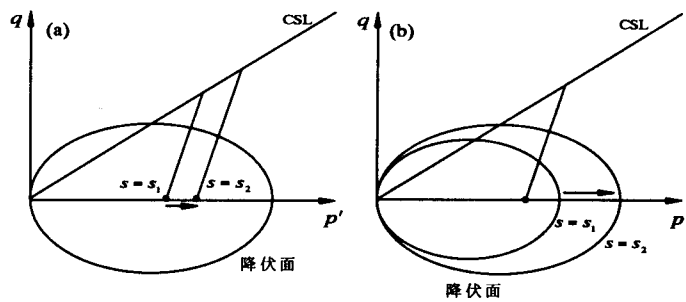


図-1.18 緩詰め供試体でのサクシオンの効果

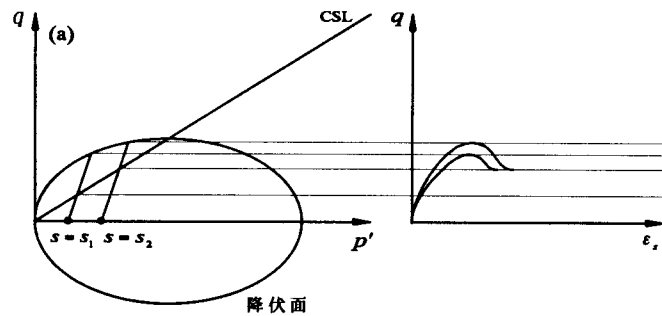


図-1.19 密詰め供試体でのサクシオンの効果

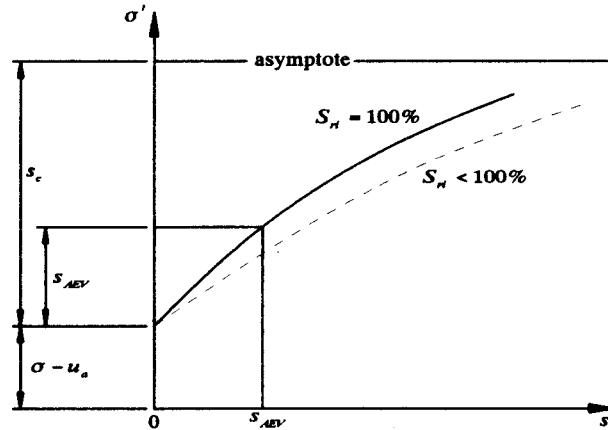


図-1.20 向後らの有効応力

が変化し、降伏面の拡大は有効応力経路が降伏面に到達したときのみ生じる。一方、懸垂水不飽和状態では有効応力の増加は小さく、降伏面が拡大する。向後らのモデルは、サクシヨンの効果を等価間隙圧として表し、これによって求められる有効応力と有効サクシヨンをを用いることで弾塑性論への適用を簡便にしている。そのため、下負荷面モデル(橋口¹⁵⁾)への適用も可能にしている点で優れたモデルであるといえる。Alonsoらのモデルが、水分特性曲線を見做しているためにSI降伏面への考察が不明瞭なのに比べて、水分特性曲線から得られるパラメーターを用いている点でより実地的なモデルである。しかしながら、水分特性曲線はサクシヨン履歴に対して強い依存性があるため、向後らのように有効応力をサクシヨンの関数とする方法では、十分でない。図-1.20は、式(1.13)～(1.15)を表している。図中実線は飽和状態からのサクシヨン載荷段階における有効応力の推移である。不飽和状態からのサクシヨン除荷過程では、サクシヨンをゼロにしたとき飽和度は100%まで回復しない。この状態からサクシヨンが増加する過程を考えると(図-1.20中一点破線)、空気侵入値まではTerzaghiの有効応力に従うことを表す式(1.13)～(1.15)では、有効応力を大きく見積もることになる。実際は、間隙空気の圧縮性のため、Terzaghiの有効応力よりも小さくなる。材料パラメーターとしている a_s は、図-1.20においてサクシヨン s に対する σ' の初期の傾きを表しており、特定することは難しいと考える。また、式(1.18)は、Alonsoらのモデルの式(1.7)と等価であり、水分特性曲線のヒステリシスを考慮した場合、材料パラメーターとしている a_s が飽和度によって異なると考えられる。

1.3 軽部らのモデル

不飽和土の挙動にサクションが大きく影響を及ぼすことが明らかであることから、不飽和土構成モデルでは、サクションの効果を剛性を強める作用や有効応力として適用する。しかしながら、サクションは間隙水に対して作用するものであり、当然、土内部の含水率によって同じサクション値であってもその効果は異なると考えられる。サクションが大きいほど飽和度は低くなり、その関係が一意に定まるのであれば、Alonso ら、向後らのアプローチは正しいといえるが、サクションと飽和度の関係を表す水分特性曲線はサクション履歴に強く依存する(図-1.21)ため、飽和度によって新たにパラメータを設定しなければならない。軽部らは、まず不飽和土中の間隙水状態を図-1.22 で分類した。図中(a)で表されるバルク水は、土粒子が作る骨格の間隙を埋める間隙水である。この場合、間隙空気圧と間隙水圧の差として表されるサクション $s = (u_a - u_w)$ は、骨格を等方的に圧縮するように作用し、不飽和土における有効応力の一部として作用する。一方、(b)で示されるメニスカス水は土粒子接点を取り巻く間隙水である。このとき、サクション増加とともに土粒子同士は引き付け合い、骨格全体としての剛性が高まることを表す。不飽和土塊内では、この2つの形態の間隙水が混在している。図-1.21 に示すように、サクション増大過程では比較的バルク水の割合が多く、サクション除荷過程ではメニスカス水が多く存在することになる。この割合は飽和度によって異なる。

軽部ら¹⁶⁾は、最適含水比より乾燥側で締固められた不飽和供試体の三軸圧縮試験結果より、バルク水を含まない比較的低い飽和度での構成モデルを構築している。図-1.23 は、破壊応力条件を表しており、次式で与えられる。

$$q'_f = M(p + f(s)) \quad (1.28)$$

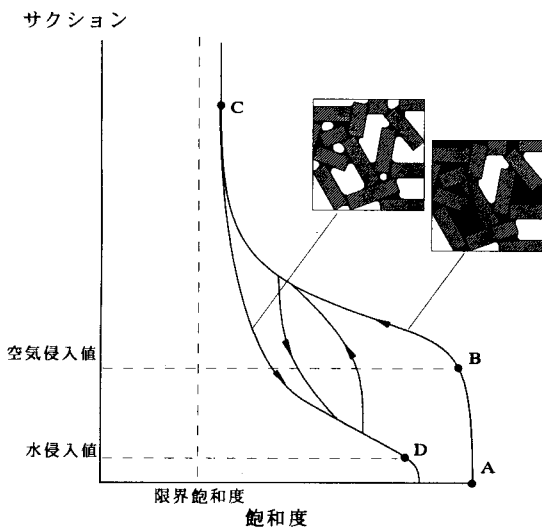


図-1.21 水分特性曲線

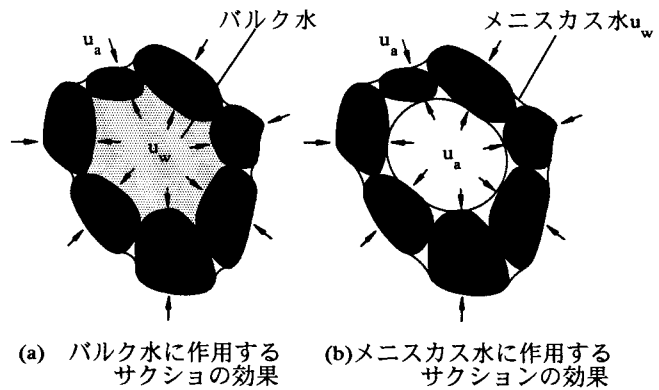


図-1.22 不飽和土中の間隙水状態

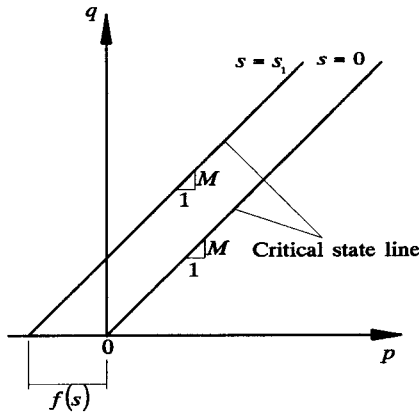


図-1.23 $f(s)$ の求め方

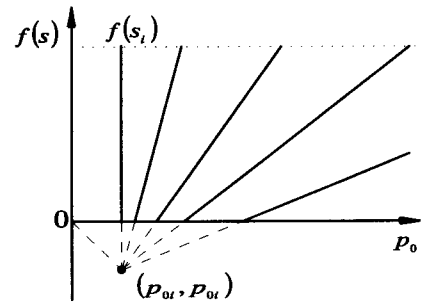


図-1.24 $f(s)$ を用いた等塑性体積ひずみ線群

ここで、 p は実質平均主応力であり $p = p_T - u_a$ で与えられる。 p_T は全応力、 u_a は間隙空気圧である。 q'_j は限界状態での主応力差であり、破壊時の主応力差にダイレイタンス補正を施して得られる。 M は飽和土における限界状態線の傾き、 $f(s)$ は図-1.23 に示されるサクシオンによる効果を平均主応力に換算した応力である。また、飽和状態の正規圧密粘土における $e \sim \ln p'$ 面で現れる線形関係式(1.29)を式(1.30)のように解釈した。

$$e = e_i - \lambda \ln(p'_0/p'_{0i}) \quad (1.29)$$

$$-\frac{dp'_0}{de} = \frac{1}{\lambda} p'_0 \quad (1.30)$$

ここで、 λ は自然対数軸における圧縮指数、 p'_0 は飽和土での平均有効主応力、 e_i は $p'_0 = p'_{0i}$ における間隙比である。式(1.30)の左辺は剛性を表しており、剛性が p'_0 に比例することを表している。不飽和土は、せん断試験より得られた $f(s)$ が剛性を強めるように作用し、式(1.30)の右辺に適用することによって次式で表す不飽和土の等方圧縮式を導き出した。

$$-\frac{dp_0}{de} = \frac{1}{\lambda} (p_0 + f(s)) \quad (1.31)$$

式(1.30)を塑性体積ひずみの増分形でとして表すと、

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \frac{dp_0}{p_0 + f(s)} \quad (1.32)$$

ここで、 κ は自然対数軸における膨張指数、 $d\varepsilon_v^p$ は塑性体積ひずみであり $e = e_i$ のときゼロとなる。式(1.32)を、 $f(s)$ 一定として積分すると次式が得られる。

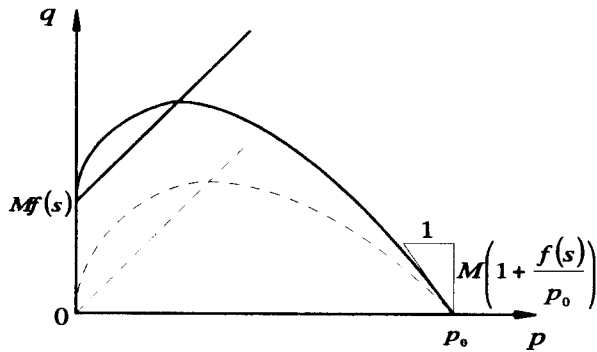


図-1.26 式(1.36)で表される降伏関数

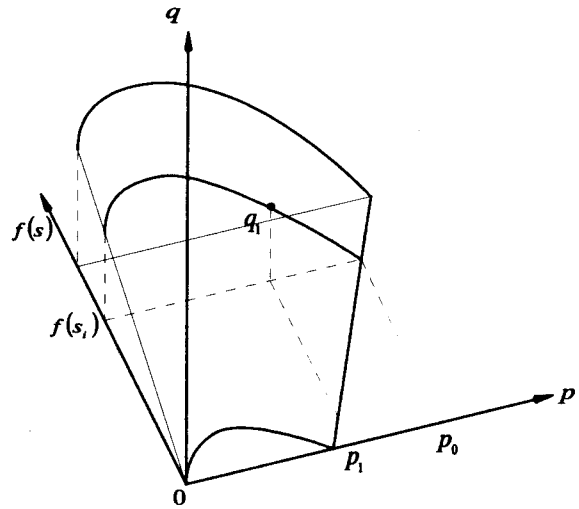


図-1.27 $(p, q, f(s))$ 空間での降伏曲面

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln(p_0 + f(s)) + B \quad (1.33)$$

ここで、 B は積分定数である。塑性降伏時の応力 $p_0 = p_{0i}$ とすると、式(1.33)は

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln \left(\frac{p_0 + f(s)}{p_{0i} + f(s)} \right) \quad (1.34)$$

となり、図-1.24 のような等塑性体積ひずみ線群を描くことができる。これは Matyas and Radhakrisna⁹⁾が得た等間隙比線に類似している。式(1.34)は、サクシヨンが増加しても塑性ひずみは生じないことを示している。これは、比較的低い飽和度の供試体の試験結果に一致している。次に、軽部らは、Cam-Clay モデルのエネルギー釣り合い式を拡張し、不飽和土の軸圧縮中のエネルギー釣り合い式を次式で与えた。

$$\begin{aligned} p \cdot d\varepsilon_v^p + q \cdot d\varepsilon_s &= M(p + f(s)) \cdot d\varepsilon_s \\ \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s} &= M \frac{p + f(s)}{p} - \frac{q}{p} \end{aligned} \quad (1.35)$$

ここで、 p は実質応力、 ε_s はせん断ひずみである。式(1.35)に関連流れ側 $(dq/dp) = -(d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s)$ を適用し、 $q = 0$ のとき $p = p_0$ として積分すると、

$$q = -pM \ln \frac{p}{p_0} + Mf(s) \left(1 - \frac{p}{p_0} \right) \quad (1.36)$$

式(1.36)は、 (p, q) 面 で図-1.26 のように表される。

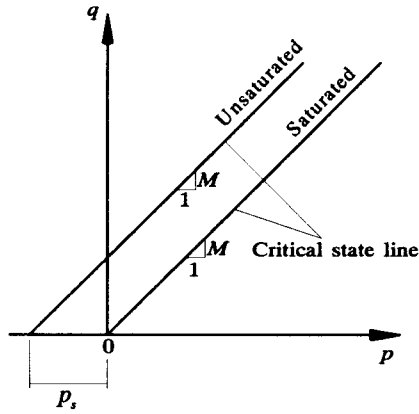


図-1.28 p_s の求め方

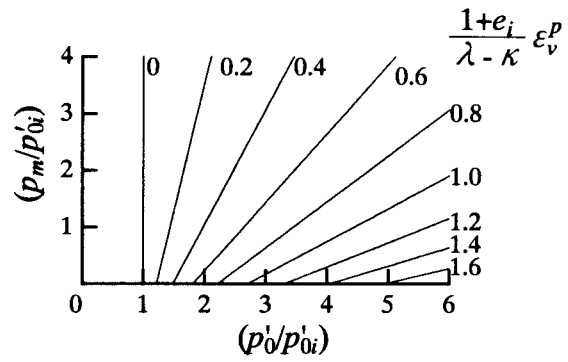


図-1.29 等方圧縮状態での
等塑性体積ひずみ線群

さらに、軽部¹⁷⁾はバルク水を含む不飽和土の構成モデルを提案した。バルク水の場合、サクシジョンの効果をも Terzaghi の有効応力における負の水圧と同等とみなせる。そこで、先述したメニスカス水による応力成分 $f(s)$ をメニスカス応力として p_m として表し、バルク水による応力の効果をバルク応力 p_b とした。このバルク応力は骨格を圧縮する有効応力の成分であり、不飽和土における有効応力として次式を与えた。

$$p' = p + p_b \quad (1.37)$$

ここで、 p は実質応力、 p' は有効応力である。不飽和土中にバルク水が存在する場合、式(1.28)～式(1.36)において骨格を圧縮する成分として表した実質応力を式(1.37)の有効応力として表す必要がある。式(1.28)は次式のような破壊応力条件式となる。

$$q'_f = M(p' + p_m) = M(p + p_b + p_m) = M(p + p_s) \quad (1.38)$$

$$p_s = p_b + p_m \quad (1.39)$$

ここで、 p_s はサクシジョン応力であり、軸圧縮試験より図-1.28 のように求められる。

次に、等方圧縮状態では、式(1.32)は次式のように表せる。

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \frac{dp'_0}{p'_0 + p_m} \quad (1.40)$$

同様に、 p_m 一定で積分すると、

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln \left(\frac{p'_0 + p_m}{p'_{0i} + p_m} \right) \quad (1.41a)$$

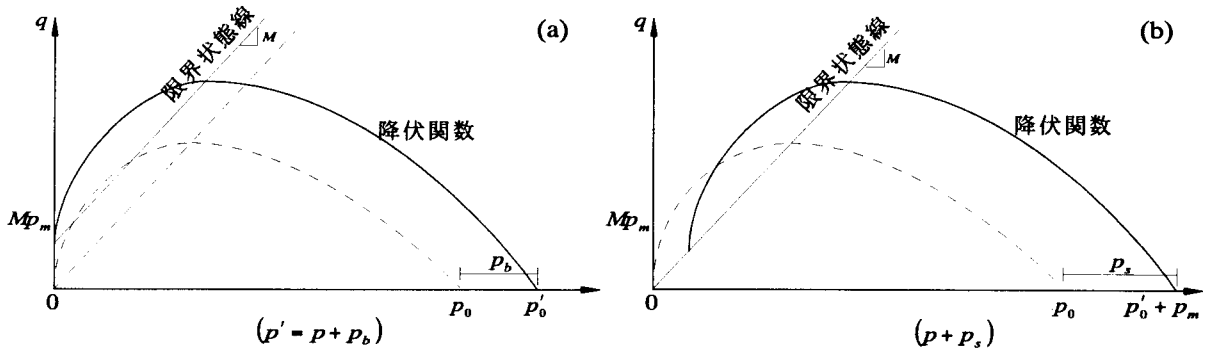


図-1.30 軸圧縮応力状態の降伏曲線

ここで、 p'_{0i} は $e = e_i$ のときの p'_0 である。図-1.29 は、式(1.41a)で p'_{0i} が p_m によらないとした場合の等塑性体積ひずみ群である。 p'_{0i} が p_m に依存する、つまり初期降伏線が $p'_{0i} = p'_{yi} + ap_m$ として表される場合、式(1.41a)は次式のように表される¹⁸⁾。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln \left(\frac{p'_0 + p_m}{p'_{yi} + (1+a)p_m} \right) \quad (1.41b)$$

図-1.29 面上でのサクシオン増加が、 p' を増加させるため、サクシオンが塑性体積ひずみを生じさせる、より一般的なモデルであるといえる。

さらに、軸圧縮応力状態において、式(1.35)のエネルギー式は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} p' \cdot d\varepsilon_v^p + q \cdot d\varepsilon_s &= M(p' + p_m) \cdot d\varepsilon_s \\ \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s} &= M \frac{p' + p_m}{p'} - \frac{q}{p'} \end{aligned} \quad (1.42)$$

ここで、 $p' = p'_0$ のとき $q = 0$ として積分すると

$$q = -p'M \ln \frac{p'}{p'_0} + Mp_m \left(1 - \frac{p'}{p'_0} \right) \quad (1.43)$$

の降伏線が得られる。図-1.30 は式(1.43)を (p', q) 面上で表したものである。図中 p_0 は実質応力である。本田ら¹⁹⁾ は、メナスカス応力によって粒子間すべりが抑制されるとの考えから、 $p' = p'_{sat}$ のとき $q = Mp_m$ を示すとして式(1.42)を積分した。 p'_{sat} は、飽和土における $q = 0$ のときの p' であり、図-1.31 で表される。これによって次式の降伏関数を得られる。

$$q = -Mp' \ln \frac{p'}{p'_{sat}} + Mp_m \quad (1.44)$$

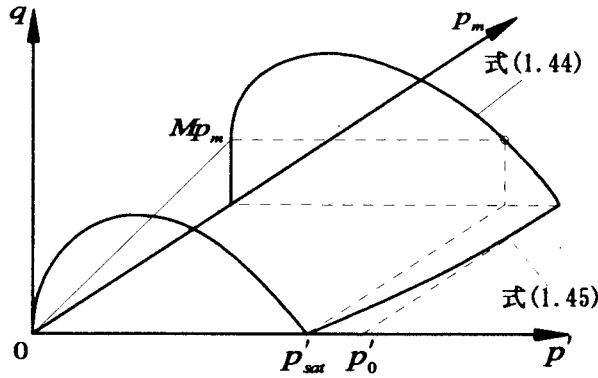


図-1.31 本田らの降伏関数

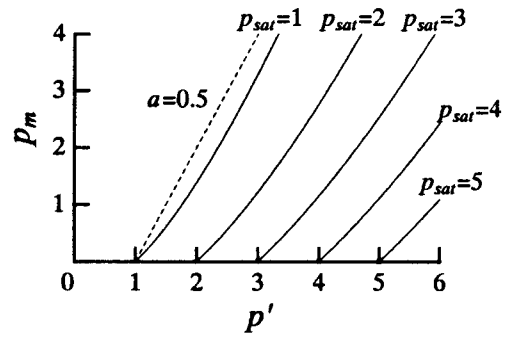


図-1.32 式(1.45)から得られる降伏線

式(1.44)に $q=0$ を代入すると,

$$p_m = p' \ln \frac{p'}{p_{sat}} \quad (1.45)$$

が得られ、 $p'-p_m$ 面上に図-1.32 のような降伏線を具現化することができる。これは式(1.42)において $a=0.5$ としたときの初期降伏線に近い傾きを持つが、降伏線がほぼ平行に拡大することから、Matyas and Radhakrisna⁹⁾ の試験結果とは一致しない。

軽部らは、塑性体積ひずみに対する状態曲線を算出するために、式(1.41a)と式(1.43)を p'_0 に関して連立させ、塑性体積ひずみを表そうとした。その際に、式(1.43)は p'_0 について展開することができないため、 $\log X$ などの展開式から状態曲面の近似式として次式を得た。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \left[\ln \frac{p' + p_m}{p'_{0i} + p_m} + \ln \frac{(p' + p_m)^2 + \frac{q}{2M}(p' - p_m)}{(p' + p_m)^2 - \frac{q}{2M}(p' + p_m)} \right] \quad (1.46)$$

上式において近似解を得ていることになるが、厳密解に対する近似度において実用範囲にあることが確かめられている。本田らの与えた式(1.44)は飽和状態に換算したときの体積ひずみとして、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln \frac{p_{sat}}{p'_{0i}} \quad (1.47)$$

を、与えていることになり、式(1.47)と式(1.44)を p_{sat} に関して解くことにより、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{0i}} \right) + \frac{q - Mp_m}{Mp'} \right] \quad (1.48)$$

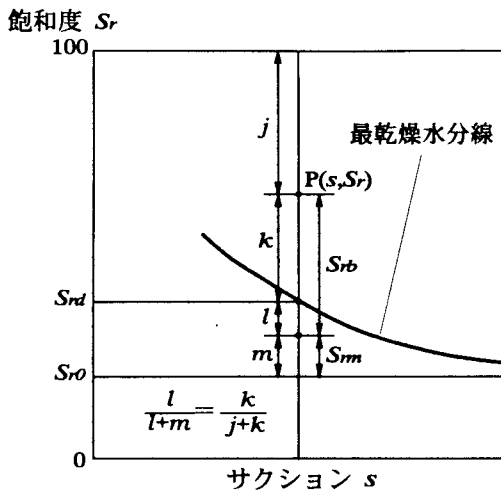


図-1.33 最乾燥水分線を用いた
間隙水分分布の算出法

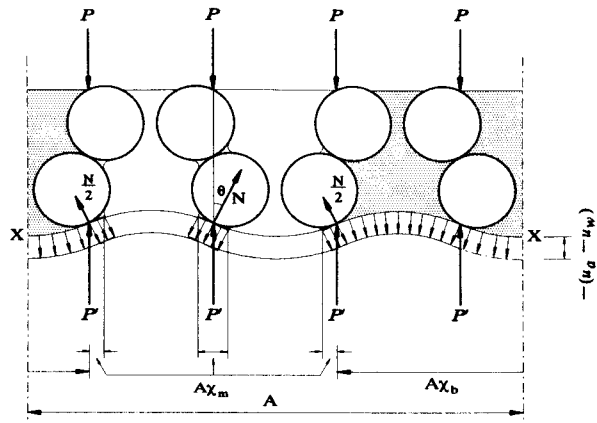


図-1.34 分応力の概念

が得られ、近似解を用いる必要がなく、数値計算を行う上で簡略化されたモデルであるといえる。

このように、間隙水の形態を考慮した構成モデルが構築されているが、式(1.31)において p_b, p_m をどのように算出するかという問題が生じる。軽部ら²⁰⁾は、最乾燥水分線を提案している。最乾燥水分線は供試体がバルク水を失った状態で描く最も乾燥側の水分線であり、限界飽和度からの吸水曲線に一致するとした。図-1.33は、最乾燥水分線を用いて間隙水分分布を算出する方法を表している。図中では、任意のサクションと飽和度を持った供試体の状態を点 P で表している。このとき飽和度は、

$$S_r = S_{r_0} + S_{r_b} + S_{r_m} \quad (1.49)$$

で表される。ここで、 S_{r_0} は吸着水相が占める飽和度であり、飽和度の下限値である。 S_{r_b}, S_{r_m} は、それぞれバルク水、メニスカス水が占める飽和度である。間隙水の構成割合は、最乾燥水分線上の飽和度 S_{r_d} からメニスカス水が飽和度の増加とともに徐々にバルク水に転じていき飽和状態になったときにメニスカス水成分が全てなくなるという仮定のもとに成り立っており、図中の式で表されることになる。これより、次式が得られる。

$$S_{r_b} = \frac{(100 - S_{r_0})(S_r - S_{r_d})}{100 - S_{r_d}} \quad (1.50)$$

$$S_{r_m} = \frac{(100 - S_r)(S_{r_d} - S_{r_0})}{100 - S_{r_d}} \quad (1.51)$$

ここで、図-1.34の一次元圧縮モデルより、サクションの作用面積の割合が式(1.50)、(1.51)に従うとして、次式を得た。

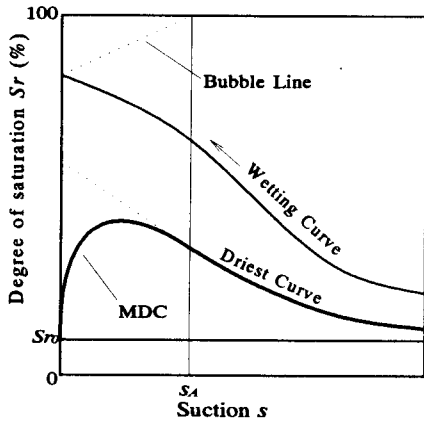


図-1.35 修正最乾燥水分線

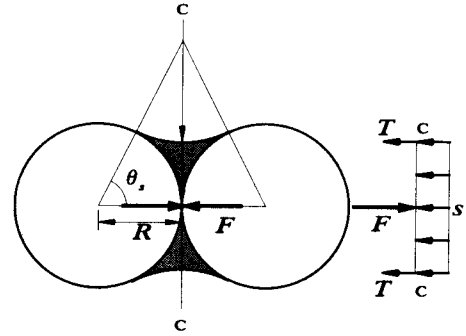


図-1.36 2球粒子モデルの粒子間圧縮力

$$p_b = \frac{S_{rb}}{100 - S_{r0}} s = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} s \quad (1.52)$$

$$p_m = \frac{S_{rm}}{100 - S_{r0}} s = \frac{(100 - S_r)(S_{rd} - S_{r0})}{(100 - S_{r0})(100 - S_{rd})} s \quad (1.53)$$

$$p_s = p_b + p_m = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} s \quad (1.54)$$

当初、最乾燥水分線は最も乾燥側の吸水曲線と定義されていたが、軽部ら²¹⁾は図-1.35に示す修正最乾燥水分線を提案している。吸水過程においてサクションが小さくなってくると隣り合うメニスカスの合同により空気が封入され、サクションがゼロになっても飽和状態には至らない。このとき、土中に存在する空気は全て封入空気となり、メニスカス応力がゼロになるという仮定に基づいている。修正最乾燥水分線は Brooks and Corey 式(第2章に詳述)を用いて次式で与えられる。

$$s \geq s_A \quad S_e = \frac{S_{rd} - S_{r0}}{100 - S_{r0}} = \left(\frac{s_w}{s} \right)^\alpha \quad (1.55)$$

$$s \leq s_A \quad S_e = \left(\frac{s_w}{s_A} \right)^\alpha \left\{ -(\lambda + 1) \left(\frac{s}{s_A} \right)^2 + (\lambda + 2) \left(\frac{s}{s_A} \right) \right\} \quad (1.56)$$

ここで、 s_A は脱水曲線で現れる空気侵入値、 s_w は吸水曲線で現れる水侵入値、 α は吸水曲線の曲率を表すパラメーターである。これに対して、本田ら²²⁾は、2球粒子の粒子間力モデル(図-1.36)より軽部²³⁾が与えた次式

$$\frac{F}{\pi R^2} = \frac{T}{R} \left\{ 2 + \frac{3T}{2Rs} - \sqrt{\left(\frac{3T}{2Rs} \right)^2 + \frac{2T}{Rs}} \right\} \quad (1.57)$$

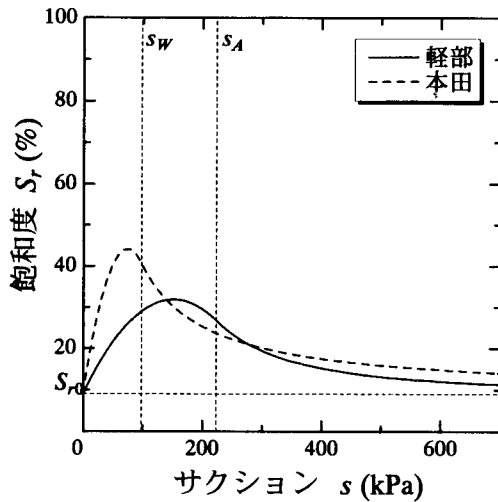


図-1.37 軽部・本田の最乾燥水分線の比較

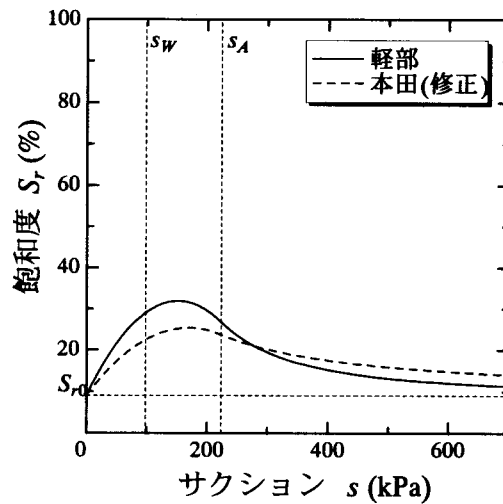


図-1.38 本田の最乾燥水分線の修正

をもとに最乾燥水分線を提案している。ここで、 R は粒子半径、 T は水の表面張力、 F は粒子間圧縮力である。この式(1.57)と式(1.53)において $S_r = S_{rd}$ としたときの p_m が等価であるとして、次式を導いた。

$$S_{rd} = \frac{100 - S_{r0}}{s} \frac{T}{R} \left\{ 2 + \frac{3T}{2Rs} - \sqrt{\left(\frac{3T}{2Rs} \right)^2 + \frac{2T}{Rs}} \right\} + S_{r0} \quad (1.58)$$

そして、軽部らの修正最乾燥水分線と同様に低サクシヨン域での挙動を表すために水侵入値以下の最乾燥水分線を次式のように二次放物線で与えた。

$$S_{rd} = (As^2 + Bs)(100 - S_{r0}) + S_{r0} \quad (1.59)$$

$$\text{ここに } A = \left(\frac{1}{s_w} \right)^4 \left(\frac{T}{R} \right)^2 \left\{ -3 \left(k - \sqrt{k} - \frac{3}{4} \right) + 2s_w \frac{R}{T} \left[1 - \frac{1}{2\sqrt{k}} \right] \right\} \quad (1.60)$$

$$B = \left(\frac{1}{s_w} \right)^3 \left(\frac{T}{R} \right)^2 \left\{ 4 \left(k - \sqrt{k} - \frac{3}{4} \right) - 2s_w \frac{R}{T} \left[1 - \frac{1}{2\sqrt{k}} \right] \right\} \quad (1.61)$$

$$k = 2s_w \frac{R}{T} + \frac{9}{4} \quad (1.62)$$

ここで、 s_w は吸水曲線が示す水侵入値である。軽部らが空気侵入値以下の領域を二次放物線補完したのに対して、本田らは水侵入値以下で補完を行っている。式(1.60)～(1.62)の水侵入値のところに空気侵入値を代入すれば、空気侵入値以下での最乾燥水分線が得られる。図-1.37、図-1.38は、本田らの最乾燥水分線と軽部らの最乾燥水分線を比較したものである。本田らの最乾燥水分線について、図-1.37では水侵入値以下の領域で、図-1.38では空気侵入値以下の領域で

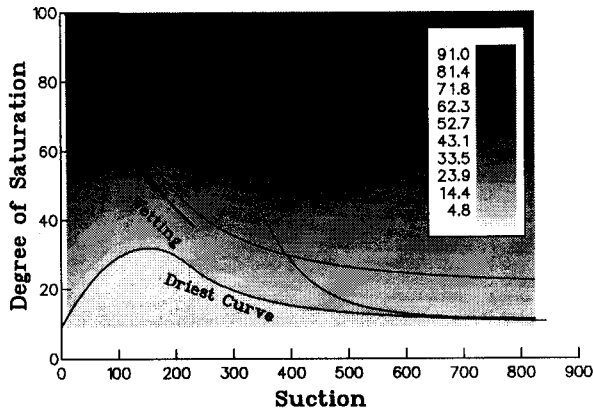


図-1.39 軽部らの式から得られる S_b 分布

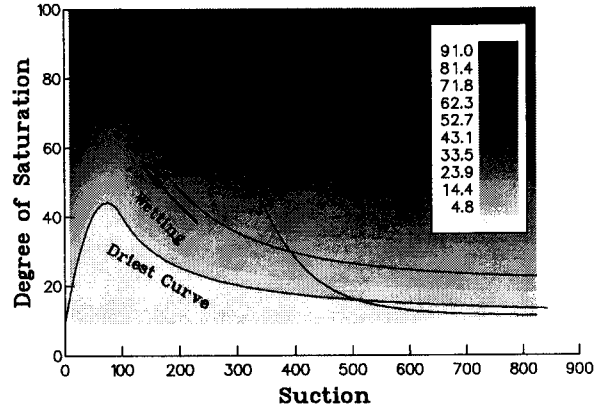


図-1.40 本田らの式から得られる S_b 分布

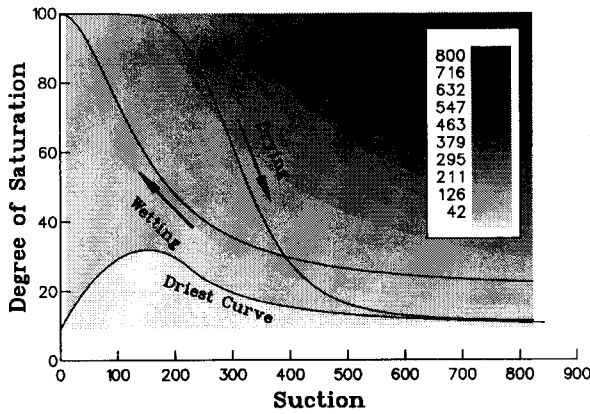


図-1.41 軽部らの式から得られる p_b 分布

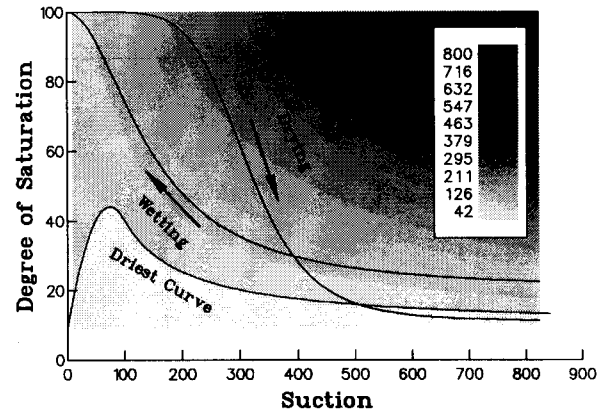


図-1.42 本田らの式から得られる p_b 分布

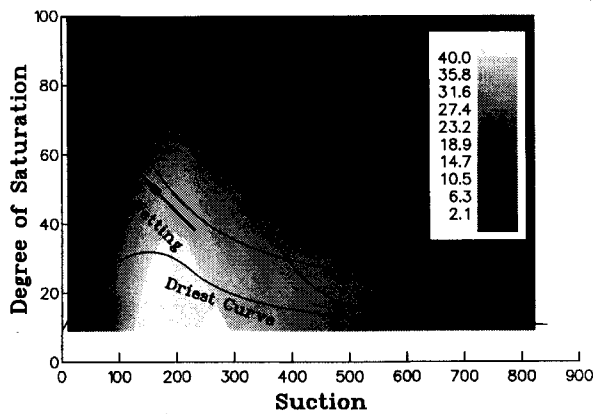


図-1.43 軽部らの式から得られる p_m 分布

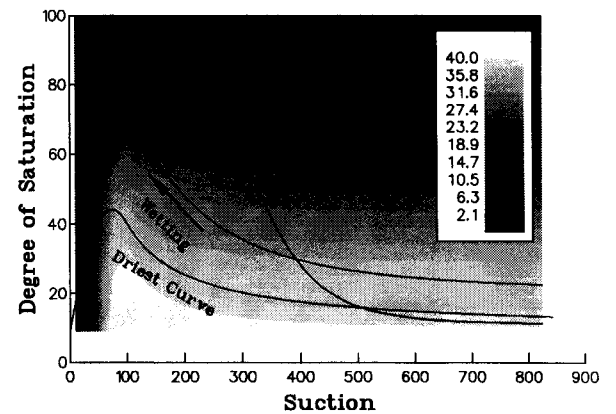
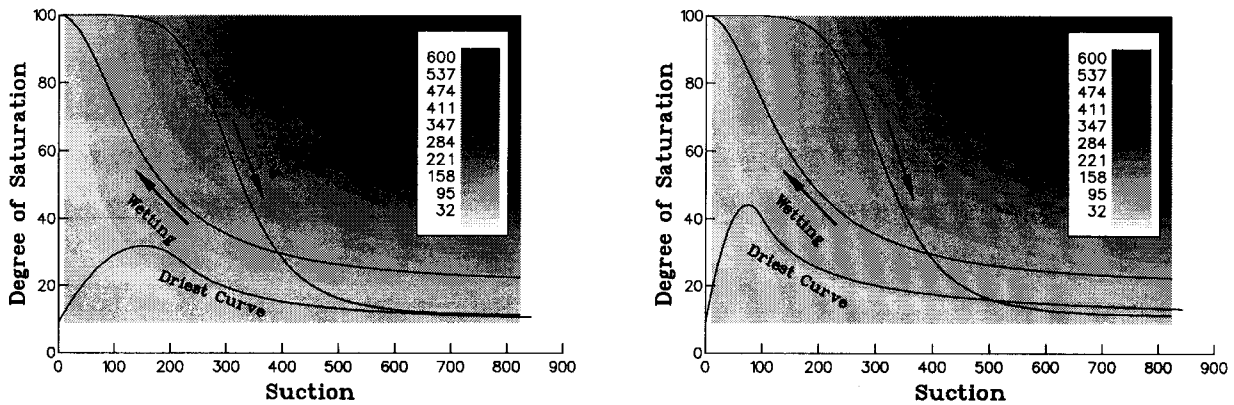


図-1.44 本田らの式から得られる p_m 分布



(a) 軽部らの式との比較

(b) 本田らの式との比較

図-1.45 サクション応力 p_s 分布

二次放物線補完したものである。軽部らの最乾燥水分線は実際の吸水曲線に基づいているため、吸水曲線が最乾燥水分線より必ず高くなるように設定されているが、図に見られるとおり本田らの最乾燥水分線では高サクション域で、実際の吸水曲線よりも最乾燥水分線が高くなる可能性がある。しかしながら、試料物性より最乾燥水分線を演繹的に求められるという利点を有する。

図-1.39 と図-1.40 は、それぞれのモデルを用いてサクション～飽和度面でのバルク水の飽和度 S_b の分布を表したものである。濃度が高い部分ほど S_b が大きいことを示している。 S_b の分布は最乾燥水分線の形状に大きく依存するが、最乾燥水分線の凸な領域のサクション値以外では、サクション方向への変化はあまり見られない。実際にこの分布に従って、バルク応力 p_b を算出したのが図-1.41、図-1.42 である。式(1.52)で計算した値は、サクション、飽和度とも低い図中の左下方部分で、バルク応力分布が歪んでいるのが分かる。また、メニスカス応力 p_m の分布は、この歪みの影響もあるため最乾燥水分線のピーク以下の領域とピーク以上の領域で急激に値が変化しているのが分かる。図中には、実際の試験データに Van Genuchten 式(次章で詳述)でフィッティングを行った外挿線を描いている。脱水過程では低サクション域で土骨格の圧縮に寄与する p_b が増加していき、サクション増加とともに飽和度が低くなると p_b が徐々に減少していくことを示している。その際、土骨格の剛性を高める p_m は単調増加を示しているのが分かる。次に、吸水過程では p_b の等値線と平行に水分特性曲線が推移し、 p_b の変化はほとんどないが、 p_m は最乾燥水分線のピーク点以下で大きく変化することになる。このときの p_b と p_m の変化の割合によって、コラプスを生じるかどうか決定されることになる。

図-1.45 は、サクション応力 p_s の分布を表している。 p_s は最乾燥水分線に依存しない値である。軽部らの最乾燥水分線式は p_s の等値線と交差しており、本田らの最乾燥水分線は p_s の等値線と平行になっている。 p_s は式(1.54)に示すとおり、 p_b と p_m の和となっており最乾燥水分線によって p_b と p_m に分配される。 p_b については、図-1.41、図-1.42 を比較する限り、最乾燥水分

線への依存性は小さい。その結果、最乾燥水分線は、図-1.43、図-1.44に見られるとおり p_m の分布に大きく影響を及ぼすことになる。

このように最乾燥水分線の与え方によって、不飽和土の応力成分が繊細に変化することになり、従来のように最乾燥水分線を定義した後で不飽和土の挙動を解析するのではなく、最乾燥水分線そのものの定量的な表現を明確にすることが必要となる。そのためには、水分特性曲線を定量化した上で、現象を表現し得る最乾燥水分線を逆算しなければならない。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. : The shearing resistance of saturated soils, *Proc. 1st ICSMFE*, Vol.1, pp.54-56, 1936.
- 2) Terzaghi, K. : Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen spannungerscheinungen, *Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Part II a*, Vol.132, pp.125-138, 1923.
- 3) 岡二三生 : 土における有効応力の原理, *土と基礎*, Vol.36, No.6, pp.11-17, 1988.
- 4) Bishop, A. W. : The principal of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
- 5) Bishop, A. W. and I. B. Donald : The experimental study of effective stress in partly saturated soil in the triaxial apparatus, *Proc. 5th ICSMFE*, Vol.1, pp.13-21, 1961.
- 6) Skempton, A. W. : Effective stress in soils, concrete and rocks, *Proc. Conf. Pore Pressure and Suction*, pp.4-16, 1960.
- 7) Bishop, A. W. and G. E. Blight : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.13, No.3, pp.177-197, 1963.
- 8) Jennings, J. E. and J. B. Burland : Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 9) Matyas, E. L. and H. S. Radhakrishna : Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.
- 10) Coleman, J. D. : Stress-strain relations for partly saturated soil, *Correspondence to Geotechnique*, Vol.12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 11) Alonso, E. E., A. Gens and D. W. Hight : Special problem soils. General Report., *Proc. 9th European RC-SMFE*, pp.1087-1146, 1987.
- 12) Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa : A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 13) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 14) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 15) Hashiguchi, K. : Constitutive equations of elastoplastic materials with elastic-plastic transition, *Journal of Applied Mechanics (ASME)*, Vol.47, pp.266-272, 1980.
- 16) 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹羽尚人 : 不飽和度の三軸圧縮状態における降伏関数, *土木学会論文集*, No.406/III-11, pp.205-211, 1989.
- 17) 軽部大蔵 : ビショップの有効応力を含む不飽和土の応力・ひずみ式, 「土質工学会 三軸試験方法に関するシンポジウム」発表論文集, pp.137-144, 1991.
- 18) 加藤正司, 軽部大蔵, 本田道識, 藤原照幸 : 不飽和土の圧縮特性に及ぼす間隙水分分布の影響に関する研究, *土木学会論文集*, No.554/III-37, pp.57-69, 1996.
- 19) 本田道識, 飯塚敦, 河井克之, 軽部大蔵 : 不飽和土の応力～ひずみ関係式, *土木学会論文集*,

No.659/Ⅲ-52, pp.153-164, 2000.

- 20) 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.
- 21) Karube, D., S, Kato, M, Honda and K, Kawai : A constitutive model for unsaturated soil evaluating effects of soil moisture distribution, *Proc. 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, pp.485-490, 1998.
- 22) 本田道識, 軽部大蔵, 加藤正司, 芦田渉 : 不飽和土の挙動に及ぼすサクション応力の影響, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, No.16-B, pp.35-43, 1998.
- 23) 軽部大蔵 : 不飽和土の応力・ひずみ関係概説, 不飽和土の工学的性質, 土質工学会関西支部, pp.1-17, 1989.

第2章 水分特性曲線の定量化に関する研究

不飽和土の研究は大きく2つに分けることができる。ひとつは第1章で述べたように、強度特性も含めた応力-ひずみ関係を明らかにし構成式の確立を目指したもの。もうひとつは降雨や地下水位の変動などによる浸潤特性を明らかにする、不飽和浸透問題の解明である。これまでの研究では、前者はサクシオンおよび間隙水状態が定常状態での力学的安定問題を扱い、後者は体積変化が無視できる状態での不飽和土の透水係数を扱ってきた。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にも拘らず、それぞれ個別に研究され、独自の発展を遂げてきた。この2つの表現方法(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。本章では、同一試料での水分特性曲線のヒステリシスに眼目をおき、その曲線形状に及ぼす要因の検討を行うと共に、新しい水分特性曲線モデルを提案する。

2.1 概説

大気に開放された不飽和土中の間隙水は、一般的に負の水圧を有している。この土中水の圧力から負号を取り除いたものがサクシオンである。実際の土中水が有しているサクシオンは図-2.1のように表される。このサクシオンは、土粒子と純水との相互作用の結果生じるサクシオンと、溶液自身が

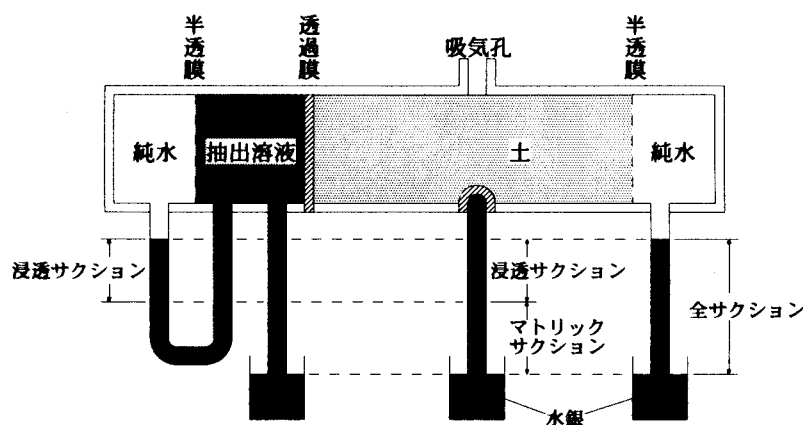


図-2.1 サクシオン成分の加法性を表す概念図¹⁾

持っている浸透圧とに分けられる。前者をマトリックサクシオン、後者を浸透サクシオンと呼ぶ。本論文で、扱っているのはこのマトリックサクシオンであり、以降単にサクシオンと呼ぶ。

水分特性曲線は、土の保水能力をサクシオンと間隙水状態で表した曲線であるが、試料によって異なる曲線となる。図-2.2 では、同一試料における脱水・吸水曲線を表している。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)にサクシオンを作用させると、土中の水膜によって空気の進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、あるサクシオン値まで達すると(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オンに対して、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、このときのサクシオン値を、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、土粒子接点のメニスカス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本論文では限界飽和度と呼ぶ。脱水曲線のある一点(C点)からサクシオンを減じていくと、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、サクシオ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。この点でのサクシオン値は、脱水曲線との相関から便

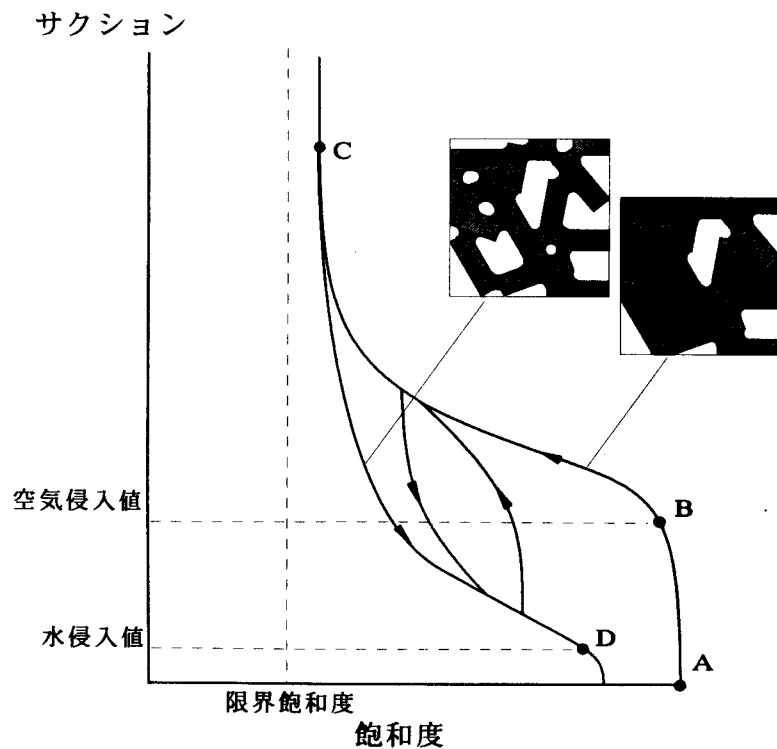


図-2.2 水分特性曲線

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 Larson²⁾, Bouwer³⁾)²⁾が、物理的に説明することはできない。

また、水分特性曲線は土質によって大きく異なる。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(図-2.3)。田中ら⁴⁾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(図-2.4)。図-2.5は、土の構造による典型的な影響を示している。この違いは、低サクシオン域で顕著であり、高サクシオン域では見られない。つまり、構造の発達の有無に拘わらず、高サクシオン域で示される土粒子

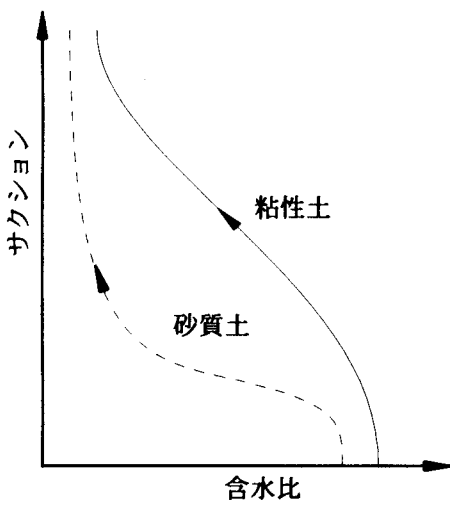


図-2.3 水分特性曲線への粒度の効果

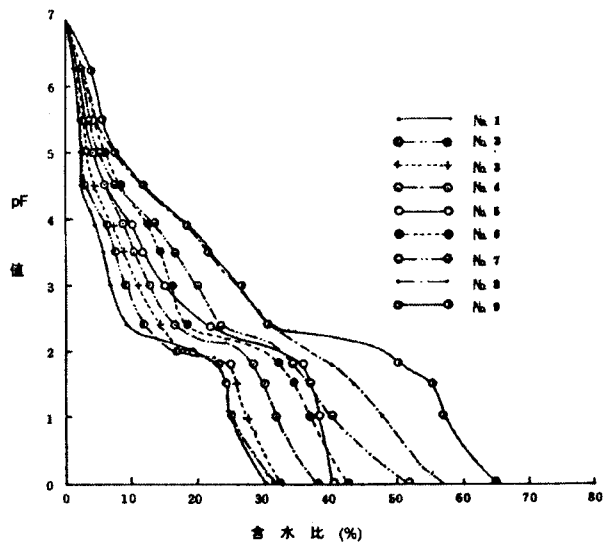


図-2.4 田中らの研究

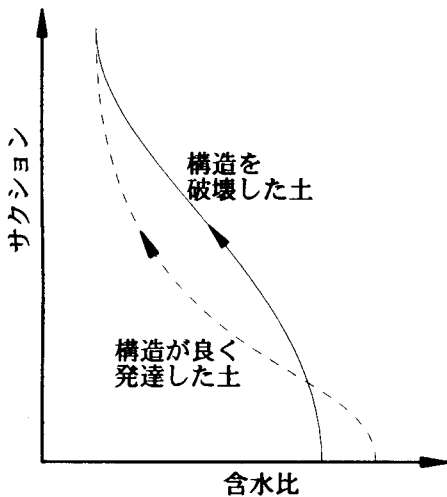


図-2.5 水分特性曲線への土構造の効果

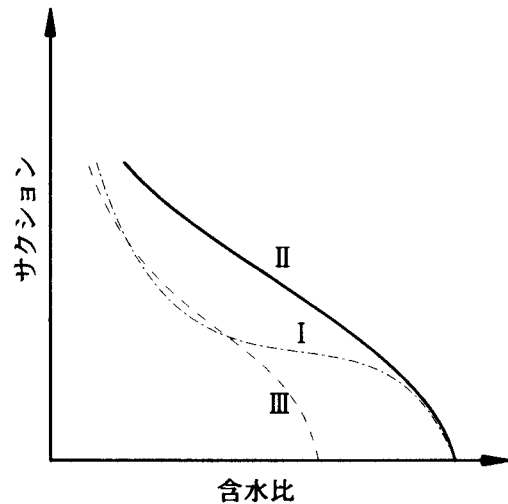


図-2.6 代表的な関東ロームの水分特性曲線

の表面保水量には影響が出ないことを示している。図-2.6 は、特有の土中水の保持形態を持つ関東ロームの水分特性曲線の実測例である(竹中ら⁶⁾)。Iは構造が良く発達した土であり、IIIは構造が未発達な土である。IIは、構造は良く発達しているが、Iよりも土中の自由間隙水量が少なく、間隙水が土粒子表面の非自由水として保持されていることを示している。関東ロームは練り返しによって、構造の変化があるだけでなく表面保水量も変化すること(図-2.7 飯竹⁶⁾)から得られた結果である。図-2.8 も構造の発達による水分特性曲線の違いを表しているが、無構造の土と自然界に存在する団粒構造の発達した土とで、低サクシオン域で違いが見られることを表した結果である(Croney and Coleman⁷⁾)。

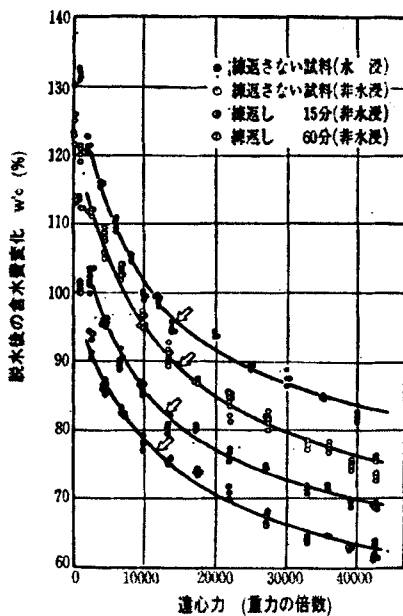


図-2.7 飯竹の研究

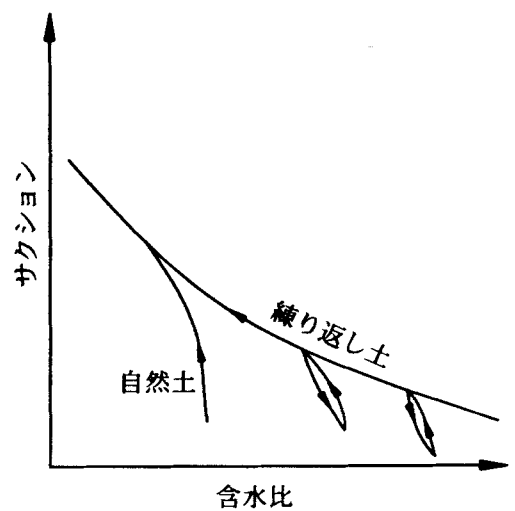


図-2.8 Croney and Coleman の研究

2.2 水分特性曲線に関する既往の研究

実地盤のサクシオンを計測することは難しく、サクシオンを計測する代わりに別に試験から得られた水分特性曲線を用いて、実地盤の含水率に見合うサクシオンを推定する。元来、この目的のために水分特性曲線の研究が始められた。水分特性曲線を得る方法は、2つに大別される。ひとつは、土槽実験による方法、もうひとつは加圧法もしくは吸引法により供試体に直接サクシオンを与える方法である。土槽実験は、土槽内の水位を上下させ、サクシオンを次式で与える。

$$s = \gamma_w \cdot h \quad (2.1)$$

ここで、 s はサクシオン、 γ_w は水の単位体積重量、 h は水位面からの高さである。図-2.9は、その模式図である。飽和状態にある土槽内の水位を低下させていくと、水位面から高い所ほど、

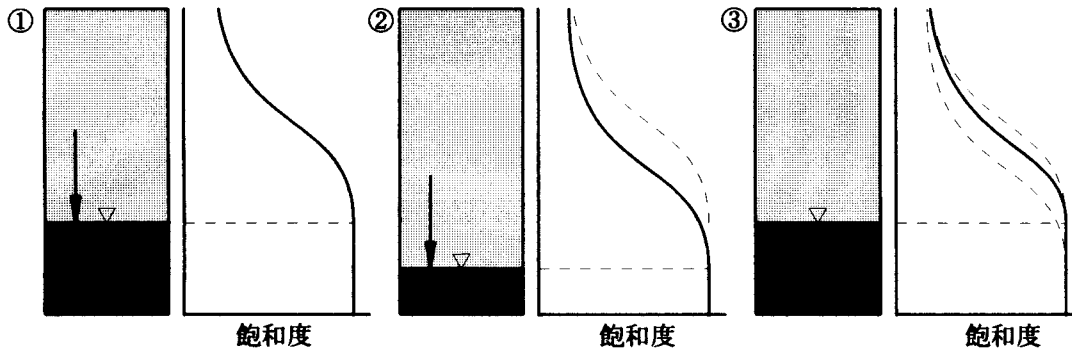


図-2.9 土槽実験の模式図

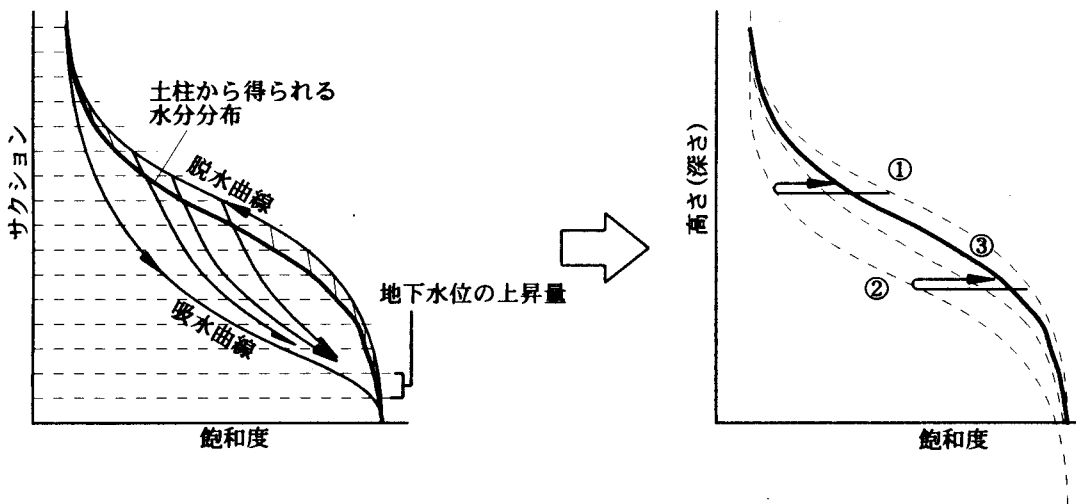


図-2.10 土槽実験から得られる水分特性曲線の評価

(2.1)で与えられるサクシヨンが高くなり、飽和度が低くなる(図中①)。つまり、このときの飽和度の深度分布を求めれば、そのまま飽和状態からの脱水曲線が得られる。この方法では、比較的低いサクシヨン域の測定が出来るだけでなく、実地盤の乾燥・浸潤減少に適合している。また、最大の利点は、得られるデータが連続的なサクシヨン～飽和度関係となることである。水位面を低くすることで、より高いサクシヨン域の飽和度を知ることが出来る(図中②)。しかし、水位面が上昇する場合、得られる飽和度の深度分布は吸水曲線を表すわけではない。図-2.10に示すとおり、土槽内のそれぞれの深さにより先行サクシヨンが異なる、いわば脱水曲線上の異なるサクシヨン値からのサクシヨン除荷であるため、ヒステリシスを考慮すると得られた飽和度の深度分布は、水位面が変化したときの等時曲線のようになる。吸水曲線を求めるためには、土槽内の一要素のサクシヨン～飽和度変化を追う以外ない。加圧法や吸引法のようにサクシヨンを変化させる方法では、離散的なデータしか得られない。水分特性曲線で最も重要なのは、飽和・不飽和の境界となるサクシヨン、空気侵入値および水侵入値であり、離散的なデータから正確に推測するには、可能な限りサクシヨンの載荷・除荷段階を多く設けなければならない。水分特性曲線の研究の第一段階は、離散的に得られた試験データを連続式で表すために、経験式を確立することであった。そして、第二段階として経験式中のパラメーターに及ぼす土の指數的性質の影響を検討している。本章の目的としている、同一試料でのヒステリシスに関する研究は少ないがいくつかモデルも提案されている。本節では、これらの水分特性曲線の既往の研究について説明および考察を加える。

(1) 水分特性曲線の経験式

水分特性曲線を表現する経験式は多く提案されている。後述するように、水分特性曲線は不飽和土の透水係数を求めるために用いられることが多く、その際に逆数が積分可能であることが望まれる。ここでは、古くより不飽和浸透問題において用いられてきた代表的な経験式 Brooks and Corey 式および Van Genuchten 式について説明し考察を加える。また、パラメーター設定が簡単であり、今後力学現象を表現するのに有益であると考え、ロジスティック曲線式を挙げる。水分特性曲線は、 $s = 0$ から $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度までの有限な範囲を表すために次のような有効飽和度として定式化されることが多い。

$$S_e = \frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} \quad (2.2)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 S_r は飽和度、 S_{rf} は $s = 0$ のときの飽和度、 S_{ra} は $s \rightarrow \infty$ での飽和度である。

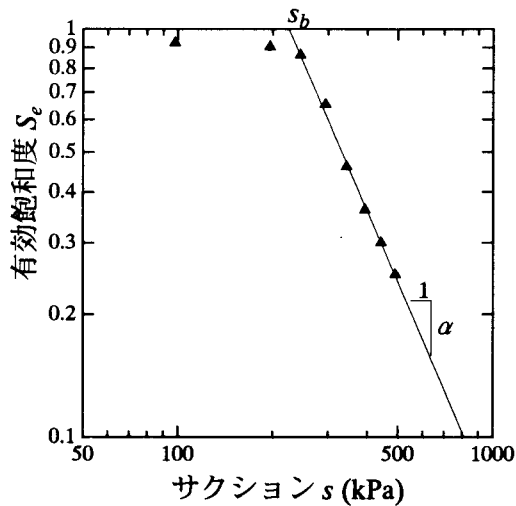


図-2.11 パラメータ推定法

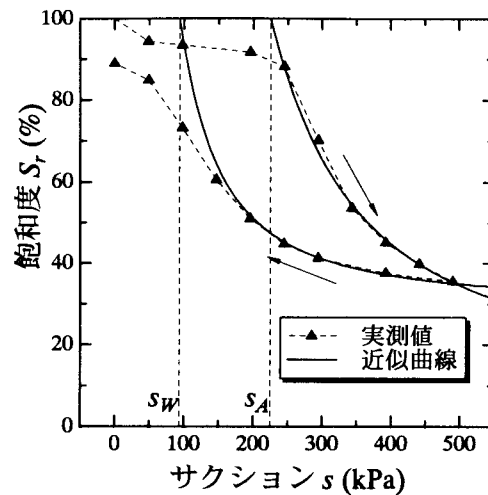


図-2.12 Brooks and Corey 式による近似例

(a) Brooks and Corey 式⁸⁾

Brooks and Corey 式は次式で表される。

$$S_e = \left(\frac{s_b}{s}\right)^\alpha \quad (s \leq s_b) \quad (2.3)$$

$$S_e = 1 \quad (s < s_b)$$

ここで、 s_b, α は形状パラメーターである。 s_b は有効飽和度が 1 のときのサクション値を表しており、脱水曲線では空気侵入値 s_A 、吸水曲線では水侵入値 s_w に相当する。 α は曲線の曲率を表す。ここで、未知のパラメーターは、 S_r, S_n, s_b, α であるが、一般的に $S_r = 100$ としてパラメーター推定を行う場合が多く、3つのパラメーターを決定すればよい。パラメーター推定には次の方法が利用できる。まず、式(2.3)は次のように変形できる。

$$\log S_e = \lambda(\log s_b - \log s) \quad (2.4)$$

式(2.4)は、 S_n を種々仮定し、両対数紙上で供試体の S_e と s に関して線形近似し、相関係数が最も高くなる S_n を求めれば、 $S_e = 1$ の切片が s_b 、直線勾配が α となることを表している(図-2.11)。得られたパラメーターによる近似例を図-2.12 に示す。図中の s_A, s_w で示されるサクションの値はそれぞれ空気侵入値、水侵入値を表している。この式は、形が簡単でパラメーターが少なくかつ両対数紙上で線形近似できるため、客観的なフィッティングパラメーターを得ることができる。また、得られたパラメーターが物理的意味を持つという利点がある。しかし、べき関数の形になっているため、S字型を示す水分特性曲線の低サクション域を表現する事ができない。

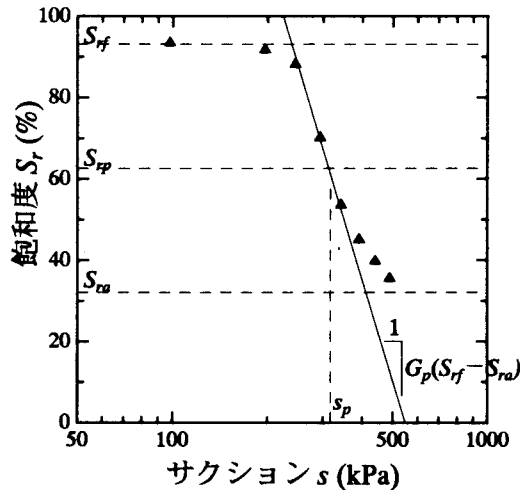


図-2.13 パラメータ推定法

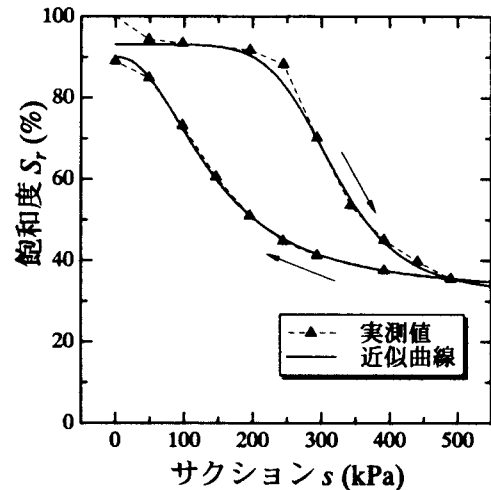


図-2.14 Van Genuchten 式による近似例

(b) Van Genuchten 式⁹⁾

水分特性曲線の S 字型を表現でき、透水係数算定の際に逆数が積分可能であるということで最もよく用いられているのが次式で表される Van Genuchten 式である。

$$S_e = 1 / [1 + (\alpha s)^n]^m \quad (2.5)$$

ここで、 α, n, m は形状パラメーターである。未知のパラメーターは、 $S_{rf}, S_{ra}, \alpha, n, m$ であり、パラメーター数が多いためフィッティングが困難であり、次式を用いる場合が多い。

$$m = 1 - 1/n$$

Brooks and Corey 式(式(2.3))では、低サクション域での飽和度変化に依存しない式の形になっているので、 $S_{rf} = 100$ とおいてフィッティングを行ったが、Van Genuchten 式では水分特性曲線の全領域にわたってフィッティングを行うため S_{rf}, S_{ra} の厳密なパラメーター設定が必要となる。そのため 4 つの未知のパラメーターを試行錯誤的に求めなければならない。図-2.13 は、Van Genuchten 式に対する経験的なパラメーター推定法を示す。まず、実験より得られた水分特性曲線を片対数紙上に描き、飽和度の上限値および下限値、つまり S_{rf}, S_{ra} を仮定する。そして、その中点となる $S_{sp} = (S_{rf} + S_{ra})/2$ となる水分特性曲線状の点における接線勾配を次式で与える。

$$G_p = \frac{1}{S_{rf} - S_{ra}} \left| \frac{dS_r}{d(\log s)} \right| \quad (2.6)$$

この G_p とパラメーター n の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 n &= 1.733G_p + 0.37 & (n > 4) \\
 G_p &= 1.15(n-1) \left\{ 1 - 2^{\frac{1}{1-n}} \right\} & (n \leq 4)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

また、パラメーター α は、 S_p におけるサクシオン s_p より次式で求められる。

$$\alpha = \frac{1}{s_p} \left(2^{\frac{1}{n}} - 1 \right)^{1-n}
 \tag{2.8}$$

図-2.14に Van Genuchten 式による近似例を示す。しかし、この方法では客観的なパラメーター推定が不可能であり、得られたパラメーターが最適である保証がない。そのため、 α, n の初期推定値を用いた非線形最小二乗法や遺伝的アルゴリズムを用いた多変量解析(竹下^{10),11)}など、特殊な解法が必要となる。また、得られたパラメーターに物理的な意味を求めることができず、それぞれのパラメーターを独立に評価することが難しい。

(c) ロジスティック曲線式

杉井ら¹²⁾は、Van Genuchten 式のパラメーター設定の難しさから、Brooks and Corey 式(式(2.3))の様に線形近似が可能でS字型の曲線を表現し得るモデルとして、次式で表されるロジスティック曲線式を提案している。

$$S_e = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e s)}
 \tag{2.9}$$

ここで、 A, B はフィッティングパラメーターである。式(2.9)は次式のように変形できる。

$$\log_e \left(\frac{1}{S_e} - 1 \right) = A + B \log_e s
 \tag{2.10}$$

上式は、 S_r, S_{rs} を種々仮定し、両対数紙上で $(1/S_e - 1)$ と s の線形近似を行えば、図-2.15の様にパラメーターを決定できることを表している。図-2.16は、ロジスティック曲線式の近似例であるが、Van Genuchten 式と同等の近似が可能であり、線形近似できるところに利点がある。また、サクシオンでこの曲線式を微分した場合、次式のように展開でき、

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial S_r}{\partial s} &= -\frac{S_r - S_{rs}}{1 + \exp(A) s^B} B \exp(A) s^{B-1} \\
 \frac{\partial^2 S_r}{\partial s^2} &= \frac{2(S_r - S_{rs})}{(1 + \exp(A) s^B)^2} (B \exp(A) s^{B-1})^2 - \frac{S_r - S_{rs}}{1 + \exp(A) s^B} B(B-1) \exp(A) s^{B-2}
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\frac{\partial^2 S_r}{\partial s^2} = 0 \text{ のとき} \quad s = \left(\frac{B-1}{B+1} \frac{1}{e^A} \right)^{\frac{1}{B}}$$

が成り立ち、フィッティングされた曲線の変曲点をパラメーター A, B で表すことができ、水分特性曲線の空気侵入値または水侵入値と関連付けることができる。図-2.17 は、パラメーター S_{r_f}, S_{r_a} の水分特性曲線の形状に与える影響を示している。第5章で述べるが、この2つのパラメーターを変化させることで水分特性曲線の走査曲線を表現することができる。図-2.18 は、パラメーター A, B のそれぞれ片方だけを変化させた場合の影響を示している。図からも分かるように、 S_{r_f}, S_{r_a} が一定であれば、 A, B 一方を変化させてほぼ同じ曲線を得られることが分かる。どちらも変曲点(空気侵入値または水侵入値に相当)を変化させるが、その効果は独立のものであり、

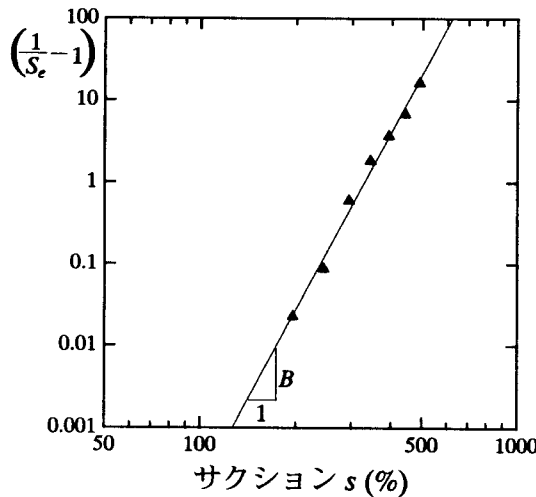


図-2.15 パラメータ推定法

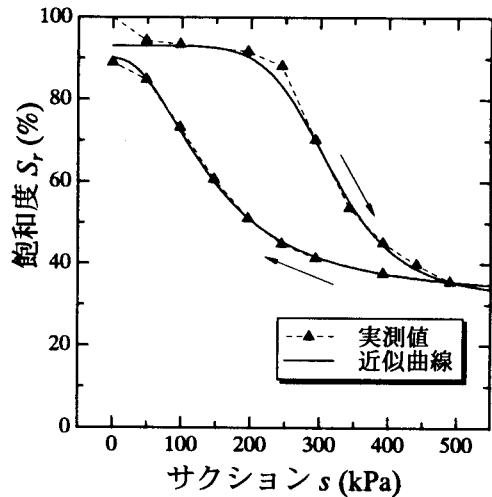


図-2.16 ロジスティック曲線式による近似例

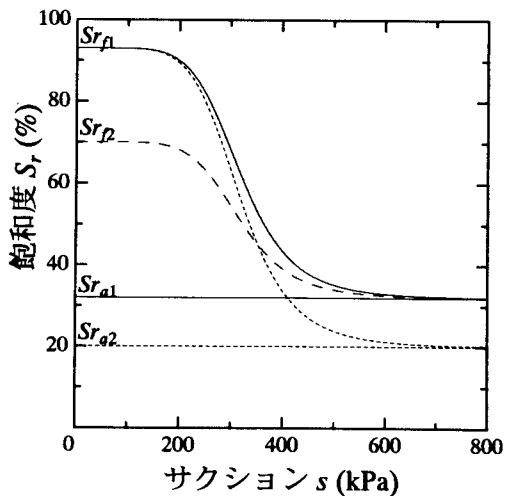


図-2.17 S_{r_f}, S_{r_a} の効果

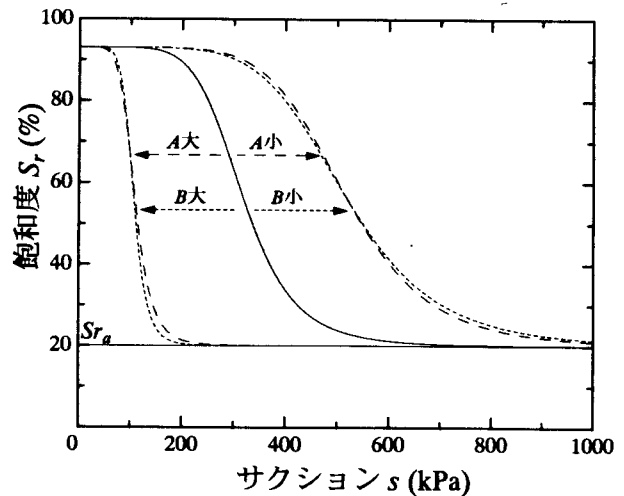


図-2.18 A, B の影響

例え一方のパラメーターを定値として扱っても問題がないといえる。ただし、元来 Van Genuchten 式に相当する水分特性曲線式として提案されたため、透水係数算定の際に式(2.5)との関連から、パラメーター m を数値計算で求める必要がある。

(2) 土の物理化学的性質と水分特性曲線の定量化

前節で述べたように、粒度分布や塑性指数などの土の指数的性質によって、水分特性曲線の形状は大きく異なる。これらの影響を考慮した水分特性曲線モデルがいくつか提案されている。

Gupta and Lason¹³⁾は、浚渫土と現場の土の配合を調整した数種の供試体の水分特性曲線を求め(図-2.19)、次式を用いて回帰分析を行った。

$$\theta_p = a \times R_{sand} + b \times R_{silt} + c \times R_{clay} + d \times R_{org} + e \times \rho_i \quad (2.11)$$

ここで、 θ_p は予想される体積含水率、 $R_{sand}, R_{silt}, R_{clay}, R_{org}$ はそれぞれ砂、シルト、粘土、有機物含有率、 ρ_i は湿潤密度である。 a, b, c, d, e は、サクシオンによって変化する定数であり、回帰分析によって求める。しかし、このようにして求められた a, b, c, d, e の別の土質への適用性については明らかではない。

Ghosh¹⁴⁾は、Brooks and Corey 式と同型の次式を用いて水分特性曲線を表した。

$$\psi = \psi_c \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{-\beta} \quad (2.12)$$

ここで、 ψ はサクシオン、 θ は体積含水率であり、 ψ_c, θ_0, β はフィッティングパラメーター。そして、砂、シルト、砂の割合がそれぞれのパラメーターに及ぼす影響を検討したが、パラメーターの物理的意味については考察していない。

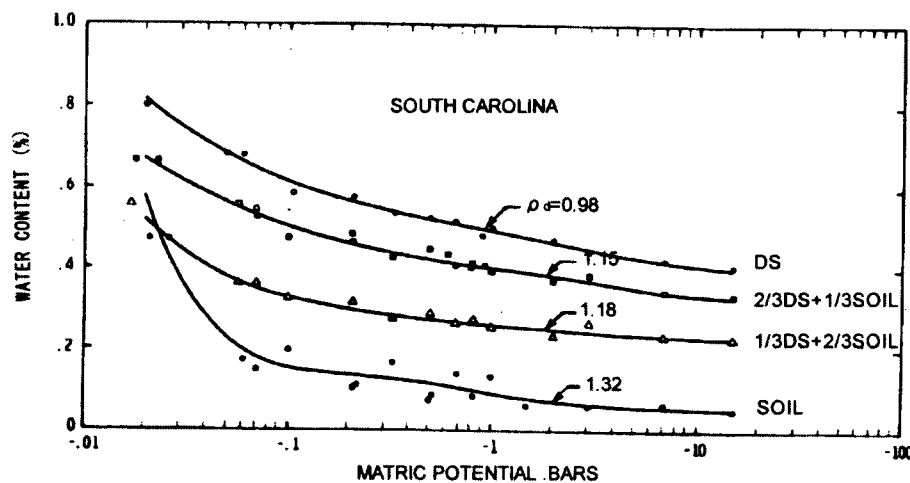


図-2.19 Gupta and Larson の研究

Araya and Paris¹⁵⁾は、粒度分布と土中の間隙サイズの分布の相関性をモデルに組み込んだ最初の研究である。彼らは、土を要素で分割し、それぞれの要素の間隙を次式で表した。

$$V_v = (W_i / \rho_p) e \quad (2.13)$$

ここで、 V_v は間隙体積、 W_i は固相重量、 ρ_p は土粒子比重、 e は間隙比。

$$r_i = R_i \left[4en_i^{(1-\alpha)} / 6 \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

r_i は要素の平均間隙半径、 R_i は要素内粒子の平均半径、 n_i は要素内の粒子数である。 α は図-2.20 で示すように粒子径の関数として与えた。

Haverkamp and Parlange¹⁶⁾は、Brooks and Corey 式(式(2.3))を基にして水分特性曲線の主脱水曲線、主吸水曲線を次式で与えた。

・ 主吸水曲線

$$h \geq h_{ac} \quad \theta = \frac{n}{1+\alpha} \left[\frac{h_{ac}}{h} \right]^\alpha \quad (2.15)$$

$$h_{we} \leq h \leq h_{ac} \quad \theta = n \left[1 - \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{h}{h_{ac}} \right] \quad (2.16)$$

$$h \leq h_{we} \quad \theta = \theta_s \quad (2.17)$$

・ 主脱水曲線

$$h \geq h_{ac} \quad \theta = n \left[\frac{h_{ac}}{h} \right]^\alpha \left[1 - \frac{h_{ac}}{h} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \quad (2.18)$$

$$h \leq h_{ac} \quad \theta = \theta_s \quad (2.19)$$

ここで、 θ は体積含水率、 h はサクシオン、 n は間隙率、 α は Brooks and Corey 式(式(2.3))の α である。 θ_s は自然状態の飽和体積含水率であり、 n と区別している所に特色がある。 h_{ac}, h_{we} は、それぞれ空気侵入値、水侵入値であり、主脱水曲線、主吸水曲線が $\theta = \theta_s$ となるときのサクシオン値である。このモデルを図-2.21 に示す。図中の PDC および PWC は、それぞれ主吸水曲線か

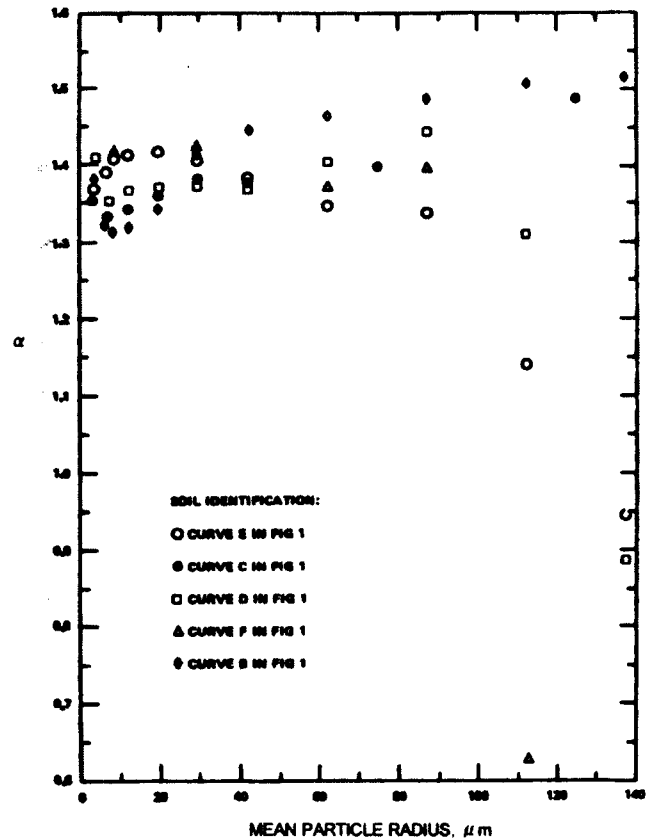


図-2.20 Araya and Paris の研究

らの脱水曲線および主脱水曲線からの吸水曲線であり, Parlange¹⁷⁾によって提案された次式の走査曲線式で表される。

$$[h - h_{std}] \frac{d\theta_w}{dh} = \theta_w - \theta_d \quad (2.20)$$

$$[\theta_w - \theta_{sw}] = [h - h_{std}] \int_h^{h_{sw}} [\theta_d - \theta_{sw}] [h - h_{std}]^{-2} dh \quad (2.21)$$

ここで, 未知数は α, h_{ae}, h_{we} である。彼らは, 粒径加積曲線と水分特性曲線の相似性から, 粒度分布を次式の Van Genuchten(式(2.5))タイプの分布関数でフィッティングした。

$$F = \frac{1}{\left[1 + \left[\frac{d_s}{d}\right]^{c_2}\right]^{c_1}} \quad (2.22)$$

$$c_1 = 1 - c_2$$

ここで, d は土粒子直径, d_s, c_1 は形状パラメーターである。これによって得られた c_1 を用いて, 次式から α を算定する。

$$\mu = \frac{c_1}{1 - c_1} \quad (2.23)$$

$$\alpha = a_1 \mu \rho_d^{a_2} \quad (2.24)$$

ここで, ρ_d は乾燥密度である。 a_1, a_2 は定数である。式(2.23)により算出された α を用いて次に示す3つの式により h_{ae} を求めることができる。

$$\frac{h_{ae}}{h(\theta_{ae})} = \left[(1 + \alpha) \left[1 - \frac{h_{ae}}{h(\theta_{ae})} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \right]^{-1/\alpha} \quad (2.25)$$

$$\frac{h_{ae}}{\gamma} = \frac{0.149}{d_s} \left[\left(\frac{\theta_{ae}}{\theta_s} \right)^{-1/c_1} - 1 \right]^{1-c_1} \frac{h_{ae}}{h(\theta_{ae})} \quad (2.26)$$

$$\gamma = b_1 + b_2 \alpha + b_3 \alpha^2 \quad (2.27)$$

ここで, $h(\theta_{ae})$ は, 主脱水曲線上の θ_{ae} 時のサクシオン。 b_1, b_2, b_3 は定数である。このモデルは,

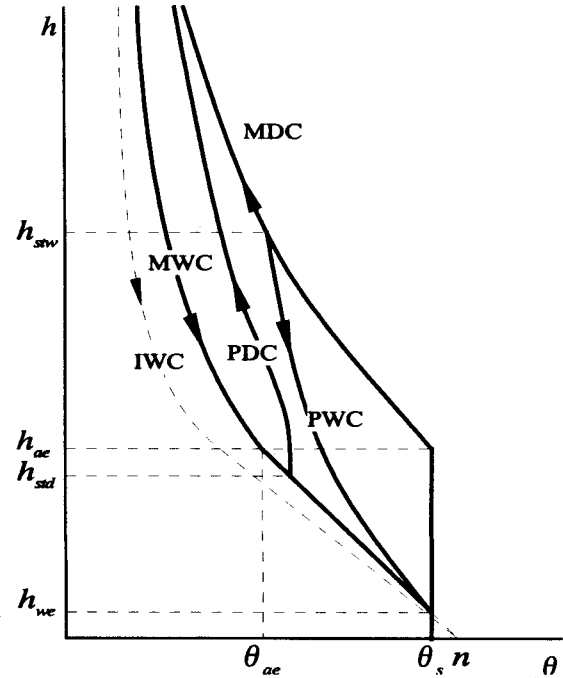


図-2.21 Haverkamp and Parlange のモデル

粒度分布を与えるだけで、演繹的に全てのパラメーターが決まり、主脱水曲線・主吸水曲線が得られる。しかし、式(2.24)、(2.27)に関しては物理的解釈が難しく、適用範囲に疑問が残る。

神谷¹⁸⁾は、土の間隙部分を図-2.22のような任意の高さを持つ毛管モデルで近似し、水分特性曲線と毛管モデル中を水が毛管上昇しているときの含水状態が等しいと仮定して、毛管束の水分特性曲線から求められる管径分布を土の間隙径分布とみなした。その結果、水分特性曲線の脱水曲線から得られる間隙径分布と粒度分布が相似形になることを提案している(図-2.23)。しかし、定性的な議論に留めている。また、水分特性曲線の吸水曲線については適用できないことを示している。つまり、ここまで列挙した粒度分布を介した水分特性曲線モデルが、脱水曲線のみ適用可能であること、または吸水曲線に関しては単なる間隙径分布では説明できないことを示唆している。

Fredlund¹⁹⁾は、既存の水分特性曲線の経験式を、毛管モデルによる間隙径分布関数の違いであると説明した。以下は、間隙径分布と経験式の相関である。

・べき関数

$$f(r) = A/r^{m+1}$$

$$\rightarrow \theta(\psi) = B - D\psi^m \quad (\text{Brooks and Corey 式})$$

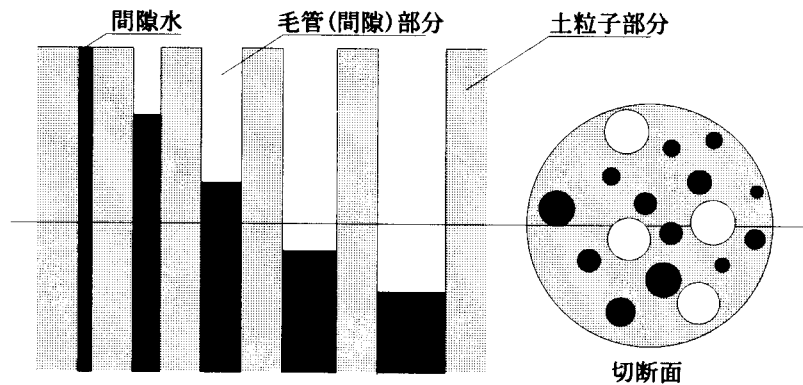


図-2.22 毛管束の含水状態

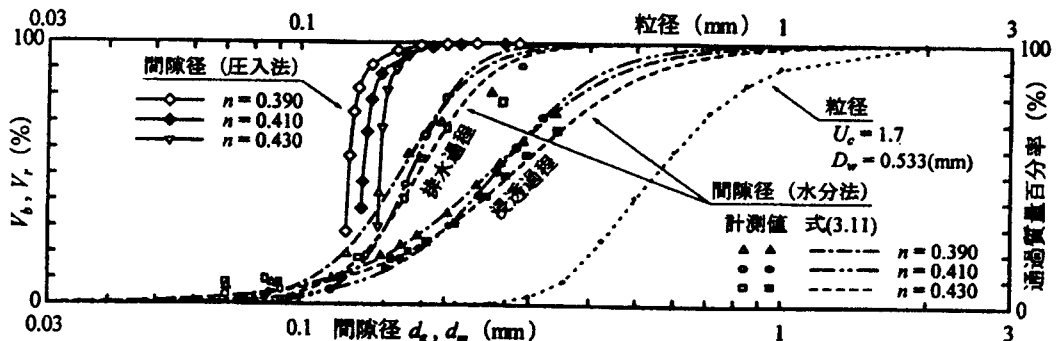


図-2.23 水分特性曲線から求められる間隙形分布と粒度分布

・ガンマ分布

$$f(h) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \exp(-1/\beta), & \beta > 0, 0 \leq h < \infty \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \rightarrow \theta(\psi) = \theta_s \exp(-\psi/\beta) \quad (\text{Mckee and Bumb }^{20}) \text{式}$$

・ベータ分布

$$f(h) = \begin{cases} \frac{h^{\alpha-1}(1-h)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, & \alpha, \beta > 0, 0 \leq h < 1 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \rightarrow$$

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 h^{\alpha-1}(1-h)^{\beta-1} dh = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$$

$$\theta(\psi) = \theta_s \int_{\psi}^1 \frac{h^{\alpha-1}(1-h)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} dh = \theta_s - \theta_s \sum_{i=0}^{\alpha+\beta-1} \binom{\alpha+\beta-1}{i} \psi^i (1-\psi)^{\alpha+\beta-1-i}$$

(Roger and Hornberger ²¹)式

・その他の分布関数

$$f(\psi) = \frac{mnp(p\psi)^{r-1}}{[1+(p\psi)^r]^{m+1}} \rightarrow \theta = \left[\frac{1}{1+(p\psi)^r} \right]^m \quad (\text{Van Genuchten 式})$$

そして、みずからも式(2.28)の間隙孔分布関数を与え、式(2.29)の水分特性曲線モデルを提案している。

$$f(\psi) = \frac{mn(\psi/a)^{r-1}}{a[\exp+(\psi/a)^r] \ln[\exp+(\psi/a)^r]^{m+1}} \quad (2.28)$$

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln[\exp+(\psi/a)^r]} \right]^m \quad (2.29)$$

ここで、未知数は a, n, m 。さらに、汎用性のある式として次式を提案している。

$$\theta = C(\psi) \theta_s \left[\frac{1}{\ln[\exp+(\psi/a)^r]} \right]^m \quad (2.30)$$

ここで、 $C(\psi)$ に関しては Croney and Coleman ²²の研究結果に見合うように、次式のように与えた。

$$C(\psi) = \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln[1+(1000000/\psi_r)]} \quad (2.31)$$

ここで、 ψ_r は残留飽和度に達するサクションを表しており、高サクション域の直線性が失われる点での飽和度を指している(図-2.24)。さらに、Fredlund ²³は、粒度分布曲線に式(2.30)と等

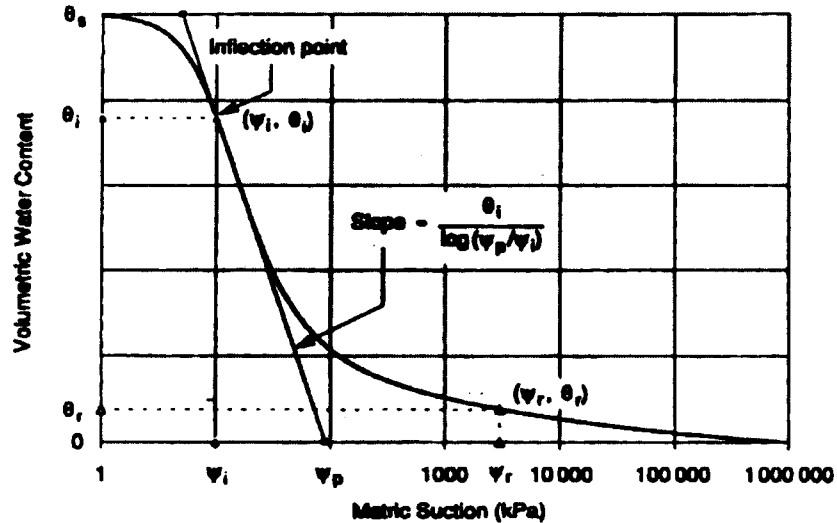


図-2.24 Fredlund の水分特性曲線式

価な次式でフィッティングすることで必要なパラメーターを算出している。

$$P = C(d_r) \frac{100}{(\ln(\exp + (d/a_r)^n))^m} \quad (2.32)$$

ここで、 P は通過百分率、 d は粒子径、 a_r, n, m はそれぞれ式(2.30)の a, n, m に相当するパラメーターである。

これらの、粒度分布と間隙孔の分布の相関を扱った研究は多く行われている。しかし、等粒径の材料であっても間隙孔の分布が一様になるとは言えない。おそらく、粒度曲線の分布関数と水分特性曲線から求められる間隙孔の分布関数が似た形となっており、それぞれの分布関数の歪度や尖度が相関関係にあるのだと考えられる。つまり、定性的な水分特性曲線の評価はできても、定量的な予測には不十分である。Fredlund は、式(2.31)とデータベース²⁴⁾から水分特性曲線を予測する方法を提案しているが、粒度分布との定量的な相関はいまだ明確でない。

(3) 水分特性曲線のヒステリシスに関する研究

(a) 実験的研究

水分特性曲線のヒステリシスに関する代表的な研究は、Vachaud and Thony²⁵⁾によるものである。彼らは、初期含水比が異なる砂質土を用いて土槽実験を行い、ヒステリシスが土の透水係数に与える影響について調べた。そして、図-2.25 に示す水分特性曲線を得、以下の結論を導いている。飽和状態から描く脱水曲線を主脱水曲線、最も乾燥した状態で描く吸水曲線を主吸水曲線とし、土の水分状態がこの2曲線間に存在することを示した。また、主吸水曲線からの最脱水曲線は、再脱水曲線 ϕ_f に収束するとした。しかし、これらの試験結果は体積含水率で整理されているため、土の締固めの度合いが評価されておらず、主脱水曲線・主吸水曲線の定量的な表現に

は至っていない。

Toll²⁶⁾は、ヒステリシスの定量的表現のために次式で表す等価間隙比を導入した。

$$e_w = \frac{V_w}{V_s} = S'_r \cdot e = G_s \cdot w' \quad (2.32)$$

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分母が同じであるため、同一平面で描かれた間隙比、等価間隙比を空隙と間隙水の体積比として評価することが出来る(図-2.26)。

Tollは正規圧密状態にある飽和土にサクシオンを作用させたときに、間隙比が描く曲線をVCL、等価間隙比が描く曲線をVDLと名付けた。あるサクシオン値までは先に述べた様に、土は飽和状態を保つため、VCLとVDLが一致する。さらに、Tollはサクシオンに対する間隙水の挙動が飽和粘土の圧密現象に似ているとし、サクシオンの再載荷時にはVDLに達するまでは、ほとんど間隙水状態に変化は無く、VDL到達後はVDLに沿って推移するとしている。VDLは、

Vachaud and Thonyによって提案された主脱水曲線に相当するが、再脱水曲線に対する基本則を与えた。また、間隙比変化を水分特性に組み込んだ最初の研究であると言える。しかしながら、水分特性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

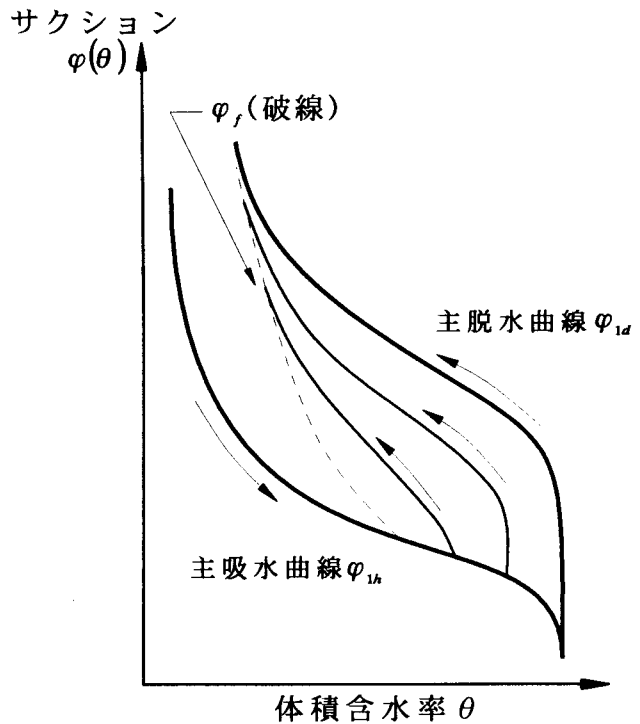


図-2.25 Vachaud and Thonyの研究

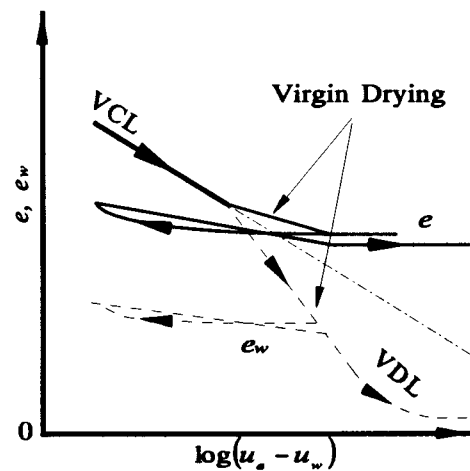
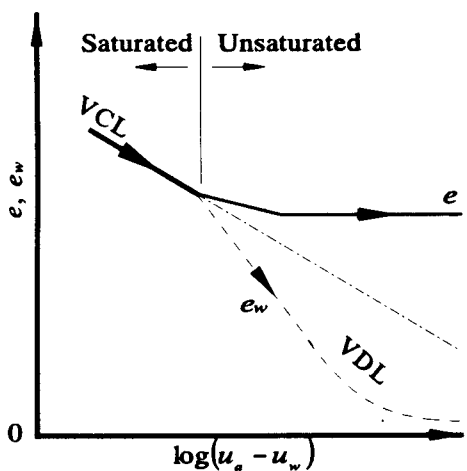


図-2.26 Tollの水分特性モデル

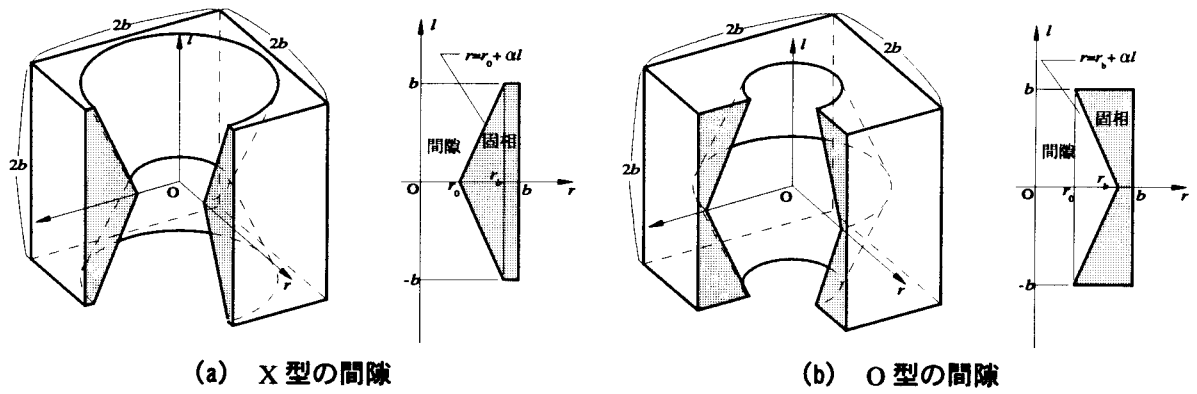


図-2.27 中野の間隙構造の極限モデル

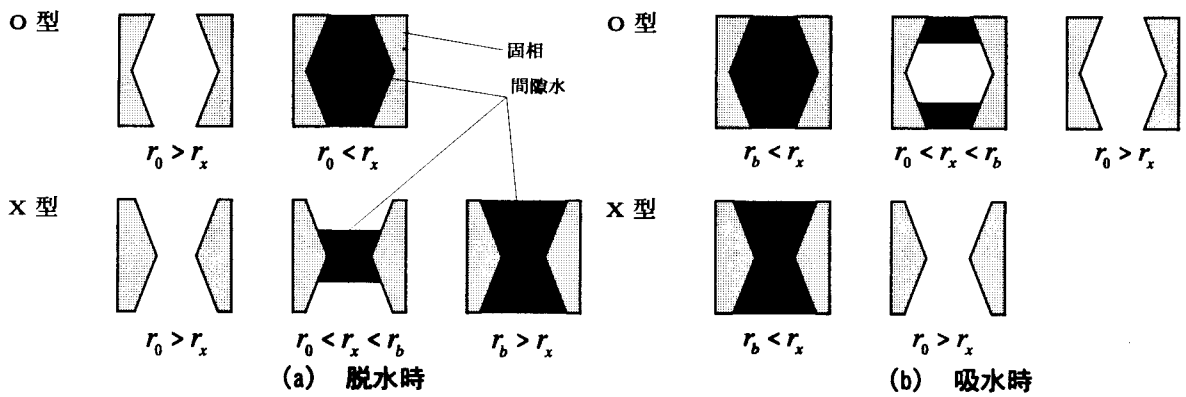


図-2.28 インクビン効果の表現

物理的意味には触れていない。また、同一試料における VDL が唯一であるとしているため、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不十分である。

(b) ヒステリシスを表現し得る既往の水分特性曲線モデル

中野^{27), 28)}は、土中の複雑な間隙構造を図-2.27(a), (b)に示す O 型, X 型の 2 つの型で表した。一般的な間隙の性質はこの両極限モデルによって捉えることができ、両者が等確率で存在し、軸方向にも等確率で配分されると考えた。そして、最小の間隙体積を持つ要素について、式(2.34)を定め、その間隙体積を幾何学的に式(2.35)のように求めた。

$$r_0 = vb, r_b = b(v + \alpha) \quad (2.34)$$

$$V_1 = 2\pi b^3 \left(v + \frac{\alpha}{2} \right)^2 + \frac{\pi}{6\alpha} (ab)^3 \quad (2.35)$$

最大の間隙体積では、

$$r_0 = b(1 - \alpha), r_b = b \quad (2.36)$$

$$V_n = 2\pi b^3 \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\pi}{6\alpha} (\alpha b)^3 \quad (2.37)$$

であり、 $V_n = nV_1$ とすると、任意の $V_i = iV_1$ の間隙を持つ要素の確率密度関数は、統計学的に次式で与えられる。

$$F = A \exp\left\{-\lambda\left(\frac{r_0}{b} + \frac{\alpha}{2}\right)^2\right\} = A \exp\left\{-\lambda\left(\frac{r_b}{b} - \frac{\alpha}{2}\right)^2\right\} \quad (2.38)$$

ここで、

$$\lambda = 2\pi B b^3$$

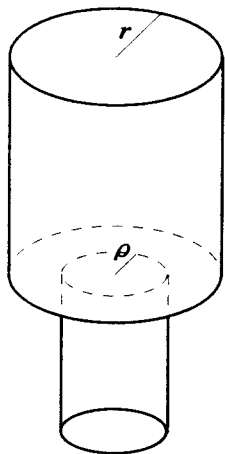
$$A = \frac{\exp\left(-\frac{\lambda\alpha^2}{12}\right) \cdot \left[1 - \exp\left\{-\left\{\lambda\left(v + \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\lambda\alpha^2}{12}\right\}\right\}\right]}{\exp\left\{-\left\{\lambda\left(v + \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\lambda\alpha^2}{12}\right\}\right\} \cdot \left[1 - \exp\left\{-\left\{\lambda\left(v - \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\lambda\alpha^2}{12}\right\}\right\}\right]}$$

この密度関数を用いて、次式からサクシオンに相当する間隙径 r_x を毛管モデルから算出し、図-2.28に従って体積含水率を求め、ヒステリシスを表現した。このようにして、間隙形状を表すパラメーターと間隙分布を表すパラメーターを使用することで、水分特性曲線のヒステリシスを解析的に記述することに成功した。このモデルで間隙構造のパラメーターを変化させることにより、砂、粘土などの保水性の異なる土の水分特性曲線を表せるとしているが、パラメーター設定には試行錯誤が必要となり、演繹的な予測手法とはいえない。

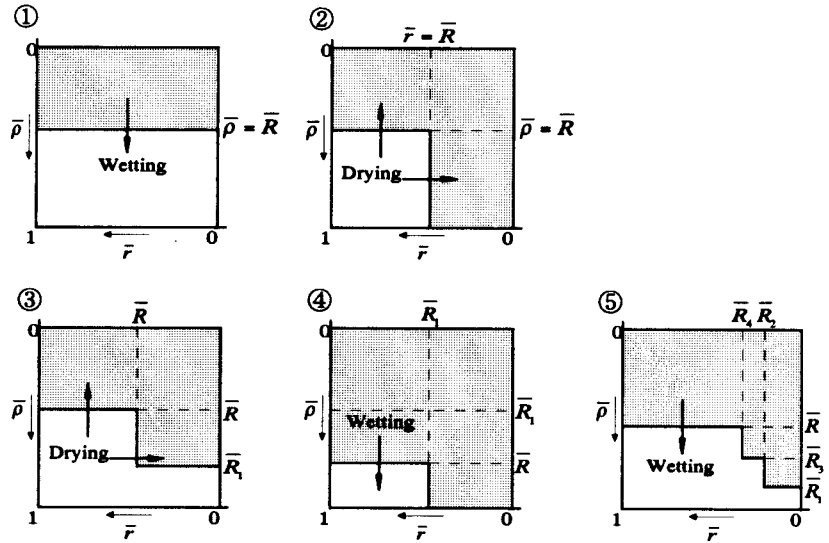
Mualem²⁹⁾は、土中の間隙を図-2.29(a)に示す簡単な管路モデルで表した。図中 r は、外部へと繋がる間隙の半径であり、 ρ はそれに連続する間隙の半径である。Mualemは、この間隙構造が存在する密度分布を $f(r, \rho)$ で表した。それぞれの間隙径は式(2.39)で正規化され、新たな密度分布として $f(\bar{r}, \bar{\rho})$ が与えられた。

$$\bar{r} = \frac{r - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (2.39)$$

ここで、 R_{\min} は最小の間隙半径、 R_{\max} は最大の間隙半径である。図-2.29(b)は、間隙水の分布の場合分けである。Mualemは、サクシオンに相当する正規化された間隙半径を \bar{R} で表し、吸水過程では、土内部の間隙半径 $\bar{\rho}$ に依存して間隙水分布が決まるとした。一方、脱水過程では小さい方の間隙半径に依存するとした。図中①は、絶乾状態から始まる吸水過程つまり主吸水曲線を表している。②は飽和状態からの脱水過程つまり主脱水曲線である。③④⑤中の \bar{R}_i の i は、サク



(a) 間隙孔モデル



(b) 間隙水の分布モデル

図-2.29 Mualem の水分特性曲線モデル

シヨソ履歴の順番を表している。③は、主吸水曲線上からの脱水過程、④は主脱水曲線上からの吸水過程である。⑤は、絶乾状態から吸水(\bar{R}_1 まで)→脱水(\bar{R}_2 まで)→吸水(\bar{R}_3 まで)→脱水(\bar{R}_4 まで)の履歴を与えられた土の吸水過程である。このヒステリシスモデルでは、試験により主脱水曲線と主吸水曲線を求め、間隙孔の確率分布関数を定めれば、走査曲線を精度よく理論的に求めることが出来る。しかし、実地盤の不飽和土は、任意のサクシヨソ値で任意の飽和度を持っている。Mualem のモデルでは、このような初期状態を設定することが出来ず、サクシヨソ履歴を知る必要があるため、実用的とは言えない。本論文の目的は、任意の不飽和状態から描く脱水曲線および吸水曲線のモデル化である。

2.3 水分特性曲線の形状に及ぼす要因の検討

前節で、水分特性曲線に及ぼす過去の研究の経緯を示したが、同一試料におけるヒステリシスの試験的な研究は少ない。また、供試体の初期条件および応力条件が一定に保たれている保証はない。Vachaudの研究では、水分特性曲線を体積含水率で表しており、相対密度や間隙比に関しては触れていない。Tollの研究も、飽和正規圧密粘土を対象としている。本節では、同一試料でも初期条件および応力条件によって水分特性曲線の形状が異なることを実験的に示し、その要因の検討を行う。

水分特性曲線を得るためには多大な時間を要するため、試料には比較的透水係数の高い2種類のシルト質粘土を用いた。表-2.1にそれぞれの物理化学的性質、図-2.30は粒度分布である。

表-2.1 試料の物理化学的性質

	G_s	w_L (%)	w_p (%)	I_p
No.5クレ-	2.7	43.0	29.6	13.4
カタルボクレ-	2.7	33.5	20.3	13.2

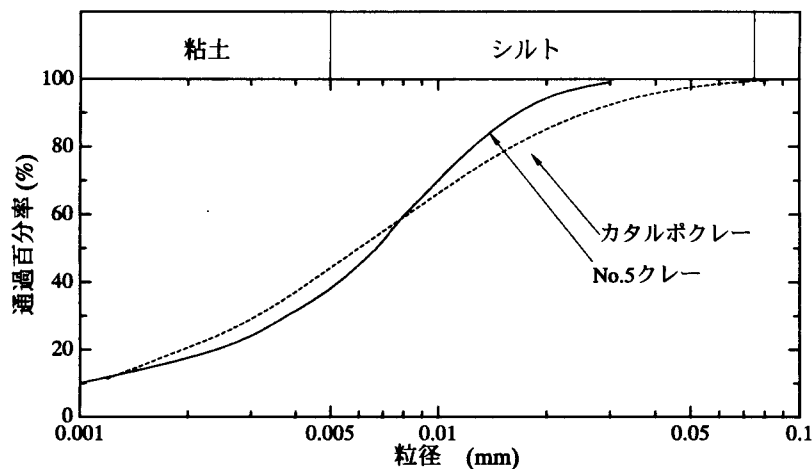


図-2.30 試料の粒径加積曲線

(1) 初期状態の異なる水分特性曲線

供試体の初期状態(飽和度, 含水比, 間隙比)による水分特性曲線形状の違いを検討した。所定の初期状態の供試体を作製するために、静的締固めを用いた。一次元圧密容器(直径 60mm)に所定の含水比に調整した粉末の No.5 クレ-を一定量投入し、全断面を静的に締固めた。このとき、所定の間隙比になる様、供試体高さを調整した。締固められた供試体は、締固め圧力解放後、試験装置に設置された。

(a) 試験装置および試験方法

図-2.31 は、試験に用いた不飽和土用一次元圧密試験機の概要である。試験装置はセル内に空気圧を作用させ、載荷キャップの上部の孔よりサクシオンを載荷することが出来る。ペDESTAL 部にはセラミックディスクを設けている。セラミックは水で飽和させることにより、内部の細孔が侵入空気に対して抗い、セラミック内の水と連続した水だけを透過する。供試体からの吸排水量はセラミックを介してビュレットで測定される。不飽和土の試験の場合、ビュレットで測定される吸排水量が体積変化量と異なるため、体積はセル外に設けられた軸変位計により換算した。ビュレットへの経路を閉じたとき、ペDESTAL に通じる間隙水圧計によって供試体内部の間隙水圧を測定することが出来る。載荷キャップのポリフロンフィルターは、水を透過せず空気だけを透過し、排水経路以外への水の漏洩を防いでいる。静的締固めによって作製された供試体は、上載圧 19.6(kPa) 下で、加圧法によりサクシオンを $s=490$ (kPa) まで載荷した後、 $s=0$ (kPa) まで減じ、そのときの脱水曲線・吸水曲線を得た。表-2.2 は供試体の初期状態を示す。これらの初期状態は比較対照を目的としており、飽和度に関して a, c および b, d が対応しており、含水比に関して a, d および b, e、間隙比に関して b, c が対応している。

(b) 試験結果

図-2.32 は得られた水分特性曲線を表している。供試体が初期に持っているサクシオンの測定を行っていないため、図中では載荷サクシオンと得られた飽和度の関係を示している。図-2.32(a)(b) は、初期飽和度の等しい2つの供試体を比較している。図-2.32(a)での2供試体は、図-2.32(b)の2供試体に比べて、水分特性曲線の違いが明らかである。これは、供試体の初期サ

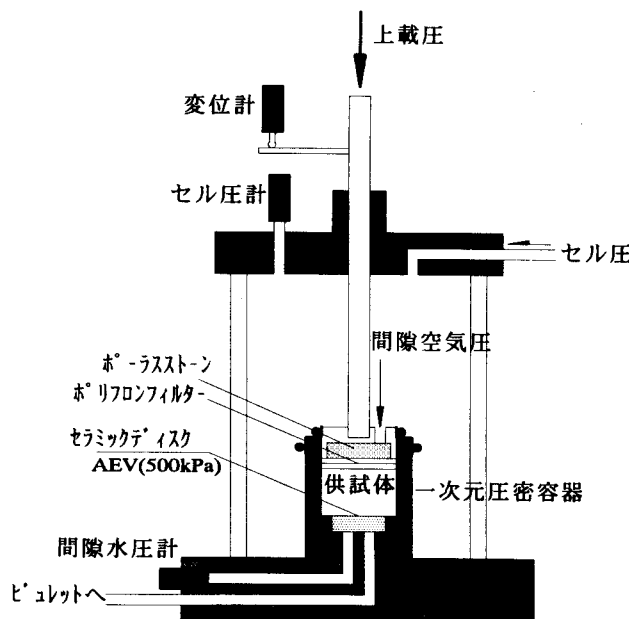
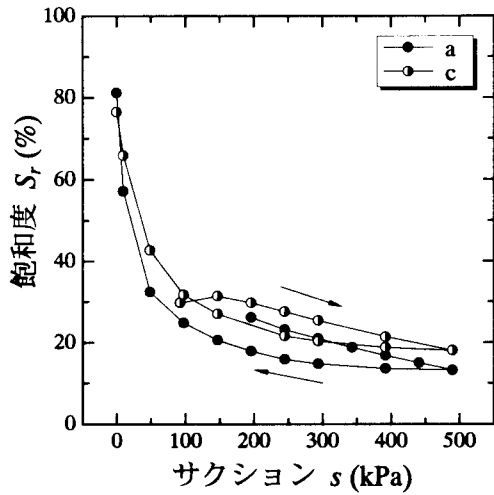


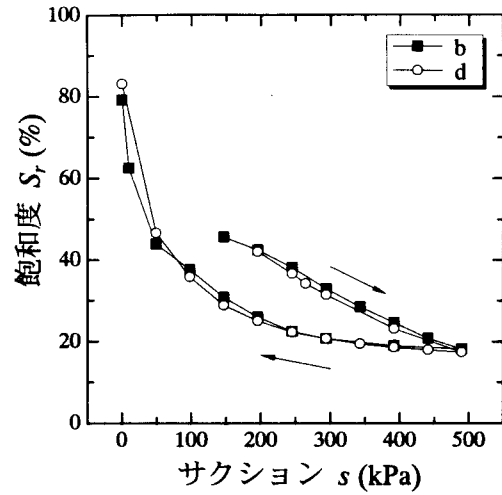
表-2.2 締固め供試体の初期状態(No.5 クレ)

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

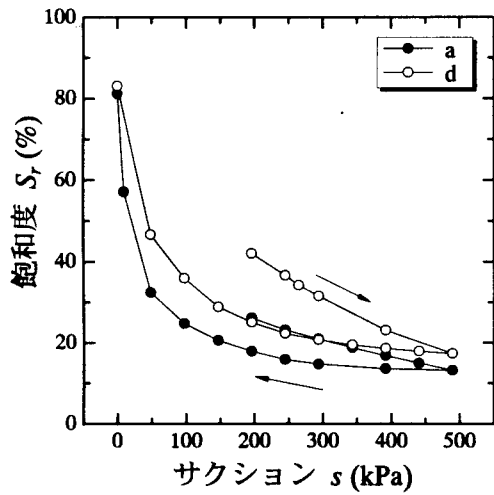
図-2.31 不飽和土用一次元圧密試験機



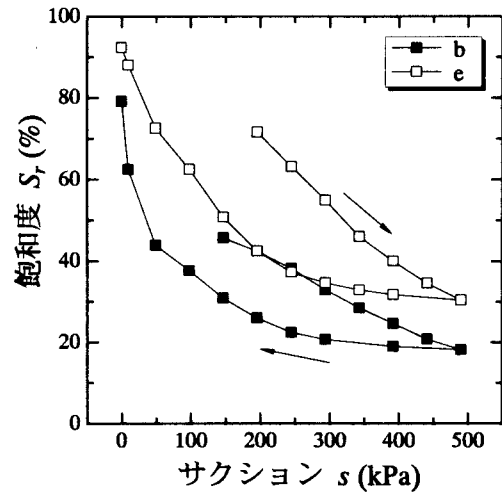
(a) 初期飽和度の等しい供試体の比較(1)



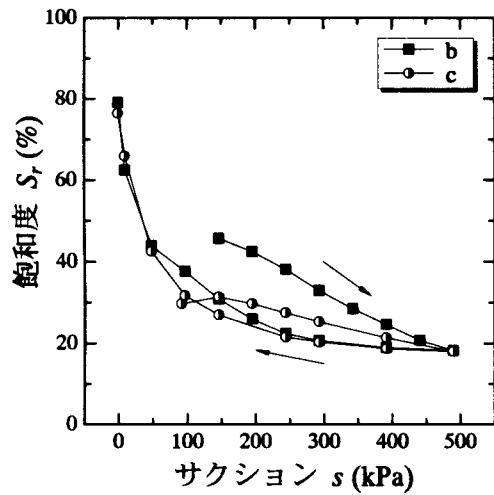
(b) 初期飽和度の等しい供試体の比較(2)



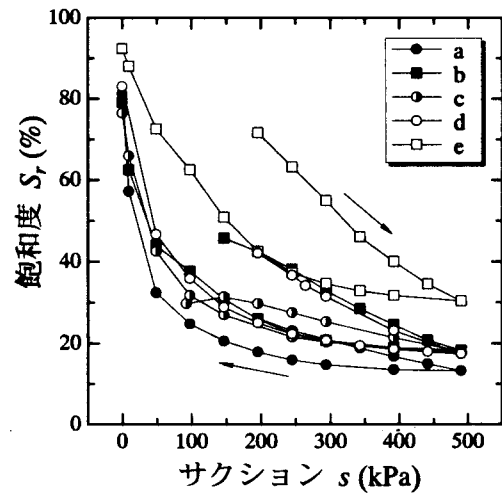
(c) 初期含水比の等しい供試体の比較(1)



(d) 初期含水比の等しい供試体の比較(2)



(d) 初期間隙比の等しい供試体の比較



(e) 全ての供試体の脱水・吸水曲線

図-2.32 初期状態の異なる水分特性曲線

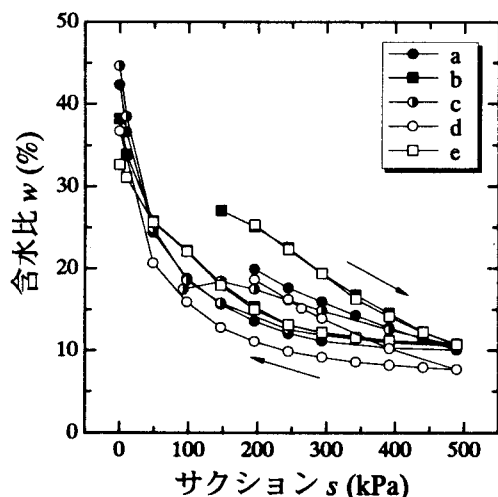


図-2.33 試験中の含水比変化

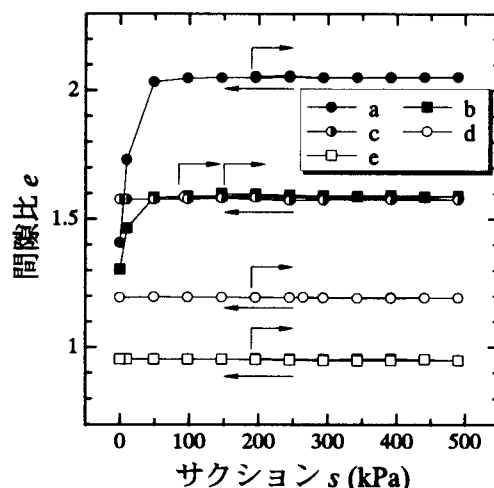


図-2.34 試験中の間隙比変化

クシヨンによる影響であると考え、同じ飽和度で、間隙比の異なる供試体を考えた場合、より土粒子同士の間隔が接近している、つまり間隙比の小さい供試体の方が、間隙水メニスカスの曲率半径が小さくサクシヨンが高くなる。飽和度の低い供試体 a, c では、メニスカス水が多く存在するため、その差が顕著に現れたものと考え。図-2.32(c) (d)は初期含水比の等しい供試体の水分特性曲線の比較である。両図とも白抜きプロットの方が、間隙比の小さい供試体を表している。脱水曲線の関して、間隙比の小さい供試体の方が、間隙水の排出により大きいサクシヨンを要するため、飽和度が高くなり、 $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度も高くなっているのが確認できる。吸水曲線においては、比較的高いサクシヨン域での飽和度の回復が見られる。図-2.32(d)は、初期間隙比の等しい供試体の水分特性曲線の比較である。途中の経路は異なるものの、高サクシヨン域で脱水曲線の収束が確認できる。また、脱水曲線が異なるにもかかわらず、同じ(サクシヨン、飽和度)点からの吸水曲線が一致しているのが分かる。図-2.32(e)は、すべての供試体の水分特性曲線をまとめたものであるが、同じ試料であっても初期状態によって水分特性曲線が大きく影響を受けることが明らかである。これは、単にひとつの供試体での走査曲線の違いでは説明できない。

図-2.33 は、含水比の推移である。先に示した様に含水比に関しては、飽和度変化に比べて、高サクシヨン域で脱水曲線のばらつきが小さく、初期含水比に無関係にある一定の値に収束している様に見える。水分特性曲線の脱水過程が示す $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度は、マトリックサクシヨンでは分離できない土粒子表面の吸着水量を表していると考えられている。吸着水量は全土粒子の表面積に比例するため、その表現には乾土重量に対する水の割合で示される含水比を用いるべきである。図-2.33の脱水曲線の収束値は、この吸着水が占めている含水比、いわば吸着水含水比を表していることになる。吸着水含水比は、土粒子表面の活性度に依存するため土固有の値を示すと説明できる。

図-2.34は、間隙比の推移である。ここで用いた供試体のように初期に不飽和状態にある供試体は、サクシオン载荷による体積変化は小さい。しかし、間隙比が大きい供試体ではサクシオン除荷段階でコラプスと呼ばれる圧縮変形が生じている。先に示した水分特性曲線では、吸水曲線が変曲点を持つ場合と持たない場合があるのが確認できる(図-2.32)。特に供試体 a, b は、吸水曲線の変化率が単調増加となっている。これはサクシオン減少によりコラプスが生じ、間隙比が大きく変化するからである。骨格が圧縮し、間隙が小さくなれば土粒子接点の間隙水メニスカスが接近して合同することによりバルクを占める間隙水となるため、同じサクシオン値でも間隙水を多く含有することが出来る。この場合、水分特性曲線がサクシオンの減少だけでなく骨格の圧縮にも依存し、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、定体積での水分特性曲線として比較検討することは出来ない。

(2) サクシオン履歴の異なる水分特性曲線

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が重要視されるため、予圧密供試体を用いた。液性限界の2倍の含水比に調整したスラリー状の No.5 クレーを、一次元圧密容器(直径 100mm)に入れ、段階载荷で 313.6 (kPa) まで予圧密した。得られたブロックサンプルを直径 35mm、高さ 80mm に成形し、飽和供試体として不飽和土用三軸試験機(図-2.35)に設置した。

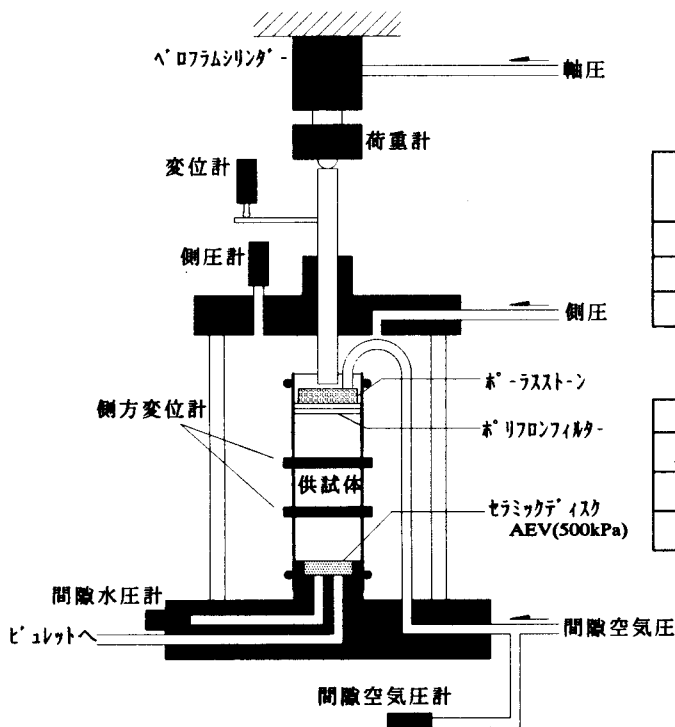


図-2.35 不飽和土用三軸試験機

表-2.3 供試体の初期状態(No.5 クレー)

供試体番号	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)
A	0.985	36.5	100
B	1.070	39.1	98.7
C	1.048	38.8	100

表-2.4 応力条件及び応力経路

	拘束圧 p (kPa)	サクシオン s (kPa)
A	19.6	0→490→0
B	19.6	0→392→49→245
C	19.6	0→294→49→245

(a) 試験装置および試験方法

試験機は、軸圧、セル圧、間隙空気圧を独立で制御できるようになっている。飽和状態からの水分特性曲線を得るには、実験に長時間を要するため、载荷応力は全て電空圧変換レギュレーターを用いることで自動化を計った。一次元圧密試験機と同様体積変化を排水量と別に測定する必要がある。本試験機では、2つの側方変位計を用いて、直接供試体の直径変化量を測定し、軸変位計から得られる高さとともに、供試体を円柱近似し体積を算定した。表-2.3, 2.4 は、それぞれ供試体の初期状態と与えたサクシジョン履歴である。

(b) 試験結果

図-2.36 は、得られたサクシジョン～飽和度関係を示している。図-2.37, 2.38 は同時に得られた含水比、間隙比の変化である。図-2.32 に示される初期に不飽和状態にある供試体とは異なり、変曲点いわゆる空気侵入値が明確に現れている。また、間隙比がサクシジョンの小さい段階で大きく変化しており、間隙比変化量が小さくなるとともに供試体の不飽和化が始まっているのが分かる。これは、土の間隙に空気が侵入するまではサクシジョンは骨格を圧縮する負の間隙水圧として作用し、この段階でのサクシジョンには Terzaghi の有効応力がそのまま適用できるからである。表-2.3 に示す様に3つの供試体は間隙比がほぼ等しく、前節で述べた様な間隙比が水分特性曲線の形状に及ぼす影響を考慮しなくてもよい。図-2.36 に示す様に3つの脱水曲線は一致しており、吸水曲線は同じ脱水曲線上の異なる飽和度からのサクシジョン除荷とみなす

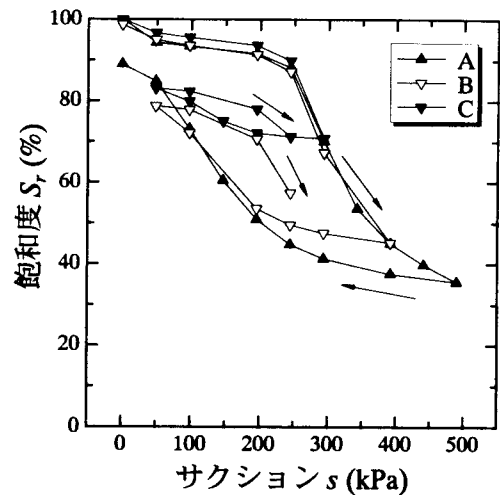


図-2.36 サクシジョン～飽和度関係

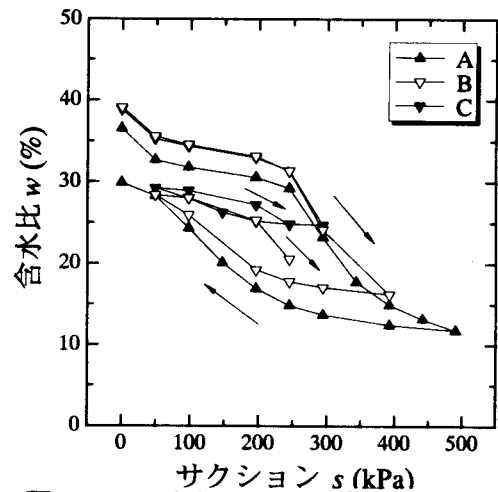


図-2.37 サクシジョン～含水比関係

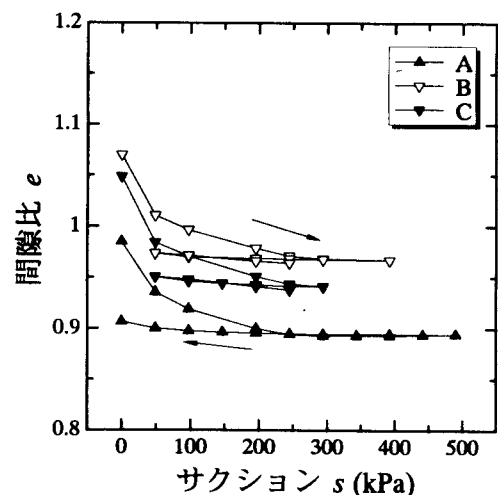


図-2.38 サクシジョン～間隙比関係

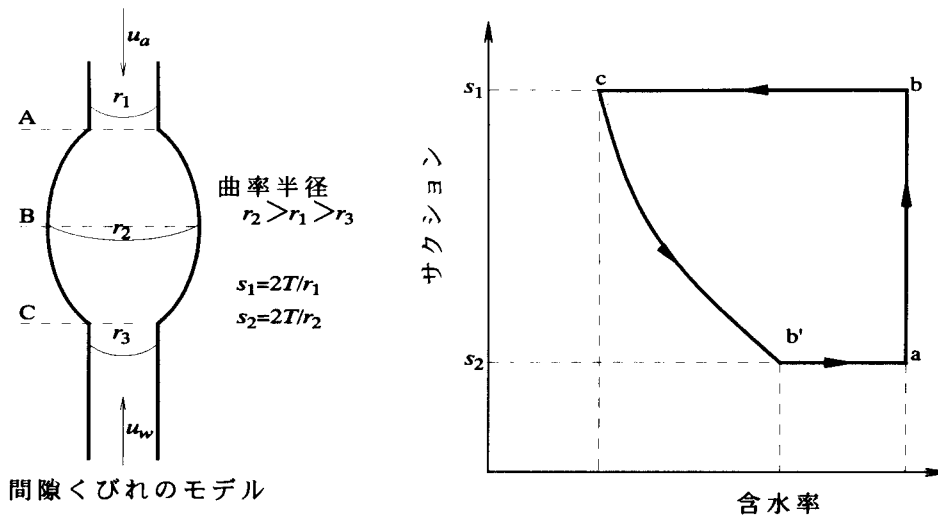


図-2.39 インク瓶効果

ことができる。吸水開始時は、サクシヨン除荷時の飽和度に拘わらず、ほとんど飽和度は回復しない。しかし、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ビン効果があるため、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-2.36)。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) 拘束圧条件の異なる水分特性曲線

先の節で供試体の初期間隙比によって水分特性曲線の形状が大きく異なることを述べた。供試体の初期間隙比が異なるということは先行圧密応力が異なることであり、ここでは応力条件による水分特性曲線の違いを検討するために、異なる拘束圧(実質応力 net stress)下でのサクシヨン載荷・除荷試験を行った。先に述べた間隙比の影響も併せて検討するために2種類の試料を用いた。表-2.5に供試体の初期状態を示す。供試体 A, Dは No.5 クレー、供試体 E, Fはカタルポクレーである。どちらも一次元圧密容器(直径 100mm)で予圧密された飽和供試体である。予圧密における上載圧は、No.5 クレーとカタルポクレーでそれぞれ 313.6, 156.8 (kPa)であり、No.5 クレー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載荷した試験では、カタルポ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。いわば、A, D に関しては過圧密比が小さく、E, F は過圧密比が大きい供試体となっている。

表-2.5 供試体の初期状態

供試体 番号	試料	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)
A	No.5	0.985	36.5	100
D	No.5	0.882	32.2	98.5
E	カタルポ [®]	0.806	28.9	97.1
F	カタルポ [®]	0.844	28.4	91.2

(a) 試験装置および試験方法

試験装置は、図-2.35 と同じ三軸試験装置を用いた。応力条件は表-2.6 に示す通りである。まず、飽和供試体を三軸試験機に設置し、所定の拘束圧まで段階载荷する。表-2.5 は、拘束圧载荷後の値である。その後、拘束圧を一定に保ったままサクシオンを作用させる。

表-2.6 応力条件及び応力経路

	拘束圧 p (kPa)	サクシオン s (kPa)
A	19.6	0→490→0
D	98	0→490→49
E	19.6	0→490→0
F	196	0→490→0

(注)A,D は No.5 クレー、E,F はカタルポクレー

(b) 試験結果

図-2.40(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-2.40(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-2.40(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-2.40(a))場合と比較して、脱水曲線同士の差が小さく、特に高サクシオン域では曲線形状が拘束圧に依存していないのが分かる。

図-2.40 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-2.41 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

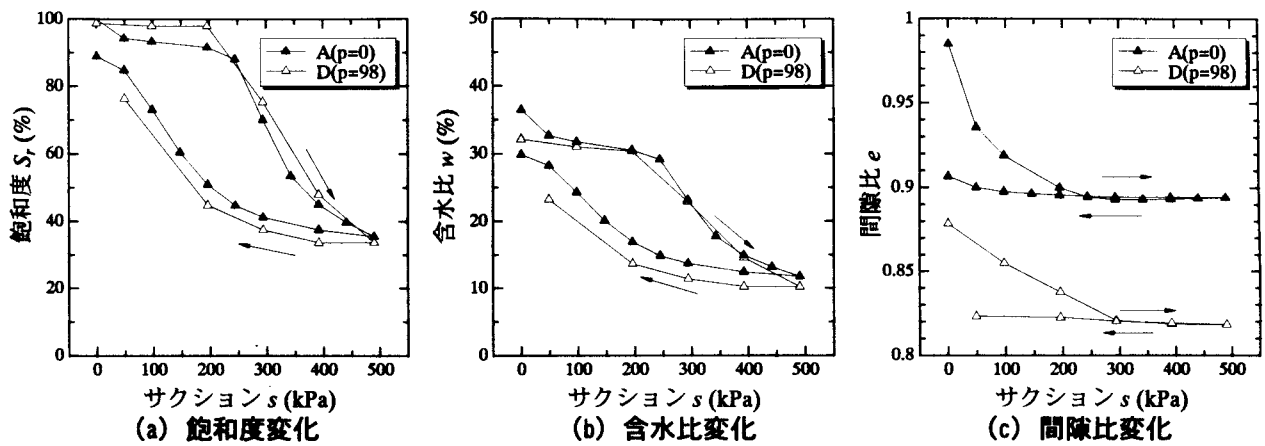


図-2.40 拘束圧の異なる水分特性曲線 (No. 5 クレー)

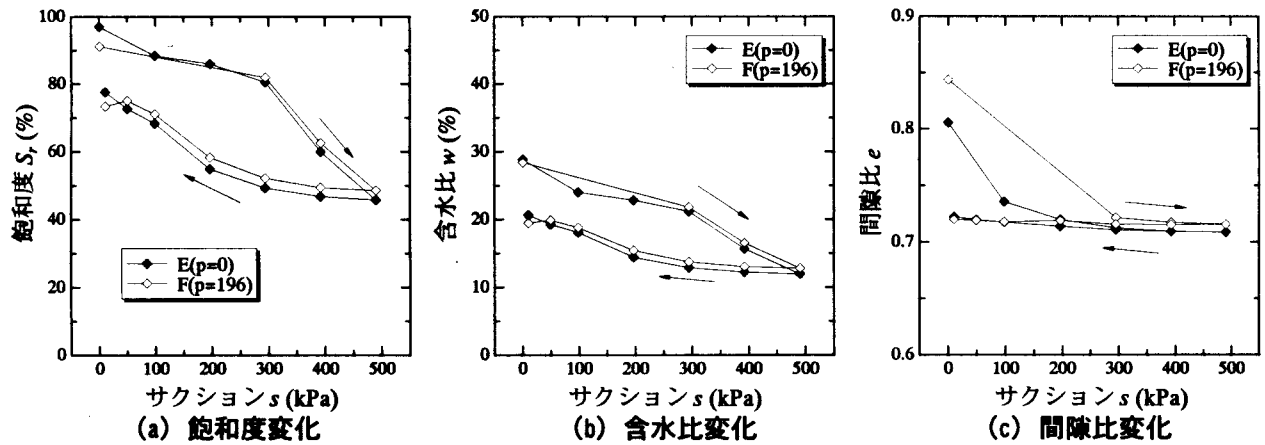


図-2.41 拘束圧の異なる水分特性曲線 (カタルボクレー)

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-2.32 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ヨ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。

2.4 新しい水分特性曲線モデル

2.3節で水分特性曲線の形状に間隙比が大きく影響を及ぼしていることが明らかとなった。本節では、試験結果に経験式を用いてフィッティングを行い、得られたパラメーターから、水分特性曲線に及ぼす間隙比の影響を定量化する。そして、間隙比とパラメーターとの関連から新しい水分特性曲線モデルの構築を目指す。

(1) 水分特性曲線の形状に及ぼす要因の定量化

2.2節で、水分特性曲線を定量的に評価する手法をいくつか挙げたが、本節ではパラメーターの物理的意味に重きをおくため、また客観的な近似を行うために Brooks and Corey 式を用いる。表-2.7は、式(2.2)で $S_{rj} = 100$ (%)として、Brooks and Corey 式(式(2.3))で近似した結果をまとめたものである。表中の S_{rn} , $S'_{rn} = 0$ となっているのは、実験値にフィッティングするとき最小二乗法に従うと、実験の範囲内で最適値が得られなかったものである。 s_A, s_w はそれぞれ、フィッティングで得られた脱水曲線、吸水曲線の式(2.3)中 s_b である。この様にして得られた s_A, s_w を、ここでは空気侵入値、水侵入値と定義する。表中の S_{rn}, α の添え字の' (プライム) は吸水曲線のパラメーターを示す。また、間隙比の影響を検討するために表中に示した間隙比は、空気侵入値を超えたときの間隙比を示している。先述したように、飽和供試体へのサクシオン載荷時やコラプスを生じるようなサクシオン除荷時に生じる吸排水は、サクシオンによるものではなくサクシオン変化から生じる体積変化によって二次的に発生するものである。そのため、ここでは体積変化が小さい空気侵入値以上のサクシオン域での間隙比とパラメーターの比較を行う。

元来、水分特性曲線の $s \rightarrow \infty$ での収束値は吸着水相を示す飽和度であると考えられてきた。図-2.42は、間隙比とフィッティングから得られた S_{rn}, S'_{rn} の関係を示している。図中には等含水比線を示しており、脱水曲線に関してはひとつの含水比線上にプロットが集中しているが、吸水

表-2.7 Brooks and Corey 式を用いた近似結果

Test	e ($s > s_A$)	脱水過程			吸水過程			p (kPa)
		S_{rn} (%)	s_A (kPa)	α	S'_{rn} (%)	s_w (kPa)	α'	
a	2.05	9.2	33.32	0.73	0	4.90	0.41	19.6
b	1.58	11.7	85.26	0.94	0	19.60	0.47	
c	1.57	12.0	13.72	0.46	0	7.84	0.36	
d	1.19	15.9	101.92	1.10	11.1	28.42	0.87	
e	0.95	19.9	163.66	1.07	0	39.20	0.47	
A	0.90	21.1	223.44	1.72	29.2	90.16	1.80	
B	0.97	—	—	—	41.7	78.40	1.74	
C	0.94	—	—	—	70.5	86.24	3.54	
D	0.82	0	245.98	1.57	0	15.68	0.33	98

曲線に関してはその傾向が見られない。先述したように、脱水曲線では唯一の含水比へ収束し、間隙比によって飽和度で表した水分特性曲線の収束値が異なるのだと考えられる。その収束値に関しては次の様に算出される。

$$S_{rc} = \frac{G_s \cdot w_c}{e} \quad (2.40)$$

ここで、 S_{rc} は脱水曲線が示す $s \rightarrow \infty$ の飽和度、 G_s は土粒子比重、 e は間隙比である。 w_c は吸着水の含水比であり、土粒子表面の活性度に依存し土固有の値である。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(久野ら³⁰⁾) 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 $w_c = 7(\%)$ を用いる。つまり、間隙比が一定であれば、吸着水が占める飽和度は式(2.40)で表されることを示している。この様に、飽和度で水分特性曲線を表す場合、間隙比によって吸着水相の評価を変える必要がある。Toll が提案している等価間隙比で吸着水相を表すと、次式のようになる。

$$e_{wc} = G_s \cdot \frac{w_c}{100} \quad (2.41)$$

この様に表すと、間隙比に依存しない収束値を定めることができる。Brooks and Corey 式は、空気侵入値(または水侵入値)以上のサクション域を表現する式であり、その領域ではほとんど間隙比の変化を無視できると考えると、式(2.2)は次の様に変形できる。

$$S_e = \frac{e_w - e_{wc}}{e - e_{wc}} \quad (2.42)$$

ここで、注目すべきことは先に示したフィッティングパラメータと同じ値を用いることができる点にある。一方、吸水曲線の場合は、唯一の含水比に相当する S'_{ra} が得られず、等価間隙比で表してもそれぞれの吸水曲線で固有の収束等価間隙比 e'_{wc} を持つとすると、吸水曲線の有効飽和度は、

$$S_e = \frac{e_w - e'_{wc}}{e - e'_{wc}} \quad (2.43)$$

となる。しかし、この e'_{wc} は吸着水を示す等価間隙比 e_{wc} 以下の値になることはないので、表-2.7

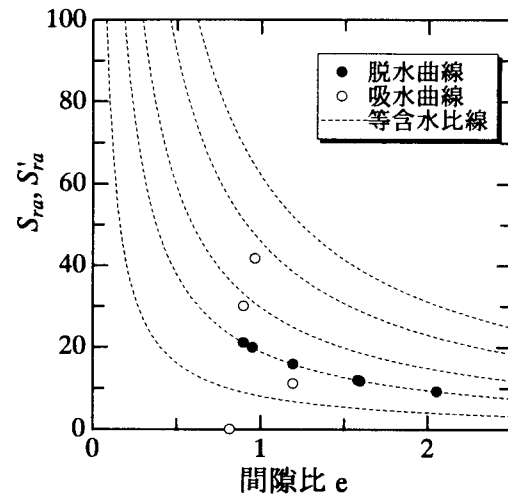


図-2.42 間隙比 $\sim S_{ra}, S'_{ra}$ 関係

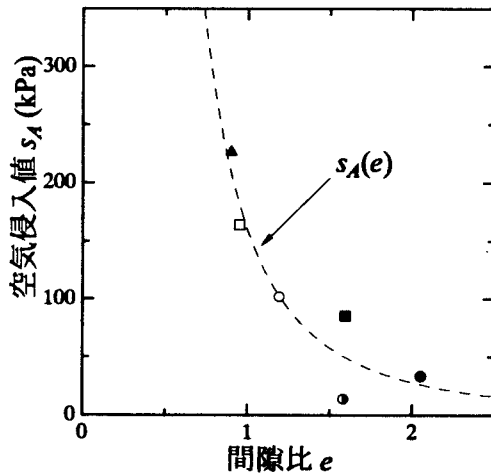


図-2.43 間隙比～空気侵入値関係

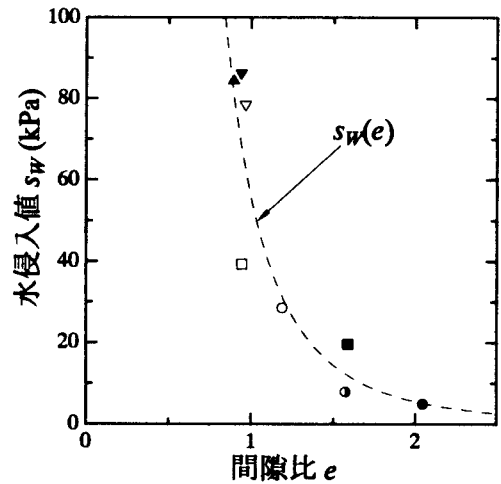


図-2.44 間隙比～水侵入値関係

中の s_m, s'_m がゼロになっているものは、少なくとも式(2.41)から得られる飽和度になる。

図-2.43, 44 は、それぞれ間隙比と空気侵入値, 水侵入値の関係を表している。間隙比の減少と共にどちらの値も小さくなっており、間隙比の関数として表せることが分かる。前節で示したように、既往の数値モデルは間隙孔の径をモデルに取り込んでいるが、ここでも、間隙径が間隙比に依存することを考えると説明がつく。この間隙比と侵入値の関係を表すために、簡単な毛管モデルを用いる場合がある。山口³⁾⁾は、直径 D の等粒径粒子がが間隙比 e で詰まっている場合の土の切り口での平均間隙径 r_m を、

$$r_m = \frac{\pi D \sqrt{e}}{8} \quad (2.44)$$

で表し、この間隙径に相当するサクション値を、

$$s = \frac{16T}{\pi D \sqrt{e}} \quad (2.45)$$

で表した。ここで、 T は水の表面張力である。この考え方は、間隙を円筒で仮定している。実際の間隙は図-2.45 に示すような粒子配置が3次的に連なったものとなり、空気侵入値ではその連続した間隙の最狭部に依存し、水侵入値は最拡部に依存することになる。そこで、図-2.46 に示すような粒子配列を考慮した毛管モデルを考える。ここで、最狭部の間隙径 r_{\min} を間隙比の関数で与える必要があるが、山口の平均間隙径と同じ次元の関数として、

$$r_{\min} = \frac{A}{\sqrt{e}} \quad (2.46)$$

ここで、 A は比例定数。間隙水がこの間隙孔から排除されるには、幾何学条件より、

$$s = \frac{2DT}{AD\sqrt{e} + A^2e} \quad (2.47)$$

のサクションが必要である。式(2.45), (2.47)を、

$$s = \frac{A}{\sqrt{e}} \quad (2.45)^*$$

$$s = \frac{1}{B\sqrt{e} + Ce} \quad (2.47)^*$$

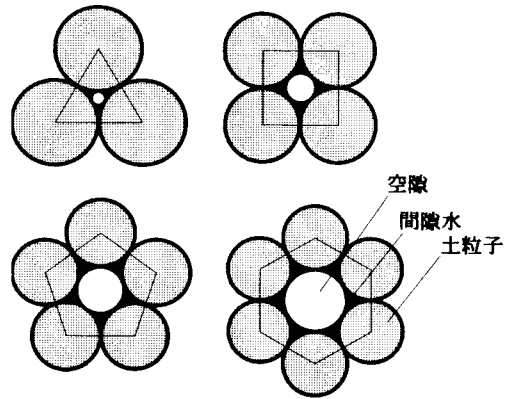


図-2.45 粒子配列による間隙孔の表現

と簡略化する。 A, B, C は形状パラメーター。図-2.47, 48 は、図-2.43, 44 を式(2.45)*, (2.47)* で近似したものである。式(2.47)*のくびれモデルで近似したものの方が実験値に良く一致して

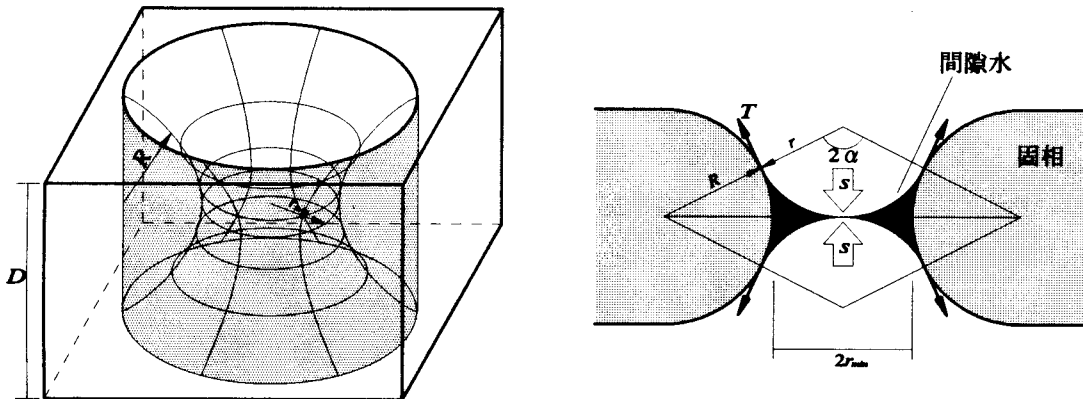


図-2.46 間隙くびれモデル

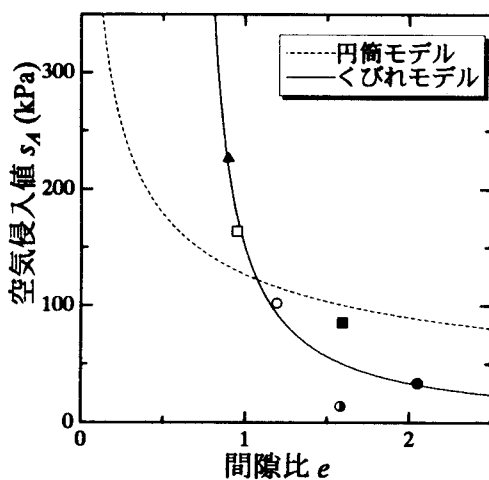


図-2.47 空気侵入値との比較

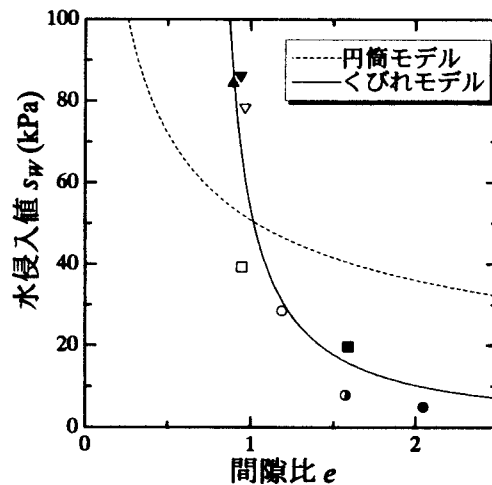


図-2.48 水侵入値との比較

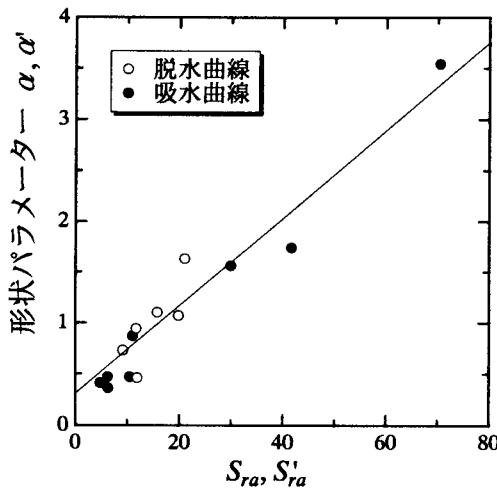


図-2.49 $S'_{ra} \sim \alpha, \alpha'$ 関係

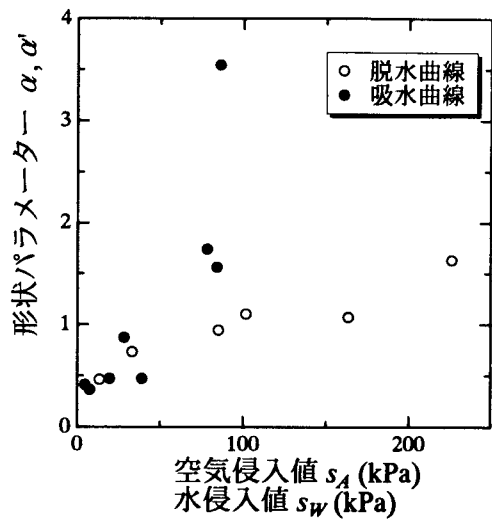


図-2.50 $s_A, s_w \sim \alpha, \alpha'$ 関係

いる。しかし、間隙径を間隙比の関数とする場合、モデルの単位体積によって関数形が異なることがあり、モデルとしての客観性に欠ける。実際、3次元の体積比である間隙比を間隙孔と直接結びつけるのは難しい。図-2.43, 44 中では、簡単な近似として次式に示すべき関数を用いて破線で示している。

$$s_A(e) = A \times e^{-B} \quad A = 160, B = 2.51$$

$$s_w(e) = A' \times e^{-B'} \quad A' = 56, B' = 3.35$$

次に、曲率を表すパラメーター α の検討を行う。図-2.49, 50 はパラメーター間の相関を表したものである。図-2.49 は脱水曲線または吸水曲線の S_{ra}, S'_{ra} と形状パラメーター α の関係である。先述した様に、 S_{ra}, S'_{ra} が式(2.41)から得られる S_{rc} 以下になることはないので、表-2.6 で S_{ra}, S'_{ra} がゼロとなっているものについては別途 S_{rc} を算出して S_{ra}, S'_{ra} としている。図-2.49 から、飽和度が高いほど、曲線の曲率が大きくなるということが読み取れる。図-2.50 は、脱水曲線または吸水曲線の空気侵入値、水侵入値と形状パラメーター α の関係であり、それぞれの侵入値が高いほど曲率が大きくなることを意味しているが、脱水曲線と吸水曲線で傾向が異なっている。これらは、曲線の曲率が他のパラメーターで決まることを表している。特に、脱水曲線を例にとると $e_{wa} = e_{wc}$ で唯一の値であるため、図-2.49, 50 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 S_{ra}, S'_{ra} に依存するとして図-2.49 の関係を用いる。

(2) 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル

ここまでで試験結果から得られた結論をまとめると、以下のようになる。

- 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。
- ② 土粒子表面にはマトリックサクショ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。
- ③ 間隙比が等しい場合、あるサクション、飽和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-2.51)。

以上のことに留意して水分特性曲線のモデル化を行った。

(a) 飽和状態からの脱水曲線

図-2.52 は、飽和状態からの脱水曲線のモデル化である。図-2.52(a)中の点線は、図-2.43 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。ここでは、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について考える。点 A_1 、 A_2 では、飽和状態にあるので間隙比と等価間隙比は一致している。サクションが増加すると、空気侵入値に至るまでは、飽和状態を保ち間隙比と等価間隙比は同じ値を示す。この間、サクションは負の間隙水圧として作用し、Terzaghi の有効応力を増加させるため、間隙比変化は飽和土の圧密理

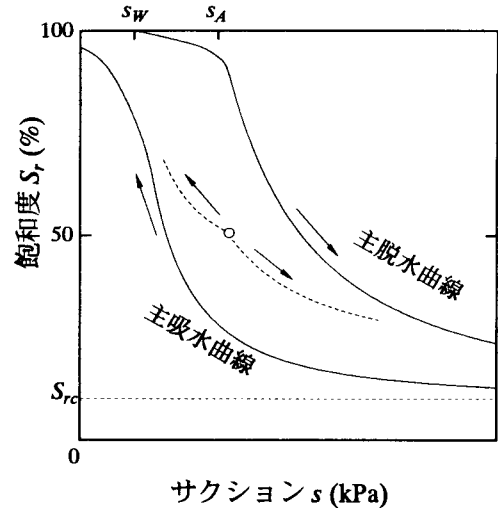
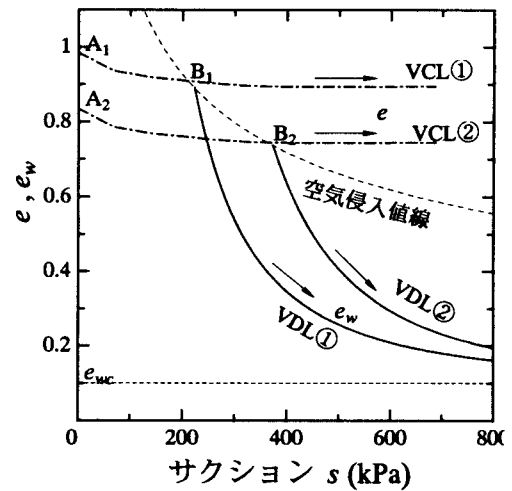
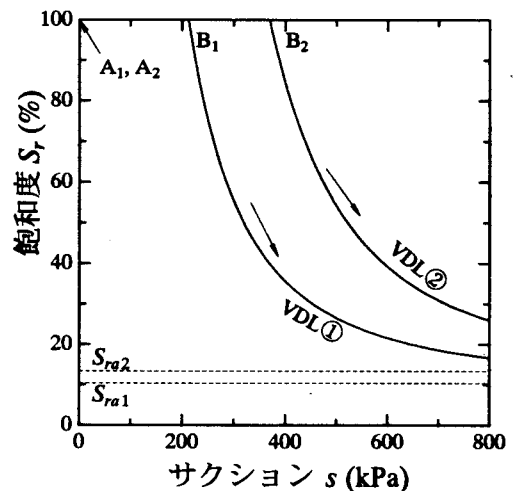


図-2.51 走査曲線の唯一性



(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

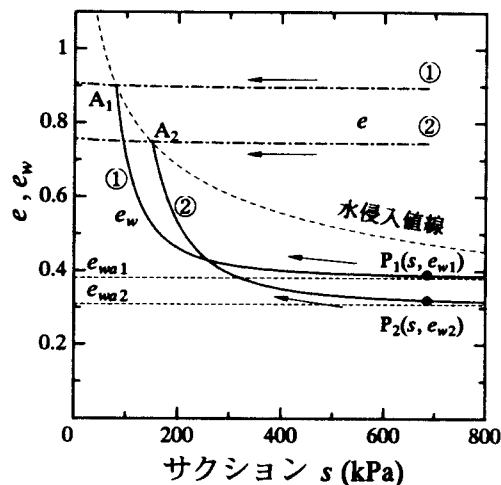
図-2.52 飽和状態からの脱水曲線

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に達すると、間隙水が排出され始め、等価間隙比が間隙比の線から逸脱する。ここで、初期の間隙比が小さいほど、空気侵入値線と高いサクシオン域で交差することになる(点 B_1, B_2)。そして、最終的に等価間隙比は、吸着水含水比を示す唯一の吸着水等価間隙比 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 と呼び、土固有の線として与えているが、この VDL は間隙比また正規・過圧密領域によっても異なる軌跡を描く。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。そのため、間隙比によって異なる VDL (VDL①, VDL②) を描く。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-2.51(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。

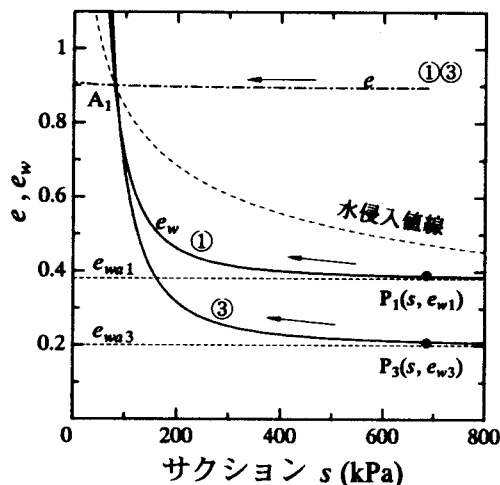
(b) 吸水曲線

図-2.53 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-2.44 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 e_{wc} が唯一の値を持たないため、次式に現在の含水状態 (s, e, e_w) を代入し、漸近等価間隙比 e_{wc} を求める必要がある。

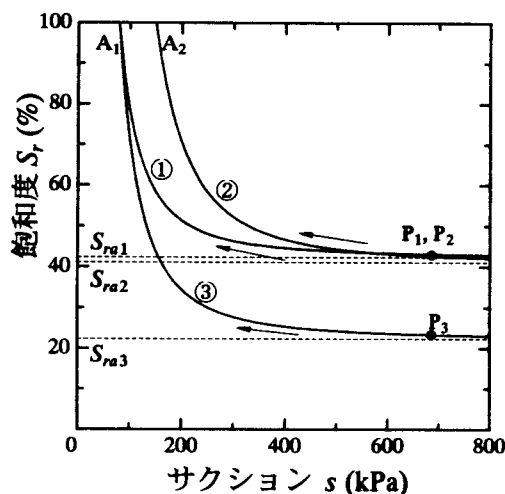
$$\frac{e_w - e_{wc}}{e - e_{wc}} = \left(\frac{s_w(e)}{s} \right)^{\alpha'} \quad (2.48)$$



(a) 間隙比の異なる吸水曲線



(b) 飽和度の異なる吸水曲線



(c) 飽和度で表した吸水曲線

図-2.53 吸水曲線のモデル化

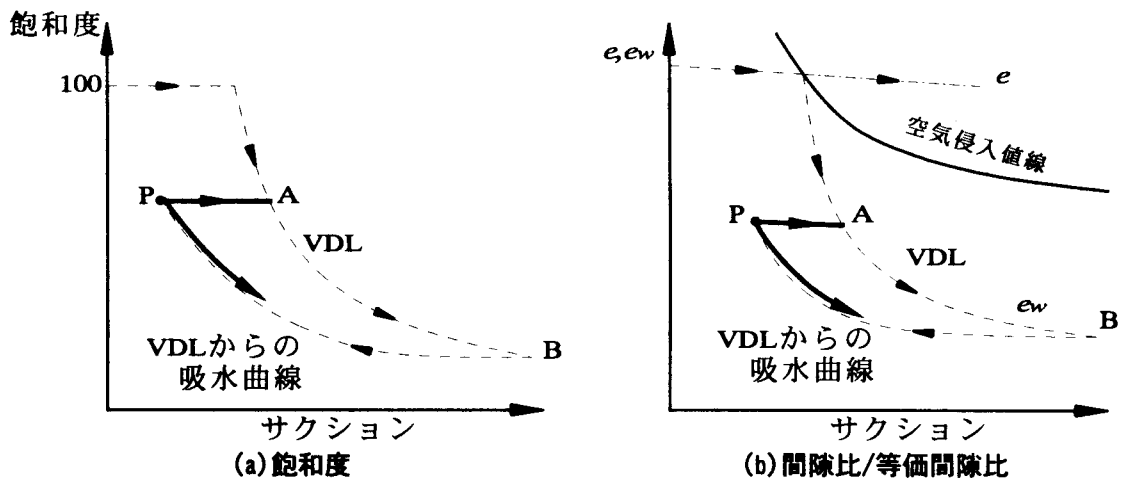
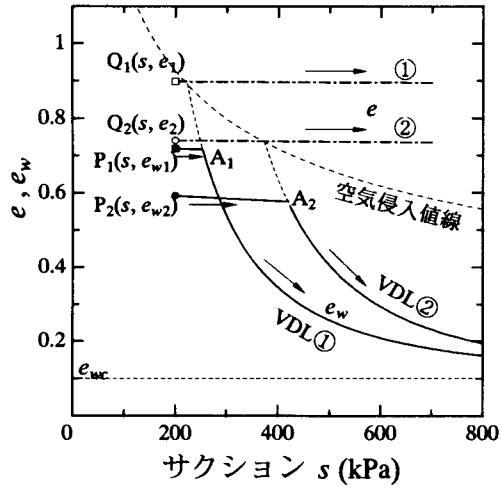


図-5.24 不飽和状態の表し方

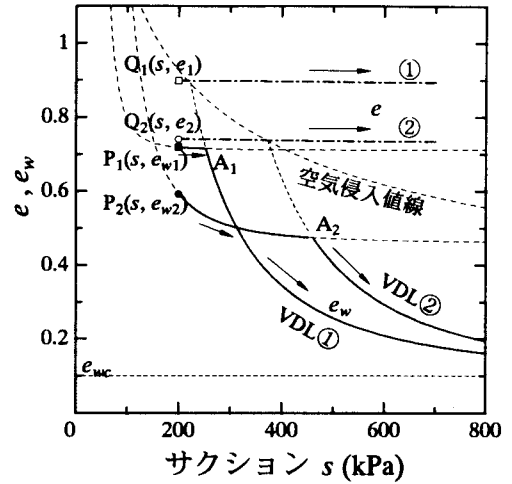
ここで、 $s_w(e)$ は間隙比の関数で表される水侵入値、 α' は吸水曲線の材料パラメーター、上添え字の*は供試体の初期状態を表している。ここで、土の初期状態として式(2.48)に (s^*, e^*, e_w^*) を代入し、 $s_w(e)$ と α' を図-2.44, 49より算出すれば、 e_{ms} を求めることが出来る。図-2.53(a)は、飽和度が等しく間隙比の異なる供試体の吸水曲線を表している。図-2.53(b)は、間隙比が等しく飽和度の異なる供試体の吸水曲線を表している。この場合、同じ水侵入値を持つ。図-2.53(c)は図-2.53(a), (b)を飽和度で表したものである。

(c) 不飽和状態からの吸水曲線

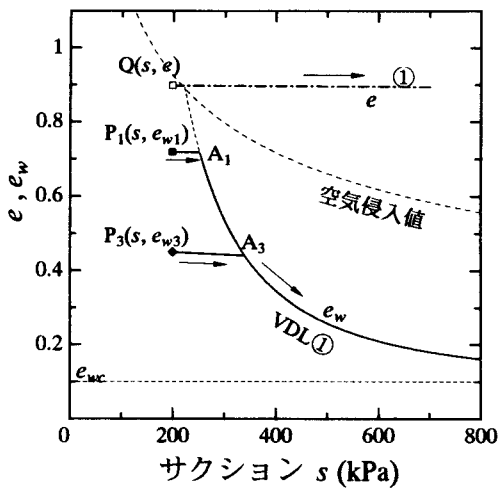
次に初期に不飽和状態にある供試体を考える。不飽和土の間隙水は、先述した様にバルク水とメニスカス水に分類することができる。土中の小さな間隙では土骨格を占めるバルク水が存在し、このバルク水膜の表面張力がサクシオンに抗う。不飽和状態では、大きな間隙のバルク水膜が破られ、メニスカス水で間隙が保持されている。初期に不飽和状態にある供試体の脱水曲線は、2.3節で示した供試体 b, c の様にS字型になるものもあれば、いきなり飽和度が減少するものもある。これは、間隙水の形態から説明できる。間隙水の形態がサクシオン履歴に依らず、現在のサクシオンと飽和度で決まるとすると、任意の不飽和状態は、飽和状態から始まる脱水曲線 VDL からの吸水曲線上にあると考えられる(図-2.54)。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



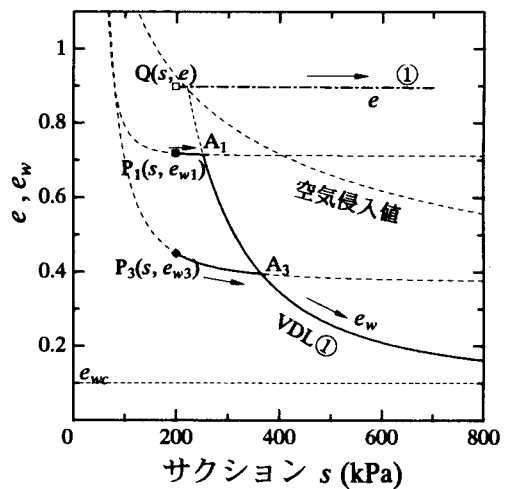
(a) 間隙比の異なる脱水曲線(メニスカス)



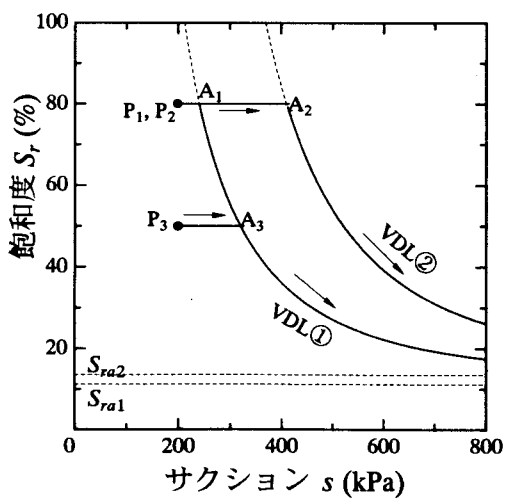
(b) 間隙比の異なる脱水曲線(バルク)



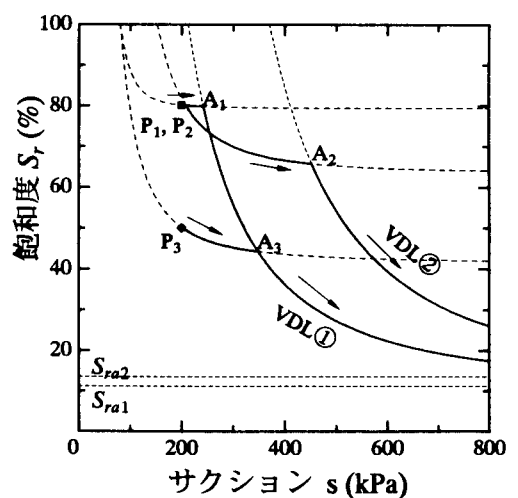
(c) 飽和度の異なる脱水曲線(メニスカス)



(d) 飽和度の異なる脱水曲線(バルク)



(e) 飽和度で表した脱水曲線(メニスカス)



(f) 飽和度で表した脱水曲線(バルク)

図-2.55 不飽和状態からの脱水曲線のモデル化

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、メニスカス水の膨張・収縮はあるものの飽和度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-2.55 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-2.55(a)(b)は初期の飽和度、サクシオンが等しく、間隙比の異なる2つの供試体である。点 Q_1, P_1 で表されている供試体は、同じ飽和度を持つ点 Q_2, P_2 で表された供試体よりも間隙比が大きいため等価間隙比も大きくなる。2つの供試体は間隙比の違いによって異なる空気侵入値(点 A_1, A_2)を示し、異なる VDL(VDL①, VDL②)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がないように、等価間隙比が変化する。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 に沿って等価間隙比が推移する。(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、みかけの先行サクシオンと供試体のサクシオンが大きく異なる点 Q_2, P_2 で表された供試体の、再脱水曲線が大きく異なることになる。

図-2.55(c)(d)は、同じ間隙比の2つの供試体の脱水曲線である。等しい間隙比を持つ不飽和状態の供試体は、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。

図-2.55(a)(b)および(c)(d)を飽和度で表したものが図-2.55(e)(f)である。

(3) モデルの適用

提案したモデルを実際の供試体に適用するには、式(2.48)において e_{wa} を算出しなければならない。しかし、式(2.48)中の α' は次式のように e_{wa} の関数となっており、 e_{wa} に関する非線型方程式を解く必要がある。

$$\alpha' = aS'_{ra} + b = a \frac{e_{wa}}{e^*} + b = a'e_{wa} + b$$

ここでは、式(2.48)を式(2.49)のように変形し、Newton-Raphson 法を用いて e_{wa} を求めた。

$$f(e_{wa}) = \left(\frac{S_w}{S^*} \right)^{a'e_{wa} + b} (e^* - e_{wa}) + e_{wa} - e_w^* = 0 \quad (2.49)$$

$$f'(e_{wa}) = \left[a'(e - e_{wa}) \ln\left(\frac{s_w}{s}\right) - 1 \right] \left(\frac{s_w}{s}\right)^{a'e_{wa}+b} + 1$$

$$e_{wa}^{(k+1)} = e_{wa}^{(k)} - \frac{f(e_{wa}^{(k)})}{f'(e_{wa}^{(k)})}$$

図-2.56 は、供試体 a に関する Newton-Raphson 法を用いた e_{wa} の導出過程を示している。図-2.57 は、提案している水分特性曲線モデルで3節の試験結果を表したものである。図-2.58 は、水分特性曲線を飽和度で表したものである。図中の一点鎖線は、飽和状態から描く脱水曲線 VDL を、実線は吸水曲線を表している。不飽和供試体の脱水過程では、メニスカス脱水モデルに従うと VDL に達するまでは飽和度が変化しない、バルク脱水モデルに従うと吸水曲線と一致することになるが、図(供試体 a, c, e)からは吸水曲線に近い挙動を示しており、バルク脱水モデルの方がよく一致している。サクシオン履歴が明確な供試体 B, C の結果から明らかなように、先行サクシオンと再脱水時のサクシオンの差が大きいくほど、再脱水曲線は傾きが大きくなることから、バルク脱水モデルの方が、実際の挙動をよく表していると言える。

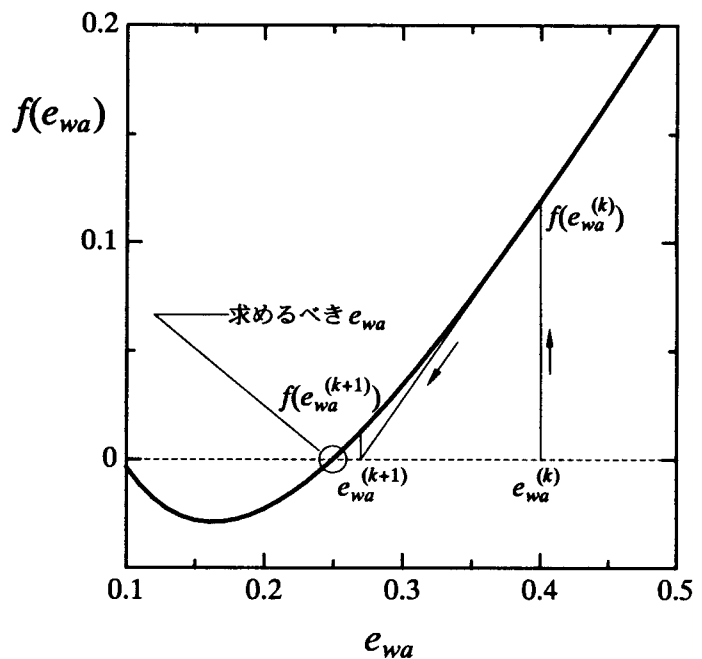
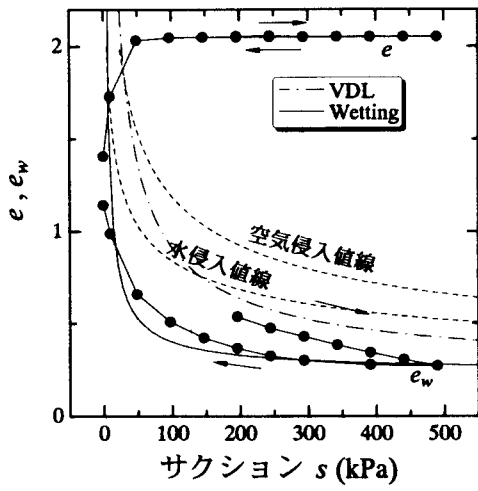
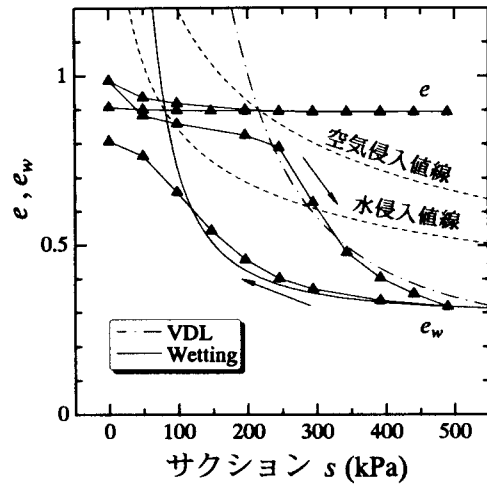


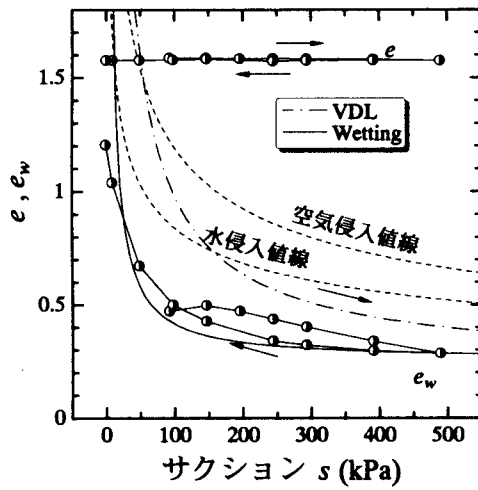
図-2.56 e_{wa} の求め方



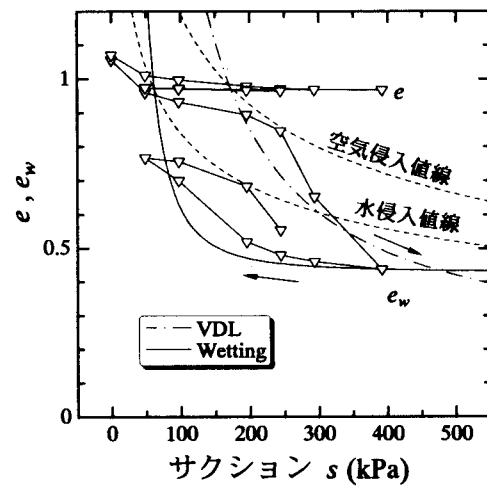
(a) 供試体 a



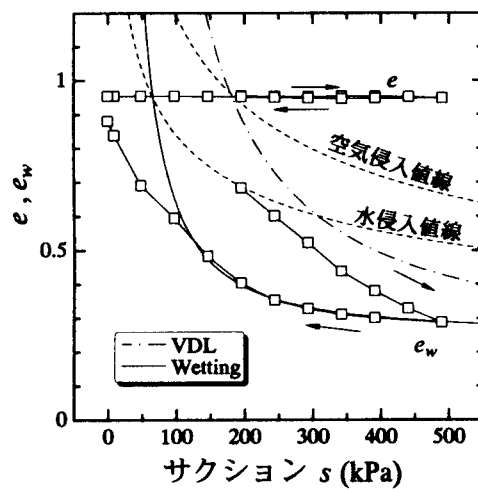
(d) 供試体 A



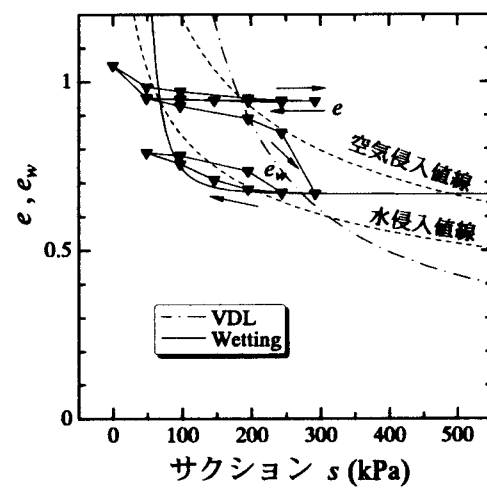
(b) 供試体 c



(e) 供試体 B

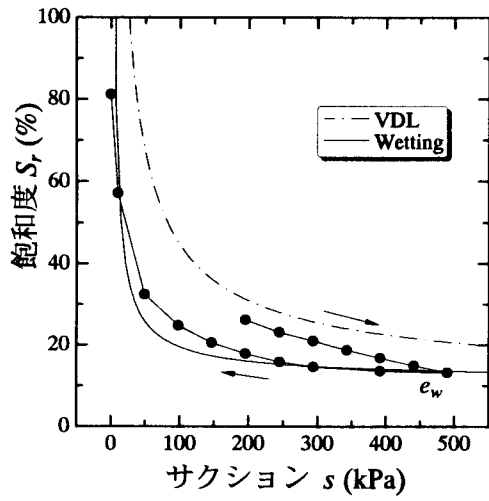


(c) 供試体 e

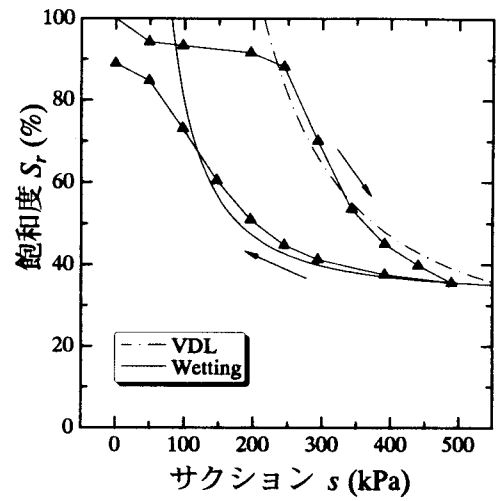


(f) 供試体 C

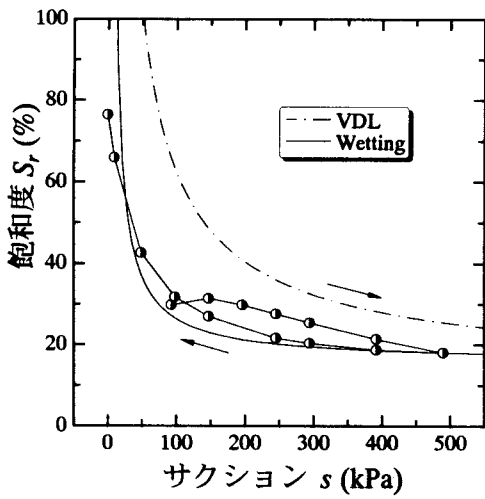
図-2.57 新しい水分特性曲線モデルの適用結果(等価間隙比)



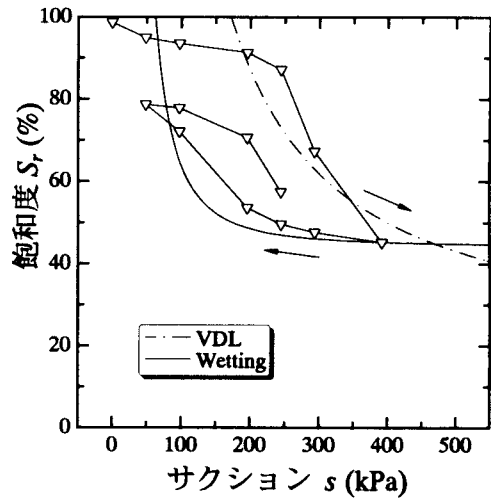
(a) 供試体 a



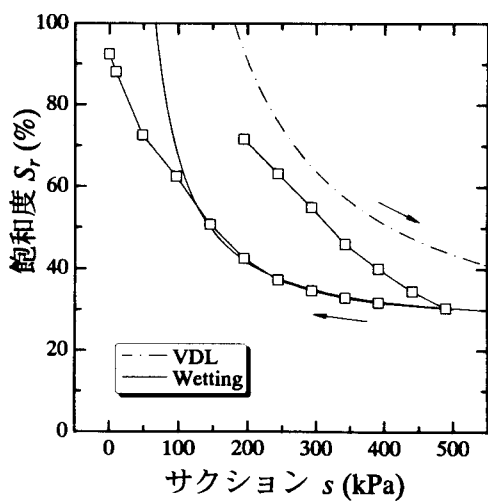
(d) 供試体 A



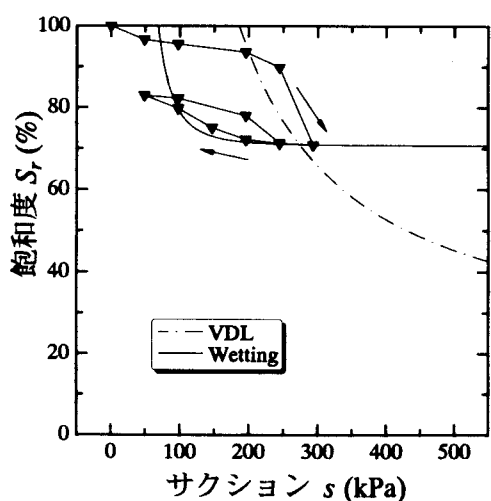
(b) 供試体 c



(e) 供試体 B



(c) 供試体 e



(f) 供試体 C

図-2.58 新しい水分特性曲線モデルの適用結果(飽和度)

2.5 水分特性曲線モデルの浸透問題への適用について

先にも述べたように、水分特性曲線を不飽和土構成モデルや浸透モデルに組み込む必要がある。不飽和土構成モデルへの適用は後で述べるとして、前節で提案したヒステリシスを考慮した水分特性曲線モデルの浸透モデルへの適用を考える。

不飽和土の浸透問題に対しては、Darcy の式を不飽和領域まで拡張し、連続の式を用いた次の浸透の支配方程式がよく用いられる³²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(s) \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(s) \frac{\partial s}{\partial z} + k(s) \right) = (C(s) + \beta S_s) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (2.50)$$

ここで、 s はサクション、 $k(s)$ は不飽和透水係数、 $C(s)$ は比水分容量であり $C(s) = d\theta/ds$ で示される。 θ は体積含水率であり、 $C(s)$ は圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合を表す。 S_s は比貯留係数で圧力水頭の変化によって土塊から水が絞り出される係数である。 β は、飽和領域において $\beta = 1$ 、不飽和領域において $\beta = 0$ として取り扱う。これは不飽和領域においては圧力水頭の変化によって土塊が圧縮されないと仮定していることによる。

式(2.50)中で実際に水分特性曲線が必要となるのは、 $C(s)$ に関する部分である。前節で提案している水分特性曲線は Brooks and Corey 式を適用しているため、 $C(s)$ は次式で表される。

$$C(s) = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d}{ds} \left[\left(\frac{s_b}{s} \right)^\alpha \right] = -\alpha \frac{(s_b)^\alpha}{s^{\alpha+1}} \quad (2.51)$$

ここで、脱水曲線に比べて、吸水曲線では s_b が異なるほか、 α が e_{wa} の関数になっている。つまり、ヒステリシスを考慮しない場合とは予測結果が大きく異なることになる。

不飽和透水係数 $k(s)$ を実際に求めるのは困難であり、水分特性曲線を用いて間接的に予測する手法がよく用いられる。水分特性曲線は、土の間隙径分布の情報を表現しており、複雑な土の間隙を毛細管の集まりと考えると、不飽和透水係数を推定するモデルがいくつか提案されている。Mualem³³⁾ は、単位体積中に含まれる間隙径 r の毛細管の密度分布を $f(r)$ で与え、体積含水率 θ を次式で与えた。

$$d\theta = f(r) dr \quad (2.52)$$

$$\theta(R) = \int_{R_{\min}}^R f(r) dr \quad (2.53)$$

ここで、 R は間隙径であり、 R_{\min} は最小の間隙径を示す。 $\theta(R)$ は間隙径 R までの間隙すべてが間隙水で満たされた場合の単位体積含水率である。飽和状態の体積含水率 θ_{sat} は次式で与えられ

る。

$$\theta_{sat} = \int_{R_{min}}^{R_{max}} f(r) dr \quad (2.54)$$

Mualemは別に図-2.59に示す毛細管モデルを提案し、次式の関係式を与えた。

$$l_1/l_2 = r/\rho \quad (2.55)$$

式(2.55)を用いて飽和状態に対する不飽和状態の透水係数、比透水係数を次式のように求めた。

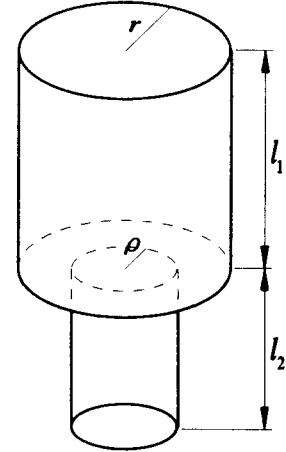


図-2.59 Mualemの透水間隙モデル

$$K_r(\theta) = S_e^n \frac{\int_{R_{min}}^R rf(r) dr \cdot \int_{R_{min}}^R \rho f(\rho) d\rho}{\int_{R_{min}}^{R_{max}} rf(r) dr \cdot \int_{R_{min}}^{R_{max}} \rho f(\rho) d\rho} = S_e^n \left[\frac{\int_{R_{min}}^R rf(r) dr}{\int_{R_{min}}^{R_{max}} rf(r) dr} \right]^2 \quad (2.56)$$

ここで、 $K_r(\theta)$ は比透水係数、 S_e は有効飽和度、 n は水分量と屈曲率に関するパラメーターである。式(2.54)と式(2.56)に毛管力の式として $r = C/s$ を代入すると、次式のように変形できる。

$$K_r(\theta) = S_e^n \left[\frac{\int_0^\theta d\theta/s}{\int_0^{\theta_{max}} d\theta/s} \right]^2 \quad (2.57)$$

ここで、水分特性曲線は $s = s(\theta)$ の形で用いられている。式(2.57)にBrooks and Corey式(式(2.3))を適用した場合、

$$K_r(\theta) = \{S_e(\theta)\}^{3+2/\lambda} \quad (2.58)$$

となり、Van Genuchten式(式(2.5))を適用した場合、

$$K_r(\theta) = [S_e(\theta)]^{1/2} \left\{ 1 - (1 - [S_e(\theta)]^{1/m})^m \right\}^2 \quad (2.59)$$

となる。ここで、ロジスティック曲線式(式(2.9))などのように、 $s = s(\theta)$ が積分不可能な場合は、式(2.57)を用いることができない。Mualemは、このように透水係数を体積含水率の関数として求めているが、式(2.50)のように簡単のため、透水係数をサクシヨンの関数として与えることも多い。ヒステリシスを考慮しない場合、式(2.57)から得られる透水係数は変わらないが、ヒ

ステリシスを考慮すると同じ体積含水率(または飽和度)でも,脱水曲線と吸水曲線で透水係数が異なることを示す.しかし, Mualem の不飽和透水係数の概念は間隙水が存在する毛管にのみ流れが生じるというものであり,水分特性曲線そのものを透水係数と結びつけたものではない.つまり,水分特性曲線にヒステリシスがあっても透水係数にヒステリシスは存在しないことになる.先に示した Mualem の提案している水分特性曲線の走査曲線モデルでは,吸水過程では間隙水が外部につながっていないとしていることから,この透水曲線モデルとは矛盾を生じている.この矛盾は,間隙が毛管方向には独立しており,他の毛管とは連続していないという仮定に無理があることを表している.やはり,間隙は土塊として捕らえるべきであり,脱水過程では連続する小さな間隙に依存し,吸水過程では大きな間隙に依存すると考えるのが適当であろう.しかしながら, Mualem の式は定性的には十分に不飽和透水係数を予測し得る.また,先に示した神谷の研究より,粒度分布と水分特性曲線の脱水曲線から得られた間隙径分布は相似を示すことから以下のことが考えられる.飽和状態からの脱水過程では,サクシジョンの大きさに応じた間隙保水状態になる.つまり,サクシジョン荷により大きな間隙から順に間隙水が排出されていく.しかし,吸水過程ではインクピン効果の影響もあり,サクシジョン除荷により小さな間隙から先に間隙水が回復していくとはいえない.間隙径分布とサクシジョンを結びつけることができないのだと考えられる.以上のことより,水分特性曲線から透水係数を算出する場合には脱水曲線のパラメーターを用い,得られた不飽和透水係数は体積含水率(または飽和度)の関数として記述するべきである.透水係数に関してはヒステリシスを考慮する必要はないと言える.

参考文献

- 1) Richards, L. A. : Physical condition of water in soil, method of soil analysis, *American Society Agronomy Monograph 9*, pp.128-152, 1965.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 竹中肇ら : 関東ロームの自由水分, 農土研別冊 7, pp.61-67, 1963.
- 6) 飯竹重夫 : 関東ロームのコンシステンシー特性について, 土木学会論文集, No.277, pp.85-98, 1978
- 7) Croney, D. and J. D. Coleman : Soil structure in relation to soil suction, *Soil Science*, Vol.5, pp.75-84, 1954.
- 8) Brooks, R. H. and A. T. Corey : Properties of porous media affecting fluid flow, *Proc. ASCE 92. IR(92)* pp.61-88, 1966.
- 9) Van Genuchten : A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 10) 竹下祐二, 安井克豊, 河野伊一郎 : 遺伝的アルゴリズムを用いた多層滞水層地盤における揚水試験データの逆解析方法, 地下水学会誌, 第 39 巻, 第 4 号, pp.313-325, 1997.
- 11) 竹下祐二, 中澤一麿, 福田大樹, 河野伊一郎 : 遺伝的アルゴリズムを用いた室内不飽和透水試験による不飽和浸透特性値の非定常算定法, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.191-201, 1999.
- 12) 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.
- 13) Gupta, S. C. and W. E. Larson : Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density, *Water Resources Research*, Vol.15, No.6, 1979.
- 14) Ghosh, R. A. : Estimation of soil-moisture characteristics from mechanical properties of soils, *Soil Science*, Vol.130, No.2, 1980.
- 15) Araya, L. M. and J. F. Paris : A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Science Society American Journal*, Vol.45, 1981.
- 16) Harverkamp, R. and J. Y. Parlange : Predicting the water-retention curve from particle-size distribution : 1. Sandy soils without organic matter, *Soil Science*, Vol.142, No.6, pp.325-339, 1986.
- 17) Parlange, J. Y. : Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves, *Water resources research*, Vol.12, No.2, pp.224-228, 1976.

- 18) 神谷浩二 : 砂質土の間隙径分布の評価とその利用, 岐阜大学博士論文, 1999.
- 19) Fredlund, D.G. and A. Xing : Equation for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532, 1994.
- 20) Mckee, C. R. and A. C. Bumb : The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies, *Proc., Hazardous Materials Control Research Institute National Conf.*, pp.50-58, 1984.
- 21) Roger, B. C. and G. M. Hornberger : Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, Vol.14, No.5, pp.601-604, 1978
- 22) Croney, D. and J. D. Coleman : Pore pressure and suction in soils, *Proc. of Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils*, pp.31-37, 1961
- 23) Fredlund, D. G. : Bringing unsaturated soil mechanics int engineering practice, *Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, pp.1-35, 1998.
- 24) Fredlund, M. D., G. W. Wilson and G. D. Fredlund : Estimation of hydraulic properties of an unsaturated soil using a knowledg-based, *Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, pp.479-484, 1998.
- 25) Vachaud, G. and J. L. Thony : 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.
- 26) Toll, G. D. : A conceptual model for the drying and wetting of soil, *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.2, pp.805-810, 1995.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) Mualem, Y. : A conceptual model of hysteresis, *Water Resources Research*, Vol.10, No.3, pp.514-520, 1974.
- 30) 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.
- 31) 山口柏樹 : 土質力学「第 2 章 不飽和土の性質」, pp.33-52, 1969.
- 32) Freeze, R. A. : Three-dimensional transient saturated-unsaturated flow in groundwater basin, *Water Resources Research*, Vol.7, No.2, pp.347-366, 1971.
- 33) Mualem, Y. : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.

第3章 不飽和土の強度特性とサクシオン応力 p_s

第1章で示したように、飽和土の場合、有効応力で挙動を記述すれば排水条件に拘わらず、同じ変形強度特性が得られる。非排水条件では体積変化が生じないとして、土内部の有効応力経路も予測することができる。しかし、不飽和土の場合、間隙空気が圧縮性であるため、排水条件だけでなく排気条件も考慮しなければならない。非排気・非排水条件下では、3相混合体としてその各相の圧縮係数より、内部で発生する間隙空気圧および間隙水圧が決まる。この場合、間隙空気の状態方程式と、間隙水への溶解を考慮すれば平衡状態での各相の分応力を求めることができる。多くの場合、間隙空気は大気圧へと開放されており、排水条件による変形強度特性の違いを把握することが必要となる。

図-3.1 は、不飽和土の排水三軸圧縮試験結果である。黒塗りのプロットはサクシオン履歴がなく、白抜きのプロットは一度サクシオンを490(kPa)にした後、所定のサクシオンまで除荷し、その後、等方応力を加え、平均主応力 p (実質応力)、サクシオン s とも一定に保ち、ひずみ制御でせん断を行っている。水分特性曲線のヒステリシスを考慮せず、不飽和土の有効応力をサクシオンのみの関数とした場合、同じサクシオン値を持つ2シリーズの試験結果は同じになるはずである。しかしながら、変形はもちろん強度も異なっており、水分特性曲線のヒステリシスが不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼしているのが分かる。図-3.2 は、主応力差のピーク点での応力状態をまとめたものである。ここで用いられている試料は飽和状態でもせん断試験中に膨張するため、飽和土に関して主応力差ピーク点での応力状態を外挿した直線が

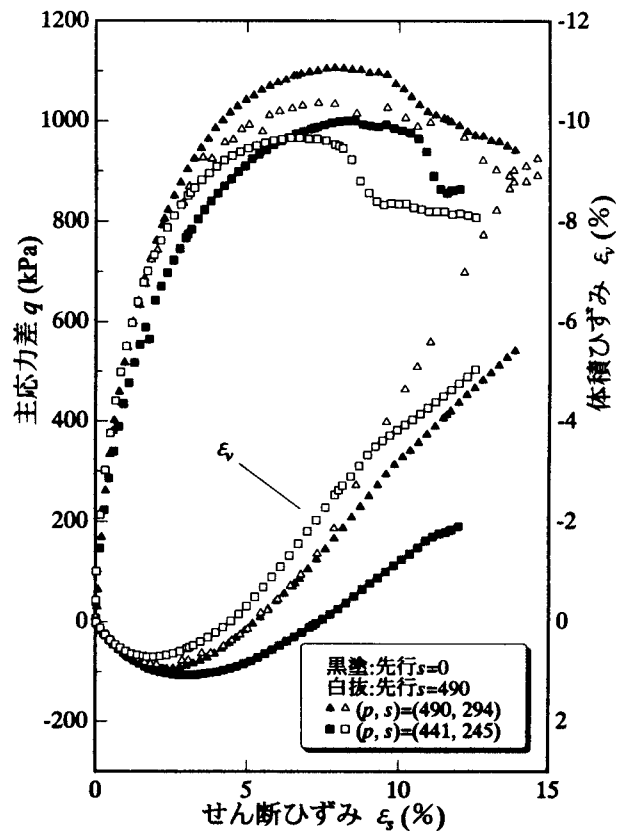


図-3.1 排水三軸圧縮試験中の不飽和土の応力～ひずみ関係

原点を通っていない。第1章で述べたように、軽部らは限界状態についてサクション応力 p_s を用いることによって、飽和土と同じ限界状態線が描けることを示しているが、図-3.2(b)では飽和度の低い白抜きのプロットが比較的高い強度を示す。この理由は、図-3.1 から説明できる。同じサクション値でも飽和度の低い供試体ほど、正のダイレイタンス(膨張)が卓越している。ピーク強度に関しては、ダイレイタンス特性に大きく依存し、膨張量が大きい供試体ほど強度

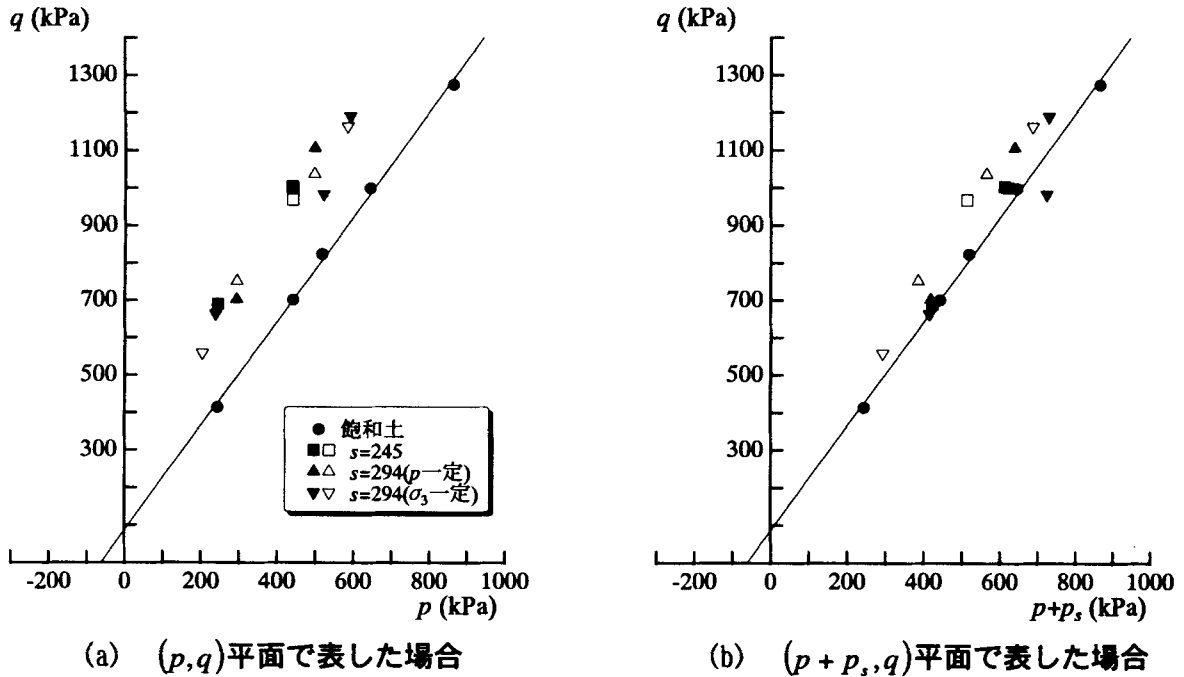


図-3.2 主応力差ピーク時の応力状態

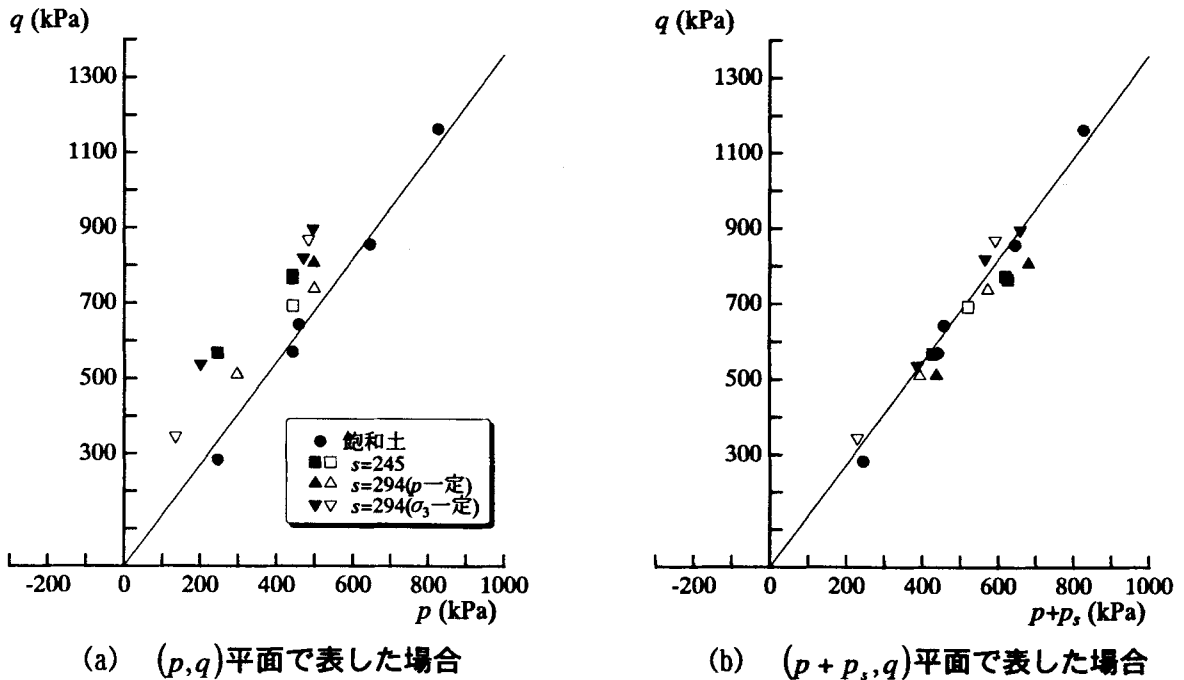


図-3.3 体積最大圧縮時の応力状態

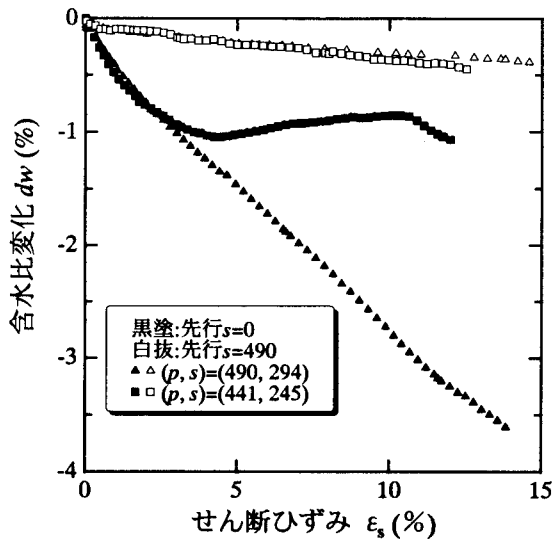


図-3.4 せん断中の含水比変化

が高く現れるため、限界状態での応力状態を表すためにはダイレイタンスの影響を取り除いた応力状態で比較検討しなければならない。そこで、図-3.3では、体積変化量がゼロとなる体積最大圧縮点での応力状態を表している。図-3.3(a)より、飽和土の応力状態を外挿した線が応力の原点を通っている。 $p + p_s$ で整理した図-3.3(b)では、サクシオン、飽和度に拘わらず全ての供試体が一本の限界状態線上にあり、軽部らの理論の正当性が確認できる。

図-3.4は、せん断中の含水比変化を表している。不飽和土中では骨格変化と間隙水の吸排水

が一致しないが、図-3.1で全ての供試体が最終的に膨張しているにも拘わらず、含水比は減少しており、吸排水方向が異なっている。また、飽和度の高い供試体では含水比変化が不安定になっている。非排水条件下ではこれらの排水挙動が間隙水圧の挙動となるため、供試体の初期状態によってサクシオンの変化特性が異なることを表している。

本章では、不飽和土の非排水強度を検討する。まず、排気・非排水条件下で三軸圧縮試験を行い、その変形強度特性とともにサクシオン変化を考察する。次に、最も汎用的に用いられている一軸圧縮試験を不飽和土に適用した場合の強度評価について検討する。

3.1 不飽和土の排気・非排水三軸圧縮試験

(1) 試料および試験方法

用いた試料は市販の No.5 クレーであり、先に示した排水試験で用いている試料と同じである。試料物性を表-3.1 に示す。先述したように試料は、飽和状態でもせん断中に正のダイレイタシーを生じる。粉末の No.5 クレーに液性限界の 2 倍の水を加えスラリー状態にしたものを、一次元圧密容器に入れ、上載圧 $\sigma_v = 313.6(\text{kPa})$ まで段階的に予圧密を行いブロックサンプルとした。このブロックサンプルを直径 35mm、高さ 80mm に成形し、飽和供試体として不飽和土用の三軸試験機(図-3.5)に設置した。

不飽和土用三軸試験機は拘束圧および軸圧だけでなく供試体内の空気圧を独立に制御できるようになっている。供試体上部の载荷キャップには、ポリフロンフィルターを貼り付けており、供試体から上部供給空気圧経路への間隙水の漏洩を防いでいる。ペDESTAL 部にはセラミックディスク(AEV500(kPa))が設けられている。セラミックディスクを飽和させると、供試体内に作用させている間隙空気圧は、セラミック細孔で発揮される表面張力のためセラミックディスクを透過することはできない。しかしながら、供試体中の間隙水はセラミックディスクを介してピュレットへと連続しているため、ピュレットで供試体からの排水量を測定することができる。また、

表-3.1 試料の材料特性

G_s	w_p	w_L	I_p
2.70	29.6%	43.0%	13.4

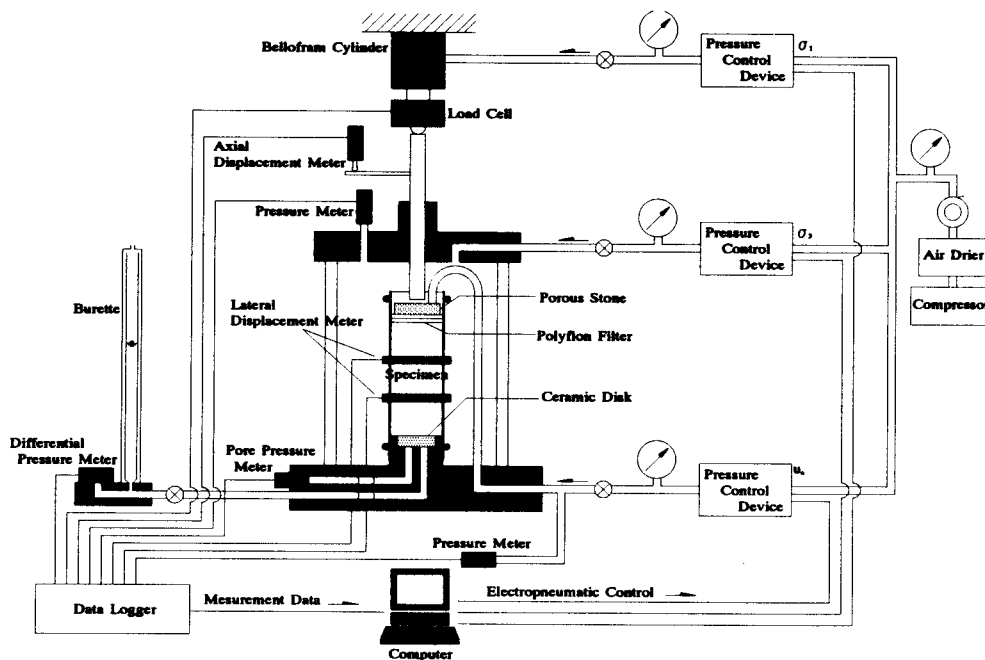


図-3.5 不飽和土用三軸試験機

表-3.2 応力履歴およびせん断開始時の供試体初期状態

供試体	サクシヨン履歴 (kPa)	せん断中の応力条件		せん断開始時の供試体状態		
		p (kPa)	u_a (kPa)	間隙比	含水比 (%)	飽和度 (%)
I-1	0→245	245	245	0.959	28.84	81.22
I-2	0→294→48→245	245	245	0.919	23.06	67.80
I-3	0→392→48→245	245	245	0.950	19.65	55.87
I-4	0→490→245	245	245	0.975	13.54	37.51
II-1	0→245	441	245	0.905	27.67	82.62
II-2	0→490→245	441	245	0.920	13.92	40.86
III-1	0→294	245	294	0.923	21.03	61.55
III-2	0→294	441	294	0.881	20.64	63.24

排水経路には間隙水圧計が設けられており、非排水状態では、与えた間隙空気圧と測定された間隙水圧の差がサクシヨンとして測定できるようになっている。

試験は、まず飽和供試体に表-3.2 に示すようなサクシヨン(間隙空気圧)履歴を与えて不飽和化させ、所定の拘束圧(実質応力)までセル圧を増加させる。このサクシヨン載荷過程と等方圧縮過程は、排水条件で行い十分に定常状態になっていることを確認しながら次の応力段階へと進んだ。その後、非排水状態で、間隙空気圧を保ったまま p 一定せん断を行った。表-3.2 中には、せん断開始時の供試体状態およびせん断中の応力条件も示されている。

(2) 試験結果および考察

(a) 非排せん断中の不飽和土の体積変化および間隙水圧変化

図-3.6, 3.7 は、非排水せん断中の応力～ひずみ関係である。図-3.6 は、 $p = 245(\text{kPa})$, $u_a = 245(\text{kPa})$ で非排水せん断したときの、応力～ひずみ関係および間隙水圧の変化である。飽和度によって、間隙水圧の発生の仕方が異なるのがわかる。飽和度が高い供試体は、せん断初期に、体積圧縮とともに間隙水圧が増加し、体積膨張とともに間隙水圧は消散している。これは飽和土と同じ挙動である。しかし、せん断ひずみが進行すると、主応力差がピークを迎える辺りから、体積は膨張し続けているにも拘わらず、間隙水圧が再び上昇傾向を示すようになる。飽和度が低くなるにつれて、間隙水圧の変化量も小さくなっていくが、いずれも体積最大圧縮点および主応力差がピークとなる辺りで変曲点をもつことが確認できる。このような挙動は土塊内の間隙水分布の影響を受けていると考えられる。間隙がバルク水で占められている土骨格では、骨格の変形をバルク水が受け持つために圧縮の際には間隙水圧が増加し、膨張の際には間隙水圧が消散する。しかし、やがてこの土骨格の膨張が顕著になってくると、バルク水がキャピテーションによりその形態を保持できなくなるため、体積膨張への依存性がなくなるのだと考えられる。一方、メニスカス水で保持された土骨格は、バルク水が存在する間隙よりも骨格として安定状態にある。また、せん断変形を受けてもメニスカスの形状を保ち、骨格の体積変化による影響は少ないと考えられる。土全体としては、このバルク水とメニスカス水の挙動の和が現れるが、間隙水圧の変化はバルク水量に支配されると考えられる。つまり、飽和度が高くバルク水を多く含む供試体は

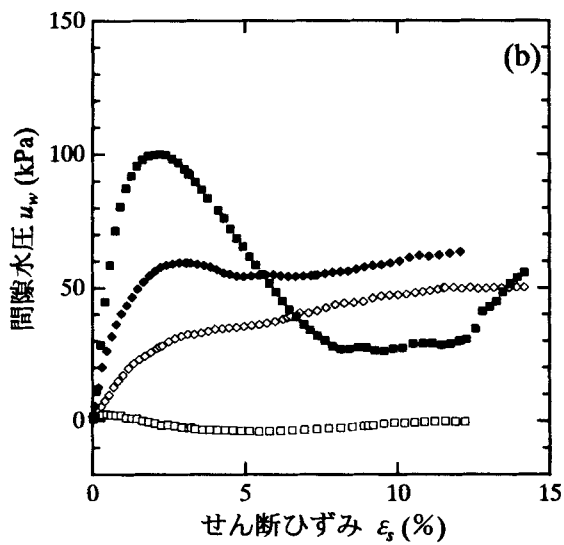
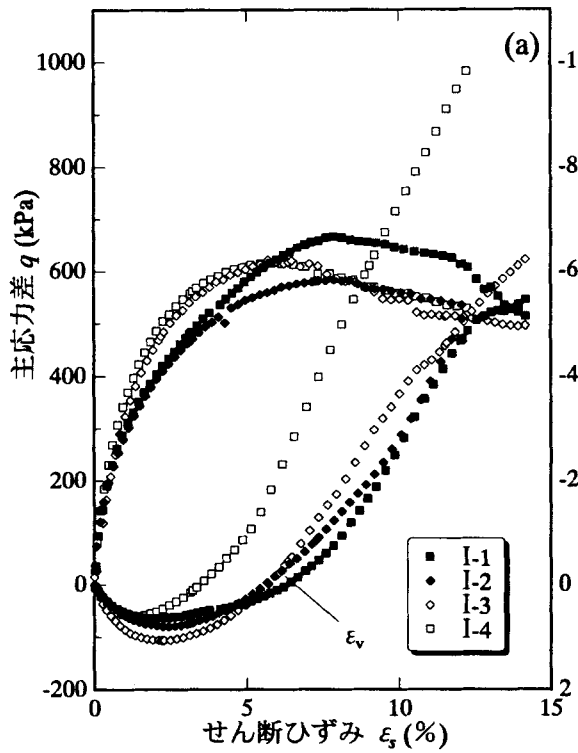


図-3.6 Iシリーズの応力～ひずみ関係および間隙水圧変化

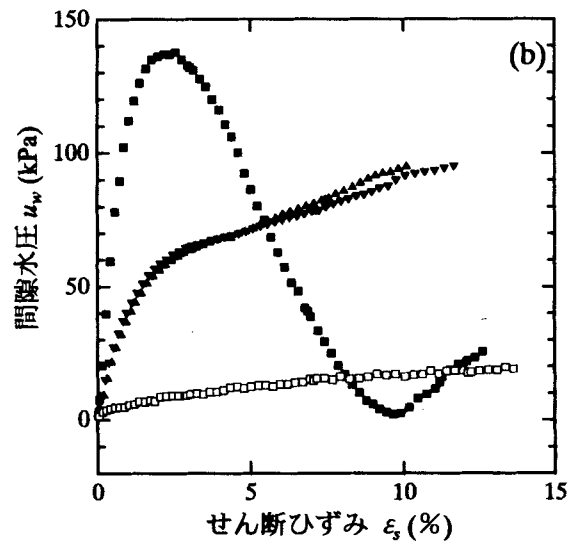
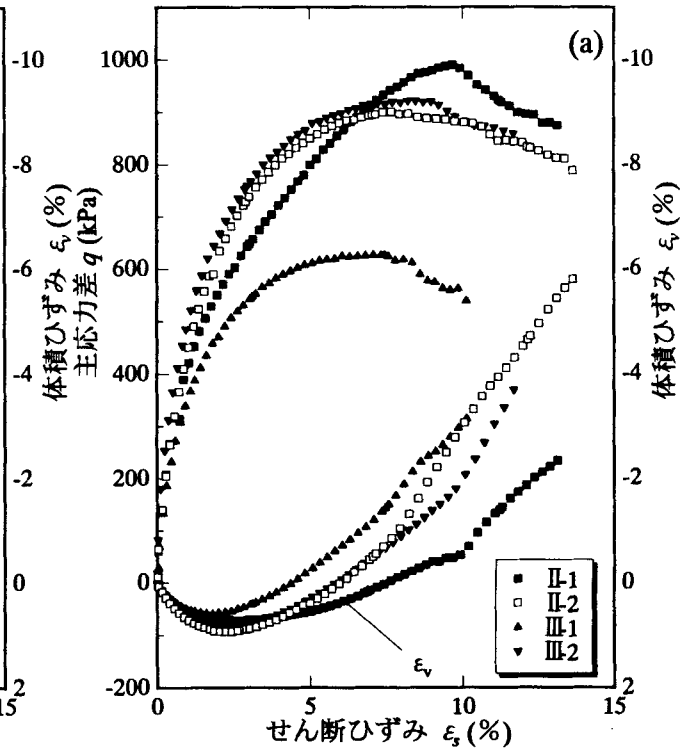


図-3.7 II, IIIシリーズの応力～ひずみ関係および間隙水圧変化

ど、先述したバルク水の挙動が顕著に表れるのだと考えられる。

既存の定サクション下での排水試験結果では、飽和度が高い供試体ほどせん断初期に体積が圧縮し、その後の膨張量も小さいという結果であった。これは、式(1.52)の拘束圧として作用するバルク応力が、飽和度とサクションの関数となっていることから説明できる。同じサクション値でも飽和度が高いほどバルク応力が大きくなり、拘束圧が発揮されるという理論に一致する。一方、本研究での非排水試験では、I-1→I-2→I-3と飽和度が低くなっているにも拘わらず圧縮量が増加している。これは、飽和度の高い供試体ほど、せん断中にサクションが減少し結果として式(1.52)のバルク応力が小さくなるからである。しかし、膨張量に関しては飽和度の低い供試体ほど大きくなり、従来の試験結果に一致し、式(1.52)を満たさない。先述したように、せん断が進み体積膨張が始まると、バルク水がその形状を保てず、バルク応力が発揮できなくなり、メニスカス応力によって骨格を保持しようとする作用が卓越してくるのだと考えられる。メニスカス応力は、メニスカス水の割合が同じであれば、サクション値に依存するので、せん断による間隙水圧の変化が小さい、つまり低い飽和度の供試体ほど剛性が保たれるのだと説明できる。図-3.7は、II、IIIシリーズの結果を表している。IIシリーズはIシリーズに比べて、実質応力が大きいせん断試験を表しており、I-1とII-1、I-4とII-2が対応している。いずれも拘束圧として作用する実質応力が大きいので強度が大きくなるとともに、体積圧縮量が大きく体積膨張が小さく抑えられている。同様に得られる間隙水圧変化も、拘束圧が大きくなっているため、大きく変化しているのが確認できる。また、IIIシリーズはせん断開始時のサクション値が異なる試験結果である。III-1とIII-2は拘束圧として加えている実質応力の異なる試験結果であるが、I-1とII-1のような明確な間隙水圧変化の違いは見られない。これは、体積変化にも見られるようにサクション値が高く、拘束圧として作用するサクションの割合が高いため、実質応力の差が比較的現れなかったのだと考えられる。また、IIIシリーズの供試体は表-3.2で見える限り、I-2の供試体と飽和度が近い。特にIII-1とI-2は、せん断開始時のサクション値が異なる供試体であるが、飽和度が低いIII-1の供試体の方が大きな間隙水圧が生じるのは興味深いデータである。これに関しては、飽和度が同じでも間隙水分布が異なり、外部応力に対し反応するバルク水成分の割合が異なるのだと考えられ、次章で検証を行う。

(b) 非排水せん断中の水分特性曲線変化

図-3.8はせん断試験中の水分特性曲線を表している。図中には第2章で提案された理論脱水曲線および吸水曲線が描かれている。この理論曲線は外力を一定に保った状態でサクションだけを独立に変化させた場合の水分特性曲線である。理論の脱水曲線に関しては、'Virgin Drying Line'を表しており、最も湿潤側の脱水曲線である。図-3.8(b)に関してはそれぞれの供試体の間隙比が大きく異なるために、吸水曲線のみ表した。圧縮段階では理論の吸水曲線に一致しているのが

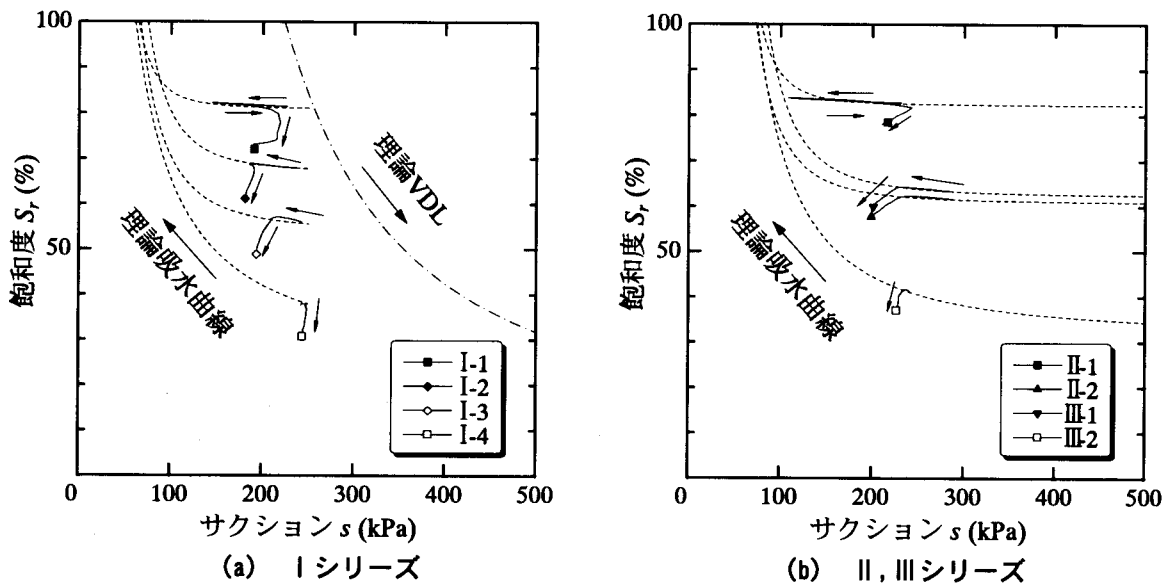


図-3.8 せん断中の水分特性曲線

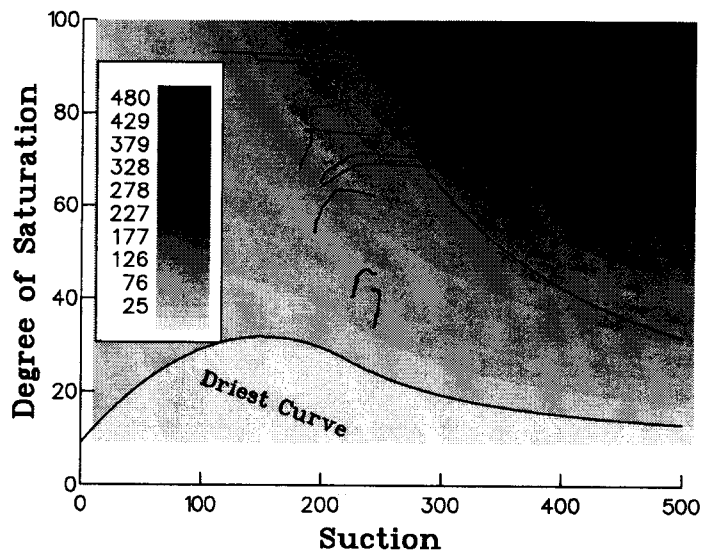


図-3.9 水分特性曲線と p_b 分布

分かる。体積が膨張に転じると、吸水曲線に沿うような脱水曲線を示しており、第2章のバルク脱水モデルに一致している。しかし、体積膨張が顕著になってくると、サクシオン変化による水分特性曲線から逸脱していく。せん断による膨張が起こると、最初はバルク水がその膨張を受け持つが、ある膨張量に達すると、キャピテーションによってバルク水が壊れる。図-3.9は、軽部によって提案された修正最乾燥水分線とそれによって求められるバルク応力 p_b の分布である。比較的飽和度の高いI-1について考える。せん断によって体積が圧縮していく場合、サクシ

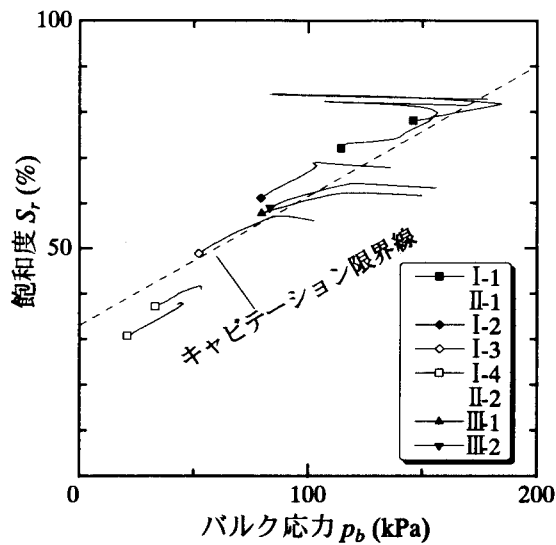


図-3.10 膨張がバルク応力 p_b に及ぼす影響

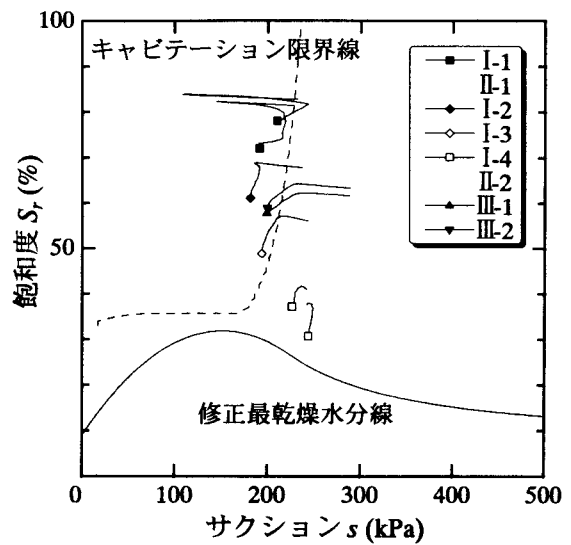


図-3.11 バルク応力の限界線

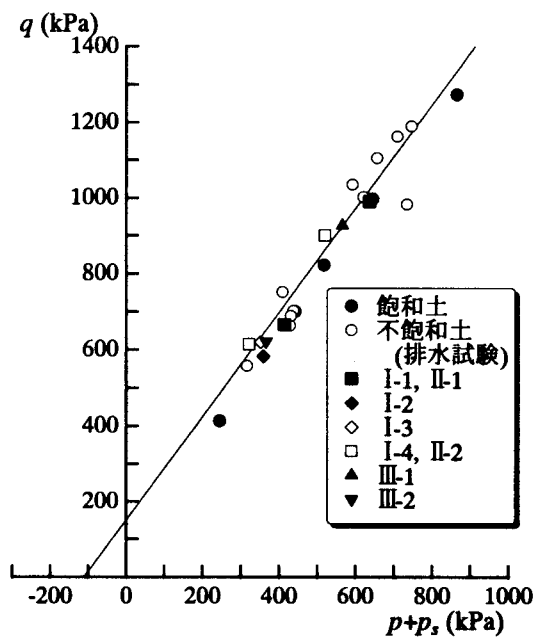


図-3.12 主応力差ピーク時の応力状態

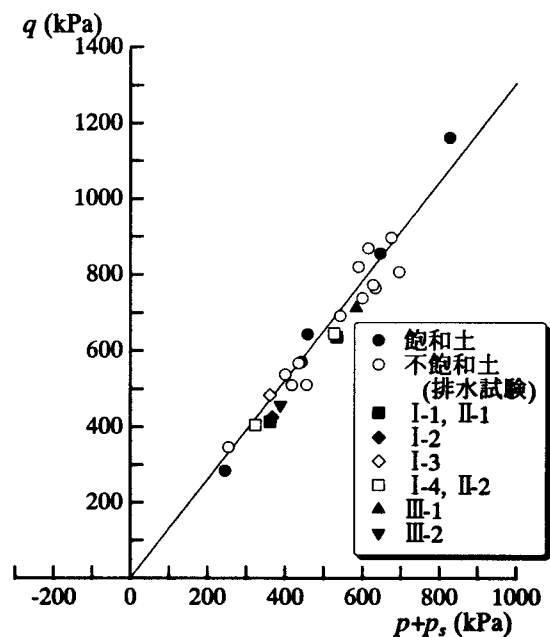


図-3.13 体積最大圧縮時の応力状態

ンの減少とともにバルク応力が減っていき、体積の膨張段階ではサクシオン増加によりバルク応力が増加しているのが分かる。図-3.10は、せん断中のバルク応力と飽和度の関係である。せん断による膨張が進むと、バルク応力はある値まで増加した後、図中の破線に沿って推移する。これは、飽和度によって間隙水のキャピテーションが生じるサクシオン値が決まっており、飽和度が高い場合は間隙水の量が多いため単位面積での抵抗サクシオンが大きくなるということの意味している。図中では飽和度と限界のバルク応力の関係が線形関係にあるとして破線の、限界線

を描いている。このように、バルク応力の上限となる線を仮定すれば、サクシジョンの変化を予測することができる。

(c) 不飽和土の非排水せん断強度

図-3.12は、破壊時の応力状態をサクシジョン応力 p_s で整理したものである。図中には既存の飽和土の試験結果および排水条件で得られた不飽和土の三軸試験結果も記している。これまでわかっているように、破壊時のダイレイタンス量は飽和度に依存し、ダイレイタンスの影響を含んだせん断抵抗力からは限界状態を推定することはできない。限界状態の応力状態を正確に評価するには、ダイレイタンス補正を行う必要があるが、ダイレイタンスを規定するバルク応力の算定方法はまだ確立していない。そこで、ダイレイタンスの影響が含まれない体積最大圧縮点で応力状態を表した(図-3.13)。サクシジョン応力 p_s を適用して得られた近似線は、既存の飽和土および不飽和土の排水試験結果ともよく一致しており、非排水せん断強度を排水せん断強度と同様に評価できることが明らかとなった。

(d) 非排水せん断中の応力ひずみ関係

式(1.42)に示すエネルギー式は次式のように展開できる。

$$\frac{q}{p+p_s} = M - \frac{p+p_b}{p+p_s} \left(\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s} \right) \quad (3.1)$$

つまり、図-3.14, 15, 16の様に縦軸と横軸を選択し、ストレス～ダイレイタンス関係を表現すると、縦軸との切片が M を示し、傾きが $(p+p_b)/(p+p_s)$ を示すことになる。図-3.14中では、過去に行われた飽和土による試験結果および不飽和土の排水試験結果も示している。なお p_s の算定には水分特性曲線より得られた $S_{r,0} = 9(\%)$ を用いた。図-3.14(b)と図-3.14(c)は、せん断初期の条件は同じである。せん断中の飽和度変化は小さいものであるが、図-3.14(c)はせん断中のサクシジョンの減少により応力が弾性域にあると考えられる。また、傾きはサクシジョン応力に対するバルク応力の割合を示していることになり、飽和度が低くなるにつれて直線の傾きが小さくなり、バルク応力がダイレイタンスに影響を及ぼしていることがわかる。しかしながら、この図からバルク応力を算定することは難しい。

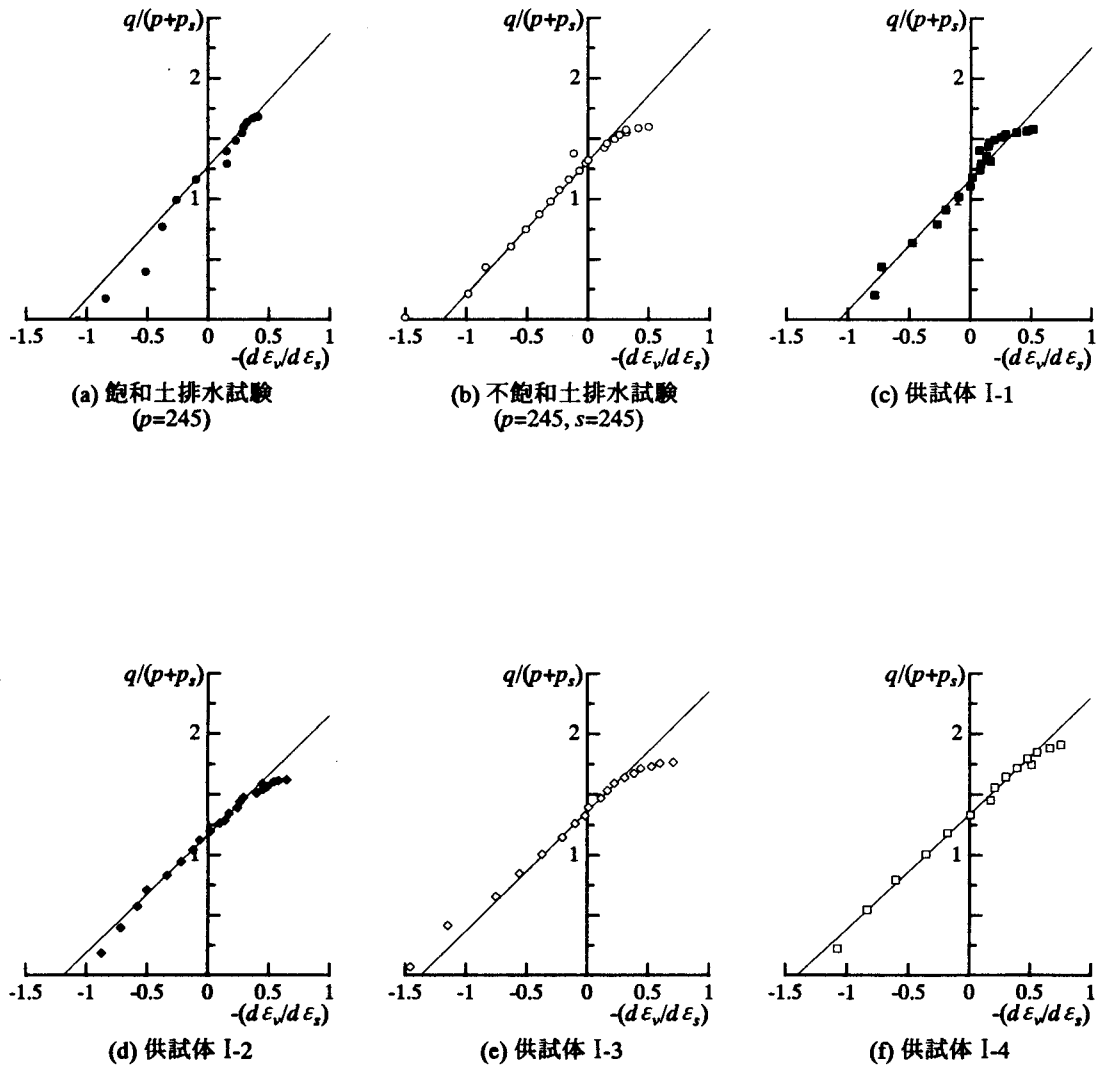


図-3.14 ストレス～ダイレイタンスー関係 (I シリーズ)

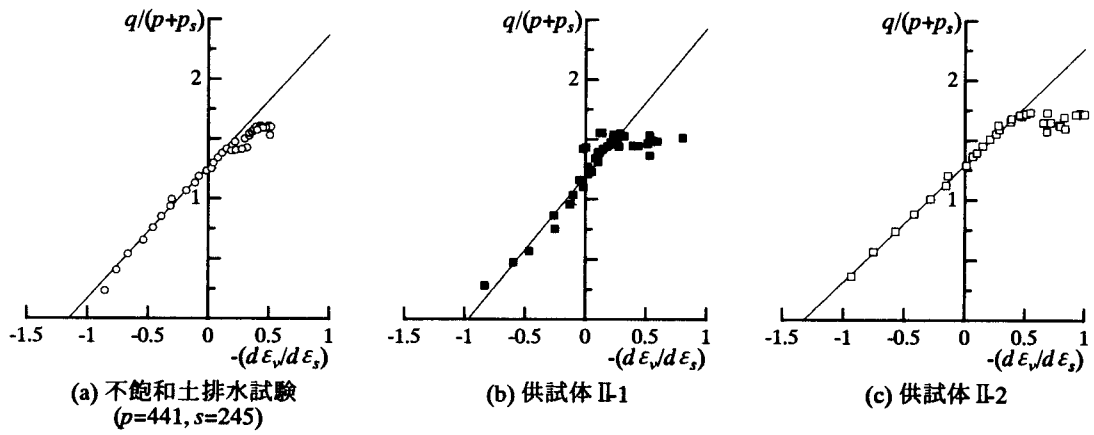


図-3.15 ストレス～ダイレイタンスー関係(Ⅱシリーズ)

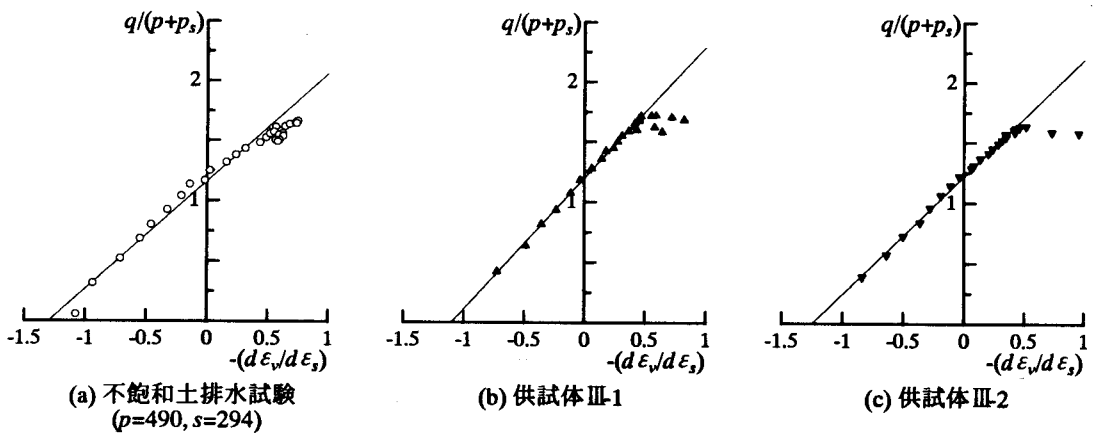


図-3.16 ストレス～ダイレイタンスー関係(Ⅲシリーズ)

図-3.17 は試験中の応力パスである。飽和土においては、非排水試験の描く応力パスは応力面上での等間隙比線を表すが、不飽和土では間隙空気の圧縮により体積変化が許容される。図-3.13 より求めた体積最大圧縮点の応力状態より求めた限界状態線を応力経路が横切る時に変曲点を持っているのがわかる。その後、図-3.15 より求めた破壊線に収束するようにせん断抵抗力は増していき、ピークを迎えた後、破壊線に応力パスが沿っていきのがわかる。ピーク状態では内部応力が不安定になっており、この試験結果からはせん断力のピーク点でサクションが減少していく現象が見られた。

図-3.18 は、 $(p + p_s) \sim q$ 平面にひずみ増分ベクトルを描いたものである。式(1.43)の降伏関数は、関連流れ則が成り立つという仮定に基づいて導かれたものである。ここでは、その仮定を検証する。図中の点線で描かれた理論降伏関数は、式(1.43)で $p_m = 0$ として求めたものである。実際には $p_m = 0$ ではなく、それぞれの供試体において異なる降伏面を持ち、せん断試験中にも p_m の値が変わるため降伏関数の相似中心も変化するが、この応力面内では応力状態に比べて p_m は十分に小さいため、 $p_m = 0$ と仮定した降伏線との比較を行っても差し支えない。結果的に、降伏線とひずみ増分ベクトルは直交しており、関連流れ則が成り立ち、降伏面が相似的に拡大するのが分かる。また、試験 I-1 や III-1 は、せん断中に拘束圧を表す $p + p_b$ が大きく変化しているにも拘らず、同じ応力状態なら他の供試体と同じひずみ増分ベクトルを有しており、応力経路への依存性は見られない。

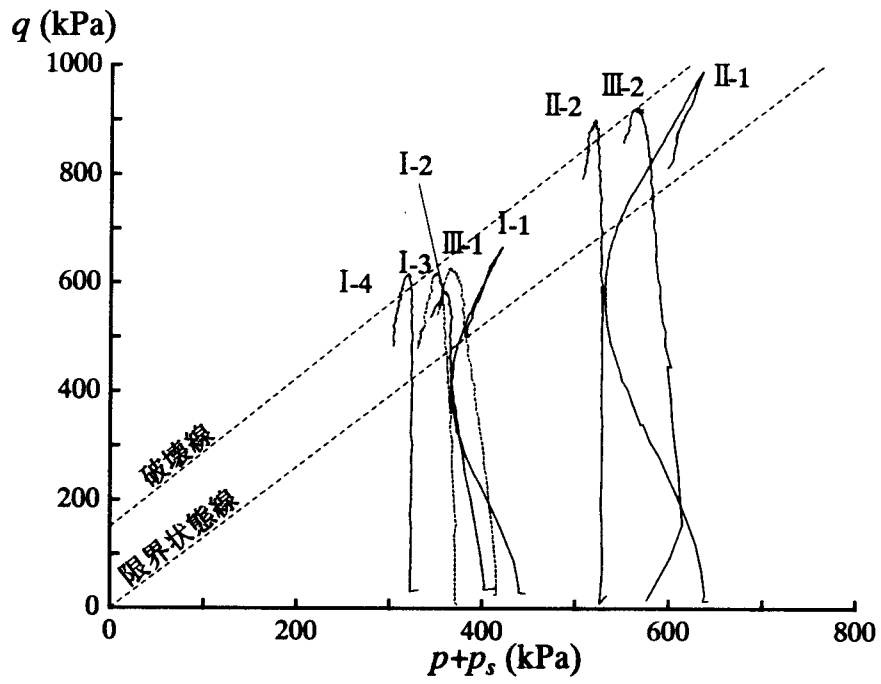


図-3.17 せん断中の応力経路

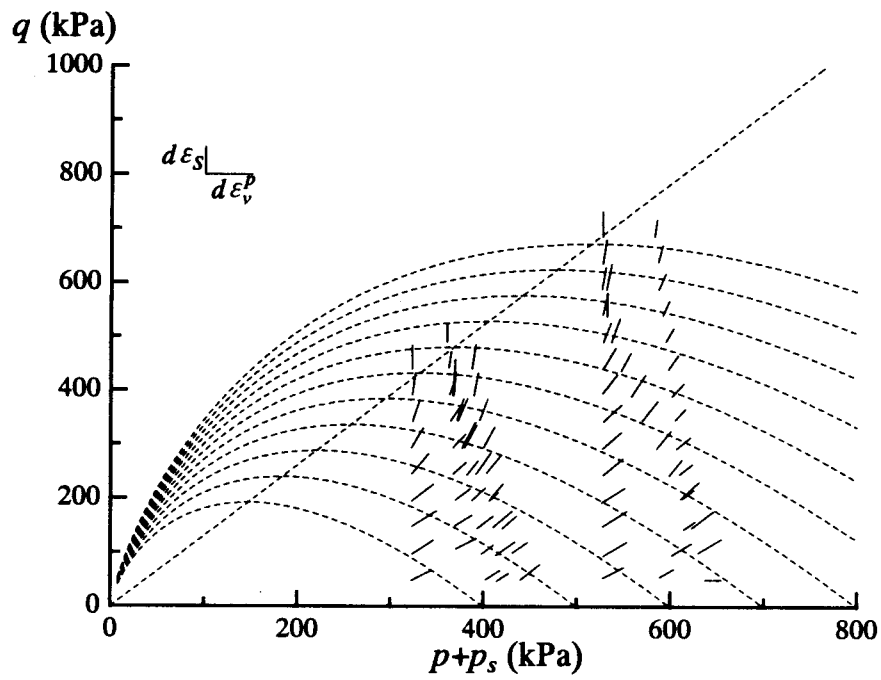


図-3.18 応力空間でのひずみ増分ベクトル

(3) まとめ

不飽和土の非排水条件下での変形強度特性および外応力とサクシジョンの相関関係について調べた。以下に得られた結論を挙げる。

- ・ 不飽和土中の間隙水は、土全体の体積変化によって複雑な挙動を呈する。間隙水圧変化はバルク水の割合に支配され、体積圧縮とともに間隙水圧が増加、体積膨張とともに間隙水圧が消散する。しかし、せん断変形による膨張量が卓越してくると、膨張を拘束していたバルク水膜が壊れてしまい、再び間隙水圧が漸増する。
- ・ 不飽和土の非排水せん断試験での体積変化は、排水試験によるものと異なる。せん断初期の体積圧縮段階では、バルク応力による拘束圧の効果が発揮される。同じサクシジョン値であれば飽和度が高いほどバルク応力が大きくなり、圧縮量も増加する。しかし、非排水試験においては飽和度の高い供試体において、圧縮による間隙水圧がより大きく上昇し、サクシジョンが減少するため、バルク応力が発揮されず、圧縮量も小さくなる結果となった。しかし、膨張に関してはこのバルク応力とは無関係に、既存の排水試験同様に、飽和度の低い供試体ほど膨張量が大きくなった。
- ・ せん断強度に関しては、サクシジョン応力を適用し、体積最大圧縮点を限界状態として考えると、排水試験と非排水試験で同じ様に限界状態線を設定できることが分かった。この限界状態線は、飽和土のせん断試験から得られる限界状態線と同じである。
- ・ これまで、不飽和土におけるエネルギー式に関連流れ則を適用して降伏関数を求めていた。今回、関連流れ則の適用性について検証するために、応力空間にひずみ増分ベクトルを示した。その結果、降伏関数とひずみ増分ベクトルの直交性が確認された。また、同時に降伏関数が応力空間の原点から相似的に拡大していることが分かった。

3.2 不飽和土の一軸圧縮試験の評価法

前節で述べたように、サクシオン応力 p_s を用いて体積最大圧縮点(限界状態と等価)で応力状態を表すことによって、不飽和土の非排水強度も排水強度と同様に飽和土の試験から得られる限界状態線に一致することが分かった。本節では、土の強度特性を知る最も簡便な試験方法である一軸圧縮試験(非圧密非排水試験)結果の評価法について考察を行う。

一軸圧縮試験での供試体は強い過圧密状態にあり、飽和試料でも土内部にサクシオン(この場合、負の間隙水圧)が作用している。このサクシオンの強度評価への適用法は様々である。三田地ら¹⁾および正垣²⁾は、乱れの影響を受けている供試体に作用するサクシオンを測定し、有効拘束圧として応力成分に取り入れることにより、従来、乱れとして考えられていた一軸圧縮強度の低下とそのばらつきを評価する方法を提案している。清水ら³⁾は、飽和シルト試料を用いたサクシオンを測定した一軸圧縮試験を行った。そして、サクシオンを有効応力として取り入れたことにより得られる破壊点が、同じ飽和試料を用いて三軸圧縮試験を行うことにより得られる破壊線上に分布することを確認している。この結果は、高飽和度状態におけるサクシオンが、一軸圧縮試験時の破壊挙動に対して有効応力として作用することを確認したものである。阿部⁴⁾は、採取した粘土をスラリーにして再圧密して得られた試料を用いて、さまざまな人為的な乱れを与えた後にサクシオンを測定した一軸圧縮試験を行った。そして、種々の乱れは初期サクシオンに影響を及ぼすが、破壊強度は軸圧縮過程で生じるサクシオンの影響をうけること、さらに、破壊時サクシオンが一軸圧縮強度に影響を与えていることを示している。これらの研究は、飽和土もしくは飽和土とみなせるほどの高飽和度領域での試験結果である。阿部⁴⁾、Vanapalliら⁵⁾は不飽和土の一軸圧縮強度を水分特性曲線から得られるパラメーターを用いて表し、サクシオンだけでなく飽和度も影響を及ぼすとしている。しかし、彼らは水分特性曲線のヒステリシスを考慮していない。ここでは、前節で確かめられた非排水強度の概念から、一軸試験結果を考察しその敵用性ととも、不飽和土の土質パラメーターを一軸圧縮試験から得ることに関する可能性を検証する。

(1) 試料および試験方法

(a) 試料

本研究では、非塑性で土粒子比重 $G_s = 2.68$ の DL クレーを用いた。粒径加積曲線を図-3.16 に示す。供試体は粉末の DL クレーから作製するが、試験に応じて異なる作製法を用いた。締固め供試体を作製する際には以下の方法に従った。粉末の DL クレーに蒸留水を加えて目標含水比に調整し、乾燥しないように密閉した容器に一昼夜以上保管した。その後、10cm モールドに試料を3層に分けて投入し、2.5kg ランマーで1層当たり25回の動的締固めを行った供試体 A シリーズ、同様に1層当たり50回の動的締固めを行った B シリーズ、そして直径 50mm のモールド

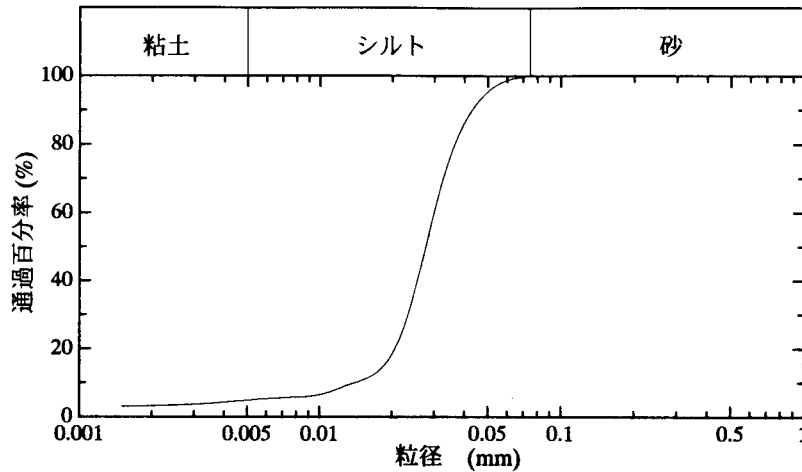
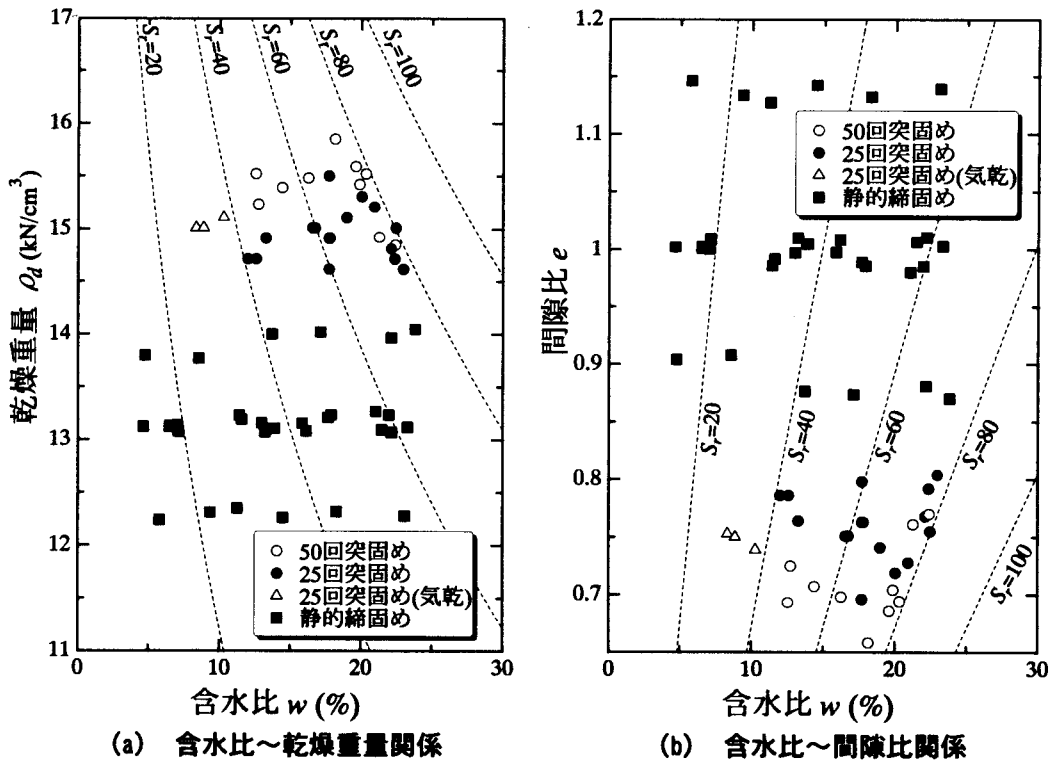


図-3.19 試料の粒径加積曲線



(a) 含水比～乾燥重量関係 (b) 含水比～間隙比関係

図-3.20 締固め試験の結果

に必要量試料を投入し全断面を静的に締固めて所定の供試体高さに調整した C シリーズの 3 種類の方法でブロックサンプルを作製した。このブロックサンプルをラップでシールし、さらにラップの周りを湿った布で覆って密閉容器に入れ、恒温室内で保管した。このように保管したブロック試料を、試験直前に各試験に応じた供試体寸法に成形して用いた。図-3.20 は供試体の締固め試験結果である。図中、白抜三角のプロットは A シリーズと同様に締固めた後、気乾状態で一日乾燥させたものである。

(b) 試験方法

①水分特性試験

試料の水分特性を、不飽和土用に改良された一次元圧密装置(図-3.21)を用いて求めた。ペDESTALにはポーラストーンの代わりにセラミックディスク(AEV=490(kPa))が埋め込まれており、圧密リングを装着することができる。載荷板にはポーラスメタルが埋め込まれており、それに続く空気経路がセル内部へ解放されている。また、セラミックに通じるペDESTAL内部の排水経路は、セル外部のピュレットに連結されている。このため、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へ開放されている。このような構造により、セル内部に加えた空気圧が供試体内部の間隙空気圧と等しくなり、サクシオンとして作用する。このとき、セル圧として加えた空気圧がセル上部のペロフラムシリンダーにも供給され、ピストンの自重が相殺され、実質応力がゼロとなるように設計されている。供試体からの排水量はセラミックに通じる排水経路に連結した、セル外部のピュレットにより測定した。また、セル外部でピストン変位を変位計で計測することにより供試体高さの変化を測定し、その変化量に断面積(28.27cm²)を乗じたものを供試体体積変化とした。また、供試体上面からの乾燥が水分量に影響すると考えられるので、セル内部には供試体に影響がないような低い

水位で水を張り、その影響が少なくなるように配慮した。サクシオンの载荷は加圧法によって行った。供試体として、スラリー状態にしたDLクレーをそのまま圧密リングに投入した飽和供試体 a と、先述した動的締固めによって得られた不飽和供試体 b, c を準備した。不飽和供試体については、ブロックサンプルからカッターリングおよびワイヤーソーを用いて削り出し、直径60mm、高さ20mmの圧密リングに挿入し、上下端面を削って成形したものを用いた。それぞれの初期状態および载荷サクシオン経路を、表-3.3に示す。不飽和供試体 b, c については、初期にサクシオンを持っており供試体が吸水したため、 $s = 4.95(\text{kPa})$ で吸排水が定常状態にあるときを初期状態とした。

表-3.3 水分特性試験の供試体初期状態

供試体番号	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)	サクシオン経路 (kPa)
a	1.21	55.0	100	0→196→0
b	0.73	24.7	86.4	0→294
c	0.66	20.5	82.7	0→294

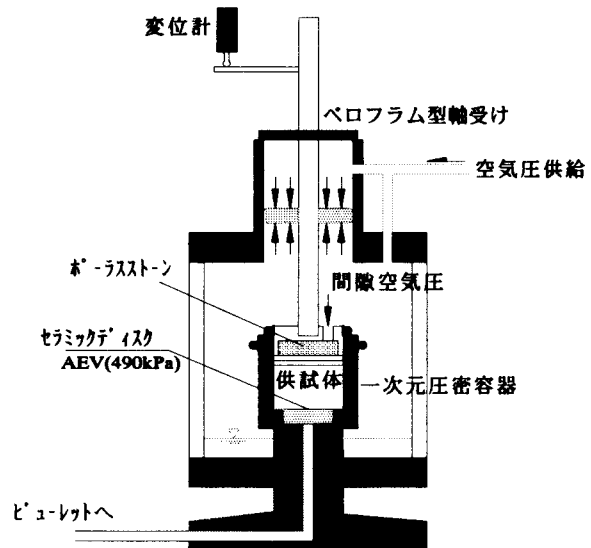


図-3.21 不飽和土用一次元圧密試験機

②一軸圧縮試験

供試体は、前節で述べた方法で作製したブロックサンプルを、トリマーとワイヤーソーにより直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体に成形したものをを用いた。なお、ブロックサンプルを締め固めた時の試料の含水比は約 11~23%であった。

一軸圧縮試験装置の概要を図-3.22 に示す。ポーラスストーンの代わりにセラミックディスク(AEV = 490 (kPa)) をペDESTALに装着した三軸セルタイプの装置である。供試体内部の間隙空気は、間隙空気用経路を通じて大気に開放されている。試験時にはセラミックディスクに通じた水管路端部に取り付けられた間隙水圧計により、セラミックディスクを介して土中の負圧を測定した。供試体のサクシヨンの大きさは、測定された間隙水圧の大きさと等しいものとした。せん断中は、セル内への水の吸排水量を測定し、それに対してピストン貫入体積を補正することにより、軸圧縮過程での供試体の体積変化量を求めた。なお、せん断時のひずみ速度は 0.1%/分とした。

非排水試験においては、供試体内部の間隙水圧を精度良く測定するためにせん断時のひずみ速度の設定が問題となる。阿部・畠山¹⁷⁾は、本試験方法と同じ試料を用い、同様な試験方法により全国の数ヶ所の研究機関において行われた一斉一軸圧縮試験結果について示している。そして、測定を行った研究機関の違いにもかかわらず、得られた破壊時のサクシヨンの含水比関係は同じ傾向を示したこと、また、一軸圧縮試験時の破壊応力点のプロットが、飽和化試料を用いた三軸圧縮試験結果から求めた破壊包絡線付近に分布したことを報告している。以上の結果から判断して、本試験方法において用いたひずみ速度により得られるサクシヨンのおよび一軸圧縮強度の精度については、信頼性があるものと判断される。

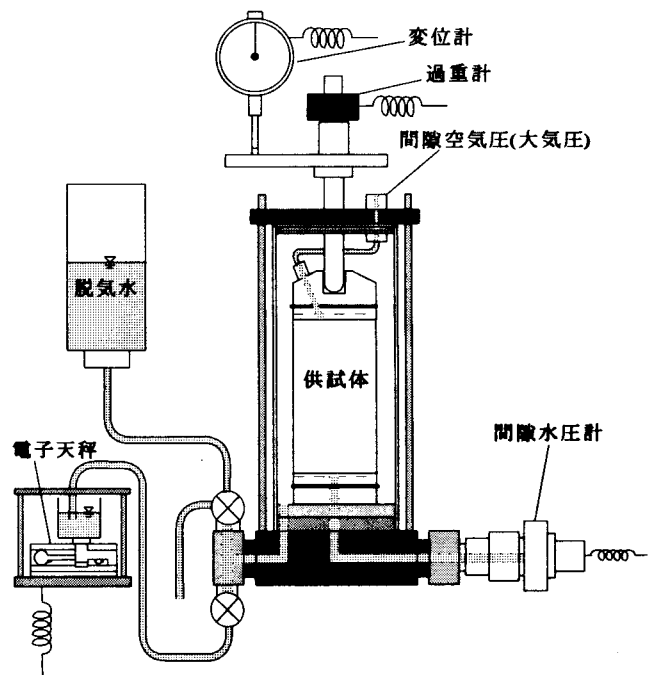


図-3.22 不飽和土用一軸圧縮試験機

(2) 水分特性試験の試験結果

図-3.23 に得られた供試体状態の変化を示す。スラリー状態から始めた供試体 a の間隙比が、サクシオン载荷の 1 段階目で大きく変化し、それに伴って含水比も不安定な変化を示しているが、それ以降は第 2 章で示したものと同様に間隙比の違いが水分特性曲線(図-3.23(c))に現れており、含水比で示した図-3.23(a)では残留含水比が一定値に収束しているのがわかる。供試体 a についてのみ、吸水曲線が得られているが試験装置の排水距離が長かったためか、セラミックの飽和が不十分であったため吸水量がうまく測定できずに、精度の良い吸水曲線が得られたとはいえない。この 3 つの供試体について Brooks and Corey 式を用いてフィッティングした結果を表-3.4 に示す。前章で得られたパラメーターの相関関係を調べる。図-3.24 は、間隙比と表-3.4 に示す空気侵入値 s_a および水侵入値 s_w の関係を示している。図中の破線は、間隙比～空気侵入値関係を最小二乗法によりべき近似したものである。この関係を DL クレーにおける空気侵入値線とする。水侵入値については、十分なデータが無いため空気侵入値線との対応関係より求めることとする。Guspta and Larson⁶⁾、Bouwer⁷⁾は、空気侵入値と水侵入値の比が試料によって決まるとしている。前章で示したとおり、間隙比によって空気侵入値、水侵入値が異なることを示しており、ここでは空気侵入値線と水侵入値線の比が、前章で求めた No.5 クレーの結果と等しくなるように水侵入値線を求めた。その結果が図-3.24 中の実線である。図-3.25 は、収束飽和度 S_{ra} と形状パラメーター a の関係であり、線形関係が現れているのが分かる。

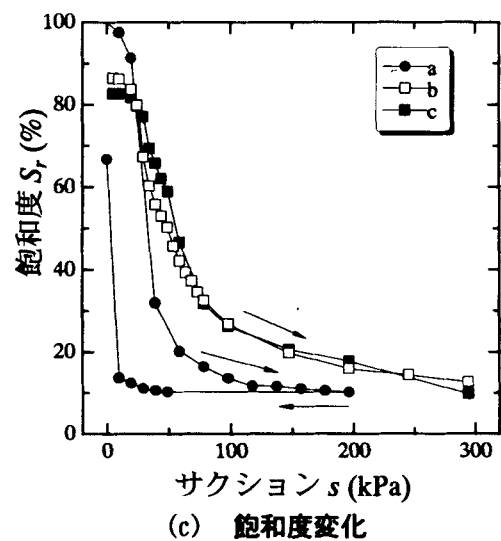
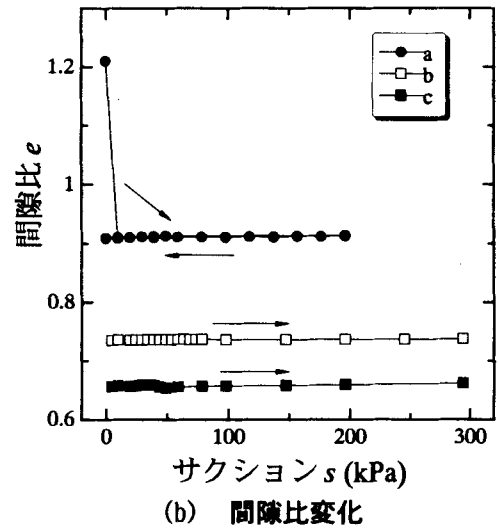
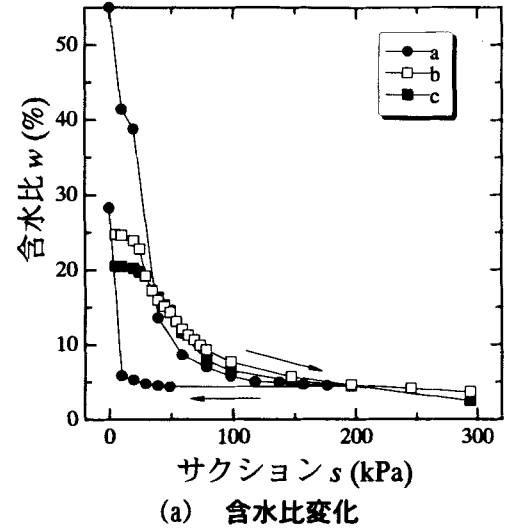


図-3.23 水分特性試験の結果

表-3.4 Brooks and Corey 式を用いた近似結果

Test	e ($s > s_A$)	脱水過程				吸水過程		
		S_{ra} (%)	w_c (%)	s_A (kPa)	α	S'_{ra} (%)	s_w (kPa)	α'
a	0.91	9	3	18.51	1.80	10	0.48	1.09
b	0.74	7	2	24.49	1.16	—	—	—
c	0.66	15	4	33.15	1.96	—	—	—

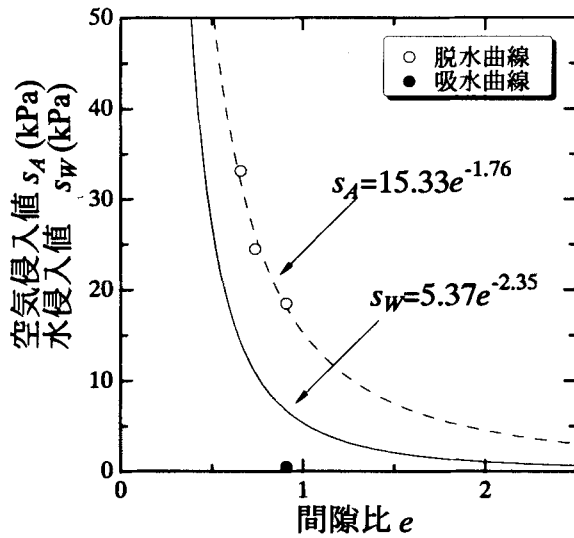


図-3.24 間隙比～空気侵入値, 水侵入値関係

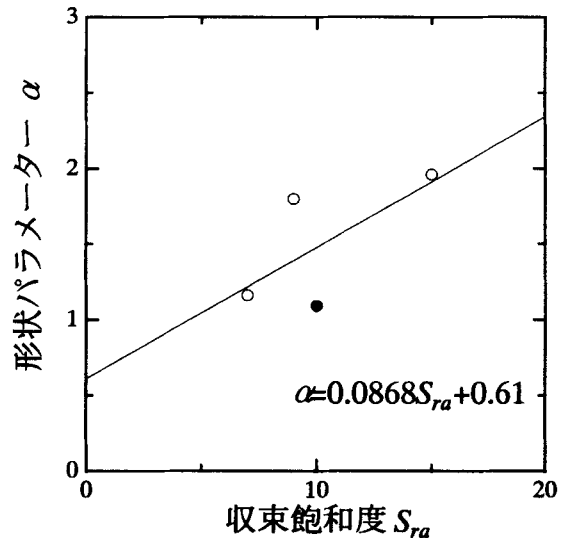


図-3.25 $S_{ra} \sim \alpha$ 関係

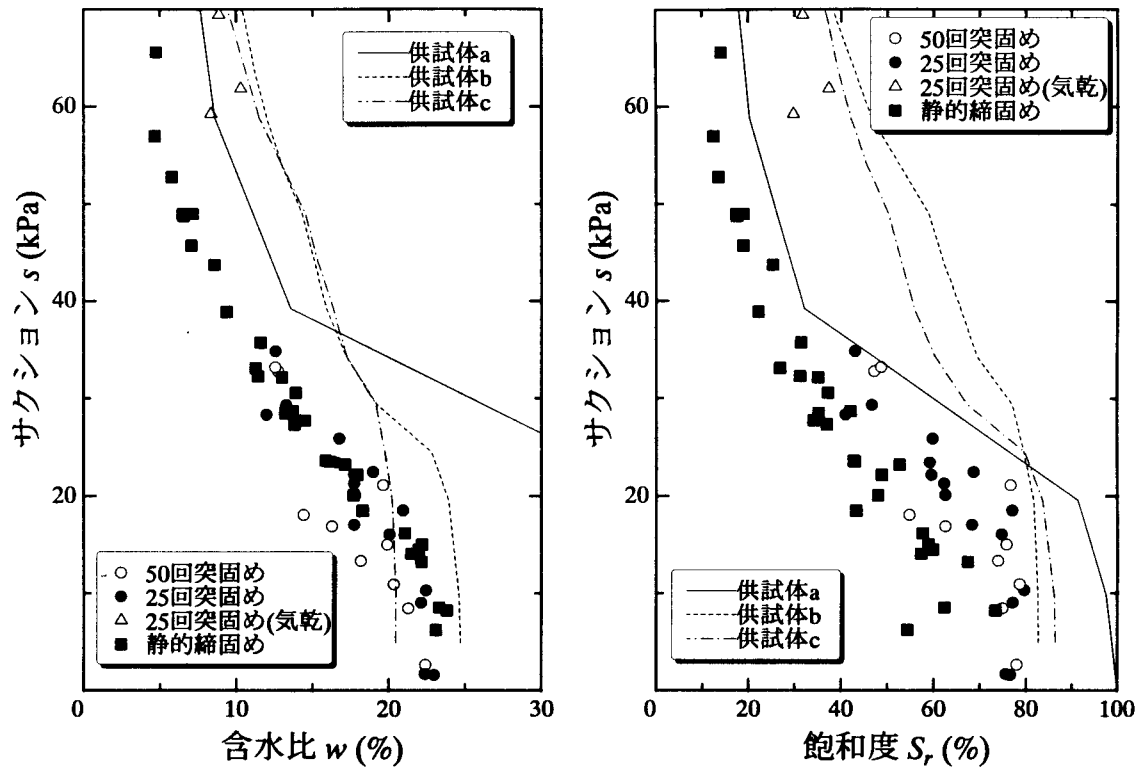
(3) 一軸圧縮試験の試験結果

(a) 一軸圧縮強度

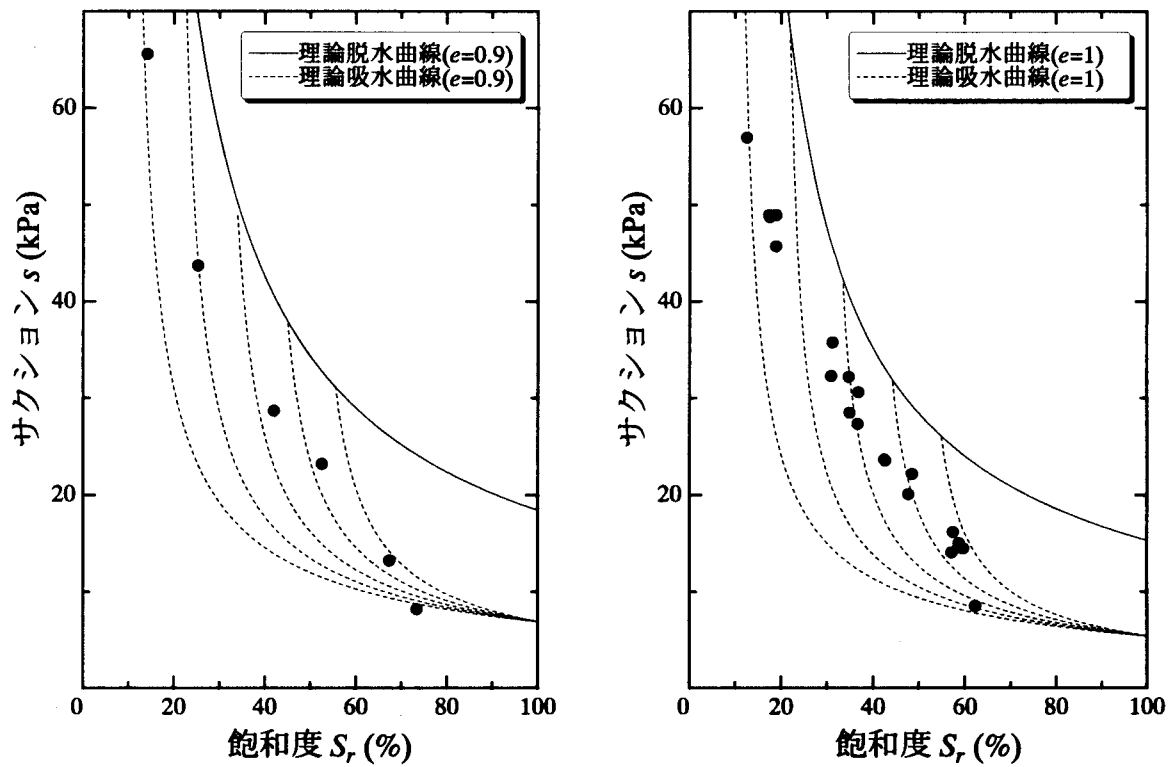
表-3.5 は一軸圧縮試験で用いた供試体の初期状態である。図-3.26 は、供試体の初期含水状態による初期サクシヨンの違いを表している。図中には水分特性試験で得られた脱水曲線が描かれている。試験データが一本の水分特性曲線のように見えるが、間隙比の異なる供試体をプロットしているので、含水比で表したこれらの初期状態は全て異なる水分特性曲線上のプロットであることに注意しなければならない。図-3.27 は、間隙比の近い供試体を抽出し、飽和度でまとめたものである。図中には、水分特性試験より得られたパラメーターを用い、描いた理論脱水曲線および、理論吸水曲線である。これによると、間隙比が等しい供試体同士でも水分特性上の相関は見られない。図-3.28 は、得られた一軸圧縮強度をサクシオンで整理したものである。阿部, Vanapalli の提案しているように水分特性曲線のヒステリシスを無視し、一軸圧縮強度がサクシヨンのみの関数とするならば、図-3.28 は同じサクシオン値で同じ破壊強度が得られるはずであるが、実際にはかなりのばらつきがある。式(1.54)のように水分特性曲線によらないサクシオン応力 p_s で一軸圧縮強度を整理したのが図-3.29 である。ここでのサクシオン応力の算定には、表

表-3.5 締固め供試体の初期状態

作製方法	供試体 No.	乾燥重量 (kN/cm ³)	間隙比	含水比(%)	飽和度(%)	サクシオン (kPa)	
25 回突固め	気乾	A1	15.01	0.753	8.35	29.71	59.25
		A2	15.01	0.750	8.88	31.73	69.45
		A3	15.11	0.739	10.30	37.36	61.88
	気乾なし	A4	14.72	0.786	12.01	40.93	28.35
		A5	14.72	0.786	12.60	42.95	34.83
		A6	14.91	0.764	13.29	46.62	29.31
		A7	15.01	0.751	16.58	59.14	23.45
		A8	15.01	0.751	16.76	59.79	25.90
		A9	14.91	0.763	17.73	62.25	21.29
		A10	15.50	0.696	17.73	68.25	17.07
		A11	14.62	0.798	17.73	59.52	22.17
		A12	14.91	0.763	17.81	62.53	20.11
		A13	15.11	0.741	18.99	68.66	22.46
		A14	15.30	0.719	20.06	74.76	16.07
		A15	15.21	0.728	20.95	77.09	18.54
		A16	14.81	0.768	22.14	77.18	9.04
		A17	14.72	0.792	22.37	75.65	1.680
		A18	15.01	0.755	22.47	79.69	10.30
		A19	14.62	0.804	22.99	76.62	1.58
50 回突固め	B1	15.23	0.725	12.76	47.15	32.79	
	B2	15.52	0.693	12.58	48.62	33.20	
	B3	15.39	0.707	14.43	54.68	18.07	
	B4	15.48	0.698	16.28	62.50	16.91	
	B5	15.85	0.658	18.17	73.99	13.34	
	B6	15.59	0.686	19.63	76.66	21.12	
	B7	14.92	0.761	21.29	74.92	8.43	
	B8	15.52	0.694	20.36	78.65	10.93	
	B9	15.42	0.704	19.91	75.78	15.03	
	B10	14.85	0.770	22.42	78.04	2.63	
静的締固め	C1	12.31	1.134	9.37	22.16	38.87	
	C2	12.24	1.146	5.79	13.54	52.74	
	C3	13.07	1.009	7.13	18.95	48.96	
	C4	13.13	1.000	7.07	18.94	45.70	
	C5	13.12	1.002	6.50	17.40	48.96	
	C6	13.13	1.001	6.55	17.54	48.75	
	C7	13.12	1.002	4.67	12.49	56.95	
	C8	13.80	0.904	4.77	14.14	65.56	
	C9	13.77	0.908	8.58	25.32	43.71	
	C10	12.26	1.142	14.51	34.04	27.74	
	C11	12.35	1.127	11.28	26.82	33.10	
	C12	12.32	1.132	18.29	43.29	18.49	
	C13	13.08	1.008	16.15	42.93	23.53	
	C14	13.15	0.997	15.87	42.66	23.64	
	C15	13.10	1.005	13.84	36.91	27.32	
	C16	13.10	1.004	13.91	37.13	30.57	
	C17	13.23	0.985	17.93	48.77	22.17	
	C18	13.21	0.989	17.69	47.95	20.07	
	C19	13.15	0.997	13.00	34.96	32.15	
	C20	28.47	1.009	13.23	35.12	28.47	
	C21	35.72	0.991	11.60	31.37	35.72	
	C22	32.26	0.986	11.44	31.10	32.26	
	C23	28.68	0.876	13.73	41.99	28.68	
	C24	23.22	0.874	17.14	52.58	23.22	
	C25	6.20	1.139	23.11	54.36	6.20	
	C26	16.18	0.980	21.07	57.62	16.18	
	C27	14.08	1.006	21.49	57.24	14.08	
	C28	15.02	1.010	22.18	58.86	15.02	
	C29	14.50	0.985	21.99	59.81	14.50	
	C30	8.51	1.003	23.32	62.33	8.51	
	C31	13.24	0.881	22.16	67.42	13.24	
	C32	8.20	0.870	23.82	73.40	8.20	



(a) 含水比～サクシヨン関係 (b) 飽和度～サクシヨン関係
 図-3.26 供試体の初期状態と初期サクシヨン



(a) 間隙比 $e = 0.9$ の供試体 (b) 間隙比 $e = 1.0$ の供試体
 図-3.27 締固め供試体と水分特性曲線

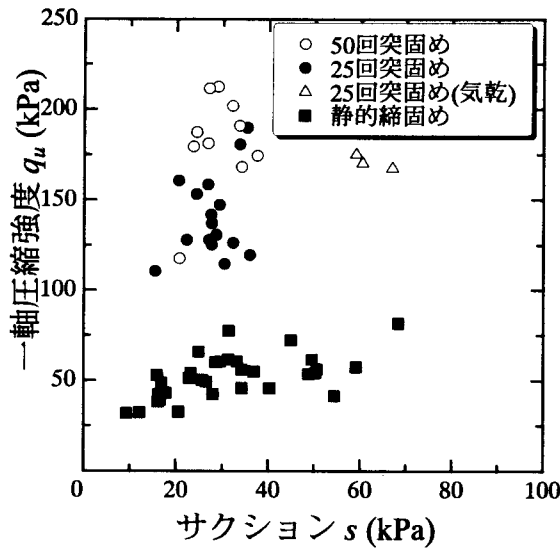


図-3.28 破壊時サクシオン～
一軸圧縮強度関係

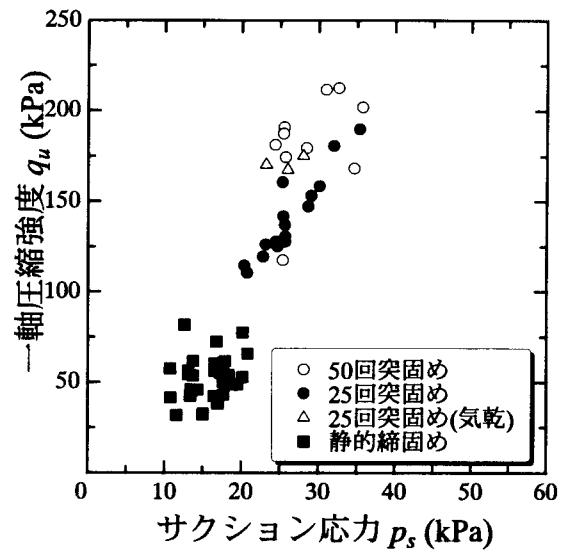


図-3.29 破壊時サクシオン応力～
一軸圧縮強度関係

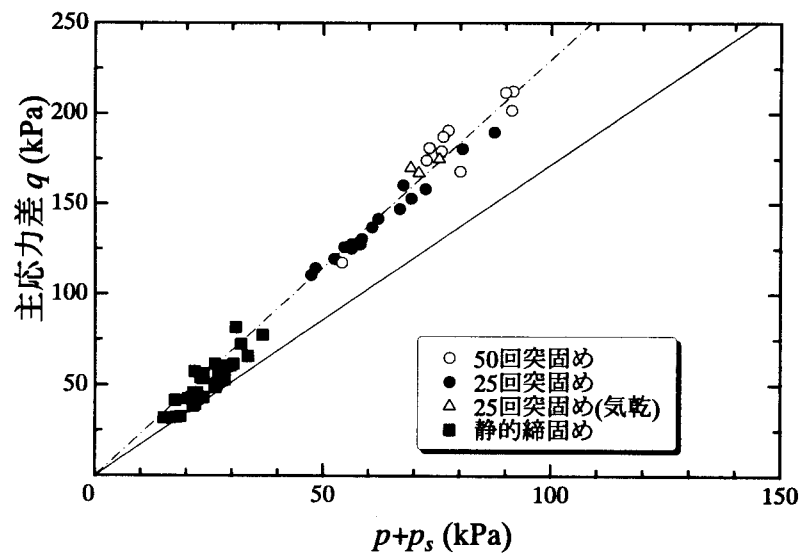


図-3.30 破壊時の応力状態

-3.4より吸着水含水比 $w_c = 3(\%)$ として、それぞれの供試体の間隙比より残留飽和度 S_{r0} を求め、式(1.54)に代入した結果である。図-3.29から、サクシオン応力の増加によって強度が増加するのが分かる。ここで、破壊時には一軸圧縮強度 q_u が軸方向に作用しているため、そのときの実質平均平均主応力は次式で表される。

$$p = \frac{q_u}{3} \quad (3.2)$$

つまり、前節と同様に $(p + p_s) \sim q$ 平面で破壊時の応力状態をプロットすると、図-3.30のように

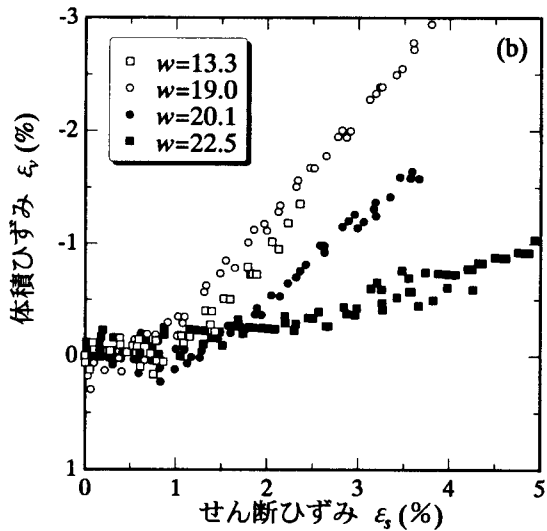
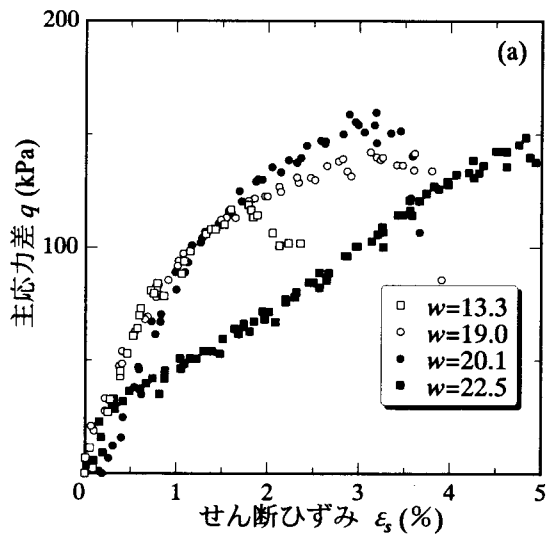


図-3.31 25回突固め供試体の
応力～ひずみ関係

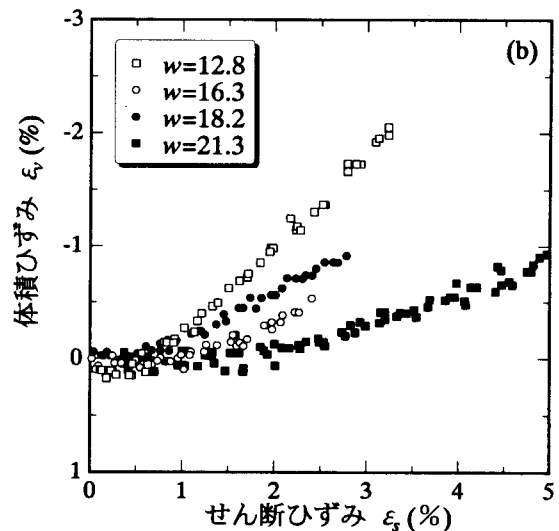
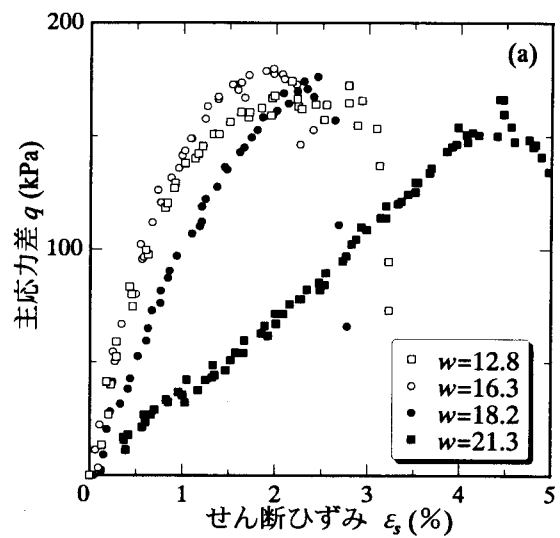


図-3.32 50回突固め供試体の
応力～ひずみ関係

なる。阿部・畠山⁶⁾は、本試験と同じ試料を用いて同じ締固め方法により作製した供試体を飽和化させ、排水三軸圧縮試験を行った結果、有効応力に基づく内部摩擦角が $\phi' = 42^\circ$ であった。つまり限界状態線の傾きが $M = 1.72$ を示し、図-3.30中の実線で表している。図からは締固め方法による破壊線の傾きの違いが現れている。静的締固めによる黒四角のプロットは阿部・畠山の飽和土の破壊線上にのっているのに対して、25回突固めのプロットは飽和土の破壊線よりも傾きの大きい線上にあり、50回突固め、気乾供試体はさらに大きな傾きの破壊線を呈する。これは、初期間隙比の違いによるダイレイタンスの影響が出ているものと考えられる。図-3.31, 3.32は、それぞれ25回突固め、50回突固め供試体のせん断中の応力ひずみ関係である。図中の凡例は締固め後の含水比である。最適含水比は、25回突固め、50回突固めで、それぞれ20%、19%で

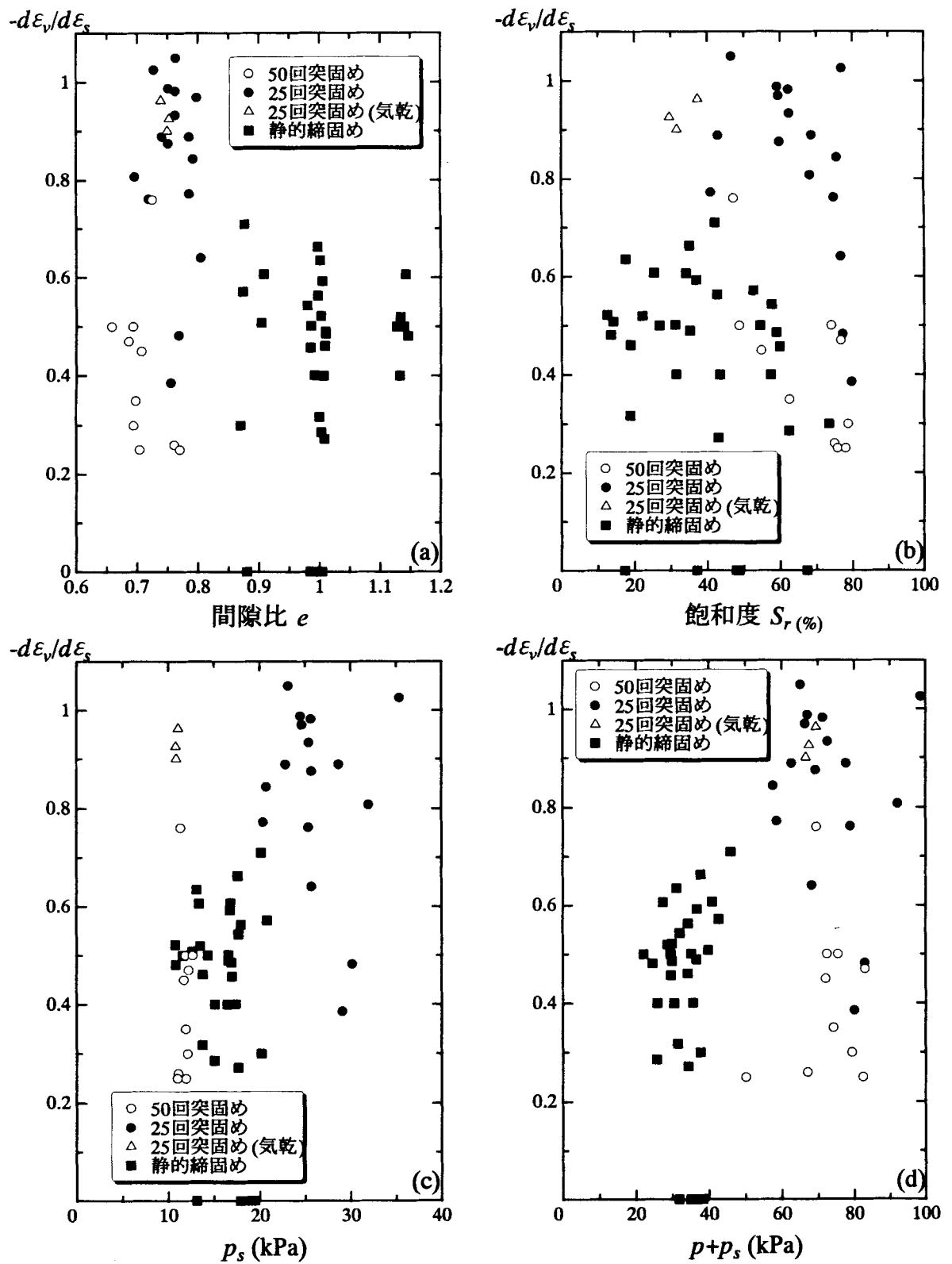


図-3.33 供試体ごとの破壊時ダイレイタンス係数の比較

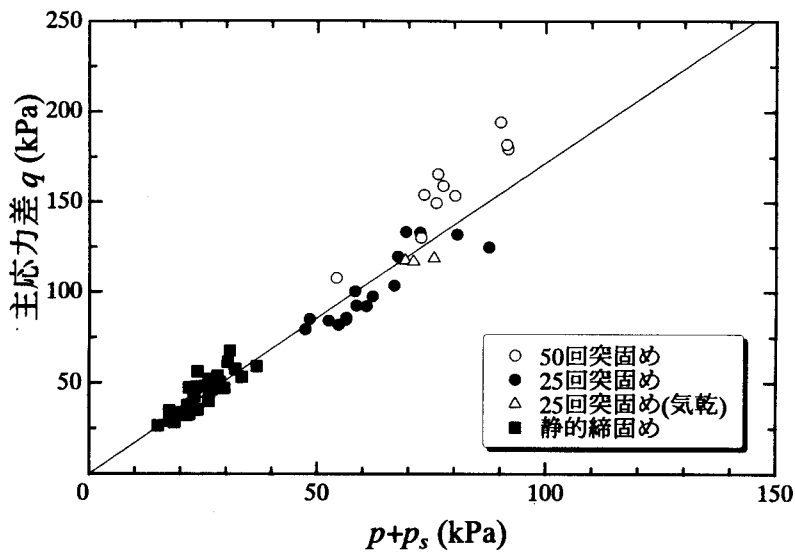


図-3.34 式(3.3)でダイレイタンスー補正した応力状態

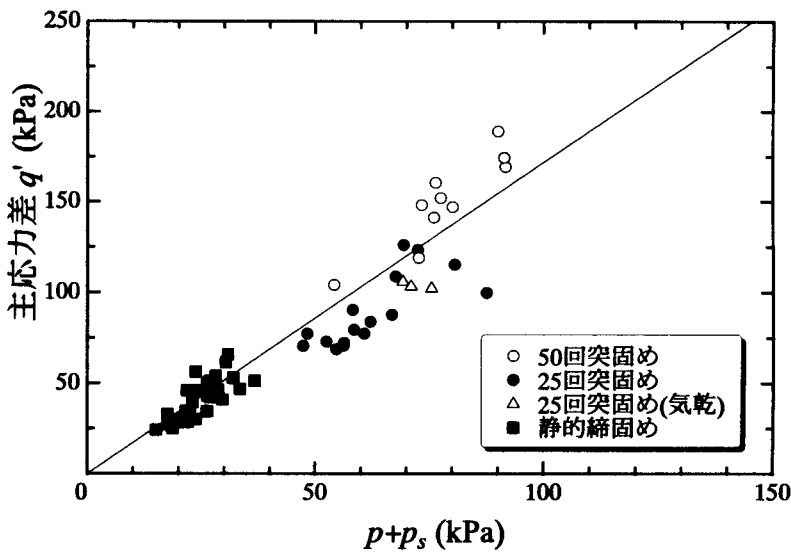


図-3.35 式(3.5)でダイレイタンスー補正した応力状態

ある。間隙比が異なるため、一概には判断できないが前節で示した三軸試験結果と同様、飽和度の低い供試体ほど正のダイレイタンスー(膨張)が大きくなる傾向にある。また全体的に50回突固め供試体の方が間隙比が小さいにも拘らず、飽和度が高いため膨張量が小さくなっている。図-3.33は、破壊時のダイレイタンスーを供試体の初期状態または応力条件によってまとめたものである。一軸試験であるため、図-3.31, 32からも分かるとおりの体積変化を測定することが難しく、ダイレイタンスー係数も大きくばらつく傾向があり、明確な傾向は確認できない。しかし、

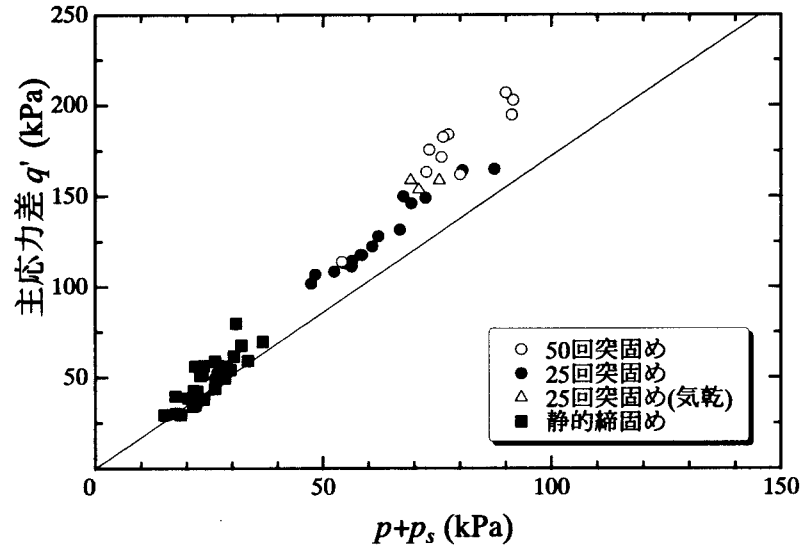


図-3.36 サクションによるダイレイタンシー項を補正した応力状態

突固め試験に比べて緩詰め供試体である静的締固め供試体のダイレイタンシー係数は、間隙比が大きくなると小さくなるという傾向があり、応力条件で表した(c), (d)では拘束応力による依存性がないのが確認できる。先述したように、破壊時にダイレイタンシーが生じていると、それによってみかけの強度が増加する傾向にある。この補正方法に関しては様々な方法が提案されている。次式は、Poorooshasb and Roscoe⁹⁾のダイレイタンシー補正式である。

$$q'_f = q_f + pD \quad (3.3)$$

ここで、 q'_f はダイレイタンシー補正された主応力差、 q_f は破壊時の主応力差、 p 破壊時の平均主応力、 D はダイレイタンシー係数であり $D = d\epsilon_v^p / d\epsilon_v$ で表される。式(3.3)は、Cam-Clayモデルのエネルギー釣り合い式に等しい。軽部らが提案している不飽和土のエネルギー釣り合い式(1.42)を用いると、不飽和土におけるダイレイタンシー補正式は以下のようなになる。

$$q'_f = q_f + p'D = q_f + (p + p_b)D \quad (3.4)$$

ここで、 p は実質応力で表された平均主応力、 p_b はバルク応力である。しかし、バルク応力の算定には最乾燥水分線が必要となる。ここでは、サクション応力 p_s 中のメニスカス応力 p_m の割合がバルク応力 p_b に比べて小さいとして、次式でのダイレイタンシー補正を行う。

$$q'_f = q_f + (p + p_s)D \quad (3.5)$$

図-3.34, 35は、それぞれ式(3.3), 式(3.5)でダイレイタンシー補正を行った応力状態を表して

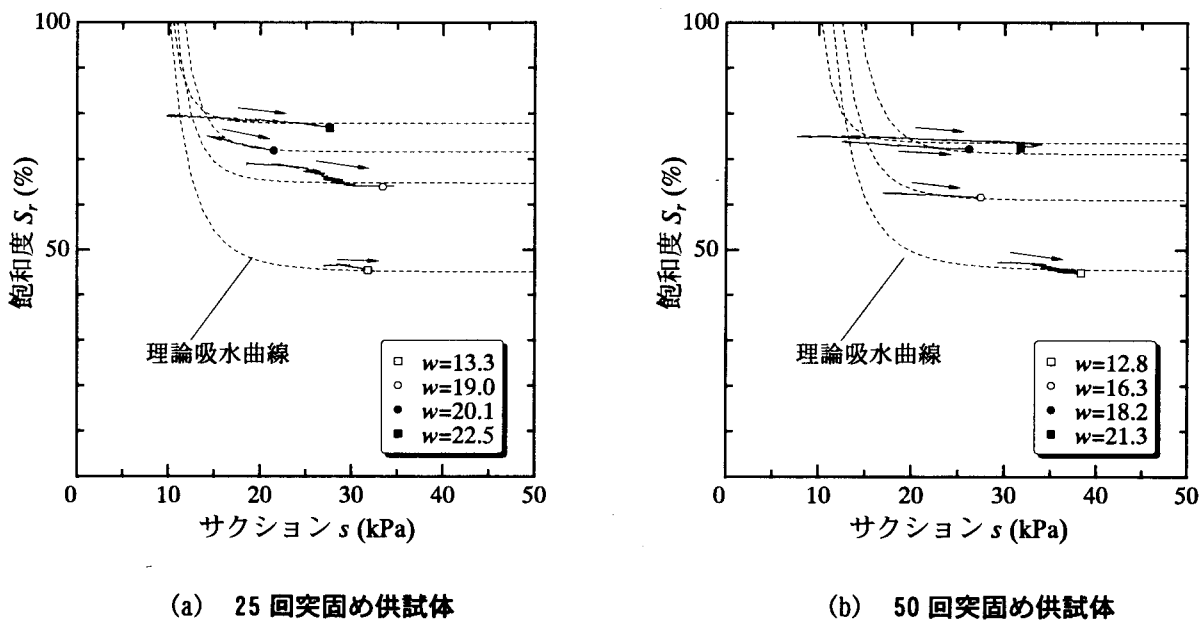


図-3.37 せん断中の水分特性曲線

いる。式(3.3)で補正したものの方が、飽和土の破壊線と一致している。しかしながら、阿部らの飽和土の破壊線は、ダイレイタンスー補正を行ったものではなく、直接比較することは難しい。そこで、式(3.5)よりサクシオンによるエネルギー消散項のみを考慮して、次式のようなダイレイタンスー補正を行う。

$$q_{fsat} = q_f + p_s D \quad (3.6)$$

ここで、 q_{fsat} は飽和土の破壊強度、 q_f は不飽和土の破壊強度である。図-3.36 は、式(3.6)を用いて補正を行った場合の破壊時の応力状態である。図からは、飽和土の破壊線との相関は見られない。本研究では、飽和土のダイレイタンスー補正された破壊線を得ることができなかったが、図-3.34、3.35 でもある程度の強度予測が可能なが分かった。この結果は、一軸圧縮強度から破壊時のサクシオン応力 p_s が算出できる可能性を示唆している。

図-3.37 は、せん断中のサクシオンおよび飽和度変化を表したものである。図中の破線は、破壊時の(サクシオン, 飽和度)点を通過する吸水曲線を前章で提案しているモデルを用いて描いたものである。図中の供試体は全てせん断によって膨張しサクシオンが増加している。前章のバルク脱水モデルに従うと、図中の理論吸水曲線上を水分特性(サクシオン, 飽和度)が推移するはずである。図中で水侵入値以下のサクシオン領域に関する予測は難しいが、高サクシオン域では予測可能であるといえる。これにより、図-3.38 に示す様に、現場から採取した試料のサクシオンを知ることができる。まず、現場から採取した試料の初期状態(w_0, e_0)を測定する。別に、飽和化させた供試体の圧縮試験と水分特性試験を行い必要なパラメーターを得る。そして現場から採

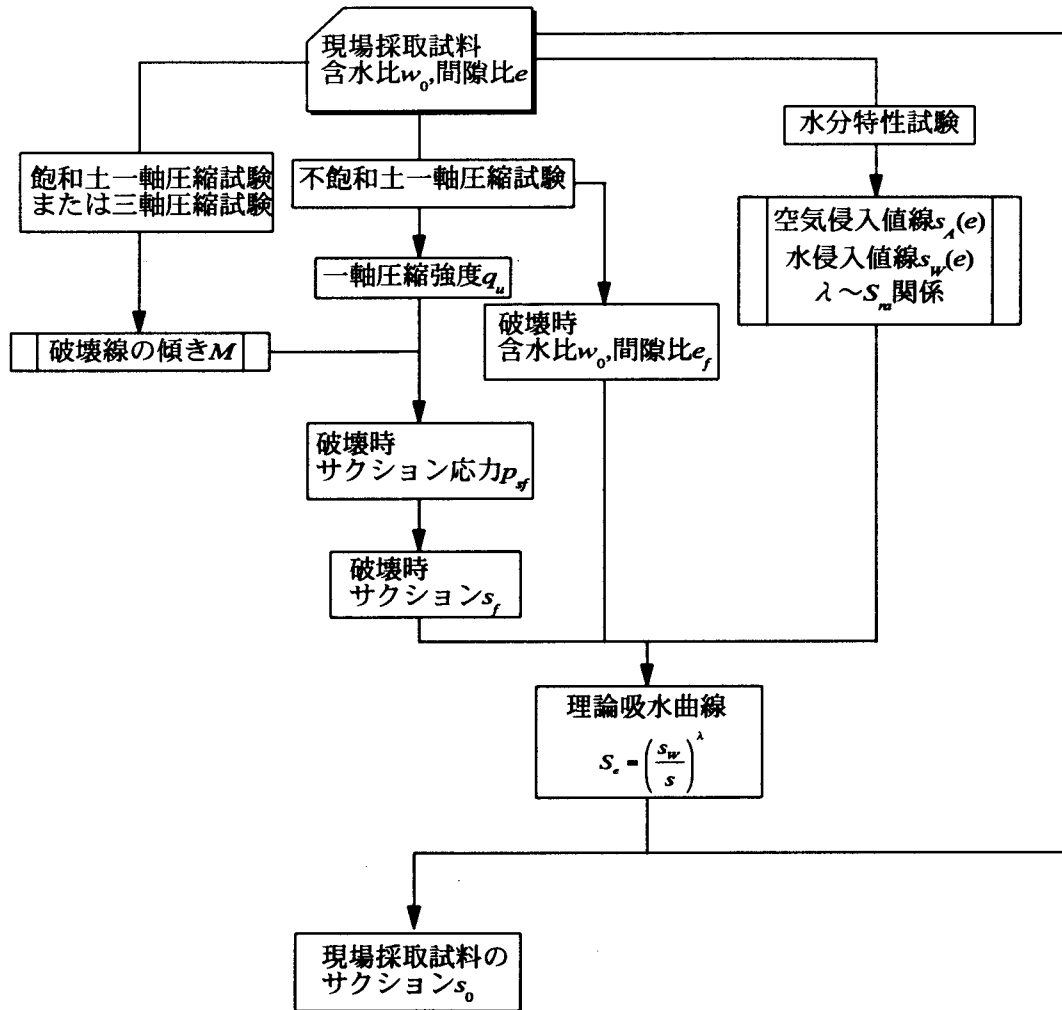


図-3.38 一軸圧縮試験より現場試料のサクシヨンを推定するフロー

取した試料の一軸圧縮強度を得る。同時に破壊時の間隙比を測定する(体積を測定した一軸圧縮試験を行う)。飽和土の試験より得られた破壊条件より、破壊時のサクシヨン応力 p_f が定まる。この破壊時のサクシヨン応力と水分特性試験から得られた限界飽和度 $S_{r\infty}$ より、破壊時のサクシヨン s_f が求められる。破壊時の含水比、間隙比より、飽和度 S_{rf} を求める。水分特性試験より得られたパラメータを用いて、 (s_f, S_{rf}) を通過するような理論吸水曲線を定式化する。この式に供試体初期状態を入力することで、供試体サクシヨンを算出することができる。ここで、水分特性曲線のパラメータが必要となるが、現在水分特性曲線のデータベースがいくつかあり、それより現場の試料に類似したものを適用することで、簡便な一軸圧縮試験より現場サクシヨンを知ることができる。水分特性のデータベースに関しては第5章で考察を行う。図-3.39は、本研究での一軸圧縮試験に用いた供試体の初期サクシヨンを予測した結果である。先述したように、水侵入値より低いサクシヨン領域に関して、飽和度が低いにも拘わらずサクシヨン値が低いような

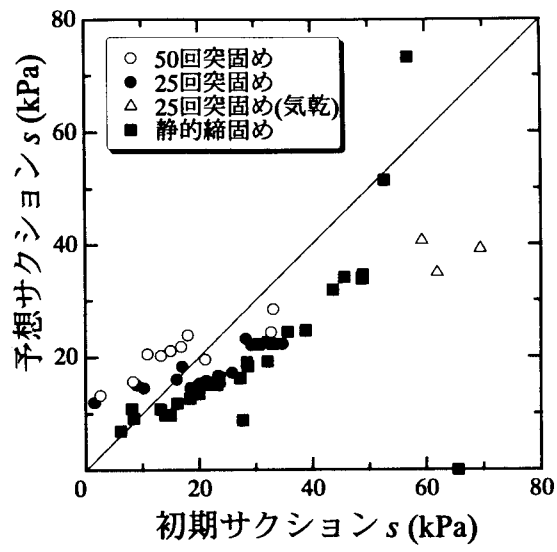


図-3.39 一軸圧縮試験から供試体サクシヨンを推定した結果

供試体については予測が困難であるが、このような供試体は部分不飽和状態で内部の間隙水分分布が、不均一になっていると考えられる。図-3.39は一軸圧縮試験より得られる情報としては十分な精度であると考えられ、新たなサクシヨン測定法の可能性を示唆している。

参考文献

- 1) 三田地利之, 工藤豊 : サクシヨンと一軸圧縮強度に基づく粘性非排水強度推定法, 土木学会論文集, No.541/Ⅲ-35, pp.147-158, 1996.
- 2) Shogaki, T. : Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.169-171, 1995.
- 3) Shimizu, M. and T. Tabuchi : effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.3, pp.28-39, 1993.
- 4) 阿部廣史 : 不飽和土の力学特性の評価方法に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1994.
- 5) Vanapalli, S. K., D. G. Fredlund, M. D. Pufahl and A. W. Clifton : Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392, 1996.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 阿部廣史, 畠山正則 : 不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験の結果について, 不飽和地盤の調査・設計・施工に関するシンポジウム発表論文集, pp.23-58, 1993.
- 9) Poorooshasb, H. B. and K. H. Roscoe : The correlation of the results of shear tests with varying degrees of dilation, *Proc. 5 th Int. Conf. Soil. Mech.*, Vol.1, pp.297-304, 1961.

第4章 不飽和土の分応力とバルク応力 p_b

前章では、不飽和土の強度特性にサクシオン応力 p_s が大きく影響を及ぼしていることが分かった。そして、異方応力状態であれば、メニスカス応力 p_m の効果は小さく、 p_m を考慮しなくても、サクシオン応力 p_s を用いてある程度変形挙動を表せることが分かった。しかし、等方応力状態でのコラプス挙動を説明するには、メニスカス応力 p_m を適用しなければならない。軽部らは最乾燥水分線を用いて、バルク応力 p_b およびメニスカス応力 p_m の割合を求めようと試みているが、第1章にも示したとおり最乾燥水分線の仮定の仕方によってその割合が大きく変わってくる。本章では、このバルク応力とメニスカス応力の割合を実験から求める方法を検討する。ここでは、2通りのアプローチによりバルク応力を算定する。ひとつは不飽和供試体の異方圧密試験、もうひとつは不飽和供試体の非排水等方圧縮試験である。

4.1 定サクシオン下での不飽和土の異方圧密挙動

地盤の内部あるいは土と他の構造物との境界面に作用する応力が土圧であり、前者を土中土圧、後者を壁面土圧と呼ぶ。一般に、地下水位以下の飽和領域において有効応力に関するものを有効土圧、間隙水圧を含むものを全土圧として区別している。土が側方を拘束された状態で一次元的に圧縮変形する際、拘束する壁面に作用する土圧が、静止土圧であり、このときの鉛直応力と側方応力の比を静止土圧係数と呼ぶ。土の代わりに流体を考えた場合、静止土圧係数は1になる。静止土圧係数は、変形を生じさせないような反力であるため、土で考える場合は変形に寄与する応力成分の比を土圧係数とすべきである。静止土圧係数に関してはいくつかの経験式が提案されており、有効応力の比として表されている。表-4.1 は、従来提案されている静止土圧係数の算定式をまとめたものである(山内・福田¹⁾)。山内・安原²⁾は、土の破壊基準のうち理論的にはもっとも厳密といわれている Hvorslev³⁾の破壊条件式が弾性平衡状態にも成り立つとの仮定から、粘性土の静止土圧係数を求める方法を提案しており、安原⁴⁾はさらに応力履歴による影響を考慮して式を拡張している。落合⁵⁾は、表-4.1を(i) $K_0 = f(\phi')$ (ϕ' :有効応力に基づく内部摩擦角)と、(ii) $K_0 = f(\phi_{cv})$ (ϕ_{cv} :Critical Void Ratioにおける内部摩擦角)に大別できるとしている。ここで、注目すべきことは静止土圧係数 K_0 の値については土のせん断強さが大きく影響を及ぼす

表-4.1 既往の静止土圧係数の経験式

Proposed Equation	Proposers
$K_0 = \frac{1}{\nu - 2}$	Ohda (1938)
$K_0 = 1 - \sin \phi'$	Jaky (1944)
$K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$	Tchebotarioff (1951)
$K_0 = \tan^2(45^\circ - \phi_{cm}/2)$	Rowe (1954)
$K_0 = 0.9(1 - \sin \phi')$	Fraser (1957)
$K_0 = \frac{(1 + (2/3)\sin \phi')(1 - \sin \phi')}{1 + \sin \phi'}$	Kezdi (1962)
$K_0 = 0.95 - \sin \phi'$	Brooker and Ireland (1965)
$K_0 = 0.19 + 0.233 \log I_p$	Alpan (1967)
$K_0 = \frac{2}{(1 + M^2/3)^{1/2}} - 1$	Burland (1971)
$K_0 = \frac{1 - 0.404 \tan \phi'}{1 + \tan \phi'}$	Yamaguchi (1972)
$K_0 = \frac{\sqrt{2} - (2/\pi)\tan \phi' - \kappa_m}{\sqrt{2 + (4/\pi)\tan \phi' + 2\kappa_m}}$	Yamanouchi and Yasuhara (1974)
$K_0 = 1 - \sin \phi'_{cv}$	Ochiai (1976) Oda (1976)

ことである。しかしながら、土圧は土骨格の変形を抑制するものであるため、土骨格が受け持つ分応力で表されるべきである。飽和土であれば、これら全てを Terzaghi の有効応力で表せるため、問題は生じない。不飽和土の場合は、サクションによって生じる応力をどのように扱うかが問題となる。本節では、不飽和供試体の異方圧密試験を行い、静止土圧係数を算出することを試みる。

不飽和土を用いた異方圧密試験結果は少ない。Lawton ら⁶⁾は、締固め供試体を応力(外力としての実質応力)比一定で異方圧密し、別に行った締固め供試体を水浸後異方圧密したものと比較し、その体積ひずみの差 $\Delta \epsilon_{vol}$ を測定して、一次元圧密試験の土圧について考察を加えている。彼らは、実験により図-4.1 を得て、 $\Delta \epsilon_{vol}$ が平均主応力 σ_m に依存し、応力比とは独立であると述べている。図中で、 $\Delta \epsilon_{vol} > 0$ は水浸による膨張、 $\Delta \epsilon_{vol} < 0$ はコラプスを表している。また、図-4.2 により軸応力が等しければ、応力比が大きい供試体ほど水浸によって圧縮し、応力比一定の線が平行に現れるとしている。一次元圧密試験結果はこの応力比一定の線を横切り、軸応力と側方応力の比が軸圧縮応力によって異なることを示した。彼らは、この一次元圧密時の挙動を図-4.3 を用いて説明している。図中の K_p, K_a, K_0 は、それぞれ主働、受働、静止土圧係数である。横軸、縦軸はそれぞれ軸方向、側方方向の有効応力である。ここで用いている有効応力は Terzaghi の有

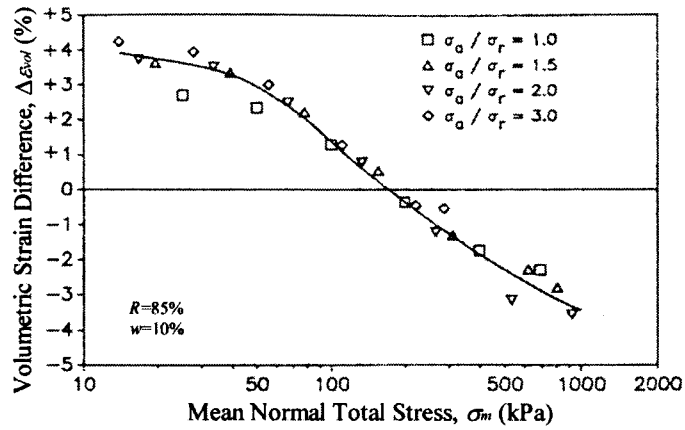


図-4.1 平均主応力～ $\Delta\epsilon_{vol}$ 関係

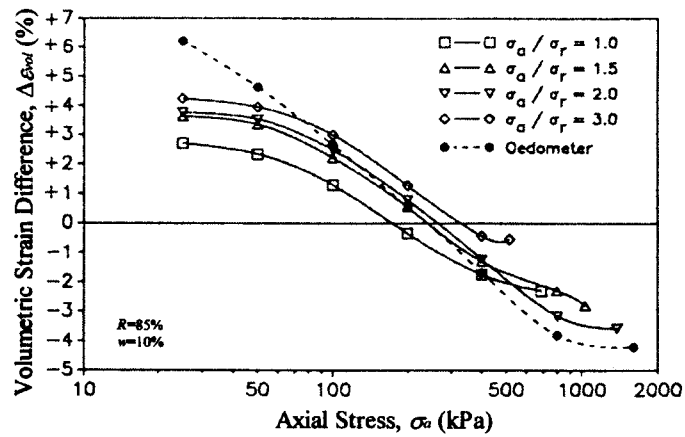


図-4.2 一次元圧密試験と異方圧密試験の比較

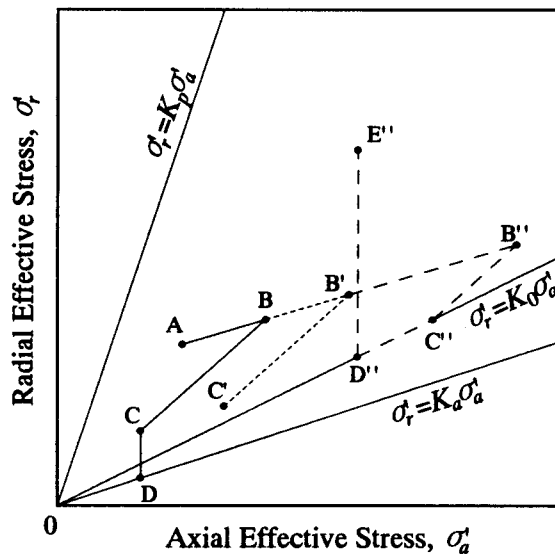


図-4.3 軸圧縮-水浸による軸応力, 側方応力の変化

効応力である。一次元状態で締固められた供試体は、締固め後、軸応力はサクシオン、側方方向にはサクシオンと締固めによる残留応力が作用しており、点 A で表される。点 A にある供試体は、軸圧縮によって A→B→B'→B'' と応力が変化する。このとき、圧縮によって飽和度が増加するため、サクシオンはわずかに減少する。また、軸方向の有効応力増分と側方の有効応力増分の比は等しい。次に、異なる軸応力の点 B, B', B'' にある供試体を、一定の軸応力下で水浸させることを考える。このときには2通りの応力変化が生じる。ひとつは、水浸によってサクシオンが消散し、 σ'_a, σ'_v ともに減少する。このとき、 σ'_a は σ'_v に等しくなる。もうひとつは、土の体積変化による σ'_v の変化である。水浸の初期は、サクシオン減少による σ'_v の変化量は σ'_a の変化量に等しい (B→C, B'→C', B''→C'')。そして、この応力変化が K_0 線に達する (C'') ほど大きかった場合、有効応力は次式を満足するように減少する。

$$\Delta\sigma'_v = K_0 \Delta\sigma'_a \quad (4.1)$$

そして、サクシオン変化が収束する点 D'' に至る。図-4.2 で、一次元圧密試験で水浸によって体積が変化していない、つまり $\Delta\varepsilon_{vol} = 0$ となっている点では、 $\sigma'_a/\sigma'_v = 1.5$ の異方圧密試験の結果と交差している。これは K_0 よりもわずかに大きな K 値である。このときは図-4.3 中の点 C' で表され、サクシオンの変化による有効応力変化のみでその後の体積変化による応力変化はない。しかし、それよりも大きな軸応力からの水浸 (B''→C''→D'') ではコラプスで密度が増加することで土が側方へ膨張しようとし、 σ'_v の増加とともに受動状態へ向かう (D''→E'')。軸応力が小さい水浸の場合 (B→C)、土が等方的に膨張しようとするが側方が拘束されているため軸方向への膨張が卓越し結果、 σ'_v が減少し主動状態へと移行する。ここで Lawton らは、サクシオンを有効応力の一部と考えているものの、土圧に関しては外力つまり実質応力を考えている。その結果、彼らの考察は不十分なものとなっている。

本節では、まず飽和土の異方圧密試験を行い、その結果より静止土圧係数を算出する。前章で、サクシオン応力 p_s を用いると飽和土と不飽和土の破壊基準を同等に評価することが可能なことが確認できており、土のせん断強さと関係のある土圧係数に関しても、土圧の捕らえ方によって同等に評価できると考え、不飽和土の分応力を検討する。

(1) 試料および試験方法

用いた試料は市販のカタルポクレであり、その材料特性を表-4.2 に示す。

表-4.2 試料の材料特性

G_s	w_p	w_L	I_p
2.70	20.3%	33.5%	13.2

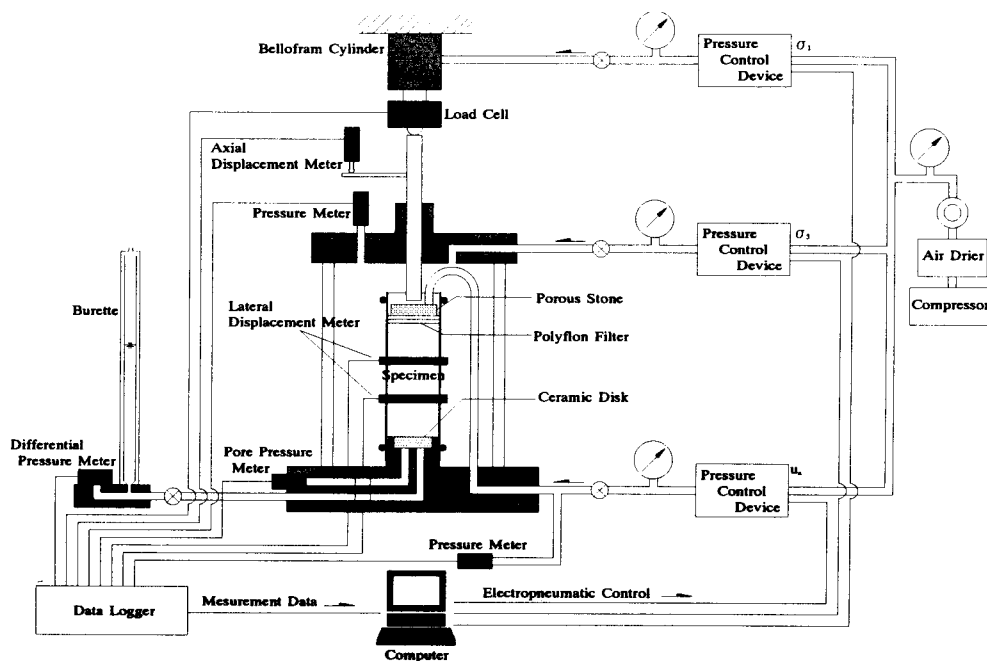


図-4.4 不飽和土用三軸試験機

粉末のカタルボクレーに液性限界の2倍の含水比になるように脱気水を加えスラリー状態にし、一次元圧密容器(φ140mm)で予圧密したものをブロックサンプルとした。このブロックサンプルを直径35mm、高さ80mmに成形し、飽和供試体として不飽和土用の三軸試験機(図-4.4)に設置した。

不飽和土用三軸試験機は拘束圧および軸圧だけでなく供試体内の空気圧を独立に制御できるようになっている。排水状態で供試体に間隙空気圧を作用させた場合、この供給空気圧がサクシヨンとなる。不飽和土の試験では、体積変化量が排水量に一致しないため、別に体積を測定する必要がある。本試験機は2つの側方変位計を設けており、直接供試体の側方および軸方向の変位を測定することで体積変化を算出した。2つの側方変位計より得られる直径変化量と、軸変位計から得られる軸変位量より、供試体を円柱近似し体積を算定した。

試験は、サクシヨン載荷→異方圧密→せん断の3つの過程で行われた。まず飽和供試体に、拘束圧 $p=19.6(\text{kPa})$ 下でサクシヨン $s=294(\text{kPa})$ まで段階載荷し、供試体を不飽和化させた。サクシヨン載荷段階終了後の供試体諸元を表-4.3に示す。その後、サクシヨンを一定に保ったまま、図-4.5に示す応力経路で異方圧密を行った。ここで、横軸 p は実質応力である。また、不飽和土の強度に及ぼす応力経路の影響を調べるために、供試体をひずみ制御で p 一定せん断した。また、比較のため表-4.4に示す初期状態の飽和土に関しても、図-4.6の応力経路で異方圧密を行った。

表-4.3 サクション載荷段階終了後の供試体状態

供試体	w (%)	e	S _r (%)
Au	18.48	0.712	70.30
Bu	22.38	0.686	82.62
Cu	20.70	0.639	86.39
Du	20.60	0.668	82.39

表-4.4 飽和供試体の初期状態

供試体	w (%)	e	S _r (%)
As	27.95	0.770	98.26
Bs	27.38	0.744	99.70
Cs	28.72	0.736	100
Ds	28.47	0.671	100
Es	27.71	0.782	95.97

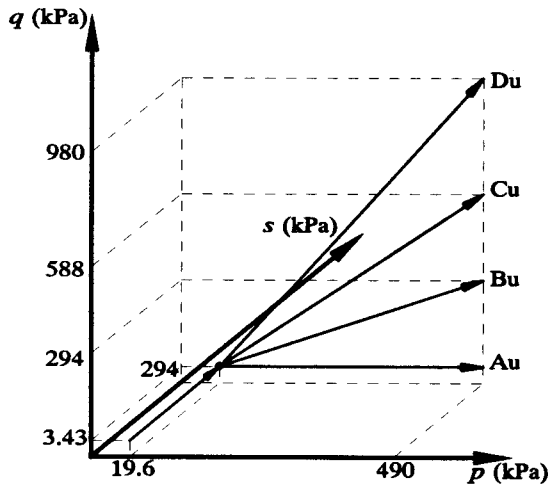


図-4.5 不飽和供試体の応力経路

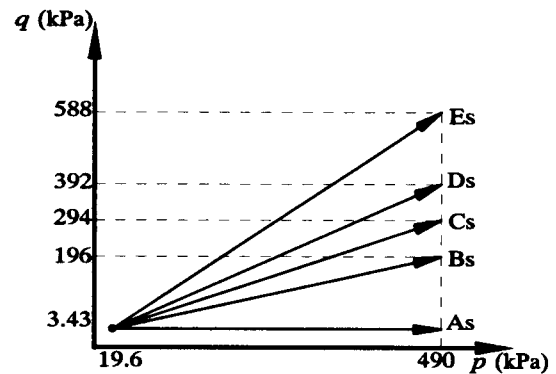


図-4.6 飽和供試体の異方圧密経路

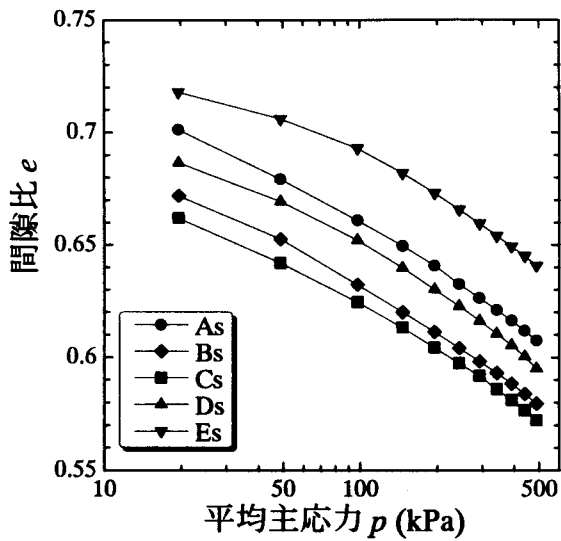
(2) 試験結果

(a) 異方圧密段階

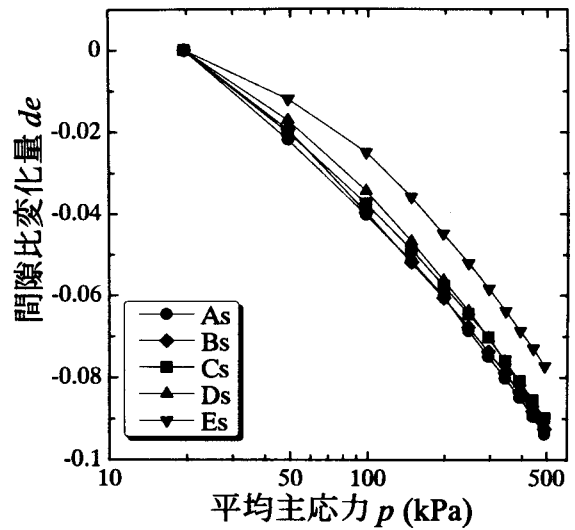
図-4.7 は、飽和土の異方圧密試験から得られる間隙比の変化である。図からは、応力比によらず全ての試験が同じ傾きの曲線となっている。Cam-Clay モデルは次式で示す体積ひずみ式を与えている。

$$de = -\lambda \frac{dp'}{p'} - \frac{\lambda - \kappa}{M} d\left(\frac{q}{p'}\right) \quad (4.2)$$

ここで、 e は間隙比、 p' は平均有効主応力、 q は主応力差、 λ, κ はそれぞれ自然対数で表した圧縮指数、膨潤指数、 M は $p'-q$ 平面で表された応力状態における限界状態線の傾きである。式(4.2)から、応力比 q/p' が一定になる異方圧密経路では、間隙比の変化量は平均主応力にのみ依存することになり、図-4.7 の試験結果と等しくなる。図-4.8 は主ひずみ差と平均主応力の関係を示したものである。図-4.9 は軽部⁷⁾が、異方圧密中の主ひずみ差 $\epsilon_d = \epsilon_1 - \epsilon_3$ と平均主応力 $\log \sigma'_m$ との間に応力比が同じならば一義的な関係のあることを示したものである。本研究で用いた供試体



(a) 平均主応力～間隙比関係



(b) 平均主応力～間隙比変化量関係

図-4.7 飽和土の異方圧密試験結果

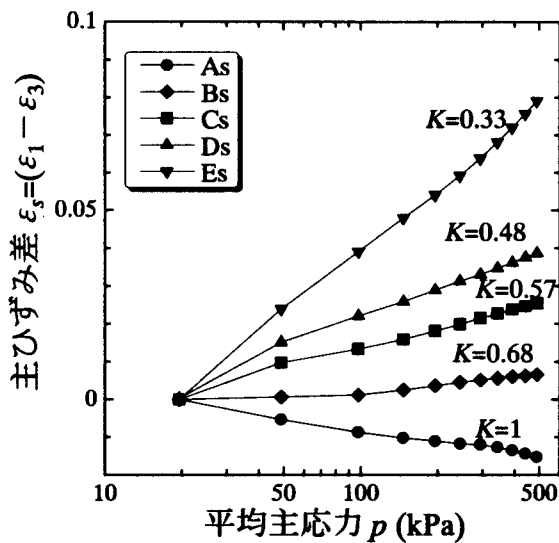


図-4.8 平均主応力～主ひずみ差関係

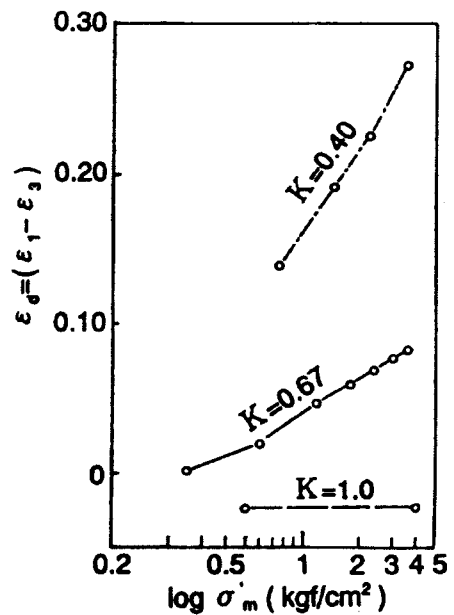
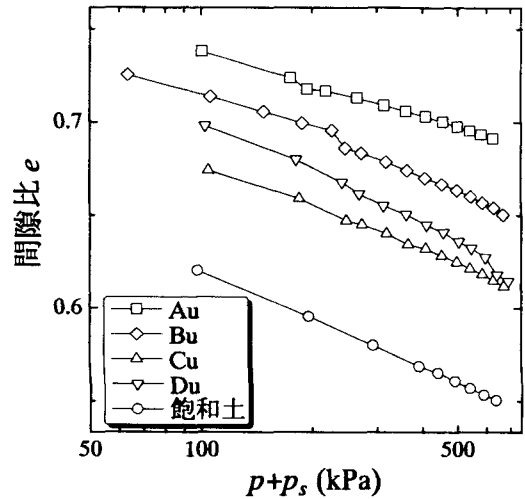


図-4.9 軽部の異方圧密試験

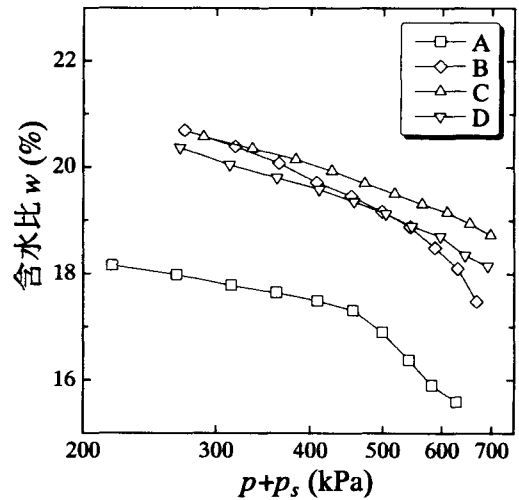
は、一次元的に予圧密を行ったものであるためか、もしくは試料自身が持っている異方性のためか等方圧密試験であるAsにおいても主ひずみ差が生じているが、軽部の結果と同様に応力比によって傾きの異なる直線が現れている。

図-4.10は、異方圧密段階での供試体の状態量変化である。図-4.10(a)は、サクシオン載荷段階からの連続した間隙比変化であり、図中には別に行った飽和土の圧密試験結果も記している。応力パス q/p の傾きが大きい試験ほど、圧縮曲線の傾きが大きくなっているのが分かる。飽和土の場合、Cam-Clayモデルに従うと、 q/p が一定であればダイレイタンスは生じず、間隙比変

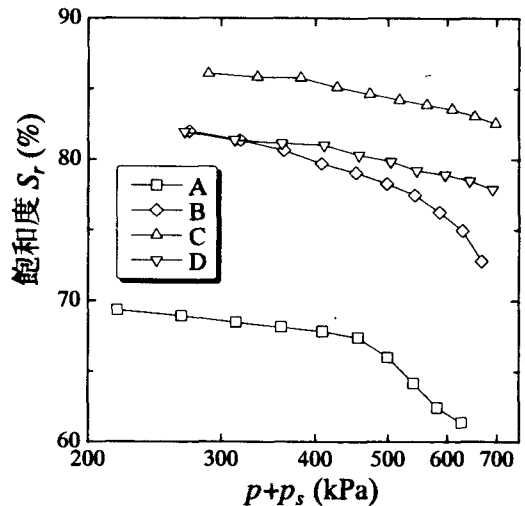
化は平均主応力 p のみに依存し、 p の対数軸に対して一定の傾きを示す。しかし、不飽和土の場合、サクシオンによる応力成分を考慮しなければならない。式(1.42)に従って圧縮中のメニスカス応力 p_m が一定であるとする、等方応力状態では $(p+p_s)$ の対数軸に対して間隙比変化が平行となる。ダイレイタンスによる体積変化は $q/(p+p_s)$ で規定される。本研究では、応力経路 q/p を一定に保った異方圧密であるため圧縮曲線が平行にはならない。サクシオン応力 p_s を一定であると考え、ダイレイタンスを引き起こす $q/(p+p_s)$ は応力段階とともに大きくなっていくので、間隙比変化の傾きに差異が生じたものと考えられる。図-4.11は、不飽和土の理論異方圧密曲線を表したものである。破線は式(1.43)から計算した等塑性体積ひずみ線である。式(1.43)中にはバルク応力 p_b 、メニスカス応力 p_m が含まれており、厳密に言えば最乾燥水分線を仮定しなければならない。実際には、メニスカス応力 p_m はゼロではないが、本研究で用いている供試体は、表-4.3 に示すとおり飽和度が高く、 p_m は $(p+p_b)$ に比べて十分に小さいと考え $p_m = 0$ とみなす。図中の実線は $q/(p+p_s)$ 一定の応力経路を表している。この場合、図-4.11(c) のとおり $e - \log_e(p+p_s)$ 関係は応力比によらず同じ傾きの直線になる。本研究での応力経路はサクシオン載荷後の異方圧密であり、図中の点線で示したような応力経路になり、 q/p が大きいほど圧縮量が大きくなる。図-4.10(a)の試験結果は、この理論的な挙動



(a) $(p+p_s) \sim$ 間隙比



(b) $(p+p_s) \sim$ 含水比関係



(c) $(p+p_s) \sim$ 飽和度関係

図-4.10 異方圧密段階の供試体状態変化

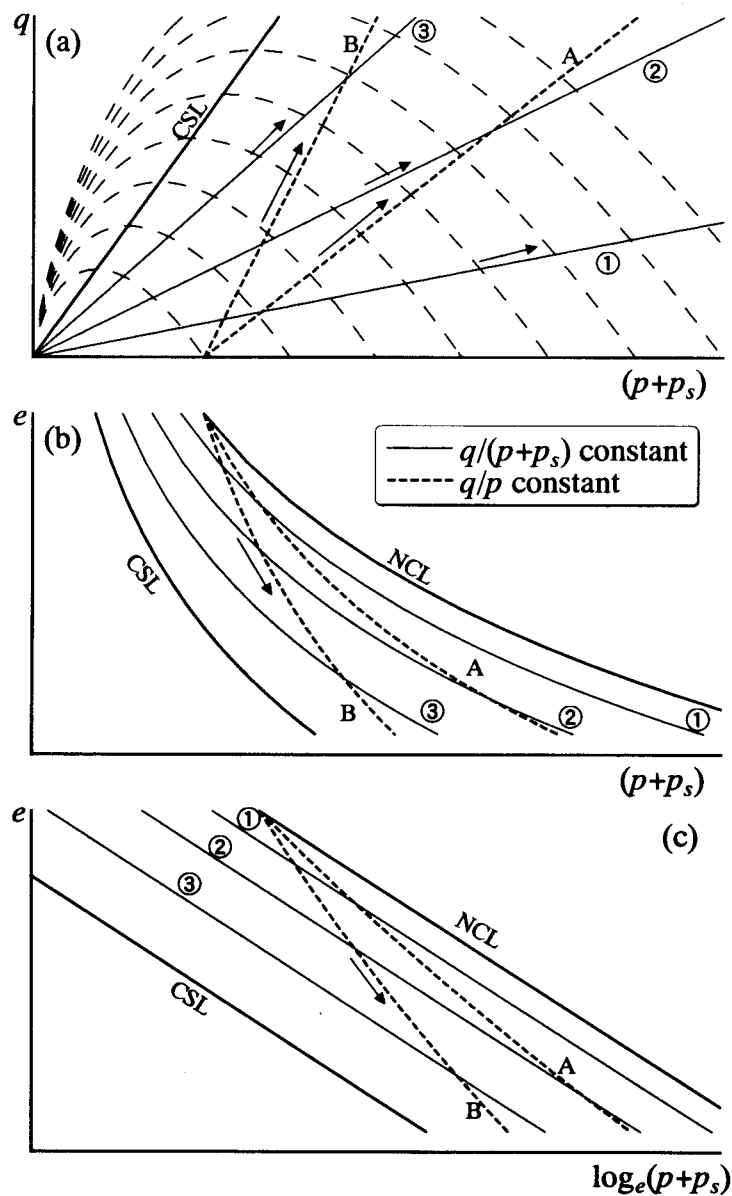


図-4.11 応力経路が間隙比変化に与える影響

に合致していると考えられる。図-4.10 (b), (c)は、それぞれ異方圧密段階の含水比変化と飽和度変化である。等方応力状態に近い供試体 Au, Bu では、含水比が大きく減少し同時に飽和度の低下も見られる。しかし、試験中に排水経路に気泡が見られたことから、正確に排水量が測定できなかったのだと考えられる。飽和度は式(1.54)に見られるようにサクシオン応力に影響を及ぼすが、ここでは高々30(kPa)であったため、以降の結果整理にはそのままの飽和度を用いた。

図-4.12 は、飽和土の試験から得られた異方圧密中の応力経路およびひずみ増分ベクトルを $p \sim q$ 面上に描いたものである。図中の実線は、別に行った飽和土の三軸試験より得られた限界状態線である。ただし、用いた試料は飽和状態でもせん断中に正のダイレイタンス(膨張)を生じ

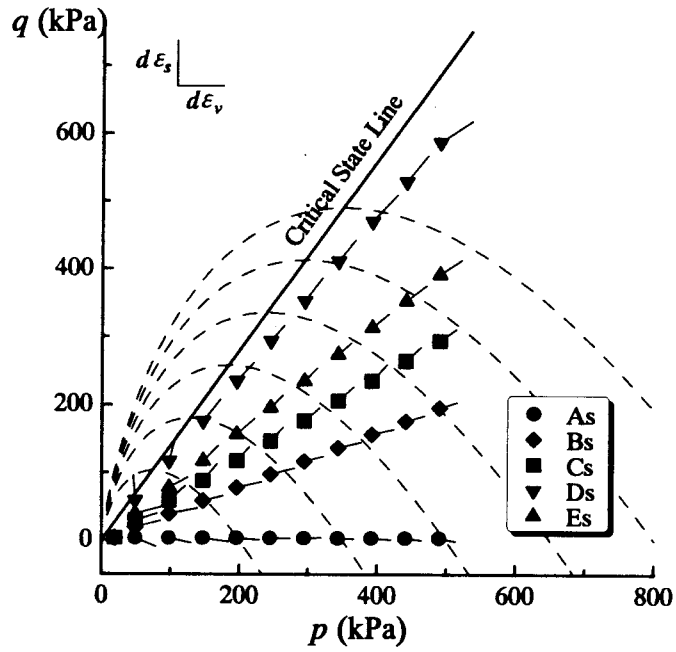


図-4.12 $p \sim q$ 面上に描かれたひずみ増分ベクトル(飽和土)

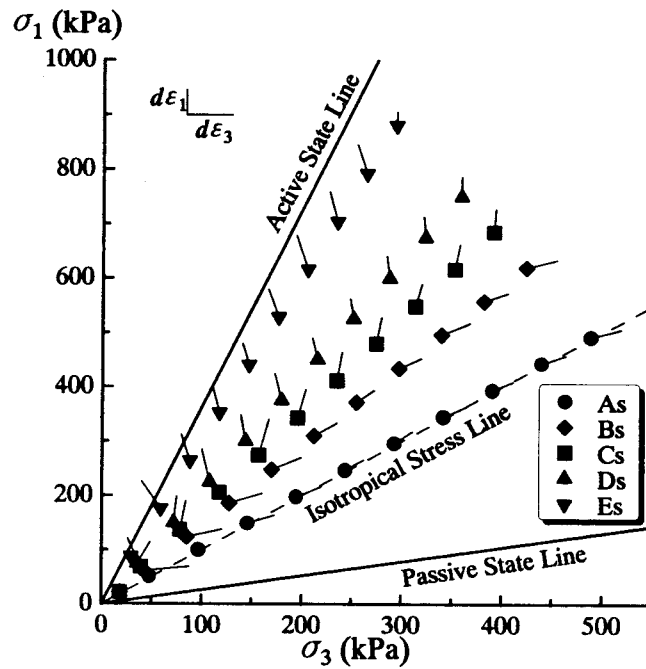


図-4.13 主応力方向へのひずみ増分ベクトル(飽和土)

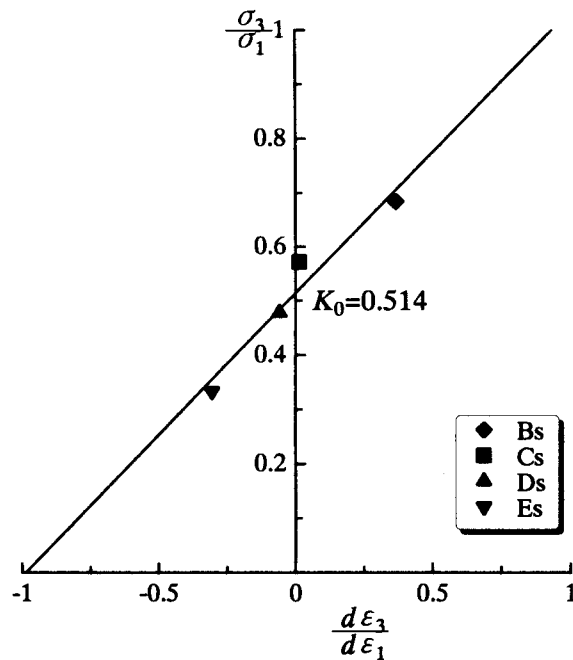


図-4.14 主応力比から主ひずみ増分比関係(飽和土)

るため、体積最大圧縮点での応力状態から限界状態線を算出した。破線は Cam-Clay モデルの降伏関数を表している。ひずみ増分ベクトルは、応力経路方向への依存性が見られるものの、降伏関数に直交している。図-4.13 は、主応力空間でのひずみ増分ベクトルを表したものである。図中には限界状態線より求めた主働状態と受働状態を表す線が描かれている。この図において、側方へのひずみ増分、つまり $d\varepsilon_3$ がゼロとなるときの応力比が静止土圧係数である。図からは、供試体 Cs と供試体 Ds の間の応力比が静止土圧係数であると判断することができる。そこで、図-4.14 のように、主応力比と主ひずみ増分の比の相関関係を表した。ここでは、塑性域の静止土圧係数を求めるため、各試験の最終応力段階での値をプロットしている。また、等方応力状態を表す As は、他と大きく傾向がずれているため図からは除いた。図より、本研究で用いた供試体の静止土圧係数は $K_0 = 0.514$ と判断することができる。

図-4.15 は、不飽和供試体の異方圧密段階でのひずみ増分ベクトルを $(p + p_s) \sim q$ 平面上に表したものである。図中実線は、別に行った飽和土の三軸試験より得られた限界状態線である。前章で示したとおりサクション応力 p_s を用いると不飽和土と飽和土の限界状態線が一致することが分かっており、ここでも不飽和土の限界状態線を表している。図中破線は、式(1.43)の不飽和土の降伏関数を表している。降伏関数にはバルク応力 p_b 、メニスカス応力 p_m が含まれているが、図中では $p_m = 0$ の理論降伏関数を示した。ひずみの増分方向が、応力経路に多少依存しているが、これは飽和土にも見られた現象であり、関連流れ則の適用性を仮定した降伏関数式(1.43)の妥当性が確かめられた。図-4.16 は主応力として $(\sigma + p_s)$ を用いて、主応力空間にひずみ増分

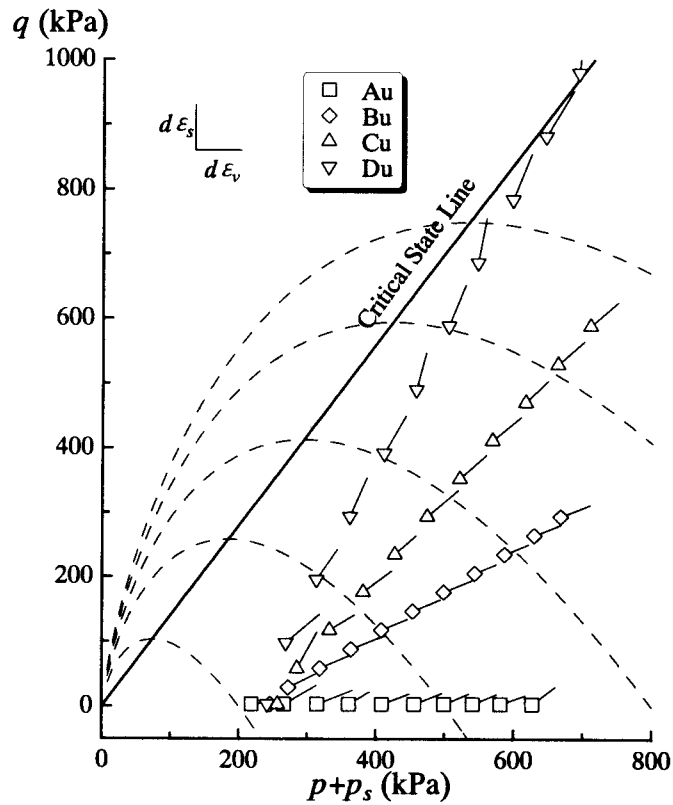


図-4.15 $(p+p_s) \sim q$ 面上に描かれたひずみ増分ベクトル(不飽和土)

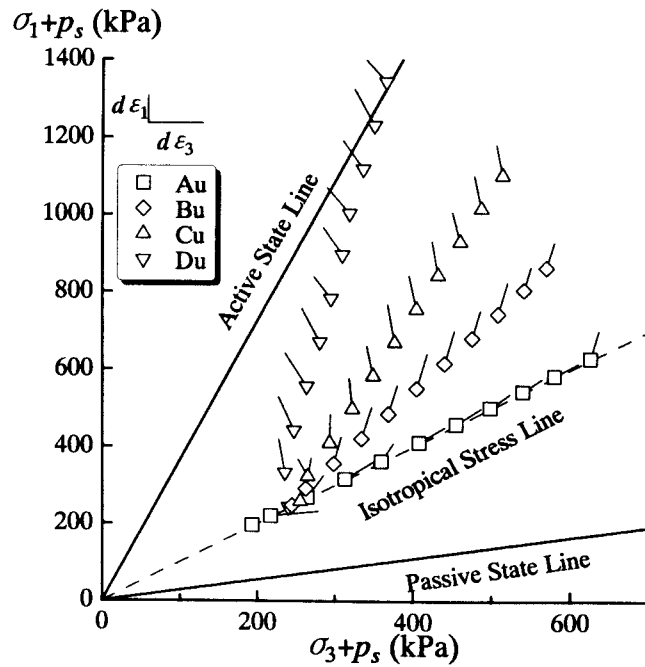


図-4.16 主応力方向へのひずみ増分ベクトル(不飽和土)

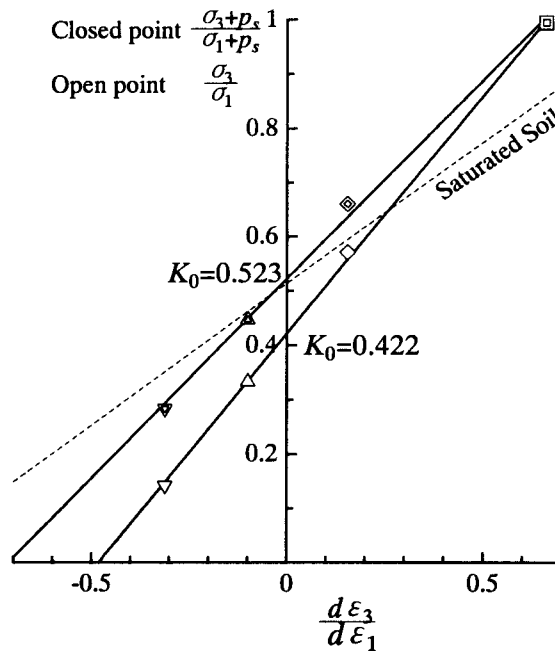


図-4.17 主応力比～主ひずみ増分比関係(不飽和土)

ベクトルを描いたものである。飽和土の場合と同様に、静止土圧係数を推定でき、供試体 Bu と供試体 Cu の間に静止土圧係数が存在すると考えられる。図-4.17 は、主応力比～主ひずみ増分比関係を表している。図中には、先に示した飽和土の傾向線も描かれている。ここで、図中の点線で飽和土の傾向線と、不飽和土の傾向線が横軸の原点以外では異なっているが、これは不飽和土と飽和土のせん断特性の違いによるものと考えられる。先にも示したとおり、限界状態では、サクシオン応力の適用で同じ応力状態として表すことができるがダイレイタンス特性が異なるために、このような傾向線の相違が生じる。そして静止土圧係数を表すときにはダイレイタンス成分がゼロとなる点であるため、一致するのだと説明できる。図中の白抜きのプロットは、応力比を実質応力の比で算出したものである。これによると実質応力としては静止土圧係数 $K_0 = 0.422$ が飽和土の場合より小さくなっていることが分かる。Lawton らの研究で、一次元圧密試験において軸応力によって静止土圧係数が高くなっていくと示していたが、それは圧縮によって土は飽和土に近くなっていく。つまり、静止土圧係数も飽和土のものに近づいていくと考えられる。本研究の試験結果と一致する。しかし、本来土圧は有効応力で表すものである。不飽和土における有効応力、つまり変形に寄与する応力成分は実質応力とバルク応力の和である $(p + p_b)$ である。このように応力比を取ることによって、飽和土の静止土圧係数と等しくなると考える。ここでは、バルク応力の上限となるサクシオン応力で主応力を表している。これによって得られる静止土圧係数は $K_0 = 0.523$ となり、飽和土の場合よりわずかに大きい値となる。つまり、バルク応力を算定

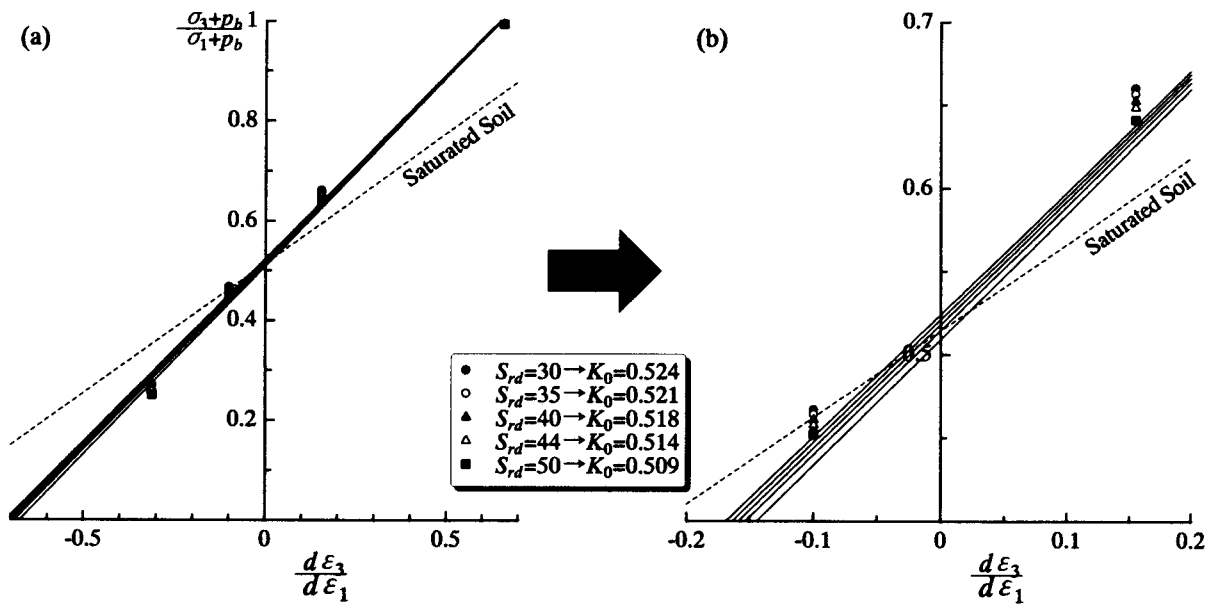


図-4.18 最乾燥水分線の推定

することができれば、飽和土の静止土圧係数と等しくなることが推定できる。逆に、試行錯誤によって飽和土の静止土圧係数と等しくなるようなバルク応力 p_b を求めることによって最乾燥水分線を推定することができる。本研究に用いている供試体は、全てサクシオン $s = 294$ (kPa) で制御されており、最乾燥水分線が間隙比などの影響を受けずに単なるサクシオンのみの関数とした場合、すべての供試体について同じ S_{rd} を式(1.52)に代入することによってバルク応力を算定することができる。図-4.18 は、種々の S_{rd} を設定して、実質応力にバルク応力を加えた応力の比を縦軸に取り、図-4.17 を描き改めたものである。これによって飽和土の静止土圧係数 $K_0 = 0.514$ と等しくなるときの S_{rd} は 44% と算定された。ちなみに、軽部の最乾燥水分線および本田の最乾燥水分線から得られる $s = 294$ (kPa) での S_{rd} は、それぞれ 40.38%、39.24% であり大きくは外れていない。これまでは、最乾燥水分線を最も乾燥側の吸水曲線としたり、2球モデルより定式化するという仮定に過ぎなかったが、このように間接的に最乾燥水分線が算出可能であることを示した。ただし、この方法はサクシオンの関数である $S_{rd}(s)$ の $S_{rd}(s = 294)$ を算出したのであって、連続関数としての最乾燥水分線を求めるには多くの試験を行うか、もしくはこれまでの仮定に基づいた最乾燥水分線式が、求められた (s, S_{rd}) を満たすように、パラメーターを決めるという方法を用いる必要がある。

(b) せん断段階

図-4.19 は異方圧密された不飽和供試体をせん断した時の、応力～ひずみ関係である。用いた試料は、せん断時に圧縮から膨張に転じた後、破壊に至る。図-4.15 で示した様に、供試体 Du

に関しては応力比が高く既に膨張域にあるため、せん断初期から膨張が始まっている。しかし、主応力差 q のピーク点もダイレイタンスー特性もほぼ等しく、強度に与える応力経路の影響は見られない。供試体 Cu が他のものに比べて、わずかに強度が大きくなっているが、この供試体はサクシオン段階終了時の飽和度が高いためである。式(1.54)で表されるようにサクシオン応力は、同じサクシオン値であれば飽和度が高いほど大きな値を示す。このサクシオン応力の違いが、強度差となって現れていると考えられる。つまり、応力経路に関わらず、既存の構成モデルの破壊基準を適用できることが明らかとなった。

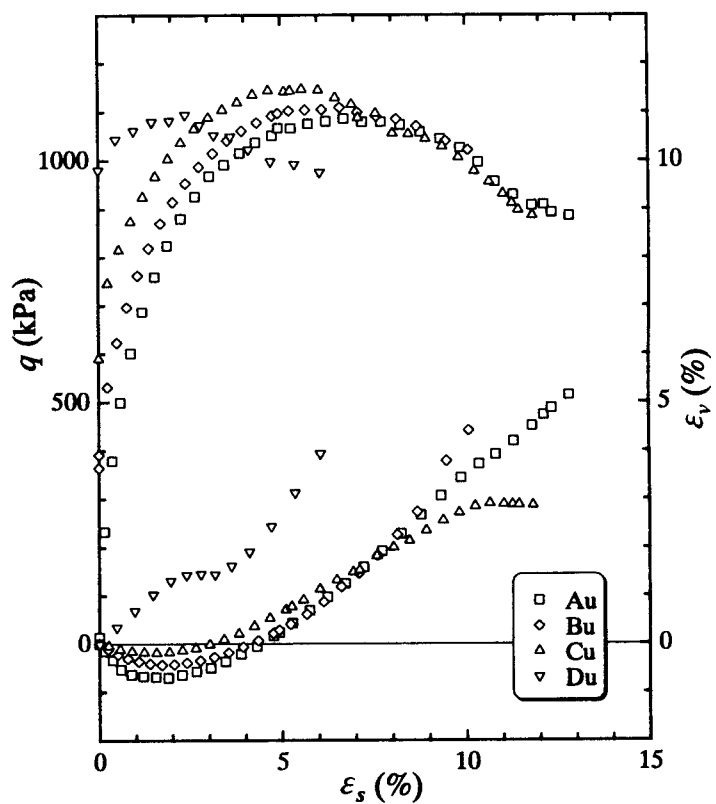


図-4.19 せん断中の応力～ひずみ関係

4.2 不飽和土の排気・非排水等方圧縮試験

前節で示したように、不飽和土の変形に寄与するバルク応力を間接的に求め最乾燥水分線上の飽和度 S_{rd} を逆算することができる。しかし、サクシオンに対して連続した S_{rd} を得るために同じ方法でいくつかのサクシオン値で試験を行う必要がある。ここでは、より簡便な方法の模索として不飽和土の非排水等方圧縮試験を行う。

Skempton⁸⁾は、三軸圧縮状態 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) において、応力変化 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ による間隙水圧の増分 Δu_w が、次式で与えられるとした。

$$\Delta u_w = B \{ \Delta\sigma_3 - A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \quad (4.3)$$

ここで、 A, B は Skempton の間隙圧係数である。飽和土の等方圧縮試験を行った場合、Terzaghi の有効応力原理に従うと $B = 1$ となる。飽和土の場合、非排水条件は間隙水による変形の拘束を表しているが、不飽和土では間隙空気の圧縮があるため実際には体積変化を生じる。ここで、間隙水の移動がなくバルク水はその形態を保持すると考える。不飽和土の分応力は、実質応力 p とバルク応力 p_b の和であるため、等方的な外力増分 Δp_T が間隙水相へ作用するのはバルク水が占める作用面積だけである。このとき、間隙水圧の増分 Δu_w は、

$$\Delta u_w = \frac{S_{rb}}{100 - S_{rc}} \Delta p_T \quad (4.4)$$

ここで、 S_{rb} はバルク水の占める飽和度、 S_{rc} は限界飽和度であり吸着水相の占める飽和度である。ここに最乾燥水分線より求められる式(1.50)を代入すると

$$\Delta u_w = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} \Delta p_T \quad (4.5)$$

が得られ、式(4.3)中の B 値は、

$$B = \frac{\Delta u_w}{\Delta p_T} = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} \quad (4.6)$$

となる。つまり、試験により B 値が測定できれば式(4.6)を S_{rd} について展開した次式

$$S_{rd} = \frac{S_r - 100B}{1 - B} \quad (4.7)$$

により、最乾燥水分線上の飽和度 S_{rd} を求めることができる。しかし、実際には土骨格の変形により間隙水が移動し形態が変化するため、本節では構成モデルからのアプローチも試みる。

(1) 試料および試験方法

用いた試料は市販の No.5 クレーであり、その材料特性を表-4.5 に示す。

表-4.5 試料の材料特性

G_s	w_p	w_L	I_p
2.70	29.6%	43.0%	13.4

供試体には、排水時間の短縮を目指し、含水量の少ない締固め供試体を用いた。まず、粉末の No.5 クレーに蒸留水を加えて所定の含水比に調整し、24 時間放置した。含水比調整された粉末試料を、直径 35mm の 4 つ割モールドに三層に分けて投入し、図-4.20 に示す突固め棒によって突き固めを行った。突固め棒には、プルーピングリングが設けてあり、プルーピングリング内のダイヤルゲージにより試料に伝わっている応力を正確に読み取ることができるため、所定の応力を静的に与えることができる。また、突固め応力が均一に伝わるように、突固め棒で突く位置に法則性を持たせた。図-4.21 は突固め試験結果である。この図からは、最適含水比を示す乾燥密度のピークが現れていない。用いた試料は、含水比が高くなっていくと突固めの際に水が滲み出てくるため、それ以上の乾燥密度を得ることができなかった。図中には、水が出ない最大の含水比までの試験結果である。実験には、490 (kPa) の一層あたり 25 回突固めを用いた。突固め終了

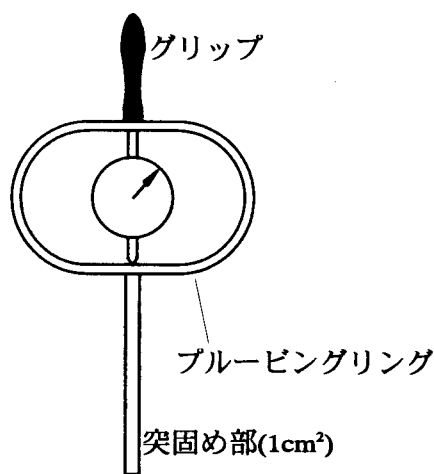


図-4.20 突固め棒

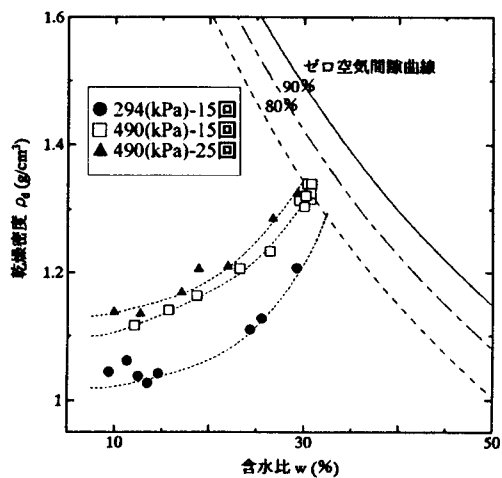


図-4.21 突固め試験結果⁹⁾

後、モールドから出して高さ 80mm に成形し、前節の異方圧密試験と同じ不飽和土用三軸試験機(図-4.4)に設置した。供試体には、まずサクシヨン履歴を与えて所定の不飽和状態にした。サクシヨン载荷には、排水条件下で間隙空気圧を与える加圧板法を用いた。表-4.6, 4.7 は、それぞれ供試体の初期状態および与えたサクシヨン履歴である。

表-4.6 供試体の初期状態

供試体	w (%)	e	S _r (%)
Ad	31.59	1.070	79.97
Aw	22.43	1.143	53.15
Bd	28.80	1.206	64.71
Bw	28.01	1.162	65.29

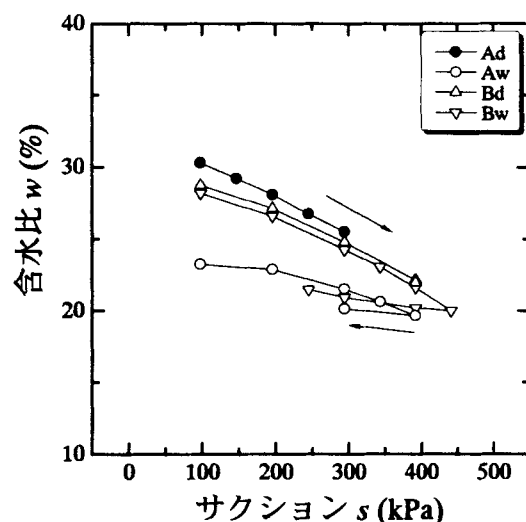
表-4.7 応力条件及び応力経路

	拘束圧 p (kPa)	サクシヨン s (kPa)
Ad	19.6	0→294
Aw	19.6	0→392→294
Bd	19.6	0→392
Bw	19.6	0→441→245

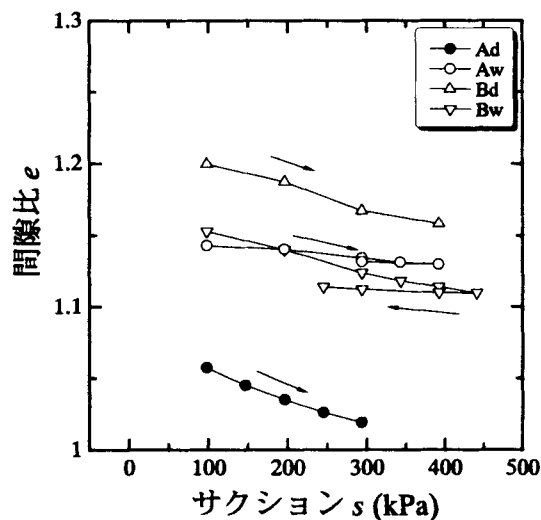
サクシヨン履歴は、等サクシヨン値で飽和度の異なる2供試体および等飽和度でサクシヨン値の異なる2供試体となるように設定した。サクシヨン载荷後、間隙空気圧を一定に保って、非排水条件下でセル圧を与え、供試体を等方的に圧縮した。そのときのセル圧の増分と間隙水圧の増分の比を B 値とした。また、与えている間隙空気圧と等方圧縮によって生じた間隙水圧の差がサクシヨンである。

(2) 試験結果

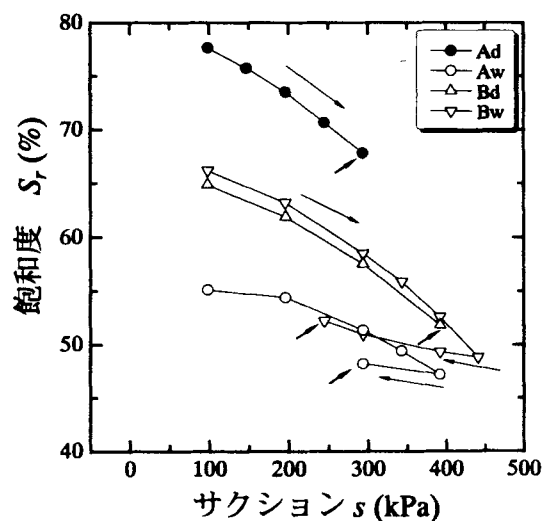
図-4.22 は、サクシヨン载荷段階の供試体状態変化である。供試体の初期状態に多少のばらつきがあるが、図-4.22(c)中で、サクシヨン載



(a) サクシヨン～含水比関係



(b) サクシヨン～間隙比関係



(c) サクシヨン～飽和度関係

図-4.22 サクシヨン载荷段階の供試体状態変化

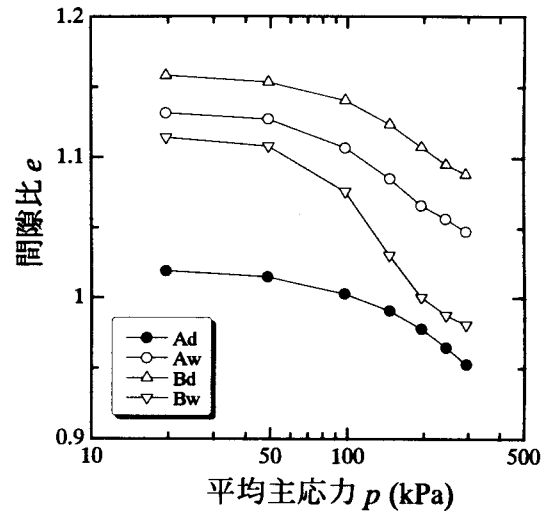
荷段階終了時の供試体のサクシオン, 飽和度を表すプロットを矢印で指示している. 目的どおり, 供試体 Bd と Bw は同じ飽和度でサクシオンの異なる供試体となっている. 表-4.8 に, サクシオン载荷段階終了後の供試体状態を示す.

表-4.8 サクシオン载荷段階終了時の供試体状態

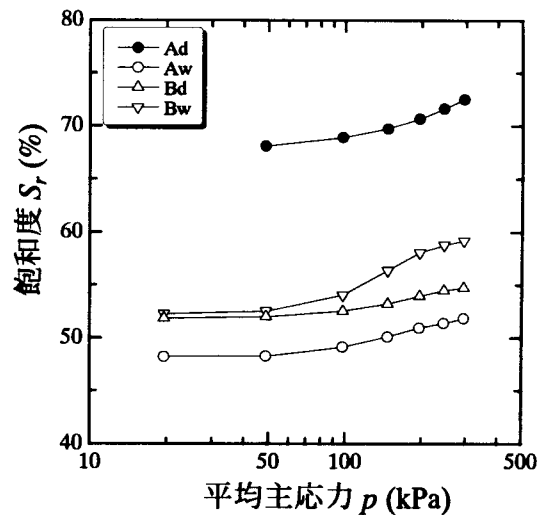
供試体	u_a (kPa)	w (%)	e	S_r (%)
Ad	294	25.52	1.019	67.83
Aw	294	20.14	1.132	48.22
Bd	392	22.70	1.158	51.86
Bw	245	21.49	1.114	52.26

図-4.23 は非排水等方圧縮段階の供試体状態変化である. 供試体 Bw については, 試験中に誤って $p = 49$ (kPa) の段階で排水条件になっていたため, 間隙水圧の変化を測定することができなかった. 同じサクシオン値の供試体 Ad と Aw を比較すると, 飽和度の高い Ad の方が高い間隙水圧が発生する. また, 同じ飽和度でサクシオン値が異なる供試体 Bd と Bw を比較すると, サクシオン値が高い Bd の方が高い間隙水圧を生じる.

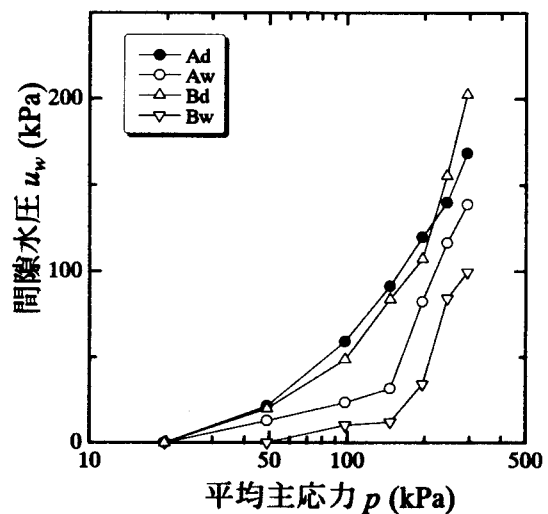
図-4.24 は, 非排水等方圧縮段階における水分特性(サクシオン, 飽和度)を表している. それぞれの図中の×印はサクシオン载荷段階での水分特性を表している. また, 点線は第2章で提案した水分特性曲線モデルに従って描いた理論吸水曲線である. これはサクシオンの最大の点における間隙比, 含水比から求めている. 水分特性曲線は間隙比によって大きく影響を受けることは第2章で明らかにされており, 本研究のように等方圧縮によって間隙比が変化する状態では, その影響を考慮しなければなら



(a) 平均主応力～間隙比関係



(b) 平均主応力～飽和度関係



(c) 平均主応力～間隙水圧関係

図-4.23 非排水等方圧縮段階の供試体状態変化

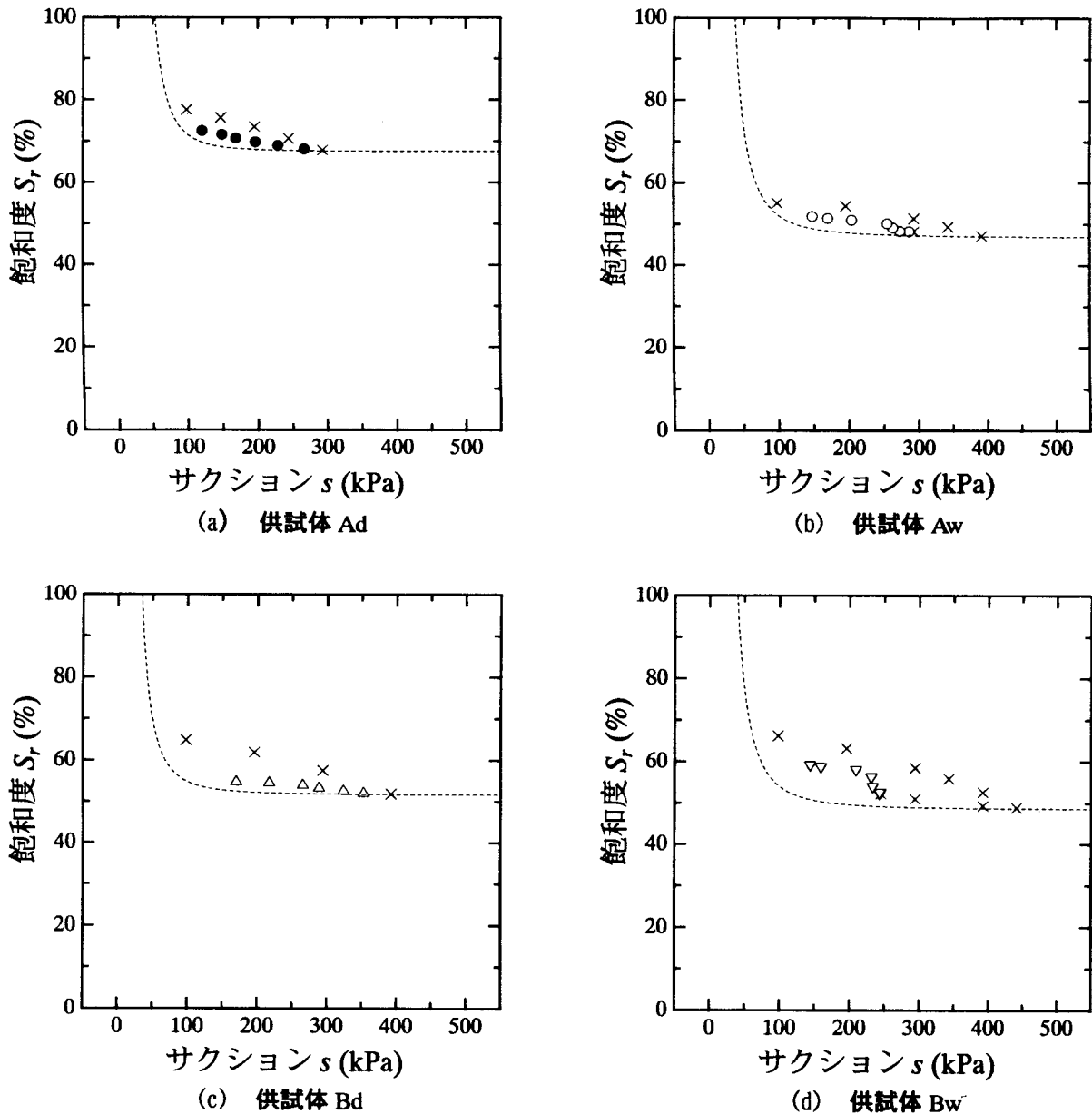


図-4.24 非排水等方圧縮段階での水分特性

ない。圧縮によって間隙比が小さくなると水侵入値は高くなるので、図中の理論吸水曲線は、より高い水侵入値に向かうはずである。実際の測定値はすべて図中に描かれている理論吸水曲線よりも高い飽和度であり、定性的に先の水分特性曲線モデルが正しいことが説明できる。

次に、試験結果より最乾燥水分線を求めることを試みる。図-2.25は、試験より得られた B 値と供試体状態の比較である。一般に B 値は飽和度と密接な関係があるとされている。しかし、軽部が示した最乾燥水分線によると、たとえ飽和度が等しくてもサクシオン値が異なれば土中の間隙水分分布が異なることを意味している。土が外部から力を受けるとき、土骨格の変形を拘束するのはバルク水のみである。メニスカス水は土粒子接点のすべりを抑制するが、土の体積変化に

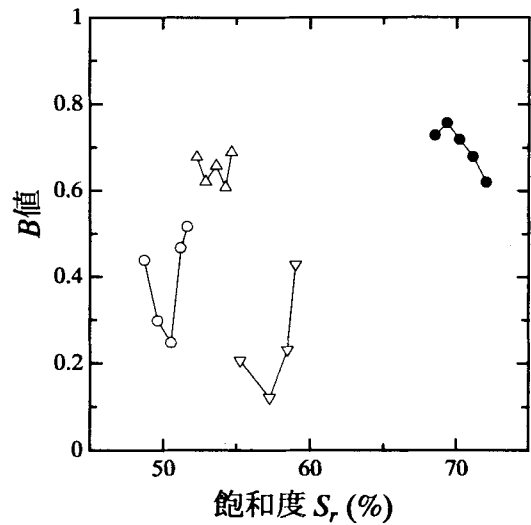
影響されない。図-4.25の結果からは、 B 値と飽和度、サクシオンとも相関関係を求めることは難しく、サクシオンと飽和度の相互関係で間隙水分布が異なるとする最乾燥水分線概念が正しいと言える。ここで求められた B 値より式(4.7)を用いて最乾燥水分線上の飽和度 S_{rd} を算出したものが、図-4.26である。結果的に、同じサクシオン値でも S_{rd} が異なっている。また、 S_{rd} が比較的高く、図中には含まれていないが100を越えるものもある。これは、体積変化をバルク水で全て拘束するという仮定に無理があったためと考えられる。しかしながら、最乾燥水分線の上に凸な形を表しており、そのピーク点は200~250(kPa)にあって、空気侵入値以下のサクシオン領域で二次放物線補完をしている軽部による最乾燥水分線を定性的に表していると言える。ただし、実際には図-4.23に示すとおり、間隙比は大きく変化しており定量的な表現には至っていない。そこで、体積変化とサクシオン変化より最乾燥水分線を求めることを試みる。

図-4.27は、横軸に $(p+p_s)$ を取り、サクシオン载荷段階から非排水等方圧縮段階の間隙比変化を表したものである。図中には、過去に同一試料で行った飽和土の圧密試験結果も記してある。式(1.41)を次式のように変化させる。

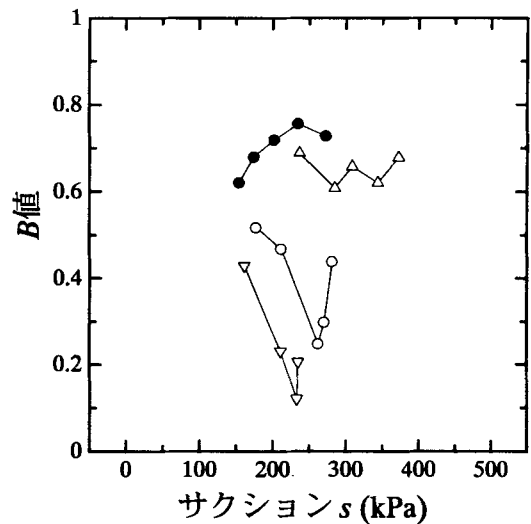
$$\Delta e = -(1+e_i)\epsilon_v^p$$

$$d(\Delta e) = -(1+e_i) \left(\frac{\partial \epsilon_v^p}{\partial p'_0} dp'_0 + \frac{\partial \epsilon_v^p}{\partial p_m} dp_m \right)$$

ここで、 Δe は基準間隙比からの間隙比変化量である。これより、弾塑性状態にあるときの間隙比変化を表すと、



(a) 飽和度~ B 値関係



(b) サクシオン~ B 値関係

図-4.25 供試体の水分特性と B 値

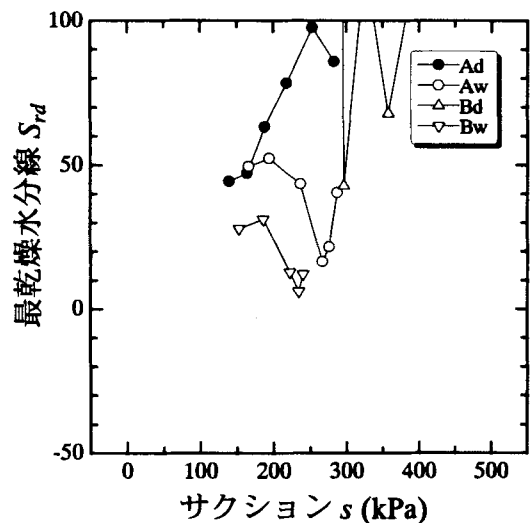
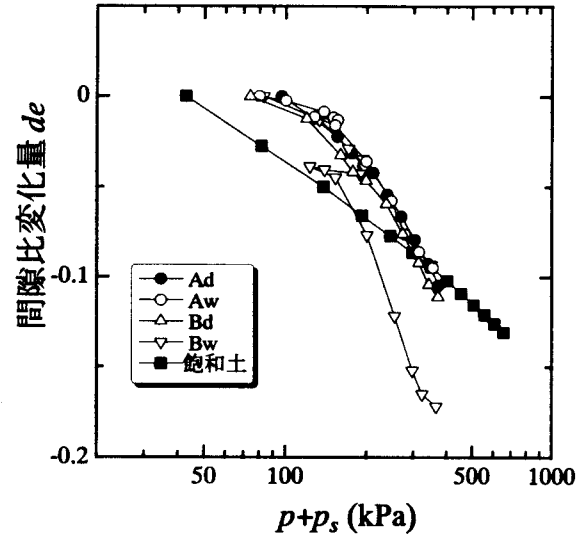
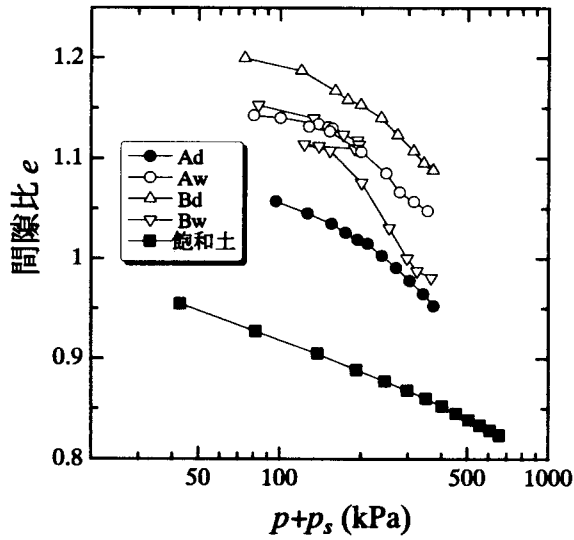


図-4.26 式(4.7)より求めた S_{rd}



(a) $(p + p_s) \sim$ 間隙比関係

(b) $(p + p_s) \sim$ 間隙比変化量関係

図-4.27 サクシオン載荷段階～非排水等方圧縮段階の間隙比変化

$$d(\Delta e) = -\lambda \left[\frac{1}{p'_0 + p_m} (dp'_0 + dp_m) - \frac{a}{p'_{yi} + (1+a)p_m} dp_m \right] \quad (4.8)$$

となる。ここで、 $p' = p + p_b$ 、 $p_s = p_b + p_m$ であることを考慮に入れると、

$$d(p + p_s) = dp + dp_s = dp + dp_b + dp_m = dp' + dp_m \quad (4.9)$$

であり、式(4.8)は次のように変形できる。

$$d(\Delta e) = -\lambda \left[\frac{1}{p + p_s} d(p + p_s) - \frac{a}{(p_{yi} + p_s) + ap_m} dp_m \right] \quad (4.10)$$

ここで、 p_{yi} は飽和状態における降伏応力を表している。式(4.10)は、 $dp_m = 0$ のとき、 $e \sim \log_e(p + p_s)$ 関係は傾き λ の直線になることを表している。 λ は飽和土の圧縮係数であり、図-4.27 で示す飽和土の圧密試験結果の傾きである。しかし、図-4.27 の結果は試験によって、傾きの異なるものとなっている。これは式(4.10)中の右辺第二項の影響によるものと考えられる。そこで、式(4.10)を図-4.28 のように考える。非排水等方圧縮試験は、実質応力 p の増加であり、間隙水圧が発生することでサクシオンが減少し、バルク応力 p_b 、メニスカス応力 p_m とも減少する。このとき、図-4.27 より $(p + p_s)$ としては増加していることが確認でき、それによる間隙比変化量は、

$$d(\Delta e) = -\frac{\lambda}{p + p_s} d(p + p_s) \quad (4.11)$$

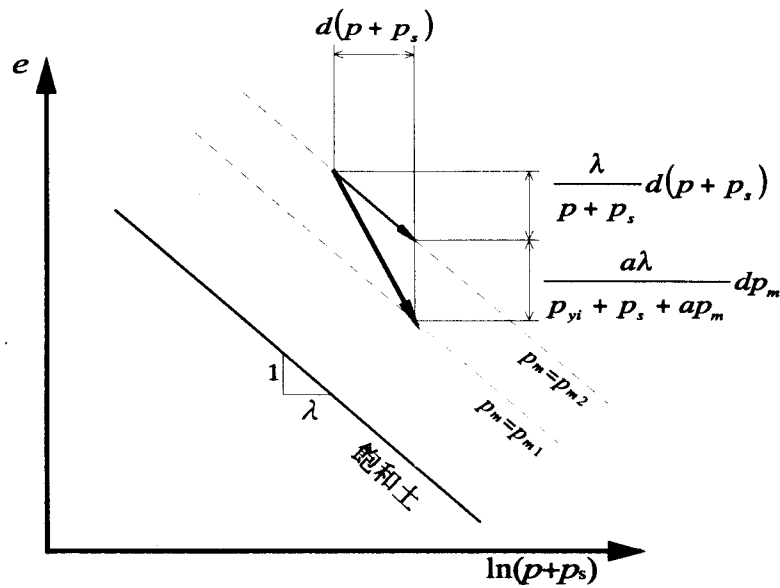


図-4.28 間隙比変化に与える応力成分

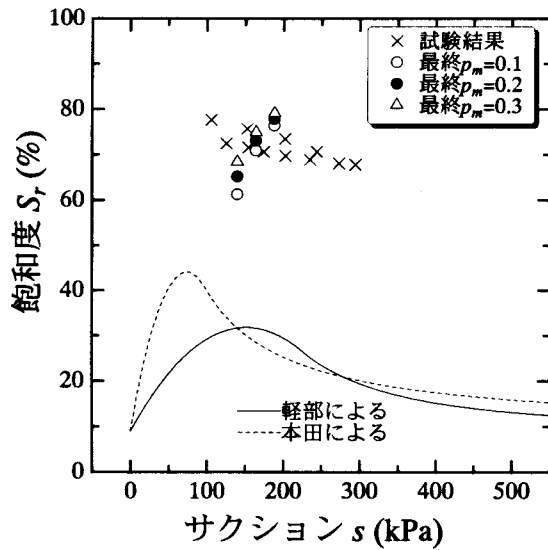
である。サクシオン応力 p_s は最乾燥水分線に依存しないので、供試体のサクシオン、飽和度より算出することができる。実際の間隙比変化は、式(4.11)で得られる間隙比変化より大きく、この差がメニスカス応力 p_m による次式の体積変化とする。

$$d(\Delta e) = \frac{a\lambda}{(p_{yi} + p_s) + ap_m} dp_m \quad (4.12)$$

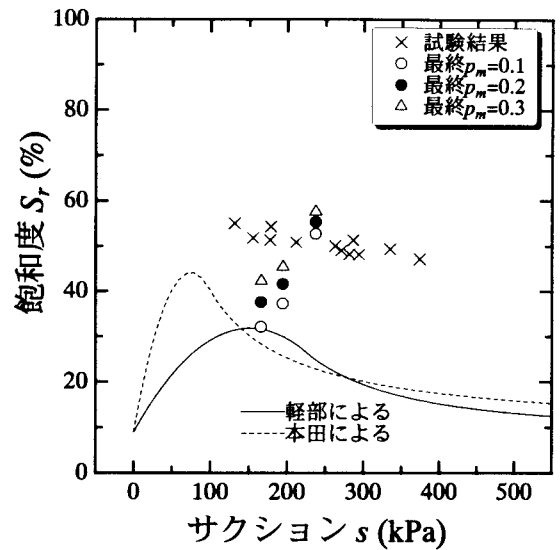
式(4.12)中の a について、軽部ら¹⁰⁾は弾性球モデルより $a \approx 0.5$ としている。また、飽和土の圧縮係数については $\lambda = 0.04593$ (本田¹¹⁾)を用いる。 p_{yi} は基準となる飽和土の先行降伏応力であるが、用いた試料は予圧密供試体ながら三軸試験機内で等方圧縮したとき変曲点が見られず、正規圧密状態にあるといえる。ここでは、実験開始時の圧力段階として $p_{yi} = 19.6$ (kpa)を用いる。これによって、式(4.12)中に試験結果を代入すると、未知数は p_m, dp_m のみとなる。つまり、ひとつの応力段階で p_m を与えてやれば、差分により全応力段階での p_m が求まり、式(4.12)を変形した次式より最乾燥水分線が求まることになる。

$$S_{rd} = \frac{(10000 - 100S_{r0})p_m + (100 - S_r)S_{r0}s}{(100 - S_r)s + (100 - S_{r0})p_m} \quad (4.13)$$

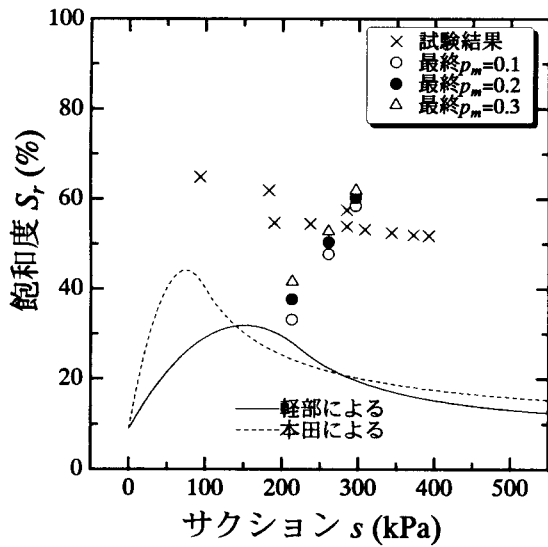
図-4.29 は、得られた S_{rd} を表している。図中には、軽部、本田による最乾燥水分線をそれぞれ実線、点線で記している。メニスカス応力 p_m を求めるために差分を用いており、試験最終段階での p_m を種々与えて、各段階の p_m を算出している。試験結果からは、式(4.12)が大きく p_m の



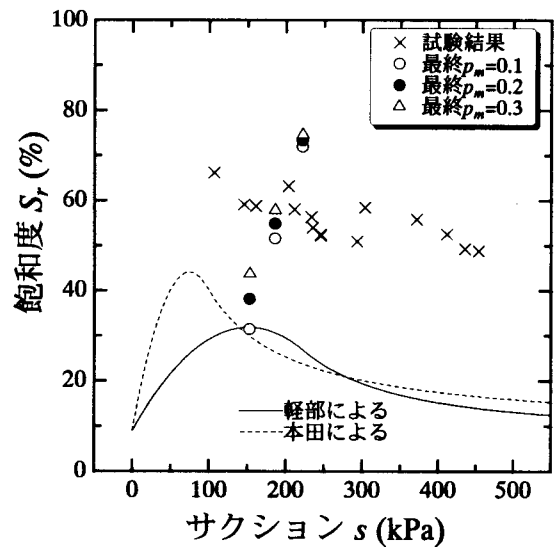
(a) 供試体 Ad による結果



(b) 供試体 Aw による結果



(c) 供試体 Bd による結果



(d) 供試体 Bw による結果

図-4.29 最乾燥水分線の導出

変化量を過大に評価してしまい、 s_{rd} がかなり大きな値となり、供試体の飽和度を上回っている。また、差分を用いていることによる誤差の蓄積が予想される。しかし、供試体 Ad および Aw の結果からは定性的に最乾燥水分線のピーク点を表しているのが確認できる。

4.3 まとめ

同じサクシオン値の応力比が異なる異方圧密試験を行って、静止土圧係数を算出することから、間接的に最乾燥水分線を求めることができた。その結果は、軽部、本田の提案しているどちらの最乾燥水分線モデルでも近い値を予測していることが確認できた。ただし、この方法では様々なサクシオン値で、異方圧密試験を行わなければならない、多大な労力と時間を要する。広いサクシオン領域での最乾燥水分線を求めるために、不飽和土の非排水等方圧縮試験を行ったが、最乾燥水分線の定量的な表現には至らなかった。しかし、 B 値より式(4.7)を用いて最乾燥水分線を予測した結果、空気侵入値以下の領域で二次放物線補完したような最乾燥水分線が得られた。この結果は、軽部の提案している最乾燥水分線に近い形状となっている。そこで、実際に最乾燥水分線を求めるには、定サクシオン値での異方圧密試験で定量的に最乾燥水分線上の一点(s, s_{rd})を算出し、その一点を通るように軽部の最乾燥水分線のパラメーターを決めるのが最善であると言える。

参考文献

- 1) 山内豊聡, 福田直三 : 粘土の堆積構造からみた静止土圧係数について, 九州大学工学集報, 第 48 卷, 第 2 号, pp.83-89, 1975.
- 2) 山内豊聡, 安原一哉 : 粘性土の静止土圧係数に関する一考察, 土質工学会論文報告集, Vol.14, No.2, pp.113-118, 1974.
- 3) Hvorslev, H. J. : Physical components of the shear strength of cohesive soils, *Proc. Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE*, pp.169-273, 1960.
- 4) 安原一哉 : 正規圧密粘土の静止土圧係数, 土木学会論文報告集, 第 284 号, pp.59-64, 1979.
- 5) 落合英俊 : 砂の静止土圧係数, 土質工学会論文報告集, Vol.16, No.2, pp.105-111, 1976.
- 6) Lawton, E. C., R. J. Fragazy and J. H. Hardcastle : Stress ratio effects on collapse of compacted clayey sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.17, No.5, pp.714-730, 1991.
- 7) 軽部大蔵 : 粘性土の力学的挙動と安定解析への適用に関する研究, 京都大学博士論文, 1974.
- 8) Skempton, A.W. : The pore pressure coefficient A and B, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.143-147, 1954.
- 9) 河井克之 : 異なる間隙水分布を有する不飽和粘性土の変形強度特性, 神戸大学大学院修士論文, 1996.
- 10) 軽部大蔵, 田中泰雄, 河井克之, 芦田渉 : 不飽和土の力学特性と水分特性曲線の関係について, 建設工学研究所論文報告集, 第 39-A 号, 1997.
- 11) 本田道識 : 不飽和粘性土の力学挙動に与える間隙水分布の影響, 神戸大学大学院修士論文, 1994.

第5章 水分特性曲線を考慮した不飽和土構成モデルによる 土／水連成解析に必要なパラメーター

近年、ロックフィルダム遮水ゾーンの長期沈下が問題となっている。図-5.1 は、吉越ら¹⁾によって計測された玉原ダムのコア天端沈下量の時刻歴である。ダム盛立て完了時を起点として、時間～沈下曲線は全体的には収れんの傾向を見せているが貯水位を大きく低下させた際(図中①～⑩)にその都度、沈下が助長される(図中の矢印)のが確認できる。この沈下速度の急変は、コアゾーンの沈下現象が複数の要因の複合によってもたらされていることを示唆しており、これに貯水位変動の影響が上乘せされる形で天端沈下がもたらされるとしている。吉越らは、この要因として次に示す5つの要因を挙げている(図-5.2)。

① 盛立て完了後の放置期間の圧密沈下：

盛立て完了後の放置期間に、築堤時に発生した間隙水圧の消散による圧密現象。

② 二次圧密による沈下：

間隙水圧消散後の上載荷重一定下での長期的な二次圧密現象。

③ 湛水荷重による沈下：

湛水後に、コアゾーンの上流側側面に作用する湛水荷重によるコアゾーン変形の鉛直成分。

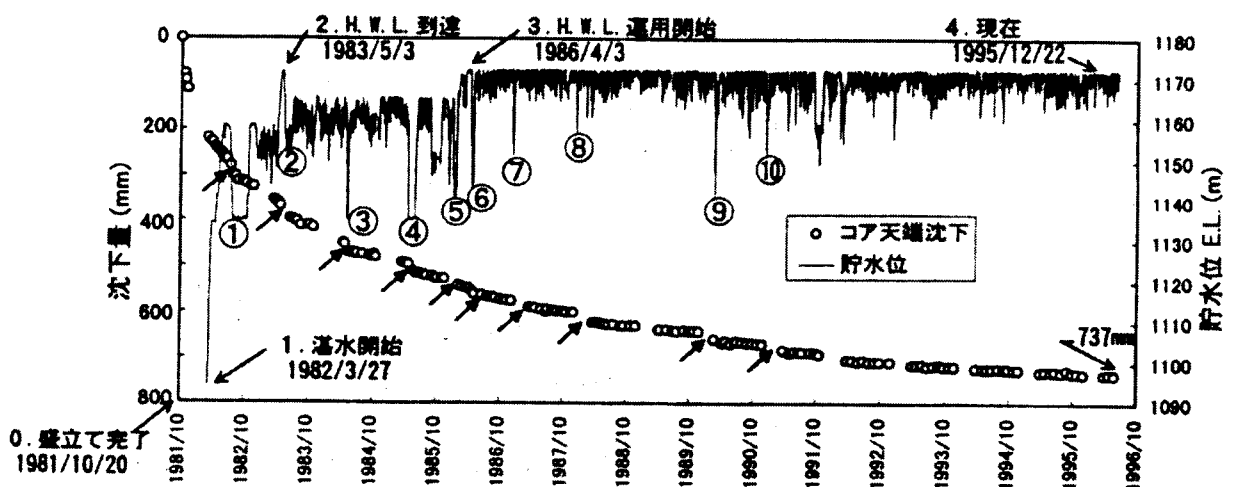


図-5.1 コアゾーン天端沈下量の時刻歴

沈下要因	沈下要因の概念
① 放置期間中の圧密沈下	コアの周囲 間隙水圧 コアの縮径 ロフク、フィルム ターへの浸水
② 二次圧密	上層荷重一定 下での二次圧密
③ 湛水荷重による沈下	湛水圧 (コアの飽和成分)
④ 湛水時の浸水沈下 (コラス現象)	不飽和状態 への変化 (コラス現象)
⑤ 貯水位低下に伴う沈下	貯水位低下 コア内水圧 低下に伴う沈下

図-5.2 遮水ゾーン長期沈下要因の想定

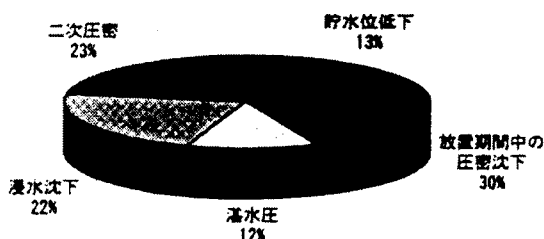
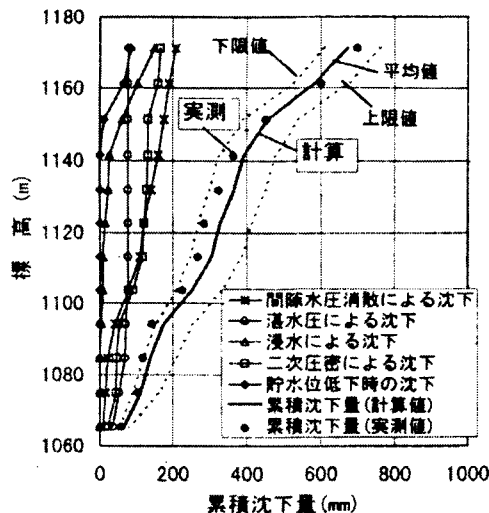


図-5.3 累積沈下量の実測値と計算値の比較
および天端沈下量に占める沈下要因の比率

④ コラス現象による浸水沈下：

締固め土は、不飽和状態にありコアゾーン浅部の密度が低い領域では浸水によるコラスが発生しやすい。

⑤ 貯水位変動に伴う沈下：

貯水位が変動するとき、コア内で応力の変動が生じ、繰返しせん断を受けていると想定される。

井上ら²⁾は、以上の要因をモデル化し個別に沈下量を予測した。①～③については堤体の幾何学形状やゾーニング、堤体材料の変形特性および湛水荷重等の外力を考慮した数値解析によってモデル化した。④については室内浸水実験の結果を参照した。⑤については、実測挙動に対する分析結果より沈下に影響を及ぼす諸因子を抽出し、これを説明変数として重回帰分析を実施して定量化している。図-5.3は、要因の解析結果である。上図は実測値と計算値の比較である。二次圧縮係数の設定の際に飯塚・太田³⁾による塑性指数を用いる経験式を適用しているが、塑性指数の実測値が少なく細粒分含有率から求めているため、上下限界を設けている。その結果が累積沈下量の予測の幅となっている。下図は、予測の結果それぞれの要因による沈下の比率を表したも

のである。彼らの研究は、これまで初期の安定性に重きを置いていた土構造物の長期沈下問題に対して、ほぼ良好な予測結果を示している。しかし、ここに不飽和土の力学を適用すると不確定要素であったコラプスによる沈下量を推定できる。また、貯水位変動の繰返しによるひずみの蓄積に関しては、水位が低下するときのサクシヨン増加、水位が上昇するときのサクシヨン減少での水分特性曲線上のヒステリシスによる影響が含まれていると考える。これまでも、不飽和土の構成モデルを用いた解析は行われている(Alonso ら⁴⁾、向後⁵⁾)が、水分特性曲線のヒステリシスを考慮しなければこのようなひずみの蓄積は現れないと考える。現在、本田ら⁶⁾、飯塚ら⁷⁾によって間隙水分分布の影響を考慮した土/水連成解析が行えるようになった。彼らが数値解析に適用している軽部の構成モデルは、基本的に飽和土の試験より得られるパラメーターを用いており、水分特性曲線を与えればよい。本章では、解析に用いる不飽和土特有のパラメーターについて考察を加える。

5.1 解析への水分特性曲線ヒステリシスの導入

第2章で水分特性曲線の性質に触れ新しい水分特性曲線モデルを提案しているが、Brooks and Corey 式を用いているため、水分特性曲線が特異点を持つことになる。解析に用いている構成モデルは、水分特性曲線に強く拘束されているため、水分特性曲線の特異点が大きな誤差を生むことになる。そこで、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。また、構成モデル自身が強い非線形性を持っているため、本来変形により生じる間隙比の変化に対して、土質定数となる水分特性曲線式を更新しなければならないが、簡便のためひとつの水分特性を用いる。そこで、第2章で紹介したロジスティック曲線式が、解析に用いるのに有用であることを示し、解析モデルへの適用法について述べる。先述したが、ロジスティック曲線式を用いる利点は、水分特性曲線のS字形状を、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することができる点にある。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、

$$S_e = \frac{S_r - S_n}{S_f - S_n} = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e s)} \quad (5.1)$$

ここで、 S_r は飽和度、 s はサクション、 S_n は $s \rightarrow \infty$ での飽和度の漸近線、 S_f 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。つまり、飽和状態から始まる脱水曲線に関しては $S_f = 100$ とし、吸水曲線に関しては $s = 0$ のときの飽和度を S_f として、種々の S_n 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_n を求めればよい。

$$\log_e \left(\frac{S_f - S_r}{S_f - S_n} \right) = A + B \log_e s \quad (5.2)$$

ここで、第2章に述べたように、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、式(5.1)における変曲点として理解できる。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。この際、2つのパラメーターを固定してしまうため曲率に関しても脱水曲線、吸水曲線で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。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。

任意のサクシオン，飽和度 (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 $s \rightarrow \infty$ で必ず限界含水比 w_c に収束し，間隙比の影響を無視すれば $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度は唯一の値 $S_{rc} = G_s \cdot w_c / e$ となる。つまり，次式を満足する S_{rf}^* を求めればよいことになる。

$$\frac{S_{r1} - S_{rc}}{S_{rf}^* - S_{rc}} = \frac{1}{1 + \exp(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s_1)} \quad (5.3)$$

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。

$$S_r = \frac{S_{rf}^* - S_{rc}}{1 + \exp(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s)} + S_{rc} \quad (5.4)$$

一方，任意のサクシオン，飽和度 (s_1, S_{r1}) を通過する吸水曲線は以下のように求める。第2章で示したように吸水曲線に関しては， $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度 S_{ra} が唯一とはならず， S_{rf}, S_{ra} の2つのパラメーター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。

$$\frac{S_{ra} - S_{rc}}{100 - S_{rc}} = \frac{S_{rf} - S_{rfc}}{100 - S_{rfc}} \quad (5.5)$$

$$S_{rf}(S_{ra}) = \frac{(100 - S_{rfc})(S_{ra} - S_{rc})}{100 - S_{rc}} + S_{rfc} \quad (5.6)$$

ここで， S_{rfc} は限界飽和度を $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度とする吸水曲線が， $s = 0$ 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

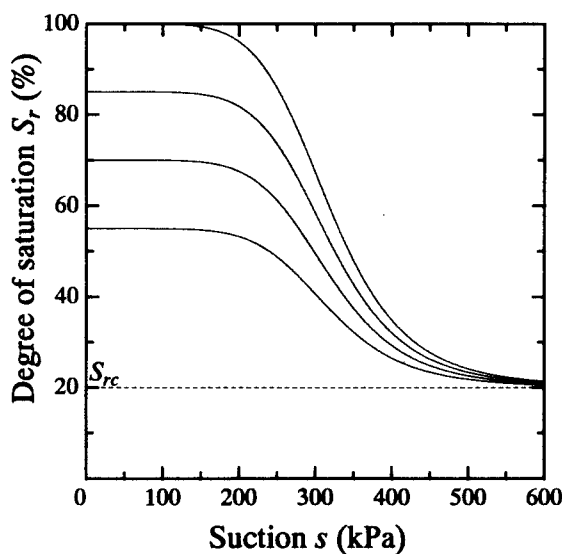


図-5.4 脱水曲線の表現

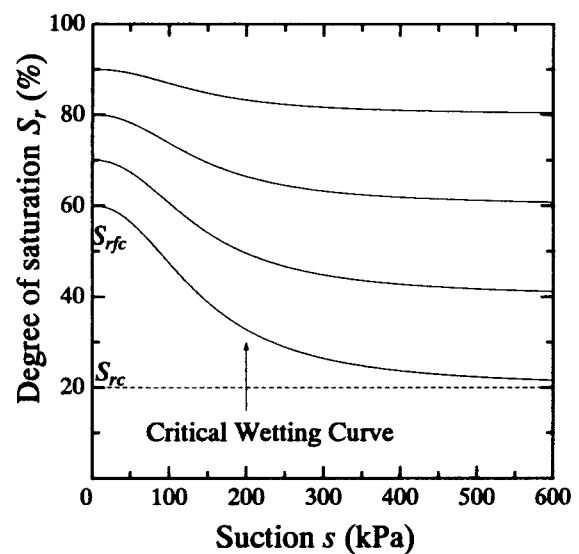
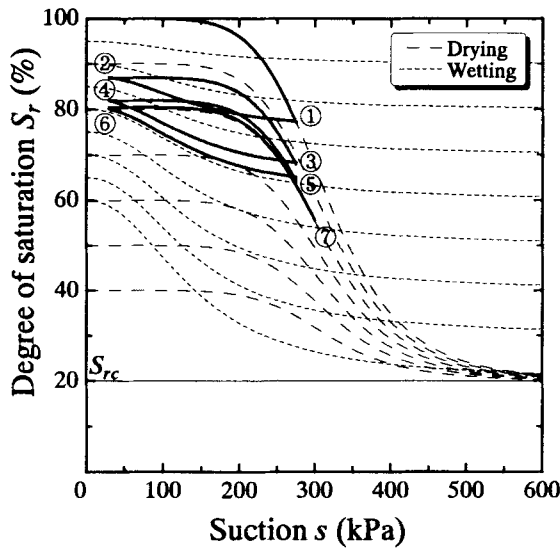
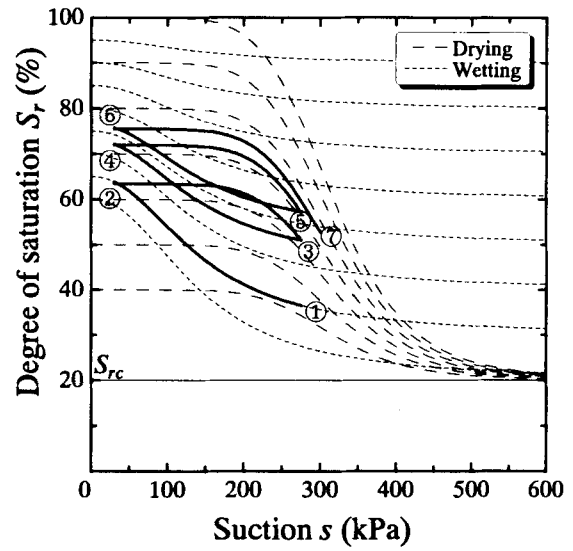


図-5.5 吸水曲線の表現

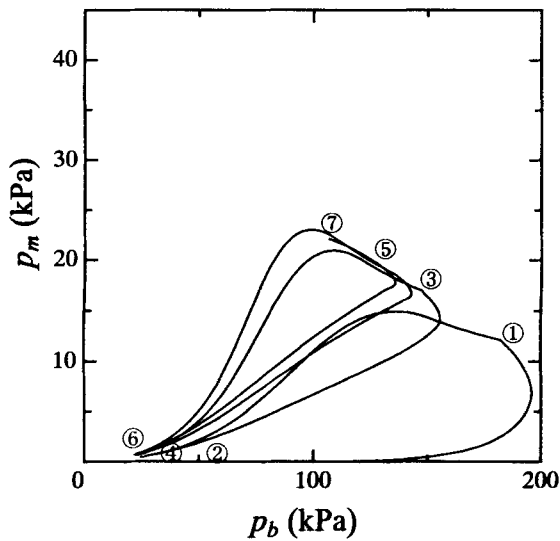


(a) 高飽和度域でのヒステリシス

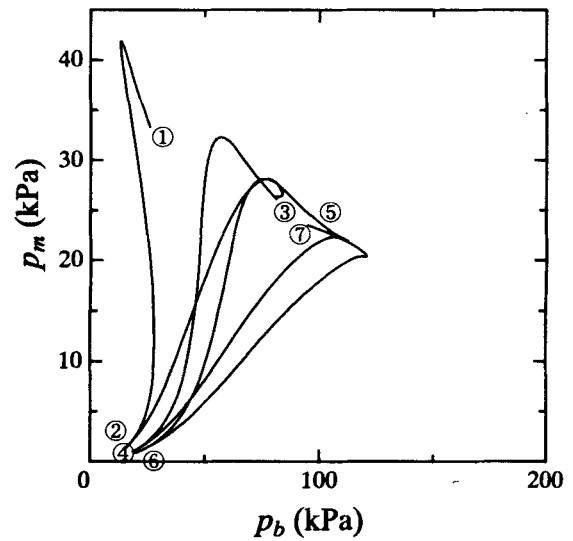


(b) 低飽和度域でのヒステリシス

図-5.6 水分特性曲線のヒステリシス表現



(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-5.7 水分特性曲線のヒステリシスを考慮した場合の応力経路

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 (5.5) に代入することで次式により求めることができる。

$$S_{rc} = \frac{100S_{rf1} - 100S_{ra1} + 100S_{rc} - S_{rf1}S_{rc}}{100 - S_{ra1}} \quad (5.7)$$

つまり、次式を満足する S_{ra}^* を求めればよい。

$$\frac{S_{r1} - S_{ra}}{S_{rf}(S_{ra}^*) - S_{ra}^*} = \frac{1}{1 + \exp(A^{(w)} + B^{(w)} \log_e s_1)} \quad (5.8)$$

この方法により、図-5.4, 5.5のように脱水曲線、吸水曲線が求められる。図-5.6は図-5.4, 5.5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、サクシヨンの繰り返し载荷による飽和度の変化を表している。(a)は、高飽和度域でのサクシヨン繰り返し履歴であり、飽和度が減少していく過程である。(b)は、同じ振幅のサクシヨン履歴ではあるが、低飽和度域での繰り返し载荷であり、徐々に飽和度が回復していく。これはやがて、ある飽和度に対して収束していくことを表しており、現実的であると考えられる。また、図-5.7は、図-5.6のように水分特性曲線のヒステリシスループが与えられたときの応力経路である。図-5.7のように応力平面を (p_b, p_m) とした場合、図面右下ほど塑性体積ひずみが生じる。高飽和度でのサクシヨン履歴を与えた場合は、徐々に弾性域内に応力が移行していくことを表し、逆に低飽和度でのサクシヨン履歴は降伏面が拡大する方向に応力が移行していく。このように考えると、貯水位変動による沈下量の蓄積は説明できる。

5.2 水分特性曲線に関わるパラメーターの決定

先述したように、軽部の不飽和土構成モデルは飽和土の構成モデルを包含しているため、用いているパラメーターは、基本的に飽和土の試験を行うことによって得ることができる。

解析を行うには地盤の現状を把握する必要がある。不飽和土の力学を解析に用いる場合、飽和土の場合に加えてサクシジョンの計測が必要となる。しかしながら、まだ現場サクシジョンの計測には精度面に問題があるだけでなく、理論的に 98 (kPa) 以上のサクシジョンをテンシオメーターで測定することはできない。そこで、第3章で述べたように不攪乱試料の一軸圧縮試験から得られる破壊強度または限界状態の応力状態より、供試体の持つ初期サクシジョン応力 p_s を導出し、式 (1.54) から展開できる次式によりサクシジョンを算定する方法が簡便である。

$$s = \frac{100 - S_r}{S_r - S_{rc}} p_s \quad (5.9)$$

ここでも、水分特性曲線から得られるパラメーター S_{rc} が必要となる。

水分特性曲線を得るためには、特別な試験機と多大な時間を要する。厳密な解析を行うには、実際の原地盤の試料で水分特性試験をしなければならない。しかしながら、現在は水分特性曲線のデータベースが種々作られており、簡単な土質試験から得られるパラメーターを対応させ、類似した土の水分特性を得ることができる。

U.S. Environmental Protection Agency が作成しているデータベース UNSODA (The Unsaturated Soil Hydraulic Database) は公用のデータベースであり、個人が自由に複製し使用することができる。

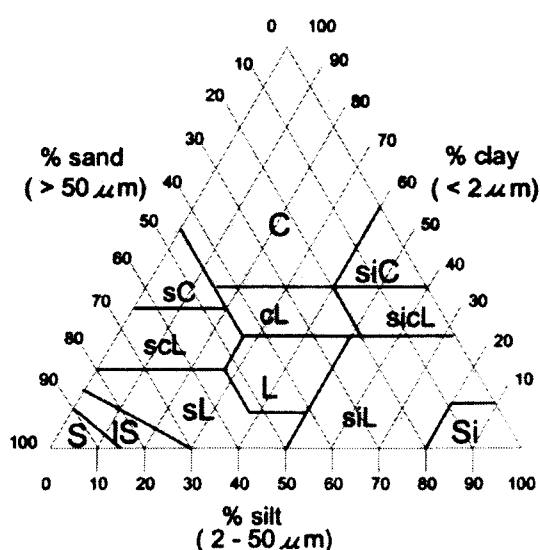


図-5.8 UNSODA で用いられている土質分類

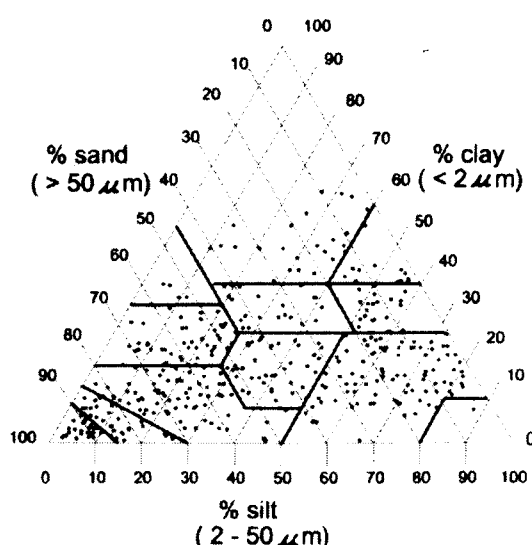


図-5.9 UNSODA に含まれる土質分布

る。また、自らデータを付加することができる。そのため、データの蓄積は促進されるが、その信頼性に関しては保証されていない。ここでは、UNSODA を紹介するとともに、本論文中で測定した水分特性曲線との比較を行う。図-5.8, 5.9 は、それぞれ UNSODA 中で扱っている土質分類法と土質分布である。図-5.10 は UNSODA から出力される供試体の採取場所、採取日時、土質定数、測定方法等に関するデータである。これには別途試験方法に関する詳細が記述されている。また、図-5.11 は水分特性に関するデータである。

Code number: 1011

Code 2 of 790

Family: loamy, siliceous, thermic Grossarenic Paleudult**Series:** Troup**Texture:** loamy sand **Structure:** massive single grain**Horizon:** A21 **Depth range:** 24 - 58 cm**General location:** Union Springs, AL, USA**Specific location:** West plot**Average daily temperature in January:** 7.8 Celsius **Annual rainfall:** 140 cm**Average daily temperature in July:** 26.7 Celsius **Depth to groundwater:** 500 cm**Ref. publication:** Dane et al., South. Coop. Ser. Bull. 262, Ala. Agric. Exp. Sta., Auburn Univ., AL, 1983.**Person to contact:** J.H. Dane, Dept. of Agronomy and Soils, Auburn Univ., AL 36849-5412. Phone (205)844-3974, fax (205)844-3945.**Keywords:** undisturbed**Rating:** Not rated. Rating person not specified.**Date:** 1979**----- Soil Properties -----**

Bulk Density: 1.52 g/cm³
Particle Density: 2.68 g/cm³
Porosity: 0.43 cm³/cm³
Saturated Water Content: No data cm³/cm³
Saturated Hydr. Cond: 310 cm/d
Organic Material Content: No data %

pH: No data
Sodium Adsorption Ratio: No data [meq/l]^{1/2}
Electrical Conductivity: No data dS/m
Cation Exchange Capacity: No data cmol/kg
Electrolyte level: No data meq/l
Exchangeable Sodium %: No data %
Mass % of free Fe/Al oxides: No data %

----- Comments and Methodology -----**General comment or keywords:** Pecan orchard with grass cover.**Comments on soil properties measurements:** PSD was determined with dry sieving, particle density by pycnometer method.**Measurement method (lab water retention):** Tempe cell, pressure membrane**Measurement method (field water retention):** Tensiometry and neutron thermalization, TDR**Measurement method (lab K saturated):** Constant head**Measurement method (field K saturated):** NA**Measurement method (lab K unsaturated):** NA**Measurement method (field K unsaturated):** Instantaneous profile**Number of determined datapairs available for code 1011:****Particle Size Distribution:** 7 **Dry Aggregate Size:** 0 **Mineralogy:** 0

	Water Retention (h)		Hydr. Conductivity (h)		Hydr. Conductivity (θ)		Wat. Diffusivity (θ)	
	Drying	Wetting	Drying	Wetting	Drying	Wetting	Drying	Wetting
Field	31	0	12	0	12	0	0	0
Lab	9	0	0	0	0	0	0	0

図-5.10 UNSODA に含まれる供試体のデータ

Code number: 1011 Series: Troup

Particle Size Distribution		Aggregate Size Distribution		Mineralogy	
particle size	fraction	aggregate size	fraction	mineral type	fraction
μm	cum.%(g/g)	mm	cum.%(g/g)		%(g/g)
2	0.03	No data	No data	No data	No data
50	0.175				
106	0.295				
250	0.757				
500	0.927				
1000	0.995				
2000	1.004				

SOIL HYDRAULIC DATA

FIELD MEASUREMENTS

DRYING CYCLE

WETTING CYCLE

Water Retention		Hydr. conductivity (h)		Water Retention		Hydr. conductivity (h)	
pres. head	theta	pres. head	conductivity	pres. head	theta	pres. head	conductivity
cm	cm ³ /cm ³	cm	cm/day	cm	cm ³ /cm ³	cm	cm/d
6	0.28	15	90.24	No data	No data	No data	No data
14	0.26	20	81.12				
19	0.28	25	66.96				
20	0.25	28	55.68				
24	0.23	31	46.56				
25	0.25	34	27.84				
28	0.22	38	7.944				
29	0.23	40	2.282				
30	0.21	51	1.111				
32	0.22	58	0.348				
34	0.21	71	0.1056				
37	0.19	73	0.00998				
39	0.17						
40	0.17						
41	0.16						
42	0.16						
44	0.16						
45	0.16						
47	0.14						
48	0.14						
51	0.13						
57	0.12						
59	0.13						
61	0.12						
62	0.1						
64	0.12						
66	0.11						
67	0.12						
72	0.12						
75	0.11						

図-5.11 UNSODA に含まれる水分特性データ (1)

FIELD MEASUREMENTS

DRYING CYCLE				WETTING CYCLE			
Soil Water Diffusivity		Hydr. Conductivity(θ)		Soil Water Diffusivity		Hydr. Conductivity(θ)	
theta	diffusivity	theta	conductivity	theta	diffusivity	theta	conductivity
cm ³ /cm ³	cm ² /day	cm ³ /cm ³	cm/day	cm ³ /cm ³	cm ² /day	cm ³ /cm ³	cm/day
No data	No data	0.274	90.24	No data	No data	No data	No data
		0.255	81.12				
		0.239	66.96				
		0.227	55.68				
		0.217	46.56				
		0.199	27.84				
		0.178	7.944				
		0.169	2.282				
		0.135	1.111				
		0.124	0.348				
		0.117	0.1056				
		0.1	0.00998				

LABORATORY MEASUREMENTS

DRYING CYCLE				WETTING CYCLE			
Water Retention		Hydr. conductivity (h)		Water Retention		Hydr. conductivity (h)	
pres. head	theta	pres. head	conductivity	pres. head	theta	pres. head	conductivity
cm	cm ³ /cm ³	cm	cm/day	cm	cm ³ /cm ³	cm	cm/d
0	0.4113	No data	No data	No data	No data	No data	No data
10	0.3807						
20	0.3678						
30	0.3207						
50	0.1765						
100	0.1123						
200	0.0917						
500	0.0727						
1000	0.0573						

LABORATORY MEASUREMENTS

DRYING CYCLE				WETTING CYCLE			
Soil Water Diffusivity		Hydr. Conductivity(θ)		Soil Water Diffusivity		Hydr. Conductivity(θ)	
theta	diffusivity	theta	conductivity	theta	diffusivity	theta	conductivity
cm ³ /cm ³	cm ² /day	cm ³ /cm ³	cm/day	cm ³ /cm ³	cm ² /day	cm ³ /cm ³	cm/day
No data	No data	No data	No data	No data	No data	No data	No data

図-5.11 UNSODA に含まれる水分特性データ (2)

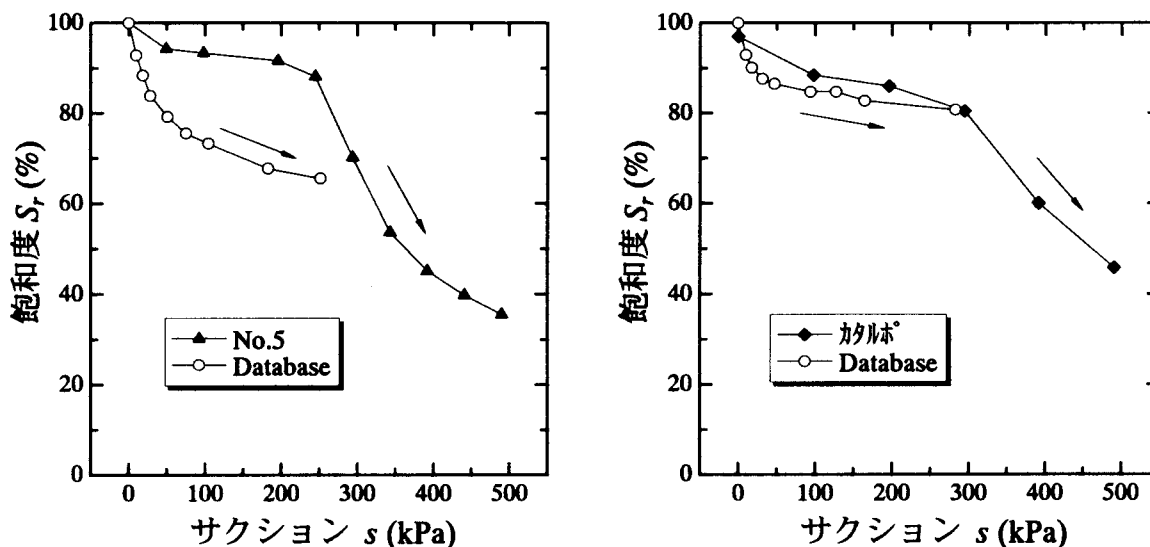
ここで、注意すべきことは図-5.10の土質データを如何に評価するかということである。透水係数は土の間隙構造および塑性指数などから決まること、また透水性媒体内の平均的な流れの状態の統計的な表示であることから、透水係数を比較することで総合的な水分特性を比較することができるので、本来透水係数の等しい土質を比較するのが良いと考える。ここでは、確認できている土質定数として粒度分布と間隙比に着目する。粒度分布に関しては、土質分類とは別に与えられているため、直接比較することができる。間隙比に関しては図-5.10中の「Porosity」が相当する。Porosityは、UNSODA中では以下の式で与えられている。

$$Porosity = \frac{e}{1+e} \quad (5.10)$$

また、図-5.11中では、サクシオンが水頭で与えられている。また水分特性に関しては、体積含水率で与えられているため、飽和度に換算する必要がある。ここでは、飽和度を求めるために必要な各サクシオン値に対する間隙比が与えられていない。そこで、初期状態で与えられているPorosityを保持するという仮定を設けた。これにより、飽和度は次式で算出できる。

$$S_r = \frac{\theta}{Porosity} \times 100 \quad (5.11)$$

図-5.12は、第2章で求めた実測の水分特性曲線と、用いた試料と粒度分布・間隙比のほぼ等しい土質をUNSODAより選択して得られた水分特性曲線の比較である。その結果、カタルポクレーに関してはよい合致が見られた。No.5クレーに関しては、大きく外れる結果となったが、そ



(a) No.5クレーとの比較 (b) カタルポクレーとの比較
 図-5.12 UNSODAを用いた水分特性曲線と実験値の比較

こには試験方法の違いや試験データの信頼性に関する問題が含まれていると考えられる。しかし、今後このようなデータベースの活用範囲が広がっていくと考えられ、その評価に関しては十分な配慮が必要となる。

参考文献

- 1) 吉越洋, 井上素行, 津田正寿, 内田善久, 藤山哲雄, 太田秀樹 : ロックフィルダム者水ゾーンの長期沈下挙動, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.197-205, 1997.
- 2) 井上素行, 内田善久, 望月直也, 石黒健, 太田秀樹 : ロックフィルダム遮水ゾーン湛水後長期沈下メカニズム, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.275-284, 1997.
- 3) Iizuka, A. and H. Ohta : A determination procedure of input parameters in elasto-visco plastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.
- 4) Alonso, E.E., F. Batle, A. Gens and A. Lloret : Consolidation analysis of partially soils-application to earthdam construction, *Proc. International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.1303-1308, 1988.
- 5) Kohgo, Y. : A consolidation analysis method for unsaturated soils coupled with an elastoplastic model, *Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils*, pp.1085-1093, 1995.
- 6) 本田道識, 飯塚敦, 河井克之, 軽部大蔵 : 不飽和土の応力～ひずみ関係式, 土木学会論文集, No.659/Ⅲ-52, pp.153-164, 2000.
- 7) 飯塚敦, 本田道識, 西田博文, 河井克之, 軽部大蔵 : 間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土/水連成解析, 土木学会論文集, No.659/Ⅲ-52, pp.165-178, 2000.
- 8) Leij, F. J., W. J. Alves, M. T. van Genuchten and J. R. Williams : *The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database User's Manual Version 1.0*, 1996.

第6章 結 論

本研究は、不飽和土の力学の实地盤への適用を目指すものである。ここでは、不飽和土の力学挙動がサクシオンだけでなく間隙水分布にも依存することを示すとともに、サクシオン～間隙水分布関係を表現している水分特性曲線の重要性について述べた。本章は、各章で得られた知見をまとめ結論とする。

第1章では、これまでの不飽和土構成モデルが作られてきた研究背景について述べている。不飽和土の研究は、飽和土理論に適用されているような有効応力の探求に始まった。Bishop は実質応力とサクシオンを独立の応力成分として、不飽和土の有効応力式を与えたが、不飽和土特有のコラプス現象を表現することができない。結局、サクシオンを有効応力として取り扱うのではなく構成モデルとして組み込むことが妥当であるとの考え方によりいくつかの不飽和土構成モデルが提案されている。その中で、軽部の構成モデルは飽和土の力学を包含するものであり、変数として間隙水分布を与えることで不飽和土の挙動を予測できるという点で優れていることが確認できた。ただし、間隙水分布を与える水分特性曲線に強く依存するモデルであり、応力成分の導出に影響を及ぼす最乾燥水分線とともに、水分特性曲線の定量化が必要であることを示した。

第2章は、水分特性曲線の定量化に眼目を置いている。まず、これまで個別に議論されてきた水分特性曲線に及ぼす要因を解明するために、同一の試料で異なる初期状態、応力条件下での水分特性曲線を得た。その結果、間隙比が水分特性に大きく影響を及ぼしていることが分かった。この間隙比の影響を定量化するために、最も簡単な Brooks and Corey 式を用いて近似を行い、得られた形状パラメーターを物理的に解釈し、水分特性曲線モデルへ関数として導入することに成功した。間隙比の影響は、吸着水の占める飽和度 S_{rc} に現れる他、脱水曲線では空気侵入値に、吸水曲線では水侵入値に現れることが分かった。この間隙比と空気侵入値の関係を空気侵入値線、水侵入値との関係を水侵入値線として、Toll の提案する間隙比/等価間隙比面に投影し、新たな水分特性曲線モデルを提案した。モデルは吸水曲線について良い合致を示したが、脱水曲線に関しては今後更なる研究の余地がある。

第3章は、構成モデルの中で不飽和土の強度特性に影響を及ぼすとされている、サクシオン応力について検討した。以前より、排水条件下での強度特性についてはサクシオン応力を導入することによって、飽和土と同じ破壊基準を不飽和土にも適用できることが確認されていたが、非排

水試験に関しては未解明であった。ここでは、不飽和土の非排水せん断強度を三軸圧縮試験と一軸圧縮試験により調べた。用いた試料は、飽和状態でもせん断中に正のダイレイタンスを生じるものであったが、飽和度が低くなるほどにその傾向が顕著となることが分かった。しかしながら、せん断中のサクシオン変化によりその傾向は排水条件下での挙動に比べると、バルク応力の影響と判断できる違いが確認できた。また、せん断中のサクシオン～飽和度関係は、供試体のダイレイタンスが小さい段階では、第2章で提案した水分特性曲線を満たす結果となることが分かった。この結果は、土/水連成解析において暗に組み込まれている土骨格の変形と土中水の移動の相互作用が、水分特性曲線に矛盾のないように表現されることを表している。また、強度試験結果に分散があるとされている一軸圧縮試験結果をサクシオン応力で整理できることが分かった。そして、一軸圧縮試験より得られる強度特性から実地盤のサクシオンを測定できる可能性について考察を加えた。現場のサクシオン測定には、特別な測定器具と技術を要するため、信頼できるデータを得ることは難しい。しかしながら、それを簡便な一軸圧縮試験で得ることができれば、不飽和土の力学定数を得るのに大幅な労力削減となろう。結果的に、ある程度の適用性が認められた。

第4章は、不飽和土の分応力について調べている。軽部の構成モデルでは、サクシオンが変形に対して寄与するのはバルク水に対してのみである。そのバルク水とメニスカス水の構成割合を表現するために最乾燥水分線の概念を導入しているが、あくまでも仮定の域を出ない。第4章では、定サクシオン下での異方圧密試験および非排水等方圧縮試験の結果より最乾燥水分線を逆算することを試みている。まずは、種々の応力比で飽和土の異方圧密試験を行い、側方ひずみがゼロとなるときの応力比、静止土圧係数を算定した。そして、定サクシオン下で不飽和土の異方圧密試験を行い、同様に応力比と側方ひずみの関係を調べた。そして、このとき実質応力とバルク応力の和で軸方向、側方方向の応力比を表せば、飽和土と同じ静止土圧係数を得ることが確認できた。そして、この結果は、様々なサクシオン値で異方圧密試験を行えば、最乾燥水分線を試験より導くことが可能であることを示唆している。また、第3章との試験結果と合わせて、応力増分方向への多少の依存性を示すが、降伏面に鉛直にひずみ増分が発生することが分かった。軽部らの構成モデルは、不飽和土の塑性状態でのエネルギー釣り合い式に関連流れ則を適用することで降伏面を導いているが、その正当性が確かめられた。また、非排水等方圧縮試験結果から最乾燥水分線を導く方法を試みているが、良好な結果が得られたとは言い難い。しかしながら、定性的な最乾燥水分線の形状を判断できることが分かり、空気侵入値以下のサクシオン領域において最乾燥水分線を二次放物線補完している軽部のモデルに近い形状となっていることが分かった。これらの結果から、異方圧密試験によって定量的に求められた最乾燥水分線上の一点を通るように軽部の最乾燥水分線式のパラメーター設定を行うのが最善であると考えられる。

第5章は、第2章で得られた水分特性曲線の性質をなるべく簡単な形で解析モデルに導入する

方法を提案している。その結果、水分特性曲線で与えたヒステリシスが応力成分のヒステリシスを生じさせ、これまで表現できなかったフィルダムの貯水位変動によるひずみの蓄積現象を説明できる事が分かった。また、公用の水分特性データベース UNSODA を用い、本研究で用いた試料の水分特性曲線と比較した。その結果は、データベースに含まれる情報の評価によっては良好な結果を得ることができることが分かった。

以上、不飽和土における土骨格の変形と土中水の相互作用を明確にするために、水分特性曲線のモデル化に始まり、各章とも水分特性モデルに立脚した見地で現象を捉えた。しかしながら、ここでは同一試料における水分特性曲線のモデル化であり、実地盤へ適用する際には、同様に水分特性試験を行い、必要なパラメーターを得なければならない。第6章でデータベースの活用について述べたが、データベース中の土質定数から実地盤との比較を行うにあたり、ある程度の憶測が含まれ、慎重なデータ選定が必要である。今後、土質定数が水分特性曲線に及ぼす影響の定量化とともにデータの蓄積が必要であることを付け加える。この一連の研究が、実地盤を不飽和土の力学体系をもって予測することの一助になれば幸いである。

記 号 表

σ_T	: 外部応力(全応力)
σ'	: 有効応力
u_a	: 間隙空気圧
u_w	: 間隙水圧
σ	: 実質応力 ($\sigma_T - u_a$)
σ_1	: 最大主応力(軸応力)
σ_3	: 最小主応力(側方応力)
s	: サクシヨン ($u_a - u_w$)
p_T	: 全応力の平均主応力
p	: 実質応力の平均主応力
p'	: 有効応力の平均主応力
p_b	: バルク応力
p_m	: メニスカス応力
p_s	: サクシヨン応力
q	: 主応力差
G_s	: 土粒子比重
w_L	: 液性限界
w_P	: 塑性限界
I_P	: 塑性指数
λ	: 自然対数表示における圧縮指数
κ	: 自然対数表示における膨潤指数
e	: 間隙比
w	: 含水比
S_r	: 飽和度
S_{r0}	: $s = 0$ のときの飽和度
S_{rfc}	: 限界吸水曲線上において $s = 0$ のときの飽和度
S_{ra}	: $s \rightarrow \infty$ での飽和度
S_{r0}	: 吸着水相が占める飽和度 ($= S_{rc}$ (限界飽和度))
S_{rb}	: バルク水が占める飽和度
S_{rm}	: メニスカス水が占める飽和度

S_{rd}	: 最乾燥水分線上の飽和度
S_e	: 有効飽和度 $(= (S_r - S_{ra}) / (S_{rf} - S_{ra}))$
M	: 限界状態線の傾き
p_0	: 降伏曲面において主応力差 $q = 0$ のときの実質応力
p'_0	: 降伏曲面において主応力差 $q = 0$ のときの実質応力
e_i	: $p'_0 = p'_{0i}$ における間隙比
ϵ_1	: 最大主ひずみ (軸ひずみ)
ϵ_3	: 最小主ひずみ (側方ひずみ)
ϵ_v	: 体積ひずみ
ϵ_v^p	: 塑性体積ひずみ
ϵ_s	: せん断ひずみ
s_A	: 空気侵入値
s_w	: 水侵入値
T	: 水の表面張力
R	: 土粒子半径
s_b, α	: Brooks and Corey 式の形状パラメーター
A, B	: ロジスティック曲線の形状パラメーター, Skempton の間隙圧係数
θ	: 体積含水率
K_0	: 静止土圧係数

謝 辞

本論文は、筆者が学部で研究室に配属されて以来、西日本旅客鉄道株式会社そして現在の神戸大学に至るまでの研究成果をまとめたものです。この論文をまとめるにあたり、多くの方々のご助力を賜りました。

神戸大学大学院自然科学研究科 軽部大蔵教授には、「不飽和土の力学」なる壮大な研究テーマを与えていただきました。以来、このテーマは、筆者の地盤工学への興味を駆り立て、現在の研究基盤となっています。先生には、試験方法や理論構築において的確な指導を賜り、その度に感服させられるばかりでした。また、研究以外の部分でも先生には温かく見守っていただき、研究に集中できる環境を提供していただきました。重ねて御礼申し上げます。

神戸大学大学院自然科学研究科 川谷健教授、日下部馨教授には、論文作成にあたり有益なご助言を賜りました。ここに深く感謝いたします。

神戸大学工学部 飯塚敦助教授からは、弾塑性体としての「土」、数値解析手法などをご教授いただきました。先生のご助言は新鮮かつ衝撃的なものであり、これまで力学の一側面にとらわれがちであった筆者を別次元へと導くものでした。先生からは「森を見て、木を知る」ことの重要性を学びました。

神戸大学工学部 加藤正司助教授には不飽和土における研究の先人としてのアドバイスを頂きました。先生との討論は、筆者にとって有意義な時間であり、ときには時間を忘れさせるものでした。そのなかで筆者自身の方向性を明確に打ち出すことができ、研究者としての自信を持つきっかけを与えて頂きました。

(株)日建設計 本田道識氏は、筆者が研究室に配属されたときからの先輩であり、常に新しい道を切り拓き、後輩である我々が理解できるように、研究の形を確立してきました。筆者の不飽和土に関する知識のほとんどは、氏から受け継いだものであり、今後も良き研究パートナーとして歩んでいきたいと思えます。

西日本旅客鉄道株式会社で過ごした2年余りは、現場の問題を肌で感じることができ、筆者にとって大変有意義な時間でした。「噴泥現象」を地盤工学の知識で理解はできても、対処できないことに苛立ちを覚え、波に削られる斜面の前でただ立ち尽くし自然の脅威を感じました。田辺保線区での業務はこのような発見の場であるとともに、地盤工学の重要性を再認識する場でした。その中で、田辺保線区員の皆様方からは現場の技術者としての視点を学ぶことができました。特

に、当時の田辺保線区長 尾原哲生氏には、多くの勉強の場と、実際の業務に筆者のアイデアを適用する機会を与えて頂きました。氏からは「何が必要で、何が不要なのか」という問題意識をもつことを学びました。また、退職後も筆者のために色々と働きかけていただきました。今も、依願退職の旨を伝えたときの、氏の温かい励ましの言葉を忘れることはできません。

岐阜工業高等専門学校 吉村優治助教授には、第3章の一軸圧縮試験に関する貴重なデータを提供していただきました。実際に試験に携わった、同学校の学生諸氏にも重ねて御礼を申し上げます。

また、本論文の試験の部分は、神戸大学の学生諸氏の協力によりなし得たものです。ここでまとめて御礼を申し上げます。

最後に、筆者の研究生生活を理解し、献身的に協力してくれた妻 貴子の内助の功に最大の謝意を持って、本論文を終えたいと思います。