The Japanese Geotechnical Society

講座

pFの原理と応用

4. pFの工学的応用（その1）

箭内寛治*　飯竹重夫**

4.4 土の強度および変形とpF

土は含水量によって液体状から固体状へと，その状態が変わることは既に述べたが，液性限界近傍で初めてせん断強さを示すといわれている。含水量の広い範囲で，土の強度および変形を考えると，やわらかい土（pF＝1～2）と固い土（pF≧3.0）に大別して考えることができる。

竹中[22]は土中の水のあり方をpFによって分類し，pF＜0注6)，pF＝1～2，pF＝3～4に，それぞれ状態の変化する所（転移点）が認められることを指摘し，特にpF＞3では水分が不連続になるため強度も不連続となることを示している（表—4.2参照）。またpF＜−1.5，−1.5＜pF＜1.5，pF＞1.5にレオロジカルな力学的模型を対応させた。さらに粘土，特に火山灰性の粘土についての特性をとり上げ土の軟化，硬化の現象をpF値の変化によって解釈できることを示した。チクソトロピックな粘土では，次式

$$\alpha \log \theta + \log k = \mathrm{pF} \quad \cdots\cdots(8)$$

k：チクソトロピー係数（関東ローム・モンモリロナイト系の土で 5～15）

α：（≒1.0）の定数，　θ：粘土の降伏値注7)

の関係が成立することを明らかにしている。

さて，われわれが普通とり扱う土（pF＞3.0）では，土に加わる垂直応力 σ を有効応力 σ' と間隙圧 u とに分けて強度や変形の問題を考えることが多い。この場合せん断強さ τ_f は，(9)，(10)式で表される。

全応力解析　$\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u$ ……(9)

有効応力解析　$\tau_f = c_d + \sigma' \tan \phi_d$ ……(10)

c_u，ϕ_u：非排水試験の強度定数

c_d，ϕ_d：圧密排水試験の強度定数

ここで，Bishopは有効応力を(11)式のように提案している。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad \cdots\cdots(11)$$

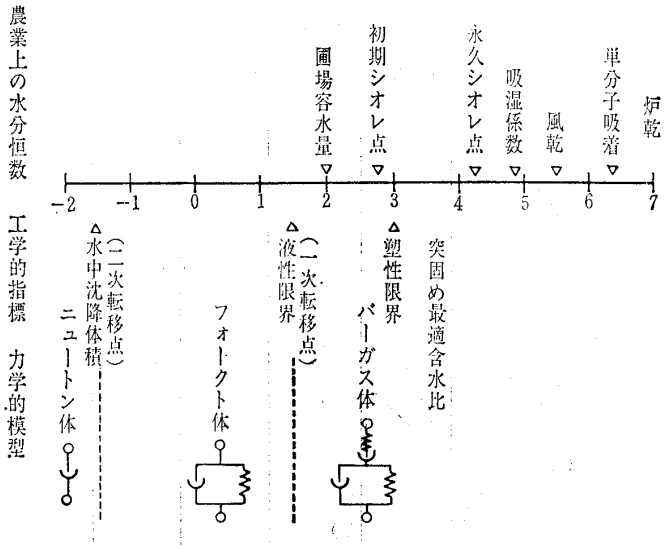
u_a，u_w：それぞれ間隙空気圧，間隙水圧

$u_a - u_w$：サクション

χ：飽和度に関するパラメーター

パラメーターχは飽和度100%なら1.0，飽和度0%なら0の値をとるとされているが，u_a，u_wを分離して測定することが容易でないことなどもあって，(11)式はまだ議論の残されるところである。

表—4.2 水分恒数とpF（竹中）



これに対しJennings & Burland[23]は不飽和土を水浸した時，サクションの解放に伴い有効応力が減少して，急激な体積膨張や体積減少が生ずる。これらは(11)式で説明できないし，(11)式の適用には限界があることを指摘した。

Burland[24]は頁岩の風化土を用いた締固め土の一軸圧縮試験を行って，S_r＞95%の不飽和土であればχ=1.0として飽和土と同じ取扱いができるとしている。S_r＜95%では飽和土とは見なせないが，強度はlog(pF)に比例することを見出している。

宇野・藤塚・原田・宮下[25]は砂質シルトについて三軸圧縮試験を行いS_r＞68.6%の試料については，パラメーターχは，従来の推定値とほぼ同様のものが得られることを確認している（図—4.20参照）。

注6) pFは(3)式に示されるように，化学ポテンシャルの低下量(cm)とすると，$\mathrm{pF} = \log_{10} h$で表されるから，水分が十分に供給されていて$h$＜1 cmなら負になる場合もある。

注7) 完全塑性体では，応力－ひずみ曲線において，弾性領域をこえると，応力が増加しなくても，変形が限りなく増大する。この限界点の応力σ_0を降伏値という。土では，応力－ひずみ曲線を描いても，降伏値が明りょうに現れない場合が多いので，例えば，一軸圧縮試験では，破壊までに発揮しうる最大の応力，すなわち一軸圧縮強さを降伏値としている。また，ここで考える範囲の低いpFレベルの土では，降伏値は次式でも求められる。

$\theta = A \cdot e^{\phi - \phi_0}$

A：土の種類によって決まる定数

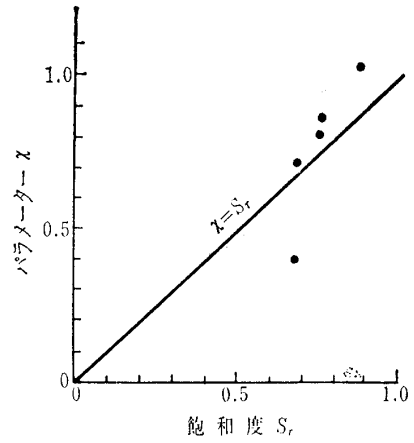
ϕ：体積濃度（$=V_s/V$），V_sは体積Vの土の中に含まれる土粒子の体積

ϕ_0：ピンガムリミットにおける体積濃度

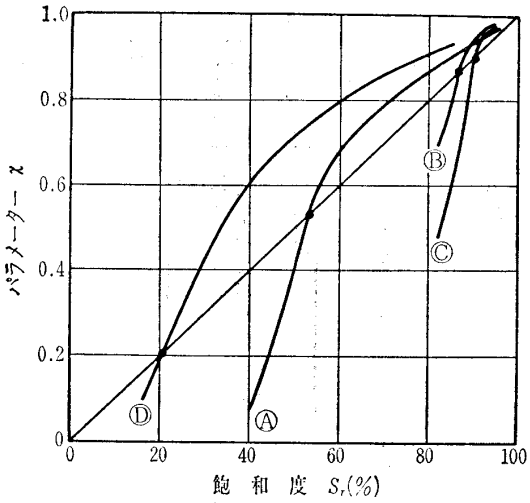
*山梨大学教授　工学部
**木更津工業高等専門学校　助教授

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—4.20　S_r–χ の関係



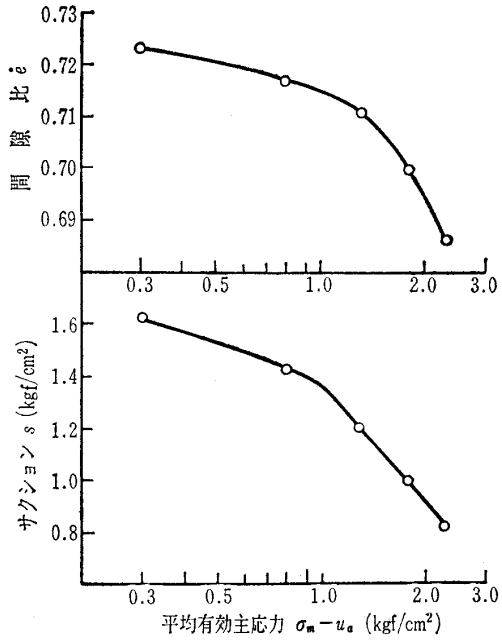
図—4.21　締め固めた土の χ

Ⓐ Talybont clay　Ⓑ Selest clay
Ⓒ Mangla shale　Ⓓ Vaich moraine

Bishop & Blight[26]は粘土から頁岩の風化土にいたる異なった土質の4種の締固め試料に関する飽和度を変えた強度試験を行った。せん断破壊の測定値から求められた χ の値が χ–S_r 図上でほぼ上に凸の曲線になるが（図—4.21参照）。この曲線が $\chi=S_r$ の45度線と交わる点は，4種の土すべてサクションがほぼ似た値となる。また，この交点は粘土分が増すと S_r の大きい方へ移動することを指摘している。

川上[27]は不飽和土の現状や問題点について紹介し総括を行い，(1)破壊に至る道程での変形はともかくとして，破壊時だけは飽和土・不飽和土ともに(1)式が使えるのではないか，(2)不飽和土の実用試験としては非排水せん断強度を求め全応力解析を行うか，もう一つの方法としては飽和土として実験を行い，飽和土の延長上の問題として有効応力解析を行う，ことを提案している。この不飽和土の力学的取扱いに関する1980年までの総説は要点をわかりやすくまとめたすぐれた文献であり，一読をおすすめしたい。

軽部ら[28),29),30)]は不飽和土を骨格構造レベル，粒子間レベル的視野から検討して，ひずみを支配する有効応力を



図—4.22　定含水比試験中の間隙比とサクション

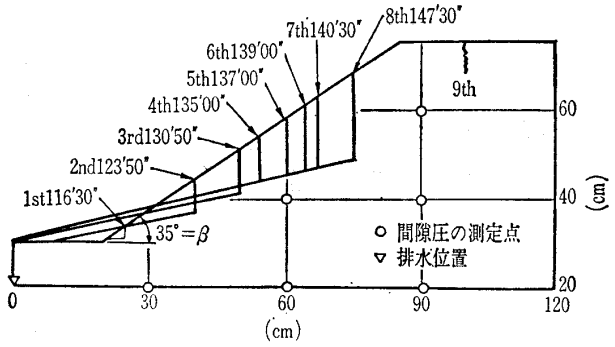
「全応力－間隙空気圧」$\sigma-u_a$ とサクション u_a-u_w とに分け，これらは独立に働くこと，$\sigma-u_a$ は飽和土の場合の有効応力 $\sigma-u_w$ のように作用することを理論的に示し，サクションは粘着力や体積圧縮係数にも影響を与えることを明らかにした。また土に加わる平均垂直応力 p とサクションの関数 $f(s)$ とで決まる新しい係数 $\alpha=1\Big/\left(1-\frac{f(s)}{p}\right)$ を誘導することによって，サクション一定の場合は試料の体積変化や含水比はその時の応力状態だけで規定されることなどを締め固めたカオリンを用いた三軸圧縮試験を行って確かめた。

ここでサクション力は粒子間の水のつき方に関係する力であるから，不飽和土の定含水比圧縮試験の場合はサクション変化が粒子接点レベルの構造変化を反映するものであると考えたのである。図—4.22は一定含水比での等方圧縮試験を実施した時の平均有効主応力 $\log(\sigma_m-u_a)$ と間隙比，サクションの関係を示したものである。Bishop & Blight[26]もほぼこれと同様の結果を得ているが，先行圧密圧力の値が間隙比とサクションでは多少異なることや，曲線の形として $e\sim\log(\sigma_m-u_a)$ の方は直線性がより明りょうであることが判読できる。すなわち，土塊全体のひずみと骨格部のひずみが独立で，かつ (σ_m-u_a) の両者への影響のようすが異なることがわかる。またサクションがある値以上で直線的であるのは $\Delta(u_a-u_w)=C\cdot\log\Delta(\sigma-u_a)$ の関係を推測せしめることを他の実験結果と総合して結論している。

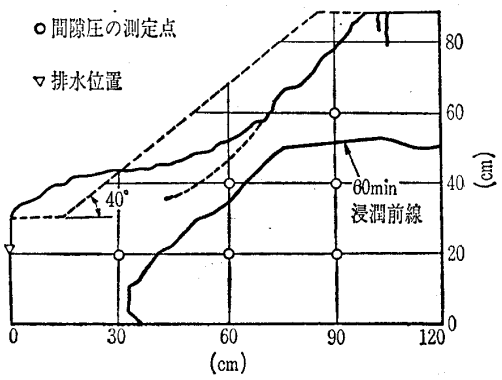
西田，八木，二木[31]および八木，矢田，山本[32]は砂質土斜面が雨水浸透によって崩壊を起こすときの安定を考えるに当たって，従来考えられていた土塊重量の増加，間隙圧の増加などによる土の強度低下のほかに，吸水によるサクションの低下消失に起因する強度減少が少なくないことに注目して飽和－不飽和領域での斜面安定解析を行った。室

NII-Electronic Library Service

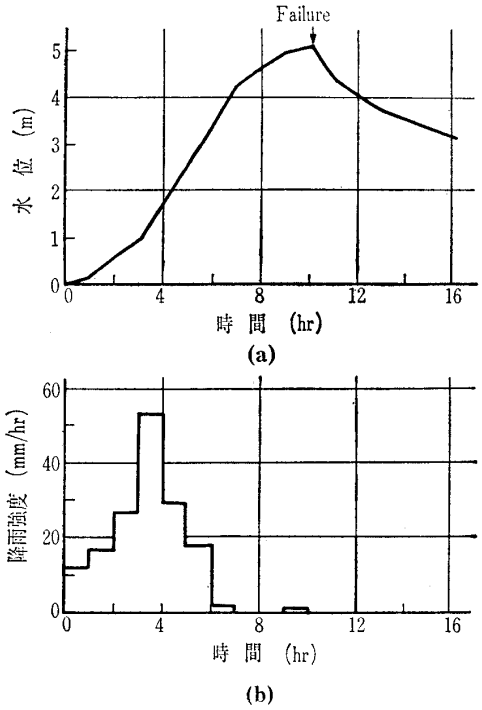
The Japanese Geotechnical Society



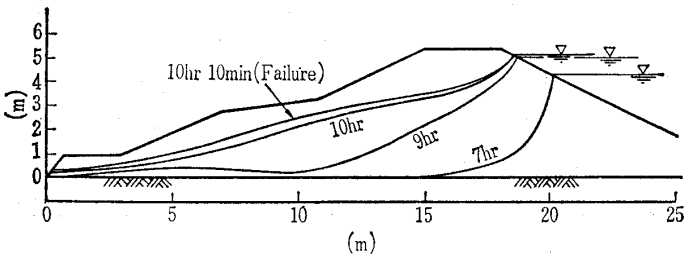
図—4.23　斜面崩壊の形態



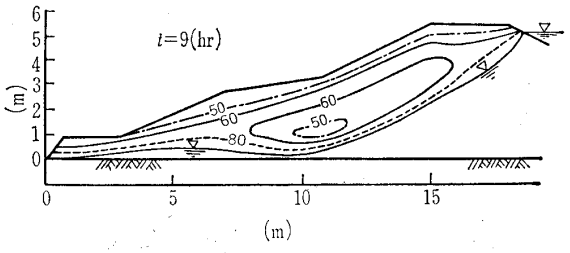
図—4.24　斜面崩壊の形態



図—4.25　宇治川左岸堤防（向島地点）における外水位(a)と降雨量(b)の変化



図—4.26　宇治川左岸堤防(向島地点)での地下水面の変化（計算値）



図—4.27　浸透時における飽和度 S_r の分布の一例（宇治川左岸堤防）

内模型実験も併せて行い間隙圧の経時変化およびその分布を求めて，有限要素法による雨水浸透解析と比較検討し，解析は実験結果と一致することを明らかにしている。その結果，(1)一度浸潤を受けた地盤に再び雨水の浸透があると，安全率は著しく低下する可能性がある。(2)吸水による強度定数の低下は砂よりシルトにむかうほど激しい。(3)崩壊の型は，斜面先の部分的破壊が上部斜面に波及するもの（図—4.23）と，斜面傾斜角 β が大きい時は降雨後短い時間で斜面全体が崩壊するもの(図—4.24)との２つに分けられることを明らかにしている。すなわち，斜面傾斜角 $\beta=35°$ の砂質土斜面（図—4.23）では，浸潤前線が地下水面に到達して跳ね返り現象が起こり，間隙圧が定常状態に近づいた時点で，斜面先下部に発生した過剰間隙圧のため斜面先の小規模の崩壊が生じ，順次それが斜面上部の崩壊へと移行した。崩壊の段階とその移行時間とが併記してある。また，$\beta=40°$ のまさ土斜面の場合である図—4.24には崩壊前の斜面形状，崩壊後の斜面形状および崩壊直前（降雨後60分）の浸潤前線の位置を示している。これから，浸潤前線が不透水層に達していないところが多いにもかかわらず，斜面全体にわたる大きな崩壊が一時に生じたことがわかる。

松尾，上野[33]は河川の水位が変動しかつ降雨がある場合の堤防の破壊の原因は，越流・洗掘などの水理学的な原因のほかに，漏水やそれに伴うのり面破壊による土質材料に起因するすべり破壊にあることに注目し，堤防内部の水分状態がどのように変化するかの解析を行った。堤防内部では毛細管圧，水圧および空気圧が働くので，飽和領域においては仮想空気帯を想定することにより（水圧も空気圧で表現する），飽和-不飽和領域での圧力をすべて空気圧で表示した。堤体内部の二次元非定常状態での水の浸透を飽和－不飽和領域で連続的に処理したのが特徴である。淀川の堤防浸透実験の測定値は計算値とよく一致しており実際問題に十分適用できることを確かめている。図—4.26は図—4.25に示すような河川水位および降雨量の条件で解析した堤防内部の地下水面の時間的な移動を追跡して破堤まで示したものである。また，図—4.27は９時間後の飽和度 S_r の

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

場所的分布である。地表面から1～2mまではS_rが60%前後となっているが，裏のり中央部から2mぐらい下のところにS_rの低い領域が残っていることがわかる。

4.5 比表面積，ポアー径分布とpF

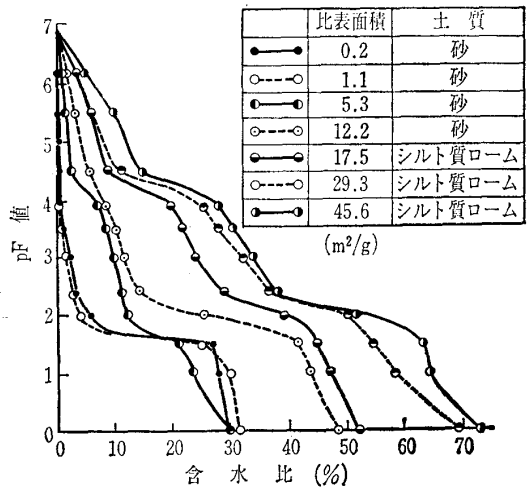
土の保水力は土粒子表面の活性（主に吸着水中の溶質が有する化学ポテンシャル）などの影響もあろうが，第一義的には土粒子の比表面に依存すると考えられている。また，ポアー径分布も土の表面特性を示すものであり，水分特性曲線と密接な関係を持っている。すなわち，土中のポアーを円筒の毛細管と仮定すれば，pFとポアー半径(r)には次の関係がある。

$$\mathrm{pF}=\log\frac{2T\cos\alpha}{\rho_w g r} \quad \cdots\cdots(12)$$

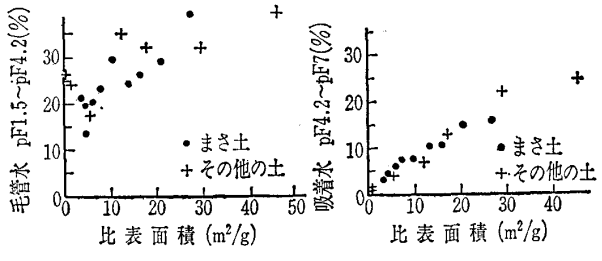
ここで，T：土中水の表面張力（dyne/cm），α：土粒子表面と土中水の接触角(°)，ρ_w：土中水の密度(g/cm³)，g：重力の加速度(cm/sec²)。この関係を用いると，ポアー径分布より，おおよその水分特性曲線を求めることができる。

一方，通常の方法でpFの広い範囲に及ぶ水分特性曲線を正確に求めるには，いくつかの異なる測定方法を用いることが必要であり，めんどうである。これに対し，ポアー径分布は1つあるいは2つの原理と測定方法から求めることができ，比較的容易である。したがって，概略的な水分特性曲線であれば，この方法によって比較的短時間にこれを求めることも可能である。現在ではまだこの種の研究はあまり行われていないが，今後の発展を期待したい。

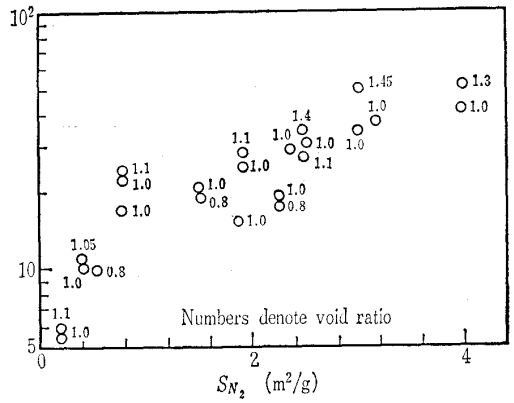
図—4.28は比表面積の異なる土についての水分特性曲線の例である[35]。比表面積の大きい土ほど同じ含水比でも高いpFを示している。したがって，土のpFの大小には比表面積が関連していると考えられる。図—4.29は比表面積と図—4.28の曲線から求めたpFが1.5～4.2に相当する毛管水，pF 4.2～7に相当する吸着水の含水量との関係である[35]。いずれも両者は比例的な関係を示している。図—



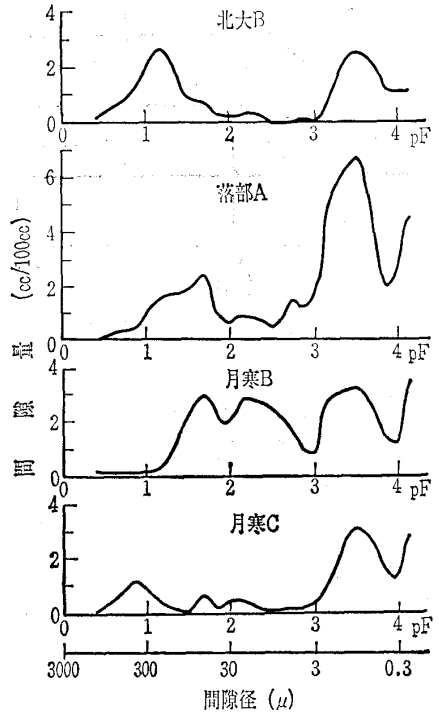
図—4.28　土の水分特性曲線の例（田中・高橋[35]）



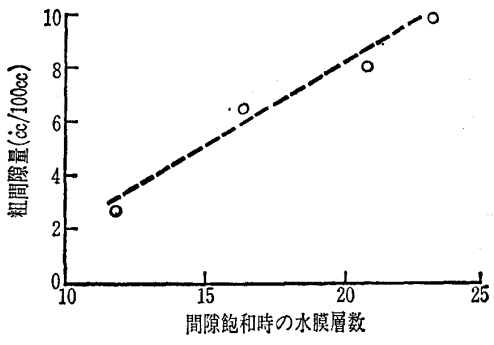
図—4.29　毛管水・吸着水と比表面積の関係（田中・高橋[35]）



図—4.30　比表面積とpF＝3.3に相当する含水比の関係（Matuo, Nishida, Sasaki[36]）



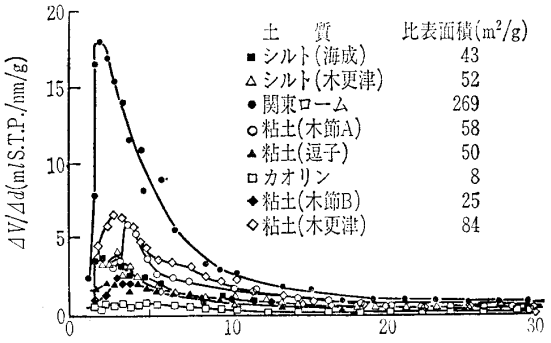
図—4.31　間隙分布曲線[37]



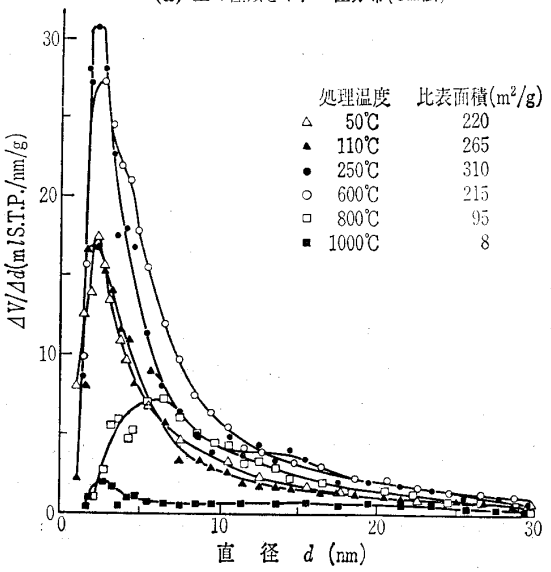
図—4.32　粗間隙量と水膜層数[37]

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



(a) 土の種類とポアー径分布(C.I.法)



(b) 熱処理した関東ロームのポアー径分布(C.I.法)

図—4.33　土のポアー径分布の例（飯竹・金井[34]）

4.30はまさ土についての比表面積（S_{N2}：窒素吸着法から求めた値）とpF 3.3に相当する含水比（w_{pF} 3.3）の関係でS_{N2}の増大に対しw_{pF} 3.3も増加の傾向にある。これらのことより，比表面積は土のpF特性を示す指数となりえよう。

水分特性曲線とポアー径分布の関係については矢沢の報告がある[37]。図—4.31は，前述の式を用いてpFをポアー径に換算し，含水比から間隙量を求め，さらに両者の関係を微分して求めたものである。いずれの土もポアー径0.3～3μmと30～300μmに間隙量のピークが見られる。図—4.32[37]は図—4.31より求めた粗間隙量（ポアー径30μm以上のポアーの量の合計）と水膜層数（間隙飽和時の含水比を単分子吸着量で除した値）の関係である。両者は比例関係にあり，粗間隙量は間接的に土粒子の団粒化の程度を表していると考えられることから，水膜層数は土粒子構造の発達の程度を評価できる可能性を持っていると言える。

図—4.33(a)，(b)は窒素ガス吸着法によって測定した結果をCranston-Inkley法[38]によって解析注8)した土のポアー径分布の例である[34]（ポアー径分布の測定方法および解析方法については文献38), 39)に詳細が述べられている）。(a)図より，ポアーの分布量の多い試料ほど比表面積も大きい。また，関東ロームは他の粘性土に比し，ミクロなポアーが多いことから，pF値も高い値を示すものと考えられる。(b)図は関東ロームを種々の温度で加熱した場合のポアー径分布である。250℃以上では加熱温度の上昇と共にポアーの分布が減少していることから，次第にpFも低下すると考えられる。

注 8)　これらの方法は原理上ポアー径が0.03μm以下の比較的ミクロなポアーを対象としたもので，主にコンシステンシーや膨潤特性などの土の物性を検討する場合に適しているであろう。しかし，土の力学的性質に関連すると考えられる，より径の大きなポアーを対象とする場合は水銀圧入法によって得たポアー径分布を用いることがよいと思われる。

参考文献

22) 竹中　肇：土壌水のエネルギー概念　pFの工学的検討，土壌の物理性，第14号，pp. 21～25, 1966.
23) 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.
24) Burland, J.B.: Correspondence, Geotechnique, Vol. 14, pp. 64～68, 1964.
25) 宇野尚雄・藤塚哲朗・原田久人・宮下高昭：サクション変化にともなう土の圧縮性と強度．第16回土質工学研究発表会講演集，pp. 469～472, 1981.
26) 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.
27) 川上　浩：不飽和土の取扱いの現状と問題点，土と基礎，Vol. 29, No. 6, pp. 7～11, 1981.
28) 軽部大蔵・苗村康造・森田　登・岩崎哲雄：不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第269号，pp. 105～119, 1978.
29) Karube, D.: Effect of Suction on Soil Behaviour, Proc. 7th ARC-SMFE, pp. 30～35, 1983.
30) 軽部大蔵・加藤正司・勝山潤一：不飽和カオリンの有効応力と力学定数，土木学会論文集，第370号／III-5，pp. 179～188, 1986.
31) 西田義親・八木則男・二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定，土木学会論文報告集，第262号，pp. 91～100, 1977.
32) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第330号，pp. 107～114, 1983.
33) 松尾　稔・上野　誠：洪水時の堤防の浸透解析と破壊予知に関する一考察，土木学会論文報告集，第299号，pp. 73～84, 1980.
34) 飯竹重夫・金井太一：関東ロームの粒子表面特性とその工学的性質に及ぼす影響について，土木学会論文報告集，第328号，pp. 69～76, 1982.
35) 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.
36) S. Matuo, K. Nishida, S. Sasaki: Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability, 土質工学会論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp. 13～22, 1979.
37) 矢沢正士：比表面積からみた不攪乱粘性土試料の構造性について，第15回土質工学研究発表会，D-2, 42, pp. 165～168, 1980.
38) Cranston, R.W. and Inkley, F.A.: The Determination of Pore Structures from Nitorogen Adsorption Isotherms, Advanced in Catalysis, Vol. 9, 143-154, 1957.
39) 慶伊富長：吸着，共立全書.

NII-Electronic Library Service