

土中水と土の物理的・力学的性質

桑 原 徹*

はじめに

土の物理的・力学的性質を決定する要因としては、土を構成する素材に固有な性質、たとえば粒度組成、粘土鉱物組成、溶液その他の共存物質などの一次的性質と、その土がおかれた環境条件などによって決定される間隙比や含水量、土の構造などの二次的性質とがある。

また、土の物理的・力学的性質を決定する機構としては、主として次の2つがあり、1つは粒子間力であり、一方は土の構造である。

ここでは、土の性質がどのような機構によって支配されているかを簡単にふりかえりながら、土中の水分が、それらの機構をどのように表現し得るかを議論してみたい。

1 粒子間力と吸着水膜層

粘土粒子表面には、結晶末端部を占める酸素原子に水素結合によって強く吸着された数分子層の水膜層が形成されている。さらに、平板状を呈する粒子の面上に発生する負の電荷によって、水中の陽イオンは coulombic 力によって引きよせられ、いわゆる電気2重層を形成する。電気2重層は、鉱物自体の帯電荷量以外の図-1に示したような種々の要因によっても、その発達状況が異なってくる。電気2重層中の陽イオンは周囲の水和水分子と共に粒子表面に吸引されており、従って電気2重層を形成する範囲内の水分は一種の吸着水膜層を形成している。こうした水膜層の厚さは条件に応じて数Åから1000Å付近まで変化し得るとされている(van Olphen 1963)。

粒子が接近すると、粒子表面に発達した電気2重層の相互作用によって粒子間には電気的な反発力が生ずる。こうした反発力は、粘土の水中での安定分散や、粘土の swelling 現象、rebound 現象などを説明してくれる。

一方、粒子間の引力成分は、粒子が極く接近した場合の van der Waals 力や、粘土粒子の結晶破端部が一般には正に帯電することから逆に帯電した粒子表面との間に働く coulombic 力、それに、粒子表面が15Å付近ま

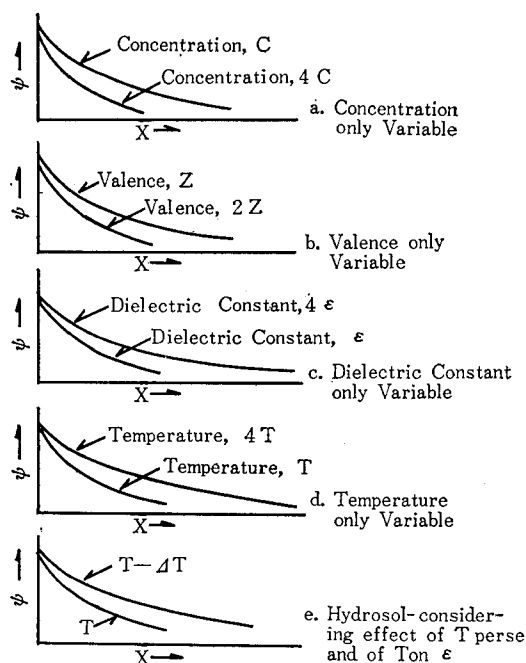


図-1 系の性質が変化した場合の電気2重層に与える影響

y: 電気ポテンシャル
x: 粒子表面からの距離

で互いに接近した場合双方の電気2重層が一体化し、そのために粒子間に働く吸引力などがある。^{*1}

実際の粒子間に働く力は、これらの吸引力と反発力が合成された結果である。高電解質濃度下での粘土粒子の綿毛化現象などは、電気2重層による反発場の縮小によって吸引力場の作用が強まり粒子接合が促進された典型的な事例である。

電気2重層的な吸着水膜層の発達状態は、粒子間の力場を反映しているといえよう。そして次の土の構造を支配する要因となっている。

2 土の構造

土の構造、つまり粘土粒子の配向もまた粘土の力学的性質を大きく左右するものである。土の構造にも種々の

*1 Rosenquist (1959) は吸着水と液体間隙水の2つの水の間の界面張力を粘土粒子間の粘着力の原因としている。

* 名城大学理工学部応用地質研究室

過程で形成されるものがあるが、ここでは堆積性の粘土についてふれることにする。

堆積性の粘土の場合、1つには粘土の堆積時の粒子の力場によって堆積時の基本的粒子の配向が決定される。さらには、堆積後の応力履歴、乾燥履歴、続成作用などの地史によって最初の基本的構造は修正され変化して行く。

粘土粒子が作る構造の思考モデルは、Casagrande (1932) から Lambe (1953), Tan (1957), Trollope and Chan (1959) へと発展した。そして高塩分水(海水)中の堆積物は電気2重層が圧縮されているため、粒子の接合が容易となり、flocculationをおこし易く特に負に帯電した面と正の結晶端が接合するような構造を含む、いわゆる random structure が発達する。淡水中の低塩分下では電気2重層が発展し粒子の分散は良好で、沈積物には面を水平にした粒子が多くなり、全般に平行配列構造 oriented structure (parallel orientation) が形成さ

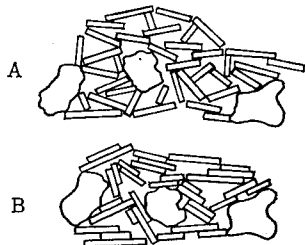


図-2 海水(A)、淡水(B)中の粘土質堆積物の構造モデル (after Lambe 1953)

れ易いという基本概念がたてられた(図-2)。

その後、土の力学的性質との対応や、粘土粒子の構造を直接実体視する方法、*2 光学的または、X線回折によって orientation をしらべる手法によって、種々の pattern が提起されてきた。

基本的には、次のような Type の構造に類別されそうである(図-3)。つまり、電気2重層が発達し易い粘土鉱物 (active clay, モンモリロナイトなど) と電気2重層の発達しにくい粘土鉱物 (inactive clay, カオリンなど) とでは差があり、同じ環境下でも堆積構造にかな

*2 方法的には、構造を乱さないように脱水固定化した試料を作ることが問題である。1つは、吸着水膜の構造に類似の氷の状態に間隙水をかえ、そのまま昇華させて脱水固定化する凍結乾燥法、また、メソソクスを作らないように Critical point 下で乾燥する方法(実際には低 Critical point のアルコールなどで間隙水を replace して行なう)がある。これらで得られた試料の破断面を、電顕でそのレプリカをまたは、走査型電顕で直接観察する。この種の方法は、粒子の配向は判るが間隙の形態が正確にわかり難い。一方、間隙水を、構造を乱さないような材料を工夫して置換固定化し、これから超薄片を作成して電顕で観察する方法がある。この方法は間隙の二次元的な発達状態を知るのに有効である。

りの差が生じる。淡水環境下でも inactive clay の場合、pH が低く結晶端の正電荷が発達する場合には a のよう

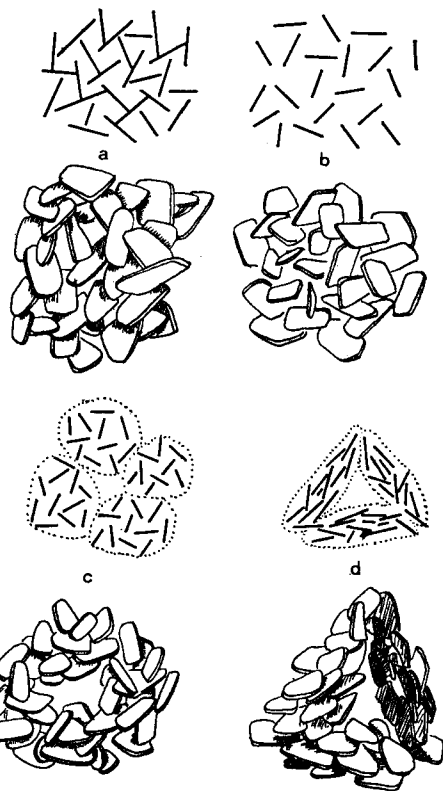


図-3 土の構造モデル
a : flocculated structure
b : random structure
c : flocc units in random orientation
d : packet floccs.
e : semi-oriented structure
f : oriented structure (parallel orientation)

な flocculated structure を作り、e のような semioriented structure を作らない場合もある。また、active clay の場合、電気2重層の発達が良い場合には高間隙の b のような dispersed structure (random) が形成され、これが圧密もしくはせん断作用をうけて始めて e→f

の構造に発展して行く。

高塩分中では、active clayはCのようなrandomな配列をしたfloc unitsの集団として堆積するし、inactiveな場合には面接合に近いfloc unitsの集合体になり易い。こうしたfloc unitsが存在するような構造は一般的にも認められ、しかも、粒子間の小間隙とfloc units間の大きい間隙とが含まれているため特異な力学的性質を示す原因にもなっている。

構造が土の性質に影響をもたらす例をあげると土の乾燥収縮の場合にparallelな構造をもつ土の方が、randomな構造をもつ土よりも収縮が大きいこと(Lambe 1960)。また、floc unitsの大きいものや、大きい団粒構造が発達した土では粗構造の間の大間隙は収縮過程でつぶれずに残ってしまい乾燥と共にair intrusionが早く起ってしまい易い。

乾燥後の膨潤過程でも、activeな粘土は、parallelな構造の方がswellingが強く現われるが、inactiveな粘土では、randomな構造の方が容積回復が大きい。

また、力学的性質についても、構造は重要な意義をもっている。Leda clayについて行なった圧密試験の $e - \log p$ 曲線(図-4)に示されるように、乱さない状態で

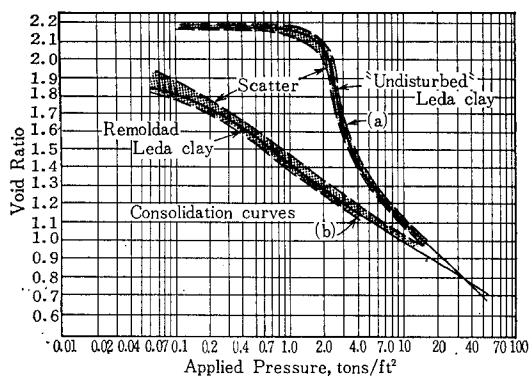


図-4 Leda clayの圧密曲線
(after Quigley and Thompson 1966)

採取された試料は flocculated structure を示し、その圧密曲線(a)は一定の荷重段階まで容積変化を示さない、つまり、明瞭な圧密降伏点が現われる。これに対して、同じ粘土を練りかえし最初の構造を破壊して平行配列になってしまった粘土(b)は、小さい荷重段階から容積変化を示し、明瞭な降伏点も示さない。aの曲線が示す降伏点は、粘土の最初の構造がもっていた強度を示すものにほかならない。こうした構造のもっている強度は、構造自体が過去に受けた荷重に応じて変化して行くので、その「構造の強さ」は、そのまま過去に受けた荷重の大きさを反映している場合があり、こうした降伏点が先行圧

密荷重値と呼ばれたりした。

構造の影響が顕著に示されるものに、quick clayがある。これは、北欧やカナダ地方に発達する氷期の海成粘土である。この粘土は乱さない状態で細い円柱状の試料として切り出したものは、10数kgの荷重を支えることが出来るが、一度練り返えしてしまおうと、同じ含水比でも粘稠な液状になってしまう。

Push (1966)は北欧に発達するquick clayの構造を電子顕微鏡によってしらべた結果、図-5に示すような構造が発達していることを示している。黒くぬりつぶ



図-5 Quick-clayの超薄片電子顕微鏡写真(上)厚さ500 Å, 8000倍, と同写真から構造を示した図(下)自拔部は間隙 push (1966)

した部分は粘土粒子が密に集合している部分であり、それらの密な集合部を細い鎖状に連結した粒子が結びつており、その間には比較的大きな(最大長径4μ程度)間隙が存在し水で満たされている。

この種の構造は、先にも示した図-3のdの海成粘土にみられる構造の一種であるが、比較的大きな間隙がflocの間隙に存在するのが注目される。

Quick clayはBjerrum (1954)らを初めとして多くの研究者によって特性が研究されているが、特に注目す

べきことは、quick clay となるものは同じ粘土層でも low activity で、高い液性指数を示していることである。そして、quick clay は海成環境で堆積した粘土層が、陸水の滲透によって間隙水中の電解質が leaching されたものであるといわれている。つまり、高電解質下で電気2重層は圧縮され粒子の接合が進んでいたものが、塩分の溶失によって、粒子表面の電気2重層は拡大しようとしており、最初の構造はもはやそぐわないう状態になっているといえる。

従って、一度既成の構造が破壊されると、構造中の大間隙中に dead volume として含まれていた水分は、拡大した電気2重層をもった粘土粒子の分散に役立つ事になり、系全体が液状を呈することになるのである。

図-6に示したように密な集合部の組合せとして構造

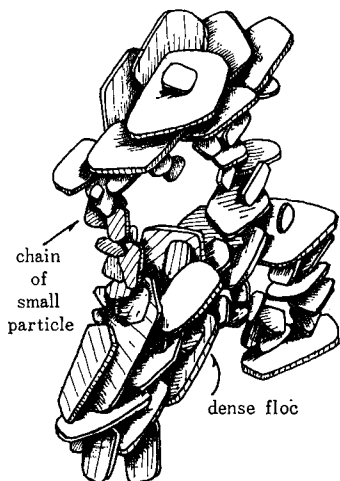


図-6 Quick clay 中の構造の model

が作られていると考えた場合、間隙は、密な集合部内の小さい間隙と、集合部の間に存在する粗なものから成り立っている。圧密の場合などで、最初につぶされるのはこの粗の間隙部分であり、比較的透水性も大で、いわゆる一次圧密と呼ばれる部分を占めているのであろう。試験片中の過剰間隙圧が0になってからも進行する二次圧密の現象は、粘土粒子表面に引かれた吸着水膜部分が大部分を占める集合体中の小さな間隙中の動きにくい水分の排出(集合体がつぶれる)によって生ずると理解することが出来よう。また、このことは集合体の内部の小間隙の間隙水圧と粗間隙中の水圧とに、ずれが存在することも示唆している。

3 土の中の水分量

いままで、粘土粒子と水の相互作用として生ずる力場の問題や、土の構造のもっている意義について2・3の事

例をあげて素描してきた。土の構造を固体の側から描いてみる代りに、固体の間隙の側から構造を描き出してみることを考えてみよう。

飽和土である限り、すべての間隙は水分によって満たされており、間隙量は含水比によって示され得る。炉乾燥によって求められる含水比中には、ハロサイトののように crystal phase に含まれるような水分まで含むことになるし、ハロサイトの管状結晶管中の間隙や、珪藻遺体などの殻中の間隙などの dead volume も一切を含めた“間隙の総量”を与えてくれるにすぎない。

Atterberg Limits も物性と関係のない dead volume の水分などを区別し得ない欠陥(桑原 1970)もある。しかし、その液性限界(WL)は対象となる土の粒子間力が一定の(実質的な rigidity を保ち得るような程度の)強さまで粒子間隙が広がったときの含水比を示し、また塑性限界(WP)は、極めて強固な状態で粒子表面に吸着された水分の上に、粒子間引力が弱まってしまわない程度までの範囲で粒子間の潤滑作用を果す程度の水分が含まれた状態と解釈されており(Grim 1962)、粘土と水との相互作用を反映した土の素材としての性質を巧みに表現し得るものとして広く使われている。

自然状態の土の含水比を WL や WP などの含水比量との関係値で表わしている液性指数^{*3}(IL)は、その土の履歴に対比して考えた場合、過剰な含水分、つまり過大な間隙量を有しているかどうかの判断するのに役立つ。“過剰な間隙量”は土の構造によってもたらされる粗間隙などの発達を示唆している。

このように単純に間隙量を示す含水比を他の特定の含水比との関係によって間隙の状態を知ろうという方法がある。

一方、間隙の形態が異なると、そこに含まれる水のエネルギー状態も異なってくるので、そこに注目して、含水分をエネルギーレベル別に測定すれば間隙形態についての情報が得られることになる。こうした目的に適したものが moisture tension curve である。

いろいろな text に述べられている水の状態名を pF に対応させてまとめて表示してみると図-7のようになる。

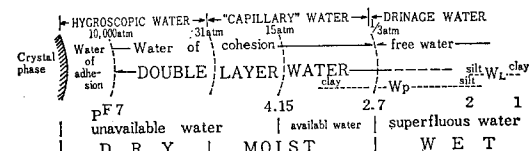


図-7 土中水の区分

^{*3} $IL = \frac{W - WP}{WL - WP}$ W: 自然含水比

これらの表現も実験的な裏づけにとぼしく、理念的なものである。とくに電気2重層中の水分には粒子表面からのへだたりによってエネルギーレベルはかなり変化し、末端部では普通の状態の水分と明確な境界がつけ難いし、電気2重層に毛管張力の影響が加わった場合どうなるかはっきりしない。また水分状態名の定義もあまり明確ではないし、状態区分の境界も明確ではないのでこうした表現では実用性にとばしい。

水分のエネルギーを毛管力にのみ起因するとして、それぞれの pF に対応する孔径の孔隙を対応させて孔隙径の分布を求める考え方もあるが、粘土分を含む土の場合これも電気2重層中の吸着エネルギーや脱水進行にともなう構造変化などが考慮に入られていない。

飽和状態の土の tension curve を描いてみると、砂質土やシルト質の土では勾配がゆるくなる部分 (pF range がせまい範囲で含水量減少が大きく生ずる部分) があり、その両側に屈曲点が現れる (図-8a)。この低勾配部分は

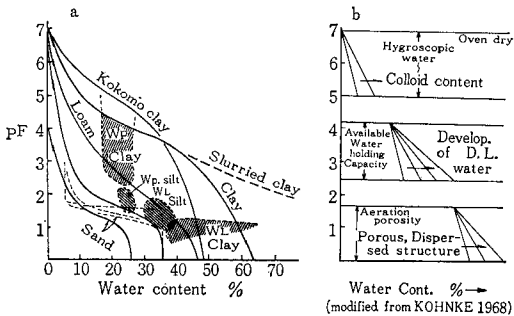


図-8 各種の土の代表的な moisture curve (a) と curve の形態を支配する要因を説明する図(b) (図 a 中の斜線部は, clay, silt の個々の試料について curve 上に WL, Wp をおとし, それらの分布範囲を示している)

砂質粒子間の pore 中の水分の排出であると説明される (Baver 1956), この低勾配部の上方の屈曲点は, 砂質土などの間隙水が失なわれ, 粒子表面の吸着水分が残される状態になった点と考えられる。

シルト質土の場合, Wp 値の含水量の位置はこの上方屈曲点よりはやや含水量の高い位置にあり, Grim(1962) などの考えた Wp 値の実体論に合致する。

一方, 下方の屈曲点は, 粗粒子の接触点に近いことを示しており, それ以上の含水量に対しては保持力を示さないことを示している。Russell and Mickle (1970) らは多数のシルト質土の tension curve 上に, それらの土の WL 値を plot すると, この下方屈曲点にはほぼ一致するとした。

図-8a 中には Russell and Mickle の資料の他に利用できる資料を加えて簡略化して示したものである。この

図からもわかるように, 粘土質の多い土では, あまり明瞭な低勾配部分は現れないために, 屈曲点ははっきりしない。これは, 間隙孔径の分布が広く, 極めて小さい孔径のものまで分布していることと, 一方では, 粘土粒子表面に発達する電気2重層中の水分のエネルギーが連続的に変化することによるものと思われる。

今, これらの現象を厳密な意味で解釈することは困難であるが, Kohnke (1968) が試みた soil moisture tension の解釈を参照しながら, 他の資料を考慮に入れて考えると図-8b のような説明が可能と思われる。つまり, pF 5~7 付近の高 pF 部分で含水量が多い(勾配がゆるい)土は, colloid やこまかい粘土粒子に富むために, 粒子表面に adhesion された水分や結晶と化学的な結合状態にあるような水分(ハロイサイト, アロフェン中の水)が多く存在することを意味し, pF 2.5~4.2 付近の中位の部分の含水量が多いものは, 電気2重層(吸着水膜層)の発達のよいもので, 間隙の size range も広いものと考えられる。また, 低 pF 部分の含水量が大きいものは, 比較的粗な間隙が発達した土(粘土質でも構造的に粗な間隙が発達するもの)が粘土で吸着水膜層が非常に発達し, いわゆる dispersed structure を呈しているような場合を考えることが出来よう。

文 献

- 1 Baver, L. D. : Soil Physics, 3rd Ed., J. Wiley. (1956)
- 2 Bjerrum, L. : Geotechnical properties of Norwegian Marine clays, Pub. No. 4. Norwegian Geotechnical Inst. (1954)
- 3 Cassagvande, A. (1932) Jour. BSCE.
- 4 Grim, R. E. : Applied Clay Mineralogy, Mc Graw Hill. (1962)
- 5 Kohnke, H. : Soil Physics. Mc Graw Hill. (1968)
- 6 桑原 徹: 粘土科学, 9, 3-4号. (1970)
- 7 Lambe, T. W. Proc. ASCE, 315 (1953)
- 8 ———: Trans. ASCE, 125. (1960)
- 9 Push, R. : Eng. Geol. 1. (6) (1966)
- 10 Rosenquist : Proc. ASCE. 85, SM.2 (1959)
- 11 Russell, E. R. and Mickle, J. L. : Liquid Limit Values by Soil Moisture Tensiou, Proc. ASCE. 96. SM.2. (1970)
- 12 Tan, T. K. : Structure Mechanics of Clays, Acad. Sinica, Soil, Mech, Lab., Inst. Civil, Eng. and Arch., Harbin, China. (1957)
- 11 Trollope, D. H. and Chan C. K. : Proc ASCE. 86. SM.2 (1959)
- 12 van Olphen, H. : An Introduction to Clay Colloid Chemistry, J. Wiley. (1963)