



土のせん断機構の物性論的研究

松 井 保*

筆者は土質力学を専門としている。読者諸氏のなかにはこの力学になじみのない方々も少なくないと思われるので、あえて簡単に解説を加えておきたい。

土質力学は“土”を材料とした応用力学の一分野である。しかし、この力学は他の力学とは少々趣きを異にしている。その最大の特徴点は、土は個々の粒子の集合体からなり、通常土粒子の固相とその間隙にある水分や空気などの液相と気相からなる3相系であるという点である。まず、土が粒子の集合体であるという点はせん断変形時に体積の増減が伴う性質（ダイレイタンスと呼ばれる）によって特徴づけられる。このダイレイタンスは金属などを扱う連続体力学では考えられないことである。また、3相系であるという点は、“土”という材料の内部機構を非常に複雑にしており、特に個々の粒子が非常に小さい粘土（粒径による分類では $5\mu\text{m}$ 以下の粒子からなる土を粘土と呼んでいる）では、粒子の表面積が相対的に大きくなり粒子の自重（重力による物体力）よりも土粒子間の相互作用（表面活性による）が大きくなり、その変形機構をさらに複雑にしている。その上、土質力学において最終的に取扱われる材料は自然状態の種々多様な土であり、このことがその体系化をさらに複雑にしてきたのである。

しかるに、人類は、地球上に出現して以来、“土”とは何らかのかかわりをもちつづけてきた。その意味では、土質力学は大古の昔から存在しえたはずであるが、上記のような複雑性の故に学問としての体裁が整ったのはわずか50年ほど前からである。したがって、土質力学は比

較的若い学問であるといわざるを得ない。読者諸氏は少し驚かれるかもしれないが、土質力学においてはいまだ汎用性のある“土の構成方程式”が確立していないのである。

とはいっても、この約20年間において、土の構成式の確立に対して多くの努力が払われ、その進展にはめざましいものがある。そのアプローチを大別すれば、微視的・物理化学的アプローチと巨視的アプローチである。前者には、X線や顕微鏡を利用して土の構造（土粒子の配列やその相互作用）を取扱うもの、ミクロレオロジー的な立場から土のせん断力の発生機構を検討するもの、個々の粒子の挙動に着目して集合体としての全体の挙動を統計的にとらえるものなどがある。一方後者には、応力-ひずみ-時間関係を実験結果のフィッティングにより表現しようとするマクロレオロジー的なものとダイレイタンスを考慮した連続体力学ともいえる弾塑性論的なものがある。

筆者は、上記アプローチのうち、走査型顕微鏡による観察を加えたミクロレオロジー的なものと弾塑性論的なものに特に興味をもって研究してきた。前者は、微視的な立場からより基本的な機構を解明するという点で、後者は、巨視的な立場から実用に供するような成果を得るといふ点でともに重要であると考えたからである。紙面の都合もあるので、以下では微視的立場からの成果を中心に話題を進めてみよう。

ここでは、その挙動が最も複雑と思われる粘土を取上げる。また、はじめに述べたように土は3相系であるが、土粒子と水との2相系だけを取上げててもまだまだ話は簡単には行かない。たとえば、土粒子の量にくらべて水の量が非常に多くなればサスペンション状態であるが、徐々に水を減らせばペースト状態に変化し、さらに水を減らせば粘土細工ができるような固体状

*松井 保 (Tamotsu MATSUI), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 土質基礎工学研究室, 助教授, 工学博士, 土質力学

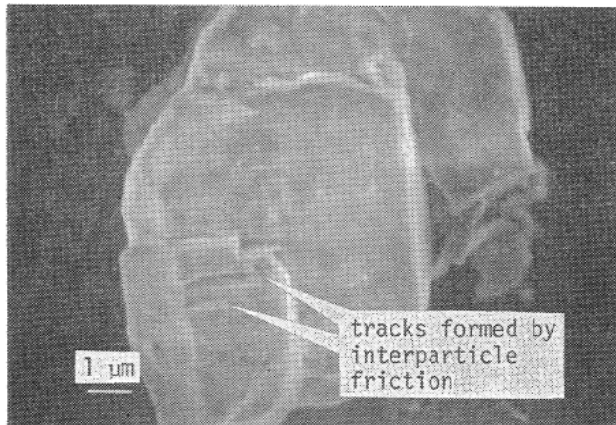
態から極端な場合泥岩のような非常に硬い状態にまで至る。このように、粘土・水系は、ただ含水量を変化させただけで、非常に多様な力学的挙動を示すのである。では、これらの力学的挙動を統一的に表現できる概念はどのようにすれば得られるのであろうか。

筆者ら²¹⁾は、高分子の分野から発展してきたレートプロセス理論に基づいて、粘土・水系の流動機構が本質的に以下に述べるような heterogeneous process として統一的に表現できることを実験的に明らかにした。すなわちニュートン流動領域の粘土サスペンション（懸濁液）の流動機構は水素結合のみの流動単位系に支配される homogeneous process であり、純水と同じ流動機構である。一方、含水量の低い粘土ペーストや固体的な圧密粘土の流動機構は土粒子接合点における酸素に関する一次結合のみの流動単位系に支配されるもう一つの homogeneous process であり、粒子固体間の直接接触による結合のみがせん断挙動に関与する。そして、これら2種の homogeneous process 間にある液体的な粘土・水系の流動機構は、上述の2種の流動単位系がともに関与する heterogeneous process であり、ある種の過渡領域を形成していると考えられる。さらにまた、酸素の一次結合の流動単位系における各流動単位に作用する破壊時のせん断力はほぼ一定であり、そのせん断力-ひずみ関係は状態量によらないユニークな双曲線関係を示すことから、「土の巨視的な力学的挙動は一定のせん断力をもつ流

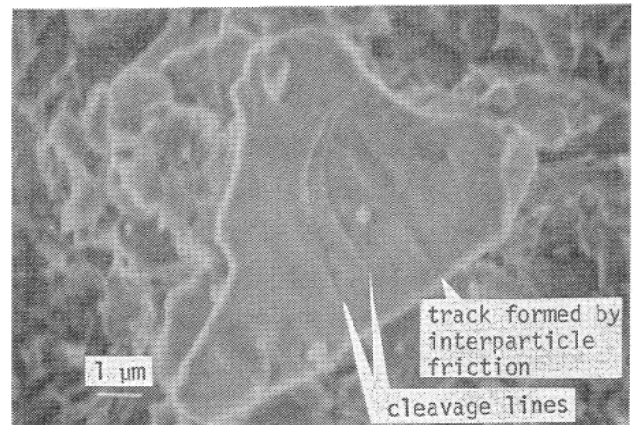
動単位（化学結合）の集合によって表わされる」という土のせん断抵抗力発生機構の一般的な微視的概念を明らかにした。

以上の結果には、粘土粒子は常に吸着水膜に覆れているというこれまでの定説と全く異なる点、すなわち粘土粒子の固体間接触が存在するという点が含まれているので、レートプロセス理論の適用性を疑問視するいくらかの人々がいる。この疑問を打破するには、目に見える形の物理的証拠を示す以外に道はないと考えられた。筆者ら²²⁾はその証拠の一つを得るために走査型電子顕微鏡により粘土粒子表面を観察することを試みた。すなわち、もし粘土粒子表面にせん断時の粒子同士による摩擦痕が観察されれば、それは粘土粒子間の固体間接触が存在することの証明になる。これまでの定説では、粘土粒子表面全体が常に吸着水膜に覆れていると考えられているので、粘土粒子表面にはせん断による摩擦痕が生じるはずはないと考えられるからである。

写真-1は、走査型顕微鏡により、せん断後の粘土粒子表面に観察された摩擦痕の例である。写真-1(a)では2条の摩擦痕が、写真-1(b)では1条の摩擦痕と2条の劈開線がそれぞれ観察されている。これらの写真は、現在、粘土粒子の固体間接触を示す、世界的に見ても唯一の目に見える物理的証拠であると自負している。さらに、もう一つの証拠がアクースティックエミッション(AE, (破壊音))によって得られる。すなわち、粘土内部においてせん断

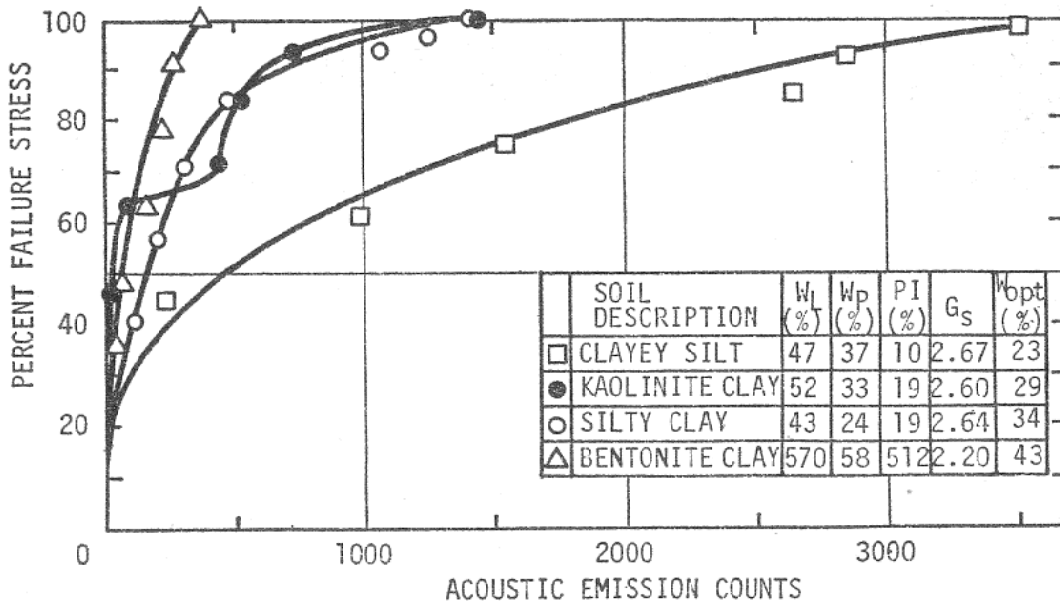


(a)



(b)

写真1



W_L : LIQUID LIMIT W_p : PLASTIC LIMIT
 PI : PLASTICITY INDEX G_s : SPECIFIC GRAVITY
 W_{opt} : OPTIMUM WATER CONTENT

時にAEが測定されれば、粘土粒子の固体間接触を示す証拠になる。AEは固体間摩擦によって発生するのであり、粘性的な吸着水膜を通じた接触からはAEの発生が期待できないからである。Koernerら⁴⁾によれば、粘土粒子表面の吸着水膜が最もよく発達するといわれているベントナイトでさえもせん断時にAEが測定されたという結果が報告されている(図-1参照)。この結果は筆者らの研究結果を支持してくれる力強い援軍であろうと思っている次第である。

土木工学の分野でこのような微視的な基礎的研究に精を出しているものがあることに驚かれる読者諸氏も少なくないかもしれない。しかし、土質力学すなわち粒子集合体の力学の基礎になるような理学方面の分野がないことにも起因して、微視的アプローチと巨視的アプローチの両刀使いにならざるを得ない。これも土質力学のもつ宿命の一つかもしれないと思っ

ているが、これを機会にいろいろな方面からご教示いただければ幸いである。

参考文献

- 1) Matsui, T. and Ito, T., "Flow mechanism of clay-water system and microscopic meaning on shear parameters of soils," Proc. of Specialty Session 9, Constitutive Equations of Soils, 9th ICSMFE, 1977, pp. 143-152.
- 2) Matsui, T., Ito, T. and Abe, N., "On the existence of solid-to-solid contact between clay particles," Proc. of Specialty Session 9, Constitutive Equations of Soils, 9th ICSMFE, 1977, pp. 298-300.
- 3) Matsui, T., Ito, T., Mitchell, J.K. and Abe, N., "Microscopic study of shear mechanisms in soils," Journal of Geotech. Eng. Division, ASCE, Vol. 105, No. GT 2, 1980 (inPress).
- 4) Koerner, R.M., Lord, A.E., Jr. and McCabe, W.M., "Acoustic emission behavior of cohesive soils," Journal of Geotech. Eng. Division, ASCE, Vol. 103, No. GT 8, 1977, pp. 837-850.