

大阪大学工学部 正員 伊藤 富雄
 同 同 〇松井 保
 同 大学院 学生員 長瀬 恵一郎

[1] まえがき

粘土-水系の広範なコンシステンシー状態において、種々の流動現象がみられる。筆者らはこの多様な流動現象を系統的に取扱ひ、その機構を解明することを目的として、現在までに粘土サスペンションのニュートン流動、粘土ペーストの定常流動および圧密粘土の定常クリープを取り上げ、それらの流動機構が現象的に rate process 理論によって説明できることを裏付けた。また、粘土-水系の流動の基本機構は本質的には homogeneous ではなく、heterogeneous process と考えることによって系統的に取扱うことができることを示した。¹⁾²⁾ 本研究においては、rate process 理論で仮定される微視的流動機構を粘土の微視的構造と対応させて、粘土粒子接合点の物理化学的機構を検討し、粘土の流動機構を明確にするとともに、さらには粘土粒子間の相互作用に関する一般的概念を得ようとするものである。

[2] 粘土の流動機構

一般に、粘土のせん断抵抗力は巨視的には粘土粒子間の粘着成分、摩擦成分およびダイラタント成分によって生ずると考えられている。粘土のせん断において、ダイラタント成分は他の二成分と比較して無視できるものではないが、定常的流動現象においてはこの成分は小さいと考えられる。また、粘土粒子間の相互作用について物理化学的のみを検討する場合には、粘土粒子の相対的移動によって生ずるダイラタント成分が無視できる現象を取扱うのが都合が悪い。ダイラタント以外のせん断成分を微視的にみたとき、これを粘着成分と摩擦成分に分ける理由はなく、両成分とも粘土粒子の吸着水、カチオン拡散層および粘土粒子間の直接接触によって生ずると考えられる。

流動現象における粘土粒子間の相互作用を定量的に評価するために、流動に関与する粘土粒子間の最小単位として流動単位 (flow unit) を仮定する。rate process 理論では、流動単位は統計的な規則性をもって挙動し、流動現象をせん断応力による微視的な流動単位の位置交換の過程と定義している。すなわち、流動単位の一回の運動距離は粘土の変形の最小量と考えることができる。流動が起こるために必要なエネルギーは活性エネルギーと呼ばれる。これは流動単位の結合力を表現するものである。Mitchell³⁾、Andersland⁴⁾らおよび筆者らの実験結果より、乾燥砂、種々の圧密粘土および液性限界付近の軟弱な粘土ペーストに対して、活性エネルギー ΔF はいずれの場合についても 30 kcal/mol 前後の値が得られ、一方粘土サスペンションに対しては、 ΔF は約 4 kcal/mol で自由水のそれとほぼ同じ値が得られている。以上の事実より、液性限界付近の軟弱な粘土ペーストにおいても、乾燥砂と同様に結合は粘土粒子間の直接接触で発揮されており、吸着水は結合にほとんど関与していない様である。したがって、これらの多様な土の流動を一つの流動単位系が他に卓越して流動に関与している homogeneous process で表わすことができると考えられる。一方、粘土サスペンションについても他の流動単位系が卓越した homogeneous process と考えられる。これら二つの process の流動に関与する基本機構としては、前者では粘土粒子間の直接接触による結合と考えると酸素結合と、後者では水素結合を想定しても現状では特に不都合な点は見当たらない。²⁾³⁾⁴⁾ しかし、粘土-水系の流動現象を系統的に取扱う立場に立つかぎり、二つの流動単位系による異なる homogeneous process の間にそれらを結ぶ過渡的な heterogeneous process の存在を予想するのは当然である。この heterogeneous process として上記二種の process のみが存在すると仮定すれば、その見かけの活性エネルギー ΔF_a は次式で表わされることが導かれる。²⁾

$$\Delta F_a = (S_1 \Delta F_1 + S_2 \Delta F_2) / S = (\Delta F_1 + \alpha \Delta F_2) / (1 + \alpha) \quad \left. \vphantom{\Delta F_a} \right\} (1)$$

$$S = S_1 + S_2, \quad \alpha = S_2 / S_1$$

ここに、 S_1, S_2 および $\Delta F_1, \Delta F_2$ はそれぞれの process における単位面積当りの流動単位の数および活性エネルギーであり、サフィックス 1, 2 はそれぞれ酸素結合および水素結合に対応する。また、 ΔF_1 および ΔF_2 はそれぞれ近似的に 30 kcal/mol. および 4 kcal/mol. とし

て以下議論する。式(1)より $\alpha = 0$ および ∞ でそれぞれ homogeneous process となることが分かる。しかし、 ΔF_a が上の状態量の関数として表現されていないので、定性的な議論しかできない。そこで、定量的な議論をするために、 ΔF_a と含水比 w の関係を次式で仮定する。

$$\Delta F_a = -m \log w + n \quad (2)$$

ここに、 m, n は係数である。式(2)は、ある含水比 w で ΔF_a が 30 kcal/mol. となり、含水比が増大するとともに ΔF_a が減少し、含水比 w_2 で 4 kcal/mol. となる定性的な必要条件は備えている。

式(1)および(2)より S_1 および S_2 の分布状態が明らかとなる。図-1 は定性的に考察される heterogeneous process における S, S_1, S_2 と含水比 w の関係を模式的に示したものである。

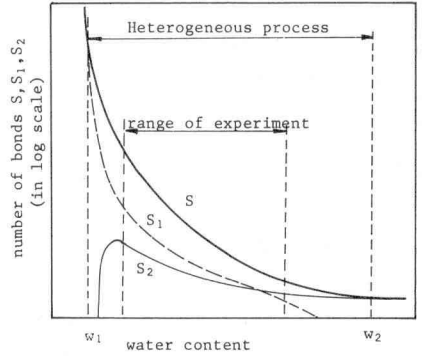


図-1

[3] ベーン型プラストメータによる検証

(2)に示した粘土の流動機構のモデルの検証として、写真-1に示すような新しく試作したベーン型プラストメータ(高精度のベーン試験機)を用い、高含水比の粘土ペーストを対象として実験を行った。実験方法および整理方法は文献(1)に述べた方法と同じであるので省略する。用いた粘土試料は2種類で、その物性は表-1に示す。図-2, 3はカオリンおよび千里粘土に対する活性エネルギーと含水比の関係を図示したものである。図中の実線は、式(2)で示される ΔF_a と $\log w$ の直線関係と Brookfield type の粘度計で測定したニュートン流動の限界が含水比 100%前後であることを考慮して描いたものである。本装置により実験する含水比の範囲に限界があり、オランダデータにバラツキがあるが、近似的に式(2)の仮定は認められると思われる。

図-4には、式(1)および(2)を用いて得られた流動単位の数 S_1, S_2 と含水比 w の関係をカオリンの場合について示す。この図から含水比の増加に伴って、 S_1, S_2 が減少することが分かる。また、 S_1 と S_2 の分布状態としては、含水比が減少するとともに S_1 と S_2 の差が広がり S_1 は S に近づき、含水比が増加するとともに S_1 と S_2 の差が小さくなりついには S_2 が S_1 より大になる傾向が認められる。この傾向は千里粘土についても同様である。図-4と図-1の比較から、今回

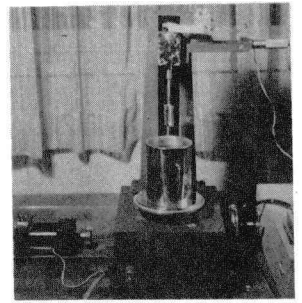


写真-1

表-1

sample description	Kaolin	Senri clay
liquid limit	52.8	118.5
plastic limit	32.7	32.4
plasticity index	20.1	86.1
specific gravity	2.69	2.68
clay fraction	60.0	56.9

図-4と図-1の比較から、今回

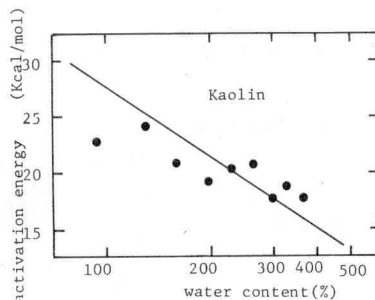


図-2

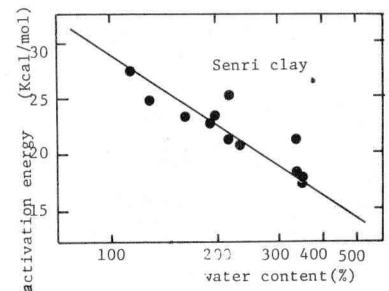


図-3

行なった実験の粘土試料の含水比の範囲は図-1に示した範囲にあったものと推察される。

一方, rate process 理論によれば, 活性エネルギーおよびひずみ速度が一定の場合, 流動単位の結合数 S とせん断強度 τ の間には比例関係が存在する。この関係は, 乾燥砂, 種々の圧密粘土あるいは軟弱な粘土ペーストといったかなり広範な状態の土に対して成立することがすでに認められている。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 図-5は今回得られた S と τ の関係を図示したものであるが, 同時に Mitchell らおよび筆者らによってすでに得られている値もプロットしてある。多種多様な土に対して, 全体を通してほぼ比例関係が認められるが, 流動単位の結合数の小さい部分においてはせん断強度 τ が小さい傾向がある。実線は S が 10^8 付近以上のプロットについて得られる S と τ の比例関係を示す。 S が 10^8 より小のプロットが実線よりやや小さい理由としては, 全結合数の中に結合エネルギーの高い酸素結合と低い水素結合が含まれており, 含水比の高い場合すなわち結合数が少ない場合には, 結合エネルギーの低い水素結合の数が相対的に多くなることが考えられる(図-4参照)。そこで, 流動単位一つの結合力を見かけ上等しくするために, 水素結合に対応する流動単位の結合数を酸素結合のそれに換算する。流動単位の換算された全結合数を $\bar{S}$ とすると,

$$\bar{S} = S_1 + (4/30) S_2 \quad (3)$$

図-6は, 式(3)により換算された全結合数 $\bar{S}$ とせん断強度 τ の関係を示したものである。同時に, 比較のため S と τ の関係もプロットしてある。 S を $\bar{S}$ に換算することにより, $\bar{S}$ と τ の関係が図中の実線に近づき, 見かけ上 heterogeneous process を酸素結合による homogeneous process とみやすことができる。

(4) おおひ

本研究は, rate process 理論で仮定される微視的流動機構に対応させた粘土の物理化学的流動機構モデルを作り, 一側面から検証したものであるが, 比較的簡単なモデル化にもかかわらずここに示した必要条件はほぼ満足しているように思われる。しかし, 図-5, 6におけるプロットのバラツキの原因として, せん断強度を求める際のひずみ速度が等しくないことや実験の精度の他に, 流動現象に関与する機構の厳密には酸素結合と水素結合の二つだけではなく, たとえば水素結合より結合エネルギーが小さいことから無視したファンデルワールス力あるいは微視的なインターロッキングなどの要素が多少とも影響しているのかもしれない。したがって, 粘土粒子間の相互作用に関する一般的概念を得るためにはさらに検討の余地がある。

最後に, 本研究に協力された元本学学生大江泰宏君(現兵庫県)に感謝の意を表す。

(参考文献)

- 1) 伊藤・松井・河倍:「粘土の流動機構について」第7回土質工学研究発表会(1972)
- 2) 伊藤・松井・河倍:「粘土の流動機構に関する考察」第27回土壌学会(1972)
- 3) Mitchell et al.: "Bonding, effective stress and strength of soils" ASCE, Vol. 95 (1969)
- 4) Andersland et al.: "Soil deformation and activation energy" Géotechn. 20 (1970)

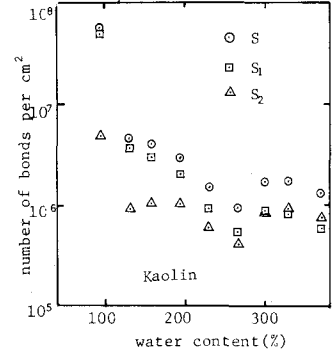


図-4

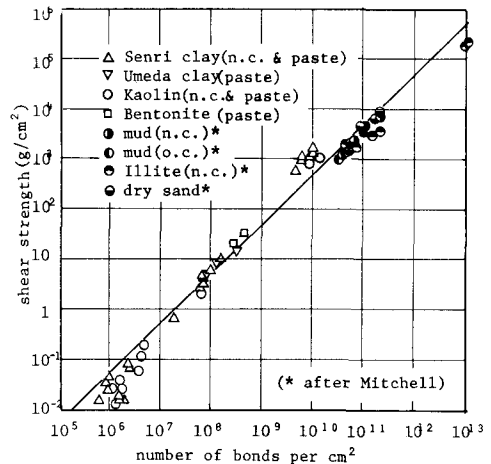


図-5

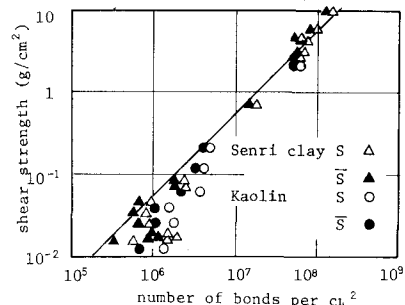


図-6