

II-174 粒子を含む流体の粘性係数に関する考察

舞鶴工業高等専門学校 正員 三輪 浩
立命館大学理工学部 正員 大同 孝之

1. はじめに、泥流のような高濃度に微細粒子を含む流体を単一の流体として巨視的に取り扱う場合、通常その流体はビンガム流体としてとらえられ、流動を支配する要因である降伏値や粘性係数等のレオロジー定数の評価が重要な問題となる。とくに、粘性係数は流動方程式からもわかるように流動を支配する最も大きな要素であるといえる。

従来より粒子を含む流体の粘性係数に関する研究は数少なくされており、理論式も多数提案されてきている。近年では、固液界面での吸着力によって形成されるフロックや吸着水の存在が現象を説明するうえで重要な意味をもつことから、これらに着目し、せん断空間の減少量を補正することによって実測値を表現しようと試みられている。しかしながら、泥流中にはこのようなフロックを形成した粒子の他に、フロックを形成することのない比較的大きな粒子も多く含まれており、この両者を考慮して粘性係数を評価する必要がある。

そこで本文では、対象とする流体がフロック形成粒子と非形成粒子とから成っているとして、前者についてはフロックの形成によるせん断空間の減少特性、すなわち見かけの粒子体積の膨張率を考へ、後者については粒子実質部分のみで存在するとして、両者を重ね合わせることによる流体粘度の算定について検討する。

2. 粒度分布特性を考慮した粘度式の誘導、フロックを形成した粒子を含む流体は粒子実質部分のみを考へる場合よりもせん断空間の減少量が増加する。本文ではこの効果によるみかけの粘度の変化を考へることとする。

流体中の粒子の流動モデルを森・乙竹¹⁾と同様に図1で与えると、流体に関する見かけの粘性係数は $\mu_s = (b_k/b_k - 1)\mu_0$ --- (1) と表わされる。ここに、 b_k は粒子間隔係数、 μ_0 は媒体液の粘度である。 b_k は bagnold の線濃度²⁾の考へ方を用いると、 $b_k = (C_{ci}/C_i)^{1/3}$ --- (2) となる。(2)式中の C_i は粒子の容積濃度であり、 C_{ci} は最充填容積濃度である。(1)式および(2)式より流体の相対粘度は $\mu_r = \mu_s/\mu_0 = (C_{ci}/C_i)^{1/3} / \{(C_{ci}/C_i)^{1/3} - 1\}$ --- (3) で与えられる。

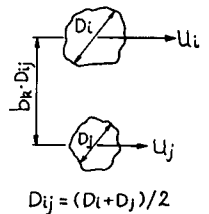


図1. 流動モデル

フロックの形成・非形成の状態や粒子の粒径分布等の影響は(3)式中の C_i と C_{ci} に現われる。粒子がフロックを形成するかどうかは種々の要素が複雑に作用して決まるが、いま、フロックを形成する粒子と粒子実質部分で存在する粒子とが粒径によって区別できると仮定して、流体中の全粒子を2つの領域に分割する。このとき、その境界となる粒径が問題となるが、シルト質以下の粒子がフロックを形成するとしてこの境界粒径を 74μ とする。以下、 74μ 以上をA領域、それ以下をB領域と呼ぶことにする。

フロックを形成した粒子の流体中での体積は、フロック容積濃度と粒子容積濃度の比例係数 α を用いて $V_F = \alpha \cdot V_{SB}$ --- (4) と表わすことができる。ここに、 V_F はフロック状態の粒子の体積、 V_{SB} はB領域の粒子実質部分の体積である。流体中でのA領域の粒子の体積 V_{SA} と、 V_{SB} との比 $V_{SB}/V_{SA} \equiv \xi$ がわかれば、フロックの形成粒子を含む全粒子容積濃度 C_i は全粒子の実質容積濃度を C_s として次式のように表わせる。

$$C_i = \{(1 + \alpha \cdot \xi) / (1 + \xi)\} \cdot C_s \quad \text{--- (5)}$$

一方、最充填濃度 C_{ci} はA領域の粒子の最充填濃度を C_{cSA} 、B領域の粒子の最充填濃度を C_{cF} として、次式となる。

$$C_{ci} = (1 + \alpha \cdot \xi) \cdot C_{cF} \cdot C_{cSA} / (C_{cF} + \alpha \cdot \xi \cdot C_{cSA}) \quad \text{--- (6)}$$

以上により、A・B両領域の粒子を含む流体の粘度は、(3)式、(5)式および(6)式より相対粘度として次式によって求めることができる。

$$\mu_r = \xi^{1/3} / (\xi^{1/3} - 1) \quad , \quad \xi = (1 + \xi) \cdot C_{cF} \cdot C_{cSA} / (C_{cF} + \alpha \cdot \xi \cdot C_{cSA}) \cdot C_s \quad \text{--- (7)}$$

3. 特性値の決定. (7)式中の $\xi, \alpha, C_{CSA}, C_{CF}$ は対象となる流体中の粒子によって異なる特性値であるから、あらかじめ求めておく必要がある。測定に用いた試料は京都稲荷山の黄土で、図2に粒度分布を示す。なお、粒子の比重は2.70である。 ξ の値はこれより $\xi=5.81$ となる。

α, C_{CSA} についてはA・B両領域ごとにシリンダーによる沈降試験を行うことによ、て求めることができる³⁾。各領域ごとの沈降状況を図3に示すが、明らかに沈降状況に相違がみられる。シリンダー内に懸濁液を投入したときの液柱高さを Z_0 、粒子が沈降して堆積したときの高さを Z_f とすると、A領域の沈降試験に関して $A \cdot Z_f = A \cdot Z_0 \cdot C_s / C_{CSA} + A \cdot h$ --- (8) が成り立つ。ここに、 A はシリンダー断面積、 h は堆積上部で十分に沈殿しない部分の高さである。ただし、 h の部分については粒子濃度が非常に低く、この部分を無視しても Z_f にはほとんど影響がないものとみなした。(8)式より $C_{CSA} = 0.43$ を得る。一方、B領域の懸濁液に対してはフロックが形成されているため、(8)式において、 $C_s \rightarrow \alpha \cdot C_s = C_f, C_{CSA} \rightarrow C_{CF}$ と置き換之ればよい。しかし、 C_{CF} は吸着水を含むフロック粒子の最充填容積濃度であるため自由水と吸着水との区別が困難である。そこで、対象とするB領域の粒子が図2からもわかるように広い範囲に分布していることから、流体中においてフロック間により小さいフロックが存在できると考えられ、等径球粒子の場合の最充填容積濃度である0.52よりも大きな値 $C_{CF} = 0.70$ を用いた。これより本試料に対する α の値は3.93となる。

4. 粘度式と実測値との比較. (7)式と流体中の粒子の特性値によ、てフロック形成粒子と非形成粒子とを含む流体の粘度が求まるが、これを検証するために水平管を用いた細管法によ、て粘度の測定を行った。図4は理論式との比較であるが実測値の傾向をよく表わしており、本手法が妥当であったといえる。

5. 要す。粒子を含む流体の流動特性として粘性係数をとりあげ、本文では流体中の粒子が粒度分布をもつ場合、フロックを形成している粒子と形成しない粒子とが混在していることに着目し、粒子の特性値を導出してその算定式を求めた。論点の中心は両者の境界の決め方であったが、実用上分類し易い方法として粒径74 μ をその境界として取り扱った結果、沈降試験において沈降状況に相違が認められた。ただ、実際の挙動だけではフロックの形成・非形成の区別はつけ難く、74 μ 付近の粒子の、流体中での状態も明らかではないが、実測値との比較ではその傾向を比較的よく表わしており、本文で用いた仮定でも十分な適応性をもっていると考えられる。

今後の問題として、フロック粒子の最充填容積濃度である C_{CF} の値の算定が残されている。ここで用いた値は一応の目安であ、て絶対的なものではない。今後検討してゆきたい。
参考文献. 1) 森・乙竹: 懸濁液の粘度について, 化学工学, 第20巻, 第9号, 1956.

2) Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Roy. Soc., A-225, 1954, pp. 49-63.

3) Daido, A.: Viscosity and Yield Value of Fluid Containing Clay, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 26, 1976, pp. 461-472.

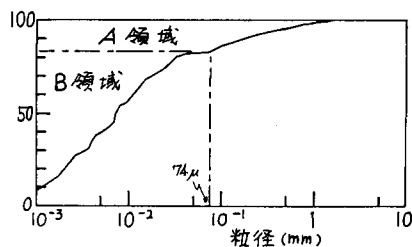


図2. 試料の粒度分布

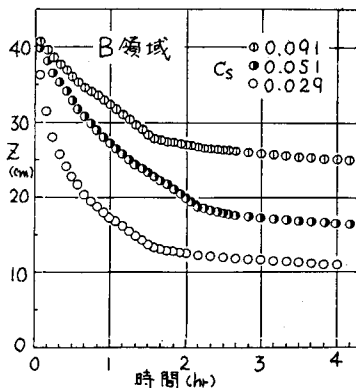
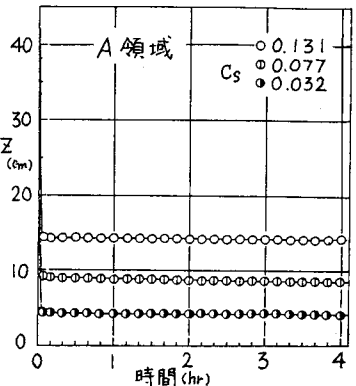


図3. 懸濁液面の沈降状況

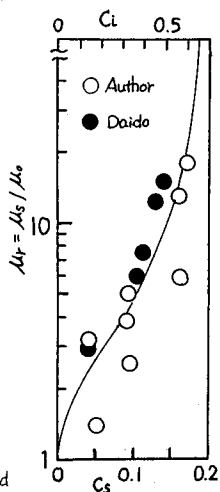


図4. 粘度式と実測値の関係