

土砂を含む流れに関する一考察

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 淳之

1. はじめに 土石流や泥流のように土砂を高濃度に含む流れは、一般に非ニュートン流体として扱われる。このような流れでは外力だけでなく内部に含まれる粒子の状態（濃度、粒径、等）によっても流動形態やその機構が支配される。本文では、まずこのような高濃度に土砂を含む流れの流動式について、流れを支配するパラメーターの変化とそれとともに流動形態について考察を行う。そして、流動を支配する重要なパラメーターの一つである粘性係数を取りあげ、その算定法について述べる。

2. 流動方程式と流動形態 土砂を含む流れの流動式は、次のように表すことができる。

$$\tau = \tau_y + \eta_s \left(\frac{du}{dy} \right) + f(c_g) \sigma D^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \rho_m \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \dots (1)$$

ここに、 τ_y :せん断降伏応力、 η_s :塑性粘度、 ρ_m :流体の密度、 ℓ :混合距離 である。右辺第2項は流体相の応力（粘性項）、第3項は粒子相の応力（慣性項）、第4項は内部運動量によるレイノルズ応力の項である。土砂を含む流れでは流体中にこれら全ての項が存在し、どの項が他の項より卓越するかによってその流体の流動形態が決定される。土石流や泥流のように高濃度に土砂を含む流れにおいては、第4項よりも第2項や第3項が卓越し、前者の場合には Bingham 流体、後者の場合には Dilatant 流体として扱われている。

両者の大きな相違点は流動によるエネルギー散逸が、主に流体相で行われるか、粒子相で行われるかということであるが、これは、外力から与えられるエネルギーが同じ場合には粒子の粒径やその濃度に依存するであろう。すなわち、同じ粒子濃度であっても流体が主に粘性項に寄与するような微細な粒子からなる場合には流体相でのエネルギー散逸が大きく、第2項が卓越するが、粒径が大きくなると粒子相で散逸されるエネルギーが増加し、ついには第3項が卓越するようになる。このような、高濃度流れのもつ機構を明らかにするには、粘性項や慣性項をいかに評価するかが問題となってくる。ここでは、粘性項における流体粘度について流体中に含まれる粒子の粒度分布特性に着目して、その算定について検討することにする。

3. 粒度分布特性を考慮した粘度式 流動形態は流体中の粒子の粒径によっても左右されることから、粘性係数の算定においても流体中の粒子の特性を考慮に入れて考える必要がある。

土粒子が水中に含まれると、粒子表面での電気化学的作用によってフロックを形成する微細粒子と単体で存在する粒子とが混在することになる。本文では、このような状態にある流体を対象とする。

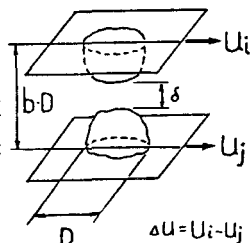


図1. 流動モデル

まず、流体中の流動モデルを図1で与ると、流体の相対粘度は次式で表すことができる。

$$\eta_r = \eta_s / \eta_o = (C_{ci}/C_i)^{1/3} / \{ (C_{ci}/C_i)^{1/3} - 1 \} \quad \dots (2)$$

Hiroshi MIWA, Atsuyuki DAIDO

ここに、 C_i :粒子のみかけ容積濃度、 C_{ci} :最充填容積濃度である。(2)式は粒径には依存しない形となっているが、この効果はフロックの形成・非形成に影響を与えている。そこで、粒子がフロックを形成するかどうか粒径と関係づけられると仮定して、粒子を2領域に分ける。境界粒径はシルト質以下の粒子がフロックを形成できるとして、 74μ とする。以下、これ以上をA領域、以下をB領域と呼ぶことにする。

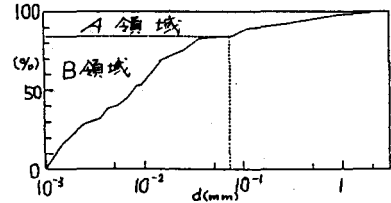


図2. 粒度分布

流体中にフロック形成粒子と非形成粒子が混在している状態を想定すると、みかけの容積濃度 C_i は実質部分の容積濃度を C_s として

$C_i = \{(1+\alpha)\xi\} / (1+\xi) \cdot C_s$ と表される。ここに、 α : B領域粒子の実体積とフロック形成時の体積比、 ξ : 流体中の両領域の実質部分の体積比である。一方、 C_{ci} はA、B領域の最充填濃度をそれぞれ C_{csA} 、 C_{cf} として、 $C_{ci} = (1+\alpha\xi) / (1/C_{csA} + \alpha/C_{cf} \cdot \xi)$ となる。以上より、相対粘度が次式によって求められる。

$$\eta_s = \xi^{\frac{1}{2}} / (\xi^{\frac{1}{2}} - 1), \quad \xi = (1+\xi) / (C_s / C_{csA} + C_{cf} / C_{cf} \cdot \xi) \quad \dots (3)$$

(3)式中 C_{csA} 、 α 、 C_{cf} は沈降堆積試験¹⁾によって見積ることができる。測定には図2に示す粒度分布をもつ京都稲荷山黄土を用いた。各領域の沈降状況を図3に示すが、明らかに相違がみられ、B領域の粒子は親水性が良いようである。沈降開始時の液面高さを Z_0 、最終堆積厚さを Z_f とすると、A領域について $Z_f = Z_0 (C_s / C_{csA})$ B領域について $Z_f = Z_0 (\alpha C_s / C_{cf})$ が成立し、これより(2)式中の未知数が求められる。

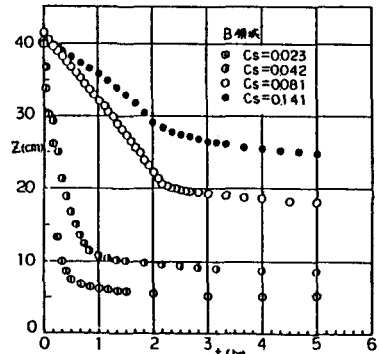
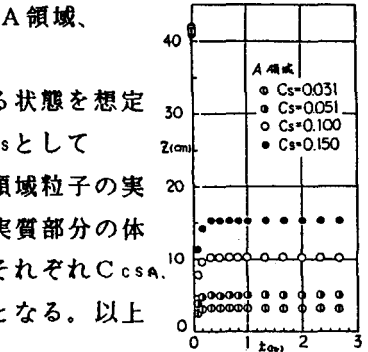


図3. 沈降状況

4. 実験および考察 以上の考え方を検討するため、B領域のみからなる試料(I)とA・B領域からなる試料(II)について細管法により粘度の測定を行った。図4は理論式との比較である。両試料とも傾向を良く表しているといえる。また粒径による差は試料(II)中のA領域の粒子の割合が小さいため顕著ではないが大きな粒子を含む試料(II)の方が若干ではあるが粘度が低いようであり、同一濃度でも粒径による差が発生しているといえそうである。

5. むすび 本文では土砂を含む流れにおいて、エネルギー散逸に寄与するパラメーターの一つである粘性係数を取りあげ、その算定について考察した。流動形態やその機構を議論するには粘性項や慣性項の評価の仕方が問題となるが、抵抗則を用いて評価することも可能であろう。このような点をふまえ、今後検討してゆきたい。

参考文献

1) Daido, A.: Theoretical and Applied Mechanics, vol. 26, 1976.

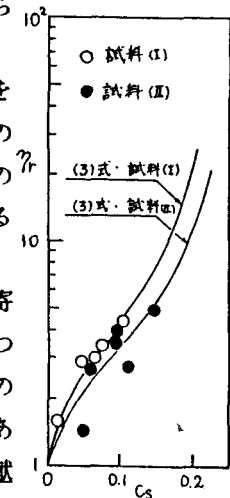


図4. 理論・実験比較