

河川底泥の流動特性

千葉工業大学 正員 ○滝 和夫
千葉工業大学 " 岡 正義

1. まえがき

河川・湖沼等の底泥の巻き上がり状態を把握することはその水質汚濁量を知るうえで重要であるが、現象の複雑さのためにいまだ十分であるとは言いがたい。この巻き上がり機構が河床付近の流れの特性と密接に関係していることは良く知られているが、量的な関係を十分に明らかにするまでには至っていない。その原因の一つとして、底泥の粒子径が微細であること、粒子表面がイオン化されていることが多く凝集・分散現象が必ず生じること、界面における物質移動に界面近傍の流体の運動が密接にかかわっているにもかかわらず、その計測に困難が伴うことが上げられる。

本研究では、底層を構成する材料特性によって掃流的現象および密度流的現象が生じるとの立場から底泥の流動特性を考察し、流れによる底泥の巻き上がり機構解明の手掛りの一つにすることを考えている。特に底泥の流動曲線に注目して降伏応力、粘度を求め、拡張Ostwald曲線の適用性およびせん断速度軸の移動量と底泥の含水比との関係について検討した。

2. 実験装置および方法

河川等の底に堆積した泥層の流動特性を知るための装置として、写真1に示すような有段変速式シリンダ型回転粘度計を用いた。測定項目は泥の粘度、せん断応力およびせん断速度である。その測定方法は500mlビーカーに底泥試料を取り、シリンダを試料層に挿入し、回転させる。この時のシリンダ軸の捩れ角をトルク測定部で電気信号に変換、プリンタへ出力し、試料の粘度およびせん断応力値算出用データとする。このデータを計算機に入れ、種々の計算の後、結果をX-Yプロッタおよびプリンタへ記録するようにしてある。ここで、本実験に用いた底泥は、泥の粘度が広領域で調節可能なベントナイト泥を用いることとした。

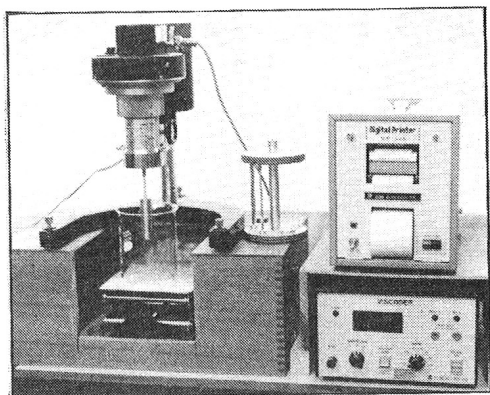


写真1 粘度測定装置

ベントナイト泥の粘度は含水比と大きな相関を持っている

ことから、含水比を段階的に変えて測定用底泥試料とした。また、含水比の調整を終えたベントナイト泥はベントナイトの膨潤性と履歴特性を考慮して2昼夜静置し、測定10分前に軽く攪拌の後、シリンダを泥層に挿入する。回転数と回転時間は0.0 rpm、0.5 rpmに8分間、1.0、2.5、5、10、20、50、100 rpmにそれぞれ4分間、0.0 rpmから順次回転数を増し、100 rpmから、再び回転数を減少させ、その時の各回転数に対するシリンダー1回転ごとのトルクをプリンタへ出力させる。この操作を同一含水比に対し、2往復行なうこととした。試料の温度はすべて、20℃になるようにした。

粘度計から打出されたデータは次式に基づいて、試料のせん断応力、せん断速度および粘度を算出することとした。ここで、 T は粘度計シリンダーのトルク、 R_b はシリンダー半径、 R_c はビーカー半径、 h はシリンダーが泥層中にある高さ、 ω はシリンダーの回転角速度、 θ は粘度計目盛盤の値（トルクに対応する）、 τ はせん断応力、 D はせん断速度、 η_s は粘度、 K_1 はせん断応力常数、 K_2 はせん断速度常数。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{T}{2\pi R_b^2 h} = K_1 \theta \\ D &= \frac{2\omega}{1 - (R_b/R_c)^2} = K_2 \theta \\ \eta_s &= \tau/D \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、時間のデータはシリンダー回転数から換算することとする。

一方、底泥としてのベントナイト粒子の形状および表面の状態をMEDで写真に、また、実験に用いた泥の粘度分布、比重、イオン活性量を、それぞれ撮影および測定した。また、流れの場合におけるベントナイト泥層上面の状態は前報¹⁾と同様な方法で、含水比350%、550%、750%、900%、1300%について、流水の流速を16.3cm/secとして写真撮影した。

3. 材料特性

底泥材料として、粒子径が微細であり、粘性を有していることから、ベントナイトを用いることとした。この材料の粒子形状および表面の状態は写真2、3のとうりである。特性は粒子のイオン化が大で、したがって、粘着性も大であることである。ここで、写真2、3は粉末状の粒子をMEDで撮影したもので、個々の粒子は砂粒子等に見られるように、立体的な形状を持ち、表面は凹凸が多く、また、大きな粒子に小粒子が付着しているのが良く観察できる。

ベントナイトの粒度分布は図1に示すとうりである。図より、実験に用いた粒子の粒度分布は比較的広範な粒径から成っており、 $d_{65} = 7.5 \mu m$ で、 $20 \mu m$ 以下の粒子が80%以上を含めている。その比重は2.59である。また、粒子のイオン化はモンモリ結晶表面積の負電荷量として表わされ、メチレンブルー吸着量で129.5 mg/gである。もう一つの大きな特徴として、材料の膨潤性がある。本実験でのベントナイトはソジウムベントナイトに分類され、吸水量は4.69 ml/g/24 hrであり、水を加えてから10～500分間に最も吸水量の増加が見られる。2日間経過すると、増加傾向は緩和しはじめ、したがって、膨潤現象も急増傾向が弱まり、以降長時間に渡りゆるやかに増加するようになる。

ベントナイトは水を含むと強い粘性を持つようになり、その泥塊は重量含水比400%程度までは自重で形を変えることはない。一方、高含水比になるに従い、自重で変形するようになり、重量含水比900%以上では、大粒径粒子は沈殿し、泥層は泥水状を呈するようになる。

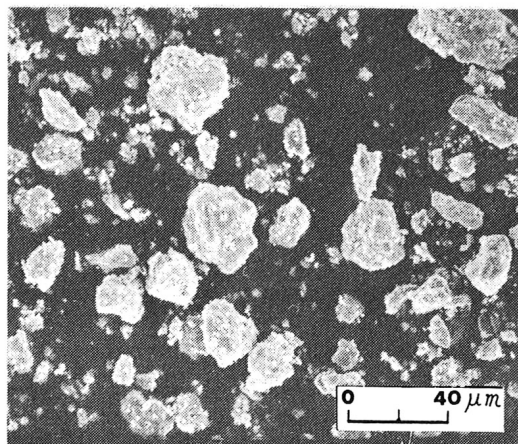


写真2 (×420)

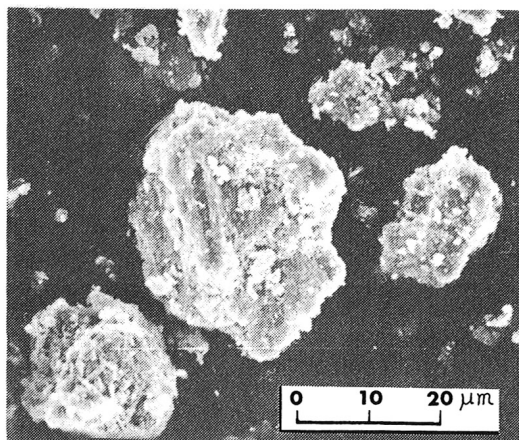


写真3 (×1,200)

ベントナイト粒子の顕微鏡写真

4. 実験結果および考察

河川・湖沼での底泥の巻き上がり現象は流れのせん断応力が底泥層のせん断降伏値を上回ることによって生じる。そこで、いま、各含水比における実測降伏値を整理し、図示すると図2のようになる。ここで、ベントナイト泥の降伏値の測定には、直接測定法を用いた。この方法は粘度計のシリンダ回転を中止した後、目盛が静止した時のトルク値を読み取る方法である。図より、ベントナイト泥層の応力降伏値は含水比の増加に伴ない急激に低下し、

$$\tau_{sc} \propto w^{-7.1} \quad (2)$$

の曲線上にプロットされているのが認められる。(2)式が適用できる範囲は重量含水比 1000 % 以下で、この値以上の含水比を持つ泥層では、泥水状となり、降伏値はすでに持たなくなっているようである。

泥層の粘度の変化を調べることもまた流動特性を知る上で重要であると考えられる。そこで、最初に、ベントナイト泥の時間依存性を調べることにする。縦軸にせん断応力 τ を、横軸に時間軸 t をとり、含水比ごとに、また、シリンダ回転数ごとに整理し、その代表的なものを図3に示す。図より、せん断応力が時間の経過と共に減少あるいは、増加しているのが認められる。この減少曲線はシリンダの回転速度が低速度から高速度へ切り変わった時に一時的なトルクの増大があったことによる時経列データである。これに対し、高速回転から低速回転速度へ変化した場合には、その粘度の経時変化は次第に増加する傾向が認められる。これは、高速回転時に生じた構造破壊が低速回転になって、泥粒子の構造系の再構成が次第に行なわれるためと考えられる。また、この時間依存性は低含水比で強く、高含水比へ移行するに従い弱くなり、重量含水比 1300 % 以上では時間依存性は見られなくなる。これらのことから、含

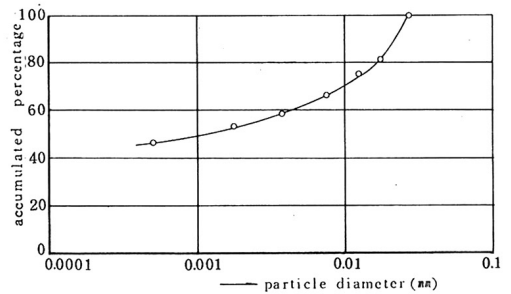


図1 ベントナイト泥の粒度分布

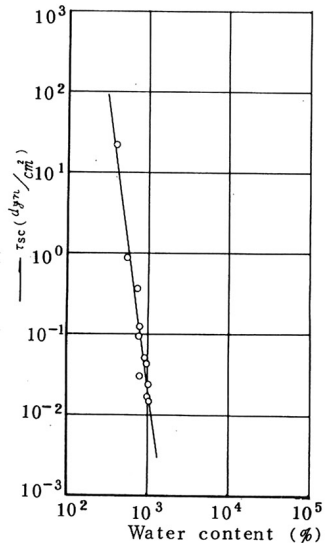


図2 降伏応力と含水比の関係

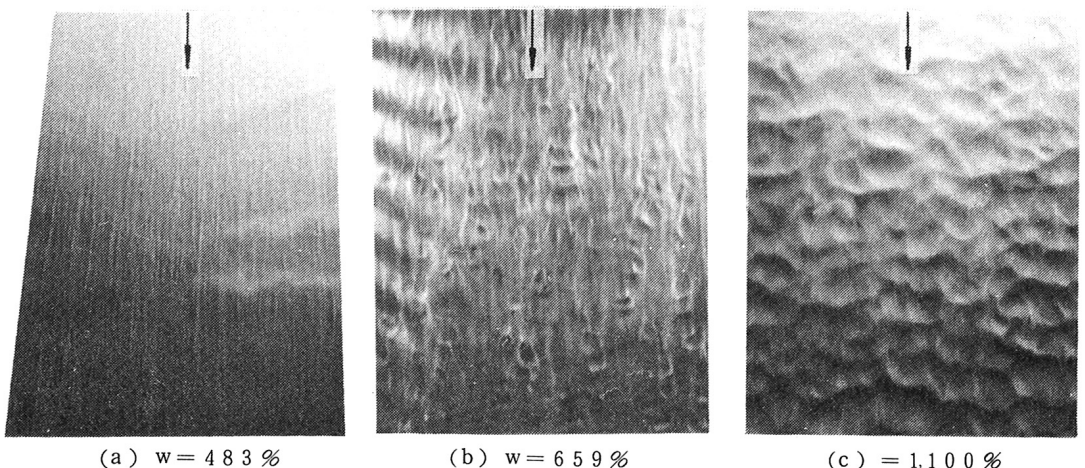


写真4 流れの中でのベントナイト泥層表面の状態 ($Re = 10.600$)

水比は粒子間のせん断抵抗を受ける範囲と強い相関を持っており、高含水比になるに従い、粒子間の接触（影響）が少なくなり、ニュートン流動へ移行して行くものと考えられる。

次に、泥のせん断応力とせん断速度との関係を表わしたのが図4である。ここで、図中の実験値は各回転数での安定した時の値を示している。図より、含水比の低い泥ほどせん断応力が高く、また、せん断速度の大きいほどせん断応力が高く現われるのが認められる。それぞれの含水比に対する応力・せん断速度曲線では、せん断速度の増加を続けた時のせん断応力と減少を続けた時のせん断応力とは同一曲線上を移動せず、ループが描かれているのが特徴的である。また、高含水比では τ - D 曲線はニュートン流動性が強く現われることから直線的であり、含水比の低下と共に曲線性が強くなり非ニュートン流動性を増しているのがわかる。

それぞれの含水比ごとの各シリンダ回転速度に対する最終粘度値とその時のせん断速度との関係を図5に示す。図より、低含水比のベントナイト泥では、せん断速度の増加と共に粘度の減少が見られ、重量含水比1030%までは、その減少の割合がほぼ同じであるのが特徴的である。また、1380%では、減少割合は急激に小さくなり、1500%になると、せん断速度の増加と共に粘度の増加するのがわかる。また、せん断速度の増減に対し、往復の粘度曲線、すなわち、ヒステリシス曲線が描かれることから、チクソトロピー流動性を持っていると考えられる。この曲線の内側面積はベントナイト泥がせん断エネルギーを泥層内の内部摩擦エネルギーとして吸収した量を表わしていると考えられ、その大きさは含水比に反比例していることがわかる。このチクソトロピー流動性はベントナイト泥のみならず、河川・湖沼の底泥に対する結果にも表わされている²⁾。

一般に、底泥がビンガム流動の特性を持っていることは良く知られているが、図3、4、5および佐藤らの上水道泥に関する研究³⁾では、せん断速度の大小によって流動特性が変化することを述べている。梅屋は⁴⁾、また、同一試料でもせん断速度の変化によって、種々の流動形態を示すことをあげ、拡張Ostwald流動曲線を示している。これは各流動形態が泥の種類によって定まるのではなく、泥に作用するせん断速度の程度によって定まるものと考えられる。

本研究においても、泥の含水比の変化はせん断速度の見掛上の変化を与えているとの立場から、各含水比における

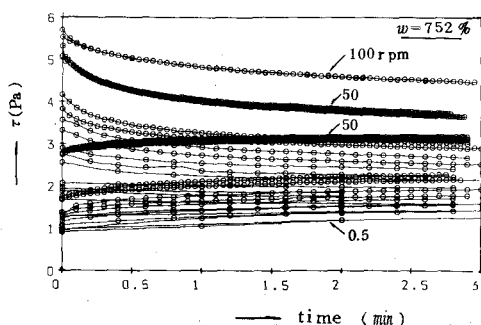


図3 せん断応力の時間依存性

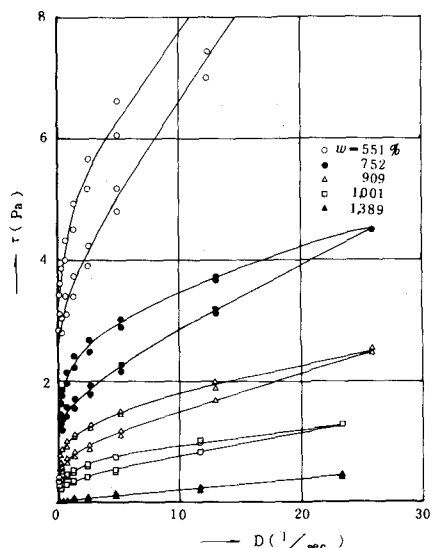


図4 せん断応力とせん断速度との関係

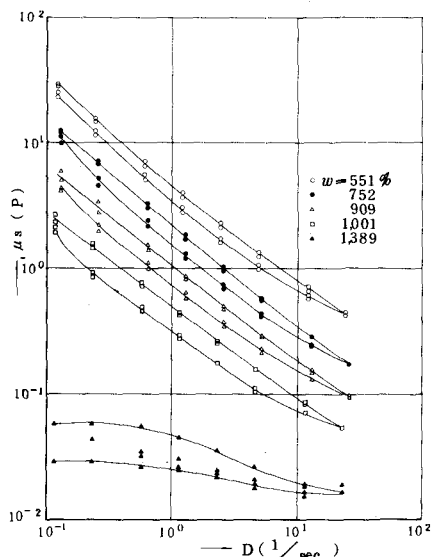


図5 粘度とせん断応力速度との関係

粘度のデータが連なり、一つの曲線を成すようにせん断速度軸を移動し、拡張Ostwald曲線を描いてみることにする。その結果を示したのが図6である。ここで、データは明確な逆S字形曲線を形成しており、泥の内部摩擦エネルギーが比較的小であるとする、その流動特性は擬塑性からビンガム性、そして、ダイラタント性流動までを表わしているものと考えられる。せん断速度軸の移動は含水比の増大に伴うせん断速度の見掛け上の増大を表わしていることから、これらの関係について整理したのが図7である。ここで、せん断速度軸の移動量 a_s はベントナイト泥の重量含水比550%のデータを基準としたもので、次式から求められる。

$$a_s = \frac{1}{2.3} \ln \ell \quad (3)$$

ここで、 ℓ は移動量で、 a_s は移動量を無次元化した値である。また、縦軸の含水比は容積含水比(%)であり、重量含水比との関係は次式のよう表わされる。

$$\frac{V_s}{V} = \frac{100}{1 + \gamma_s (w/100)} \quad (4)$$

ここで、 V_s はベントナイト粒子の体積、 V は全体の体積、 w は重量含水比(%)、 γ_s は粒子比重。

図より、含水比の減少に伴い、軸の移動量は増し、5%を折れ曲り点として急増しているのがわかる。この急増点の重量含水比は750%点であり、写真4～6における掃流的現象から密度流的現象へと移行する点に相当しているものと考えられる。

また、図6より、応力・せん断速度の関係式として、

$$\tau - \tau_0 = \mu_s D^n \quad (5)$$

ただし、

$$D = D_s \cdot a_s \quad (6)$$

ここで、 τ はせん断応力、 τ_0 は降伏応力、 μ_s は見掛け粘度、 D_s はひ

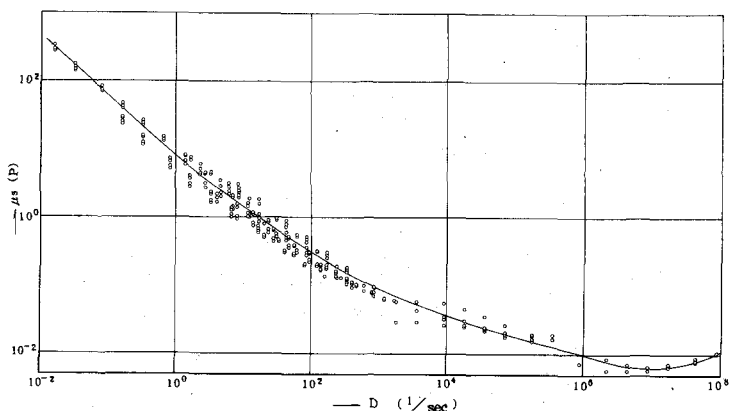


図6 粘度・せん断速度に関する拡張流動曲線

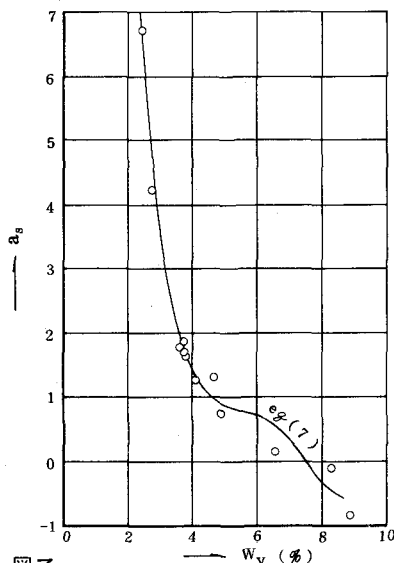


図7 せん断速度軸移動量と容積含水比

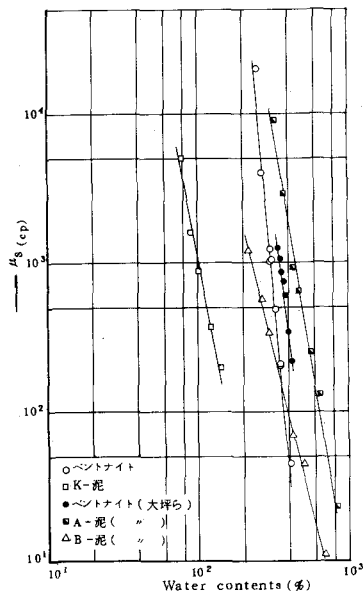


図8 種々の泥に関する粘度と重量含水比

ずみ速度。一方、移動量 a_s と含水比との関係は図 7 より、

$$a_s = f(V_s/V) = 44.76 - 28.86 W_v + 7.02 W_v^2 - 0.75 W_v^3 + 0.029 W_v^4 \quad (7)$$

したがって、せん断応力 τ は (6), (7) 式より次式のようにになる。ここで、 $W_v = (V_s/V) \times 100$ 。

$$\tau - \tau_0 = \mu_s \{ D_s \cdot f(V_s/V) \}^n = \mu_s \{ D_s (44.76 - 28.86 W_v + 7.02 W_v^2 - 0.75 W_v^3 + 0.029 W_v^4) \}^n \quad (8)$$

従来、粘度・せん断速度のデータの多くは泥の含水比の相異によって平行移動した形の曲線を示していた。しかし、(8) 式で示されるような、ひずみ速度軸の移動を考慮することにより、図 8 に見られるよう平行移動現象は解消されるものと考えられる。

5. あとがき

本研究は河川底泥の流動特性を知るための初期の段階として、粘性の大きなベントナイト泥を用いた流動特性について考察を行なった。その結果、次のような知見を得た。

- 1) ベントナイト泥の流動形態は含水比およびせん断速度によって種々に変化することが明らかとなった。なかでも、含水比の低い泥ではチクソトロピー性が現われ、含水比の低下に伴ない、非ニュートン性が強くなる。このチクソトロピー性は河川・湖沼の底泥にも見られる。
- 2) 泥の含水比の変化はせん断速度の変化を与えるとの立場から、各含水比における粘度のデータが一連の曲線上に連なるようにせん断速度軸を移動すると、その結果は拡張 Ostwald 曲線と良い一致が見られる。いま、泥の内部摩擦エネルギーが比較的小であるとする、その流動特性は擬塑性からビンガム性、そして、ダイラント流動まで容易に変化することが明らかとなった。
- 3) 種々の泥の流動特性もせん断速度軸を移動することによって、拡張 Ostwald 曲線上にプロットすることが可能であり、この移動量を含水比の関数として、せん断応力、せん断速度および粘度の間の関係式を (8) 式として示すことができた。

6. 引用文献

- 1) 滝 和夫, 岡 正義: 粘性を有する河川底泥の巻き上がり現象, 第 10 回環境問題シンポジウム講演論文集, 土木学会, 1982.
- 2) 大坪国順: 底泥の物性及び流動特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第 24 号, 1983.
- 3) 佐藤敦久, 陳 鴻霞: 上水汚泥の流動特性に関する研究 (II), 水道協会雑誌, 第 52 巻第 5 号, 1983.
- 4) 梅屋 薫: 分散系の流動特性, 化学工学, 第 46 巻第 9 号, 1982.