

九州大学 工学部 正員 栗谷陽一
 正員 楠田哲也
 正員 海田輝之
 学生員 近藤恒夫

1. はじめに

海域や河川において、洪水時や土木工事の際に、底泥の巻き上げが起こる。最近、これが水圏環境保全にとって重要な問題となっている。砂粒のような非凝集性土の限界掃流力、掃流量については、Shields, 岩垣, 栗原らの多くの研究成果があるが、底泥のような凝集性を有する土については、その挙動が、非凝集性土と異なり、またその物性の複雑さにもより、このような水理学的特性に関する研究は、ほとんど進められていないのが現状である。著者らは、この底泥の巻き上げについての基礎的研究を行っており、特に、限界掃流力についての実験的検討を進めて来た。本研究は、汚泥の含水比を変えた場合の、含水比と汚泥自体の強度-即ちビンガム体としての降伏値-との関係、及び含水比と限界掃流力との関係を実験的に求め、若干の考察を加えたものである。

2. 実験装置及び実験方法

底泥の形成方法としては、予め含水比を調整した汚泥を水路に敷く方法を用いた。この方法は、汚泥の力学的特性と巻き上げとの関係を求める場合や、限界掃流力を求める場合に有効である。実験に用いた水路は、可変勾配循環水路で、長さ13m、幅0.87m、汚泥を敷く区間7mのものである。その他水路の詳細は、本研究[Ⅳ]で述べる。掃流力 τ_w は、 $\tau_w = \rho g R I$ (ρ : 流体密度, g : 重力加速度, R : 径深-壁面も底泥表面も同じ滑面として算出した, I : 水面勾配)として求めた。また、流量もしくは循環水量を変えることにより、掃流力 τ_w の増減を行った。水面勾配 I の測定には、チャートゲージを用いた。限界掃流力 τ_w は、浮遊物濃度の単位時間当りの増加速度が急増する時の掃流力を採用した。実験に用いた試料は、福岡市箱崎浜高速度路工事現場(A, B, C)及び同市中洲地下鉄工事現場(D)から採取した粘性土である。粒度分布はJIS A1204に従った。その結果を図1に示す。各試料の比重は、A; 2.73, B; 2.73, C; 2.66, D; 2.75, 強熱減量比は、A; 5.1%, B; 8.2%, C; 5.4%, D; 4.1%, 塑性指数は、A; 11%, B; 41%, C; 56%, D; 42%, であった。実験時のレイノルズ数は、 1.5×10^5 で、完全乱流下で実験を行った。試料の降伏値 τ_0 は、コーンプレート型回転粘度計(コーン径8mm中、頂角172.8°, 平均径0.7mm中のガラス球を、すべり止めに張りつけたもの)を用いて測定した。図2にその概略図を示す。速度勾配 $\dot{\gamma} = \Omega / \theta$ (Ω (rad/sec)はコーンの角速度, θ (rad)は、コーンとプレートとのなす角)と、せん断力 τ (予め、キャリブレーションにより、プレートの回転角 ϕ (rad)との関係式を求めている。)を測定し、両者の関係を表わす塑性流動曲線を求めた。

3. 実験結果と考察

図3に一例として、コーンプレート型回転粘度計で求めた、汚泥Cの塑性流動曲線を示す。この図から、本研究で用いた汚泥は、ほぼビンガム体とみなせる

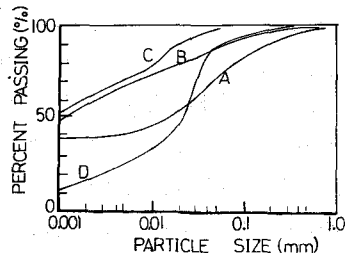


図-1 粒度分布

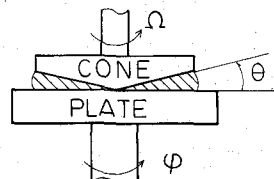


図-2 CONE AND PLATE VISCOMETER

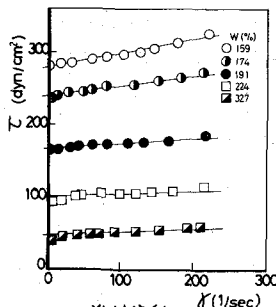


図-3 塑性流動曲線

ことがわかる。降伏値 T_y は、図中の直線部分を延長し、縦軸： $\gamma = 0$ との交点として求めた。図4に、降伏値 T_y と含水比 w の関係を示す。3つの汚泥とも、片対数紙上でほぼ直線にのることがわかる。また、粒度分布幅が狭く、平均径が小さい汚泥ほど、(Cの方)含水比の増加による降伏値の減少が小さく、同じ含水比では降伏値は大きくなることわかる。これは、塑性指数がCの方が大きくなっていることから、粘着力が大きくなっている為と考えられる。次に図5に、汚泥Cにおける、掃流力 T_w と、単位時間(分)、単位面積 cm^2 当りの汚泥の巻き上がり速度 E ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$)との関係を、含水比をパラメーターにして示す。この図から、粘性土についても、砂粒と同じ様な限界掃流力が存在すること、また、含水比の違いによる、巻き上げ速度の違いがあることが明らかである。

ここで図5の横軸を限界掃流力 T_{wc} で無次元化して、図6に示す。各点はほぼ同一曲線上になるが、すなわち、巻き上げ速度 E から見た巻き上げのパターンは、含水比の違いによらず、ほぼ同じと考えられる。

次に図7に、汚泥Cの含水比 w と限界掃流力 T_{wc} の関係を示す。限界掃流力は、ほぼ $1(\text{dyn}/\text{cm}^2) \sim 5(\text{dyn}/\text{cm}^2)$ である。またこの限界掃流力の範囲では、含水比の増加に伴って、限界掃流力が減少することが明らかである。ここで、砂粒限界掃流力理論との比較を試みる。

岩垣の式²⁾、限界摩擦速度 $U_{*c} = [T_{wc} / \rho]^{1/2} = [0.14(G_p - 1)gd]^{1/2}$ に汚泥Cの $G_p = 2.66$ 、 $d_{50} = 0.0001 \text{ cm}$ (図1より)を適用すると、 $U_{*c} = 0.15 (\text{cm}/\text{sec})$ となる。汚泥Cの最小限界掃流力 $T_{wc \min} = 1.0 (\text{dyn}/\text{cm}^2)$ より、 $U_{*c} = 1.0 (\text{cm}/\text{sec})$ となり、理論値をかなり上まわり、一致しない。従って、汚泥の凝集性が無視できないと考えられる。

また、凝集性土の限界掃流力については、その土の塑性指数の関数とする式 (例えば $T_{wc} = K_1 I_p^{K_2}$; I_p : 塑性指数, K_1, K_2 : 定数) が提案されているが、図7において明らかのように、汚泥の含水比の違い、すなわち降伏値の違いにより、限界掃流力は異なる。故に、限界掃流力を塑性指数のみの関数で表わすのは、無理であると考えられる。

そこで、図8に、それぞれの含水比における、汚泥A, B, Cの降伏値 T_y と限界掃流力 T_{wc} との関係を示す。この図から、3つの汚泥 降伏値 T_y が、 $1500 (\text{dyn}/\text{cm}^2)$ 以下においては、それらの $T_{wc} \sim T_y$ が、片対数紙上でほぼ同じ勾配の直線にのることがわかる。このことから、粒度分布、平均径等の異なる粘性土の限界掃流力を、それぞれの粘性土の降伏値で表わしうる可能性があるといえる。

以上、含水比 $100\% \sim 300\%$ の範囲内では、粘性土のビンカム体としての降伏値 T_y と、限界掃流力 T_{wc} とが、実験的に密接な関係があることが、推定できた。今後は、含水比、粘性土の種類、掃流力等を変えて実験的検討を加え、この考察が適切であるか確かめつつもっている。

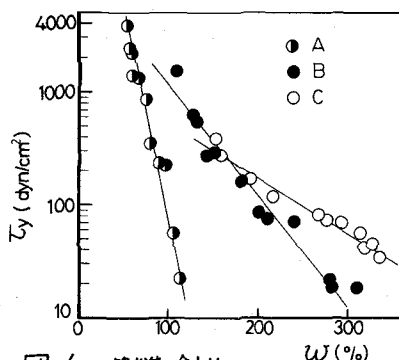


図-4 降伏値-含水比

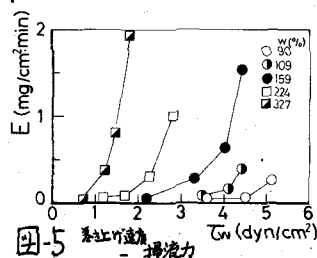


図-5 巻き上げ速度 - 掃流力

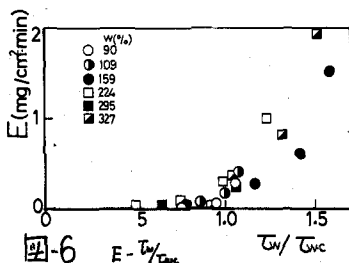


図-6 $E - T_w/T_{wc}$

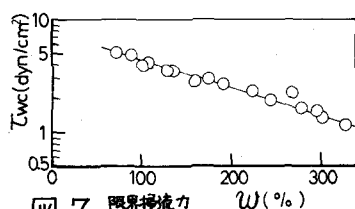


図-7 限界掃流力 - 含水比

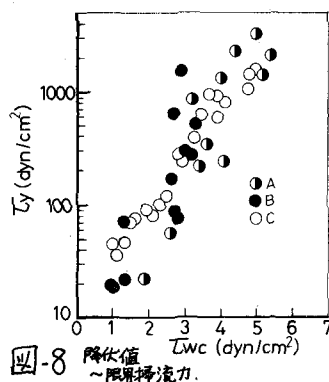


図-8 降伏値 ~ 限界掃流力

参考文献: 1) 栗林 清田, 海田: 底泥の巻き上げに関する基礎的研究 土木学会論文 221-226 2) 水理公式集 p200-p201 土木学会編 3) Erosion of Cohesive Sediments J. of H.D. July 1967 p1071-p1089