

粘性土の洗掘

東北大学 正会員 首藤伸夫
東北大学 学生員 阿部正則
東北大学 学生員 金子範彦

1. はじめに

底泥などの粘性土は砂粒などの非凝集性の土とは異なり顕著な凝集性を有する。さらに、その物性は水温、PH、イオンの存在などの物理化学的要因によって微妙かつ複雑に変化する。このため粘性土の洗掘に関する実験にも様々なアプローチの方法がある。我々は自然環境における洗掘を対象として、実験の際の粘性土を自然沈降によって形成している。本論では洗掘、再浮上に関する基礎資料を得るとともに洗掘速度の表現方法を考察した。

2. 実験

実験に用いた水路は長さ6.0m、巾0.1m、高さ0.5mの両側面ガラス張りの長方形断面水路で、下流端に鉛直方向に回転軸を有する回転ゲートを設置した。水路上流端の流入調整バルブ、下流端の回転ゲートにより掃流力を変化させることができる。

試料粘土を希釈攪拌した後水路に投入し、18~20時間静置して沈殿層を形成し、水路に通水し洗掘実験を行う。同時に、回転ゲートより0.7m、3.7mの地点にサイフォン式採水器を設置し上流側、下流側の濃度鉛直分布を得る。掃流力の算定には足立による側壁効果を考慮した掃流力の算定方法を用いた。水路の粗度係数は $n \approx 0.013$ である。また、コンプレート型粘度計によって沈殿層表面の降伏応力を測定した。実験条件を表-1に示す。

3. 結果

(1)式によって算定した洗掘速度を図-1, 2に示す。

$$Q_s = \frac{1}{L} \left[\int_0^H C_2 u_2 dR - \int_0^H C_1 u_1 dR \right] \quad (1)$$

ここで、 Q_s : 洗掘速度、 L : 区間長 ($L=3.0m$)、 u : 流速、 C : 浮遊物濃度、 H : 水深、添字1, 2は上流、下流を表わす。 $t < 5$ 分では $\log Q_s$ は時間に対し直線的かつ急激に減少し、 $t > 5$ 分ではその時間変化はゆるやかになっており、それぞれに対して $Q_s = a \exp(bt)$ と近

表-1 実験条件

Run No	1	2	3	4
掃流力($dyne/cm^2$)	3.16	3.85	2.20	3.80
初期含水比(%)	1013	1021	1358	1558
沈殿時間(分)	20	20	20	20
水温($^{\circ}C$)	10.0	12.2	12.3	17.2
P H	4.25	4.25	6.20	6.30

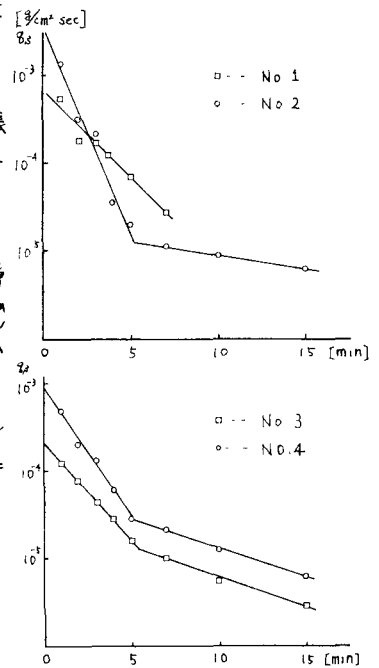


図-1, 2 洗掘速度の時間変化

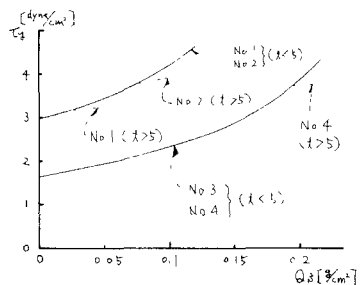


図-3 剪断強度の分布

似できる(表-2)。

ここで、既報において提案した(2)式中の g_c を挾掃条件

$$g_{gs} = g_c \left(\frac{\tau}{\tau_g} - 1 \right)^m \quad \begin{array}{l} \tau: \text{掃流力}, \tau_g: \text{土のもつ強度} \\ m: \text{定数} \end{array} \quad (2)$$

挟掃条件によって定まる定数と考えると未知数 m , τ_g , g_c は(3)~(5)によって求められる。

$$\frac{1}{m} \ln \frac{B_2}{B_1} = \ln \frac{1-B_2^{\frac{1}{m}}}{1-B_1^{\frac{1}{m}}} - \ln \frac{1-(\frac{A_1}{B_1})^{\frac{1}{m}}}{1-(\frac{A_2}{B_2})^{\frac{1}{m}}} \quad (3)$$

$$\tau_{gj} = \frac{\tau_A \cdot \tau_B \{ (A_1^{\frac{1}{m}} - A_2^{\frac{1}{m}}) \alpha_1 - (B_1^{\frac{1}{m}} - B_2^{\frac{1}{m}}) \alpha_j \}}{\tau_B (A_1^{\frac{1}{m}} - A_2^{\frac{1}{m}}) \alpha_1 - \tau_A (B_1^{\frac{1}{m}} - B_2^{\frac{1}{m}}) \alpha_j}, \quad (j=1,2,3) \quad (4)$$

$$g_{cA} = \frac{g_{sA_j}}{\left\{ \frac{\tau_A}{\tau_{gj}} - 1 \right\}^m}, \quad g_{cB} = \frac{g_{sB_j}}{\left\{ \frac{\tau_B}{\tau_{gj}} - 1 \right\}^m} \quad (5)$$

ここで、 $A_i = g_{sA_j} + i / g_{sA_j}$, $B_i = g_{sB_j} + i / g_{sB_j}$ ($i=1,2$), $\alpha_j = g_{sA_j} / g_{sB_j}$ で j は Q_{sj} ($Q_s = \int g_s dt$) に対する値を示す。Run No. 1-2, 3-4について求めた m は1.0であり g_c も一定値となっている(表-2)。 Q_s に対する τ_g の変化を図-3に示す。また、 g_s の急変点に対する $(\tau/\tau_g - 1)$ の値は1%前後になっている。コーンプレート型粘度計による τ_g は $0.8 \sim 0.9 \text{ dyne/cm}^2$ となっている。

4. 考 察

自然沈降させた場合の粘性土の含水比分布は深さ方向に減少するが、それに従って土の強度の分布は深さ方向に増加すると考えられる(図-4)。この同一の剪断強度分布の粘性土に対して異なる掃流力が作用した場合各々 $\tau \leq \tau_g$ なる深さまで洗掘が進行し、その後 g_s は急速に0に漸近するものと考えられる。しかし、図-1, 2に示す様に $\tau < 5$ までの g_s と $\tau > 5$ 分の g_s の時間変化を見ると、掃流力が剪断強度に接近するはずの $\tau > 5$ において g_s の減少がゆるやかとはっており、これに対する τ_g の分布もより大きな掃流力に対して得られた τ_g の分布と見かけ上ずれて来る。換言すれば $\tau < \tau_g$ であるべき所でも洗掘は進行するということである。均一な試料の τ に対する g_s の変化を図-5に示す。均一な強度を有する粘性土に対しても上述と同様の考えをするならば、図-5中の g_s の τ に対する変化の急変点は $\tau = \tau_g$ となっていると考えられる。ここで扱っている剪断強度 τ_g は機械的な強度とは異なる。

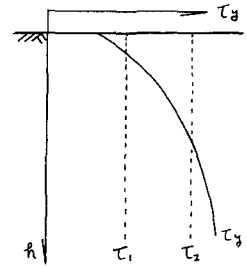


図-4 堆積層内の剪断強度分布

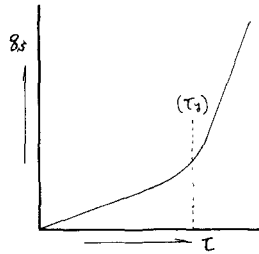


図-5 g_s と掃流力

なぜなら、粘性土の洗掘は粘土粒子(あるいは粒子の塊)が堆積層から離れると考えるのが自然であり、粘土粒子のインターロッキング、摩擦の効果を含む機械的な強度とは異なると考えられる。さて、一般に粘性土は直接水に触れることにより膨潤し、その含水比の増加により剪断強度は低下すると考えられる。膨潤の場合は $\tau = \alpha \sqrt{e}$ で表わされる。この膨潤による τ_g の減少と洗掘による堆積物表面の τ_g の増加が釣り合いを成立して g_s を生じて見よう。堆積物表面の Q_{gs} の層の含水比を e_0 、洗掘が生じ始める斜仕を e_g とする。洗掘が生ずるためには堆積物表面で e_0 が $\alpha \sqrt{e_g} = e_0 - e_g$ だけ減少しなければならぬ。このための所要時間 t は $\tau = \alpha \sqrt{e}$ より $\frac{de}{dt} = -\frac{2}{\alpha} (e - e_0)$ であるから $dt = 2(e - e_0) / \alpha (e - e_0)$ である。ここで e_0 は水の密度である。よって $g_s = \frac{Q_{gs}}{t}$ であるから $g_s \propto \alpha (e - e_0) / 2 (e - e_0)$ となる。すなわち、掃流力の増加に対して g_s は増加し、 τ_g の増加に対して g_s は減少するようになる。

5. まとめ 以上を要約すると、1. 粘性土の洗掘は τ/τ_g のみならず $\tau \leq \tau_g$ においても生ずると考えられる。2. $\tau > \tau_g$ に対して g_s は(2)式である程度評価できる。3. $\tau \leq \tau_g$ に対して g_s は含水比等の関数として表現される可能性がある。本論文において(2)式中の g_c を掃流条件を含めて扱っているが不明な点が多く今後の検討課題として残されている。また、(2)式によって求めた τ_g と粘土計による機械的な τ_g の関連についても解明しなければならない。