

高含水比底泥の巻き上げについて

関西大学工学部 正員 山田 一三
 関西大学工学部 正員 西形 達明
 前田建設工業株式会社 正員 嘉満 一裕

1.はじめに 一般に、都市河川・貯水池等には、比較的高含水比の底泥が堆積しており、種々の水質環境問題を引き起こしている。このような高含水比底泥の巻き上げ現象は、密度流の混合現象と非常に類似しているものと考えられる。本研究は、このような観点から、底泥の巻き上げ現象を密度流的な現象としてとらえ、底泥の巻き上げ現象について実験的・理論的考察を行ったものである。

2.実験 底質として、平均粒径 8.8μ 、比重 2.47 のPearl-Clayと呼ばれる人工粘土を用い、種々の含水比、粘性を有する実験試料を作成した。実験には、長さ $4.7m$ 、幅 $0.2m$ 、高さ $0.3m$ のアクリル製水平水路を用い、この水路に実験試料を敷きつめ流送実験を行い、試料の限界掃流力、試料の侵食速度を測定した。なお、試料の粘度、せん断降伏値は、二重円筒式回転粘度計により測定した。

3.実験結果および考察 限界掃流力の測定の結果、従来指摘されているように、二つの限界掃流力すなわち流送限界（底泥表面の一部が移動し始める限界）と破壊限界（底泥表面が破壊され底泥厚が維持できなくなる限界）が存在し、高含水比の底泥においては、破壊限界時に底泥表面に波動が発生することが観察された。図1に侵食速度と流水の平均流速との比によって表わされる連行係数(E)と層平均Richardson数(Ri)との関係を示す。なお図中の直線は従来の密度流の研究において得られているべき集則 $E \propto Ri^{-1/2}$

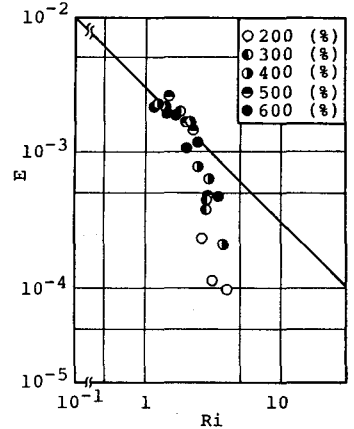


図-1

である。 Ri の増加とともに

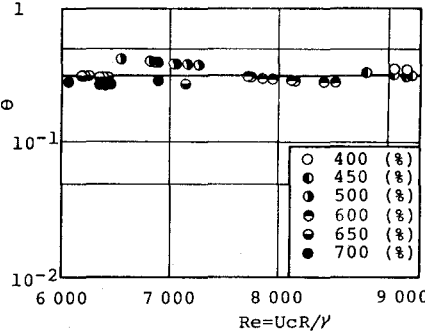


図-2

い E の減少が急激になる傾向が見られるが、底泥が高含水比で侵食が激しく生じるような Ri の小さい領域では、べき集則 $E \propto Ri^{-1/2}$ に一致してくるようになる。これらのことから高含水比底泥の巻き上げ現象が密度流のものと類似していることが推察される。

そこで、高含水比底泥の破壊限界について、密度流の内部波の安定指標であるKenelgan

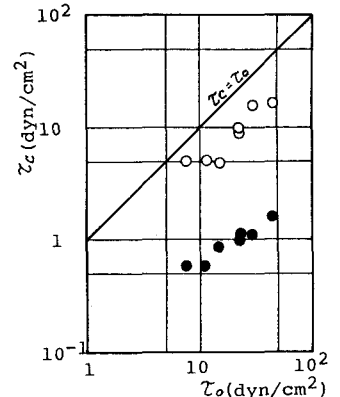


図-3

数 $\theta = (\rho_s \cdot \varepsilon \cdot g)^{1/3} / U_0$ を用いて整理した。 $(\rho_s$:底泥の動粘度, ε :相対密度差, U_0 :破壊限界流速, g :重力加速度) 其の結果、図2のように密度流の場合と同様に、Reynolds数($Re = U_0 \cdot R / \nu$, ν :水の動粘性係数, R :径深)の増加に無関係にほぼ一定値をとる傾向が見られる。このことから、高含水比底泥の破壊限界は、Keulegan数によってある程度規定できるものと考えられる。

次に、破壊限界掃流力と底泥のせん断降伏値との関係について検討しよう。図3は底泥の破壊限界掃流力(Z_0)とせん断降伏値(τ_0)の関係を示したものであるが、摩擦抵抗に基づく破壊限界掃流力(オアロット)は、せん断降伏値に比べはるかに小さいオーダーの値を示している。これは、底泥面近傍に生じるその他の抵抗性が考慮されていないことから、破壊限界掃流力が過小評価されたものと思われる。そこで、密度流分野における界面抵抗則すなわち底泥表面に生じる内部波による造波抵抗($\tau_{iw} = 8\pi^2 \frac{1}{Re^2} \frac{1}{\lambda^2} (a)^2$, τ_{iw} :抵抗係数, a :波高, λ :波長, $\alpha = 1/10$)および混合による抵抗($\tau_{im} = 2E$, τ_{im} :抵抗係数)を考慮した結果、

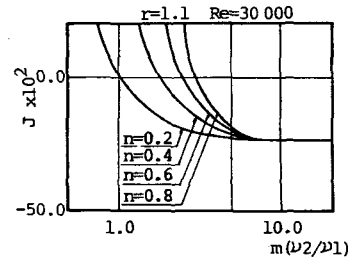


図-4

図3より明らかなように、底泥の限界掃流力(オアロット)とせん断降伏値の間には大きな差はなくなり、両者はほぼ等しい値を示しており、底泥の破壊限界をせん断降伏値によって表示することの妥当性が示されたものと考えられる。

4. 底泥表面の安定限界。破壊限界時に底泥表面に発生する波動の安定・不安定という観点から、二層流における内部波安定問題によって底泥表面の安定性について検討を加える。簡単のため、流速分布として放物線分布形($U = ay + by^2$, a, b :定数)を考えると、底泥表面に生じる波動の安定条件は次式で与えられる。

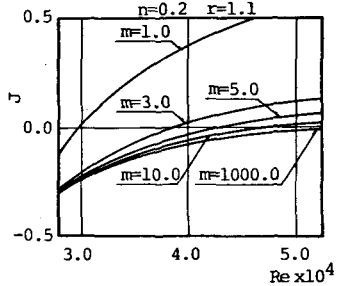


図-5

$$J = \frac{1}{H_0} \{ I_1 - I_2 + 2H_1(3 + \frac{b}{C_0}) + \frac{2b}{C_0} H_2 + 2mH_3(1 + \frac{b}{C_0}) \} \leq 0 \quad (1)$$

ここで、 $I_1 = \frac{1}{30} (aB_2 - bB_1)(10 + \frac{b}{C_0})$, $I_2 = \frac{1}{6} (B_2C_0 + b)(6 + \frac{b}{C_0})$, $H_1 = -\frac{1}{6} (aB_2 - bB_1 - 2(C_0B_2 + b) + C_0(B_1 + 2B_2) + F^2(1 + B_1 + B_2))$, $H_2 = \frac{H_1^2}{m} - \frac{H_1^2}{3mC_0} \{ C_0(rB_2 - B_1) - aC_0 - F^2 \}$, $H_3 = \frac{2a}{m} H_1 - \frac{H_1^2}{3mC_0} \{ C_0^2(rB_2 - B_1) - aC_0 - F^2 \} + \frac{1}{4m} rB_2C_0H_1^2$, $H_4 = \frac{2b}{C_0^2} \{ C_0^2(1 + B_1 + B_2) - C_0(C_0 + a + b) \}$, $B_1 = \frac{2}{3}h - \frac{a}{C_0}$, $B_2 = \frac{m}{h} - \frac{b}{C_0}$, $B_3 = \frac{2}{3}h$, $B_4 = \frac{1}{h^2}$
 C_0 :表面流速と波速の相対速度差, C_{20} :内部波の波速, m :淡水と底泥の動粘度の比(ν_2/ν_1), n :水深と底泥厚の比(d_2/d_1), r :淡水と底泥の密度比(ρ_2/ρ_1), $F^2 = -(p_2 - p_1)g \cdot d_1 / \rho_1 U_0^2$, U_0 :表面流速, たゞし、赤字1は淡水、赤字2は底泥を表すものである。図4は、底泥の破壊限界付近の安定度パラメータ(J)と動粘度の比(m)との関係を示したものであるが、すべての n に対して、 m の増加にともない安定度が増加する傾向が見られる。また、図5は、 J と淡水(上層)のReynolds数($Re = U_0 d_1 / \nu_1$)との関係を示したものであるが、 Re の増加にともない、底泥表面は安定から不安定に遷移する傾向が見られ、 m の増加にともない底泥の破壊限界時の Re は増加している。このことから、底泥の侵食現象は淡水の流況の影響を大きく受け、底泥の粘性は侵食を抑制する方向に働くことがわかる。

5. おわりに。以上述べたように、高含水比底泥の破壊限界時の巻き上げ現象は、密度流の連行混合現象とかなり類似しており、密度流的な取り扱いによってかなり有効に表現できるものと考えられる。また、内部波安定問題による取り扱いについては、流速分布形等の問題があるため、今後、さらに検討を進める必要がある。