

1 まえかき 都市河川の水質に底泥が重要な影響をおよぼすことが指摘され、底泥に関する種々の研究が行なわれるようになってきた。ここでは限界掃流力をこえた流水状態における底泥の浮上量について、とくに含水比の影響を中心に若干の考察を行なう。

2 底泥の浮上に関する実験結果 長さ 10m、幅 0.3m の開水路（勾配 1/600）の路床部に長さ 90cm、幅 15cm、深さ 2cm の凹部を設けて泥を敷いた後、水を流し底泥の浮上実験を行った。使用した泥は吉野川河口より採取した、比重 2.69、平均粒径 17.5μ の粘着性をもったものである。

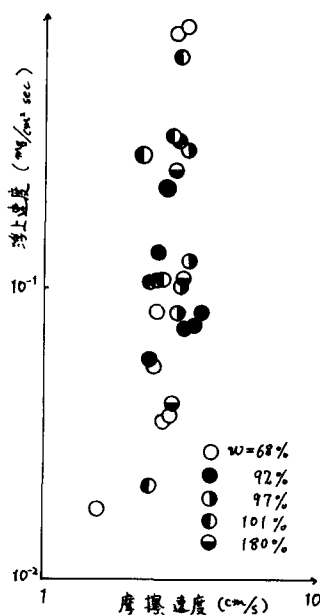


図-1 摩擦速度と浮上量との関係

らないが、含水比の増加が必ずしも浮上量の増加につながっているとはいえないようである。そこで含水比をも考慮した底泥の浮上に関するモデルを考え、含水比のおよぼす影響について検討を試みる。

3. 更新理論を用いた底泥の浮上モデル Einstein¹⁾ は周期的な粘性底層の形成・破壊モデルを考えた。すなわち、ある瞬間乱れは壁面までやってくるが shear より

減速され、粘性が支配的な層が成長するが、ついには不安定になり主流部と混合されるという過程がくり返されるものと考えた。そして粘性底層に対して次式を考えた。 $\frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ (1) ここで u は水平方向流速、 y は壁面を原点に鉛直上向きを正とする。 ν は水の動粘性係数、 t は時間である。 $t=0$ において乱れが壁面までやってくると考え、(2) に示す条件で (1) と解くと、式(3)~(4)のような結果を得る。

$$\left. \begin{aligned} t=0, y=0 & \quad u=U_0 \\ t>0, y=0 & \quad u=0 \\ t>0, y=\infty & \quad u=U_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$u = U_0 \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{\nu t}} \right) \quad (3)$$

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \rho U_0 \sqrt{\frac{\nu}{t}} \exp \left(-\frac{y^2}{4\nu t} \right) \quad (4)$$

$$\tau_0 = [\tau]_{y=0} = \rho U_0 \sqrt{\frac{\nu}{t}} \quad (5)$$

以上のモデルを基礎に、粘性底層の成長期に於いて底泥が掃流され、破壊混合時にそれが主流部へ運ばれるという更新理論による底泥浮上モデルを検討してみる。すなわち底泥の浮上は泥による泥の流動化と流れによる混合の二段階によりおこると考える。

いま粘性底層の一周期の挙動の間に流動化・混合される泥層の厚さを l とし、そこにおける泥の密度および体積をそれぞれ ρ_s, V_s 、水に関するものを ρ_w, V_w とする。(図-2 に示す) 含水比 w は次式で表わされる。

$$w = \frac{\rho_w V_w}{\rho_s V_s} \quad (6)$$

泥面面積を a とするとつぎの関係がなりたつ。

$$al = V_s + V_w \quad (7)$$

式(6),(7)より次式を得る。

$$V_s = \frac{al}{1 + w \frac{\rho_w}{\rho_s}} \quad (8)$$

したがって一度の混合により浮上する泥の総重量は単位面積あたりつぎのようになる。

$$\frac{\rho_s V_s g}{a} = \frac{\rho_s l g}{1 + w \frac{\rho_w}{\rho_s}} \quad (9)$$

3. 重力加速度

粘性底層の破壊周期を T_s とすると、単位時間、単位面積あたりの浮上量は次式となる。

$$\phi = \frac{\beta_2 \beta_3}{\tau_s (1 + w \beta_w)} \quad (40)$$

つぎに泥層の流動化について考察する。泥はBingham体としての挙動を示すと言われており次式を考える。

$$\tau = \theta + \eta \dot{\gamma} \quad (41)$$

ただし θ はBingham降伏値、 η は塑性粘度、 $\dot{\gamma}$ はひずみ速度である。

式(41)の θ, η は泥層の含水比により大きく変化する。一般に底面せん断応力として観測されるのは式(4)を平均した次式である。

$$\bar{\tau}_0 = \frac{1}{l_s} \int_0^{l_s} \tau_0 \, dz = 2\beta_0 u_0 \sqrt{\frac{V}{\pi \tau_s}} \quad (42)$$

したがって平均値による議論を行っている場合には、 $\theta > 2\beta_0 u_0 \sqrt{\frac{V}{\pi \tau_s}}$ の場合には泥のまきあげはおこなないことになる。しかし式(4)によれば、 τ_0 がとんなに小さくても $\tau > \theta$ となる時間があることがわかる。これは従来より報告されている底泥の限界掃流力がその降伏応力より小さくなるという実験結果にも矛盾するものではない。

$\tau > \theta$ の場合については泥層はNewton流体のように扱えるものとする。泥層をNewton流体と考えたときの動粘度を ν' とする。Newton流体における境界層の長さスケールは動粘度と時間の積の平方根に比例することから、流動化される泥層厚さ l をつぎのように仮定する。

$$l \sim \sqrt{\nu' t} \quad (43)$$

泥の粒度は含水比によって変化し、 a^{-w} (a :定数)に比例するという実験結果がある。また泥層のみかけの密度は $\frac{\beta_2 V_s + \beta_w V_w}{V_s + V_w}$ である。したがって ν' を以下のように表わす。

$$\nu' \sim \frac{a^{-w}}{\left(\frac{\beta_2 V_s + \beta_w V_w}{V_s + V_w} \right)} = \frac{(1 + \frac{\beta_2}{\beta_w} w)}{\beta_2 (1 + w)} a^{-w} \quad (44)$$

式(43)の右は $\tau > \theta$ の条件を満たしている時間 t^* に等しいものと考えると式(44)より次式を得る。

$$t^* = \frac{\nu' R^2 u_0^2}{\pi \theta^2} \quad (45)$$

式(42)(44)より t^* を τ_0 で表わすことをつぎのようにする。

$$t^* = \frac{\bar{\tau}_0^2}{4 \theta^2} \tau_s \quad (46)$$

式(46)の t^* を式(43)の右に代入し、さらに式(44)の ν' も代入してつぎの結果を得る。

$$l \sim \frac{\bar{\tau}_0}{2 \theta} \sqrt{\frac{\tau_s (1 + \frac{\beta_2}{\beta_w} w)}{\beta_2 (1 + w)}} a_1^{-w} \quad (47)$$

ただし $a_1 = \sqrt{a}$ である。

目視でまきあげが観測されるためには $\frac{l}{\beta_2} \geq \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)_c$ を満たすことが必要であり、 $\frac{l}{\beta_2} = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)_c$ であるときの τ_0 が限

界掃流力 $\bar{\tau}_{0c}$ であるとするとき、境界掃流力と降伏応力との関係は式(47)よりつぎのように考えられる。

$$\frac{\bar{\tau}_{0c}}{\theta} \sim \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)_c \sqrt{\frac{\beta_2 \tau_s (1 + w)}{(1 + \frac{\beta_2}{\beta_w} w)}} a_1^{-w} \quad (48)$$

この式は含水比の増加にともなう境界掃流力と降伏応力の比の指数的な増加を示している。含水比が100~300% ($w=1 \sim 3$) におけるベントナイトによる実験結果²⁾は図-3のようになり式(48)に予測するものではない。本図より a_1 を求めると約4.4となる。大坪⁴⁾の示した

ベントナイトに関する w - μ' の関係より a_1 を読みとると6~10程度の値になる。これより a_1 を計算すると $a_1 = \sqrt{a} = 2.4 \sim 3.2$ となりほぼよく似た値となっている。

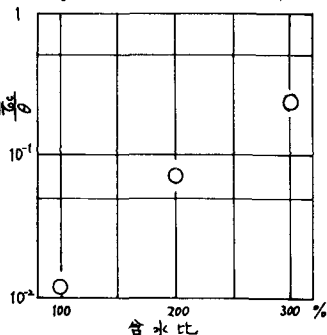


図-3 含水比 $\bar{\tau}_0/\theta$ との関係(澤井²⁾による)

同一物性の泥では降伏応力と含水比との間につぎのような実験結果がある。³⁾ $\theta \sim a_2^{-w}$ (49)

よって式(40)(47)(49)よりつぎの結果を得る。

$$\phi = \alpha \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} g f(w) \bar{\tau}_0 \quad (50) \quad \text{ただし } \alpha \text{ は係数。}$$

$f(w)$ は含水比に関する項で2次式で与えられる。

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{(1 + w \frac{\beta_2}{\beta_w})(1 + w)}} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^w \quad (51)$$

$\beta_2 = 2.69$, $\beta_w = 100$ としたときの $\frac{a_2}{a_1}$ をパラメータとした w と $f(w)$ の関係は図-4のようになる。本図は含水比と浮上量との

図-4 w と $f(w)$ の計算結果($\beta_2 = 2.69$, $\beta_w = 100$)
図にはいつも単調傾向があるのではなく、条件により極値が存在することもあることを示唆するものである。

4. あ と が き こ こ へ は 含 水 比 と 浮 上 量 と の 必 ず し も 一 意 的 な 相 関 関 係 に あ る と は 言 い が た い こ と を 指 摘 し た。し か し 図-1 の 傾 向 を 十 分 に 説 明 し え た け れ ば な く、今 後、実 験 精 度、モ デ ル の 兩 面 か ら の 検 討 が 必 要 で あ る。

1) Einstein, Le Trans of ASCE, vol. 123, 1948.

2) 澤井健二: 京大学位論文, 1977.

3) 澤井健二: 第15回河川工学研究計論会論文集, 1979.

4) 大坪村国: 第25回水理環境学論文集, 1981.