

大阪工大 正員 木原 敏

はじめに： 通過時の砂層は逆洗水降効果によつて、砂粒径が上層より下層へほぼ均一成層化されていることになつてゐるが、実際にはチャンネルリング等の砂層の混合作用が働いて、完全には成層化されない。したがつて、各層はある一定の粒度分布をもつて形成されることになるが、このように成層化と混合とをもつた砂層によつて、通過層は形成される。砂通過層での通過による浮遊物質の抑止現象を論議する上では、この砂層中の間隙の状況を把握、その間隙中の流れを知らなければならぬ。

1. 均一な砂粒径による層の相当有効間隙径

ϕ_i の直径の砂粒によつて構成されている砂層の間隙を(1)式のように定義し、相当有効間隙径 d_{*i} とする。

$$d_{*i} = \{V_a \cdot \lambda_{io} / n_i\}^{1/3} = \left\{ \frac{\pi}{6} \cdot k \cdot \lambda_{io} / (1 - \lambda_{io}) \right\}^{1/3} \cdot \phi_i \quad \dots\dots (1) \quad n_i = (1 - \lambda_{io}) V_a / \frac{\pi}{6} k \phi_i^3 \quad \dots\dots (1')$$

V_a : 微小単位体積 (cm^3), λ_{io} : ϕ_i の直径の砂層間隙率, n_i : ϕ_i 直径の砂層中の単位体積 V_a 中の砂粒子数, k : 体積形状係数 (理論的に表面積形状係数 k' と等しい.)

Fair の定義によつて、間隙径 d_f は、間隙中の有効動径として、 $d_f = V_a \cdot \lambda_{io} / \Sigma a_s \quad \dots\dots (2)$

a_s : 砂単体の表面積 (cm^2) Σa_s : 微小単位体積中の砂の表面積の総和 (cm^2) $\Sigma a_s = n_i \cdot a_s \quad \dots\dots (2')$

$$d_f = (k/k') \cdot \left\{ \lambda_{io} / 6(1 - \lambda_{io}) \right\}^{1/3} \phi_i \quad \dots\dots (2'')$$

(1) と (2'') と定義が若干異なる。

2. 完全成層化された砂層間隙の垂直分布

砂粒径分布が対数正規分布を示すものとし、砂粒径分布平均径 ϕ_m , 標準偏差 σ_ϕ とすれば、 ϕ_i に対応する砂層厚さ dz は

$$dz = \frac{(1 - \lambda_o) f_{so}}{(1 - \lambda_{oi}) f_{si}} \cdot Z_o \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_o} \exp \left[-\frac{(\log \phi_i / \phi_m)^2}{2 \sigma_o^2} \right] \cdot d\phi \quad \dots\dots (3)$$

f_{so} : 砂全体の平均密度 (g/cm^3)

f_{si} : ϕ_i の砂の密度 (g/cm^3) *

* f_s は粒径の大小により、異なる。一般に ϕ が小さくなるにしたがひ、 f_s は大きくなる傾向がある。しかし、その差はわずかであるので、 $(1 - \lambda_o) f_{so} / (1 - \lambda_{oi}) f_{si} \div 1$ とすると、

$$Z = Z_o \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_o} \int_{\phi_i}^{\phi_i} \exp \left[-\frac{(\log \phi_i / \phi_m)^2}{2 \sigma_o^2} \right] d\phi \quad \dots\dots (4)$$

(4) に対応する ϕ_i の d_{*i} より、 Z と d_{*i} の関係を求め得る。この関係は数値積分演算を伴うが、Hazen 級による図式を用いて、演算と組合せれば比較的簡単に求め得る。

3. 粒径分布を有する混合状の相当有効間隙径

いわゆる実際の層の砂粒径の分布は、成層化と混合との中間である。どちらの影響がより強く現れているかについては、現在のところ、一律的にはいえないが、混合の影響の方が大きいのではないかと思う。しかし、明らかに実測値よりも、成層化の傾向がており、それらのウェイトの大きさは、通過水のわずかな洗淨の条件で異なるので、現在のところ、定量化することは難しい。実測値から $\phi_m = (Z/\alpha)^{1/n} \quad \dots\dots (5)$ α, n 常数 $\sigma_o = a \frac{Z}{\phi} + b \quad \dots\dots (6)$, a, b 常数 とみなし得る。

粒径の異なる粒子によつてつくられる間隙は、均一な場合と異なり間隙率、間隙径共に小さくなる。砂層の混合された状況での粒径分布は、逆洗水降効果による成層化の影響にも拘らず、実測値からはほぼ対数正規分布とみなし得る分布のようである。

砂層の間隙率は粒度や、その分布の状況によつて異なるが、これを定格化することは、砂の形状によつても影響を受けるので難しい。むしろ経験的に捉え直方がよい。通常の通過砂の範囲では間隙率は粒径によつて殆んど差異を生じないが、ガラス球のように球形のものに較べて角張つてゐる砂の方が差異は大きくなる。一般に

$$\log(\lambda_0 - c) = a\phi + b, \dots\dots\dots(7) \quad a, b, c \text{ 常数}$$

砂層中のある深さの \$dz\$ 中に含まれる砂のうすさ \$V_A \phi_i\$ の全粒子の重量合計 \$W_{zi}\$ は

$$W_{zi} = W_{z0} \cdot p_i \cdot d\phi = V_A (1 - \lambda_0) f_s \cdot p_i \cdot d\phi \dots\dots\dots(8)$$

$$\phi_i \text{ 粒子の } V_A \text{ 中の粒子数 } N_i \text{ は } N_i = W_{zi} / w_i = V_A (1 - \lambda_0) f_s \cdot p_i \cdot d\phi / k(\pi/6) f_s \phi_i^3 \dots\dots\dots(9)$$

$$w_i: 1 \text{ 個の粒子の重量} = f_s V_{Ai} = f_s (\frac{\pi}{6}) k \phi_i \dots\dots\dots(10) \quad V_A \text{ 内の全表面積は}$$

$$A_0 = \int_0^{\phi_1} 6 V_A (1 - \lambda_0) \frac{k'}{k} \phi_i \cdot p_i \cdot d\phi = 6 \frac{k'}{k} V_A (1 - \lambda_0) \int_0^{\phi_1} p_i \cdot \phi_i \cdot d\phi \dots\dots\dots(11)$$

混合状態の相当有効間隙率 \$\delta_m\$ は Fain の表現とするは、

$$\delta_m = V_A \cdot \lambda_0 / A_0 = \frac{1}{6} \frac{k}{k'} \frac{\lambda_0}{(1 - \lambda_0)} \Big/ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\phi} \int_0^{\phi_1} \phi_i \cdot \exp \left[- \frac{(\log(\phi_i/\phi_m))^2}{2 \sigma_\phi^2} \right] d\phi \dots\dots\dots(12)$$

\$\lambda_0, \phi_m, \sigma_\phi\$ は、(5) (6) (7) で表わされるような経験値である。同一通過地内でも深さ \$z\$ との相関性は平面上の位置が異なれば果つてくる。(3層の逆洗は実際には極めて不均一である。)

4. 間隙内の速度

通過中の抑止物質の捕捉現象をどのようにみるかについては、物理、化学的な各種のパターンがモデル化されている。通過砂表面の電気力学的吸着力であるとする説もあるが、筆者は最も影響の大きい因子としてはむしろ砂表面の掃流力と捕捉現象にあるとみている。

間隙は通過開始前の清浄3層の場合で、\$0.3 \sim 0.5 \text{ mm}\$ の毛細管の組合せであるが、この間隙径は有効間隙径 \$\delta_m, \delta_m\$ で規定されて均一ではない。この有効間隙径は毛管の平均的代表径であり、径の大小は不規則に振縮している。しかつて、単純に直管モデルを流下する流れとしてみるのではなく、不規則管内の摩擦剪断現象とみるべきであらう。また間隙内には砂の持つ不規則な凹凸があり、これの組合せによつてできた小室があつて、この周辺を接近して流れる際に生じる剥離により、小室に閉じ込められる捕捉がある。これらをミクロ的に表現することは困難であるが、対数正規分布の容量の小室群としてのモデルと考へてみる。

間隙径の \$dz\$ における \$V_A\$ 内の分布を \$\delta_m, \sigma_\phi\$ (\$\sigma_\phi\$ は \$V_A\$ 内の \$\delta_m\$ の標準偏差) とすると、



間隙内の摩擦剪断速度 \$U_{0i}\$ は

$$U_{0i} = (g k' d_i dh/dl)^{1/2} \dots\dots\dots(13)$$

$$\therefore 1: p(\phi_i) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\phi} \exp \left[- \frac{(U_{0i} \phi_i / \phi_m)^2}{2 \sigma_\phi^2} \right] \dots\dots\dots(13')$$

間隙内の小室、小表面を掃流剪断によつて移動する限界速度は \$U_{0c}\$ であり、この値の周辺より小さい部分で抑止が起る。それ以上の速度では掃流され、下流へ運搬される。

剥離によつて生じる小室の死水部もまた統計的に検証すると考へられる。死水部の占める間隙への割合が大きければ、抑止効果は大きくなるであらう。間隙に生じる死水部の大きさは間隙の通過流速によつて変るであらうが、差異ではない。死水部の大小はむしろ砂の異形性に支配されるであらう。

以上の抑止現象は、間隙が、抑止物質によつて閉塞を告げている状態でのモデルである。閉塞によつて間隙が変化してゆく中で、通過層中の抑止物質の剥離流が生じ、層の深部への移動が起る。これらの現象については今後の課題となる。閉塞による水圧の非定常変化は、ミクロ的には、掃流の断続運動であり、連続的な取扱いには無理があるように思う。本研究は工大中研の助成金によつてこゝをここに記す。