Ⅲ-3　段落部に於ける流れの特性と浮遊砂のまき込みについて

九州大学　工学部　正員　椿 東一郎
〃　　〃　　〃　平野宗夫
〃　　〃　学生員○石田 眞

Ⅰ、まえがき

貯水池の堆砂には掃流砂によるものと浮遊砂によるものとがあり、その機構を異にする。実際の貯水池に於いては両者が混在し、浮遊砂の堆積したBottom－Set Bed上を掃流砂が段丘の形で進行するといった形態をとるものと考えられる。我々は、これ迄浮遊砂と掃流砂が同時に貯水池内に流入する場合の貯水池の堆砂過程について実験・考察して来たが、これ迄の実験の範囲では段丘の形成に寄与する浮遊砂は、デルタ先端のWake内に沈殿したものだけであり、従ってFore－Set Bed附近の流れの様相と浮遊砂の濃度分布を知る事が必要である。このような観点から図-1に示すような装置を作ってFore－Set Bed附近に於ける水理特性（特に剥離領域の性状），Wakeの長さ(ℓ)，Wake内に沈殿する浮遊砂量(q_{sf})，及び浮遊砂の濃度分布について実験したので、以下報告する。

Ⅱ、実験装置と方法

有効長15m，幅60cmの鋼鉄製水路に図-1に示すような装置を作り上流端に取付けられたSand Feederから一定量の石炭粉(d_{50}= 0.57mm)を供給し(q_{so})、Wake内に沈殿した石炭粉(q_{sf})はサイフォンで抜いて測定した。この際供給石炭粉は浮遊状態で流れる($U_* > w_0$)ように下流端の可動堰で水位(h_0)を調節し、上流端に於いても攪拌板を用いて水と石炭粉の混合を促進した。剥離域の長さ(ℓ)は水路底に2cmの間隔で接着した長さ2cmの木綿糸のたなびき具合とWater Blueの溶液を注入して、その流向とから判定した。流速はプロペラ流速計に依り、濃度分布についてはϕ=5.0mmの円形断面をもつPipeを用いて測定(サイフォン式に)した。資料採取に当っては採取点の流速とPipe内の流速が出来るだけ一致するように努めた。尚マサツ速度U_*はPreston's Tubeによって測定したものである。

実験要目

No.	Q l/s	h_0 cm	D cm	h_0/D	U_* cm/s	φ	w_0/U_*	P
Ⅰ-1	27.5	6.6	10	0.66	3.7	18.8	0.70	0.064
2	38.1	6.6	10	0.66	4.4	22.2	0.60	0.082
3	17.9	4.1	10	0.41	3.5	20.8	0.74	0.063
4	29.9	5.9	10	0.56	3.9	21.8	0.67	0.072
Ⅱ-1	24.3	5.8	20	0.29	3.8	18.6	0.69	0.063
2	37.0	7.3	20	0.365	4.2	19.9	0.615	0.076
3	29.9	6.3	20	0.315	4.0	19.8	0.65	0.071
4	17.3	4.5	20	0.225	3.6	17.7	0.72	0.055

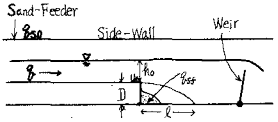
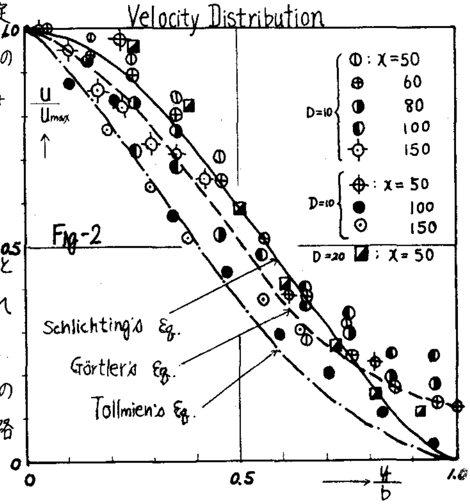


Fig-1.

Ⅲ、実験結果と考察

1．剥離領域の性状

段落部の水理特性は剥離領域の形成と噴流の拡散過程として考えられる。自由噴流の場合、噴流によって連行される流体の補給は拘束なく行なわれるが、段落部に於いては、下流側水路底の為、深さ方向の流れは拘束され、連行流体の補給は逆流によって補給されねばならず、よって噴流と水路底の間に逆流領域が形成される。



1) 流速分布；流速分布の計算方法には多くの方法があるが、いずれも自由乱れと、流速分布の相似を仮定しており図-2に示した如く実測による誤差に比べて大差ない。ここでは図-4に示す如く x-y 座標軸をとり Schlichting の式を用いる事にする。

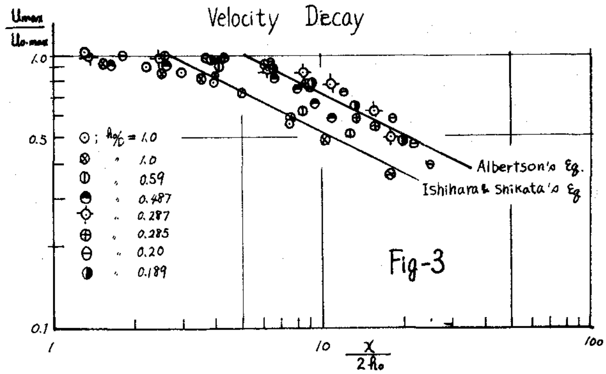


Fig-3

$$\frac{u}{U_{max}} = 1-(1-\eta^{\frac{3}{2}})^2 \qquad (1)$$

但し $\eta = \frac{b-y}{b}$

ここで b は拡散領域の幅を表わし拘束係数 σ を用いて表わすと、$b = x/\sigma$ で表わされる。

2) 流速の低減；表面流速の低減特性は、いずれも Tollmien の式

$$\frac{U_{max}}{U_{0\cdot max}} = K_0\sqrt{\frac{2h_0}{x}} \qquad (2)$$

を満足している。K_0 の値として Albertson は2次元理想噴流の場合 $K_0=2.28$、石原・志方[1]は開水路急拡部に於いて $K_0=1.64$ を与え、K_0 を定数とし、変化するのは σ であるとしているが我々の実験では $h_0/D\to$ 小につれて自由噴流に近付き（限界として $h_0/D \fallingdotseq 0.3$）、むしろ K_0 自体が変化していると考えられる。

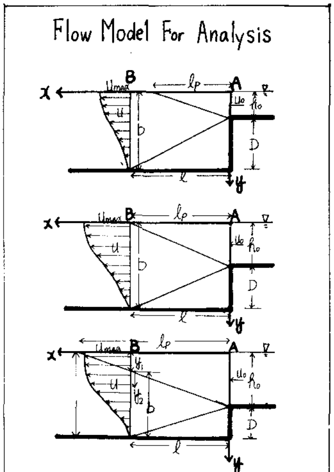


Fig-4

3) 剥離領域の長さ(l)；Wake の長さと Potential Core の長さ(l_p)との関係により段落部に於ける常流遷移流は図-4に示す3つのパターンに分けられる。

(i) $l_p > l$ のとき：

断面A, Bでの連続式より（平均値をサフィックス m で表わして）

$$U_{0\cdot m}\cdot h_0 = \alpha\cdot U_{0m}y_1 + \int_0^b u\cdot dy_2 \qquad (3)$$

又、$y_1 = D+h_0-b$, $b = x/\sigma = l/\sigma$ ゆえ(1)式を用いて変形すると

$$U_{0m}\, h_0 = \alpha\cdot U_{0m}(D+h_0-l/\sigma) + \frac{l}{\sigma}U_{max}\int_0^1[1-(1-\eta^{\frac{3}{2}})^2]d\eta \qquad (4)$$

(4)式を l/h_0 についてせいりすると

$$l/h_0 = \frac{1}{\alpha-\beta\cdot C}\left\{\alpha\frac{D}{h_0}-(1-\alpha)\right\} \qquad (5)$$

$\alpha=\beta=1$ のとき

$$l/h_0 = \frac{1}{1-C}\cdot\frac{D}{h_0} \qquad (5)'$$

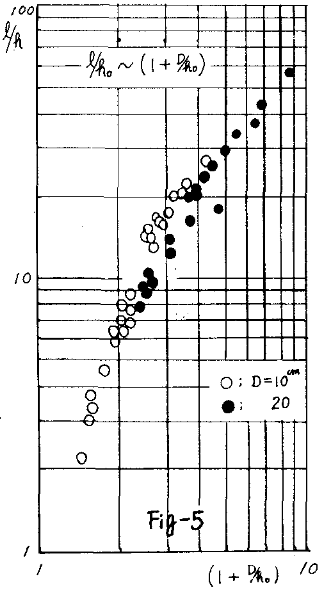


Fig-5

但し $\alpha = \frac{1}{U_{0m}\cdot y_1}\int_{h_0-y_1}^{h_0} u_0\, dy$, $\beta = U_{max}/U_{0\cdot max}$, $C = \int_0^1[1-(1-\eta^{\frac{3}{2}})^2]d\eta$ である。

(ii) $l_p < l$ のとき：

A, B断面での連続関係は、$U_{0m}h_0 = \int_0^b u\, dy$ ゆえ(1),(2)式を用いて変形し l/h_0 でせいりすると、

$$l/h_0 = 2(1+D/h_0)^2\cdot C^2\cdot\alpha^2\cdot K_0^2 \qquad (6)$$

$\alpha=1$ のとき

$$l/h_0 = 2(1+D/h_0)^2\cdot C^2\cdot K_0^2 \qquad (6)'$$

(iii) $l_p = l$ のとき；

(6)式より $l_p=l$ のときは、$1+D/h_0=\frac{1}{\alpha C}$，又 $\delta=l/D=l/(D+h_0)$ より $l/h_0=\delta(1+D/h_0)$ ゆえ、これらを用いて(6)式より

$$K_0=\sqrt{\delta/2\alpha\cdot C} \qquad (7) \qquad \alpha=1\text{のとき}\quad K_0=\sqrt{\delta/2C} \qquad (7)'$$

(5),(6)式が常流遷移の段落部に於ける剥離領域の長さを表わす式である。又Cの値としては数値積分した結果、C=0.55とする。そこで $l/h_0\sim(1+D/h_0)$ をPlotすると図-5のようになる。図-5によると D/h_0 の小さい所では2次的に変化し、D/h_0 の大き所では直線関係にあるようである。そこで $l/h_0\propto(1+D/h_0)$ とすると $K_0\propto(1+D/h_0)^{-1}$ となり、$D/h_0\to$大になるとかえって K_0 は減少する。これは前述の流速の低減の時と逆になっており、今後、更に検討していきたい。

2. 浮遊砂のまき込み

本実験に於いては、u_*/w_0≒1.3~1.7の範囲であるので、供給した石炭粉のうち、一部は掃流砂となって段落から、Wake内に沈殿するものと考えられる。従って、Wake内に堆積する石炭粉の量(q_{sf})は、Wake内に沈降してくる浮遊砂(q_{sw})と、段落から落ちてくる掃流砂(q_{Bf})から構成される。q_{Bf}は供給点から段落までの間に水路床に沈殿する量に等しいから、q_{s0}, u_*/w_0, 及び供給点から段落までの距離の函数になると思われる。然るに、供給点と段落間の距離は各実験とも共通ゆえ、$q_{Bf}=q_{s0}\cdot f_1(u_*/w_0)$ なる関係が予想される。次に q_{sw} は、Wake境界面上の濃度を C_0、その点に於ける流速の上向き成分を v とすると

$$q_{sw}=\int_0^l\left\{C_0(w_0-v)-\varepsilon_s\left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)_{z=b}\right\}dx \qquad (8)$$

で表わされる。ここに ε_s は浮遊砂の拡散係数である。

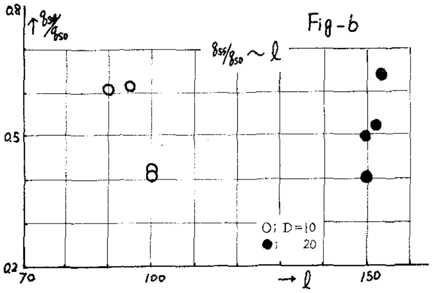


Fig-6

従って

$$q_{sf}=q_{sw}+q_{Bf}=w_0\int_0^l C_0dx-\int_0^l\left\{v+\varepsilon_s\left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)_{z=b}\right\}dx+q_{s0}f_1(u_*/w_0) \qquad (9)$$

実験結果によると、同一水理条件に於いては、供給量 q_{s0} を変化させても Wake内に沈殿する割合(浮遊砂量配分) q_{sf}/q_{s0} は殆んど変化しない。従って同一水理条件の下では、濃度は q_{s0} に比例すると考えられるから次の関係式が予想される。

$$C_0=C_{0f}\cdot f_2(x), \qquad \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)_{z=b}=C_{0f}\cdot f_3(x) \qquad (10)$$

又 $v\propto U_{max}\propto U_0$, $\varepsilon_s\propto b\cdot U_{max}\propto b\cdot U_0$ でかつ $U_0\propto u_*$ ゆえ、以上の関係式を(9)式に代入すると

$$\frac{q_{sf}}{q_{s0}}=\frac{C_{0f}\cdot w_0}{q_{s0}}\left[\int_0^l f_2(x)dx-K\frac{u_*}{w_0}\int_0^l f_4(x)\cdot dx\right]+f_1(u_*/w_0) \qquad (11)$$

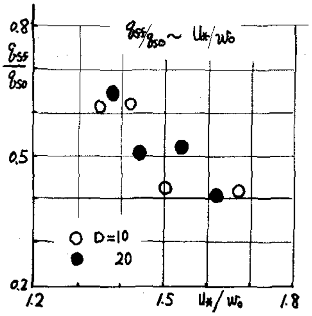


Fig-7

但しKは定数。濃度分布式としてKalinskeの式を用いると

$$C_{0f}=q_{s0}/P\cdot q \qquad \text{但し}\ P=\int_0^1\left[1+2.5\frac{u_*}{V}(1+\ln\eta)\right]e^{-\frac{15w_0}{u_*}\eta}d\eta \qquad (12)$$

であるから結局(11)式は

$$\frac{q_{sf}}{q_{s0}}=\frac{w_0}{P\cdot q}\left[\int_0^l f_2(x)dx-K\frac{u_*}{w_0}\int_0^l f_4(x)dx\right]+f_1(u_*/w_0) \qquad (13)$$

となる。Pは u_*/w_0 の函数，$\int_0^l f_2(x)dx$, $\int_0^l f_4(x)dx$ は l の関数であるから、浮遊砂量配分(q_{sf}/q_{s0})は l と u_*/w_0 の函数となる。そこで実験値を $q_{sf}/q_{s0}\sim l$, $q_{sf}/q_{s0}\sim u_*/w_0$ でPlotすると、各々図-6, 7のようになる。それによると q_{sf}/q_{s0} は u_*/w_0 が減少すると増大している。

これは u_*/w_0 が増すと q_{Bf}，従って $f_1(u_*/w_0)$ が減少する事、及び(12)式の右辺才1項が減少する事から説明される。次に q_{ss}/q_{so} と l の図については特定の関係は認められず、l の変化による q_{ss}/q_{so} の変化が非常に小さい事を示している。このことは我々の"貯水池の堆砂過程"[2]の実験に於いてみられた事とも一致している。

3、濃度分布

D=10cm の場合を例として x=0, 50, 100, 150 cm の各点での濃度分布を示すと図-8 のようになる。

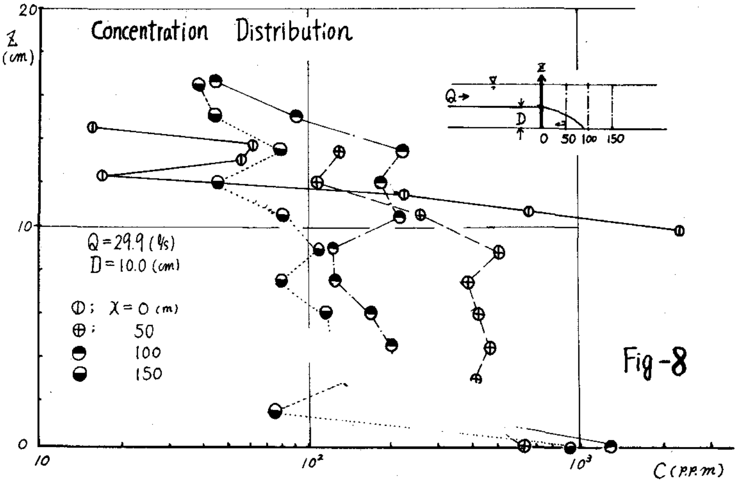


Fig-8

i) 水表面附近に於いては x=0 点の濃度より x=50, 100, 150 点の濃度の方がいずれも大きい。この事は噴出口下流の水面附近では出口附近よりも拡散が卓越している事を示し、「浮遊砂を含んだ貯水池の堆砂過程」[2] の実験に於ける実測結果でも同様の傾向が見られた。

ii) 下流に行くにつれて濃度は減少し、深さ方向に一様になる傾向 ($\partial c/\partial z \to 0$) にあり、従来の実測結果とも定性的に一致しているようである。この事は堆積が進行しつつある状態では、乱れの効果が水面附近を除いて小さい事を示している。濃度分布は浮遊砂の堆砂形状を解く場合に非常に重要な問題であり、今後更に実験を追加し、研究していきたい。

Ⅳ、あとがき

i)、段落部に於ける水理特性は、剥離領域の形成と噴流の拡散過程として考えられる、との観点から Schlichting の流速分布式と Tollmien の低減公式を用いて WaKe 長 (l) について解析を試みた。その結果 $h_0/D \to$ 小になるにつれて表面流速の低減状態は自由噴流に近づき（限界として $h_0/D \fallingdotseq 0.3$），K_0 は変化している。又(2)式の K_0 と WaKe 長を決める(6)式の K_0 とは逆の傾向にあり、更に検討を要する。

ii)、WaKe 内に堆積する全石炭粉量 (q_{ss}) は、WaKe 内に沈降してくる浮遊砂量 (q_{sw}) と、段落から落ちて来る掃流砂量 (q_{Bf}) から構成され、q_{Bf} は $q_{so} \cdot f_1(u_*/w_0)$，$q_{sw}$ は(8)式で表わされるものとすれば、浮遊砂量配分 (q_{ss}/q_{so}) は(13)式で表わされる。その結果、q_{ss}/q_{so} は l と u_*/w_0 の函数となり、我々の行った実験の範囲では l よりも u_* の方が q_{ss}/q_{so} に効いてくる事が確かめられた。

参考文献

(1) 石原・志方「開水路急拡部の水理学点性状に関する研究」土木学会論文集 才128号 (S.41.4)

(2) 平野・岩田・渡辺「掃流浮遊砂の流入による貯水池の堆砂過程」才23回年次学術講演会概要集 (Ⅱ-144)