

2 次元水平噴流による洗掘

山口大学工学部

斉藤 隆

山口大学工学部

柴田 幸信

1 まえがき

水平噴流による洗掘の状態を観察すると、洗掘の初期においては岩垣、土屋、今村氏等が理論的に取扱ったように砂は掃流状態で移動しているが、洗掘が進行していくと噴流は洗掘穴の旁に曲がり、前方の洗掘面に衝突して急に流れの方向を上に向き、ほぼ初期砂面の位置あたりから流れは剥離し、洗掘穴より搬入された砂と同時に砂堆砂面を転落した砂を巻き込んで噴きあげ、その一部が砂堆頂を越えて出ていくことによって洗掘が進められている。

水平噴流による洗掘の後期においては、洗掘穴より噴き上げられ砂堆頂を越えて出ていく砂量と洗掘穴より砂量とが平衡状態を保っているものと考えて、洗掘後期における洗掘穴の時間的变化および最終洗掘深さについて考察を行ってみたい。

2 洗掘形状と流れの状況

洗掘形状と流れの状況

況を測定した代表的なものも示すものが図-1である。洗掘穴は最大洗掘深さDと洗掘穴の長さLとで表示すると図のように概略、ノズル中に奥係なくほぼ相似になっている。また時間的にも同じ長さとするれば、洗掘の開始より4分程度経過した後にはほぼ相似であることも認められる。

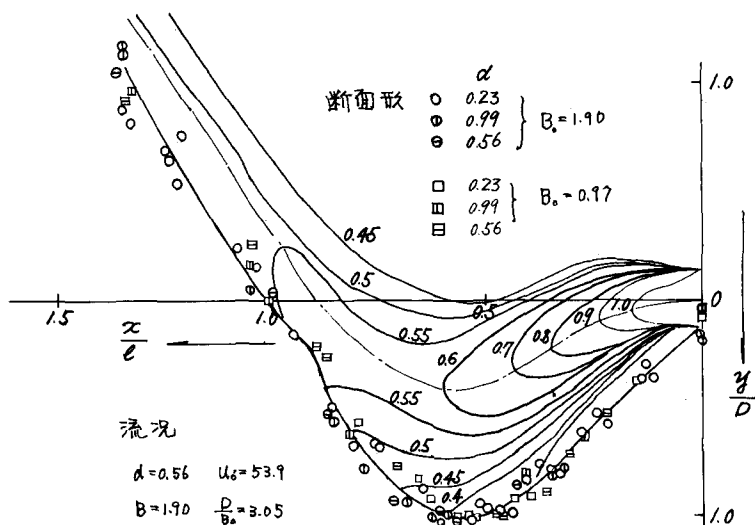


図-1 洗掘形状と流況

各断面において流速が最大なる点と噴流の

中心と考えると、最大洗掘深さの断面までは噴流の中心線に沿っての流速の逆減および流速分布はほぼ自由噴流のそれと同じであつた。最大洗掘深さの断面までは噴流の中心はほぼ円弧をなしてしまふが、最大洗掘深さの断面あたりから急にその方向を転じて、ほぼ一様な流れになつて砂面に沿つて流れている。

洗掘形状は時間的に相似であることから、噴流との幾何学的な関係を記述すると思われるので、最大

$$\frac{\rho_s}{\rho_0} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{u_0}{u_*} \frac{z}{B_0} \right\} \quad (8)$$

となる。基礎式(5)に(6)、(8)を代入して整理すると、最大洗掘深さの時間的变化は

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{D}{B_0} \right) = \frac{\cos \theta_0}{1-\lambda} \frac{K}{\frac{D}{B_0} (1 + \sqrt{\lambda \cos \theta_0} \sqrt{\frac{D}{B_0}})} \frac{\sqrt{3} d^3}{B_0^3} \left(\frac{u_0}{\sqrt{3} d} \right)^m \left\{ 1 - \frac{u_* u_{bc}}{K^2} \left(\frac{D}{B_0} \right)^m \left(\frac{K^2}{2 \sin \theta_0 + 4 \lambda \cos \theta_0} \right)^m \left(\frac{D}{B_0} \right)^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{u_0}{u_*} \frac{z}{B_0} \right\} \right\} \quad (9)$$

となる。

3 最終洗掘深さ

洗掘深さが定常状態に達した場合には砂堆頂を越えて出ていく砂量がなくなることであるから、(8)式が零となることと見られるが、(8)式は噴き上げられた砂量に対する砂堆頂を越えていく砂量の割合であるので、実際の洗掘深さが定常状態になるのは、

$$\left\{ 1 - \frac{u_* u_{bc}}{K^2} \left(\frac{D}{B_0} \right)^m \left(\frac{D}{B_0} \right)^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{u_0}{u_*} \frac{z}{B_0} \right\} \right\}$$

が充分零に近い値であるものと考えられる。\$u_{bc} \propto \sqrt{gd}\$とみると、\$u_{bc}/u_* \propto \sqrt{d}/\sqrt{B_0}\$であるので、最終洗掘深さ\$(D/B_0)_f\$は\$u_0/u_*\$と\$d/B_0\$、\$u_0/u_{bc}\$によって規定されよう。図-4は最終洗掘深さを\$u_0/u_*\$に対し図示したもので、\$B_0/d\$が等しいものは同一曲線上にある。

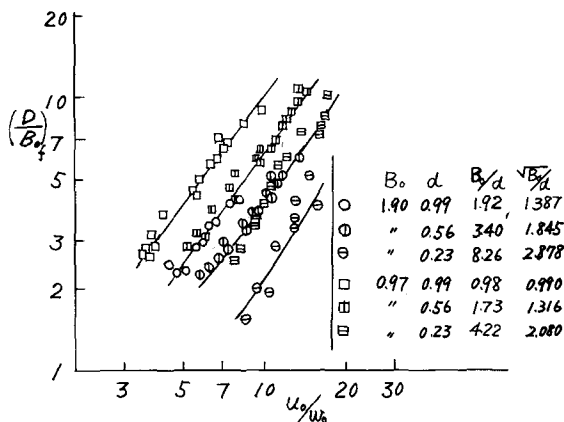


図-4 最終洗掘深さと\$u_0/u_*\$の関係

図-4は最大洗掘深さの時間的測定結果で\$B_0/d=2\$の場合を示した。

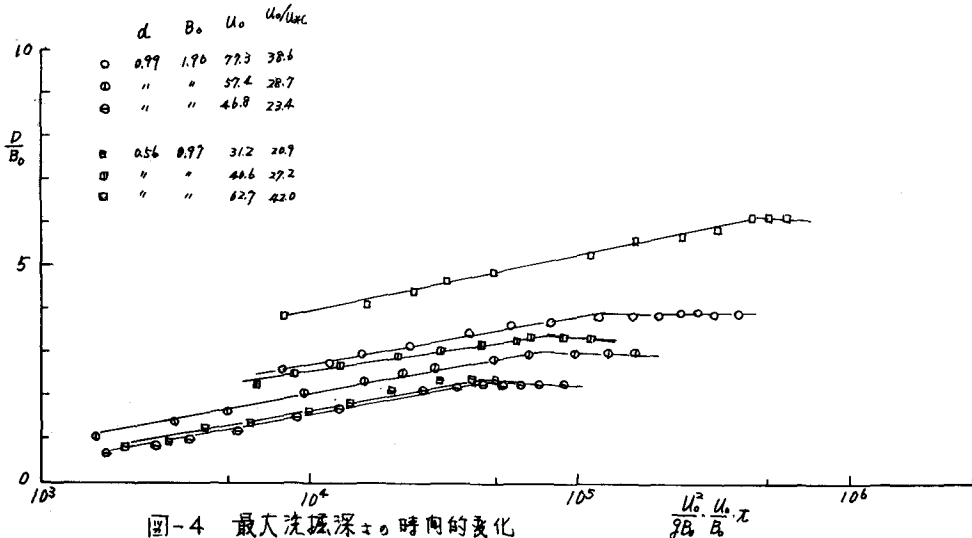


図-4 最大洗掘深さの時間的变化

洗掘深さの断面では、噴流中心線と洗掘面との間には一定の流量が流れていて、噴流の衝突する砂面は砂の水中安息角 θ_0 をなして傾斜するものとすると、最大洗掘深さ D と洗掘穴の長さ l との関係は

$$\frac{D}{B_0} = \frac{r}{B_0} \left[1 - \cos \theta + \frac{\theta}{\theta_0} \operatorname{arctanh} \left\{ \frac{r}{k_1} \left(\frac{r \theta_0}{B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right] \quad (1)$$

$$\frac{l}{B_0} = \frac{D}{B_0} \left[\frac{\sin \theta + \frac{\theta}{\theta_0} \operatorname{arctanh} \left\{ \frac{r}{k_1} \left(\frac{r \theta_0}{B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \times \{ \sin \theta_0 - (1 - \cos \theta_0) \cot \theta_0 \}}{1 - \cos \theta + \frac{\theta}{\theta_0} \operatorname{arctanh} \left\{ \frac{r}{k_1} \left(\frac{r \theta_0}{B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}} + \cot \theta_0 \right] \quad (2)$$

となる。図-2には l と D との実測値と同時に θ を媒介変数として D/B_0 と l/B_0 の計算値と実線と記入してある。

洗掘された底床積と堆積された底量と等しいことから洗掘穴端から砂堆頂までの距離 l' は

$$\frac{l'}{B_0} = \sqrt{\alpha \cot \theta_0} \sqrt{\frac{D}{B_0} \frac{l}{B_0}} \quad (3)$$

となる。図-3には(1)、(2)の関係を用いて(3)式を計算した結果を実線と記入してある。(式中の α には0.45の値を用いてある)

3. 洗掘深さと規定する要素

上記の洗掘形状で洗掘が進行していくものとすると、基礎式は洗掘穴の穴積を V とし、噴き上げられる砂量 g_0 、砂堆頂を越えて出ていく砂量を g_p とすると

$$\frac{g_0}{1-\lambda} \frac{dz}{dt} = \frac{dV}{dz} \frac{dz}{dt} + l' \sec \theta_0 \frac{dz}{dt} \quad (4)$$

となる。流砂量の式としては指数形

$$\frac{g_0}{\sqrt{g d^3}} = K \left(\frac{u^2}{\rho^2 s g d} \right)^n \left(1 - \frac{\rho^2 u_c^2}{u^2} \right)^n \left(\frac{1}{\sin \theta_0 + M \cos \theta_0} \right)^n \quad (5)$$

を仮定する。

洗掘穴から噴き上げられ砂堆頂を越えていく砂量を推定するのは困難なことであるが、次のように単純化して考えることにする。噴き上げられる砂量を1と考える、ある地点で p の沈降した量を p とし、残量 $1-p$ なる量が流れの中に一様に分布して一様な沈降速度 ω で沈降するものとする、 dt 時間内に除去される量 dp は、流れの中に B とすると

$$dp = (1-p) \frac{dt}{B \omega} \quad (6)$$

となる。噴き上げ流れの流速 u が流れの中に一定であると仮定して、流れに沿って距離 s を測り、 $s=0$ で $p=0$ のもとで積分を行なうと、砂堆頂を越えて出ていく砂量は

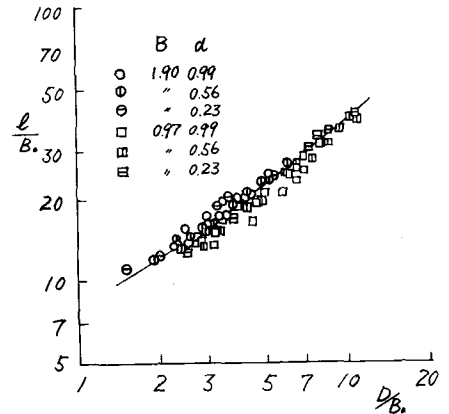


図-2 最大洗掘深さと洗掘穴長さ

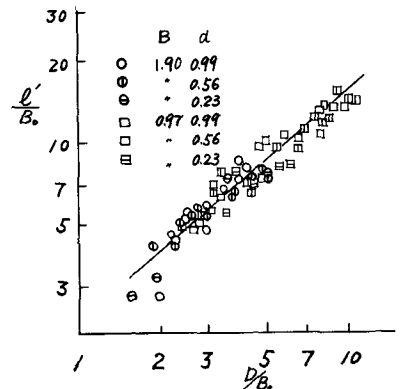


図-3 最大洗掘深さと砂堆の半巾