

名古屋工業大学	正員	橋	本	理	明
京都大学防災研究所	正員	工	屋	義	人
名古屋工業大学	学主員	清	水	孝	一
同上		広	本	文	泰
同上		斎	藤	正	勝

1. 緒 言

噴流による局所洗掘に関する研究は、鉛直噴流の場合 Abbettson, Rouse, 栗津, Smith, 岩垣らにより、また水平噴流の場合は Lauraen や著者らによってそれぞれ独自の立場からその現象の解明に寄与すべく進められてきたが、局所的に発達する大きな乱れのために、その適確な水理学的考察は困難といわねばならない現状のようである。ここで述べる研究もそうした現象に対する水理学的考察の一つであって、鉛直噴流による洗掘とさらに水たたきを設けた場合のそれぞれについて行なった結果についてその概要を説明することにする。

2. 鉛直噴流による洗掘

まず二次元の鉛直噴流の場合について考えよう。岩垣らの研究と同様に洗掘に対する連続方程式と鉛直噴流の拡散特性に基づいて、噴流の中心付近にのみ着目して洗掘深さの時間的变化をあらわす関係と導けば、つぎのようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + f_1(\eta, \xi) \left\{ 1 + f_2(\eta, \xi) \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right\} = 0, \quad \text{ここに } f_1(\eta, \xi) = -\frac{Kd}{(1-\lambda)V_s^{2m}B_0V_0} \left(A\alpha\beta V_0 \frac{b}{B_0} \right)^2 \frac{\xi^2}{\eta^3}$$

$$- U_*^2 \left\{ \frac{2m+1}{2} \left(A\alpha\beta V_0 \frac{b}{B_0} \right)^2 \frac{\xi^2}{\eta^3} - U_*^2 \left(A\alpha\beta V_0 \frac{b}{B_0} \right) / \eta^{3/2} \right\}, \quad f_2(\eta, \xi) = -(\frac{1}{2}) \xi / \eta \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\eta = (b-z)/B_0$, $\xi = x/b$, $t = V_0 t/b$, b : 噴流から砂面までの距離, z : 鉛直上から見た洗掘深さ, V_0 : 噴流出口の流速, t : 時間, B_0 : 噴流の幅, $V_s^2 = (\alpha\beta - 1)gd$, g : 重力の加速度, d : 砂粒の大きさ, η/ρ : 比重, λ : 空隙率と100で割った値, U_* : 限界摩擦速度, であり、その他は適当に仮定されるべき実験定数である。(1)式の解けつぎのようになる。

$$\left(\frac{b-z}{B_0} \right)^{2m} \left\{ \left(\frac{b-z}{B_0} \right)^{3/2} - \left(\frac{b}{B_0} \right)^{3/2} \right\} = \frac{5}{2} \frac{(2m+1)K(A\alpha\beta)^{2m+1}}{(1-\lambda)} \left(\frac{d}{B_0} \right) \left(\frac{b}{B_0} \right)^{2m} \left(\frac{V_0}{V_s} \right)^{2m} \left(\frac{x}{b} \right)^{2m} \left(\frac{V_0 t}{B_0} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{(A\alpha\beta)^2} \left(\frac{B_0}{b} \right)^2 \left(\frac{U_*}{V_0} \right)^2 \right\}$$

$$\left(\frac{b}{x} \right)^2 \left(\frac{b-z}{B_0} \right)^3 \left\{ 1 - \frac{1}{(2m+1)(A\alpha\beta)^2} \left(\frac{B_0}{b} \right)^2 \left(\frac{U_*}{V_0} \right)^2 \left(\frac{b}{x} \right)^2 \left(\frac{b-z}{B_0} \right)^3 \right\} \quad \cdots \cdots (2)$$

またこの結果から、最終洗掘深さは、 $(b-z)/B_0 \propto \left\{ (b/B_0)(V_0/U_*) \right\}^{2/3} \quad \cdots \cdots (3)$ で与えられる。

つぎに三次元の鉛直噴流の場合には、砂面上の掃流力が限界掃流力より十分大きい場合に対して、洗掘深さの時間的变化は次式であらわされる。

$$\left(\frac{b-z}{D_0} \right)^3 \left\{ 1 - \left(\frac{b}{b-z} \right)^{\frac{5m+3}{m+1}} \right\} = \frac{2K(5m+3)(A\alpha\beta)^{2m+1}}{(1-\lambda)} \left(\frac{x}{b} \right)^{2m} \left(\frac{b}{D_0} \right)^{2m} \left(\frac{V_0}{V_s} \right)^{2m} \left(\frac{d}{D_0} \right) \left(\frac{V_0 t}{D_0} \right) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 D_0 : 噴流出口の直径, x : 噴流中心からの距離, であり、その他(2)式中の記号に従うが、 γ も実験定数である。また最終洗掘深さは二次元の場合と同様の考察によれば、

$(b-Z)/D_0 \propto (b/a)(V_0/U_0^2)^{1/2}$ (5) であらわされることになる。つきに二、三の実験結果について述べよう。まず図-1はこの実験に用いた砂礫の粒度分布を示したものである。図-2は二次元噴流による洗掘形状をその代表的な長さとして最大洗掘深さ Z_0 を用いてあらわした結果の一例であるが、この他の場合においてもほとんど同様の結果がえられた。つきに図-3は(3)式に基づいて洗掘深さの時間的变化を考察した結果であるが、これから洗掘の初期において正確に(3)式の関係が成立していることがわかる。たとえば、(4)式中の定数 m の値を近似的に $m=2$ とした場合、この程度の値が最も実験結果に適合するようである。なお、(2)式に基づいて二次元噴流の場合を考察した結果については講演時に説明するつもりであるが、やはりこういふ関係に支配されるようである。図-4は(3)式に基づいて二次元噴流の場合の最終洗掘深さを考察した結果であって、図中の直線は実験に最も適合する。ように引いた関係であるが、これは(3)式であらわされる関係にかなり近いことがわかる。*Circular jet* の場合に対して(5)式を検討した結果もさくさくした関係と満足している。この他の実験結果については講演時に説明するつもりであるが、以上のような極めて大胆な近似のもとに、噴流による洗掘現象を考察した結果によれば、極めて多く未知の現象が存在することはいうまでもないが、一応このような取扱ひのもとに考察を進めていくことは十分有意義であると考えられる。

図-1 実験砂の特性

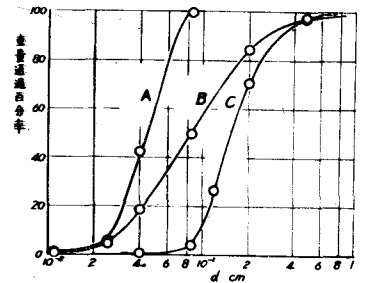


図-2 洗掘形状の一例

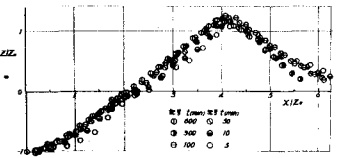


図-3. *Circular jet* の場合の洗掘深さの時間的变化

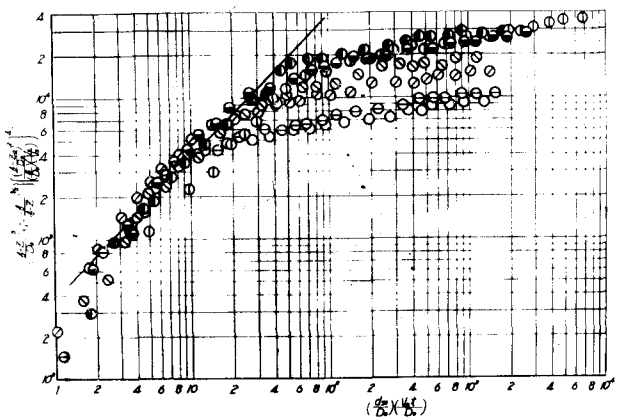
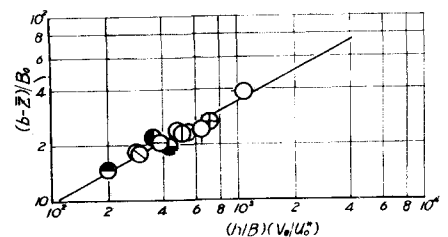


図-4. 二次元噴流の場合の最終洗掘深さ



3. *Armorplate* と置いた場合の鉛直噴流による洗掘
 これは鉛直噴流による洗掘を防止するために、噴流の中心部に水に比重の一種であるいわゆる *armorplate* を置いた場合を対象とする。このような洗掘の大きな特徴の一つは、一つの壁面に沿って流れが拡散することであり、またとくに洗掘孔内には水平軸をもった局所的に発達する渦かすの現象を大きく支配するということである。これと極めてよく類似した現象として水平噴流による洗掘現象を考察することができる。著者の一人と屋らはこの問題を究明すべく、すでに二、三の実験を行い、またその水理学的機構を解明する一つの試みとして、水平軸をもった局所的な渦の発達と弁

達とに立脚して簡単な理論的考察を行なった。ここでも、もう少し理論的考察を進めて、この現象を説明することと試めることにしよう。まず、洗掘形状の時間的变化とあらわす方程式を渦の発達に着目して、さきの研究と全く同様の仮定のもとにつくればつぎのようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{K(2m+1)KA^{2m+1}}{2\pi(1-\lambda)} \eta_0 \left(\frac{\bar{u}_0}{V_s} \right)^{2m} \left\{ 1 + \frac{K\eta_0}{2\pi \sqrt{(\alpha\eta_0 - \xi)^2 + (\beta\eta_0 + \eta)^2}} \right\}^{2m} \\ \{ (\alpha\eta_0 - \xi) + (\beta\eta_0 + \eta) \}^{1/2} \{ (\alpha\eta_0 - \xi) - (\beta\eta_0 + \eta) \} \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \} = 0 \quad (6)$$

ここに、 $\eta = z/d$, $\eta_0 = z_0/d$, $\xi = x/d$, $\tau = \bar{u}_0 t/d$, z_0 : 最大洗掘深さ, $\bar{u}_0$: 水柱比3の先端における最大流速であって、土屋らの実験によれば、近似的に $\bar{u}_0/V_{max} = 0.5405/(0.0628 + \xi^2)$ であらえられる, $\xi' = x/b$, V_{max} : 距離 b における噴流の中心最大流速, であり、その他は適当な定数である。

(6)式に基づいて水平噴流の場合と同様の考察を行なえば、最大洗掘深さに対して、結局つぎの関係が成立することになる。

$$z_0/d_{50} = F \left\{ (u_1/V_s)^{2m} (\bar{u}t/d), u_c^*/u_1 \right\} \quad (7)$$

ここに、この関係に基づいて実験結果を整理し、水平噴流の場合と比較検討した結果について述べる。まずこの場合においても洗掘形状は図-2に示したように、水平噴流の場合と同様、 z_0 を代表的な長さとしてあらわされる。図-3は z_0 におよぼす砂粒の大きさの効果と(7)式に基づいて検討した結果であって、水平噴流の場合と同様にこうした関係によってまとめられることがわかる。つぎに図-6は図-5の結果を用いて最大洗掘深さの時間的变化を考察した結果であるが、実験結果は非常にばらついているけれども、やはりこうした関係によって統一的にあらわされることかわかるであろう。また図-7は最終洗掘深さについて検討した結果であって、図中には水平噴流による洗掘の場合と比較のため示したが、これからつぎのことかわかるであろう。すなわち、水平噴流の場合に較べて若干実験結果がばらついているようであるが、ほぼこうした関係によってあらわされ、鉛直噴流の場合の方が u_c^*/u_0 の増加による z_0/d_{50} の減少が若干著激であることがわかる。

以上述べた成果は実験結果も十分にいいが、今後の研究に待つべきものが極めて多いので、今後詳細な実験をさらに進めて、こうした局所洗掘の機構を解明すべく努力したいと考えている。

図-5. $(z_0/d_{50})_0$ と $\bar{u}_0/V_s$ との関係

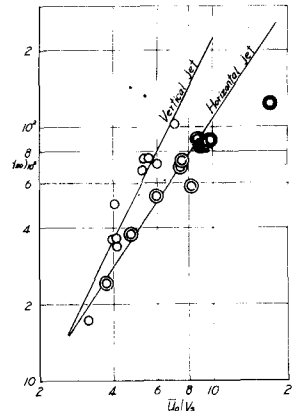


図-6. Armorplateを置いた場合の洗掘深さの時間的变化

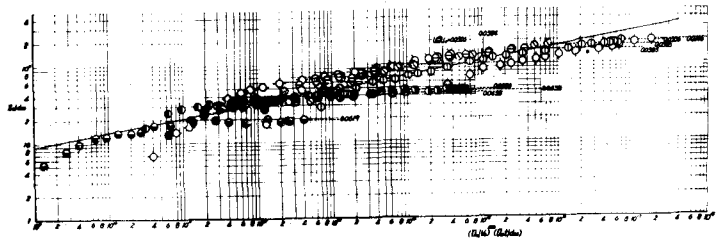


図-7. Armorplateを置いたときの最終洗掘深さ

