

噴流による局所洗掘の問題は、米国では1940年 H. Rouse が二次元垂直噴流による洗掘の実験を行って以来、E. M. Laursen は二次元水平噴流による洗掘、M. L. Albertson, D. Doddiah および R. A. Thomas は三次元垂直噴流および自由越流の落下水束による洗掘、G. L. Smith は水平の Cantilever culvert から落ちる水束による洗掘の実験と実施し、またわが国でも最近栗原椿、栗津がこうした噴流による局所洗掘の研究を行っている。しかし、これらの実験結果を解析するにあたって、すべて次元解析の方法を用いているため、それぞれの実験結果と統一する洗掘法則を明らかにし、その相似律を確立するまでに至っていない。

著者は昭和32年7月より1年2ヶ月間の米国留学中、コロラド大学において噴流による局所洗掘の研究に従事する機会をえた。三次元噴流による洗掘理論については、すでに昨年8月アトランタにおいて開催された米国土木学会の水理学部門講演会において発表したもので、ここでは二次元噴流による場合について述べる。

1. 流砂の連続式

図-1 に示すように座標軸をとれば、移動床に衝突した噴流による流砂の連続式は、図の AA' および BB' 断面を通過する流砂量と洗掘量の関係から

$$(1-\lambda) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここに、 q_s ：単位巾、単位時間当りの流砂量の容積， λ ：砂の空隙率(%)を100で割って示したものを。

2. 流砂量の式

摩擦速度 U^* が限界摩擦速度よりかなり大きい場合は

$$q_s / U^* d_s = A_0 (U^* / V_s)^{2m} \quad (2a)$$

ここに、 $V_s^2 = (\sigma/\rho - 1) g d_s$ ， d_s ：砂粒径 (2b)

従って、摩擦速度 U^* が x の関数としてあらわされれば、(1) 式を積分することによって、洗掘深さを求めることができる。

3. 水面上で射出される噴流の場合 (図-2)

(1) 水底に衝突する前の噴流の拡散

$$\frac{V_m}{V_0} = \alpha e^{\beta \frac{z-b}{B_0}} \quad (3)$$

$$\frac{V}{V_m} = \psi \left(\frac{b-z}{B_0}, \frac{x}{b}, \frac{b}{B_0} \right) \quad (4)$$

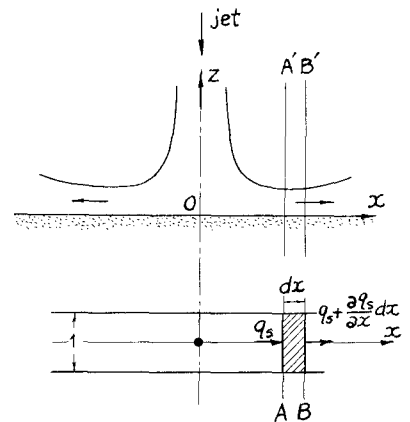


図-1 座標軸

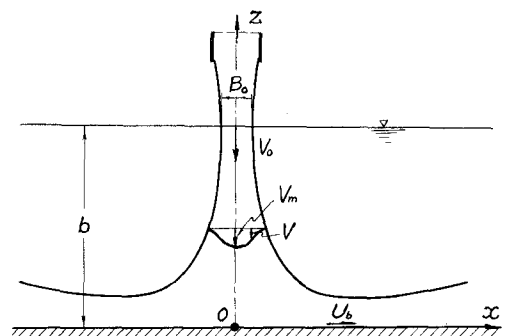


図-2 水面上で射出される噴流の衝突

(2) 摩擦速度の分布

水底上に発達する境界層の方程式を解くことによつて、つぎのような stagnation point (原点) の近傍において適用される摩擦速度の分布式を求めることができる。

$$(U^*/V_{bm})^2 = 0.0225 \beta_2^{-\frac{1}{2}} (V_{bm} x / \nu)^{-\frac{1}{5}} (1 - \psi_0^2)^{\frac{9}{10}} \quad (5)$$

ここに、 V_{bm} : $z=0$ (水底) としたときの V_m の値、 β_2 : U_b の分布や境界層内の速度分布に係する常数、 ψ_0 : $z=0$ のときの ψ の値。

(3) 洗掘深さ

(2a) および (5) 式を用いて (1) 式を変形し、 V_{bm} を (3) 式の V_m に等しくおいて積分すれば、洗掘深さ $Z_s = -Z$ をあらわす解としてつぎの式がえられる。

$$\frac{Z_s}{B_0} = \frac{10}{9\beta(2m+1)} \ln(1+\eta) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{9}{10(2m+1)} \frac{\beta A_0}{(1-\lambda)} (\alpha F_0)^{2m+1} \left(\frac{V_0}{V_s}\right)^{2m} M' M^{2m} \frac{d_s}{B_0} \frac{V_0 t}{b}, \quad F_0 = e^{-\frac{9}{10}\beta \frac{b}{B_0}} \\ M &= (0.0225)^{\frac{1}{2}} \beta_2^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\alpha V_0 b}{\nu} \frac{x}{b}\right)^{-\frac{1}{10}} (1 - \psi_0^2)^{\frac{9}{20}}, \quad M' = \frac{dM}{d(x/b)} \end{aligned}$$

4. 水中で射出される噴流の場合 (図-3)

この場合の噴流の拡散は

$$\frac{V_m}{V_0} = 2.28 \sqrt{\frac{B_0}{b-Z}} \quad (7)$$

$$\frac{V}{V_m} = e^{-4.24 \frac{x^2}{(b-Z)^2}} \quad (8)$$

であらわれ、3. の場合と同様な取扱いをすれば、結局 (6) 式に対応して

$$\frac{b+Z_s}{B_0} = \left\{ \left(2m + \frac{29}{9}\right) \xi + \left(\frac{b}{B_0}\right)^{\frac{18m+29}{20}} \right\}^{\frac{20}{18m+29}} \quad (9) \quad \text{図-3 水中で射出される噴流の衝突}$$

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{9}{2.0(2m+1)} \frac{A_0}{1-\lambda} (2.28)^{2m+1} \left(\frac{V_0}{V_s}\right)^{2m} N' N^{2m} \frac{d_s}{B_0} \frac{V_0 t}{b} \\ N &= (0.0225)^{\frac{1}{2}} \beta_2^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{2.28 V_0 b}{\nu} \frac{x}{b}\right)^{-\frac{1}{10}} \left\{ 1 - e^{-8.48 \left(\frac{x}{b}\right)^2} \right\}^{\frac{9}{20}}, \quad N' = \frac{dN}{d(x/b)} \end{aligned}$$

以上の解析結果から、洗掘深さの時間的変化は噴流の拡散特性によって支配されることわかる。なお噴流が水底に斜めにあたる場合と Rouse の実験結果に適用した例については講演時に述べる。

この研究を行うに当って多大の援助を頂いた Dr. M.L. Albertson, Mr. G.L. Smith および Mr. L. Duckstein ならびに U.S. Bureau of Public Roads に感謝するとともに、文部省試験研究費による研究の一部であることを付記する。

