

# 防砂坝下游河床局部冲刷现象之研究

连 惠 邦<sup>\*</sup>

(逢甲大学水利工程学系·台湾)

**摘 要** 防砂坝下游河床局部冲刷问题,对坝体安全及河道稳定具有深远之影响。因此,本研究乃利用冲射流理论分别探讨当冲刷达平衡时,冲刷坑之最大冲刷深度以及冲刷深度之时间变化,经与其他研究者试验资料验证比较,初步已获得良好之结果。

**关键词** 防砂坝 局部冲刷 最大冲刷深度

## Scouring Phenomenon of the Channel Bed Below a Sabo—dam

Hui—pang Lien

(Department of Hydraulic Engineering, Feng Chia University, Taiwan)

**Abstract** Local scour in the channel bed below a sabo dam is an important factor related to river stability and safety of dam body. This paper presents the results of a study on the maximum depth of scour hole under equilibrium condition and scouring hydrograph of channel bed. The derived equation was found to be quite satisfactory by comparing with the experiments data obtained from other studies.

**Key words** sabo dam local scour maximum depth of scour

## 1 绪 论

本省河道上游土砂灾害之治理工程,常构筑防砂坝(sabo dam)横跨河道以调整泥砂运移、稳定河床、减缓坡脚冲刷防止两岸土砂崩塌。唯因水流通过防砂坝溢口后,常以自由冲射流(free plunging jet flow)形态直接冲击下游床面泥砂并造成一冲刷坑(scour hole)。根据水理试验观测,在冲刷初期冲射流大部分的能量直接作用在床面泥砂,使冲刷坑深度迅速地扩展,之后随著冲射流挟带大量泥砂进入冲刷坑,其深度的发展逐渐受到限制,直到进出冲刷坑之泥砂量相当时,冲刷坑形状及深度即不再改变,而维持冲淤平衡状态。由於冲刷坑之形成与发展可能影响到坝体本身安定、河道防砂工程及其泥砂冲淤平衡等问题,因此针对防砂坝下游床面冲刷机制之研究,殊属必要。

有关坝下游床面形态局部变动之研究,有以限界扫流理论及自由喷流理论,推导最大冲刷深度(Tsuchiya, 1967),有以边界层理论及势流理论模拟冲刷坑之剪力分布及其水流特性者(Hayashi, 1985),有以能量之观点解释冲刷现象(Spurr, 1985),或以一垂直自由射流贯入静止

① 收稿日期 1995—05—10 ※逢甲大学水利工程学系副教授。

水体模拟防砂坝下游冲刷(苏, 1993), 但多数研究均采用水工定性模型试验和因次分析方式, 建立最大冲刷深度或冲刷深度及其延时之关系(Mason, 1985; Novak, 1984; Whittaker, 1985)。

## 2 理论分析

### 2.1 冲射流理论

以冲射流理论模拟防砂坝下游床面泥砂之冲刷现象, 乃假设冲刷系由冲射流中液相水体之动量所引起, 而忽略了水流中固体泥砂颗粒对床面泥砂碰撞、搅动之影响, 并采用一维运动方式推导获得冲刷坑内水流流速与冲刷深度之关系, 即

$$\frac{z}{D(1 - C_d)} = B \ln \frac{U_i}{U} \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为冲射水流之砂体积浓度;  $B$  为待定常数。

### 2.2 冲刷平衡与临界流速( $U_{bc}$ )

Lauren(1962)认为局部冲刷必有一极限范围, 当局部冲刷体积随时间之变率等於零(即冲刷速率(scour rate)=0), 即携离与进入冲刷范围之输砂率相当时, 则在冲刷范围包络线上(冲刷坑剖面)的泥砂颗粒必处于动与不动之平衡状态, 其形状及深度将保持不变, 且冲刷深度可达最大值  $Z_l = (h_l / \sin \alpha)$ , 如图1所示。此时底部水流作用流速恰为临界流速, 即水流流速  $U_{(z=Z_l)} = U_{bc}$ , 代入(1)式可获得最大冲刷坑深度之表示式, 为

$$\frac{h_l}{D \sin \alpha (1 - C_d)} = B \ln \frac{U_i}{U_{bc}} \quad (2)$$

式中:  $U_{bc}$  为冲刷坑底部泥砂颗粒处于平衡状态时之临界流速。假设防砂坝下游床面为一均匀粘聚性之均匀泥砂所组成, 则根据作用在泥砂颗粒上各个作用力之平衡关系, 可得临界流速表示式为

$$U_{bc} = \Phi \sqrt{(s - 1)gd_s} \quad (3)$$

式中:  $s$  为比重( $=\rho_s/\rho$ ),  $\Phi$  为综合系数, 根据杨氏(1973)采用0.102~7.01mm 泥砂颗粒径分析得知, 当砂粒雷诺数( $U_{bc}d_s/\nu$ ,  $U_{bc}$  为摩擦速度)大于70时, 综合系数  $\Phi=2.05$ 。

## 3 试验资料验证与讨论

### 3.1 试验资料搜集

本文采用吴氏(1990)水工模型试验资料进行模式系数之检定。吴氏於长度6cm, 宽度7.8cm, 深25cm之流槽内, 铺设厚约10cm的四种均匀粒径( $d_s = 1.11\text{cm}, 0.79\text{cm}, 0.56\text{cm}$  和  $0.36\text{cm}$ )之泥砂层, 采用六种坝高及三种渠槽坡度, 分别以流量0.2、0.3、0.4、0.5和0.6 l/s 进行清水流冲刷(clear-water scour)试验, 直到冲刷坑形状及其深度几乎不变时, 量测记录冲刷坑之最大深度, 其实测资料共计268组。

### 3.2 模式系数检定

根据吴氏实验资料计算, 其砂粒雷诺数均大于70, 取综合系数  $\Phi=0.25$ , 且属清水流冲刷( $C_d=0$ ), 故将实验量测之各相关资料, 依(2)式应用最小二乘方优选法分析, 可获得冲刷平衡方程式为

$$\frac{h_l}{D \sin \alpha} = 20.0 \ln \frac{U_i}{20.5 \sqrt{(s - 1)gd_s}} \quad (4)$$

如图2所示,由图示得知,冲刷平衡方程式与实测点间具有高度相关性,其相关系数均可达0.95以上。这结果表明,防砂坝下游床面最大冲刷深度无因次式与相对流速间具有极为显著之关系,可适当地反映出最大冲刷深度与水力条件及泥砂颗粒特性间之变化规律。

### 3.3 冲刷深度过程线

在局部冲刷的相关问题中,除了最大冲刷深度之估算,有关冲刷深度之时间变化(冲刷深度过程线),亦是一重要之课题。根据冲射流理论可得冲刷深度之时间变化方程式为

$$\frac{z}{D} = \frac{(1 - C_d)}{f_b} \ln \left[ 1 + \frac{f_b}{1 - C_d} F_r \sqrt{\frac{g}{D}} t \right] \quad (5)$$

式中:  $f_b$  为摩擦阻力系数,福祿数  $F_r (= U_1 / \sqrt{gD})$ 。由於摩擦阻力系数为表床面泥砂颗粒和冲刷坑内水体对冲射流之阻抗效应,故依据冲刷坑之发展、床面泥砂颗粒之运动状况和冲刷坑水体体积之大小等因素,可将摩擦阻力系数  $f_b$  表为

$$f_b = f_{b1} + f_{b2} + f_{bs} \quad (6)$$

式中:  $f_{bs}$  为含滓流冲刷(sediment-laden scour)时,冲射流中泥砂颗粒与冲刷坑水体和床面泥砂颗粒之摩擦阻力系数。根据冲射流理论分析得知,  $f_{bs} \approx \tan \Phi$  ( $\tan \Phi$ : 动摩擦系数),故取  $f_{bs} \approx 0.32$  (Takahashi, 1991),唯在清水流冲刷中,  $f_{bs} \approx 0$ 。  $f_{b1}$  为冲射流中流体部分因搅动并输离床面泥砂所产生之摩擦阻力系数,在冲刷进行中,  $f_b \approx f_{b1}$ ,而  $f_{b2}$  为冲射流与冲刷坑内水体之相对运动和紊动漩涡所产生之损失系数,故在冲刷坑处于冲刷平衡时,  $f_b \approx f_{b2}$ 。

一般而言,  $f_{b1}$  和  $f_{b2}$  虽然会随冲刷坑深度的发展而互有消长,唯在整个冲刷过程  $f_{b1}$  和  $f_{b2}$  之和仍保持固定,即  $f_{b1} + f_{b2} = \text{定值}$ 。

**3.3.1 清水流冲刷摩擦阻力系数之估算** 当床面冲刷已达冲淤平衡时,於冲刷坑内取一控制体积(如图3所示)。由於流体单位重量能量变化可以进出控制体表面单位重量能量之净流率表示之,故设各断面之能量系数(energy coeff.)等於1时,则能量损失  $\Delta E = U_0^2 - U_1^2 / 2g = f_b U_1^2 / 2g$ 。将摩擦阻力系数置入能量损失公式中,乃著眼於当冲刷达平衡时,冲刷坑内水体对冲射流的阻抗将转化为系统的能量损失。因此,根据吴氏清水流冲刷试验资料经回归分析,可得曲线斜率或摩擦阻力系数为  $f_b = 0.9$ ,如图4所示。因此,将摩擦阻力系数  $f_b = 0.9$  代入(5)式中,即可得冲刷深度随时间变化之趋势,如图5为冲刷坑深度与时间之关系,图中显示冲刷坑深度於初期发展呈现急速上升之趋势,并随时间渐趋平衡,且其最大冲刷深度与实测值甚为接近。

**3.3.2 含滓流冲刷深度过程线** 由於防砂坝下游床面泥砂之冲刷现象,依冲射流中泥砂含量变化,而有清水流与含滓流两种床面冲刷形态。据此,将清水流流况摩擦阻力系数  $f_{b1} + f_{b2} = 0.9$  及含滓流流况摩擦阻力系数  $f_{b1} + f_{b2} + f_{bs} = 1.22$ ,代入(5)式可绘得冲刷深度之理论过程线,如图6所示。由图显示在清水流冲刷阶段,其冲刷坑深度快速地增加,直到冲射流挟带部分泥砂颗粒进入冲刷坑后,冲刷坑深度突然降低,之后随著上游来水来砂量之变化,使得冲刷坑深度呈上下跳动,而此冲刷过程与 Engeldinger (1956) 之实验观测成果相符 (Breusers, 1991)。

## 4 结 论

利用冲射流理论建立水流通过防砂坝后,对下游床面泥砂颗粒之冲刷规律,经实测资料验证初步已获得良好之结果。根据分析成果,相对最大冲刷深度与相对速度间呈对数相关(如4式),且於冲刷过程水流和泥砂颗粒间摩擦阻力系数之变化,与冲刷深度之发展关系密切。经能量损失方程式估算,清水流冲刷之摩擦阻力系数  $f_b = 0.9$ ,而含滓流冲刷时,尚必须考虑冲射流中泥砂含

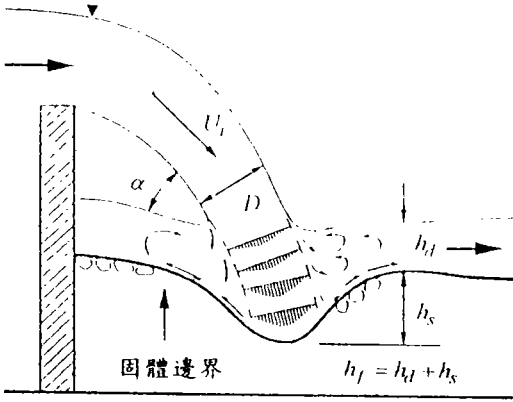


圖 1 自由沖射流沖刷示意圖

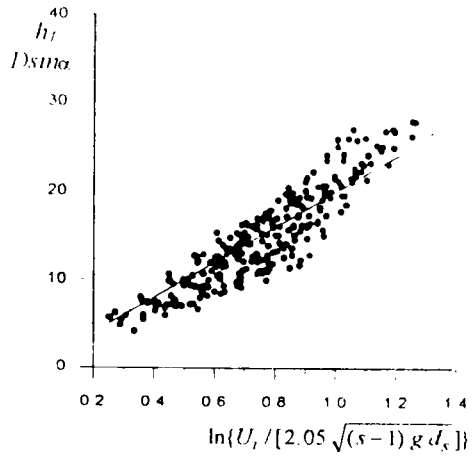


圖 2 清水流相對最大沖刷深度關係圖

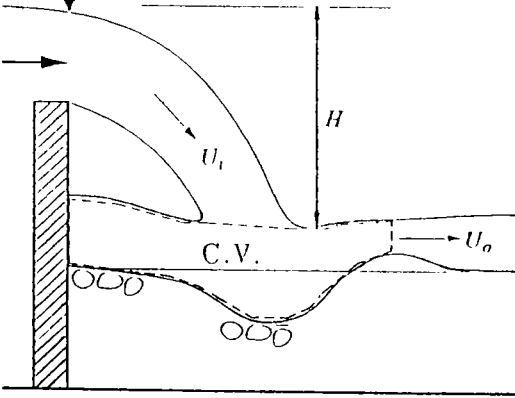


圖 3 沖刷坑控制體積示意圖

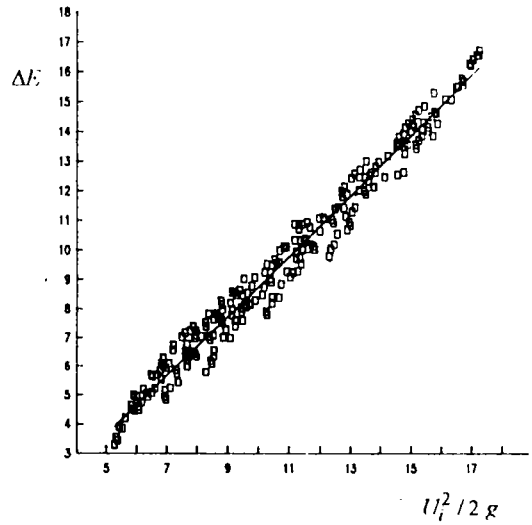


圖 4 能量損失曲線

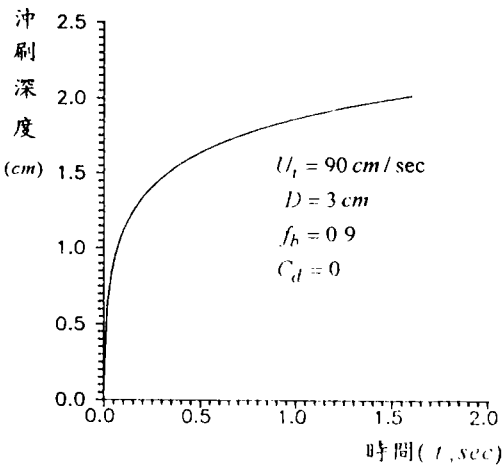


圖 5 清水流沖刷深度與時間之關係曲線

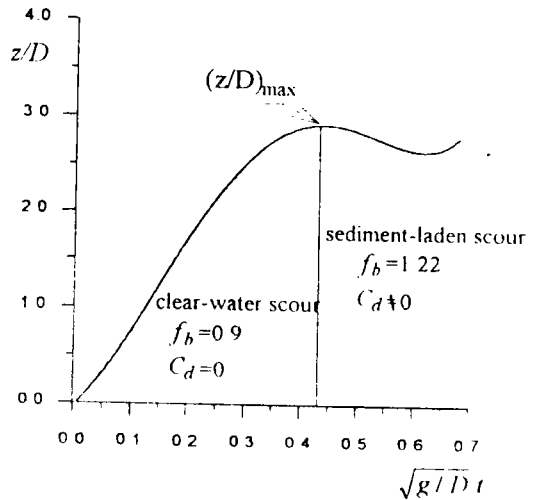


圖 6 沖刷深度與時間之關係曲線

量所造成额外的能量损失,故阻摩擦力系数  $f_b = 1/22$ 。这样,由不同阶段摩擦阻力系数之变化,可模拟防砂坝下游床面冲刷深度之时间变化趋势(如5式)。结果显示,在清水流冲刷时,冲刷坑深度快速地增加,直到冲射流挟带部分泥砂颗粒进入冲刷坑后,冲刷坑深度突然降低,之后随著上游来水来砂量之变化,使得冲刷坑深度呈上下跳动,而此趋势与过去若干实测结果相符。

#### 参考文献

- 1 吴金洲. 堰坝溢流水舌对下游河床冲刷之研究,逢甲大学土木及水利工程研究所硕士论文,1990,95pp
- 2 苏重光,连惠邦. 防砂坝下游天然河床受坝顶溢流冲刷之研究,台湾水利季刊,1993,41(2),p. 35~41
- 3 Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi, "Scouring," Published for the IAHR, the Netherlands, 1991, pp. 61~62.
- 4 Hayashi, S. "Hydraulic studies on the phenomenon of scour at the base caused by free falling nappe over sediment control dams," International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, 1995, Sept. 3~5, Tsukuba, Japan, pp. 395~400
- 5 Laurent, E. M. "Scour at Bridge Crossings", Trans. ASCE, 1962, Vol. 127, part 1
- 6 Mason, P. J. and K. Arumugam, "Free jet scour below dams and flip buckets," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 1985, Vol. 111, No. 2, pp. 220~235
- 7 Novak, P., "Developments in Hydraulic Engineering - 2," Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1984, pp. 214~217
- 8 Spurr, K. J. W., "Energy approach to estimating scour downstream of a large dam," Water Power & Dam Construction, July, 1985, pp. 81~89
- 9 Takahashi, T., "Debris Flow", Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Published for the IAHR, the Netherlands, 1991, pp. 26~29
- 10 Tsuchiya, Y. and Y. Iwagaki. "On the mechanism of the local scour from flows downstream of an outlet," Proc. of the 12th Congress, IAHR, 1967, Sept. 11~14, Vol. 3, pp. 55~65
- 11 Whittaker, J. G., U. Schaelchli and M. N. R. Jaeggi. "Design problem with torrent check dams in Switzerland," Proceedings of the International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Sept. 3~5, Tsukuba, Japan, 1985, pp. 387~393
- 12 Yang, C. T., "Incipient motion and sediment transport," J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY10, 1973, pp. 1679~1704