

# 宽级配床沙起动规律的实验研究

晋明红

(西南电力设计院勘测处, 四川 成都 610021)

**摘 要:** 本文在水槽实验的基础上, 根据最小能量耗散原理, 考虑诸如水流脉动、床沙组成、河床糙率、粗细颗粒间相互作用、河床粗化程度等因素的影响, 建立了宽级配床沙起动的三种模式以及相应的非均匀沙起动流速公式, 经实验资料检验, 符合较好。

**关键词:** 起动流速; 粗化程度; 清水冲刷; 泥沙补给

中图分类号: P33. 4

文献标识码: A

## 1 引 言

砾石或卵石河床宽级配床沙起动规律是河流动力学中诸多难题之一。此类河床床沙起动流速的确定对于解决工程泥沙问题非常重要。相对而言, 均匀沙起动问题的研究多于非均匀沙。目前, 均匀沙起动流速计算公式相对较为成熟<sup>[1]</sup>。对于宽级配床沙组成的河床, 其床沙起动流速的确定非常复杂。河床中泥沙颗粒形状、位置、作用于床沙颗粒的水流流速、暴露度对粗颗粒的影响、隐蔽度对细颗粒的影响等都是随机变量<sup>[2]</sup>, 合理量化这些变量非常困难。通过理论分析和系统的水槽实验, 本文研究了宽级配床沙在清水冲刷初期(河床未粗化)、清水冲刷末期(河床充分粗化)和有泥沙补给的河床冲刷的三种不同模式下的起动问题, 并提出了相应的起动

流速计算公式。

## 2 水槽实验

本实验在四川大学高速水力学国家重点实验室的活动水槽中进行。水槽侧壁为树脂玻璃, 水槽全长 20m, 宽 0. 4m, 如图 1 所示。在水槽起始端附近, 设置有加沙机, 可根据水流速度以不同速度向水槽提供泥沙。在下游(水槽末端)设置有一套泥沙接收系统。16m 长的水槽中段铺设 4cm 厚的可动床沙, 床沙配以专门的级配。床沙受到水槽中水流冲刷作用运动至水槽下游, 进入漏斗型容器。每组实验完成后, 分析收集到的床沙颗粒级配, 以推移质重量累积百分比 96% 较之为小的粒径作为当前状态的临界最大起动粒径。水槽流量由矩形薄壁堰测量, 水槽尾端挡板开度依据进水流量确定。

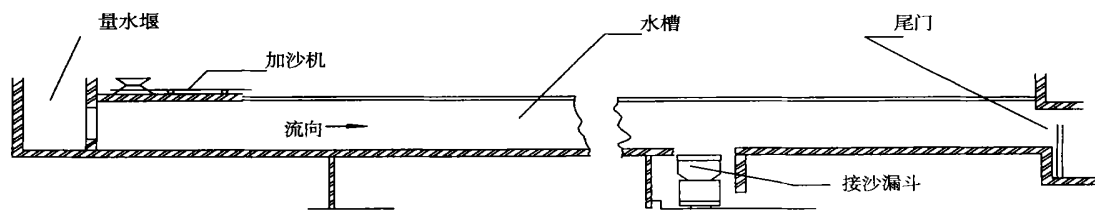


图 1 水槽布置图

Fig. 1 Schematic layout of the experiment flume

收稿日期(Received date): 2002- 10- 11; 改回日期(Accepted): 2003- 01- 15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重大项目(59493600) [Supported by National Natural Science Fund Great Item(59493600)]

作者简介(Biography): 晋明红(1971- ), 女(汉族), 重庆人, 工学硕士, 工程师。[JIN Ming-hong (1971- ), female, from Chongqing, Engineering Master, Engineer.]

清水冲刷实验范围:

流量  $Q = 5.97 \sim 14.12$  (l/s); 水深  $h = 3.53 \sim$

6.70 (cm); 水槽床面坡降  $J = 4\% \sim 10\%$ ;

床沙粒径  $D = 0.2 \sim 30$  (mm); 拣选系数  $S =$

1.45 ~ 2.27 (冲刷初期床沙)、1.50 ~ 1.98 (冲刷末期床沙)。

挟沙水流冲刷实验范围:

流量  $Q = 6.5 \sim 23.1$  (l/s); 水深  $h = 3.0 \sim 8.3$  (cm); 水槽床面坡降  $J = 4\%$ ;

床沙粒径  $D = 0.31 \sim 25$  (mm); 拣选系数  $S = 1.87 \sim 2.23$ 。

### 3 理论分析和实验资料回归

#### 3.1 清水冲刷非均匀沙的起动规律

床沙的起动是床面粗化的开始, 整个现象属于非恒定过程, 可结合床面在冲刷过程中的粗化程度来研究非均匀沙的起动问题<sup>[3]</sup>。在粗化过程中, 床沙组成、暴露度不断调整, 直至床沙组成基本保持不变<sup>[4]</sup>。

##### 3.1.1 清水冲刷早期非均匀沙的起动规律

在此阶段, 河床床面相对较为平整密实。水槽实验现象表明: 床面起动颗粒多以滚动方式翻越下

游相邻颗粒, 见图 2 所示。

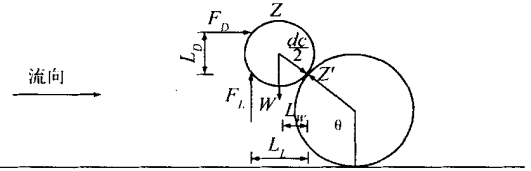


图 2 清水冲刷早期泥沙起动力学模式示意图(侧视)

Fig.2 Schematic diagram of incipient motion by clear water in initial stage (profile)

在这种起动模式下, 起动泥沙  $Z$  绕  $Z'$  轴的转动惯量为

$$J_Z = \frac{7}{20g} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_c^2 \cdot a \cdot bc \cdot A_j \quad (1)$$

式中  $A_j$  为泥沙颗粒形状系数,  $\gamma_s$  为泥沙比重,  $d_c$  为泥沙起动粒径,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为泥沙颗粒相应的长、中、短径。

颗粒  $Z$  相对于  $Z'$  点的角加速度为

$$\varepsilon' = \left( \frac{d_c}{d_m} + 1 \right) \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

式中  $d_m$  为床沙加权平均粒径,  $\theta$  为泥沙的转动角度。

各力对轴的力矩和为

$$\begin{aligned} \Sigma M_{Z'} &= F_D \cdot L_D + F_L \cdot L_L - W \cdot L_W \\ &= \frac{\rho}{\zeta_s} \cdot u_{bs}^2 \cdot (1 + \alpha_{um} \cdot \sin \frac{2\pi\theta}{T})^2 \cdot [f_{CD}(Re^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}) \cdot f_{KD}(\frac{d_c}{d_m}, \zeta_s) \cdot \sqrt{ab} \cdot c^2 \\ &\quad + f_{CL}(Re^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}) \cdot f_{KL}(\frac{d_c}{d_m}, \zeta_s) \cdot \sqrt{(ab)^3}] - \frac{\pi}{6} \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot f_{KW}(\frac{d_c}{d_m}, \zeta_s) \cdot \frac{\sqrt{(ab)^3}}{2} \cdot c \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $F_D$ 、 $F_L$  为水流作用于泥沙颗粒而产生的拖曳力和上举力,  $W$  为泥沙水下重量,  $L_D$ 、 $L_L$  和  $L_W$  分别为  $F_D$ 、 $F_L$  和  $W$  的力臂,  $\rho$  为水的密度,  $u_{bs}$  (本文中符号尾脚标为  $S$  者表示清水冲刷早期、为  $A$  者表示清水冲刷末期、为  $E$  者表示有泥沙补给)为瞬时底速的时均值,  $\alpha_{um}$  为瞬时流速振动特征峰值比例系数,  $\zeta_s$  为隐蔽系数,  $Re^*$  为沙粒雷诺数,  $(d_{75}/d_{25})^{1/2}$  为拣选系数,  $\gamma$  为水的比重,  $f_{CD}(\cdot)$ ,  $f_{KD}(\cdot)$ ,  $f_{CL}(\cdot)$ ,  $f_{KL}(\cdot)$ ,  $f_{KW}(\cdot)$  为各函数。

采用刚体平面运动微分方程描述泥沙的起动

$$J_Z \cdot \varepsilon' = \Sigma M_{Z'} \quad (4)$$

将(1)、(2)、(3)式代入(4)式, 并经简化整理得

$$u_{bs} = \sqrt{\frac{E_s \zeta_s \gamma_s \cdot d_c^2}{F(Re^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}, \frac{d_c}{d_m}, \zeta_s, \lambda_s)}} \quad (5)$$

式中  $E_s$  为动力系数<sup>[5]</sup>,  $\lambda_s = (ab)^{1/2}/c$  为泥沙形状扁度系数,  $F(\cdot)$  为函数。

近底流速与平均流速的关系为

$$u_s = \frac{\lg \frac{11.1hX_s}{k_{sS}}}{\lg \frac{30.2\gamma X_s}{k_{sS}}} \cdot u_{bs} \quad (6)$$

式中  $u_s$  为平均流速,  $h$  为水深,  $X_s$  为修正系数,  $k_{sS}$  为当量糙度系数,  $\gamma = \alpha k_{sS}$ ,  $\alpha$  为一常数。将(5)式代入(6)式得

$$u_s = \frac{\lg \frac{11 \cdot 1 h X_s}{k_s}}{\lg(30 \cdot 2 \alpha X_s)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \zeta_s \gamma_s \cdot d_c^2}{N \cdot F(\text{Re}^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}, \frac{d_c}{d_m}, \zeta_s, \lambda)}} \quad (7)$$

通过实验资料对(7)式进行多元回归分析计算, 得到清水冲刷早期床沙起动流速公式为

$$\frac{u_s}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_c}} = 1.271 F_1 \cdot e^{0.4907[\lg(h/k_s)]^{0.527} \cdot F} \quad (8)$$

式中  $F_1 = \sqrt{E_s d_c}$

$$F = \left(\frac{d_m}{d_c}\right)^{0.4709} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{0.3405} \cdot (\lg \lambda)^{-0.1034} \cdot \left(\sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}\right)^{-0.3941},$$

$$E_s = 0.4204 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma}} / d_{50} + 7.274,$$

$$k_{sS} = \frac{12.27 R_b \cdot X}{10^{u/5.75 u_*}}$$

$\sigma$  为颗粒粒径的标准偏差,  $\sigma_1$  为  $\lg d$  的标准偏差,  $d_{50}$  为重量累积百分比 50% 较之为小的粒径 ( $d_{25}$ 、 $d_{75}$ 、 $d_{90}$  等类推),  $R_b$  为槽底水力半径,  $X$  为考虑粘性底层影响的修正系数,  $X = f(k_s/\delta)$ ,  $\delta$  为光滑床面近壁层流厚度,  $\delta = 11.6v/u_*$ ,  $v$  为流体运动粘滞系数,  $u_*$  为摩阻流速。

### 3.1.2 清水冲刷末期非均匀沙的起动规律

在此阶段, 随着粗化程度的加剧, 河床床面最终形成由粗颗粒及隐蔽区少量细颗粒组成的相对稳定的粗化层。水槽实验现象表明: 起动沙粒最优起动路径为沿下游相邻颗粒侧边缘绕行的路径, 如图 3 所示。

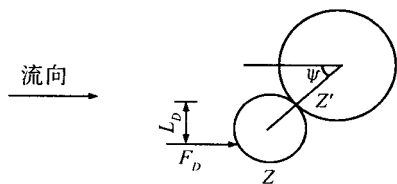


图3 清水冲刷末期泥沙起动力学模式示意图(俯视)

Fig. 3 Schematic diagram of incipient motion by clear water in last stage(plan)

泥沙  $Z$  绕  $Z'$  的角加速度为

$$\varepsilon = \left(\frac{d_m}{d_c} + 1\right) \cdot \frac{d^2 \psi}{dt^2} \quad (9)$$

式中  $\psi$  为泥沙转动角度。

各力对轴  $Z_1$  的力矩和为

$$\begin{aligned} \Sigma M_Z &= F_D \cdot L_D \\ &= \frac{\rho}{\zeta_s} \cdot u_{bA}^2 \cdot (1 + \alpha_{um} \sin \frac{2\pi}{T})^2 \cdot \\ &\quad g_{CD}(\text{Re}^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}) \cdot g_{KD}(\frac{d_m}{d_c}, \zeta_A) \cdot abc \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $g_{CD}()$ 、 $g_{KD}()$  为函数。

同样, 用刚体平面运动微分方程描述泥沙颗粒起动, 于是清水冲刷末期的起动流速表达式为

$$u_A = \frac{\lg \frac{11 \cdot 1 h X_A}{k_{sA}}}{\lg(30 \cdot 2 \alpha X_A)} \cdot \sqrt{\frac{E_A \zeta_A \gamma_s \cdot d_c^2}{N \cdot G(\text{Re}^*, \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}, \frac{d_c}{d_m}, \zeta_A)}} \quad (11)$$

式中  $G()$  为函数。

对(11)式进行分析, 化简, 并通过实验资料对上式进行多元回归计算, 可得清水冲刷末期床沙起动流速公式为

$$\frac{u_A}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_c}} = 2.343 \cdot G \cdot \left(\lg \frac{h}{k_{sA}}\right)^{0.2527} \quad (12)$$

式中  $G = \sqrt{E_A d_c} \cdot S^{0.6762} \cdot \left(\frac{d_c}{d_m}\right)^{0.6345} \cdot \left(\frac{\sigma}{d_{50}}\right)^{0.4045},$

$$E_A = 0.449 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma}} / d_{50} + 21.83,$$

$$k_{sA} = \frac{12.27 R_b \cdot X}{10^{u/5.775 u_*}}$$

### 3.2 有泥沙补给条件下非均匀沙起动规律

在床沙与推移质的交换处于动态平衡的条件下, 上游的泥沙补给使床面粗化程度减弱。这种情况下, 床沙最初向下游移动的模式可假定为滑动形式, 如图 4 所示。

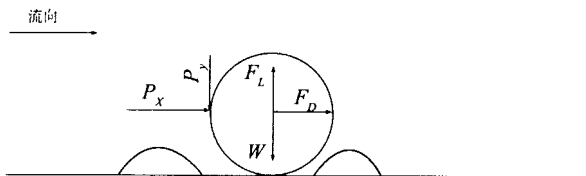


图4 有泥沙补给条件下的泥沙起动力学模式示意图(侧视)

Fig. 4 schematic diagram of incipient motion by flow carrying sediment(profile)

考虑颗粒的滑动平衡条件, 得到

$$F_D + P_x + W \sin \alpha_0 = \text{tg} \alpha (W \cos \alpha_0 + P_y - F_L) \quad (13)$$

式中  $P_x$ 、 $P_y$  为泥沙碰撞作用力的水平分力和垂

直分力;  $\alpha_0$  为床面与水平面的夹角;  $\tan \alpha$  为泥沙在水中的摩擦系数。

将相关条件代入式(13)中, 经整理化简可得

$$u_{bE} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_c \cdot \frac{e_a}{e_c} \cdot H(\text{Re}^*, S, \frac{d_m}{d_c})} \quad (14)$$

式中  $e_a$  为起动粒径的平均暴露度,  $e_c$  为具有代表粒径的泥沙的平均暴露度<sup>[4]</sup>。  $H()$  为函数。

在加沙实验情况下, 床面糙度大多处于过渡区, 流速分布可采用指数流速公式

$$u_y = (1 + m) u \left( \frac{y}{h} \right)^m \quad (15)$$

式中  $u_y$  为距河底  $y$  处的流速,  $y = ad$ ;  $m$  为指数。

于是, 有泥沙补给条件下, 非均匀沙起动流速可表达为

$$u_E = \frac{1}{1 + m} \left( \frac{h}{d} \right)^m \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_c \cdot \frac{e_a}{e_c} \cdot H(\text{Re}^*, S, \frac{d_m}{d_c})} \cdot a^{-2m} \quad (16)$$

通过实验资料对式(16)进行分析、化简并进行多元回归计算可得到有泥沙补给条件下床沙起动流速公式为

$$\frac{u_E}{\sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_c}} = e^{1.404 \left( \frac{d_{90}}{h} \right)^{0.081} \cdot L} \quad (17)$$

式中  $L = \left( \frac{C_s}{S} \right)^{0.2427} \left( \frac{d_c}{d_m} \right)^{0.0128} \left( \frac{d_m}{\sigma} \right)^{0.2365}$ , 代表粒径  $d_a$   
 $= \sum_{i=1}^m d_i P_i + \sum_{i=m}^n d_c^* P_i^{[4]}$ , 临界粒径  $d_c^* = \frac{\tau_0}{0.024(\gamma_s - \gamma)^\circ}$

## 4 检 验

根据式(8)、(12)、(17)可将相关点据绘于文献[6]所示的起动流速计算值和实测资料的对照图上, 如图5所示。

由图可见, 两者符合较好。分析三者差别有:

对于粒径为  $1.2\text{mm} < d < 25\text{mm}$  的泥沙颗粒:

$U_E > U_A > U_s$ ;

对于粒径为  $0.8\text{mm} < d < 1.2\text{mm}$  的泥沙颗粒:

$U_A > U_E > U_s$ ;

对于粒径为  $0.3\text{mm} < d < 0.8\text{mm}$  的泥沙颗粒:

$U_A > U_s > U_E$ 。

## 5 结 论

本文在考虑床面糙度、粗化程度、水流脉动、床

沙级配、沙粒大小形状、粗细颗粒间隐蔽、暴露作用以及颗粒分布密度等多种影响因素的条件下, 进行了多组水槽实验, 通过理论分析和实验数据的多元回归分析, 得出以下结论:

1. 在实验范围内, 表示清水冲刷早期床沙起动的流速公式(8), 可用于计算开始粗化阶段床面的床沙起动问题; 表示相对粗化程度充分发展的清水冲刷末期床沙起动的流速公式(12), 可用于计算经受冲刷、具有较高粗化程度的床面的床沙起动问题; 表示有泥沙补给条件下床沙起动的流速公式(17), 可用于计算挟沙水流条件下的床沙起动问题。

2. 对于粒径为  $1.2\text{mm} < d < 25\text{mm}$  的泥沙颗粒:  $U_E > U_A > U_s$ ;

对于粒径为  $0.8\text{mm} < d < 1.2\text{mm}$  的泥沙颗粒:  $U_A > U_E > U_s$ ;

对于粒径为  $0.3\text{mm} < d < 0.8\text{mm}$  的泥沙颗粒:  $U_A > U_s > U_E$ 。

由于清水冲刷末期的床面糙度大, 泥沙起动难于清水冲刷早期; 有泥沙补给情形下, 床面糙度小, 粗颗粒受到充填程度的影响, 较难起动, 细颗粒则较易起动。

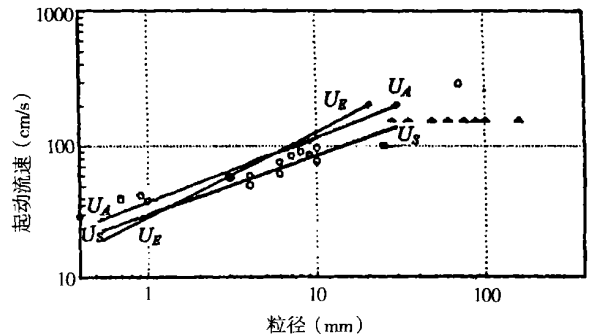


图5 起动流速公式与实验资料对照图

Fig. 5 Comparison of calculated results and experiment data

## 参考文献 (References):

- [1] Zhang Rui-jin and Xie Jian-heng, Sedimentation Research in China water Press, Beijing 1993. [张瑞瑾, 谢鉴衡. 泥沙研究[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993.]
- [2] Cao, S. Y. and D. Fang(1988), stochastic Characteristics of cobble - Gravel Bedbad Transport, Proc. of the National Conference Hyd. Engin., ASCE. Colorado Springs, U. S. A.
- [3] Qian ning and Wan Zhao-hui, Bedload Movement Mechanics, Science Press, Beijing, 1983. [钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [4] Liu Xing-nian, Non-uniform sedimat Transport Rate and its Ar-

mouring steady structure. [ 刘兴年 . 非均匀推移质输沙率及其粗  
化稳定结构[ D]. 成都科技大学硕士论文, 1996. ]

[ 5] Penkai and Cheng Yuan-xin , Incipient Motion of Non- uniformity,  
*Journal of Chengdu Science and Technique University*, 1986. [ 彭  
凯, 陈远信. 非均匀沙起动问题[ J]. 成都科技大学学报, 1986. ]

[ 6] Compiled by the River Bedload Research Office of Hydraulic and  
Electric Power Institute in Wuhan , River Bedload Engineering ,  
Hydraulic and Electric Power Press , Beijing, 1981. 武汉水利电力  
学院河流泥沙工程学教研室编著 . 河流泥沙工程[ M]. 北京: 水  
利电力出版社, 1981.

Study on Incipient Motion of Bed Material with a Wide Size Distribution

JIN Ming-hong

( Southwest Electrical Power Design Institute , Chengdu 610021 China)

**Abstract:** Based on the flume experiments, the principle of minimum energy consumption, the consideration of the effects of factors such as the fluctuation of flow, the composition of bed material , the roughness on river bed, the interaction between coarse particles and fine ones and the extent of armorng of the river bed, three pat- terns of incipient motion of bed material with a wide size distribution and corresponding formulas for their incipi- ent velocities have been established. The results calculated from these formulas agree well with the experiment data.

**Key words:** incipient velocity; roughness ; clear water scour; sediment supply