

(4) 2-5-33

1995年12月

泥沙研究
Journal of Sediment Research

第4期

回流泥沙起动规律的试验研究^{*}

刘青泉

(中国科学院力学所)

TV142.1

提 要

本文利用水槽概化模型,对回流的泥沙起动规律进行了试验研究.讨论了它与一般顺直明渠流中泥沙起动的差异,分析了回流泥沙起动的基本特性和规律,建立了回流泥沙起动的临界判别公式,经验证与试验资料吻合良好.

关键词 回流, 径向环流, 回流强度, 泥沙起动规律, 水槽概化模型,

一、引 言

回流是自然河流和水利水电工程中常见的一种副流.一般地,回流区由于水流流速较小,大多呈淤积状态.但是,当回流的运动强度大到一定程度时,回流区的床沙同样会起动,进而处于不断的运动状态,尤其是在远离回流中心的周界区域,泥沙更易起动,常常发生冲刷岸壁的现象,是工程界十分关心的一个问题.研究回流泥沙起动具有一定的工程实际意义.由于回流区水流运动的特殊性,其泥沙起动规律与在一般顺直明渠流中有明显的差异,而过去的研究大多是针对顺直明渠流的.因此,回流泥沙起动也是河流动力学中的一个基本理论课题.

本文针对回流泥沙运动,采用水槽概化模型,对回流的泥沙起动规律进行了较为细致的试验和研究.

二、试验装置简介

为了简化研究条件,我们采取科学抽象,建立了一种特殊的水槽概化模型:根据回流运动的基本特性,主要考虑回流运动的主动动力,即主流在主回流交界面的剪切作用力.用旋转的皮带代替主流,对盲肠水槽内的水体施加摩擦切力,从而在盲肠式水槽口门形成回流(见图1).该水槽长120cm,宽60cm,深20cm,采用可控硅无级变速仪,可控制直流电机的转速在0~1500转/分内实行无级变速.

该模型对研究回流泥沙起动问题有两个基本特点:第一,直流电机转速不变,则皮带施加给水体的剪切作用力也不变,使得回流运动比较稳定.改变皮带速度,回流强度随之改变.避免了一般模型中,调节主流流速要通过改变主流流量,从而影响到回流稳定性的问题,为研究回流泥沙起动创造了有利条件.第二,采用可控硅无级变速仪,可任意改变皮带速度,从而在短时间内即可任意调节回流运动强度,十分易于控制和操作.

* 本文是在武汉水利电力大学谢鉴衡教授指导下完成的,特致谢.

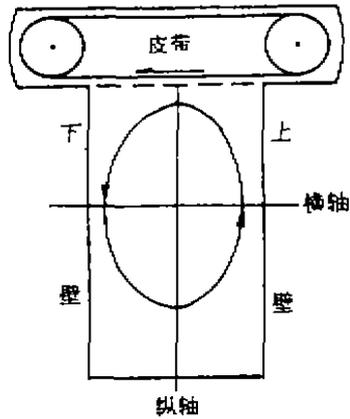


图1 试验装置示意图
Sketch of experiment device

三、回流的水流运动特性

图2所示为另一水槽模型上实测的回流垂线平均流速在平面上的分布。^[2]

回流的平面形态近似于椭圆形,长宽比约为1.5(正交盲肠回流),垂线平均流速由回流中心沿矢径向外逐渐增大;围绕回流中心的椭圆形流线上,各点的垂线平均流速大小不等,呈交替增减的变比规律;沿下壁向里的水流流速一般略大于沿上壁向口门的水流流速。流速矢量在回流横轴上近似垂直于横轴,在其它各处一般不垂直于它至回流中心的径。在不同的相对水深处,流线图大体相似,但各自的流向并不完全一致。

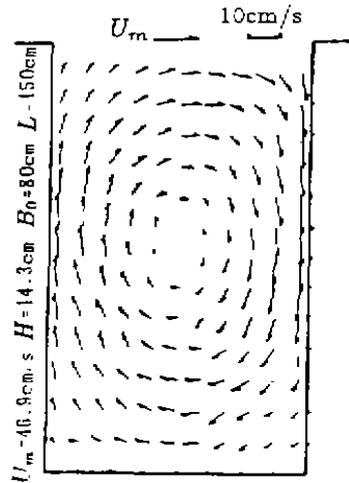


图2 回流平面流速场
Plane flow pattern of circulating flow

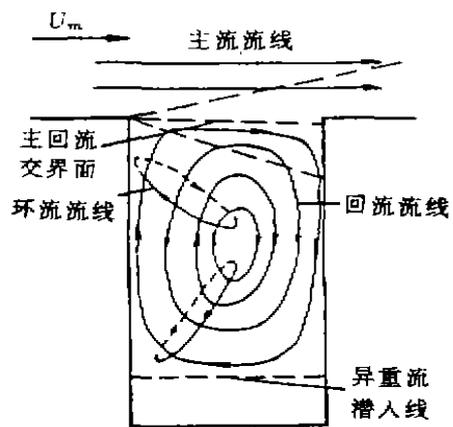


图3 盲肠回流结构示意图
Structure of circulating flow in cecum reach

盲肠回流在平面上作环形曲线运动,在离心力和重力共同作用下维持平衡。通过水流的

自动调整,使得回流中心水面降低,周界水面升高,形成外高内低的径向比降,从而在回流中产生较强的径向环流.回流中表层与底层的水流流线也不相同,表流斜向回流周界,而底流斜向回流中心,且底流具有由底向上的螺旋状运动.回流是一种十分典型的三维流动,其结构比较复杂,但为了抓住主要矛盾,对浅水情况,可以将回流结构概化为平面上的竖轴回流和以平面回流流线为轴的径向环流的叠加构成(如图3所示).当然,实际上这种叠加不是简单的线性叠加,而是非线性的复杂叠加,二者的有机组合构成了回流运动系统的三维结构.回流运动的特殊性也决定了回流泥沙起动的特殊规律.

四、回流泥沙起动规律

(一)回流泥沙起动现象

试验中,在回流区床面上铺上很薄一层均匀树脂沙,缓慢地调节回流强度,观察少量均匀沙在回流中的起动过程.

当回流强度(用横轴上的平均流速 U_m 表示)加大到一定程度时,回流内下壁区(图4中A区)的泥沙首先起动,在其它各处,泥沙仍处于静止状态.回流强度略有增大时,上壁区(B区)的泥沙也开始起动,而此时C、D区的泥沙仍处于静止状态,且在A、B区起动的泥沙一旦运动到C、D区时,则又转化为静止状态.继续加大回流强度,最后,C、D区的泥沙也开始起动,此时A、B区的泥沙已经以无法计数的方式处于不断的运动状态之中,不断的被推移到C、D区.在C、D区,泥沙间断地起动,时动时停,而一旦被推移到A、B区,泥沙又会被较快地推移到C、D区.并且回流内起动的泥沙不完全随椭圆形水流流线运动,而是在随水流方向推移的同时,不断地向回流中心偏移,形成由外向里收缩的螺旋线运动轨迹(如图5所示).

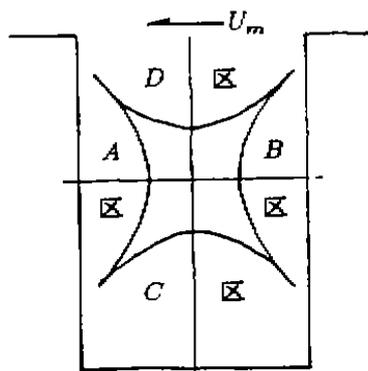


图4 泥沙起动分区图
Regions of sediment incipient motion

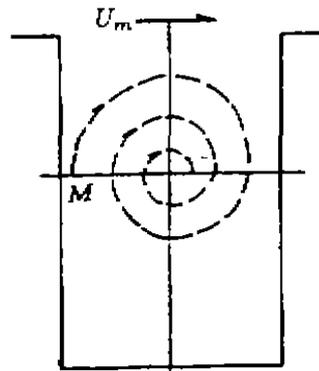


图5 推移质运动方式示意图
Sketch of bed load movement

回流区泥沙起动与一般顺直明渠流中泥沙起动比较,有如下特点:

(1) 同回流的垂线平均流速分布相对应,泥沙起动呈现分区域先后起动的特点,起动的先后次序正好与流速的大小区相对应.不同于顺直明流.回流中不同位置的泥沙起动所要求的回流强度各不相同.

(2) 回流中径向环流直接影响着泥沙的起动.受径向环流的作用,尤其是在床面附近,

径向流速较大,使得泥沙运动不同于顺直明渠流情况.泥沙除受切向水流剪切力外,同时还受到径向环流的水流剪切力作用.泥沙并不完全随同切向水流运动,而是在随切向水流前移的同时,不断向回流中心运动.

本试验中采用的是均匀树脂沙,实际情况中一般均为非均匀粒径的天然沙,有时还存在具有较大粘性的细颗粒泥沙,其起动特性与均匀树脂沙(轻质沙)是有所差异的.但是我们认为,回流中泥沙起动的特殊性,主要是由于回流的水流运动特性所决定的,可以肯定,就揭示回流中泥沙起动的特殊规律和探讨与顺直明渠流中泥沙起动的差异方面来说,所遵循的基本规律和表现的基本特性是完全一致的.

(二) 回流泥沙起动的临界标准

根据文献[1]中对泥沙起动的描述,认为床面上总是这里或那里有一些沙粒由静止转入运动,或继续处于静止状态;这里或那里总有一些沙粒由运动转入止动,或继续处于运动状态;这种情况即可作为泥沙起动的临界条件.进一步说,可将泥沙处于少量动的状态作为泥沙起动的临界标准.

试验中发现,回流区的流速分布与回流强度有着比较确定的关系.回流强度一定,各处的流速大小也一定,因此,可以寻找一个以回流强度为参数,能反映回流泥沙起动特点的临界判别标准.

以回流横轴上的平均流速表达回流强度.

$$\text{即 } U_{\text{平}} = \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} U dr, \quad r_0 \text{ 为回流的横半轴长;}$$

$$\text{而 } U = ar^b = U_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^b, (a, b \text{ 为常数}) \quad (\text{文献}[7])$$

这里 U_0 为 $r=r_0$ 处的垂线平均流速;

则

$$U_{\text{平}} = \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} U_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^b dr = \frac{U_0}{1+b}$$

即

$$U_0 = (1+b)U_{\text{平}}$$

说明 U_0 仅与 $U_{\text{平}}$ 有关,与回流的大小范围无关,只要回流强度 $U_{\text{平}}$ 确定,则回流中的最大流速 U_0 也随之确定.因此,完全可以用回流强度 $U_{\text{平}}$ 为参数来判别回流的泥沙起动.

根据回流泥沙起动的特点,泥沙一般在回流外围接近上、下壁处(横轴两端附近)首先起动.研究回流泥沙起动也主要是考虑水流对上、下岸壁的冲刷作用,因此我们认为,回流内横轴两端接近上、下壁处(A、B区)的泥沙起动即可作为特定意义上的回流泥沙起动.

试验表明,下壁区(A区)泥沙更先于上壁区(B区)泥沙起动.当B区泥沙达到个别动时,A区的泥沙已达少量动状态.由于水流在上壁区运动比较平稳,因此可进一步将B区泥沙个别动的临界条件,作为回流泥沙起动的临界条件.

(三) 试验成果及分析

共取六组不同比重、粒径的均匀沙进行起动试验.在回流中选8点,分别对个别动、少量动及大量动三种起动状态的起动流速进行测量,结果详见文献[2],表1列出了少量动试验结果(测点坐标,以上口门为原点,主流方向为 x 方向,沿盲肠口门向里为 y 方向).

将其中一组沙($\rho_s=1.42\text{t/m}^3, d=0.25\sim 0.35\text{mm}$)的试验结果,与长办顺直水槽中的轻

质沙起动试验结果^[4]进行对比(见表2),可见泥沙在回流区较在顺直明渠流中更易起动。当然,试验中人为的观测标准不同,沙粒级配不同,都会带来一些差异,但根本原因则与回流自身的运动特点有关。

表1 少量动状态的平均流速表

Average velocity of sediment incipient motion (in small amount)

测 点		各粒径组沙(mm)少量动状态的平均流速(cm/s)					
x (cm)	y (cm)	$\gamma_1=1.42$ $d=0.30$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.40$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.52$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.68$	$\gamma_2=2.65$ $d=0.30$	$\gamma_2=2.65$ $d=0.40$
55	45	9.4	10.4	11.5	12.2	19.8	20.7
55	55	9.5	10.4	11.4	12.3	19.8	20.6
5	45	10.4	11.2	12.9	13.0	20.5	21.5
50	70	9.9	11.0	11.8	12.7	20.2	21.2
45	60	10.0	11.0	11.8	12.6		
10	65	10.2	11.0	11.9	12.7		
15	80	10.1	10.9	11.9	12.6		
20	30	10.0	10.9	11.9	12.6		
平 均		9.9	10.9	11.8	12.6	20.1	21.0

注:盲肠水槽 长 $L=120\text{cm}$ 宽 $B=60\text{cm}$ 水深 $H=10\text{cm}$

表2 回流区与顺直水槽泥沙起动对比表

Comparison of incipient velocities between circulating and straight channel flows

试验 条件	粒径 d (mm)	水深 H (cm)	各动状态临界流速 (cm/s)		
			个别动	少量动	大量动
回流区	0.25~0.35	10	8.3	9.9	14.5
顺直水槽	$d_{50}=0.24$	15	12.7	16.1	18.3

回流中,水流除了具有切向流速外,还具有径向流速,且靠近河底,径向流速较大。床面上的沙粒除了受到切向水流的剪切力作用外,还受到径向水流的剪切力作用。根据张瑞瑾的研究^[5],环流中取 $k=0.4$, $\sqrt{g}/ck=0.125$,代入 Россински. К. И 公式有: $V_r|_{\gamma=0.99}/U=5.83 H/r$, (各符号意义同 Россински. К. И 公式)。该式表明,底部的径向流速 V_r 与切向垂线平均流速 U 成正比,且可达到一定的数值。由于沙粒的起动与底部水流的流速直接相关,假设回流中切向垂线平均流速与顺直水槽中的垂线平均流速相同,则回流底部水流对沙粒的作用流速较顺直水槽中底部水流的作用流速要大,沙粒也就更易起动。回流中大尺度的紊动影响,也促使泥沙更易起动。

表3 各组沙在上、下壁区不同起动状态的回流强度

Circulating flow strength of different states of incipient motion

起动区	起动 状态	回流强度 (cm/s)					
		$\gamma_1=1.42$ $d=0.25$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.35$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.45$	$\gamma_1=1.42$ $d=0.60$	$\gamma_2=2.65$ $d=0.25$	$\gamma_2=2.65$ $d=0.35$
		~0.35	~0.45	~0.60	~0.75	~0.35	~0.45
下壁区 (A区)	个别动	5.2	5.7	6.2	6.6	10.3	11.0
	少量动	6.5	6.8	7.5	7.9	12.9	13.5
上壁区 (B区)	个别动	5.9	6.4	7.2	8.0	11.7	12.2
	少量动	7.2	7.7	8.3	9.0	14.1	14.8

注:其中 γ 单位: t/m^3 , d 单位: mm

从表1中还可发现,在达到同样的起动状态时,泥沙在 C、D 区要求的起动流速较 B 区要略小一些,这主要是由于 C、D 区的流线曲率半径小,径向流速的作用更显著所造成的。在

同一矢径上也有类似的规律,即越靠近回流中心,流线曲率半径越小,泥沙起动所需的切向流速也越小.然而,A区的泥沙起动流速小,主要是由于水流波动剧烈,使泥沙更易起动所致.

用回流强度 U_{∞} 作参数,分析回流泥沙起动.表3即为针对A、B区个别动和少量动状态的实测结果.从表可看出,随着泥沙粒径和重率的增大,各种起动状态所对应的回流强度也相应增大.

五、回流泥沙起动的判别公式

根据上述分析,回流中散粒体泥沙的起动与一般顺直明渠流中的差异主要在于,回流中多受一项径向水流切应力的作用,而径向切应力的大小,是与切向垂线平均流速,水深及曲率半径直接相关的.

参照文献[1],散粒体泥沙的近底起动流速为

$$U_* = \left(\frac{2k_3 a_3}{k_1 C_D a_1 - k_2 C_L a_2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (1)$$

式中 C_D 、 C_L 为推移力及上举力系数; a_1 、 a_2 为垂直于水流方向及铅直方向的沙粒面积系数; a_3 为沙粒的体积系数; k_1 、 k_2 、 k_3 为推移力、上举力及沙粒水下重力的作用力臂系数; d 为沙粒粒径; γ_s 为沙粒容重.该式的详细推导参见文献[1]P38.

一般情况下,近底作用流速 U_b 的测量十分困难,多数采用水流的垂线平均流速来代替.在回流中如何实现垂线平均流速与近底作用流速的转化呢?这正是问题的关键所在.

将回流中水流的近底作用流速 U_b 看作切向作用流速 U_{*t} 与径向作用流速 U_{*r} 的合成

$$U_b = \sqrt{U_{*t}^2 + U_{*r}^2} \quad (U_{*t} \perp U_{*r}) \quad (2)$$

切向流速 U_{*t} 和径向流速 U_{*r} 在回流中的垂线分布规律是一个很复杂的问题,就现有资料和研究现状还难以较准确地解决这一问题.对于回流的泥沙起动,研究重点在于横轴两端附近,因此判别回流泥沙起动也仅限于上、下壁区的横轴两端附近.在回流横轴两端附近,水流流线曲率较小,水流比较平顺,可将它近似作为二度渐变流来处理.在实际工程中,回流一般都较大,曲率半径相对于水深要大的多,作这样的近似处理,误差并不会太大.

设切向流速沿垂线符合指数分布,即有

$$U_{*t} = U_* \frac{y^m}{h} \quad (3)$$

式中 U_* 为 $y=h$ 处水流的切向流速; h 为水深; m 为指数; U_{*t} 为距河底 y 处的切向流速.

由此可得切向垂线平均流速

$$V = \frac{U_*}{h} \int_0^h \left(\frac{y}{h}\right)^m dy = \frac{U_*}{1+m}$$

$$U_* = (1+m)V$$

得

$$U_b = (1+m)V \left(\frac{y}{h}\right)^m \quad (4)$$

若取 $y=ad$ (a 为小系数, d 为沙粒直径) 处的流速作为切向水流作用于沙粒上的平均流速,则

$$U_* = (1+m)\alpha^n V \left(\frac{d}{h}\right)^m \quad (5)$$

对于径向流速 U_r , 采用文献[2]P37中导出的径向流速沿垂线分布的近似公式(2.5.21)

$$U_r = 5.18 \sqrt{\frac{h}{r}} V \cdot f(\eta), \quad (6)$$

其中

$$f(\eta) = 0.305 - (1 - \eta^{1/3})^{3/2} (0.457 - 0.69\eta^{1/3} + 0.86\eta^{2/3})$$

仍取 $y=ad$ 处的流速为径向水流作用于沙粒的平均流速, 有

$$f(\eta) \approx -0.152 \quad (y \ll h, \eta \ll 1)$$

$$U_{*r} = -0.787 \sqrt{\frac{h}{r}} V \quad (r \text{ 为曲率半径}) \quad (7)$$

将式(5), (7)代入式(2)得

$$U_* = \sqrt{(1+m)^2 \alpha^{2m} \left(\frac{d}{h}\right)^{2m} + 0.619 \frac{h}{r}} V \quad (8)$$

有

$$U_* = \sqrt{(1+m)^2 \alpha^{2m} \left(\frac{d}{h}\right)^{2m} + 0.619 \frac{h}{r}} V_c \quad (9)$$

将上式代入(1)式, 并化简得

$$V_c = k \left[\left(\frac{d}{h}\right)^{2m} + \frac{0.619}{(1+m)^2 \alpha^{2m}} \frac{h}{r} \right]^{-1/2} \sqrt{\frac{\gamma_c - \gamma}{\gamma} g d} \quad (10)$$

其中

$$k = \frac{1}{(1+m)\alpha^n} \left(\frac{2k_1 a_1}{k_1 C_D a_1 + k_2 C_L a_2} \right)^{1/2}$$

按照沙莫夫泥沙起动试验结果, 取 $m = \frac{1}{6}$, $\alpha = \frac{2}{3}$, $k = 1.14$, 则有

$$V_c = 1.14 \left[\left(\frac{d}{h}\right)^{1/3} + 0.52 \frac{h}{r} \right]^{-1/2} \sqrt{\frac{\gamma_c - \gamma}{\gamma} g d} \quad (11)$$

此式即为回流中以切向垂线平均流速 V 为参数的泥沙起动的临界判别式。

以回流强度 U_{*r} 为参数, 表达回流泥沙起动的临界条件。具体考虑, 在上壁区 $r=r_0$ (横轴端点) 处的垂线平均流速 $V_0 = V_c$ 时, 回流泥沙起动。

V_0 与回流强度 U_{*r} 成确定比例关系, U_{*r} 一定, V_0 亦随之确定, 徐建益曾根据试验得到^[2]

$$U_{*r} = 0.69V_0$$

取曲率半径 r 为近似流线方程 $x^2 + \frac{1}{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{R}{r_0}\right) + 1\right]} y^2 = R^2$ (见文献[6]) 中 $R=r_0$ 时的曲

率半径, 则可求得 $r = 2.25r_0$ 。

代入式(11)得

$$U_{*r} = 0.786 \left[\left(\frac{d}{h}\right)^{1/3} + 0.24 \frac{h}{r_0} \right]^{-1/2} \sqrt{\frac{\gamma_c - \gamma}{\gamma} g d} \quad (12)$$

此式即为用回流强度为参数表达的特定意义上的回流泥沙起动的临界判别式。

在应用公式(11)、(12)时, 应注意公式推导中的一个重要假定, 就是在回流横轴两端附

近,水流比较平顺,可近似将水流看作二度渐变流。一般地,在回流横轴两端附近,此条件是较容易近似满足的,但对回流中其它部位,则要对流速分布公式进行分析,具体情况具体运用。

在本试验中,回流横半轴 $r_c = 30\text{cm}$,水深 $H = 10\text{cm}$,依照式(12),用本试验资料进行验证,结果如图6所示。可见计算值与实测值符合良好,说明公式(11)及公式(12)的结构形式是合理的,能够较好地反映回流泥沙起动的特点。

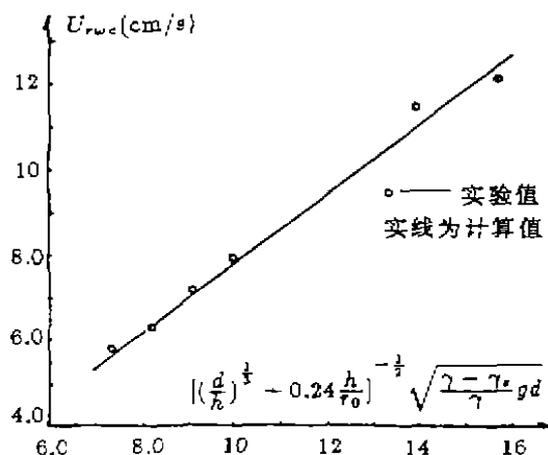


图6 起动回流强度验证图

Verification on sediment incipient motion

六、结 语

本文是对回流泥沙起动规律的初步探讨,所得出的结论以定性结论为主,丰富了河流动力学中泥沙起动的研究内容,为揭示回流区的泥沙运动机理打下了一定的理论基础。我们认为影响回流泥沙起动的一个特殊因素,就是回流中存在着复杂的径向环流。对回流内径向环流的认识还很不够,有待于作进一步的试验研究和理论分析,以期能更合理地根据回流运动的特点来分析回流的泥沙起动特性。

参 考 文 献

- [1]武汉水利电力学院泥沙教研室编,河流泥沙工程学(上册).水利出版社,1980年12月。
- [2]刘青泉,盲肠河段回流区及主、回流过渡区的水沙运动规律,武汉水利电力大学博士学位论文,1993年4月。
- [3]H·A·米哈依诺夫,泥沙运动的研究,泥沙研究,1957年第2期。
- [4]长江水利水电科学院,几种模型沙的起动流速试验,1973年。
- [5]张瑞瑾,论环流结构与河道演变的关系,高等学校自然科学学报(土木、建筑、水利版),1964年4月。
- [6]刘青泉,回流水沙运动规律的试验研究,武汉水利电力学院硕士论文,1990年6月。
- [7]徐建益,盲肠河段口门回流水沙运动机理的试验研究,武汉水利电力学院硕士论文,1984年。

Experimental study on the sediment incipient motion in circulating flow

Liu Qingquan

(Institute of Mechanics, CAS)

Abstract

A special testing flume is used to study the sediment incipient motion in circulating flow. The experimental phenomena show that the law of sediment incipient motion in circulating flow is different from that in straight channel flow. The property of sediment incipient motion in circulating flow has been analysed. Based on the theoretical derivation, a formula for calculating velocity of sediment incipient motion has been proposed, and a good agreement between the calculated and experimental data is obtained.

Key words circulating flow, radial circulation, circulating flow strength, sediment incipient motion.

《水动力学研究与进展》征订

《水动力学研究与进展》由全国40多个高等院校和科研单位联合主办,海洋出版社出版。国内统一刊号:CN31-1399(中文版,A辑);CN31-1563(英文版B辑),两版内容不相同。

本刊是国家科委正式批准的全国性学报类学术刊物,国内外公开发售。主要刊载能源开发、海洋工程、船舶工程、水利工程、机械工程、反应堆工程、石油化学工程、环境工程、生物工程等方面有关物理模型、数值模拟、试验研究、试验技术新成果以及学科介绍、研究简讯等文章。

《水动力学研究与进展》刊出的学术论文在美国《工程索引》、《数学评论》、《应用力学评论》、德国《数学文摘》等国际权威文摘刊物中都有摘录。已被美国《应用力学评论》定为“核心期刊”,美国《工程索引》定为该刊选录的17种中国科技期刊之一,国际核心期刊研究会定为“中国自然科学核心期刊”(名列第71名),北京高校图书馆期刊工作研究会定为“中文核心期刊”,中国科技信息研究所定为“统计用中国科技期刊”。

本刊重视学术论文的水平和质量中国科协周培源基金国际交流委员会已决定从《水动力学研究与进展》发表过的论文中评选周培源优秀水动力学论文。1996年征订工作已经开始,订价:A辑,全年6期,30元;B辑,全年4期,40元。订购处:《水动力学研究与进展》编辑部(上海高雄路185号,200011)。

《水动力学研究与进展》编辑部