

浑水泥沙含量对矩形槽水位流量关系影响的实验研究

林性粹 胡书红

(西北农业大学·陕西杨陵·712100)

蒋定生 张学栋

(中国科学院水利部西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

摘 要 浑水与清水的水流特性有差异。但实验分析研究结果表明,在本实验条件下(比降 1/82,有机玻璃矩形槽,含沙量 $0\sim 245.5\text{kg/m}^3$,流量 $<5.0\text{l/s}$,槽内水流属粗糙紊流急流流态,且距槽尾 47~102cm 的槽段为恒定均匀流),含沙量未对实验槽的糙率及水位流量关系产生影响,槽内也未产生泥沙淤积,从而精确地确定了清水和浑水的糙率及其相应的水位流量关系计算公式,可供土壤侵蚀,模拟模型测定水土流失量应用。本文就含沙量对糙率和水位流量关系影响的初步分析和探讨,可供有关研究参考。

关键词 浑水 含沙量 流态 水位流量关系

Impact of Silt Concentration in Mud Water on Relation between Water—level and Flow Volume

Lin Xingchui Hu Shuhong

(Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Jiang Dingsheng Zhang Xuedong

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract Flow characteristics of mud water and clear water are different. But the results of experimental analysis and research showed; at the experimental conditions (descending ratio is 1/82 in rectangle channel made in plastic glass, silt concentration is $0\sim 245.5\text{kg/m}^3$, flow volume is less than 5 l/s, water flow is flow pattern of rough and turbulent flow in the channel, but flow pattern of 47~102cm distance to channel end is steady and uniform flow), silt concentration did not affect on roughness in the channel and relation between water level and flow volume, silt deposition in the channel did not produce. And calculation formulas for roughness of clear water and mud water and their relation of water level and flow volume have been precisely established. Those formulas can be used to determine soil loss in soil erosion simulation model. Impact of silt concentration on roughness and relation between water level and flow volume can be reference in related research.

Key words mud water silt concentration flow pattern relation between water level and flow volume

1 前言

浑水系指泥沙颗粒与水的二相混合物,其组成相当复杂。浑水中泥沙颗粒的大小和形状及悬移质的级配对浑水的物理力学性质有很大的影响。特别是粘性泥沙颗粒(直径 $0.005\sim 0.01\text{mm}$)对胶化性质起主要作用,而胶化作用又影响浑水的流变性、阻力、絮凝作用和群体沉速等性质。已有的研究表明,浑水中粘粒泥沙颗粒含量通常不随含沙量的增加而成比例的增加,一般均趋近于稳定和常数。对于高含沙浑水水流,其中粗泥沙颗粒通常都有一定的级配关系。粗颗粒泥沙主要提高含沙量的重量,而细颗粒泥沙则起改变浑水的作用。

浑水含沙量的定义是,一定量的浑水中所含泥沙的数量,通常有三种表示方法:

(1)容重含沙量(S)

$$S = \frac{W_s}{V}, \quad \text{kg/m}^3 \quad (1)$$

(2)体积比含沙量(S_v)

$$S_v = \frac{V_s}{V} \times 100, \quad \% \quad (2)$$

(3)重量比含沙量(S_c)

$$S_c = \frac{W_s}{W} \times 100, \quad \% \quad (3)$$

式中: W_s 为浑水中的泥沙重量(kg); V 为浑水体积(m^3); V_s 为浑水中的泥沙体积(m^3); W 为浑水重量(kg),工程中一般多采用容重含沙量表示,三种含沙量之间关系如下式

$$\gamma = \gamma_0 + (\gamma_s - \gamma_0)S_v \quad (4)$$

式中: γ 、 γ_0 和 γ_s 分别为浑水、清水和泥沙的容重(kg/m^3),据研究,清水或低含沙水水流的流变性均服从于“牛顿体”规律,即

$$\tau = \mu_0 \frac{du}{dy} \quad (5)$$

式中: τ 为水流牛顿体剪应力; μ_0 为清水的运动粘滞系数; $\frac{du}{dy}$ 为距离管壁 y 处的流速梯度。

当含沙量,特别是细颗粒泥沙含量超过一定数量后,浑水的流变性将发生质变,不再服从“牛顿体”规律,而服从于“宾汉体”规律,即

$$\tau = \tau_B + \tau \frac{du}{dy} \quad (6)$$

式中: τ_B 为水流宾汉体极限剪应力; τ 为浑水的刚度系数,或称塑性粘度;其余符号意义同(5)式。高含沙浑水水流必须在克服了 τ_B 之后,才能像牛顿体水流那样流动。

目前,国内外在水资源管理,水土保持及农田灌溉和排水等领域中测量流量的试验研究多以清水为对象,浑水流量测量则完全应用清水流量所取的成果。但是,如前所述,浑水与清水的水流特性有区别,而这种差异是否会影响到流量测量的精度,尚未见有详尽的报导。为此,本实验结合“中国科学院、水利部西北水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅”径流泥沙自动采集系统研究项目,为观测室内土壤侵蚀模型的水土流失量建立精度较高的水位—流量的关系,同时探讨不同含沙量的浑水对矩形槽中水位流量关系的影响,并研究其与清水比较在流量测量中的误差大小。

2 实验材料、装置及方法

依照该实验室模拟降雨大厅径流泥沙自动采集系统研究项目要求,土壤侵蚀模型实验用的土料为黄土类土壤,本实验选用埴土作泥沙土料。水土流失流量小于 5l/s ;量测水土流失量的集流矩形槽为有机玻璃板(厚 5mm)槽,长 200cm ,宽 5.0cm ,高为 12cm 。

本实验装置采用自循环水流系统,见图1。当 $S < 80\text{kg/m}^3$ 时,选用 $1\frac{1}{2}\text{B}-17$ 型泵; $S > 80\text{kg/m}^3$ 时,选用 $2\text{B}-31$ 型泵,蓄水池为水泥砂浆抹面之砖砌矩形槽,尺寸为 2.5m (长) \times 1.0m (高) \times 0.4m (宽),保证蓄水深度 $>0.8\text{m}$ 。供水箱也为水泥砂浆抹面之砖砌池,尺寸为 1.0m (高) \times 0.6m (宽) \times 0.6m (长),有效容积为 0.216m^3 ,保证供水水头为 0.6m 。向有机玻璃实验水槽供水的管嘴,经出流验算确定,采用 5cm 钢管。供水箱内的溢流管选用 6.3cm 钢管接塑料软管插入蓄水池中。

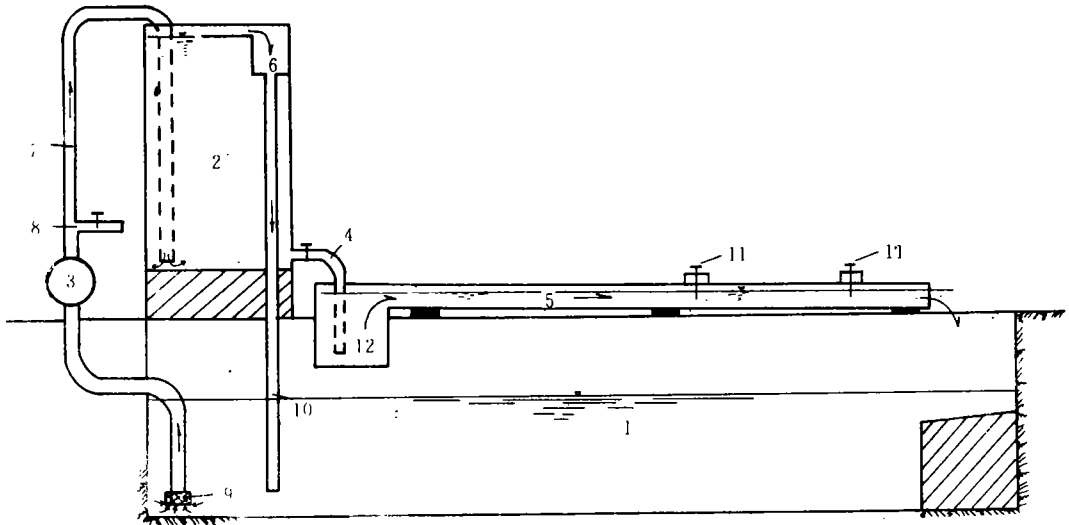


图1 自循环水流系统实验装置示意图

1. 蓄水池 2. 供水箱 3. 水泵 4. 供水管 5. 有机玻璃矩形槽 6. 回水箱 7. 压水管
8. 三通 9. 底阀 10. 溢水管 11. 水位测针位置 12. 稳水箱

有机玻璃矩形槽中水深采用灵敏度较高的水位测针(精度 0.01mm)测读、流量采用体积法,应用塑料桶(容积 15L)、量杯、磅称和计时秒表(精度 0.01s)量测,浑水含沙量采用常规法,量取 500ml 左右浑水,澄清 12h 以上,然后烘干用天平(精度 0.02g)称量泥沙重量,并应用(1)式计算。实验中,水深、流量和含沙量必须同步量测,每次平行取样或平行读数据三个,其间相对误差小于 5.0% 时,求均值作为分析不同含沙量水位流量关系的依据资料。本实验研究作为不同含沙量浑水使用的土料也为黄土类型的埴土,经风干并用 0.5cm 粗筛过筛后,应用比重瓶法及土工试验常规颗粒分析法实测得知,土粒比重 γ_s 为 $2.709 \times 10^3\text{kg/m}^3$;颗粒分析粒径在 $0.008\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ 之间的颗粒约占总量的 60% ,其中 $d_{50} = 0.017\text{mm}$,见图2。不同含沙量的浑水按预先计算好的加土量随机加入供水箱中,每次量测时需充分搅拌蓄水池和供水箱内的泥沙,以尽量保证量测时含沙量基本保持均匀和稳定。

实验时,有机玻璃矩形槽中的水深和流量系按由大到小和由小到大的顺序,用供水箱上的供水

管嘴闸阀控制,而每次测读水深值和量测流量值及含沙量时均待槽中水位稳定后进行,以保证和量测具有较高的精度。

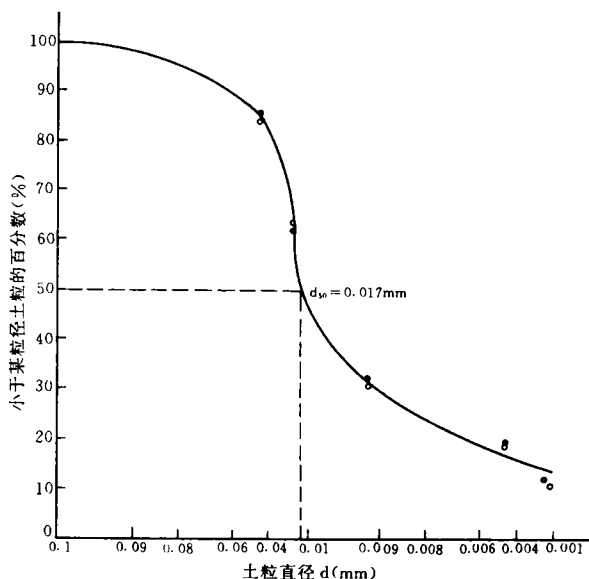


图2 实验土料颗粒分析图

55cm的槽段上,其水流形态可视为均匀流。因此,本实验选定水位测针安装的断面位置,测针1#距槽尾不得小于47cm,测针2#距槽尾不得大于102cm。

3.2 实验槽中水流流态的判别

依水动力学原理知,实际水流由于粘滞性存在而具有层流和紊流两种流动形态,并可用雷诺数(Re)予以判别

$$Re = \frac{VR}{\gamma}$$

式中 V 为流速, m/s ; R 为水力半径, m ; γ 为运动粘滞系数, m^2/s , 与水温有关。本实验、清水(含沙量 $S=0$)时,通过实验槽的最大流速 $V=0.957m/s$,相应的水力半径 $R=0.1858m$,实验时的水温为 $13^{\circ}C$,其中 $\gamma=1.207 \times 10^{-6}m^2/s$;所以

$$Re = \frac{0.957 \times 1.858}{1.207 \times 10^{-6}} = 147\,300 \gg 2300$$

故槽中水流属粗糙紊流。

重力对流态的影响,通常用弗劳德数 Fr 判别,即

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (8)$$

式中: h 为槽中水深, m ; g 为重力加速度, $g=9.81m/s^2$; V 为流速, m/s 。本实验,清水时, $V=0.957m/s$ 的相应水深 $h=0.0679m$,所以 $Fr=0.957/\sqrt{9.81 \times 0.0679}=1.195 > 1.0$ 故槽中流态属急流。

本实验槽, $i=1/82$,清水时,经实测验算,在所测定的流量范围内,其水流均属粗糙紊流急流流态。实际观测,距槽尾47cm到槽出口,其水面线具有明显的下降趋势;距槽尾102cm到槽进口,其水

3 实验结果及其分析

3.1 实验槽底比降的调整及水位测针位置的确定

“模拟降雨大厅径流泥沙自动采集系统”研究项目要求,有机玻璃集流槽内不允许产生泥沙淤积现象。为此,本实验参考西北水科所有有关明渠水槽泥沙实验研究成果资料,经实际观察比降为 $1/30 \sim 1/100$ 条件下有机玻璃槽中水流的泥沙淤积情况,并仔细调整,最后确定有机玻璃不发生淤积和适宜比降为 $1/82$ ($i=0.012195$)。

为了尽可能充分利用水动力学中的恒定均匀流计算公式,本实验在槽底比降已确定($i=1/82$)的情况下,实际放水观测各种含沙量和不同流量下的浑水沿槽长(2.0m)的水流形态和水深,从而确定,在距槽尾端102~47cm之间的长

面线初始下降而后又有回升。只有距槽尾47cm~102cm之间的槽段,水面线与槽底基本平行,水深大致不变,水流属均匀流。

据已有的泥沙实验研究,高含沙浑水水流同样具有层流和紊流、急流和缓流等流态的区分。其判别数仍为雷诺数和弗劳德数。

在明渠条件下,高含沙浑水水流服从于“宾汉体”规律的雷诺数 Re 可用下式计算

$$Re = \frac{4\gamma hV}{g(\eta + \tau \frac{\tau_B h}{zV})} \quad (9)$$

式中: γ 为浑水容重, kg/m^3 ; h 为平均水深, m ; V 为断面平均流速度, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; η 为塑性粘度, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; τ_B 为宾汉体极限剪应力, kg/m^2 。

据本实验实测资料,当 $S = 218 \text{kg}/\text{m}^3$, $Q = 2.72 \text{l}/\text{s}$ 时,其 $h = 0.056 \text{m}$, $\gamma = 0.978 \text{m}/\text{s}$; γ 取 $1,137 \text{kg}/\text{m}^3$ 。参考西北水科所的泥沙实验研究成果

$$\eta = \frac{0.63S + 1000}{1000(1 - 1.33 \times 10^{-3} \beta^{0.362} S)} \cdot \eta_0 \quad (10)$$

式中: η 、 η_0 分别为同温度下的浑水和清水的刚度系数(塑性粘度);清水,水温 13°C 时, $\eta_0 = 0.125 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。 β 为泥沙粒径小于 0.025mm 的重量和占全部泥沙的百分数,由图2知,本实验 $\beta = 0.69(69\%)$ 。所以

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{0.63 \times 218 + 1000}{1000(1 - 1.33 \times 10^{-3} \times 0.69^{0.362} \times 218)^{1.4}} \times 0.125 \times 10^{-3} \\ &= 0.214 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

宾汉体极限剪应力 τ_B 也采用西北水科所的泥沙实验研究成果计算,即

$$\tau_B = 0.125\beta \times (s \times 10^{-3})^{1.732} \quad (11)$$

式中符号意义同前,则

$$\tau_B = 0.125 \times 0.69 \times (218 \times 10^{-3})^{1.732} = 0.0617 \text{kg}/\text{m}^2$$

于是,

$$R_r = \frac{4 \times 1137 \times 0.056 \times 0.978}{9.81(0.214 \times 10^{-3} + \frac{0.0617 \times 0.056}{2 \times 0.978})} = 12824 \gg 2300$$

故在高含沙浑水条件下,实验槽水流仍为粗糙紊流。而其弗劳德数

$$Fr = \frac{0.978}{\sqrt{9.81 \times 0.056}} = 1.32 > 1.0$$

故实验槽高含沙浑水水流,在 $i = 1/82$ 时,亦为急流流态。

3.3 有机玻璃实验槽的糙率分析与确定

如前分析所述,本实验有机玻璃矩形槽在实测的流量和含沙量范围内,槽底比降为 $1/82$ 时,槽内水流均属粗糙紊流急流流态,但在两水位测针断面间的槽段则可视作恒定均匀流。因此,可应用均匀流谢才公式计算,即

$$Q = A c \sqrt{R i}$$
(12)

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 , $A = b h$, (式中 b 为槽宽, $b = 0.05\text{m}$, h 为水深, m); R 为水力半径, m , 矩形槽, $R = \frac{bh}{b + 2h}$; i 为比降, $i = 1/82$; C 为谢才系数, 采用曼宁公式计算, 即

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$
(13)

式中 n 为糙率。

$$n = b \cdot \frac{h^{5/3}}{(b + 2h)^{2/3}} \cdot (i)^{1/2} / Q$$
$$= 0.000\ 748\ 7 \frac{h^{5/3}}{(0.05 + 2h)^{2/3}} / Q$$
(14)

实测清水和不同含沙量下浑水的 h 与 Q 的数据共156组, 经微机处理并采用格拉布斯法检验后, 按(14)式计算得出符合精度要求的糙率平均值 \bar{n} 列入表1中。

由表1可知, 矩形槽在实测的各种含沙量组合范围内, 其浑水的糙率均与清水的糙率相接近, 最大相对误差仅为2.7%。因此, 在本实验量测的流量范围内完全可以采用清水的糙率值 ($\bar{n} = 0.008\ 032$) 来代替浑水的糙率值 ($\bar{n} = 0.008\ 025$); 含沙量的存在并未对有机玻璃矩形槽的糙率产生影响。

表1 有机玻璃矩形实验槽的糙率 \bar{n}

实测数据组数 (N)	容重含沙量 ($S, \text{kg}/\text{m}^3$)	平均糙率 (\bar{n})	标准差 ($\sigma_n - 1$) %	变异系数 ($\sigma_n - 1/\bar{n}$) %	与清水($S=0$)比较 的相对误差, %
17	2.00~10.00	0.00825588	0.029	3.5	2.7
62	10.01~50.00	0.00796839	0.039	4.9	0.9
21	50.01~100.00	0.00789381	0.035	4.4	1.7
29	100.01~150.00	0.00809138	0.049	6.0	0.7
9	150.01~245.50	0.00807778	0.055	6.8	0.5
16	0(清水)	0.00803200	0.021	2.6	
79	2.00~50.00	0.00803025	0.039	4.8	0.03
100	2.00~100.00	0.00800160	0.038	4.7	0.40
129	2.00~150.00	0.00802132	0.041	5.1	0.10
138	2.00~245.50	0.00802500	0.042	5.2	0.09

3.4 实验矩形槽的水位流量关系曲线。

将表1中的 \bar{n} 值代入(14)式, 对于清水 ($S = 0.0\text{kg}/\text{m}^3$), 则水位流量关系为

$$Q_{n1} = 0.093\ 21 \times h^{5/3} / (0.05 + 2h)^{2/3}$$
(15)

对于浑水 ($S = 2.00 \sim 245.4\text{kg}/\text{m}^3$), 则为

$$Q_{n2} = 0.093\ 29 \times h^{5/3} / (0.05 + 2h)^{2/3}$$
(16)

式中: h 为水深, m ; Q 为流量, m^3/s 。 Q_{n1} 与 Q_{n2} 相对误差 $< 1.1\%$, 见图3和表2。

实验数据经微机处理并优选经验公式, 其水位流量关系均为二次抛物线型(见图3)。清水时

$$Q_1 = -0.185\ 5 + 0.411\ 9h + 0.014\ 28h^2, \quad R = 0.999\ 3$$
(17)

浑水时

$$Q_2 = -0.297\ 8 + 0.496\ 1h + 0.003\ 94h^2, \quad R = 0.996\ 2$$
(18)

式中: h 为水深, cm ; Q 为流量, l/s 。

由表2可知,(17)式与(18)式及与(15)式相比较,当 $Q>5.0\text{l/s}$ 时,其相对误差均超过了 5.0% ;说明,二次抛物线(17)式精度稍低。(18)式虽与(16)式比较,相对误差未 $>5.0\%$,但当 $h<1.3\text{cm}$ 时,其流量相对误差不符合精度要求。因此,本实验,清水时以采用(15)式和浑水时采用(16)式,其水位流量关系密切,精度高,符合量水对误差的要求。

表2 4种水位(h)流量(Q)关系公式的比较

h (cm)	2	4	6	8	10	备注
$Q_{n1}(\text{l/s})$	0.684	1.699	2.792	3.917	5.059	$S=0\text{ kg/m}^3$
$Q_{n2}(\text{l/s})$	0.684	1.700	2.795	3.921	5.063	$S=2.0\sim245.4\text{ kg/m}^3$
$Q_1(\text{l/s})$	0.695	1.691	2.799	4.023	5.361	$S=0\text{ kg/m}^3$
$Q_2(\text{l/s})$	0.710	1.749	2.820	3.923	5.057	$S=2.0\sim245.4\text{ kg/m}^3$
$ Q_{n1}-Q_{n2} /Q_{n1}(\%)$	0.00	0.06	1.07	1.02	0.08	
$ Q_1-Q_2 /Q_1(\%)$	2.16	3.42	0.75	2.48	5.67	
$ Q_{n1}-Q_1 /Q_{n1}(\%)$	1.67	0.50	0.29	2.72	5.97	
$ Q_{n2}-Q_2 /Q_{n2}(\%)$	3.80	2.88	0.89	0.06	0.11	

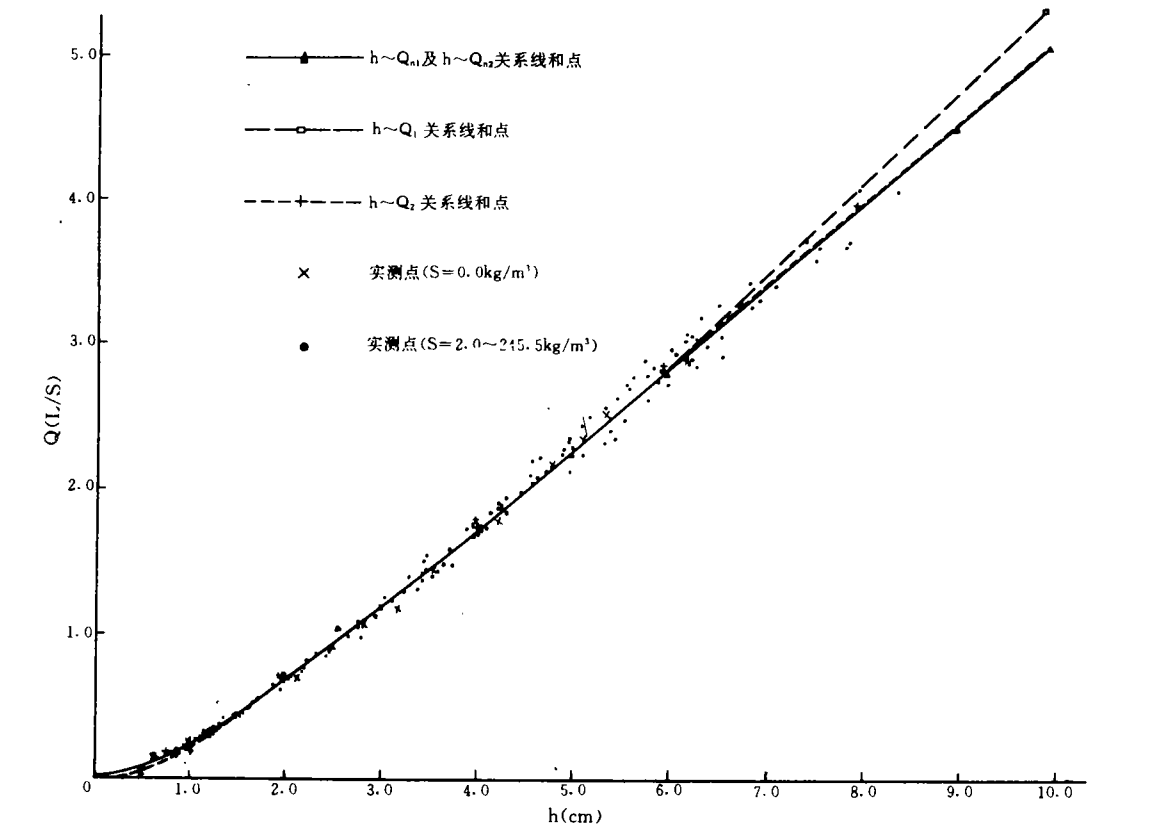


图3 有机玻璃矩形实验槽h~Q关系曲线

4 结论

4.1 为使测定土壤侵蚀模型水土流失量的有机玻璃矩形槽内不发生淤积,经实际观测调整,确定在所研究的含沙量和流量范围内,其槽底适宜比降为 $1/82$ 。

4.2 经实测分析,该矩形槽中,清水和浑水的水流均属粗糙紊流急流流态;但在距槽尾 47cm

到102cm的槽段内水流是恒定均匀流。为方便应用水力学中恒定均匀流计算公式,两水位测针安置的位置必须距槽尾 $>47\text{cm}$ 及 $<102\text{cm}$ 处。

4.3 实测水位流量数据,经微机数据处理和采用格拉斯法检验,清水16对,剔除粗大误差可疑值2对,浑水140对,剔除5对,其余数均符合量测精度(5.0%)的要求。

4.4 经分析研究,有机玻璃矩形槽的平均糙率,清水时($S=0.0\text{kg}/\text{m}^3$), $\bar{n}_1=0.008\ 032$;浑水时($S=2.0\sim 245.5\text{kg}/\text{m}^3$), $\bar{n}_2=0.008\ 025$,两者非常接近,相对误差仅为0.09%。表明,含沙量对本实验槽的糙率未产生影响。

对应于糙率的水位流量关系,清水时

$$Q_{n1} = 0.093\ 21h^{5/3}/(0.05 + 2h)^{2/3}$$

浑水时

$$Q_{n2} = 0.093\ 29h^{5/3}/(0.05 + 2h)^{2/3}$$

两者相对误差 $<1.1\%$ 。

4.5 经微机处理优选经验公式,其均为二次抛物线关系,清水时

$$Q_1 = -0.185\ 5 + 0.4119h + 0.014\ 28h^2, \quad R = 0.999\ 3$$

浑水时

$$Q_2 = -0.297\ 8 + 0.496\ 1h + 0.039\ 4h^2, \quad R = 0.996\ 2$$

通过比较分析,本实验有机玻璃矩形槽的水位流量关系,清水以采用 $h\sim Q_{n1}$ 关系及浑水采用 $h\sim Q_{n2}$ 关系,计算误差小,更符合量水精度要求。

通常,清水在固定边界上流动时,其糙率可视为一定值,而浑水中一定量泥沙的存在,将会使水流特性发生变化,就本实验来看,其影响变化的主要因素是流态和阻力。含沙量愈高,浑水的粘滞性愈大,水流必须克服更大的剪应力(以糙率表征)流动,特别是当流量较小时,泥沙颗粒将与水质点一同粘附于固定边界上,水流需克服浑水与边界的摩擦而流动,其糙率将比清水大,若流量较大时,固体细颗粒泥沙将悬浮,此时水流则主要克服浑水与水质点的摩擦,相对而言,糙率将比小流量时减小。但是,浑水的粘滞性又会使水的紊动减弱,从而抑制涡流的形成与发展,且浑水质点间易团聚成类似集团式整体流动,能量损失减小。因此,糙率反而会减小。由于这两种相互作用的结果,有可能使含沙量对浑水糙率及其水位流量关系的影响减至最低限度,而向清水水流特性靠近。不过,本实验的有机玻璃矩形槽断面小,容重含沙量仅达 $245.5\text{kg}/\text{m}^3$,大致相当于重量比含沙量25%左右。若含沙量继续增加,其对糙率和水位流量关系的影响如何,尚需继续进行实验分析研究。

参考文献

- 1 清华大学水力学研究组编. 水力学. 人民教育出版社, 1981
- 2 沙玉清著. 泥沙运动学引论. 中国工业出版社, 1965
- 3 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 科学出版社, 1983
- 4 清华大学水利系泥沙研究室. 高含沙水流运动. 清华大学出版社, 1989
- 5 陕西省高含沙引水实验研究小组. 高含沙浑水淤灌技术及渠道规划设计. 西北农学院翻印, 1982
- 6 陈炯新, 邹广荣等著. 灌区量水工作手册. 水利电力出版社, 1984
- 7 中华人民共和国电力部、水利电力部. 土工实验规程. SD128-84. 水利电力出版社, 1987