

排沙漏斗截沙率计算

李 琳 牧振伟 周 著

(新疆农业大学水利与土木工程学院 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要 排沙漏斗是经过 15 年系列模型试验及原型观测研究成功的排沙设施,该设施工程设计时的截沙率一般通过试验测得。文章根据多年原型工程的运行经验,分析了影响排沙漏斗截沙率高低的主要因素,通过量纲分析给出了各因素与截沙率之间的函数关系,结合室内系列模型试验,运用数值分析的方法推导出排沙漏斗截沙率的计算公式,并利用实际工程的原型观测资料对所推导的公式进行对比验证。结果表明,该公式的计算误差不超过 $\pm 5\%$,可供今后排沙漏斗工程设计计算参考。

关键词 排沙漏斗 截沙率 量纲分析 模型试验 数值分析

中图分类号:TV673 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2007)04-0050-05

Calculation of interception efficiency of sand funnel//LI Lin, MU Zhen-wei, ZHOU Zhu(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract :The sand funnel is a new sand removal facility which is developed from 15 years' model tests and prototype observation, and its sand interception efficiency during the engineering design is generally obtained by model tests. Based on many years' experiences from the operation of practical projects, the main factors influencing the sand interception efficiency were analyzed, and their relationships were given by dimensional analysis. In combination with the laboratory model tests, a calculation formula for the interception efficiency of the sand funnel was deduced by numerical analysis, and it was verified by some prototype observation data of actual projects. The results show that the calculation error of the formula is in the range of $\pm 5\%$, and therefore, the calculated result can provide some references to sand funnel design.

Key words : sand funnel; interception efficiency; dimensional analysis; model test; numerical analysis

排沙漏斗^[1]是新疆农业大学经过 15 年研究成功的一种漏斗型工程排沙设施,该设施对粒径大于 0.5 mm 的粗沙直至数十厘米的卵石可 100% 排除,对粒径 0.5 ~ 0.05 mm 的细沙截沙率达 90% 以上,排沙耗水量平均仅占引水量的 3% ~ 5%。进入漏斗室的高含沙水流在几何边界和重力的共同作用下形成三维立轴螺旋流致使水沙分离,泥沙从漏斗的排沙底孔经排沙廊道排走,清水自漏斗溢流边墙溢入原渠道,从而达到“引清排沙”的目的,可广泛用于灌溉、发电、水产养殖、工业及人畜饮水等领域的泥沙处理。该排沙设施与曲线形沉沙池和厢形沉沙池等设施比较,具有排沙耗水量小、截沙率高、结构简单、造价低廉(仅为前 2 种设施的 1/2 ~ 1/5)及管理方便等诸多优点,是当今国内外先进的排沙设施之一。

由于排沙漏斗三维螺旋流场的复杂性,其三维流场的数学模型求解困难,前人的理论研究^[2-4]都建

立在大量假设的基础之上,而且各人的假设又不尽相同,导致结论存在很大差异,不能用于指导实际工程设计,以往排沙漏斗工程的截沙率主要根据工程经验和通过室内模型试验获得。因此,建立供实际工程设计使用的排沙漏斗截沙率的计算公式就显得非常有必要。

1 试验方案

1.1 试验设计

排沙漏斗试验模型结构尺寸为:漏斗室直径 71 cm,排沙底孔孔径 2 cm,进水涵洞宽度为 14.2 cm,涵洞底坡为平坡,悬板宽度 14.2 cm,悬板高度可调,悬板中心角 180°,排沙漏斗溢流边墙为漏斗周长的 1/4,在悬板末端设置调流墩,排沙廊道纵坡 1/50。漏斗径向底坡可调,从 0.1 可变化至 0.5,如图 1 所示。模型试验中,根据实验室的场地和所能提供的

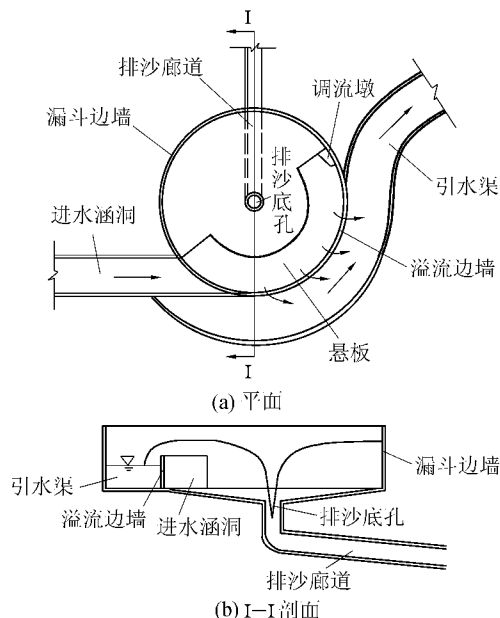


图1 排沙漏斗模型结构示意图

流量大小,选定 Q_i 为 $0.9 \sim 4.72 \text{ L/s}$ 。试验中模型沙采用天然无黏性沙粒,密度为 2.65 t/m^3 , d_{50} 分别为 0.065 mm , 0.08 mm , 0.1 mm , 0.192 mm , 0.28 mm , 0.4 mm 。泥沙颗粒的沉降速度在粒径小于 0.1 mm 时,用斯托克斯公式^[5]进行计算:

$$\omega^2 = \frac{4gD}{3C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (1)$$

在粒径介于 $0.15 \sim 1.5 \text{ mm}$ 之间时采用式(2)进行计算:

$$\omega = 6.77 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} D + \frac{\rho_s - \rho}{1.92\rho} \left(\frac{t}{26} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: ω 为泥沙颗粒的静水沉降速度 cm/s ; D 为泥沙粒径 mm ; t 为温度 $^\circ\text{C}$ 。本实验条件下 $t = 20^\circ\text{C}$; ρ , ρ_s 分别为水和泥沙的密度 g/cm^3 ; C_D 为阻力系数。

由已建排沙漏斗工程运行观测和模型试验经验可知,在一定的含沙质量浓度范围内,排沙漏斗的含沙质量浓度与截沙率及排沙耗水量并不直接相关^[6-8]。本文试验中也证明了这一点。因此,本文对于水流含沙质量浓度的选择主要考虑大部分已建工程所处理的平均含沙质量浓度范围,从而确定试验含沙质量浓度分别为 10 kg/m^3 , 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 , 60 kg/m^3 , 80 kg/m^3 , 100 kg/m^3 , 130 kg/m^3 。

在上述模型中进行了系列模型试验,通过改变排沙漏斗的进流量、排沙道的冲沙流量、泥沙粒径、水流含沙质量浓度的大小、悬板高度以及漏斗径向底坡大小,分别测试其相应的截沙率。截沙率在本文中用 P 表示,试验中用式(3)计算截沙率:

$$P = \frac{W_{\text{su}}}{W_{\text{si}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: W_{su} 为排沙道排除的泥沙质量; W_{si} 为进入漏斗

中的泥沙总质量。

1.2 试验测试方法

1.2.1 流量观测

对悬板溢流量与底孔流量同时进行量测,两者相加为漏斗总进流量(以 Q_i 表示),即为排沙漏斗的设计进流量。设 Q_u 为排沙漏斗排沙道的冲沙流量, Q_o 为排沙漏斗处理后经悬板溢入引水渠道的流量,三者满足 $Q_i = Q_u + Q_o$ 。悬板溢流流量在集流槽尾部安装三角堰量测,底孔流量因为较小,采用称重法进行测定。

1.2.2 含沙量观测

为了准确而快速地在现场实测出当时模型试验水流的含沙量,利用置换法原理,将比重瓶改用口径 3 cm 、容量为 250 mL 以上的小口硬质透明玻璃瓶,避免了比重瓶容积小和瓶口小、注沙误差大、无法直接采样的困难。容积和含沙量经过严格率定,在实验室水温变化 $1 \sim 5^\circ\text{C}$ 的情况下,用感量为 1 g 的天平对现场取得的样品进行称重并采用查曲线法,测出含沙量,与烘干法实测出的含沙量相比误差不超过 $\pm 3.5\%$,精度满足试验要求。

2 量纲分析及公式拟合

由多年的原型工程运行经验可知,排沙漏斗截沙率 P 主要与 Q_i , Q_u , Q_o , Z_h , h_p , r , i , d_{50} , ω_0 , ν , g , S_m 有关。 Q_i 为进入漏斗的总流量; Z_h 为悬板的高度; h_p 为漏斗边墙处的水深; r 为漏斗室的半径; i 为漏斗室径向坡度; d_{50} 为泥沙的中值粒径; ω_0 为泥沙沉速; ν 为水的运动黏滞系数; g 为重力加速度; S_m 为质量比含沙浓度(为无量纲数)。用以下函数关系式来表达各个变量与 P 之间的关系:

$$P = f(Q_i, Q_u, Q_o, Z_h, h_p, r, i, d_{50}, \omega_0, \nu, g, S_m) \quad (4)$$

式中共 13 个物理量,其中自变量数为 12 个,选择 Q_i , h_p 为基本物理量,根据量纲和谐原理,式(4)可以用 11 个无量纲数组成的关系式来表达:

$$P = f\left(\frac{Q_u}{Q_i}, \frac{Q_o}{Q_i}, \frac{Z_h}{h_p}, i, \frac{r}{h_p}, \frac{d_{50}}{h_p}, \frac{\omega_0}{Q_i/h_p^2}, \frac{\nu h_p}{Q_i}, \frac{g}{Q_i^2 h_p^{-5}}, S_m\right) \quad (5)$$

将式(5)改写成:

$$P = f\left(\frac{Q_u}{Q_i}, \frac{Q_o}{Q_i}, \frac{Z_h}{h_p}, i, \frac{r}{h_p}, \frac{d_{50}}{h_p}, \frac{\omega_0}{Q_i/h_p^2}, \frac{\nu}{Q_i d_{50}/h_p^2}, \frac{r^2 \sqrt{gh_p}}{Q_i}, S_m\right) \quad (6)$$

式中: $\frac{\omega_0}{Q_i/h_p^2}$ 与 $\frac{\nu}{Q_i d_{50}/h_p^2}$ 的比值为 $\frac{\omega_0 d_{50}}{\nu}$,令 $K =$

$\frac{\omega_0 d_{50}}{\nu}$ 。由 $Q_o = Q_i - Q_u$,可将式(6)改写成 $P = f\left(\frac{Q_u}{Q_i}, \frac{Z_h}{h_p}, i, \frac{r}{h_p}, \frac{d_{50}}{h_p}, K, \frac{Q_i}{r^2 \sqrt{gh_p}}, S_m\right)$,其中 $\frac{d_{50}}{h_p}$ 相当于相对粗糙度 ,在排沙漏斗正常运行时 ,由于螺旋流场的作用 ,泥沙不会沉积在漏斗室内 ,因此不考虑 $\frac{d_{50}}{h_p}$ 对截沙率 P 的影响。在试验过程中 $\frac{r}{h_p}$ 的大小不变 ,不考虑其对截沙率的影响。而 S_m 在一定范围(当 $S_m \leq 15\%$, h_p 不变时)内变化时 ,试验结果表明其大小对截沙率影响可忽略。所以影响 P 的主要因素是: $\frac{Q_u}{Q_i}, i, \frac{Z_h}{h_p}, K, \frac{Q_i}{r^2 \sqrt{gh_p}}$,其中 $\frac{Q_u}{Q_i}$ 为排沙耗水率 $\frac{Z_h}{h_p}$ 为悬板高度与水深之比 , $\frac{Q_i}{r^2 \sqrt{gh_p}}$ 与 Fr 具有相同的量纲 ,反映漏斗室内的螺旋流强度 ,用 T 表示(即 $T = \frac{Q_i}{r^2 \sqrt{gh_p}}$)。

结合室内系列模型试验 ,研究排沙漏斗截沙率 P 与各无量纲数之间的关系。试验条件为 : $d_{50} = 0.08 \sim 0.4 \text{ mm}$, $\frac{Q_u}{Q_i} = 2\% \sim 6\%$, $i = 0.1 \sim 0.5$, $\frac{Z_h}{h_p} = 0.75 \sim 0.95$, $T = 0.008 \sim 0.038$, $S_m \leq 15\%$ 。其中 P 与 K 的关系见图 2 ,利用数值拟合可知 $P \propto K^{0.0764}$,于是可假定

$P_1 = \frac{P}{K^{0.0764}}$, P_1 与 $\frac{Q_u}{Q_i}$ 的关系见图 3 ,数据拟合可知 $P_1 \propto \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}$,令 $P_2 = \frac{P}{K^{0.0764} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}}$,在试验中保持

$\frac{Z_h}{h_p}, T$ 不变 , P_2 与 i 的关系见图 4 ,拟合可知 $P_2 \propto i^{0.0621}$,令 $P_3 = \frac{P}{K^{0.0764} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621}}$,当 T 不变时 , P_3

与 $\frac{Z_h}{h_p}$ 的关系见图 5 ,通过对数据拟合分析可知 $P_3 \propto \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32}$,假定 $P_4 = \frac{P}{K^{0.0764} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621}}$,通

过试验研究 , P_4 与 T 的关系见图 6 ,对试验数据拟合可得 $P_4 = 0.3818 \ln T + 4.2$,代入前面 P_4 公式中有

$$P = (0.3818 \ln T + 4.2) K^{0.0764} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621} \quad (7)$$

利用式(7)计算的截沙率 P 的范围是 $0 < P \leq 1$,而实际工程中常用百分数来描述截沙率 ,因此可在式(7)左端乘 100% ,即得公式(8):

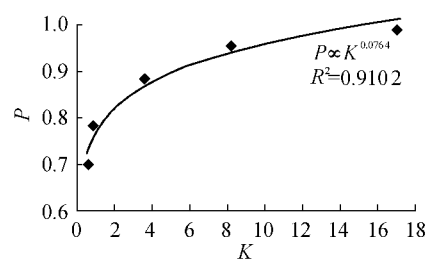


图 2 P 与 K 的关系

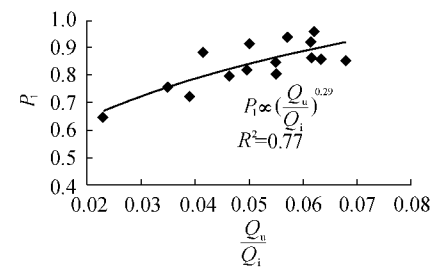


图 3 P_1 与 $\frac{Q_u}{Q_i}$ 的关系

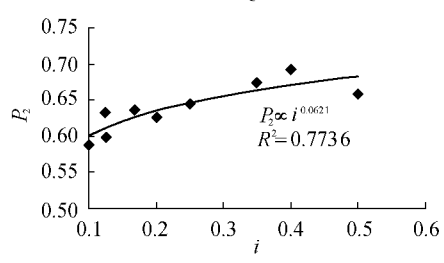


图 4 P_2 与 i 的关系

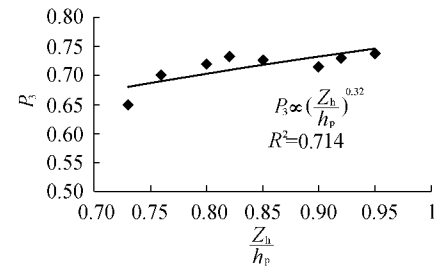


图 5 P_3 与 $\frac{Z_h}{h_p}$ 之间的关系

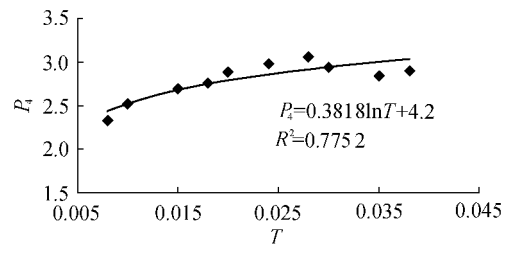


图 6 P_4 与 T 之间的关系

$$P = (0.3818 \ln T + 4.2) K^{0.0764} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621} \times 100\% \quad (8)$$

式中 : Z_h, h_p 的单位均为 m ; Q_u, Q_i 的单位均为 m^3/s 。

公式(8)适用于 $d_{50} = 0.08 \sim 0.4 \text{ mm}$, $\frac{Q_u}{Q_i} = 2\% \sim 6\%$,
 $i = 0.1 \sim 0.5$, $\frac{Z_h}{h_p} = 0.75 \sim 0.95$, $T = 0.008 \sim 0.038$,
 $S_m \leq 15\%$ 进水涵洞底坡为平坡的排沙漏斗工程。若
计算截沙率 $P > 100\%$,认为截沙率 P 为 100% 即可。

3 公式验证

3.1 新疆石河子红山嘴水力发电厂电站渠首排沙漏斗工程

新疆石河子红山嘴水力发电厂为了解决二级电站引水渠的泥沙问题 ,延长水轮机的大修期限 ,在二级电站引水渠 $0 + 900$ 处修建了一座直径为 30 m 、处理流量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 的排沙漏斗工程 ,电站引水渠悬移质泥沙粒径范围在 $0.002 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间 ,中值粒径在 0.131 mm 左右 ,以中、细沙为主。1998 年 6 月 ,石河子水文水资源勘测大队对该排沙漏斗工程进行了原型观测 ,主要测定排沙漏斗在 1998 年 8 月 7 日至 9 月 6 日时段内不同来沙来水情况下的截沙率和排沙耗水率。将观测资料列入表 1 中 ,其中包括漏斗的实际进流量 Q_i 、泥沙中值粒径 d_{50} 、漏斗室内的水深 h_p 、排沙耗水率 $\frac{Q_u}{Q_i}$ 和观测截沙率 P 。在表 1 中列出公式(8)所需要的参数并进行计算 ,结果为 : $\frac{Q_u}{Q_i} = 0.0258 \sim 0.0313$, $\frac{Z_h}{h_p} = 0.935 \sim 0.976$, $T = 0.023 \sim 0.032$, $i = 0.167$, $0.1 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.4 \text{ mm}$,满足公式(8)的适用范围。于是在表 1 中计算泥沙沉速 ω , $\left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621} K^{0.0764} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \ln T$,并将它们代入公式(8)中计算截沙率 ,结果列于表 1 中计算值一栏。从表 1 中可以看出 ,截沙率的计算值与实测值较为接近 ,除了少数观测组 ,大部分观测组截沙率计算值的相对误差小于 5% ,说明公式(8)的计算精度较好。

表 1 新疆石河子红山嘴水力发电厂电站渠首排沙漏斗工程截沙率的计算

组号	$Q_i/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	r/m	d_{50}/mm	$\omega/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	Z_h/m	h_p/m	K	$\frac{Z_h}{h_p}$	$\frac{Q_u}{Q_i}$	$\left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}$	i	$i^{0.0621}$	$K^{0.0764}$	$\left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32}$	T	S	Y	$P/\%$		
																		计算值	原型观测值	相对误差
8-7	24.6	15	0.125	1.234	2	2.07	1.528	0.966	0.0267	0.350	0.167	0.895	1.033	0.989	0.024	2.780	0.320	88.878	88.23	0.73
8-10	23.4	15	0.142	1.430	2	2.06	2.010	0.973	0.0258	0.346	0.167	0.895	1.055	0.991	0.023	2.763	0.324	89.501	89.33	0.19
8-14	22.9	15	0.147	1.487	2	2.05	2.165	0.976	0.0276	0.353	0.167	0.895	1.061	0.992	0.023	2.755	0.332	91.599	91.60	0.00
9-3	32.7	15	0.152	1.545	2	2.14	2.325	0.935	0.0270	0.351	0.167	0.895	1.067	0.979	0.032	2.883	0.328	94.453	92.13	2.52
9-3	29.1	15	0.141	1.418	2	2.13	1.980	0.939	0.0264	0.349	0.167	0.895	1.054	0.980	0.028	2.839	0.322	91.429	89.27	2.42
9-4	26.7	15	0.133	1.326	2	2.10	1.747	0.952	0.0295	0.360	0.167	0.895	1.044	0.985	0.026	2.809	0.331	92.947	88.17	5.42
9-5	28.0	15	0.150	1.522	2	2.11	2.260	0.948	0.0313	0.366	0.167	0.895	1.064	0.983	0.027	2.826	0.343	96.883	90.00	7.65
9-6	27.1	15	0.148	1.499	2	2.11	2.197	0.950	0.0293	0.359	0.167	0.895	1.062	0.984	0.027	2.814	0.336	94.489	91.80	2.93

注 : $S = 0.3818 \ln T + 4.2$, $Y = K^{0.0764} i^{0.0621} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}$ 。表 2 同。

3.2 陕西东雷抽黄(I)灌区东雷二级站排沙漏斗工程

陕西东雷抽黄灌溉工程是高扬程电力提灌工程 ,其泥沙问题已成为灌区可持续发展的首要问题 ,也是灌区急需解决的最大课题。为解除泥沙对灌区发展的严重制约 ,东雷抽黄灌区在灌区东雷二级站 $1 + 500$ 的左侧修建了一座直径为 16 m 、处理流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的排沙漏斗工程。2003 年 4 月 ,渭南市东雷抽黄灌溉工程管理局会同陕西省三门峡库区水文水资源局对原型工程进行了原型观测 ,主要观测内容为 :对不同组合的箱涵进口流量、排沙廊道出口流量进行观测 ,通过进出口流量的观测 ,计算原型工程的排沙耗水率 ;采集进水涵洞口、排沙廊道出口、溢流悬板上的水样 ,测定与校对其含沙量和泥沙颗粒组成。通过进水涵洞和溢流悬板上的含沙量比较 ,计算总截沙率和有害粒径的排除率。原型观测共观测 13 组 ,其中每组漏斗进口处泥沙的中值粒径分别为 : 0.0625 mm , 0.0625 mm , 0.06 mm , 0.052 mm , 0.016 mm , 0.065 mm , 0.113 mm , 0.131 mm , 0.12 mm , 0.1 mm , 0.125 mm , 0.118 mm , 0.132 mm 。

由于公式(8)主要适用于 $d_{50} = 0.08 \sim 0.4 \text{ mm}$ 之间的泥沙截沙率的计算 ,因此在表 2 中仅列出了后 7 组的原型观测数据 ,其中包括漏斗的实际进流量 Q_i 、泥沙中值粒径 d_{50} 、漏斗室内的水深 h_p 、排沙耗水率 $\frac{Q_u}{Q_i}$ 、观测截沙率 P 。与上例相同 ,在表 2 中列出公式(8)所需要的参数并计算了泥沙沉速 ω , $\left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29} i^{0.0621} K^{0.0764} \left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32} \ln T$,将它们代入公式(8)中计算截沙率 ,结果列于表 2 中计算值一栏。同时 ,为验证公式的计算精度 ,对计算值进行了相对误差计算(见表 2)。结果表明除了少数观测组 ,大部分观测组截沙率计算值的相对误差均小于 $\pm 5\%$ 。该原型观测资料进一步表明公式(8)的计算精度较好 ,可供排沙漏斗工程截沙率计算参考。

表 2 陕西东雷抽黄(I)灌区东雷二级站排沙漏斗工程截沙率的计算

组号	$Q_i/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	r/m	d_{50}/mm	$\omega/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	Z_h/m	h_p/m	K	$\frac{Z_h}{h_p}$	$\frac{Q_u}{Q_i}$	$\left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}$	i	$i^{0.0621}K^{0.0764}\left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32}$	T	S	Y	$P/\%$				
																计算值	原型观测值	相对误差		
7	2.401	8	0.113	1.096	1	1.112	1.226	0.899	0.0433	0.4023	0.1	0.867	1.0157	0.967	0.011	2.491	0.342	85.271	81.46	4.68
8	1.255	8	0.131	1.303	1	1.060	1.690	0.943	0.1076	0.5238	0.1	0.867	1.0409	0.982	0.006	2.252	0.464	100.000	93.74	6.68
9	2.586	8	0.120	1.177	1	1.120	1.398	0.893	0.0476	0.4134	0.1	0.867	1.0259	0.964	0.012	2.518	0.355	89.258	84.53	5.60
10	1.599	8	0.100	0.947	1	1.075	0.937	0.930	0.0738	0.4696	0.1	0.867	0.9951	0.977	0.008	2.342	0.396	92.681	93.62	-1.00
11	1.056	8	0.125	1.234	1	1.050	1.528	0.952	0.1316	0.5554	0.1	0.867	1.0329	0.985	0.005	2.188	0.490	100.000	98.37	1.66
12	2.563	8	0.118	1.154	1	1.117	1.348	0.895	0.0515	0.4231	0.1	0.867	1.0231	0.965	0.012	2.515	0.362	91.061	91.40	-0.37
13	1.728	8	0.132	1.315	1	1.093	1.718	0.915	0.0799	0.4805	0.1	0.867	1.0422	0.972	0.008	2.368	0.422	99.911	97.21	2.78

4 结 语

通过量纲分析,结合室内模型试验和数值分析方法,推导出排沙漏斗截沙率的计算公式,并利用实际工程的原型观测资料对该计算公式进行了验证,验证结果表明公式(8)的计算误差不超过±5%,可供排沙漏斗工程截沙率计算参考。

参考文献:

[1]周著,邱秀云,侯杰,等.漏斗式全沙排沙技术及其应用[J].水科学进展,2001,12(1):95-98.
[2]唐毅.排沙漏斗三维涡流水流结构的研究[D].成都:四川联合大学,1996:15-78.

(上接第33页)

参考文献:

[1]GARBOCZI E J,BENTZ D P. Analytical formulas for interfacial transition zone properties[J]. Advanced Cement Based Materials,1997,1(3):99-108.
[2]DELAGRAVE A,BIGAS J P,OLLIVIER J P,et al. Influence of the interfacial zone on the chloride diffusivity of mortars[J]. Advanced Cement Based Materials,1997,1(3):86-92.
[3]YANG C C,SU J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of the aggregate content on the migration coefficient of mortar[J]. Cement and Concrete Research,2002,32(10):1559-1565.
[4]CARE S. Influence of aggregate on chloride diffusion coefficient into mortar[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(7):1021-1028.
[5]ZHENG Jian-jun,XU Shi-lang,ZHOU Xin-zhu. Effect on interfacial transition zone on chloride diffusion coefficient[J]. Key Engineering Materials,2006,302:167-174.
[6]NEMAT-NASSER S,HORI M. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.,1993:3-8.
[7]ZHENG Jian-jun,LI Chun-qing,ZHOU Xin-zhu. Characterization of microstructure of interfacial transition zone in concrete[J]. ACI Materials Journal,2005,102(4):265-271.

[3]王顺久.漏斗涡流特性研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,1997:20-45.
[4]周著,唐毅,吴持恭.带悬板排沙漏斗的三维贴体网格生成方法[J].新疆农业大学学报,1996,19(1):4-7.
[5]中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[M].北京:中国环境科学出版社,1998:58-60.
[6]李琳.排沙漏斗结构优化研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2005:40-62.
[7]王顺久,周著.漏斗式全沙排沙设施模型试验及原型观测[J].水力发电,2000(7):1-4.
[8]徐燕,邱秀云,周著,等.排沙漏斗应用于自来水供水工程的试验研究[J].新疆农业大学学报,2005,28(3):63-67.

(收稿日期:2006-09-08 编辑:熊水斌)

[8]ZHENG Jian-jun,LI Chun-qing. Three-dimensional aggregate density in concrete with wall effect[J]. ACI Materials Journal,2002,99(6):568-575.
[9]郑建军,周欣竹,姜璐,等.混凝土界面面积分数和渗流阈值及其应用(Ⅰ):计算机模拟[J].建筑材料学报,2006,9(6):266-273.
[10]GEORGE P L. Automatic mesh generation: application to finite element method[M]. Chichester: John Wiley & Sons,1991:1-10.
[11]杜善义,王彪.复合材料细观力学[M].北京:科学出版社,1998:5-14.
[12]PIVONKA P,HELLMICH C,SMITH D. Microscopic effects on chloride diffusivity of cement pastes: a scale-transition analysis[J]. Cement and Concrete Research,2004,34(12):2251-2260.

(收稿日期:2006-09-05 编辑:马敏峰)

