

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.005

连续冲洗式沉沙池截沙率试验研究

宗全利¹, 刘焕芳^{1, 2}, 吴均¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院 新疆 石河子 832003; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要 对连续冲洗式沉沙池截沙率进行分析研究, 并在一维流超饱和输沙法基础上, 得出连续冲洗式沉沙池池段分组截沙率、工作段分组截沙率、大于某粒径级截沙率以及总截沙率的近似计算方法。为验证该方法的实用性, 对连续冲洗式沉沙池的截沙率进行模型试验, 试验结果表明: 采用近似处理的截沙率计算公式, 其计算结果与实测结果吻合较好, 在符合计算精度的前提下, 可以用于实际工程计算。

关键词 连续冲洗式沉沙池 截沙率 恢复饱和系数

中图分类号: TV149.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)01-0016-04

Experimental study on sand interception rate of continuous flushing sedimentation basins//ZONG Quan-li¹, LIU Huan-fang^{1, 2}, WU Jun¹ (1. College of Hydraulic and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the supersaturated sand transfer method in one-dimensional flow, the approximate calculation methods for the sand interception rate in groups for the basin section and working section, the sand interception rate of grains with the diameter greater than a certain value, and the total sand interception rate were worked out. Model tests were performed on the sand interception rate of a continuous flushing sedimentation basin to verify the applicability of the present methods. It is shown that the calculated result by the approximate calculation methods accords well with the measured data. Therefore, the approximate calculation methods can be used in practical projects.

Key words: continuous flushing sedimentation basin; sand interception rate; recovery saturation coefficient

沉沙池截沙率是衡量沉沙池工作效率的一个非常重要的指标, 截沙率能否达到要求也是判断沉沙池是否达到设计标准的关键, 所以有必要对沉沙池的截沙率进行深入研究。现有的沉沙池截沙率计算公式基本上都是针对定期冲洗式沉沙池, 而连续冲洗式沉沙池的工作原理是在连续供水的同时, 将沉落的泥沙连续不断地冲排入下游河道^[1], 其沉沙、冲沙和供水同时进行。因此, 排沙廊道和沉淀室内的流量属于沿程变量流, 这样在计算沉沙池截沙率时, 就不能直接用定期冲洗式沉沙池的计算公式, 必须重新对连续冲洗式沉沙池截沙率进行分析, 得出连续冲洗式沉沙池截沙率的计算公式。

1 沉沙池截沙率基本公式

沉沙池的截沙率指的是沉沙池沉降下来的泥沙

占整个来沙量的百分数, 其计算公式如下^[2]:

$$E = \frac{G_{s2}}{G_s} = \frac{Q_2 S_2}{Q_0 S_0} = 1 - \frac{Q_1 S_1}{Q_0 S_0} \tag{1}$$

式中: E 为沉沙池的总截沙率; G_{s2} 为沉沙池排沙廊道输沙率, kg/s ; G_s 为沉沙池来水渠道输沙率, kg/s ; Q_2 为排沙廊道流量, m^3/s ; Q_0 为渠道来水总流量, m^3/s ; Q_1 为溢流堰出水流量, m^3/s ; S_2 为排沙廊道出口含沙量, kg/m^3 ; S_0 为渠道来水含沙量, kg/m^3 ; S_1 为溢流堰出池含沙量, kg/m^3 。

若已知相应断面处的粒径级配情况, 则用式(1)可计算分组粒径的截沙率, 即

$$E_i = \frac{G_{s2i}}{G_{si}} = \frac{Q_2 S_{2i}}{Q_0 S_{0i}} = 1 - \frac{Q_1 S_{1i}}{Q_0 S_{0i}} \tag{2}$$

式中: E_i 为第 i 粒径组工作段截沙率; G_{s2i} 为沉沙池排沙廊道第 i 粒径组输沙率, kg/s ; G_{si} 为沉沙池来水渠道

第 i 粒径组输沙率 kg/s ; S_{2i} 为排沙廊道出口第 i 粒径组含沙量 kg/m^3 ; S_{0i} 为渠道来水第 i 粒径组含沙量, kg/m^3 ; S_{1i} 为溢流堰出池第 i 粒径组含沙量 kg/m^3 。

2 连续冲洗式沉沙池截沙率分析

2.1 池段分组截沙率

在沉沙池沿程含沙量计算时,可以将沉沙池的工作段分成若干间距较小的计算池段,由上游至下游逐池段计算各断面的泥沙分组含沙量变化,在一维流超饱和输沙法的基础上,可以得到沉沙池分段分组含沙量沿程变化公式^[3]

$$S_{(k+1)} = S_{ik} e^{-\frac{\omega_i x_k}{\alpha_{ik} h_k v_k}} \quad (3)$$

式中: S_{ik} , $S_{(k+1)}$ 分别为第 k 池段进口和出口断面分组含沙量 kg/m^3 ; α_{ik} 为第 k 池段粒径组的恢复饱和系数; ω_i 为第 i 粒径组的平均沉速 m/s ; x_k 为第 k 计算池段的长度 m ; h_k 为第 k 池段内的平均水深 m ; v_k 为第 k 池段内的平均流速 m/s ; i 为粒径组编号,按粒径由小到大排序, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

根据截沙率的定义,由式(2)可以得到池段的分组截沙率为

$$E_{ik} = 1 - \frac{Q_{k+1} S_{(k+1)}}{Q_k S_{ik}} \quad (4)$$

式中: E_{ik} 为池段的分组截沙率; Q_k , Q_{k+1} 分别为第 k 计算池段进口、出口断面的流量 m^3/s 。

将式(3)代入式(4)就可以得到一维流超饱和输沙法的池段分组截沙率计算公式,即

$$E_{ik} = 1 - \frac{Q_{k+1}}{Q_k} e^{-\frac{\omega_i x_k}{\alpha_{ik} h_k v_k}} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,要计算池段的分组截沙率,除了要知道该池段的各种水力要素外,还必须已知该池段进出口断面的流量变化情况,也就是说由于连续冲洗式沉沙池的运行特点,使得工作段内的流量沿程变化,以至于池段的分组截沙率较定期冲洗式沉沙池复杂,还要解决流量的沿程变化问题。由于流量的沿程变化受到水流各种水力要素的影响作用,使得该问题比较复杂,要想精确确定流量的沿程变化情况很困难。由于沉沙池工作段内的水流紊动比较弱,流速较小并且分布也比较均匀,所以可以假定流量的沿程变化是均匀的,这样根据渠道来水流量 Q_0 、溢流出水流量 Q_1 和工作段的长度 L 就可以近似算出单位长度沿程变化的流量 ΔQ ,即

$$\Delta Q = \frac{Q_0 - Q_1}{L} \quad (6)$$

式中: ΔQ 为沉沙池单位长度沿程变化流量 m^3/s ; L 为沉沙池工作段长度 m 。

由式(6)可以得到第 k 池段进口断面的流量计算公式为

$$Q_k = Q_0 - \Delta Q (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-1}) \quad (7)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ 分别为沉沙池工作段第 1, 2, ..., $k-1$ 计算段的长度。

将式(6)代入式(5)可得

$$E_{ik} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_k} x_k\right) e^{-\frac{\omega_i x_k}{\alpha_{ik} h_k v_k}} \quad (8)$$

这样利用式(6)、式(7)和式(8)可以近似估算连续冲洗式沉沙池的池段分组截沙率。

2.2 工作段分组截沙率

将式(4)进行转化,可以改写为

$$S_{(k+1)} = \frac{Q_k}{Q_{k+1}} (1 - E_{ik}) S_{ik} \quad (9)$$

可见,当 $k = 1$ 时, $S_{i2} = \frac{Q_1}{Q_2} (1 - E_{i1}) S_{i1}$

.....

当 $k = n$ 时, $S_{(n+1)} = \frac{Q_n}{Q_{n+1}} (1 - E_{in}) S_{in} = \frac{Q_1}{Q_{n+1}} \cdot$

$(1 - E_{in})(1 - E_{(n-1)}) \dots (1 - E_{i1}) S_{i1}$
将溢流堰前的工作段划分为 n 个计算池段,即 $k = n$,第 $k+1$ 断面的分组含沙量 $S_{(k+1)}$ 即是 $S_{(n+1)}$,从而可以得到溢流堰区前第 i 粒径组工作段截沙率为^[4]

$$E_i = \frac{Q_1 S_{i1} - Q_{n+1} S_{(n+1)}}{Q_1 S_{i1}} = 1 - (1 - E_{in}) \cdot$$

$$(1 - E_{(n-1)})(1 - E_{(n-2)}) \dots (1 - E_{i1})$$

可以简写成

$$E_i = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - E_{ik}) \quad (10)$$

2.3 大于某粒径级截沙率及总截沙率

在衡量沉沙池沉沙效果时,经常用到大于某一粒径截沙率指标,这实际上是将泥沙进行了分级处理,每一粒径组泥沙都可以用一个粒径级来表征,用 i 代表粒径组, l 代表粒径级数,并且粒径组数与粒径级数是相等的。将泥沙划分为 m 组(级),按粒径由粗到细并相应使粒径级编号由大到小顺序排列, $i = l = m, m-1, \dots, 2, 1$,大于 l 粒径级的泥沙截沙率为

$$E_l = \frac{\sum_{i=m}^l E_i \Delta P_i}{\sum_{i=m}^l \Delta P_i} \quad (11)$$

式中: E_l 为大于 l 粒径级的泥沙截沙率; E_i 为第 i 粒径组泥沙的工作段截沙率; ΔP_i 为第 i 粒径组泥沙的沙重百分数, %。

可以看出沉沙池的总截沙率就是大于第 1 粒径级的截沙率,也就是式(11)中 $l = 1$ 时的截沙率,即

$$E_1 = \frac{\sum_{i=m}^1 E_i \Delta P_i}{\sum_{i=m}^1 \Delta P_i} \quad (12)$$

式中 E_1 为沉沙池的总截沙率。

3 试验结果分析

为了确定上述连续冲洗式沉沙池截沙率计算公式的正确性,在长 3.4 m、宽 0.8 m 的沉沙池模型中进行泥沙沉降试验,模型工作段断面形状为梯形,边坡系数 $m = 1.9$,如图 1 所示^[5-6]。主要针对不同的来水流量和来沙量等各种组合情况进行泥沙试验,试验中在工作段内每隔 0.25 m 设一断面取样,分别测含沙量,得到含沙量沿程变化规律;同时,对取得的沙样烘干进行粒径分析,得到分组含沙量沿程变化规律,试验所采用模型沙的粒径级配如表 1 所示,其中中值粒径为 0.22 mm,平均粒径为 0.30 mm。

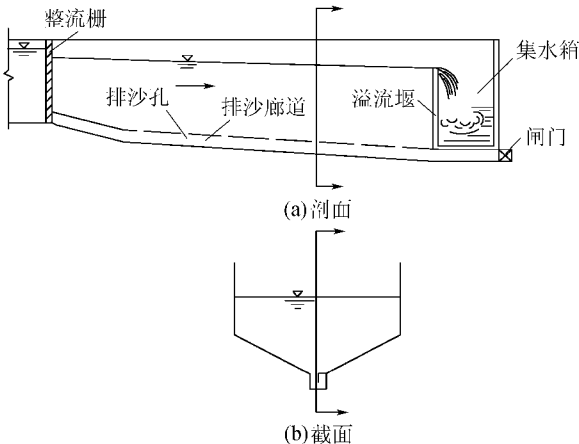


图 1 沉沙池模型试验

表 1 模型沙粒径级配

粒径/ mm	小于相应粒径 的百分数/%	粒径/ mm	小于相应粒径 的百分数/%
0.05	0.66	0.5	87.78
0.10	5.24	1.0	98.03
0.15	11.09	2.0	100
0.25	69.97	5.0	100

3.1 池段分组截沙率

实测池段分组截沙率可以用式(4)计算,在具体计算时将流量沿程变化看做是均匀变化的,采取式(8)的处理方式可以得到实测池段分组截沙率为

$$E_{ik} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_k} x_k\right) \frac{S_{(k+1)}}{S_{ik}} \quad (13)$$

式中: E_{ik} 为实测池段分组截沙率; ΔQ 为单位长度沿程变化的流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; S_{ik} 、 $S_{(k+1)}$ 分别为第 k 池段进口、出口断面分组含沙量, kg/m^3 ; x_k 为第 k 池段的计算长度, m 。

池段分组截沙率的理论值用式(8)计算,式中

α_{ik} 通过试验方法确定。

在模型试验中,利用池段进出口断面的含沙量、泥沙沉降速度等试验数据,经过拟合得到 α_{ik} 的计算公式为

$$\alpha_{ik} = 4.087 \times \left(\frac{\omega_i}{v_*}\right)^{-0.581} J_k^{-0.042} + 0.224 \quad (14)$$

$$v_* = \sqrt{g R_k J_k} \quad (15)$$

式中: ω_i 为第 i 粒径组的平均沉速, m/s ; v_* 为水流摩阻流速, m/s ; J_k 为池段平均水力坡度; R_k 为池段平均水力半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

经验证恢复饱和系数 α_{ik} 计算公式计算值与实测值符合较好,可以满足工程计算的要求^[7]。利用上述公式,通过计算分别得到池段分组截沙率的实测值和理论值,图 2 为池段分组截沙率理论值与实测值的比较,从图中可以看出两者的计算结果相差不大,平均误差为 4.8%,可以满足工程计算的需要。

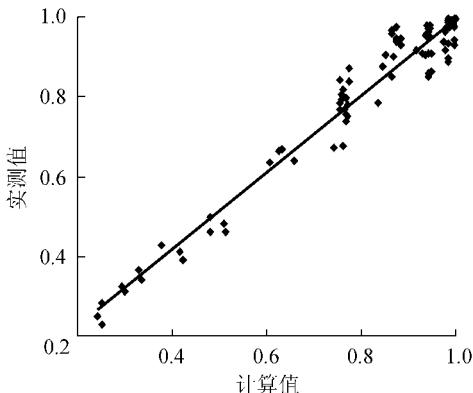


图 2 池段分组截沙率计算值与实测值比较

3.2 工作段分组截沙率

沉沙池工作段分组截沙率即全池分组截沙率,计算时用式(10)计算,同时为了验证计算结果的可靠性,用式(2)计算沉沙池工作段的分组截沙率的实测值,并与式(10)的计算结果进行对比。表 2 为式(2)与式(10)的计算结果比较表,从表中数据可以看出,除了粒径较细的粒径组($< 0.05 \text{ mm}$ 、 $0.05 \sim 0.10 \text{ mm}$ 、 $0.10 \sim 0.15 \text{ mm}$)由于量测等原因表现出较大误差外,其他粒径组的误差均小于 5.0%。整个粒径组的平均误差仅为 4.59%,能够满足工程计算的需要。

3.3 大于某粒径级截沙率

根据前面求出的工作段分组截沙率和原沙分组沙重百分比就可由式(11)求出大于某粒径泥沙的截沙率,为了说明计算结果的实用性,表 3 给出了沉沙池总截沙率计算值与实测值的比较结果,其中实测值由式(1)计算得到。从表 3 结果可以看出,计算值与实测值的最大误差均小于 9.0%,经计算平均误差为 5.81%,从工程实际计算角度来看,基本可以满足要求。

表 2 工作段分组截沙率计算值与实测值比较

粒径级	分组粒径/ mm	来水流量 $Q_0 = 5.7 \text{ L/s}$			来水流量 $Q_0 = 7.5 \text{ L/s}$		
		计算值	实测值	误差/%	计算值	实测值	误差/%
1	< 0.05	0.8163	0.8556	4.81	0.7470	0.7943	6.33
2	0.05 ~ 0.10	0.8260	0.9056	9.64	0.7655	0.8647	12.96
3	0.10 ~ 0.15	0.8420	0.9644	14.54	0.8531	0.9472	11.03
4	0.15 ~ 0.25	0.9508	0.9891	4.03	0.9565	0.9834	2.81
5	0.25 ~ 0.50	0.9940	0.9986	0.46	0.9879	0.9978	1.00
6	0.50 ~ 1.00	0.9872	1.0000	1.30	0.9994	0.9999	0.05
7	1.00 ~ 2.00	0.9580	1.0000	4.38	0.9991	1.0000	0.09

表 3 总截沙率计算值与实测值比较

流量/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	总截沙率		
	计算值	实测值	误差/%
5.7	0.9810	0.9351	4.91
	0.9811	0.9445	3.88
	0.9813	0.9063	8.28
	0.9812	0.9217	6.46
	0.9850	0.9358	5.26
7.5	0.9880	0.9466	4.37
	0.9858	0.9073	8.65
	0.9858	0.9416	4.69

4 结 论

本文首先从池段分组截沙率、工作段分组截沙率和大于某粒径级截沙率 3 个方面对沉沙池截沙率问题进行了理论探讨,并在一维流超饱和输沙法的基础上,推导出了连续冲洗式沉沙池的池段分组截沙率、工作段分组截沙率和大于某粒径级截沙率的计算公式;由于连续冲洗式沉沙池工作段流量属于沿程变量流,计算较复杂,所以在满足工程计算要求的前提下,对截沙率公式进行了近似处理,并给出了

截沙率的近似计算公式。为了验证公式的实用性,对沉沙池截沙率进行了试验分析,结果表明,采用近似处理的截沙率计算公式计算结果与实测结果符合较好,在符合计算精度的前提下,可以用于实际工程计算。

参考文献:

[1] DL/T5107—1999,水电水利工程沉沙池设计规范[S].
[2] 刘焕芳,张开泉.水电站引水渠上涡管排沙式沉沙池试验研究[J].水电站设计,1997,13(4):55-60.
[3] 谭伟民.水电站沉沙池泥沙沉降率计算方法分析与检验[J].水力发电,2003,29(4):24-28.
[4] 黎运,杨晋营,张金凯.水利水电工程沉沙池设计[M].北京:中国水利水电出版社,2004:72-109.
[5] 宗全利,刘焕芳,李强,等.一种新型冲洗式沉沙池的设计探讨[J].长江科学院院报,2005,22(2):13-16.
[6] 刘焕芳,宗全利.一种新型平流式沉沙池的设计[J].工业水处理,2005,25(4):71-74.
[7] 宗全利,刘焕芳,汤骅,等.微灌用沉沙池泥沙沉降计算方法试验研究[J].节水灌溉,2007(4):23-26.

(收稿日期:2007-03-05 编辑:方宇彤)

· 简讯 ·

我国 3 条特高压输电线路工程开始建设

我国在初步实现输电线路全国联网的基础上开始了特高压输电线路工程的研究,短短几年间,又从研究阶段转入工程实施阶段。目前已有两条输电线路工程开工建设,另一条已经由国家发展和改革委员会批准即将开工。相关工程简述如下:

a. 云南—广东直流 ± 800 kV 输电线路工程。起点在云南省楚雄州绿丰县楚雄换流站,终点在广东省增城市穗东换流站,全长 1438 km,额定容量 500 万 kW,由南方电网公司主办,是西电东送南部通道的重大工程,也是云南澜沧江上小湾水电站和金沙江上金安桥水电站的输出工程。已于 2006 年 12 月开工建设,计划 2009 年 6 月单极投入运行,2010 年 6 月双极投入运行。

b. 晋东南—南阳—荆门交流 1000 kV 输电线路工程。起点在山西省长治市变电站,终点在湖北省荆门市变电站,全长 654 km,由国家电网公司主办,是连接华北和华中电网的干线工程,已于 2007 年 4 月开工,共分 18 个标段,力争一期工程于 2008 年投入运行。

c. 金沙江—上海直流 ± 800 kV 输电线路工程。起点在四川省宜宾市复龙换流站,终点在上海南汇换流站,全长 2034 km,额定容量 640 万 kW,由国家电网公司主办,是西电东送中部通道的重大工程,也是金沙江上向家坝和溪洛渡水电站的输出工程。已于 2007 年 4 月经国家发展和改革委员会批准,即将开工建设,计划 2012 年投入运行。

(吴 高供稿)