

## 承压式溢流井淤积实验研究

陈勇民,薛向东

(浙江科技学院 建筑工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为研究承压式溢流井的淤积规律,通过模型实验实测了井底面速度分布,并据此计算出相应的床面切应力。根据相似准则进行泥沙沉积实验,得到不同工况下的泥沙沉积分布。结果显示,溢流井内流场在恒定流工况时由一对大致对称的椭圆形涡流组成,而且涡流周围区域的紊动能及切应力均较大,其冲刷力亦较强,泥沙难以沉积下来。涡流中心和四周角落区域的切应力及冲刷力较小,有大量泥沙沉积。分析比较泥沙沉积位置与切应力分布,即可估计出模型沙的临界切应力值为  $0.05\sim 0.07\text{ N/m}^2$ 。

**关键词:** 承压式溢流井;模型实验;速度分布;床面切应力;沉积

中图分类号: TU992.24

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2013)03-0219-05

## Experimental study on sedimentation of pressurized CSO chamber

CHEN Yongmin, XUE Xiangdong

(School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to research the sedimentation regulation of pressurized combined sewer overflow(CSO) chamber, the velocity distributions of well bottom were measured and the bed shear stress (BSS) were correspondingly computed. According to the similarity criteria, sedimentation distributions of different conditions were obtained by sedimentation experiment. The results show that the flow field consists of two approximately symmetrical elliptic eddy current under steady flow condition. The turbulent kinetic energy and shear stress are strong as well as the scouring force around the eddy current, where sedimentation occurs hardly. On the contrary, there are large amount of sedimentation in the eddy current centre and corner because of less shear stress and scouring force. The critical BSS is estimated to be  $0.05\sim 0.07\text{ N/m}^2$  by comparing sedimentation distribution and shear stress distribution.

**Key words:** pressurized CSO chamber; model experiment; velocity distribution; bed shear stress; sedimentation

---

收稿日期: 2013-03-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-001);浙江省教育厅科研项目(Y201222896)

作者简介: 陈勇民(1975—),男,湖北省嘉鱼人,讲师,博士,主要从事市政工程研究。

截流式合流制是合流制排水管网的一个经济合理的改造方式。截流式合流制系统的关键构筑物是溢流井,其主要功能是截流旱季污水和初期雨水,而在降雨期间则使超量的合流污水溢流排入接纳水体,以保证其他构筑物的正常工作<sup>[1]</sup>。截流式合流制的改造工程有一种情况值得注意,即排水系统接纳水体的常水位较高,其堤岸及沿岸城区相应加高后,原有合流制排水管渠的覆土厚度较大,有些覆土甚至达到 10 多米。针对此情况,为降低造价和施工难度,新建截流污水至污水厂的截污干管埋深设计得相对较小,这样的设计则会产生一些进水管标高低于出水截流管标高的非传统溢流井。由于这种溢流井持续处于压力工作状态,因此称其为“承压式溢流井”<sup>[2]</sup>。其工作原理如图 1 所示。

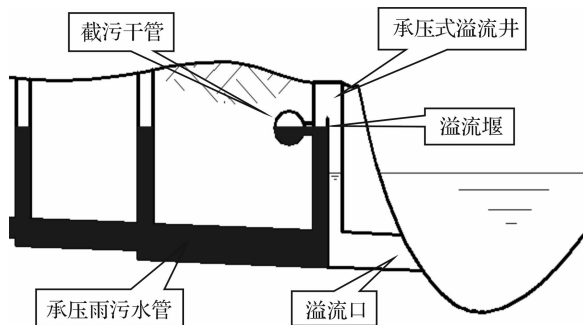


图 1 承压式溢流井示意图

Fig. 1 Schematic drawing of pressurized CSO chamber

不同于传统的重力式溢流井的是,承压式溢流井具有以下明显特点:进水管标高低于出水截流管标高;溢流井室及进水管渠持续处于承压工作状态。显然,这种情况下溢流井在运行管理过程中就面临着一个不可忽视的问题,即淤积问题。本研究采用泥沙模型实验的方法探讨了恒定流工况下承压式溢流井的淤积规律,为进一步解决其淤积问题提供可靠依据,对这种情况排水系统的截流式改造具有重要的实用价值。

## 1 研究方法

### 1.1 实验装置

本研究的实验装置如图 2 所示。

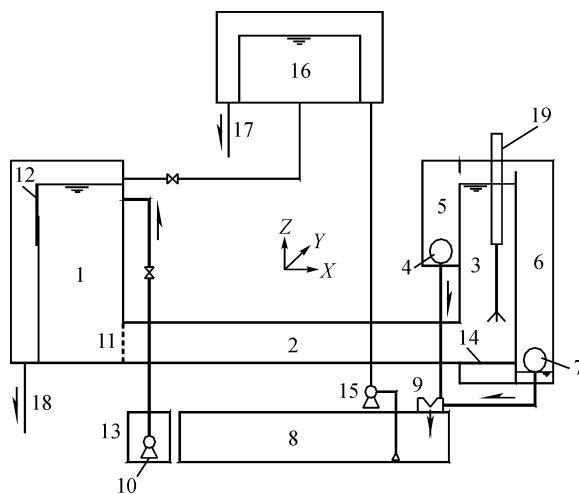
实验中利用 ADV 测量水平面内各点的速度矢量,用于合成平面速度场。在隔板 14 上打上垂直相交的网格,两个方向的网格线间距均为 25 mm,并为每条网格线编号,如图 3 所示。

### 1.2 模型设计

本研究采用模型实验方法,模型实验装置按 Froude 相似准则设计,长度比尺  $\lambda_L = 5$ ,流量比尺  $\lambda_Q = (\lambda_L)^{5/2} = 55.90$ ,流速比尺  $\lambda_V = (\lambda_L)^{1/2} = 2.24$ ,糙率比  $\lambda_n = (\lambda_L)^{1/6} = 1.31$ ,时间比尺  $\lambda_T = (\lambda_L)^{1/2} = 2.24$ 。溢流井原型的建造材料为钢筋混凝土,其糙率系数  $n_p = 0.014$ ,按糙率相似比则模型材料的糙率为  $n_m = n_p / \lambda_n = 0.014 / 1.31 \approx 0.01$ ,有机玻璃的糙率系数约为 0.01,那么用有机玻璃制作的实验装置则可满足糙率相似要求。这样模型实验就同时满足了阻力相似和重力相似。

选用酚醛树脂粉(俗称电木粉)作为实验用模型沙,用于实验模拟排水系统中泥沙的输运,由于其相对密度适中,可用于模拟悬沙和底沙。酚醛树脂粉的密度为  $1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,它既能以相对较大的粒径得到较小运动特征值,以达到模型沙的启动、沉降及悬扬相似,同时可以避免太轻的模型沙所带来的实验过程中操作困难的缺陷<sup>[3]</sup>。

模型沙的制备需满足沉降相似、扬动相似和挟沙量相似<sup>[4-5]</sup>。经计算,模型沙满足沉降相似的粒径比尺为



1-上游检查井;2-合流管渠;3-分流井室;4-截流干管;5-截流井室;6-溢流井室;7-溢流出水管;8-循环水池;9-三角堰;10-潜水泵;11-整流板;12-可调溢流堰;13-配沙池;14-隔板;15-离心水泵;16-高位恒位水箱;17、18-溢流出水管;19-ADV(超声波多普勒测速仪)

图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental installation

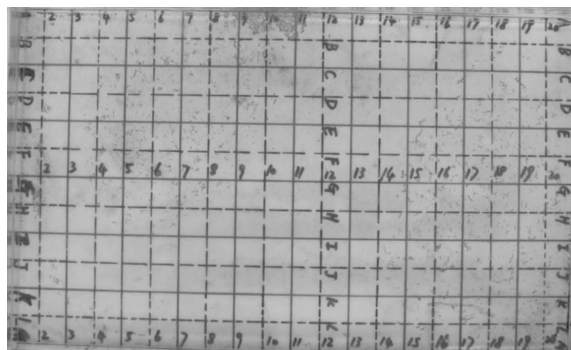


图 3 隔板网格线

Fig. 3 Grid lines on separator

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\lambda_v \lambda_h}{\lambda \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \lambda_L}} \quad (1)$$

满足扬动相似的粒径比尺为

$$\lambda_d = \frac{\lambda_v^{\frac{5}{4}}}{\lambda^{\frac{3}{4}} \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \lambda_h^{\frac{1}{4}}} \quad (2)$$

挟沙量比尺为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)} \quad (3)$$

冲淤时间比尺为

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{\gamma_s} \lambda_L}{\lambda_v \lambda_s} \quad (4)$$

式中:  $d$ —粒径;  $\lambda_d$ —粒径比尺;  $h$ —水深;  $\lambda_h$ —水深比尺;  $\lambda_t$ —冲淤时间比尺;  $\lambda_s$ —挟沙量比尺;  $\gamma_s$ —泥沙容重;  $\gamma$ —水的容重。

经检测,原型沙  $\gamma_s = 2.43$ , 粒径  $d_p = 91 \mu\text{m}$ , 模型沙  $\gamma_s = 1.45$ , 均为平均值。代入式(1)~(4)中即可计算出满足沉降相似和扬动相似时的  $\lambda_d \approx 0.8$ ,  $\lambda_s = 0.53$ ,  $\lambda_t = 7.07$ , 模型沙粒径  $d_m = 114 \mu\text{m}$ 。

## 2 数据分析

泥沙淤积实验分别在  $Q = 3.6 \text{ L/s}$  和  $Q = 5.1 \text{ L/s}$  恒定流工况下进行,以探讨不同流量工况下的溢流井的淤积规律。

### 2.1 井底平面速度分布

利用 ADV 测量井底水平面各网格点的速度矢量,各网格点的速度均测量 30 s 以上,最终取其  $x, y$  方向的速度平均值,将其合成即可绘制出井底平面的速度矢量分布图,  $Q = 3.6 \text{ L/s}$  和  $Q = 5.1 \text{ L/s}$  工况下的井底平面速度矢量分布如图 4 所示。井底平面的尺寸单位: mm。

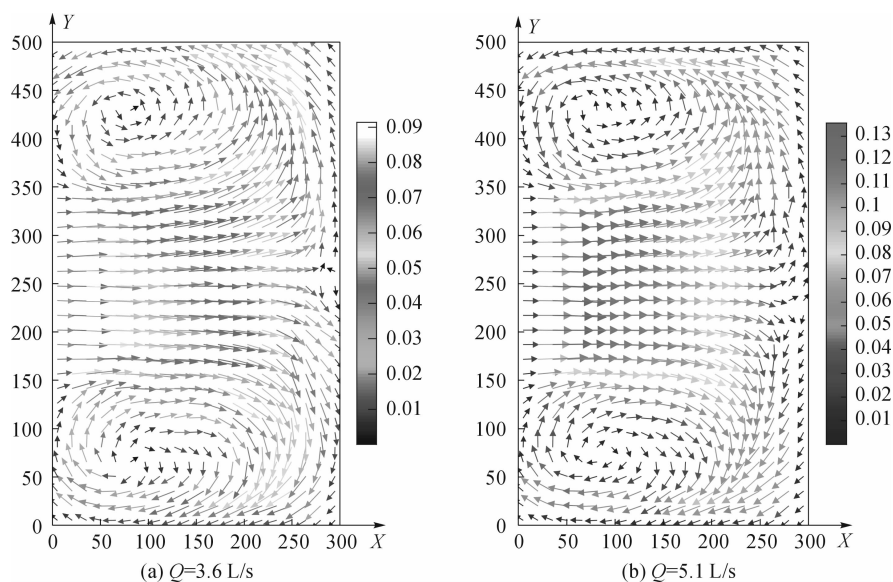


图4 井底平面速度分布(单位: m/s)

Fig. 4 Velocity distribution of well bottom(units: m/s)

为便于描述,以井平面左下角点为原点、宽度方向为  $x$  方向、长度方向为  $y$  方向建立坐标系。由图 4 可知,  $x = 0 \sim 250$ ,  $y = 150 \sim 350$  区域受入流的直接影响,其速度值最大,  $Q = 3.6 \text{ L/s}$  时该区域速度值为  $0.06 \sim 0.09 \text{ m/s}$ ;  $Q = 5.1 \text{ L/s}$  时该区域速度值为  $0.09 \sim 0.13 \text{ m/s}$ 。承压式溢流井的入流在井内受到  $x = 300$  的井壁正面阻挡后,在水平面上以中心线  $y = 250$  为对称轴分流成为两部分,并分别向  $+y$  和  $-y$  方向运动。这两股分流继续沿  $+y$  和  $-y$  方向运动并在遇到  $x = 0$ ,  $y = 0$  和  $y = 500$  处井壁的阻挡后,产生

了两个大致对称的椭圆状涡流。该椭圆状涡流的长轴与  $x$  轴平行。由不同工况下的井底面速度分布图可以推测:两个涡流位置分别处于  $x=0\sim 250, y=0\sim 150$  和  $y=350\sim 500$  范围内,而且在流量变化的情况下,涡流区域几乎不变,即形成涡流的范围几乎不随流量工况变化而改变,但涡流周边的线速度会随流量变化而变化。由井底平面速度分布图还可观察到,在  $x=200\sim 250, y=0\sim 50$ ,以及  $y=450\sim 500$  区域范围内均有较大的速度分布,其值分别为  $0.05\sim 0.06\text{ m/s}$  ( $Q=3.6\text{ L/s}$ ) 和  $0.06\sim 0.09\text{ m/s}$  ( $Q=5.1\text{ L/s}$ )。分析其原因为该范围内的涡流处于井壁和较小流速的涡流核心之间,受两者的阻挡后,该区域范围内形成较小的过水断面,因而在流量不变的情况下产生了相对较大的流速。此外,由井底面速度分布图还可观察到,涡流中心区域和井室的四周角落几乎形成了死水区,其速度值接近于零。

## 2.2 泥沙淤积实验分析

实测井底面的速度场之后进行泥沙沉积实验。根据前述流量比尺  $\lambda_Q$ ,挟沙量比尺  $\lambda_s$ ,冲淤时间比尺  $\lambda_t$  分别计算模型实验的流量、挟沙量和冲淤时间值。在  $Q=3.6\text{ L/s}$  时,挟沙量  $Q_s=114\text{ g/L}$ ,模型冲淤时间  $t_m=34\text{ s}$ ;  $Q=5.1\text{ L/s}$  时,挟沙量  $Q_s=161\text{ g/L}$ ,模型冲淤时间  $t_m=25\text{ s}$ 。

泥沙实验时需考虑加沙量和冲淤时间。用潜水泵往模型溢流井内输送模型沙,加沙量根据前述计算的挟沙量进行控制。而输沙流量的持续时间则需按冲淤时间比尺进行控制。输沙完成后水中尚残留有较多微小粒径的悬浮模型沙,使水变得浑浊不便观察沉积效果,因此需要用不影响已沉淀下来的模型沙的小流量持续运行,直到将水中残留的悬浮模型沙清除。

研究证明,床面切应力 (bed shear stress, BSS) 是与水工构筑物内泥沙运动和沉积规律存在密切关系的<sup>[6-7]</sup>。由紊流的壁面速度对数分布律<sup>[8-9]</sup>,根据图 4 实测的井底面速度分布图可计算出各工况相应的床面切应力分布图<sup>[10]</sup>。为研究泥沙淤积规律,将各工况的床面切应力分布图和泥沙沉积效果进行对比分析,如图 5 和图 6 所示。

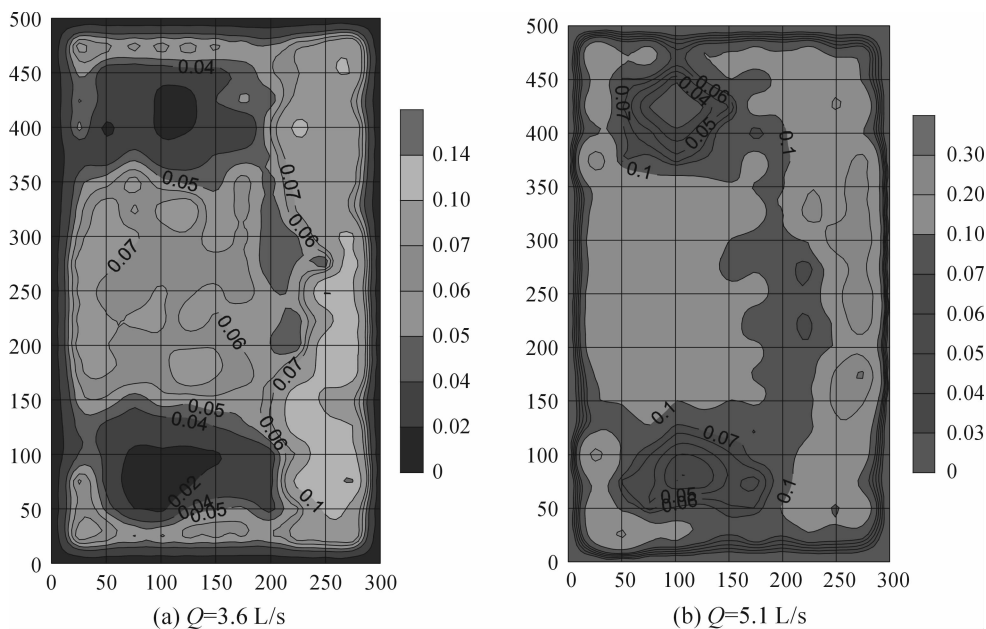


图 5 床面切应力分布 (单位:  $\text{N/m}^2$ )

Fig. 5 BSS distribution (units:  $\text{N/m}^2$ )

对比图 5 和图 6 可知,泥沙沉积与床面切应力分布存在密切关系,溢流井入流区域 BSS 较大,泥沙沉积少。 $x=0\sim 250, y=0\sim 150$  和  $y=350\sim 500$  区域处于两个涡流周边,其线速度、BSS 和紊动能均较大,具有较强的冲刷力,泥沙难以沉积。此外,  $x=250\sim 300$  区域具有较大的  $z$  向紊动能,泥沙沉积较少。相反,  $x=50\sim 200, y=50\sim 100$  及  $y=400\sim 450$  区域位于涡流中心,其 BSS 和紊动能均较小,有大量泥沙沉积。此外,井四周角落亦有少量泥沙沉积。

由泥沙沉积效果图可以观察到,床面切应力小于某个临界值时,泥沙将会沉淀下来,超过此临界值则泥沙难以沉积,该临界值可称之为临界床面切应力 (critical bed shear stress, critical BSS)。根据实验结

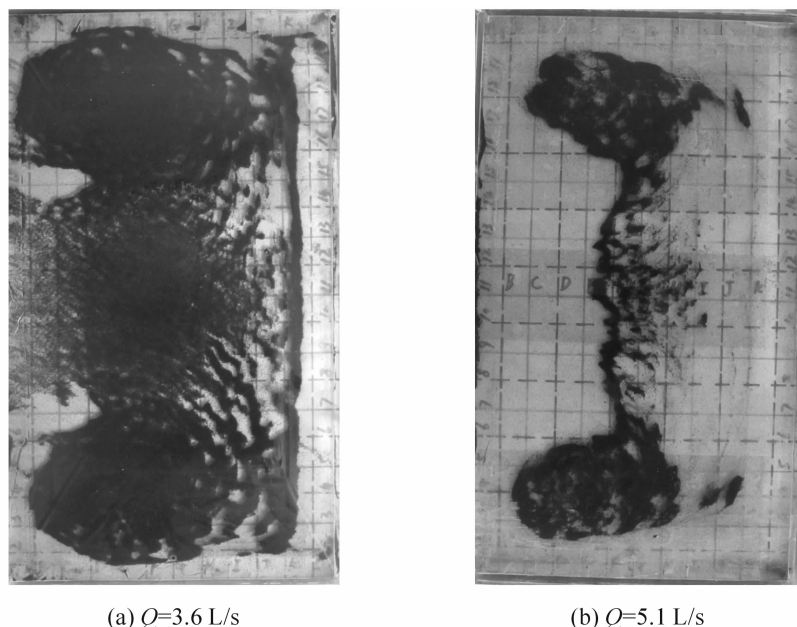


图6 井底面泥沙沉积分布

Fig.6 Sedimentation distribution of well bottom

果,对比分析图5和图6的床面切应力分布和井底面泥沙沉积位置分布,即可估算出实验所用的模型沙的临界床面切应力  $\tau_{\text{critical}}=0.05\sim 0.07 \text{ N/m}^2$ 。

### 3 结 语

恒定流工况下,由于受四周井壁阻挡影响,溢流井内流场总体上形成一对大约对称的椭圆形涡流。进水口入流速度对泥沙沉积影响较大,泥沙沉积率随着与进水口的距离增大而增加。而涡流的存在对井内泥沙的运动和沉积有显著影响,涡流周围区域由于紊动能及切应力较大,其冲刷力亦较强,所在位置的泥沙沉积量较小;而涡流中心区域及井室角落的紊动能及切应力远小于临界值,导致该区域泥沙大量沉积。通过实验还可观察到,床面切应力与泥沙的运动和沉积有密切关系,为了在泥沙输运研究中预测和判断泥沙沉积分布,可通过实验测算出泥沙的临界床面切应力,然后将其应用于泥沙淤积的判断。本实验所用模型沙的临界床面切应力实测为  $0.05\sim 0.07 \text{ N/m}^2$ 。

### 参考文献:

- [1] 严煦世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 彭艺艺,陈勇民,周永潮. 基于声纳技术的截流深并淤积研究[J]. 中国给水排水,2011,27(5):6-8.
- [3] 何耘,马春生,韦鹤平. 污水泵站前池浑水模型试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报:自然科学版,1997,5(2):47-52.
- [4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [5] 赵毅山,韦鹤平. 南线A污水泵站浑水模型试验研究[J]. 力学季刊,2008,29(4):583-589.
- [6] Wilcock P R. Methods for estimating the critical shear stress of individual fractions in mixed-size sediment[J]. Water Resources Research,1988,24(7):1127-1135.
- [7] Stovin V R, Saul A J. Sedimentation in storage tank structures[J]. Water Science and Technology,1994,29(112):363-372.
- [8] Pope N D, Widdows J, Brinsley M D. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach: A comparison of annular flume and field data[J]. Continental Shelf Research,2006,26(8):959-970.
- [9] George A O. 3-D simulation of flow and sediment transport during a controlled flood in a short river reach[D]. Quebec: Concordia University,2005.
- [10] Martin J R, Steinberg L J, Michaelides E E. Determination of bed shear stress by digital particle image velocitmetry in turbulent open channel flow[C]//Joint Conference in Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management 2000. Minneapolis, USA: ASCE,2000.