

流动环境中高浓度射流的三维数值模拟

方神光,黄胜伟,崔丽琴

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611)

摘要 :应用流动环境中高浓度圆孔射流的三维 RNG 湍流模型,模拟计算不同水深和环境来流下的流态和浓度场分布。结果表明在已有射流区、冲击区以及异重流区的基础上,还存在 1 个上游入侵区。该上游入侵区的长度随环境流速的增大而减小,水深对其的影响相对较小。射流触底点位置随环境流速以及水深的增大而下移,触底点浓度则随环境流速以及水深的增大而减小。流态分析显示,壁面反射流形成动量较强的附壁射流时,会在较短距离内收缩和膨胀,紊动掺混剧烈,水深较浅时容易形成全水深掺混。比较而言,附壁射流较弱时无上游入侵,在射流孔口下游附近横断面上会形成较为特别的水滴状浓度等值线分布,在水体底部形成更为稳定的异重流。最后探讨了水体底面横向最大浓度沿流向的分布特征。

关键词 :三维湍流模型;异重流;附壁射流;浓度等值线

中图分类号 :O358

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2010)04-0017-05

Three-dimensional numerical simulation of high-concentration jets in flowing environment //FANG Shen-guang, HUANG Sheng-wei, CUI Li-qin(*Pearl River Hydraulic Research Institute of Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China*)

Abstract : A three-dimensional RNG turbulent model for high-concentration jets from a circle orifice in flowing environment was established. The flow regimes and concentration fields under various water depths and environmental currents were calculated. The results show that an intruding area exists in addition to three distinguished areas : jet area, striking area and density flow area. Its length decreases with the increase of the incident velocity and the water depth has relatively small influences on it. The location where the jets touch the water bottom will move downwards with the increase of the incident velocity and the water depth, and the concentration will decrease. When the wall-attached jets with strong momentum due to the reflection of the jets are formed, the shrinkage and expansion will occur within rather short distance downstream from the jet orifice, leading to violent turbulent mixing. It will result in the turbulent mixing at whole depth when the water depth is shallow. When the wall-attached jets with weak momentum due to the reflection of the jets are formed, there is no upstream intrusion, and special drop state of concentration isolines will immediately occur at section downstream the jet orifice. Rather steady density flows will be formed at the water bottom. Finally, the distribution characteristics of the transverse maximum concentration along the flowing direction were discussed.

Key words : three-dimensional turbulent model; density flow; wall-attached jet; concentration isoline

在航道和港池的兴建和整治过程中会产生大量疏浚泥土或泥浆,如何做到经济、环保并妥善地处理这些疏浚物是工程设计人员面临的首要问题。对疏浚物的处理一般有陆抛和水抛 2 种方式,考虑到经济性和工作效率,目前国内的航道和港池疏浚工程中水抛方式使用最多。泥浆被重新抛入环境水体后,一部分泥沙会沉积在抛泥点附近,其余细颗粒泥沙将在抛泥点的局部区域形成高浓度含沙水体随水流运动,在环境水流作用下极易形成浮泥异重流,考

虑到尽量避免泥沙回淤航槽及环保要求,需要正确预测高浓度泥浆水流射流进入环境水体后的运动输移规律。

国内外学者采用试验、理论分析和数值模拟方法对抛泥进入环境水体后的运动形态进行了研究探讨。张燕等^[1]采用试验方法研究了高浓度泥浆射流入水后在环境水流作用下的近区运动、扩散和输运规律;李樟苏等^[2]采用放射性示踪沙对长江口北槽航道抛泥区底沙运动进行了研究;Yu 等^[3]通过试验

和数值仿真研究了横向来流情况下泥沙云团下降过程的运动轨迹; Nakasuji 等^[4]通过试验发现, 当泥沙颗粒较小, 抛泥云团较大时, 泥沙云团表现为各向同性的异重流; 王长海等^[5]采用理论分析、经验公式和数学模型相结合的方法计算了长江口北槽拟选倾倒区抛泥的淤积情况; 陈祖华等^[6]采用分布点源扩散模型结合平面二维黏性泥沙数学模型模拟河口区开放水域抛泥输移; 徐宏明^[7]在二维潮流数学模型基础上建立疏浚土扩散数学模型, 模拟计算了黄骅港海区疏浚土水抛后的扩散过程; 吴修广等^[8]采用平面二维潮流和悬沙输移扩散的数学模型模拟计算了苍南电厂港池和航道疏浚物抛泥过程中悬沙扩散输移; 吴华林等^[9]对抛泥运动研究进行了总结和评述。

数值模拟方法中, 平面二维浅水数学模型方法较为常用, 鉴于进入浅水环境中的污染物在随水流运动一定距离后, 在紊动扩散及弥散作用下垂向可以近似为均匀分布, 采用二维浅水数学模型比较合理, 且其在模拟大范围的泥沙运动方面取得了很多成功实例。但在泥浆水体射流进入环境水体后的近区范围内, 污染物的分布不具有垂向均匀分布特性, 必须采用三维数学模型才能更准确地预报其运动形态。张燕等^[1]对高浓度射流进入有来流环境水体中的近区流态进行试验研究, 得到了水深、射流流速、环境来流及密度差对异重流形成和扩散的影响规律。笔者将采用三维笛卡尔坐标系下的 RNG 双方程 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟高浓度射流水体进入有来流环境水体中的流态, 将数值模拟结果与试验结果进行对比, 研究探讨射流近区污染物传播扩散的三维特性, 为实际工程提供参考。

1 数学模型

图 1 给出了高浓度射流进入有来流环境水体中的示意图, 图中 u_a, v_j, ρ_a, ρ_j 分别为环境流速、射流出口流速、环境流体密度和高浓度射流流体密度, 为便于与张燕等^[1]得到的流动规律进行对比, 取 $\rho_a = 1\,000\text{ kg/m}^3, \rho_j = 1\,170\text{ kg/m}^3$ 。以射流出口流速、射流孔径和环境水体密度为特征量, 可以得到无量纲恒定三维 RNG 湍流模型^[10]。模型中的参数取值为

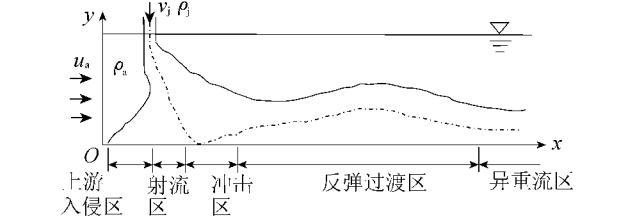


图 1 射流近区示意图

$$C_\mu = 0.085, C_{\epsilon 1} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3}, \eta = \frac{Sk}{\epsilon}, S = \left(\frac{P_k}{\nu_t}\right)^{\frac{1}{2}}, \beta = 0.015, C_{\epsilon 2} = 1.68, \sigma_k = 0.7179, \sigma_\epsilon = 0.7179. \text{ 各参数的物理含义见文献 } [10]$$

2 边界条件

水面边界: 采用刚盖假定, $v = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0$; 左边界: $u = u_a, v = 0, w = 0, \rho = 1.0, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$; 右边界: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$; 水槽侧壁面边界: $w = 0, \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, u, v, k, \epsilon$ 采用壁函数求解; 底面边界: $v = 0, \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0, u, w, k, \epsilon$ 采用壁函数求解; 射流孔口边界: $u = 0, v = -1, w = 0, \rho_j/\rho_a = 1.17, k_0 = 0.006, \epsilon_0 = 0.0001$ 。

3 计算网格

前述数学模型中的偏微分方程(连续性方程除外)都可以写成以下形式:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 2A \frac{\partial \Phi}{\partial x} + 2B \frac{\partial \Phi}{\partial y} + 2C \frac{\partial \Phi}{\partial z} + G \quad (1)$$

式中: Φ 为数学模型中偏微分方程的各未知量; A, B, C, G 为系数。

式(1)为拟线性椭圆形偏微分方程, 采用混合有限分析法对其进行离散求解^[10], 计算网格采用非均匀网格, 射流入口处的网格较密, 不同工况的计算区域和网格数有所差别, 如图 2 所示, 其中 x, y, z 轴分别表示来流方向、水深方向和横向, d 为孔口直径。控制误差选用各方程残差的最大值, 流速 $u, v,$

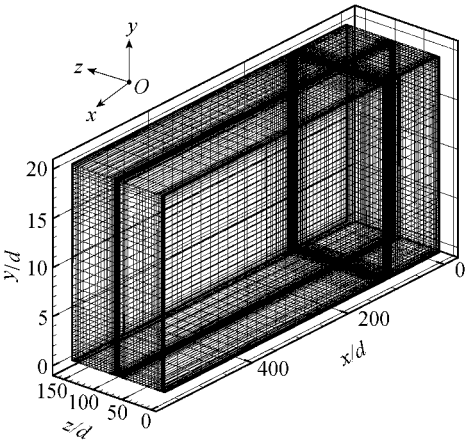


图 2 计算网格

w 的控制精度均为 10^{-3} , 密度方程迭代计算的控制精度为 10^{-5} 。三维求解计算采用 Fortran 程序进行。

4 试验参数

本文主要研究高浓度泥浆垂直进入流动环境水体后的近区三维流动特征和形态, 射流出口密度弗

劳德数 $Fr = \frac{v_j}{\sqrt{\left(\frac{\rho_j - \rho_a}{\rho_a}\right)gd}} = 10.21$, 与张燕等^[1]的

试验取值一致。表 1 给出了数值模拟试验参数, 表中 h 为环境水深, 由于数学模型采用的是以 d 和 v_j 为比尺的无量纲变量, 因此表 1 给出了环境水深与孔口直径之比(h/d)以及环境流速与射流出口流速之比(u_a/v_j)。

表 1 数值模拟试验参数

组次	h/d	u_a/v_j	组次	h/d	u_a/v_j
1	5	0.064	10	3.6	0.064
2	5	0.107	11	3.6	0.105
3	5	0.128	12	3.6	0.128
4	9	0.064	13	7.2	0.064
5	9	0.107	14	7.2	0.105
6	9	0.128	15	7.2	0.128
7	20	0.064	16	10.7	0.064
8	20	0.107	17	10.7	0.110
9	20	0.128	18	10.7	0.128

5 数值模拟结果

数值模拟结果表明, 高浓度的异重流从水体表面喷射入有限水深的环境水体后, 射流流体与环境来流剧烈掺混, 沿主射流方向形成射流区、冲击区、异重流区, 与张燕等^[1]的试验结果一致。在射流区, 射流流体卷吸周围环境水体而不断稀释; 在冲击区, 流速减小, 压强增大, 形成壁面反射流向四周扩散; 在环境水流和密度差的影响下, 潜入底层形成异重流; 在异重流区, 射流出口动量影响消失, 异重流随环境水体向下游运动。在射流区和冲击区, 紊动掺混越剧烈, 异重流区越不容易形成稳定的异重流, 浓度沿水深断面越容易均匀分布; 当水深较浅且射流出口动量较大时, 水体底部壁面对射流流体产生反射, 因而形成向四周喷射的壁面反射流, 若环境来流流速较小, 部分壁面反射流会朝射流孔口上游方向入侵。因此, 在已有射流区域划分的基础上, 需增加 1 个上游入侵区, 这一现象也为樊靖郁等^[11]所证实。

根据数值模拟结果, 在射流对称面上, 沿环境水流方向以射流孔口中心线与水底面的交点为基准点, 以 L_i 表示壁面反射流向上游入侵的水平距离, L_{max} 表示最大浓度值所在位置与基准点的距离, 见图 1。表 2 给出了射流流态特征值。由表 2 可见, 若

表 2 射流流态特征值

h/d	u_a/v_j	底层最大浓度	L_{max}/d	L_i/d
5	0.064	1.11	1.10	12.75
5	0.107	1.10	1.10	4.75
5	0.128	1.10	1.10	3.50
9	0.064	1.08	1.50	18.75
9	0.107	1.07	2.00	4.75
9	0.128	1.06	2.50	3.00
20	0.064	1.04	3.00	22.75
20	0.107	1.02	7.75	
20	0.128	1.01	15.75	

h/d	u_a/v_j	底层最大浓度	L_{max}/d	L_i/d
3.6	0.064	1.12	0.88	14.75
3.6	0.105	1.12	0.88	6.75
3.6	0.128	1.12	1.12	4.75
7.2	0.064	1.10	1.12	18.75
7.2	0.105	1.09	1.50	6.75
7.2	0.128	1.08	1.50	3.50
10.7	0.064	1.09	1.12	18.75
10.7	0.110	1.08	1.50	4.75
10.7	0.128	1.08	2.00	4.75

注: 底层最大浓度为环境浓度的倍数。

以水底面最大浓度值所在位置为射流触底点, 相同水深条件下, 触底点位置随环境流速的增大而下移, 触底点浓度随环境流速的增大而略有减小。可以推测, 在有限水深条件下, 若环境流速无穷大, 异重流将难以向上游入侵; 相同环境来流条件下, 触底点位置随水深的增大而下移, 触底点浓度随水深的增大而减小, 这一现象同样为张燕等^[1]所证实。表 2 表明, 相同水深条件下, 底部壁面反射流向上游入侵的距离随环境流速的增大而减小; 在 u_a/v_j 较小时(如为 0.064), 底部壁面反射流向上游入侵的距离随水深的增大而增大, 但随着 u_a/v_j 的增大, 其向上游入侵距离反而随水深的增大而减小。数值模拟结果表明, 当 $h/d = 20$ 且 $u_a/v_j = 0.107$ 或 0.128 时异重流不向上游入侵。

6 断面密度等值线分布特征

选取无量纲密度 ρ/ρ_a 进行分析, 其中 ρ 为任意位置的水体密度, kg/m^3 , 图 3 和图 4 给出了 $h/d = 20$ 时不同 u_a/v_j 下对称面和水体底面上的无量纲密度等值线分布。由图 3 ~ 4 可见, $u_a/v_j = 0.064$ 时, 在来流作用下, 射流水体着底点略向下游移动, 着底后形成的壁面反射流向上游形成入侵段, 由于环境来流和底部壁面的阻力作用, 该入侵段一般较短, 因此入侵段内等值线分布较密, 浓度梯度较大。在射流背流面, 受到环境来流绕流作用, 射流水体卷吸周围环境水体并与之掺混, 出现分叉现象, 射流水体不断膨胀, 并在环境来流携带和紊动作用

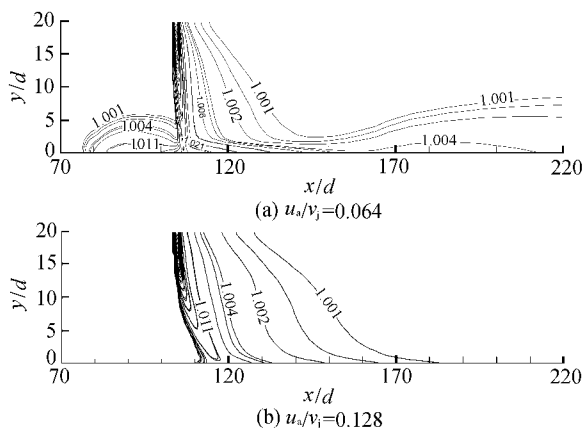


图3 对称面上的无量纲密度等值线分布 ($h/d = 20$)

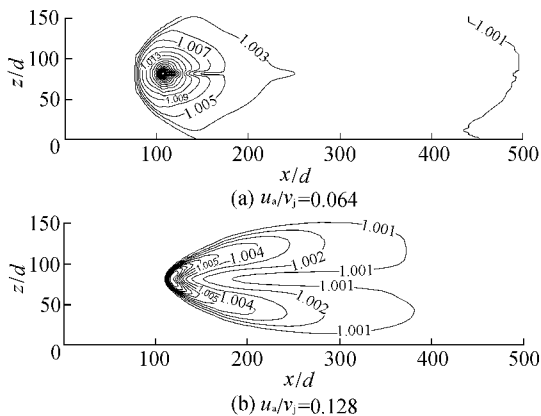


图4 水体底面上的无量纲密度等值线分布 ($h/d = 20$)

下向下游方向移动和扩散,因此图中显示紧邻射流背流面存在一浓度梯度分布。卷吸了环境水体的射流水体着底后向四周反射,在初始动量的作用下,沿下游方向形成附壁射流,由于初始段流速较大及壁面吸附作用,初始压强较小,因此断面在水平方向距离射流孔口中心 $40d$ 左右的位置处出现收缩,然后在底部壁面阻力的作用下,动量迅速衰减,在较短距离内高浓度流体迅速膨胀,最终在环境来流携带和密度差的影响下形成异重流向下运动。显然,若形成的附壁射流初始段动量越大,则在较短距离内收缩和膨胀的幅度就越大,紊动掺混越剧烈,在水深很浅时,很容易在全水深断面形成掺混,在近区很短距离内沿水深断面浓度将趋向均匀分布,不会形成稳定的异重流流态。

当 u_a/v_j 增大为 0.128 时,由于环境来流的作用较 $u_a/v_j = 0.064$ 时的大,射流在着底前已向下游方向运动一段较长距离,因此射流背流面的浓度梯度扩散范围比较大;着底后形成向上游方向的壁面反射流很弱,不足以抗衡环境来流和壁面的阻力,整个壁面反射流在来流和密度差的影响下,随环境来流向下运动并逐渐潜入水底,形成较为稳定的异重流流态。另外,从底部壁面浓度等值线分布可以看到,由于环境流速大,绕流作用强烈,射流下游出现

更为明显的分叉现象。

图5和图6给出了 $h/d = 20$ 时不同 u_a/v_j 条件下下游与射流孔口中心线距离分别为 $4d$ 、 $16.5d$ 和 $48.5d$ 位置处横断面上的无量纲密度等值线分布。

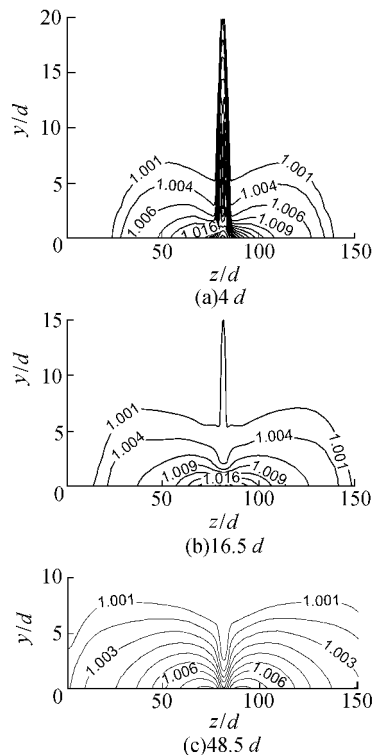


图5 在 $h/d = 20$, $u_a/v_j = 0.064$ 时横断面上的无量纲密度等值线分布

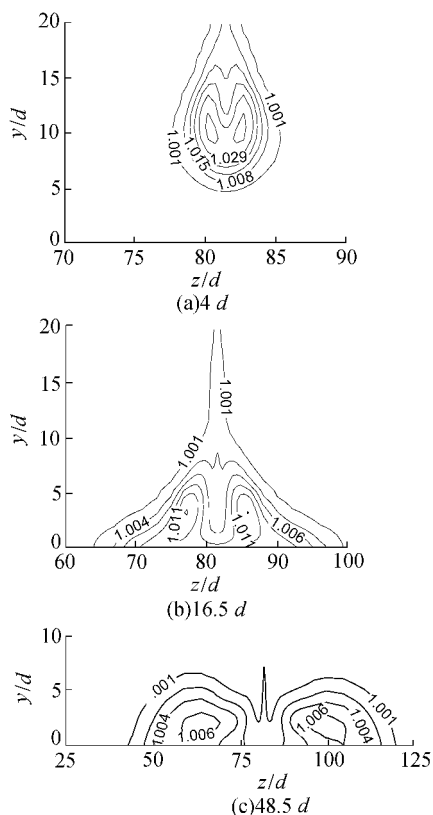


图6 在 $h/d = 20$, $u_a/v_j = 0.128$ 时横断面上的无量纲密度等值线分布

由图 5~6 可见,这 2 种工况下横断面上的密度等值线分布差别较大:在离射流孔口 $4d$ 位置处, $u_a/v_j = 0.064$ 时,高浓度射流已经着底,且在横向扩展范围较大,但分叉不明显,而同一断面位置处, $u_a/v_j = 0.128$ 时的高浓度射流则还未触底,断面密度等值线形状呈现较为特别的水滴状。射流出现分叉,出现了 2 个高浓度中心,在距离射流孔口 $16.5d$ 位置处, $u_a/v_j = 0.064$ 时射流已出现分叉,横向浓度继续扩展并趋于平坦, $u_a/v_j = 0.128$ 时水滴状射流已触底并开始横向扩展,在距离射流孔口 $48.5d$ 位置处,2 种工况下射流流体都平坦地贴附于水底面并分叉为 2 个浓度中心,但 $u_a/v_j = 0.064$ 时的密度等值线在水深方向扩展范围更大,比较而言, $u_a/v_j = 0.128$ 时形成的异重流更稳定。

7 水体底面密度等值线分布

高浓度射流进入环境水体后,由于密度差的作用,在适当的条件下最终将潜入水底形成异重流。在异重流区,数值模拟以及试验结果都显示水体底部浓度较大。但由于环境来流绕流的影响,射流背流面出现分叉,导致下游横断面上的最大浓度不在对称面上,而是沿对称面两边分别出现了 1 个高浓度中心。张燕等^[1]通过试验给出了对称面上沿水深方向和水平方向上的浓度分布特征,但从环保角度来讲,需要了解水体底面泥浆最大浓度值的大小和分布。图 7(a)(b)分别给出了同一水深以及同一流速情况下水体底面水平方向的最大浓度分布,浓度最大值所在位置为射流触底点,触底点上游段浓度分布为壁面反射流向上游入侵造成。由图 7 可见,触底点下游 $30d \sim 40d$ 范围内,各试验工况下的水体底面水平方向的最大浓度值迅速减小,之后各浓度分布线变化非常平缓,逐渐接近水平,表明形成了较为稳定的异重流。由图 7(a)可知,同一水深条件下,环境流速越大,上游入侵段越短,触底点的最大浓度值越小,但不同环境流速对触底点下游水平方向的最大浓度值影响较小,最大浓度分布线接近重合。由图 7(b)可知,环境流速一定时,水深对触底

点上游的入侵段影响很小,对下游最大浓度分布有一定程度影响,其大致影响趋势是水深越小,水体底面水平方向的最大浓度越大。图中显示 $h/d = 20$, $u_a/u_j = 0.128$ 时,在射流孔口附近位置($0 \sim 40d$ 范围内),水体底面沿水平方向各位置处最大浓度较其他工况小很多,数值模拟显示该工况壁面反射流很弱,无上游入侵,其原因显然是由于环境来流作用较强,高浓度射流流体触底前较其他工况下能更充分地掺混和稀释,因此触底后水体底面的浓度更小。

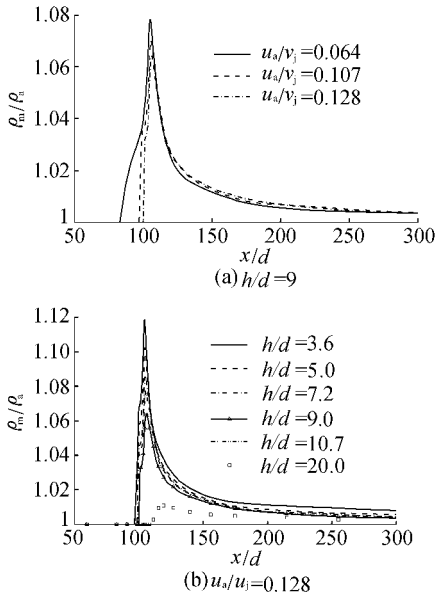


图 7 水体底面水平方向的最大浓度分布

为分析水体底面横向浓度分布情况,以 z/d 轴为纵坐标,以 $(\rho - \rho_a)/(\rho_m - \rho_a)$ 为横坐标,其中 ρ 表示横向任一位置处泥浆的密度, ρ_m 表示横向上泥浆的最大密度。图 8 给出了下游距射流孔口水平位置分别为 $5.25d$ $24.5d$ $43.5d$ $63.5d$ 和 $90.5d$ 处泥浆的横向浓度分布。图 8 显示,水体底面泥浆横向浓度分布迅速由离射流孔口很近时的单峰变为以对称面与水体底面交线为中心线(虚线所示)的对称双峰分布,表明射流出现分叉,沿 z 轴横向的泥浆浓度分布范围则逐渐扩大。

8 结 论

a. 采用三维 RNG 湍流模型,对有来流环境下

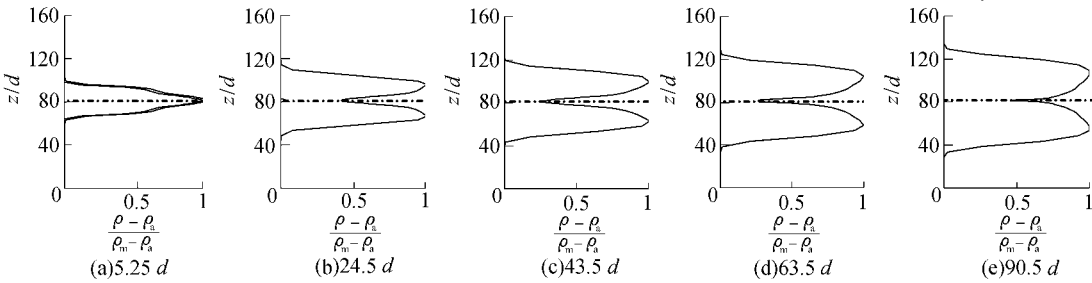


图 8 $h/d = 9$, $u_a/u_j = 0.128$ 时水体底面不同位置处的横向浓度分布 (下转第 59 页)

4 年运行 ,10 台机组运行平稳 ,没有原机组运行时振动等现象 ,噪音降低 ,水泵装置效率大幅度提高 ,机组试运行验收时测试水泵填料函部位 ,测试仪显示的垂直振动读数为 0.003 ~ 0.009 mm ,水平振动读数为 0.003 ~ 0.007 mm ,满足《泵站技术规范》的要求。

5 结 论

江都三站进水流道改造应用自密实微膨胀混凝土配制与浇筑施工技术、复杂流道模板组合装配技术、流道环形薄壁厚薄不均混凝土防裂技术、保证新老混凝土黏结技术 ,通过采取混凝土增压、浇筑过程中设置静停等待期、利用混凝土势能与动能的转变等技术和措施 ,确保混凝土浇筑到位 ,防止混凝土产生沉降收缩裂缝和温度裂缝。采用二次拌和、二次投料、外加剂后掺等施工工艺 ,提高自密实混凝土拌合物的均质性 ,防止坍塌度损失。通过多项技术的组合应用 ,多成果集成创新 ,保证流道混凝土密实度、表面平整度、流道流线。江都三站进水流道成功

改造为国内外大型泵站流道改造提供了新的施工技术和工艺 ,也为过密配筋、薄壁、复杂形体等振捣困难的部位应用自密实混凝土施工技术提供实例。

参考文献 :

[1] 沈日迈.江都排灌站 [M].3 版.北京 :中国水利电力出版社 ,1986 :101-106.
[2] 汤正军 雍成林.江都三站综合技术改造初探 [J].水利水电科技进展 ,1999 ,19(4) :59-61.
[3] 朱炳喜 邵林 彭志芳 ,等.自密实混凝土在结构中应用质量控制 [J].施工技术 ,2008(增刊) :47-49.
[4] CCES02—2004 自密实混凝土设计与施工指南 [S].
[5] JTJ/T 271—99 港口工程混凝土黏结修补技术规程 [S].
[6] 朱炳喜 徐荣俊.江苏省水闸混凝土构件维修加固施工技术 [C]//杨克 ,陈改新.混凝土工程耐久性研究和应用研讨会论文集.成都 :西南交通大学出版社 ,2006 :323-326.

(收稿日期 2009-12-09 编辑 :方宇彤)

(上接第 21 页)

的高浓度射流水体垂直进入浅水中的流态进行数值模拟 ,得到了不同水深和来流下的流态分布和浓度分布 ,证明了射流区、冲击区以及异重流区的存在 ,与试验结果吻合。

b. 浅水环境中 ,在环境流速较小时 ,射流撞击壁面形成的反射流会向射流孔口上游入侵 ,因此在已有流动分区的基础上 ,还存在 1 个上游入侵区 ,入侵长度随环境流速的增大而减小 ,水深对其的影响相对较小。

c. 环境流速的增大会增大射流触底点向下游的移动距离 ,触底点浓度也略有减小 ,相同来流条件下 ,触底点位置随水深的增加而下移 ,浓度随水深的增加而减小。

d. 流态分析显示 ,射流以较大动量撞击水体底面 ,形成的壁面反射流在下游方向形成动量较强的附壁射流 ,在较短距离内收缩和膨胀 ,紊动掺混剧烈 ,水深较浅时容易形成全水深掺混 ;比较而言 ,碰撞较弱时形成的附壁射流弱 ,无上游入侵 ,横断面会形成特别的水滴状浓度分布。

e. 水体底面上水平方向的最大浓度分布显示 ,同一水深下 ,环境流速对触底点上游段浓度线影响较大 ,对触底点下游浓度分布线影响较小 ,环境流速一定时 ,水深对触底点上游的入侵段影响很小 ,对下游最大浓度分布有一定程度影响 ,其大致影响趋势是水深越小 ,水体底面浓度越大。

参考文献 :

[1] 张燕 王道增 樊靖郁.流动环境中高浓度射流扩散实验研究 [J].应用数学和力学 ,2002 ,23(12) :1276-1282.
[2] 李樟苏 程和森 曹更新 ,等.利用放射性示踪沙定量观测长江口北槽航道抛泥区底沙运动 [J].海洋工程 ,1994 ,11(2) :59-67.
[3] YU T S ,LI C W. Instantaneous discharge of buoyant fluid in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1998 ,12 :1161-1176.
[4] NAKASUJI K ,TAMAI M ,MUROTA A. Dynamic behaviors of sand clouds in water [C]//International Conference on Physics : Modeling of Transport and Dispersion. Boston : Massachusetts Institute of Technology ,1990 :8 :1-6.
[5] 王长海 丁红 邱桔斐.抛泥扩散淤积分布计算 [J].水道港口 ,2007 ,28(2) :86-90.
[6] 陈祖华 王光谦 王志石.河口抛泥数学模型及应用 [J].水利水运工程学报 ,2003(1) :44-48.
[7] 徐宏明.疏浚土扩散数学模型及其应用 [J].海洋环境科学 ,2000 ,19(2) :34-37.
[8] 吴修广 季大闰 史英标 ,等.港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟 [J].水运工程 ,2006(8) :87-91.
[9] 吴华林 严以新 周宜林.抛泥运动研究述评及展望 [J].泥沙研究 ,2008(5) :76-80.
[10] 槐文信 方神光.静止环境中阻力圆盘浮力射流特性的研究 :数学模型及计算方法的验证 [J].水科学进展 ,2004 ,15(5) :549-554.
[11] 樊靖郁 张燕 王道增.动水中含污染物冲击射流横向高浓度聚集区的形成机理和特性分析 [J].水科学进展 ,2005 ,16(5) :623-627.

(收稿日期 2009-08-18 编辑 :骆超)