

用于深隧工程的折板式竖井湿室部分数值模拟研究

李璐¹, 梁舒豪², 杨墨¹, 薛英文^{3,4}

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 湖南省建筑设计院有限公司, 湖南 长沙 410011; 3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为研究不同工况下折板式竖井内的水力特性参数变化情况, 分别采用 RNG $k-\varepsilon$ 和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对竖井湿室部分进行数值模拟; 同时, 结合实际工程, 构建 1:20 物理模型, 得到不同工况下的试验结果, 将其与模拟结果进行对比分析。结果表明, 两种模型都能得到较为合理的流场, 但 Realizable $k-\varepsilon$ 模型的计算结果与试验结果更为相符; 竖井的总消能率可达到 96% 以上, 消能效果较好, 折板间能量的消耗主要依靠水垫层消能和紊动消能。

关键词: 深层隧道; 折板式竖井; 水力特性参数; Realizable $k-\varepsilon$ 模型; 消能; 数值模拟

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2019)13-0128-06

Numerical Simulation of Wet Chamber Part of a Baffle-drop Shaft in Deep Tunnel Engineering

LI Lu¹, LIANG Shu-hao², YANG Mo¹, XUE Ying-wen^{3,4}

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Hunan Architectural Design Institute Co. Ltd., Changsha 410011, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Engineering Research Center of Urban Disasters Prevention and Fire Rescue Technology of Hubei Province, Wuhan 430072, China)

Abstract: RNG $k-\varepsilon$ model and Realizable $k-\varepsilon$ model were used to simulate the wet chamber part of a baffle-drop shaft to explore the variation of hydraulic parameters under different working conditions. Meanwhile, a 1:20 physical model based on actual engineering case was established to obtain experiment results, and the results were compared with the simulation results. The results indicated that reasonable flow fields could be obtained by both of the two models. However, the computational results of Realizable $k-\varepsilon$ model were more consistent with experiment results. Additionally, the total energy dissipation rate of baffle-drop shaft could reach above 96%, indicating the energy dissipation effect was obvious. The energy dissipation between baffles mainly ascribed to the water cushion and turbulence.

Key words: deep tunnel; baffle-drop shaft; hydraulic parameter; Realizable $k-\varepsilon$ model; energy dissipation; numerical simulation

随着城市的不断发展, 污水处理厂用地布局与城市格局的矛盾、合流制溢流和内涝等问题日益加

剧。为此,有学者根据实际工程背景,提出了地下深层排水隧道系统(简称“深隧系统”)[¹]。其中,入流竖井作为深隧系统的关键组成部分,能将水流从浅层排水系统安全稳定地输送到深层隧道[²]。目前常用的竖井包括跌落式竖井和旋流式竖井。跌落式竖井使浅层排水系统中的水流自由跌落至水垫层中,由此水流能顺利地进入到深层排水隧道;而旋流式竖井采用特殊的进口方式,使得水流沿着竖井内壁呈螺旋式下落,至竖井底部后与水垫层形成冲击,随后一起被输送至深层排水隧道[²]。

折板式竖井,一种新型的竖井形式,在跌落式竖井的基础上设置交错的折板,使水流跌落在折板或壁面上,经过往复跌落后进入到深层排水隧道中[³]。这种竖井能有效避免空化,同时结构简单、消能效果也较好。近年来,国内外已有较多学者对折板式竖井进行了研究[³⁻⁵],但大多采用圆形断面,对其他形式的断面研究较少,而不同的竖井断面会有不同的壁面形态,折板间水流流态、水力参数分布、过流能力等也会有所变化;另外,之前的研究大多采用小尺寸模型,而小尺寸模型流道非常狭窄,竖井中很多水力参数很难通过模型试验测得。鉴于此,笔者采用数值模拟方法,弥补试验测量的不足,对矩形断面的折板式竖井进行模拟计算,研究竖井在不同工况下的水力特性参数变化,并采用 1:20 的比例建立物理模型,测量实际模型的部分水力参数,将试验结果与数值模拟结果进行对比分析,验证数值模拟方法及相关湍流模型和参数设置的合理性,以为后续的竖井研究提供参考。

1 物理模型建立

实际工程中的折板式竖井初始方案设计如图 1 所示,由进水渠道、竖井主体段、出水渠道组成,设计进水规模近期为 $2.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 、远期为 $4.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 。进水渠道断面为矩形,尺寸为 $2.50 \text{ m} \times 1.50 \text{ m}$,渠道内底高程为 21.00 m ;竖井主体段由湿室和干室两部分组成,整体平面尺寸为 $10.00 \text{ m} \times 15.00 \text{ m}$,底高程为 -4.00 m ;湿室主要用于消能,内设 12 层尺寸为 $5.00 \text{ m} \times 4.00 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 的折板,间隔为 2.08 m ,每层折板的底部分别设置 $1.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ 的通气孔;干室主要用于通气和除臭,断面尺寸为 $10.00 \text{ m} \times 11.00 \text{ m}$,顶部设有除臭间。出水渠道由两个 DN1 500 的管道组成,用于将竖井中的污水输送至隧道的主流段。

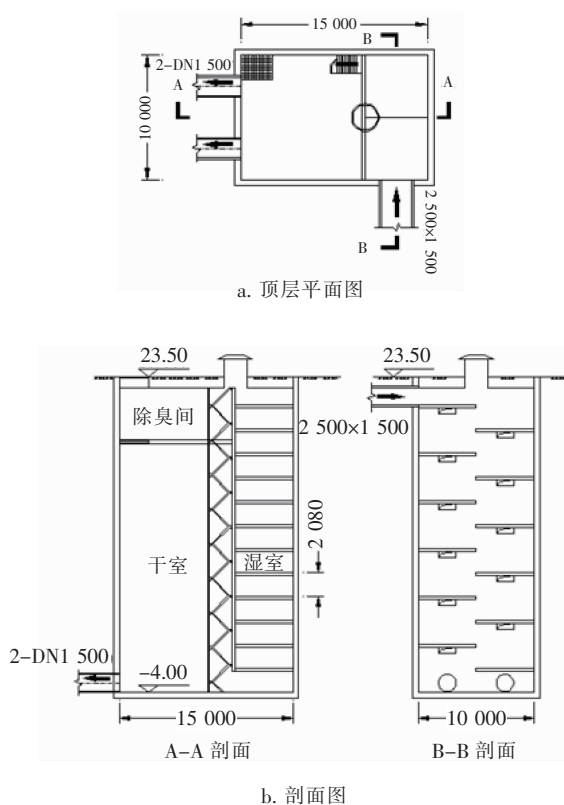


图 1 折板式竖井的初始方案设计

Fig. 1 Initial design of baffle-drop shaft

考虑到折板式竖井内可以达到通气充分条件、本研究重点考察湿室内的折板等因素,将竖井进行了相应简化。试验模型采用重力相似准则设计,且选用 1:20 的几何尺寸制作,简化模型见图 2。试验模型主体部分采用有机玻璃板制作,其入口段采用 DN50 的管道进行衔接;竖井的进水端和出水端分别设置高、低位水箱,采用水泵进行水流循环。

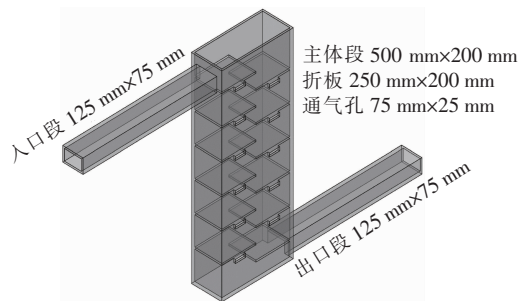


图 2 折板式竖井试验模型示意(1:20)

Fig. 2 Schematic diagram of 1:20 baffle-drop shaft

本研究仅对竖井内流态以及压强进行测量。流态图像采用照相机获取,压强数据采用压力传感器(TST6300)测量,试验及计算测点分布如图 3 所示,其中折板最左端代表横坐标原点。

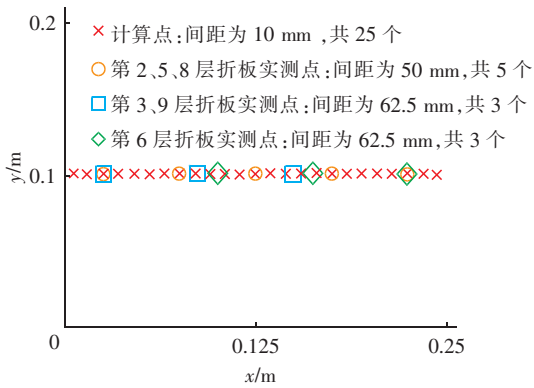


图3 折板上的压强测点布置

Fig. 3 Arrangement of pressure measurement points on the baffles

2 数学模型建立

折板式竖井数值计算所需的紊流模型分别采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,其对应的不可压缩流体控制方程组^[6]如下:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (2)$$

k 方程(RNG $k-\varepsilon$ 模型):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程(RNG $k-\varepsilon$ 模型):

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

k 方程(Realizable $k-\varepsilon$ 模型):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (5)$$

ε 方程(Realizable $k-\varepsilon$ 模型):

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度; x_i, x_j 为坐标分量; u_i, u_j 为速度分量; P 为流体压强; $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 为紊流切应力; f_i 为质量力分量; μ 为动力黏度系数; k 和 ε 分别为紊动能和紊动耗散率; G_k 为紊动能产生项。

关于竖井内气液两相流问题,本研究采用 VOF 模型对水流自由表面进行追踪,液相体积分数控制方程为:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式中: α_w 为液相体积分数,气液两相体积分数总和为 1, $\alpha_w = 0$ 代表控制单元里全是气相, $\alpha_w = 1$ 代表该单元全是液相, $0 < \alpha_w < 1$ 代表该单元内部分是液相、部分是气相。

对于上述控制方程组,采用有限体积法进行离散,而离散后的方程组采用基于压力-速度耦合且对瞬态流动问题较为合适的 PISO 算法。

建立折板式竖井数学模型,计算区域采用 5~10 mm 的六面体结构化网格进行划分,其中进口端区域的网格局部细化,如图 4 所示。数值计算时间步长经过相应调试,设置为 0.000 5~0.001 s。

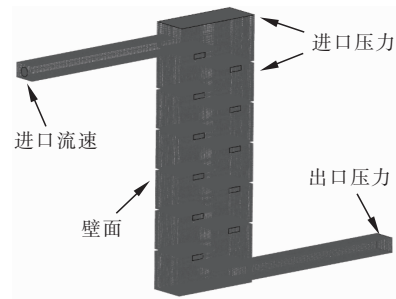


图4 计算区域的网格划分及边界条件

Fig. 4 Grid partition and boundary distribution of the computation domains

3 结果与分析

分别采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对远期工况下的竖井进行数值模拟。

3.1 流态

数值计算与试验得到的远期工况下竖井内部流态如图 5 和图 6 所示。可以看出,数值计算所得到的水流流态与试验基本一致,均呈往复跌水流态;水流从折板上射出,直接跌落在下一层折板上,随后与折板上由于竖井壁面限制而形成的水垫层进行强烈的对冲,其中一部分水流与水垫层掺混,形成涡旋流动,另一部分水流则反向流动跌落至下一级折板上,

如此往复跌落而形成流态。从竖井内水体流动来看,随着水流往下跌落,折板上水流依然保持为往复跌水流态,但水舌与水垫层撞击程度越来越剧烈,掺混效果也越来越强。

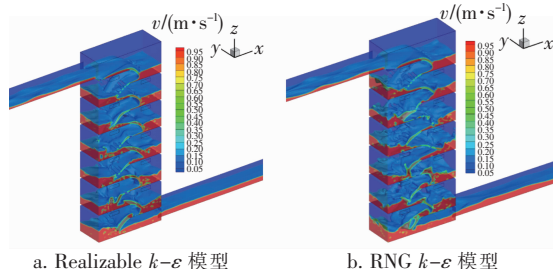


图 5 折板式竖井内部流态

Fig. 5 Flow patterns in baffle-drop shaft

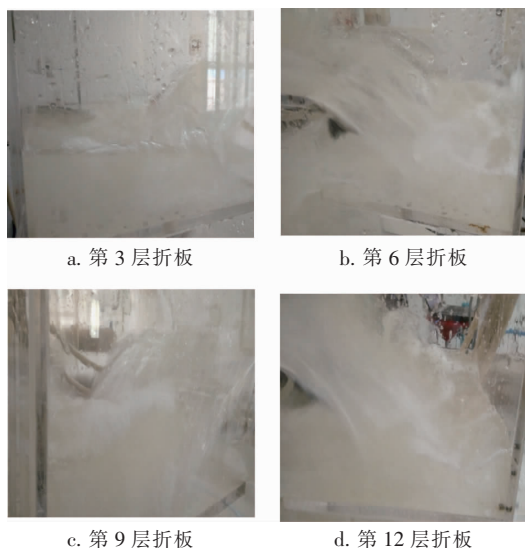


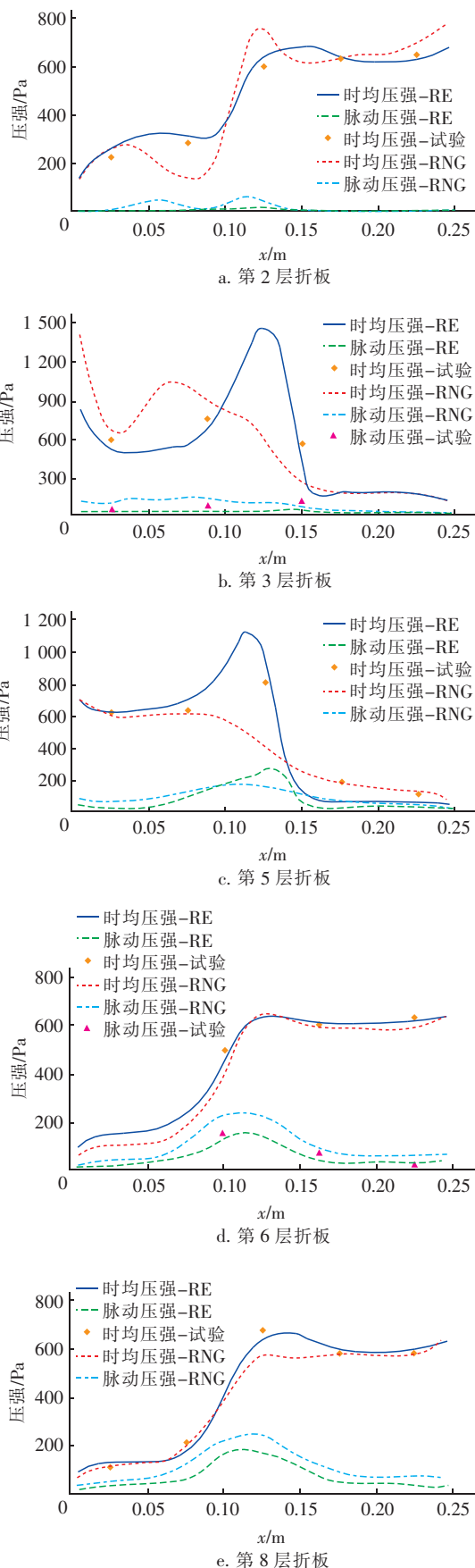
图 6 不同折板上的水流流态测定结果

Fig. 6 Experiment results of flow patterns on different baffles

两种湍流模型的计算结果主要不同之处在于:
①RNG $k-\varepsilon$ 模型计算得到的第 2 层折板到第 3 层折板之间的水舌射流水平距离较远,与试验结果相差较远,而 Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算得到的结果更加符合实际情况;
②RNG $k-\varepsilon$ 模型计算得到的水垫层波动程度较大,而且有部分区域的流态出现失真现象,而 Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算得到的结果是水流波动程度相对较小,与试验有略微的不同。总体来看,Realizable $k-\varepsilon$ 模型的计算结果与实测情况更为相符。

3.2 压强

图 7 为远期工况下第 2、3、5、6、8 和 9 层折板上表面纵向中心压强分布。



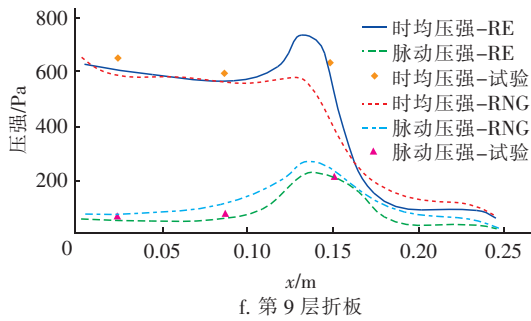


图7 不同折板上表面的压强分布

Fig.7 Pressure distribution on the baffles

由图7可以看出,折板上时均压强呈现类似“山峰”形曲线,曲线中部的峰值是由于水舌与折板撞击而导致的;靠竖井边壁一侧,压强先下降后略微增大,这可能是因为水舌与折板撞击后,受折板边壁的限制而使得水垫层内形成漩涡,这样折板上表面就会出现压强极小值;而靠折板边缘一侧,压强会陡然下降,这是因为折板上水垫层被水舌拦截,导致只有很薄的水流从折板上射流出去;在折板边缘附近,水流滑掠而过,与折板分离,压强会有所降低,甚至可能出现负压。从图7中也可以发现,脉动压强分布与时均压强类似,也会出现类似“山峰”形曲线,折板上靠近峰的脉动压强较大,靠近壁面和折板边缘的脉动压强较小,且随着水流往竖井底层折板跌落,脉动压强整体呈现先增大后稳定的趋势。

从整个竖井压强分布情况来看,竖井内水流从第2层跌落至第3层所产生的时均压强最大,之后随着水流往下跌落,最大时均压强会逐渐减小,而脉动压强却逐渐增大,但跌落至第6层折板之后,整体时均压强和脉动压强变化不大,这可能是因为折板式竖井消能效果较好,水流在跌落过程中,大部分能量被消耗,但由于涡旋或撞击,水流紊动会越加剧烈,当水流继续往下跌落,流体脉动充分发展使得时均压强和脉动压强变化减慢。

将计算与试验结果进行对比发现,对于时均压强,Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算的结果与试验测得的结果吻合较好,但也有个别点的数值有较大差异;对于脉动压强,两种模型在峰值附近的计算结果与试验结果都有一定差距。总体来看,Realizable $k-\varepsilon$ 模型的计算结果与实测情况更为相符。

3.3 流速

根据前文的分析结果,流速以及消能率均采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算所得进行分析。图8为远

期工况下竖井中心截面上的流速等值线分布图及第2、6和10层折板局部放大图,图中流速数值单位均为m/s。可知,竖井进水渠道内的平均流速约为0.8 m/s,经过折板间的跌落,水流势能转化成动能,跌落的水舌最大速度可达到1.8 m/s,但与折板撞击以及水垫层掺混后,折板边缘射流流速有所降低,且折板水垫层内的最大速度均不超过0.4 m/s;对比不同折板边缘的流速分布可以发现,随着水流往下跌落,整体流速略微增大,而折板边缘的流速却基本保持在0.6~1.4 m/s之间,这表明往复跌水的消能效果较好,因势能而转化的动能基本得到消耗。

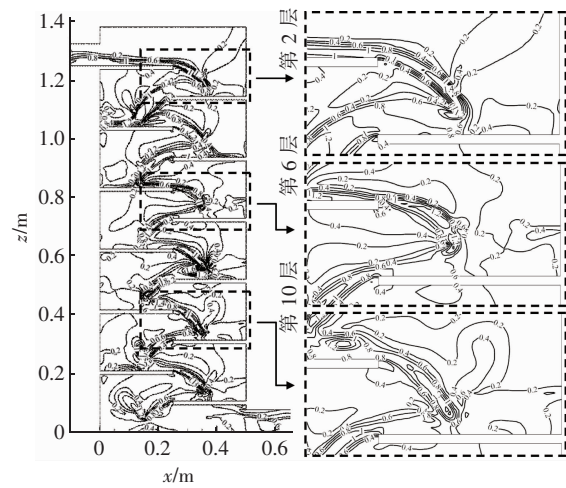


图8 流速等值线分布图及第2、6和10层折板间局部放大图

Fig.8 Velocity contour distribution and enlarged drawing of the step

3.4 消能率

图9为竖井内单一折板及多层折板间的消能率,其中单一折板的消能率上下游断面分别取相邻折板边缘的出流断面,多层折板间的消能率上下游断面分别取首层折板与对应折板边缘的出流断面。可以看出,折板式竖井的消能效果较好,水流经过4次跌落后,累计消能率就达到了93%以上,因势能而转化成的动能基本完全耗散。从单一折板的消能率变化情况来看,随着水流往下跌落,消能率从50.02%整体增大10%~25%,而后一直处于波动状态,这可能是因为最上层折板水流跌落增加的能量主要是由于与水垫层掺混及冲击折板被消耗,而水流继续往下跌落,紊动愈加剧烈,下层折板水流主要靠水垫层消能和紊动消能;由于折板间漩涡的存在,水垫层水深与折板边缘射流流速呈周期性变化,

相邻折板间的消能率就会产生图9中的波动状态。

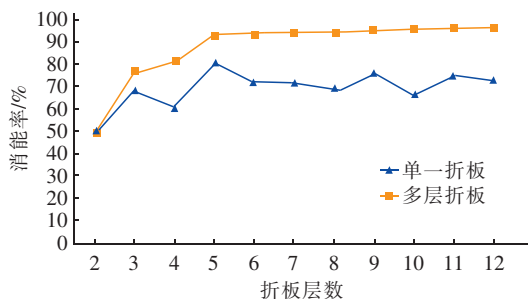


图9 竖井内单一及多层折板间的消能率

Fig.9 Energy dissipation of each baffle and multi-layer baffles

4 结论

① 采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型或 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对折板式竖井湿室部分进行数值模拟,都能得到较为合理的流场,但后者计算结果与实际更相符。

② 折板上时均压强和脉动压强均呈类似“山峰”形分布规律,水舌撞击或折板凹角处的压强最大;整个竖井内,第3层折板所受冲击最大,且之后最大时均压强会逐渐减小,而脉动压强却逐渐增大,直至竖井底部,两者均趋于稳定。

③ 折板间的水流流速先增大后减小,之后随着水流往下跌落,整体流速会有略微的增大,但折板边缘的流速基本保持在一定范围不变。

④ 折板式竖井的总消能率可达到96%以上,消能效果较好,折板间能量的消耗主要依靠水垫层消能和紊动消能。

⑤ 本研究中数值模拟计算结果与试验结果虽较为接近,但仍有很多不足之处,如试验中发现水垫层内由于水舌的冲击会出现很多气泡运动现象,而数值计算由于网格不够精细导致该现象不够明显,但过大的网格数量往往会增加计算成本;竖井内水流存在强旋转流动、气液两相流分离及强烈掺混现象,而 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对此还较难预测,故需对模型进一步改进;仅对小尺寸模型进行了研究,回归到原型竖井还是会有一定差异,需在之后的研究中考虑比尺效应问题。

参考文献:

- [1] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(24): 35-40.

Lu Zhaoyang, Che Wu, Tang Lei, et al. Application of stormwater tunnel to control of urban flooding and combined sewer overflow [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(24): 35-40 (in Chinese).

- [2] 王广华,陈彦,周建华,等. 深层排水隧道技术的应用与发展趋势研究[J]. 中国给水排水,2016,32(22): 1-6,13.

Wang Guanghua, Chen Yan, Zhou Jianhua, et al. Discussion on application and development trend of deep tunnel drainage[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 1-6,13 (in Chinese).

- [3] Odgaard A J, Lyons T C, Craig A J. Baffle-drop structure design relationships[J]. J Hydraul Eng, 2013, 139(9): 995-1002.

- [4] Ma Y, Zhu D Z, Rajaratnam N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft [J]. J Hydraul Eng, 2016, 142(10): 04016038.

- [5] 王斌,邓家泉,何贞俊,等. 折板跌落式竖井设计约束条件研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015, 13(5): 363-367, 374.

Wang Bin, Deng Jiaquan, He Zhenjun, et al. A study on design constraints for baffle-drop shaft structure [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 363-367, 374 (in Chinese).

- [6] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.

Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Xie Longhan. Practical Course of FLUENT Fluid Analysis and Simulation [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010 (in Chinese).



作者简介:李璐(1984-),女,湖北武汉人,硕士,高工,主要从事水处理技术设计与研究工作。

E-mail: 16575854@qq.com

收稿日期:2018-12-13