

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.016

基于数值模拟的武汉大东湖深隧入流竖井选型

李 尔¹, 曾祥英¹, 邹惠君¹, 石亚军¹, 吴志高¹, 饶世雄¹,
韩继斌², 姜治兵², 杨青远²

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430015; 2. 水利部长江水利委员会
长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 入流竖井是排水深隧系统关键组成部分之一,选择合适的入流竖井类型直接影响着排水深隧系统的设计和运行。以武汉大东湖污水深隧工程中处理能力最大的二郎庙入流竖井为例,选择旋流式和折板式两种入流竖井进行对比,并采用 realizable $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLER 算法分别对入流竖井中的流态、流速和压强等进行数值模拟分析。结果表明,在设计工况条件下,旋流式入流竖井在气液分离效果、整流效果、池体受力情况和消能效果等方面均优于折板式入流竖井,考虑到两类入流竖井在造价方面相差不大,故该工程采用旋流式入流竖井。

关键词: 大东湖污水深隧; 入流竖井; 选型; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0108-07

Selection of Drop Shaft in Dadonghu Deep Drainage Tunnel in Wuhan Based on Numerical Simulation

LI Er¹, ZENG Xiang-ying¹, ZOU Hui-jun¹, SHI Ya-jun¹, WU Zhi-gao¹,
RAO Shi-xiong¹, HAN Ji-bin², JIANG Zhi-bing², YANG Qing-yuan²

(1. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430015, China;
2. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission of the
Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: Drop shaft is one of the key components of deep drainage tunnel system. The selection of appropriate drop shaft type directly affects the design and operation of deep drainage tunnel system. This paper compared the performances of two types of drop shaft, namely vortex drop shaft and baffle drop shaft, and simulated the flow pattern, velocity and pressure in Erlangmiao drop shaft which has the largest treatment capacity in Dadonghu Wastewater Deep Drainage Tunnel Project in Wuhan by realizable $k-\varepsilon$ model and SIMPLER algorithm. Under the design working conditions, the vortex drop shaft was superior to the baffle drop shaft in terms of gas-liquid separation, flow-stabilizing performance, shaft wall stress condition, and energy dissipation. Considering that the two types of drop shafts had little difference in investment, the vortex drop shaft was eventually selected for the project.

Key words: Dadonghu Wastewater Deep Drainage Tunnel; drop shaft; type selection; numerical simulation

为解决环境邻避效益,武汉市将大东湖地区的沙湖、二郎庙、落步咀3座污水处理厂进行整体拆

除,并通过排水深隧系统将污水输送至位于化工新城的北湖污水处理厂。入流竖井是排水深隧系统关

键组成部分之一,其作用是将浅层排水管网系统的来水转输到深层隧道中,在此过程中对水流能量进行消减并排除其中的气体。不同类型的入流竖井消能和排气效果差别较大,选择合适的入流竖井类型是排水深隧系统设计和运行的关键。针对该问题,笔者采用数值模拟的方法对大东湖污水深隧工程中入流竖井的选型进行研究。

1 武汉大东湖污水深隧工程

1.1 项目概况

武汉大东湖污水深隧工程主要是转输沙湖、二郎庙、落步咀3座污水处理厂服务范围内的污水和白玉山片区的污水,其由以下部分组成:①浅层收集和处理系统,二郎庙、落步咀、武东预处理站及上游地表污水管网系统;②浅、深系统衔接设施,二郎庙、落步咀、武东入流竖井;③深层隧道系统,主隧和支隧;④主隧和支隧连通设施,如汇流井;⑤深隧末端泵站。武汉大东湖污水深隧工程布局如图1所示。地表污水管网的来水经过各预处理站以后进入入流竖井,经其消能排气后进入污水深层隧道中流至末端,并由深隧末端泵站抽排至北湖污水处理厂^[1]。



图1 武汉大东湖污水深隧工程布局

Fig.1 Layout of Dadonghu Wastewater Deep Drainage Tunnel Project in Wuhan

1.2 主要工艺参数

主隧和支隧的设计流量:近期为11.58和3 m³/s,远期为15和5.72 m³/s。主隧起于二郎庙预处理站,止于深隧末端泵站(位于北湖污水处理厂内),全长约为17.9 km。主隧为单排隧道,其中二郎庙预处理站-汇流井(支隧汇入主隧处)隧段内径为3 m,长度约为6.9 km;汇流井-武东预处理站隧段内径为3.2 m,长度约为4.2 km;武东预处理站-深隧末端泵站隧段内径为3.4 m,长度约为6.8 km。支隧起于落步咀预处理站,止于汇流井,支隧为双排

隧道,每排隧道内径为1.5 m,长度约为1.7 km。主、支隧均采用压力流传输方式运行,主、支隧埋深约为26~50 m^[1]。

2 入流竖井类型及设计方案

2.1 入流竖井类型

根据相关案例调研结果,排水深隧中常用的入流竖井类型主要有旋流式和折板式入流竖井^[2-5]。旋流式入流竖井是在井室内设置中心筒,水流进入入流竖井后,先沿中心筒内壁以旋流形式向下流动,从中心筒下部的出水口流出,然后进入中心筒筒体外的整流逸气池(位于入流竖井下部)中,最终流入排水深隧中。水流在中心筒内完成初次消能,在整流逸气池内完成排气和第二次消能。折板式入流竖井是在井室内设置上下交错的折板,水流进入该入流竖井后依次经各级折板跌落后流入竖井底部,最后进入排水深隧中。水流在各折板之间跌落的过程中完成消能和排气^[6-9]。

2.2 设计方案

以大东湖污水深隧工程中处理能力最大的入流竖井——二郎庙入流竖井选型为例进行研究,其他入流竖井的选型方式与之类似。该竖井近期设计规模为7.37 m³/s、远期为8.28 m³/s,分别采用旋流式和折板式入流竖井进行设计。

① 旋流式入流竖井设计方案

旋流式入流竖井进水渠道断面尺寸为 $B \times H = 3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,圆形,内径为10 m,深为32.8 m,中心筒内径为2 m,中心筒下部设有4个出水口,各出水口断面尺寸为 $B \times H = 0.8 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。旋流式入流竖井设计方案如图2所示。

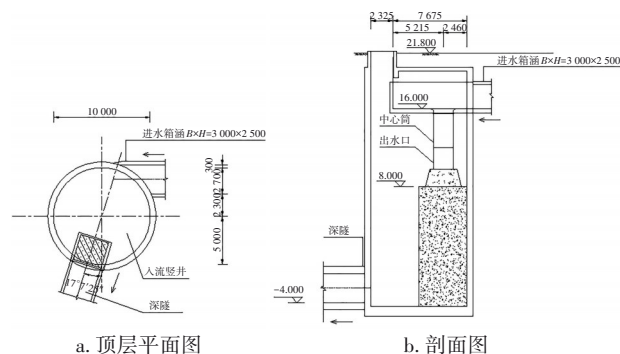


图2 旋流式入流竖井设计方案

Fig.2 Design scheme of vortex drop shaft

② 折板式入流竖井设计方案

折板式入流竖井进水渠道断面尺寸为 $B \times H =$

5.0 m×2.5 m, 圆形, 内径为10 m, 深为32.8 m。入流竖井内腔被中隔墙分为湿室和干室, 宽度分别为4和6 m, 湿室主要用于消能及气液分离, 干室主要用于通气。湿室内设7级上下交错布置的折板, 每两级折板之间的间隔为2.6 m, 折板之间的中隔墙设有1个通气孔, 其断面尺寸为 $B \times H = 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。折板式入流竖井设计方案如图3所示。

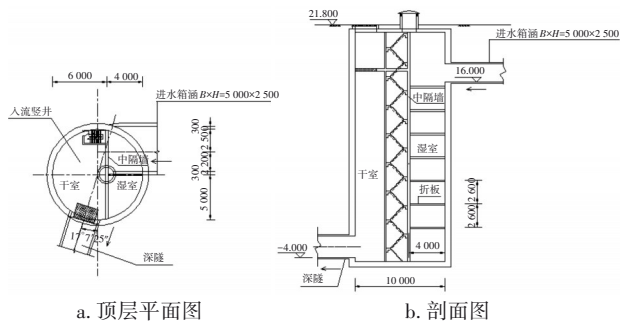


图3 折板式入流竖井设计方案

Fig.3 Design scheme of baffle drop shaft

3 数学模型的建立

采用三维计算流体力学模型对旋流式与折板式入流竖井中水流和气流进行模拟, 其中气液两相紊流采用realizable $k-\varepsilon$ 模型进行分析, 流速和压强耦合采用SIMPLER算法进行分析^[5,10]。

3.1 控制方程

三维realizable $k-\varepsilon$ 紊流数学模型模拟水流及气流流场过程见式(1)~(6)^[5,9-10]。

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + v_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: t 为时间,s; u_i, u_j 为速度分量,m/s; x_i, x_j 为坐标分量,m; v 为运动黏性系数,m²/s; v_t 为紊动黏性系数, $v_t = C_u k^2 / \varepsilon$,m²/s; k 为紊动能,J; ε 为紊动耗散率,m²/s³; p 为修正压强,Pa; f_i 为质量力,N; ρ 为水体密度,kg/m³; C_k 为平均速度梯度产生的紊动能项,

$$C_k = v_t \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right], \text{ m}^2/\text{s}^2; \text{ 经验常数 } C_u =$$

$$0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.33, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.42^{[5]}.$$

气液两相采用VOF模型进行分析, 令函数 $a_w(x, y, z, t)$ 与 $a_a(x, y, z, t)$ 分别代表控制单元内水、气所占的体积分数。在每个单元中, 水、气体积分数之和为1, 即^[5]:

$$a_w + a_a = 1 \quad (5)$$

对于单个控制单元, 存在三种情况, $a_w = 1$, 表示该单元完全是水相; $a_w = 0$, 表示该单元完全是气相; $0 < a_w < 1$, 表示该单元部分为水相、部分为气相, 并且存在水、气交接面, 水的体积分数 a_w 的控制方程为:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

3.2 网格划分

入流竖井计算区域采用六面体结构化网格进行划分^[7-9], 具体如图4所示。

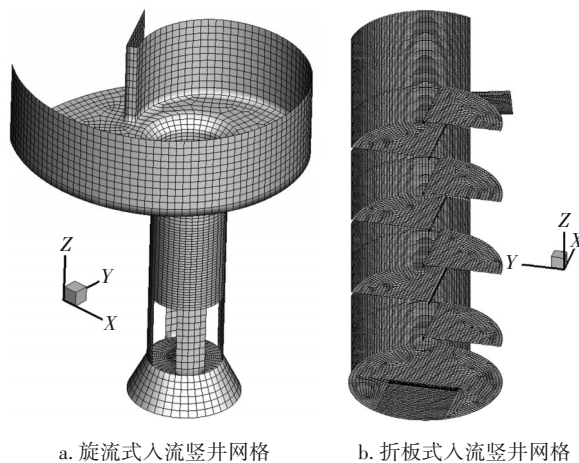


图4 入流竖井网格划分结果

Fig.4 Grid partition results of drop shafts

4 入流竖井数值模拟

对于二郎庙入流竖井, 按其最大设计流量为8.28 m³/s、平均设计流量为6.37 m³/s和设计水位为12 m时的工况进行数值模拟, 其他设计工况下的结论与之类似。

4.1 排气

旋流式和折板式入流竖井水相体积分数一维和三维分布结果如图5所示。由图5(a)~(d)可以看出,在最大设计流量和平均设计流量工况条件下,水流在旋流式入流竖井中心筒内旋流下落的过程中流速迅速增大,水体表面掺气量也随之增大,中心筒内形成了稳定的空气腔;掺气旋流从中心筒下部出水口流出时形成环状“水跃”,部分空气随环状“水跃”掺混入水流中,并且随其进入整流逸气池,随后在整流逸气池完成排气。整流逸气池内高程7 m以上的水体中存在明显的气团,而高程在7 m以

下的条件下则基本无气泡存在,水流由整流逸气池进入排水深隧时,隧道入口处也几乎无空气进入隧道。

还可以发现,中心筒内旋流的空心率随着高程的降低先减少后增大,最大设计流量和平均设计流量工况下中心筒的最小空心率分别出现在高程为16.2和15 m处,数值分别为0.25和0.37。该空心率能够保持旋流流态稳定,不会发生呛水现象。另外,与平均设计流量工况相比,在最大设计流量工况条件下,中心筒最小空心率产生处以下(高程为13~14 m处)出现剧烈的水、气两相流紊动带。

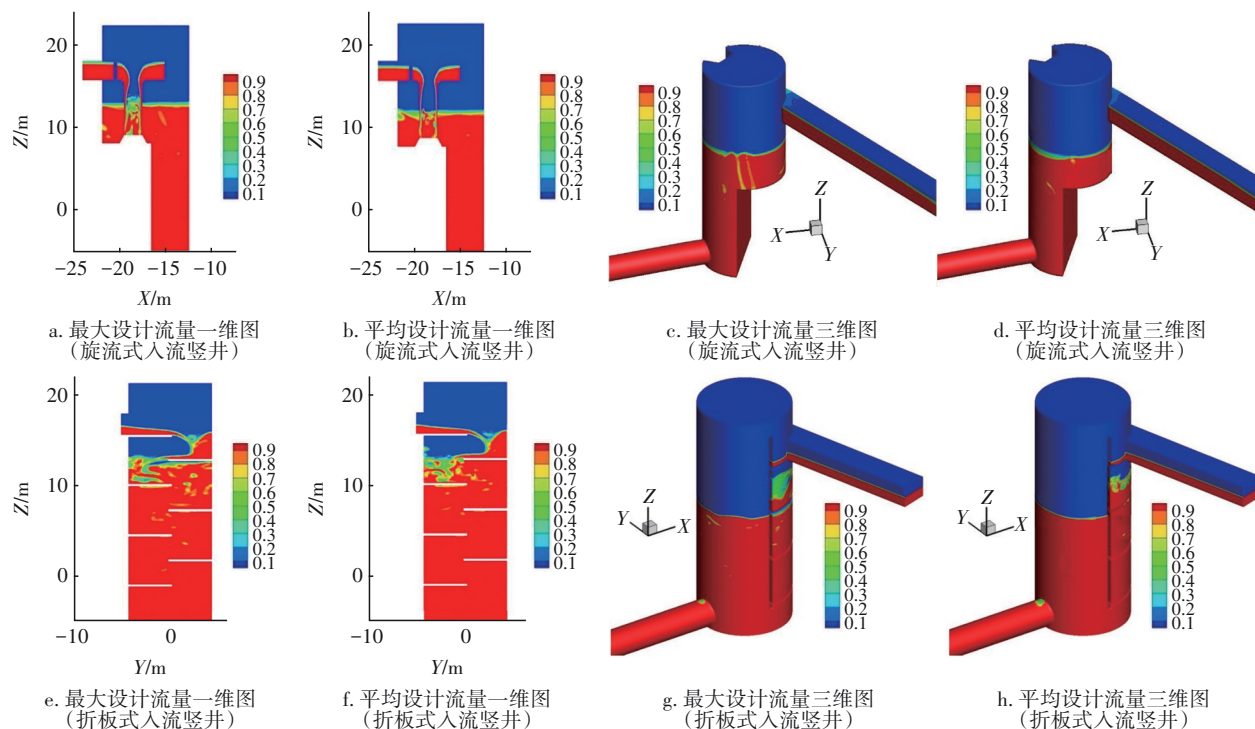


图5 旋流式和折板式入流竖井水相体积分数一维和三维分布结果

Fig.5 One-dimensional and three-dimensional distribution results of water phase volume fraction in vortex and baffle drop shafts

由图5(e)~(h)可以看出,在最大设计流量和平均设计流量工况条件下,由于折板式入流竖井内设计水位为12 m,因此水流在各级折板依次跌落的过程中,其在第2级和第3级折板上为自由跌水,大量气体在这两级折板处进入水流并被其携带进入下级折板,第2、3级折板下的通气孔处于畅通状态,其他级折板下的通气孔淹没于水下,入流竖井内随着高程的降低,气体含量逐渐降低,但有少量气体聚集在隧道入口处,并由此进入隧道。另外,与设计最大流量工况相比,平均设计流量工况下,在第3级

及以下的其他各级折板之间含气量明显减少,这说明设计流量越大,气液分离则需要更多级折板跌水来实现。

大东湖污水深隧系统为压力流运行且入流竖井设计水位相对较高,由上述分析可知,旋流式入流竖井排气效果略优于折板式入流竖井,水流经过其处理后几乎不会携带空气进入隧道中,这有利于减少隧道内部腐蚀和气体对水流流动的阻碍。

4.2 流速

旋流式和折板式入流竖井流速分布结果见图6。

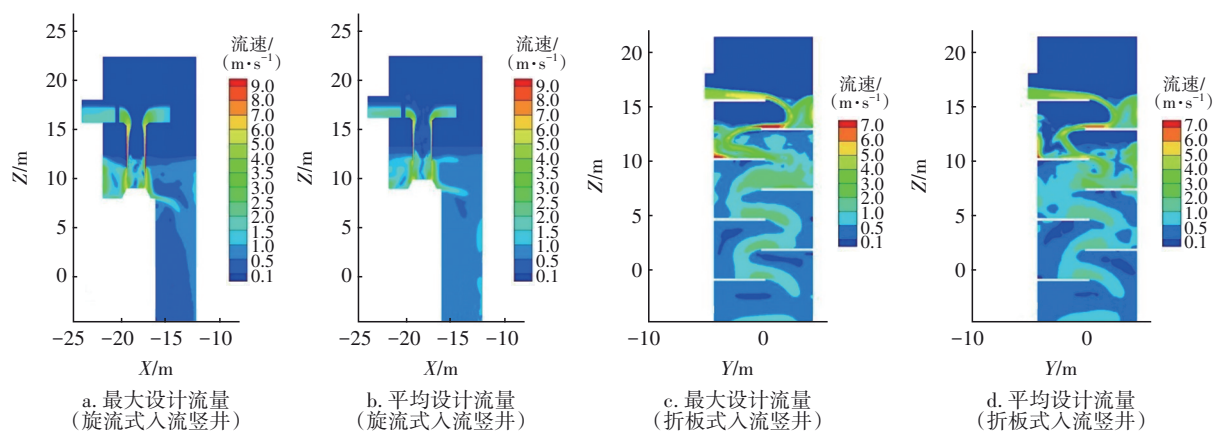


图6 旋流式和折板式入流竖井流速分布结果

Fig.6 Flow velocity distribution results of vortex and baffle drop shafts

由图6(a)和(b)可以看出,水流进入旋流式入流竖井以后,在中心筒旋流落下过程中其势能不断转化为动能,流速随着高程的降低而增大,至中心筒下部出水口顶缘附近时,局部位置流速达到最大,在最大设计流量和平均设计流量工况条件下,其值分别约为9和7.2 m/s。由环状“水跃”区出水时水流流速有所降低,进入整流逸气池以后直至入流竖井底部时,流速基本均小于0.8 m/s,两种工况条件下深隧入口处附近的断面平均流速分别约为0.6和0.47 m/s。

由图6(c)和(d)可知,在最大设计流量和平均设计流量工况下,水流进入折板式入流竖井后,在

各级折板依次跌落过程中流速的分布情况类似。其中第2、3级折板上水的流速较大,两种工况下分别达到6和5.2 m/s;其他级折板水流跌落区的流速相对较小,两种工况下分别约为4和2.5 m/s;至折板区底部时流速均在1 m/s左右,两种工况下深隧入口处附近的断面平均流速分别约为0.8和0.6 m/s。因此,旋流式入流竖井的水流在进入隧道时的流速低于折板式入流竖井,旋流式入流竖井整流效果更好。

4.3 压强

旋流式和折板式入流竖井内部压强分布结果如图7所示。

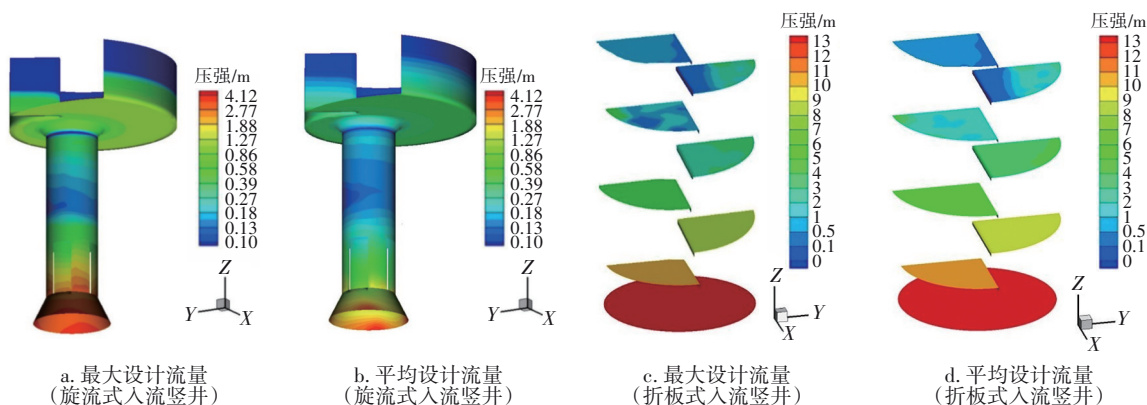


图7 旋流式和折板式入流竖井内部压强分布结果

Fig.7 Pressure distribution results inside vortex and baffle drop shafts

由图7(a)和(b)可知,在最大设计流量和平均设计流量工况下,中心筒喉部(进水渠底部与中心筒顶部衔接处)壁面都可见环状低压带,其值接近0 m水柱(1 m水柱的压强约为10 kPa),此区域压强梯度较大。中心筒喉部以下1~2 m范围内,两种工况的壁面压强分别为0.28~0.35和0.2~0.27 m水柱,

随后压强沿高程下降而逐渐降低,至中心筒喉部以下(约为4和2.2 m处)壁面的压强分别降至0.15和0.12 m水柱,其后壁面压强沿高程下降而逐渐增加,至中心筒下部的出水口底部处的压强分别为3.5和2.8 m水柱。

由图7(c)和(d)可知,在最大设计流量和平均

设计流量工况下,折板式入流竖井中第1级折板沿流向压强逐渐减小,均在1 m水柱以下。而第2、3级折板上压强分布都不均匀且梯度较大,水流直接跌落区压强较大,两种工况下分别达到5和3.7 m水柱以上。其他区域压强较小,分别在2和1.5 m水柱以下。第4、5级压强分布虽然仍不均匀,但是梯度已明显减小,平均压强分别约为5~6和4~5 m水柱。至第6、7级时折板压强分布已趋于均匀,其中两种工况下第7级折板平均压强分别达到11.5和10.6 m水柱。

由上述分析可知,旋流式入流竖井中心筒出水处的压强明显低于折板式入流竖井折板区出水口处,故其池体所承受的压强也低于折板式入流竖井。鉴于该项目为连续运行的污水深隧系统,长期、持续的较高压强负荷对池体结构受力不利,因此旋流式入流竖井更适合于本深隧系统。

4.4 能量消减

入流竖井的消能情况一般采用消能率 η 进行评价,见式(7)~(9)。

$$\eta = (E_0 - E_1)/E_0 \quad (7)$$

$$E_0 = Z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \quad (8)$$

$$E_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} \quad (9)$$

式中: E_0 和 E_1 分别为入流和出流位置相应的断面总能量,m; Z_0 和 Z_1 分别为入流和出流相应断面位置的水头,m; $\frac{p_0}{\rho g}$ 和 $\frac{p_1}{\rho g}$ 分别为入流和出流相应断面的压力水头,m; $\frac{a_0 v_0^2}{2g}$ 和 $\frac{a_1 v_1^2}{2g}$ 分别为入流和出流相应断面的速度水头,m。

旋流式和折板式入流竖井消能率的变化如图8所示。可知,在最大设计流量和平均设计流量工况下,旋流式入流竖井的总体消能率分别为91%和89%,折板式入流竖井分别为84%和81%。可见,旋流式入流竖井稍优于折板式,这是因为水流在旋流式入流竖井中心筒形成的附壁旋流具有强烈的摩擦消能作用,其后进入中心筒筒体外的整流逸气池又进一步消减了能量。另外,还可以看出,在入流竖井内相同高程处,旋流式入流竖井总体消能率高于折板式。

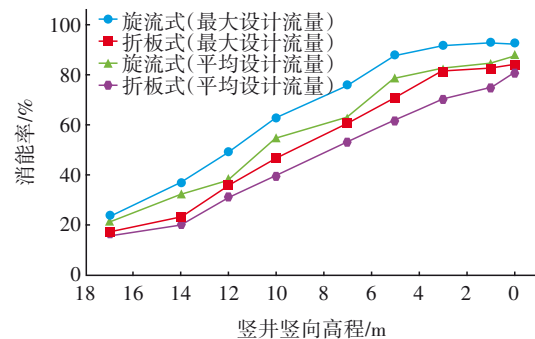


图8 旋流式和折板式入流竖井消能率的变化

Fig.8 Change of energy dissipation rate of vortex and baffle drop shafts

4.5 工程投资

二郎庙入流竖井是在污水深隧盾构施工完成后由1#盾构工作井改造而成的。经计算,旋流式和折板式入流竖井的造价(主要为盾构工作井改造的土建费用)分别为163万元和172万元,相差不大。

4.6 入流竖井型式的确定

综上所述,针对大东湖污水深隧工程的特点,相对于折板式入流竖井,旋流式入流竖井在流态、流速、池体受力和消能等方面具有优势,同时考虑到两类入流竖井在工程投资方面相差不大,因此本工程选用旋流式入流竖井。

5 结论

旋流式入流竖井排气效果略优于折板式,水流经过其处理后几乎不会携带空气进入隧道中。旋流式入流竖井中的水流进入隧道时的流速低于折板式,且旋流式的整流效果更好。旋流式入流竖井中心筒出水处压强明显低于折板式入流竖井折板区出水口处,故其池体所承受的压强也低于折板式入流竖井。旋流式入流竖井总体消能率高于折板式入流竖井。

参考文献:

- [1] 李尔,曾祥英,邹惠君,等. 武汉大东湖污水深隧工程平面竖向及传输方式研究[J]. 给水排水, 2021, 47(1): 139-143.
- LI Er, ZENG Xiangying, ZOU Huijun, et al. Research on the plane routing, vertical layout and sewage transmission mode of the Dadonghu waste-water deep tunnel transmission project in Wuhan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (1) : 139-143 (in Chinese).

- [2] 胡龙,戴晓虎,唐建国. 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 17-21.
HU Long, DAI Xiaohu, TANG Jianguo. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (8) : 17-21 (in Chinese).
- [3] 刘家宏,夏霖,王浩,等. 城市深隧排水系统典型案例分析[J]. 科学通报, 2017, 62(27): 3269-3276.
LIU Jiahong, XIA Lin, WANG Hao, *et al.* Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62 (27) : 3269-3276(in Chinese).
- [4] 林忠军. 深层隧道排水系统在城市排水规划中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2014(5): 143-147, 13.
LIN Zhongjun. Application of deep tunnel drainage system in urban drainage planning [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014 (5) : 143-147, 13 (in Chinese).
- [5] 何贞俊,王斌,杨聿,等. 市政排水系统中竖井研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 49-53.
HE Zhenjun, WANG Bin, YANG Yu, *et al.* Review on vertical shaft in urban wastewater drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (10) : 49-53 (in Chinese).
- [6] 李璐,梁舒豪,杨墨,等. 用于深隧工程的折板式竖井湿室部分数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(13): 128-133.
LI Lu, LIANG Shuhao, YANG Mo, *et al.* Numerical simulation of wet chamber part of a baffle-drop shaft in deep tunnel engineering [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13) : 128-133(in Chinese).
- [7] YU D, LEE J H W. Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(3): 164-174.
- [8] ODGAARD A J, LYONS T C, CRAIG A J. Baffle-drop structure design relationships [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(9): 995-1002.
- [9] 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).
- [10] 高祯,宋嘉美,杨园晶,等. 深圳市前海—南山排水深隧系统工程方案研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 96-100.
GAO Zhen, SONG Jiamei, YANG Yuanjing, *et al.* Analysis of Qianhai-Nanshan deep tunnel drainage system project scheme in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 96-100(in Chinese).

作者简介:李尔(1979-),男,湖北武汉人,博士,教授级高工,主要研究方向为排水深隧及管网系统、水环境综合治理、污水及污泥处理处置。

E-mail:whwater2008@163.com

收稿日期:2021-11-29

修回日期:2022-03-02

(编辑:任莹莹)

借自然之力,护绿水青山