

Research on Physical Simulation of Folding Plate Shaft in Deep Tunnel Engineering

Jiangyuan Liang

China Railway Water Resources and Hydropower Planning and Design Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518011, China

Abstract

In order to verify the rationality of the design scheme of fold-plate shaft for deep tunnel drainage system, the hydraulic model test was used to simulate and analyze the flow capacity, energy dissipation effect, dynamic water pressure and flow pattern of the fold-plate vertical shaft during the operation of the deep tunnel, based on the water transfer tunnel project in Bao'an District, Shenzhen city. The test results show that: ① The original design scheme can meet the overflow demand under the design discharge of 34.30 m³/s, but the energy dissipation effect is poor; ② The mean value of pulsating pressure in the core area of the second level folded plate energy dissipation of the shaft is greater than that in the third level, but the maximum pressure appears in the third level, and the pressure fluctuation is more intense; ③ The folded plate length and outlet connection shape of the shaft are optimized. The optimized shaft still has about 45% margin for the overflow space between the folded plates and 37% margin for the backwater space at the shaft wall when operating at the excess flow (65.8%), which can give a good play to the overflow energy dissipation function of the shaft.

Keywords

baffle-drop shaft; deep tunnel drainage system; physical mode; fluctuating pressure; energy dissipation

高落差折板式竖井消能物理模型试验研究

梁江源

中铁水利水电规划设计集团有限公司, 中国·广东深圳 518011

摘要

为验证深隧排水系统折板式竖井工程设计方案的合理性, 论文基于深圳宝安区清水转输隧洞工程, 采用物理模型试验对深隧折板式竖井运行过程中的过流能力、消能效果、动水压强、流态等进行模拟分析。试验结果表明: ①原设计方案在设计流量34.30 m³/s条件下能够满足过流需求但消能效果不佳; ②竖井第2级折板消能核心区域的脉动压强均值大于第3级, 但压强最大值出现在第3级, 且压强波动更剧烈; ③对竖井的折板长度和出口衔接形状进行优化, 优化后的竖井在超标流量(65.8%)运行时折板间的过流空间仍有约45%余量, 井壁处壅水空间仍有约37%余量, 能较好地发挥了竖井过流消能功能。

关键词

折板式竖井; 深隧排水系统; 物理模型; 脉动压强; 消能

1 研究背景

近年来, 发达城市利用地下排水隧道来解决城市山洪及排水问题, 地下排水隧道主要包括浅层连接设施、预处理设施、竖井、隧道、调压水槽、排水泵站、通风(除臭)设施、排泥除砂设施、监测与控制管理系统等^[1-3], 其中入流竖井在排水隧道中具有至关重要的地位, 它不仅承担着将水流从浅层排水系统接入到深层排水隧道系统, 还将水流下降时产生的势能进行消减并排出水流夹带的空气, 保障深隧工程系统安全。目前, 国内外深隧工程的折板式竖井设计参数主要

通过物理模型试验和数值模拟的方法进行验证, 但实际计算中发现数值模拟方法对边界条件和材料属性过于简化, 且结构离散化的随机性比较大, 使得模拟结果和精度与实际工程可能存在较大偏差^[4-6]。此外, 数值模拟在计算过程中易被预先设计的结果所影响, 主观性较强, 从而造成可信度降低。杨乾等人采用物理模型试验对深隧排水系统进行试验, 结果显示物理模型试验可最大限度还原工程设计工况和环境下的运行情况, 并对工程中可能存在的问题进行优化设计。

中国深圳市宝安区清水转输隧洞工程中山涧雨水经雨洪沟收集汇入深层隧洞时存在水头高、流量大的问题, 入流竖井可能出现过流能力不足、水流震荡、消能不充分、排气不畅等问题, 有必要通过开展物理模型试验, 对不同工况下折板

【作者简介】梁江源(1988-), 男, 中国广西南宁人, 本科, 工程师, 从事河道治理、水工结构及岩土工程研究。

消能井的过流能力和消能效果进行验证,并对预见原设计工程中可能存在的问题进行优化,为深隧工程折板式竖井设计、方案优化和运行方式提供科学依据,有力保障工程安全^[7]。

2 工程概况

深圳市宝安区清水运输隧洞工程设计标准为50年一遇,主要建筑物级别为2级,次要建筑物级别为3级,收集清洁雨水的流域面积为6.81 km²。工程沿深圳羊台山生态区山脚及建成区外围山脚布置雨洪沟,在机荷高速南侧布置运输隧洞,通过隧洞沿线布置的竖井和雨洪沟收集各汇水区的清洁雨水,最后汇入铁岗水库,形成“隧洞主干、雨洪沟分支”的清水运输系统,见图1。隧洞主干共设置6座折板式消能竖井,选取水流落差大、流量大的竖井进行物理模型试验,其工程设计直径为14 m,跌落流量为34.3 m³/s,落差差为13.63 m。

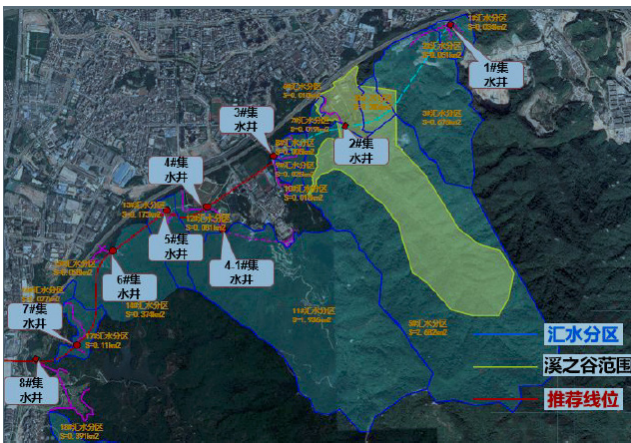


图1 清水运输隧洞系统平面布置图

3 物理模型试验

3.1 物理模型试验

本物理模型试验由蓄水池、进水管(包括水泵、流量计、控制阀等部件)、前池整流网栅、竖井、出口阀门及回水渠等,按照重力相似准则进行建设(1:14的几何比尺),模型结构示意图见图2。此外,在满足重力相似的基础上,为降低水流粘滞力和表面张力对试验结果的影响^[8],本模型的水流必须是紊流且水深不小于3 cm。

根据弗劳德(Froude)数相似条件,求得模型各水力比尺,结果见表1。试验过程中,上游隧洞进水与分流沟进水采用独立的供水管道,上游来水使用离心泵从蓄水池抽取,利用球阀控制流量大小,由电磁流量计进行实时监测。在竖井内采用下游蝶阀控制水位,并在竖井外壁设置刻度标尺测量实时记录水位与折板水舌厚度,采用CY200型(频率设为50 Hz)智能数字压力传感器监测动水压强。

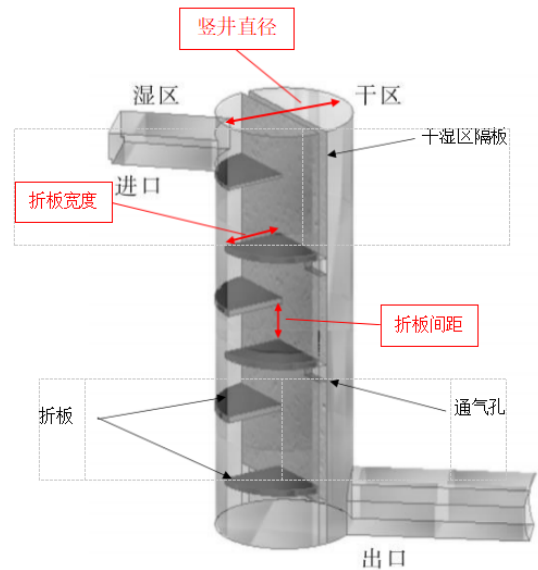
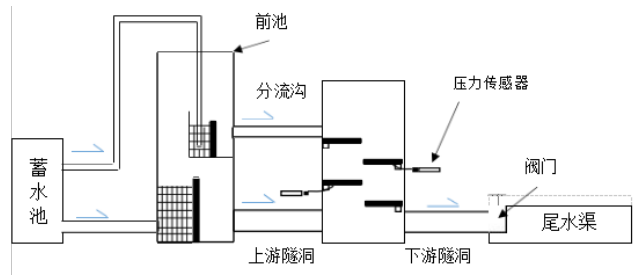


图2 折板式竖井物理模型及其结构示意图

表1 物理模型水力数据表

竖井编号	几何尺寸	速度比尺	流量比尺	压强比尺
1	14	3.74	1789	14

3.2 试验方案

为了验证原设计方案竖井过流能力和消能效果,通过设置不同竖井直径、折板宽度及间距的比选方案,进一步比选不同工况条件下竖井的过流能力和消能效果,各方案特征尺寸见表2。

表2 竖井各方案的特征尺寸一览表(单位:m)

项目	竖井直径	折板宽度	折板间距
原设计方案	14	8.0	5.0
比选方案1	14	10.36	3.5
比选方案2	16	11.84	4.0
比选方案3	18	13.32	4.5
比选方案4	20	12.00	5.0

4 过流能力和消能效果评估

4.1 原设计方案物理模型试验结果分析

过流能力方面:由图3(a)可知,竖井折板末端挑流的水舌最大厚度为3.2 m,小于折板间距过流空间(5 m),且水舌上边界低于通气孔的位置,对排气无影响;井壁处壅

水的最大高度发生在2级折板与竖井内壁的连接处，高度为4.8 m，该位置上方无其他结构物阻碍，且有超过30%的余量，水流表现整体平顺，水舌扩散效果较好。

消能效果方面：由图3(b)和(c)可知，竖井跌流没有落在折板上方，而是直接冲击在竖井内壁。由于过流流量较大，水流在1级折板处扩散后，有较大部分流量分布在竖井内壁附近，该部分流量从折板射出后未直接跌落，而是形成贴壁旋流^[9]。贴壁旋流的存在使得水流在第2级折板的一侧集中，使得有效消能面积小于折板面积，导致折板构件发挥的消能效率较低。在水流通过最后一级折板跌落至井底时，液面波动大、气泡数量多，说明竖井底的水垫层承担了较大部分的消能作用，效能效果有待进一步优化提高。

对原设计方案竖井出口断面的流速进行了测量，对水流的动能、重力效能及机械能进行测算，定性评价其效能效果，结果见表3。

由表3和图3可知，原设计方案竖井能够消减跌流

72%的能量，但存在水流直冲井壁、过流不均匀的问题，折板构件消能作用未得到充分发挥，竖井底部水垫层承担的消能需求较大，结构有待进一步优化。

4.2 比选方案物理模型试验结果分析

基于原设计方案消能效果不佳的试验结果，通过对比选方案的物理模型试验结果进行统计分析，结果见表4。

由表4可知，各方案均满足竖井过流需求，但消能效果随着竖井直径增加不断提高，水舌厚度、最大井壁壅水高度、构件承受动水最大压强、过流余量均随竖井直径的增加而降低，水流与通气孔距离随之增加。通过对比发现：比选方案2、3、4的水舌厚度、井壁壅水最大高度、构件承受动水压强以及过流余量较为接近，效能效果比较好，能够较好发挥折板式消能作用^[10]。但比选方案2竖井直径较小，工程占地和投资较少，同时各项指标比较均衡，因此选择比选方案2（直径16 m）作为竖井的推荐方案。

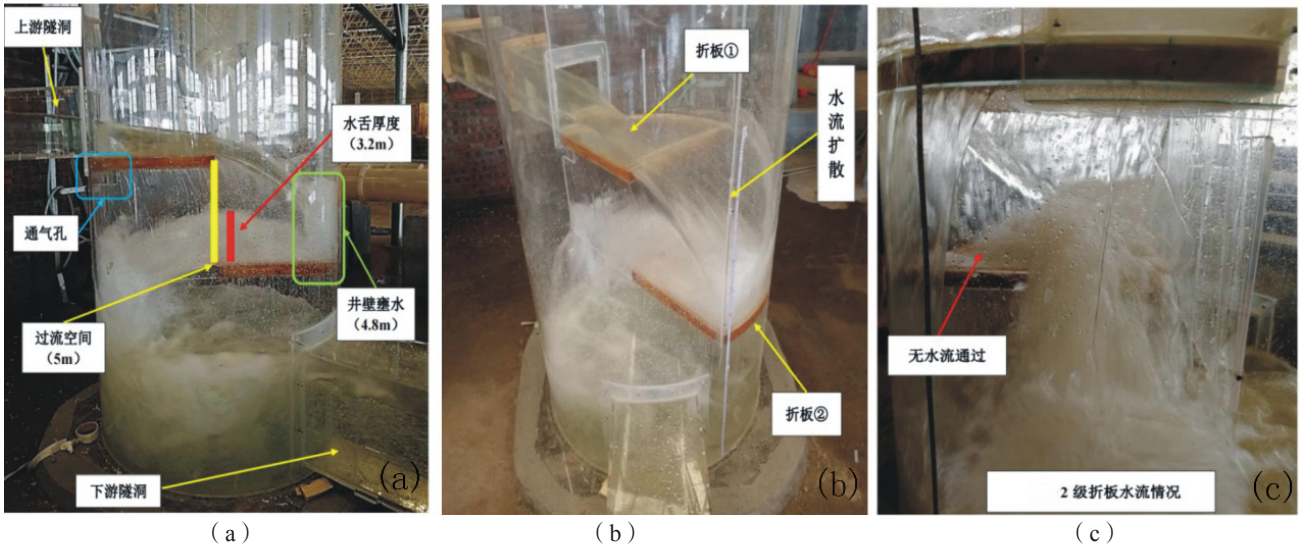


图3 原设计方案竖井试验情况

表3 原设计方案竖井消能试验结果

位置	流量 (m ³ /s)	平均流速 (m/s)	水深 (m)	高程 (m)	动能 (kJ)	重力势能 (kJ/s)	机械能 (kJ/s)	消能量 (kJ/s)
进口	34.3	4.76	1.60	53.51	389.21	1869.69	2265.77	723.08
出口		2.45	4.21	39.87	102.94	1439.74	1542.69	

表4 比选方案物理模型实验数据统计表

项目	直径 (m)	水舌厚度 (m)	最大壅水高度 (m)	构件承受动水最大压强 (kPa)	过流余量	与通气孔距离 (m)	消能效果	过流条件
比选方案1	14	1.72	3.64	120	35%	2.76	一般	满足
比选方案2	16	1.36	3.60	116	60%	3.80	较好	满足
比选方案3	18	1.26	3.45	112	70%	4.95	较好	满足
比选方案4	20	1.20	3.62	80	70%	5.78	较好	满足

5 讨论

5.1 比选方案优化

5.1.1 折板长度优化

基于比选方案2的试验中最后一级折板出射水流的落点距离竖井出口断面较近,引起出口断面的掺气和偏流较显著,且第③折板出射水流直接跌入井底,导致消能不充分,对井壁冲击较大。因此,对第③折板顺水流方向的长度进行调整,见图4。

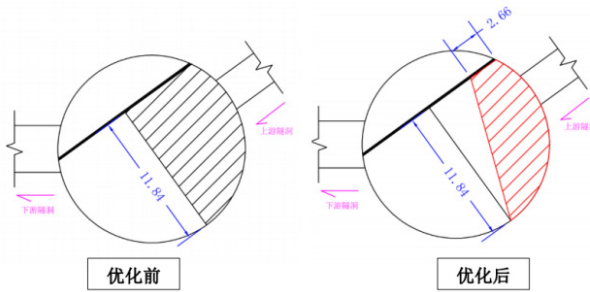


图4 第③级折板优化前、后形状对比

由图5(b)可知,优化后水流落点与出口断面的距离增大。结合第③折板受动水压力的测量测试结果(表5)可知,第③折板及其连接处井壁的动水压强平均值、最大值和波动情况在优化后均有减小,表明优化后的结构可以减轻第③折板所受的水流冲击作用。

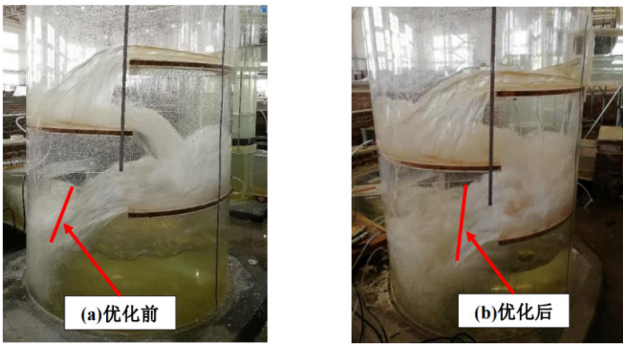


图5 第③级折板优化前、后的跌流落点变化

表5 第③级折板优化前、后压强特征值对比(单位:kPa)

测量位置		平均值	最大值	最小值	极值
折板	优化前	57.22	106.17	18.01	88.17
	优化后	48.52	93.51	13.68	79.83
井壁	优化前	64.15	112.44	18.41	94.04
	优化后	60.41	107.67	20.79	86.88

5.1.2 竖井出口衔接段形状优化

基于竖井与下游隧洞衔接处存在断面形状突变的情况,下游隧洞进口的水流衔接不够平顺,如图6(a)所示。因此,对竖井—隧洞衔接段的几何形状进行了优化,如图6(b)所示,优化后出口处水流条件改善明显。



图6 竖井出口衔接段优化设计

结合竖井与下游隧洞衔接部位的动水压强作用的情况(表6)可知,优化后竖井与下游隧洞衔接段的压强最大值和波动情况有所减小,表明优化后的结构可以减小竖井出口衔接段的动水压力。同时,压强平均值稍稍增大,衔接处的负压消失,表明优化后的结构可以减小发生空化的风险。图7为优化后竖井平剖面示意图。

表6 竖井出口衔接段优化前、后的压强特征值(单位:kPa)

测试位置		均值	最大值	最小值	极差
衔接处	优化前	8.92	23.3	-2.33	25.63
	优化后	9.23	13.3	5.05	8.25
衔接处下游1 m	优化前	8.6	17.42	2.67	14.75
	优化后	9.12	12.59	4.89	7.7

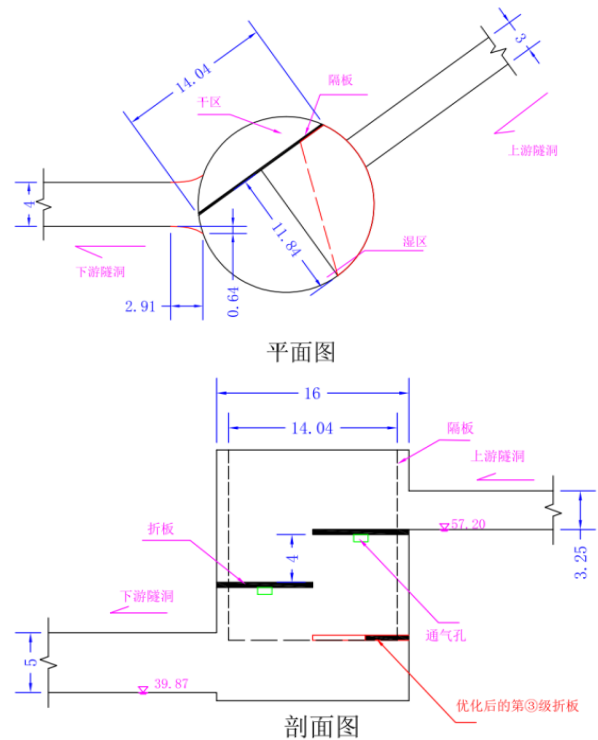


图7 优化后竖井平剖面示意图

5.2 优化方案分析

对优化后折板式竖井再次开展物理模型试验,从过流能力、消能效果、脉动压强和过流敏感性进行分析评价,结果见表7~表9。

表7 竖井消能试验结果

位置	流量 (m ³ /s)	平均流速 (m/s)	水深 (m)	高程 (m)	动能 (kJ)	重力势能 (kJ/s)	机械能 (kJ/s)	消能量 (kJ/s)
进口	34.3	4.76	1.60	53.51	389.21	1869.69	2265.77	740.69
出口		2.31	3.85	39.87	91.51	1433.57	1525.08	

表8 竖井折板及其井壁处压强试验特征值 (单位: kPa)

测量位置	平均值	最大值	最小值	极差
②级折板	57.55	71.50	42.61	28.89
③级折板	48.52	93.51	13.68	79.83
②级折板处井壁	55.33	75.68	32.90	42.78
③级折板处井壁	60.41	107.67	20.79	86.88

表9 不同流量下的试验结果

流量 (m ³ /s)	水舌厚度 (m)	井壁处壅水最大高度 (m)
34.13	1.36	3.60
39.82	1.60	3.84
45.51	1.82	4.32
51.20	2.02	4.48
56.89	2.19	4.72

优化后竖井的过流能力完全能满足设计要求,水流的机械能消减了 740.69 kJ/s,动能和重力势能均得到有效削减,竖井没有负压的情况出现,压强数值波动更小^[11]。当上游流量达到 56.89 m³/s (超过设计值的 65.8%),折板间的过流空间仍然有约 45% 的余量,井壁处壅水空间仍有约 37% 的余量,过流能力仍然可以满足要求。

6 结论

①通过物理模型试验发现,原设计方案的消能效果一般,且折板长度和衔接段形态对消能效果及动水压强影响较大。

②通过对方案进行优化设计,结合折板水舌厚度、井壁壅水高度、动水压强等参数的测量结果分析,最终确定了优化后的比选方案 2 作为推荐方案。该方案竖井的消能和过流状态最好,且在超设计流量 65.8% 时仍然能较好地发挥功能。

③通过物理模型实验可知,采用折板式竖井对水头高、流量大的排水系统进行消能是可行的,且消能效果较好。

参考文献

[1] 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.
[2] 王志刚,张东,张宏伟,等.折板消能竖井中的折板功能分析[J].中

国水利水电科学研究院学报,2015,13(4):270-276.

- [3] Pettersson K, Krajnovic S, Kalagasidis A S, et al. Simulating wind-driven rain on building facades using Eulerian multiphase with rain phase turbulence model[J]. Building and Environment,2016,106:1-9.
[4] 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.
[5] 徐剑乔.基于FLUENT的排水深隧入流竖井三维湍流仿真[J].中国给水排水,2019,35(21):125-131.
[6] 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.
[7] 马永林,王海阳,傅宗甫,等.内湿外干型折板式竖井泄流特性数值模拟[J].水电能源科学,2020,38(1):108-111.
[8] 杨乾,杨庆华.竖井消能工折板压强及脉动特性分析[J].中国安全生产科学技术,2021,17(6):12-18.
[9] 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.
[10] 杨庆华,尧远,杨乾,等.折板型竖井结构设计参数优化研究[J].长江科学院院报,2020(9):21-27.
[11] 杨乾,杨庆华,郑立宁,等.深隧排水折板型竖井泄流消能的试验研究[J].西南交通大学学报,2020,55(6):1247-1256.