

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230116

长距离变径变糙率无压隧洞典型区段的过流能力分析

李 娟^{1,2,3}, 戚印鑫¹, 李江峰¹, 尹 辉¹

(1. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究某长距离无压引水隧洞部分洞段改变衬砌方案后能否满足原设计流量的问题, 采用模型试验和理论计算的方法分析了该隧洞典型区段的过流能力。该隧洞典型区段共有 4 种洞径, 2 种糙率, 为满足阻力相似条件, 对比测试不同材料, 并进行糙率率定。对 3 种运行工况的过流能力及水流特性进行测试与分析, 得出工况 1 可安全过流, 工况 2 部分洞段净空余幅不足, 最小余幅值为 14.39%, 工况 3 大部分洞段不满足安全过流。对比试验值与理论计算值, 二者结果较接近, 且试验值偏安全, 可为该工程施工、运行提供理论依据。

关键词: 无压隧洞; 糙率; 模型试验; 理论计算; 过流能力

中图分类号: TV672⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0125-04

1 引言

长距离隧洞输水具有蒸发渗漏损失小, 能够解决落差不足的优势, 但受选线限制, 大量长距离输水隧洞在建设过程中, 将不可避免地需要穿越具有复杂地质构造的地区。新疆某引水工程是新疆复杂长距离引水工程之一, 该引水工程为大(I)型工程, 采用无压隧洞引水, 可有效缓解新疆缺水难题。该隧洞长度约 95 km, 设计流量 65 m³/s, 洞段纵坡为 1/3 000, 隧洞断面为圆形, 正常运行工况下输水隧洞为明流洞。该工程在原设计方案中, 各洞段过流能力均满足设计要求, 且最小余幅为 16%。但由于施工过程中, 受不良地质条件影响, 需改变衬砌方式, 部分区段需减小洞径尺寸, 从而影响过流能力, 原设计无压流可能会变为明满流过渡流, 威胁隧洞安全运行。为确保工程的安全运行和经济合理, 需全面分析隧洞过流能力、水面衔接、水面曲线等。对于输水隧洞水力特性的研究, 通常采用原型观测、数值模拟及模型试验三种方法^[1-3]。目前, 关于隧洞单一位置处的局部水头损失和流态的研究较多^[4], 关于多处变洞径变糙率的隧洞研究少^[5], 本文采用物理模型试验和理论计算的方法对长距离变径变糙率无压隧洞典型区段的过流能力进行研究, 以期为后期

的运行管理方案制定提供参考。

2 试验设计

由于该隧洞纵坡、断面型式、断面尺寸按照钻爆施工和 TBM 施工而不同, 隧洞支护衬砌结构亦不同, 因而隧洞被不同的水力断面分割, 水面连接情况复杂。隧洞 II 类围岩采用局部喷砼, 过水内径为 7.6 m, 设计糙率 0.018; III a 类围岩采用全断面喷砼, 过水内径 7.5 m, 设计糙率 0.018; III b 类围岩采用混凝土衬砌, 过水内径 6.9 m, 设计糙率 0.014; IV、V 类围岩采用混凝土衬砌, 过水内径 6.5 m, 设计糙率 0.014。

根据隧洞的特征选取典型区段, 共 4 种洞径, 2 种糙率, 长度为 348 m, 进行水工模型试验。试验在室内有机玻璃水槽中进行。水流循环系统包括进水槽、引流直线段、尾水段及控制尾门、供水系统等。

模型按照重力相似和阻力相似准则, 采用有机玻璃管制作。考虑模型比尺与糙率的关系, 由于有机玻璃的糙率为 0.007 5~0.008 3, 若要满足糙率 0.014 的洞段, 则模型比尺在 25~40 之间。对于糙率 0.018 的洞段, 用同样的管材, 不采取其他措施, 则模型比尺需要 100 以上。由于有机玻璃减糙不易实现, 试验中对于模拟 0.018 糙

收稿日期: 2023-02-01, 修回日期: 2023-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969030); 自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目(ky2022131、ky2023110)

作者简介: 李娟(1988-), 女, 硕士、高级工程师, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: home_hstlg@163.com

通讯作者: 戚印鑫(1975-), 男, 硕士、正高级工程师, 研究方向为河流泥沙及水力学, E-mail: 376112812@qq.com

率采用加糙处理,可达到原型设计要求。

根据设计资料及设计参数,选用正态模型,几何比尺确定为 1 : 30,流量比尺 λ_Q 为 1 : 4 929.50,流速比尺 λ_V 为 1 : 5.48,时间比尺 λ_t 为 1 : 5.48,糙率比尺 λ_n 为 1 : 1.76。

3 糙率率定试验

3.1 原状管糙率测试

糙率率定试验段总长 300 m(模型长度 10 m),洞径 7.5 m(模型内径 25 cm),并在测试段上、下游设置量水堰测流量,流量为 65 m³/s(模型流量 18.186 L/s)。考虑到有机玻璃的糙率与加工手段和加工工艺有关,因此需对原状管进行率定^[6],再进行加糙测试,应用于长距离隧洞的模型试验。

考虑进出口过渡段对水流的影响,采用恒定非均匀流的方式计算试验糙率值。糙率系数 n 的计算公式为:

$$n = \frac{\bar{AR}^{2/3}}{Q} \sqrt{s_0 + \frac{y_1 - y_2}{L} + \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}\right) \frac{Q^2}{2gL}} \quad (1)$$

其中 $\bar{AR}^{2/3} = (A_1R_1^{2/3} + A_2R_2^{2/3})/2$ (2)

式中, \bar{A} 为上下游测量断面的平均断面面积; \bar{R} 为上下游测量断面的平均水力半径; Q 为流量; s_0 为渠段底坡; y_1 、 y_2 分别为上、下游测量断面水深; L 为测量断面间的渠段长度; A_1 、 A_2 分别为上、下游测量断面面积; g 为重力加速度; R_1 、 R_2 分别为上、下游测量断面的水力半径。

通过试验测试,原状管测试糙率为 0.007 1~0.008 6。当糙率为 0.014 时,即隧洞采用混凝土衬砌时,对应比尺为 1 : 30 的试验糙率值为 0.007 94。将试验测试结果取平均值为 0.007 8,按比尺换算后为 0.013 73,糙率接近且略小于设计值。

3.2 管材加糙试验

设计中根据围岩类型,隧洞采用喷混凝土衬砌时,对应的糙率为 0.018。比尺为 1 : 30 时,其相似糙率为 0.010 21,因此需对原状管进行加糙处理。在河道整治模型中,常采用粘贴卵石、铺设草垫的方法进行加糙;标准断面的水槽试验中通常采用沙子、铁屑、铁丝网、新型材料粘于模型上,实现加糙,效果良好^[5-8]。本试验采用加糙膜,对隧洞洞身进行加糙。

3.3 糙率测试结果

选取三种加糙管进行试验,流量为 65 m³/s

时,测试起始断面和最终断面的水深,代入式(1),得出三种加糙管的糙率见表 1。由表 1 可知,原状有机玻璃管糙率、#2 加糙管糙率分别对应于不同洞段的设计糙率 0.014、0.018,偏差均小于 3%,认为其能够代表和反映原设计糙率,将此两种管应用于后续试验中。

表 1 加糙试验率定糙率成果统计表

Tab. 1 The results of increased roughness testing

工况	工况描述	模型范围值	模型取值	原型值	设计值	试验偏差/%
0	原状	0.007 1~0.008 6	0.007 8	0.013 7	0.014	-1.79
1	#1 加糙管	0.008 2~0.009 3	0.008 8	0.015 5	0.018	-13.89
2	#2 加糙管	0.008 5~0.012 4	0.010 5	0.018 5	0.018	2.83
3	#3 加糙管	0.009 2~0.013 4	0.011 3	0.019 9	0.018	10.66

3.4 糙率率定结果分析

对式(1)进行泰勒展开,并略去二阶以上高阶项有:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial n}{\partial y_1} \Delta y_1 + \frac{\partial n}{\partial y_2} \Delta y_2 \quad (3)$$

根据误差理论,明流糙率的不确定度可表示为:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial Q} \Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y_1} \Delta y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y_2} \Delta y_2\right)^2} \quad (4)$$

由(4)式可知,影响无压隧洞测试糙率不确定度的因素包括流量测量误差、上游水深测量误差、下游水深测量误差,则有:

$$|\Delta n|_{\max} \leq |\Delta n_Q| + |\Delta n_{y_1}| + |\Delta n_{y_2}| \quad (5)$$

其中 $\Delta n_Q = \Delta Q \partial n / \partial Q$; $\Delta n_{y_1} = \Delta y_1 \partial n / \partial y_1$

$$\Delta n_{y_2} = \Delta y_2 \partial n / \partial y_2$$

式中, Δn_Q 为糙率的流量误差分量; Δn_{y_1} 、 Δn_{y_2} 分别为糙率进、出口水深误差分量。

试验中, $\Delta Q / Q \leq 3\%$, 上下游水深采用测压管进行量测,误差 0.1 mm。

$$\frac{\Delta n}{n} \leq \frac{|\Delta Q|}{Q} + \frac{|\Delta y_1| + |\Delta y_2|}{2(s_0 L + y_1 - y_2)} \quad (6)$$

当流量为 65 m³/s 时,底坡为 1/3 000, L 为试验段长度 10 m,根据测试数据,流量不确定度为 3%,水深影响糙率的不确定度为 1.69%,原状管糙率的不确定度为 4.69%。#2 加糙管,流量的不确定度小于 1.5%,水深影响的糙率不确定度为 3.24%,#2 加糙管糙率的不确定度为 4.74%。#3 加糙管流量不确定度为 2.8%,水深影响糙率的不确定度为 1.4%,#3 加糙管糙率的不确定度为 4.2%。综合糙率值的不确定度均小于 5%,满足试验要求。

4 无压隧洞典型区段引水能力分析

无压隧洞典型区段共有 4 种洞径,由 5 段顺

直段和 4 段变径连接段组成,各洞段轴线共线。该隧洞中的典型区段洞段各断面直径、糙率组合见表 2。

表 2 无压隧洞典型区段划分

Tab. 2 The typical section division of non-pressure tunnel

类型	起始桩号	终止桩号	衬砌洞段类型	长度 /m	断面	直径 /m	设计糙率	纵坡
TBM	0+000	0+030	II	30	圆	7.6	0.018	3 000
TBM	0+030	0+033	II—III b	3	圆	7.6	0.014	3 000
TBM	0+033	0+093	III b	60	圆	6.9	0.014	3 000
TBM	0+093	0+096	III b—III a	3	圆	6.9	0.014	3 000
TBM	0+096	0+156	III a	60	圆	7.5	0.018	3 000
TBM	0+156	0+162	III a—IV、V	6	圆	7.5	0.014	3 000
TBM	0+162	0+282	IV、V	120	圆	6.5	0.014	3 000
TBM	0+282	0+288	IV、V—II	6	圆	6.5	0.014	3 000
TBM	0+288	0+348	II	60	圆	7.6	0.018	3 000

典型区段的三种运行工况首端和末端水深 h 一致,分别为 5.40、5.75、5.90 m。通过试验测试三种工况下,可安全通过的设计流量为 $65 \text{ m}^3/\text{s}$ 。试验共设置 14 个测试断面,将试验测试值与理论计算值进行对比,对比各测试断面的水深、余幅,观测不同洞段的流态和过渡段的水面衔接情况。

4.1 水面线及流态

当施放设计流量 $65 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,三种工况下,水流整体平缓,波动很小,试验段对应原型的水深分别介于 4.72~5.45、5.09~5.84、5.25~5.99 m。水流平顺由入口进入逐渐缩小段桩号 0+030~0+033,经过桩号 0+033 后水面线下降,降幅分别为 16、10、4 cm(原型)。流动至桩号 0+090~0+093 逐渐扩大段,水面线上升,升幅约 10、6、4 cm。流动至桩号 0+156 处为渐缩段且连接最小洞径段,桩号 0+156~0+162 水面有较大幅度下降,降幅 17、7、9 cm 以内。在桩号 0+282~0+288 为渐扩段,水位上升约 17、15、12 cm。桩号 0+348 后 30 m 接矩形槽,末端控制水位平稳。图 1 为三种水位时桩号 0+282 处的水流流态,流态平稳,无明显波动。图 2 为设计流量下三种工况时的水深沿程变化。

4.2 余幅

通过试验测试,得到工况 1 净空面积余幅均大于 15%;工况 2 时桩号 0+033~0+093、0+162~0+282 净空面积余幅不足,最小余幅值为 14.39%;工况 3 洞径较小的洞段即直径为 6.5、6.9 m 的混凝土衬砌洞段,净空余幅均小于 15%。

本工程沿程各断面的弗劳德数 Fr 均小于 1,判别流态为缓流。理论计算时由于设计流量下各洞段水流均为缓流,因此依据明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程推算水面线,再由 1—

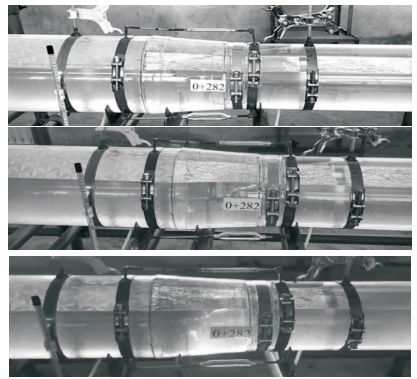


图 1 三种工况下桩号 0+282 流态

Fig. 1 The flow regime at 0+282 in three conditions

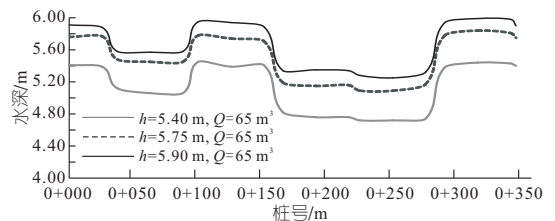


图 2 设计流量下三种工况的沿程水深变化

Fig. 2 The variation of water depth in three operating conditions under design flow rate

A_1/A_0 (A_1 为过水面积, A_0 为断面面积) 计算各断面净空余幅 Δs 。水面线推算方程为:

$$\Delta s = (E_d - E_u) / (i - J) \quad (7)$$

式中, Δs 为流段长度; E_d 、 E_u 分别为计算流段下游及上游断面的断面比能; i 为底坡; \bar{J} 为计算流段的平均水力坡度。

对比试验余幅值与理论计算余幅值可知,工况 1 理论计算净空余幅值均大于 15%,试验与理论计算差值最大为 -1.87%;工况 2 理论计算净空余幅值均大于 15%,试验中有三段原型中约 20 m 长洞段净空余幅小于 15%,试验与理论计算差值最大为 2.33%;工况 3 理论计算净空余幅值在洞径分别为 6.9、6.5 m 处均小于 15%,试验测试效果同样,试验与理论计算差值最大为 1.47%。理论计算与试验结果的余幅差在 $\pm 2\%$ 之内,余幅差见表 3。

4.3 流速

试验在各断面分别测试了水面下 3 个部位(水面以下 0.75 m、 $h/2$ 、底部以上 0.45 m) 的流速。3 种工况下,流速数值分别介于 1.24~2.99、1.13~2.76、1.08~2.66 m/s,基本符合各洞段相应洞径对应的流速范围。面流速整体大于 $h/2$ 流速和底流速, $h/2$ 处流速大小更集中,随着运行水深的提高流速呈减小趋势,底流速受管壁的糙率影响速度最小。沿程流速变化见图 3。

表 3 各测试断面试验值与理论计算余幅值对比

Tab.3 Comparison of experimental values and theoretical

断面	residual values of each test section %								
	始末端水深 5.40 m			始末端水深 5.75 m			始末端水深 5.90 m		
	情况下余幅值			情况下余幅值			情况下余幅值		
	试验	计算	试验-计算	试验	计算	试验-计算	试验	计算	试验-计算
0+000	23.86	23.49	0.37	18.68	18.54	0.14	16.56	16.39	0.17
0+026	24.16	23.98	0.18	18.54	18.92	-0.38	16.98	16.40	0.58
0+038	20.43	22.30	-1.87	14.83	16.93	-2.10	13.36	14.43	-1.07
0+063	21.41	22.42	-1.01	15.28	16.96	-1.68	13.50	14.44	-0.94
0+089	21.41	22.49	-1.08	15.28	16.98	-1.70	13.36	14.44	-1.08
0+101	22.16	23.38	-1.22	17.30	18.25	-0.95	14.92	16.25	-1.33
0+126	23.07	23.51	-0.44	17.88	18.61	-0.73	15.06	16.24	-1.18
0+152	22.77	23.84	-1.07	18.31	15.98	2.33	15.75	16.21	-0.46
0+167	20.49	21.91	-1.42	14.39	15.99	-1.60	12.09	13.44	-1.35
0+192	21.52	22.03	-0.51	15.03	16.00	-0.97	11.94	13.41	-1.47
0+218	21.52	22.17	-0.65	14.87	16.05	-1.18	12.09	13.44	-1.35
0+227	22.22	22.30	-0.08	15.99	16.10	-0.11	13.00	13.46	-0.46
0+252	22.22	22.43	-0.21	15.99	16.13	-0.14	13.46	13.49	-0.03
0+278	21.87	22.55	-0.68	14.71	16.25	-1.54	12.39	13.50	-1.11
0+293	24.31	23.93	0.38	18.40	18.95	-0.55	16.15	16.64	-0.49
0+318	23.40	23.96	-0.56	17.54	18.95	-1.41	15.46	16.65	-1.19
0+344	23.55	23.97	-0.42	17.97	18.79	-0.82	15.59	16.65	-1.06
0+348	24.01	23.97	0.04	18.83	18.79	0.04	16.70	16.66	0.04

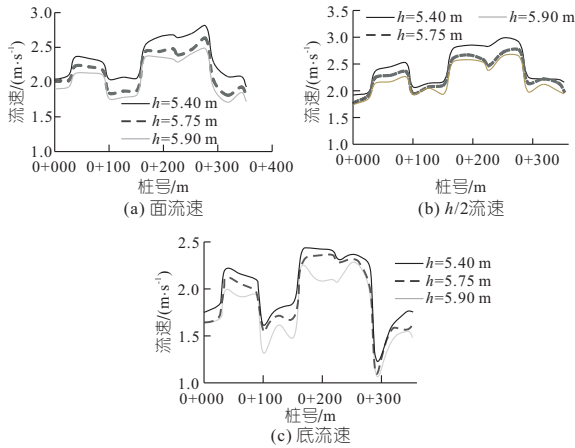


图 3 设计流量下三种工况的流速分布

Fig.3 Velocity distribution of water depth in three operating conditions under design flow rate

5 结论

a. 对两种糙率进行率定,模型比尺为 1 : 30 时,原状管可模拟混凝土洞壁糙率 0.014,[#] 2 加糙管可模拟喷混凝土洞壁糙率 0.018,试验测试糙率的不确定度小于 5%,满足阻力相似要求。

b. 当施放设计流量 65 m³/s 时,3 种工况下隧洞流态平稳,无明显波动。工况 1 可满足安全运行要求,所有洞段净空余幅大于 15%;工况 2 最小余幅为 14.39%,与理论计算结果略有不同,但余幅差在 ±2% 以内,实际运行时以试验结果为准;工况 3 较小洞径段净空余幅小于 15%。运行时工况 2、3 均对工程不利,尽量避免该工况。

c. 为保证隧洞在工况 2 时安全运行,还可对隧洞的小洞径段进行减糙处理,减糙措施还需进一步论证。

参考文献:

- [1] 吴永妍,刘昭伟,陈永灿,等. 梯形明渠—马蹄形隧洞过渡段流动形态与局部水头损失研究[J]. 水力发电学报,2016,35(1): 46-55.
- [2] 刘强,刘亚坤,张帝,等. 复杂频繁突变断面输水隧洞水力特性的数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2022,40(9): 154-157,209.
- [3] 胡普年. 盘道岭隧洞除险加固工程糙率原型观测及过流能力分析[J]. 长江科学院院报,2019,36(4): 67-70,76.
- [4] 王常红. 长距离输水隧洞水力特性数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [5] 罗毅. 变水位条件下某无压水工隧洞的空化空蚀研究[J]. 中国农村水利水电,2019(4): 110-113,119.
- [6] 杨开林,汪易森. 提高渠道糙率率定精度的方法[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(6): 1-4,15.
- [7] 赵海镜,田世民,王鹏涛,等. 水工模型试验中的草垫加糙方法研究[J]. 水力发电学报,2015,34(4): 77-82.
- [8] 李甲振,郭永鑫,甘明生,等. 河工模型试验加糙方法综述[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4): 129-135.

Analysis of Overflow Capacity in Typical Section of Long Distance with Variable Diameter and Roughness Non-pressure Tunnel

LI Juan^{1,2,3}, QI Yin-xin¹, LI Jiang-feng¹, YIN Hui¹

(1. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830000, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to study whether the original design flow can be met after the lining scheme of sections of a long distance non-pressure diversion tunnel is changed, the flow capacity of typical sections of the tunnel was analyzed by model test and theoretical calculation. There are 4 tunnel diameters and 2 roughness in the typical section of the tunnel. In order to meet the conditions of similar resistance, different materials were compared and tested, and the roughness was determined. Through testing and analyzing the flow capacity and flow characteristics at three operating conditions, it is concluded that the flow can be safely passed under operating condition 1, and the clearance margin of some tunnel sections under operating condition 2 is insufficient, with the minimum margin of 14.39%. Most tunnel sections under operating condition 3 do not meet the safety flow. Comparing the test and theoretical calculation, the results of the two are relatively close, and the test value is relatively safe, which can provide a theoretical basis for the construction and operation of the project.

Key words: non-pressure tunnel; roughness; model test; theoretical calculation; overflow capacity