

长距离分洪隧洞输水模型试验相似性研究

余远浩, 张根广, 李安斌, 麻卉港, 封博研

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对长距离输水隧洞小比尺物理模型难以满足阻力相似的问题, 依托陕西省某县城分洪隧洞工程, 通过对进口闸室段过流能力及隧洞段输水能力进行分别验证, 实现了在小比尺物理模型上进行隧洞过流能力的试验研究。基于隧洞段内可以形成均匀流的特点, 采用明渠均匀流计算方法对模型实测结果进行了计算验证。结果表明: 计算流量与模型实测流量的最小差值为 $11.71 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小相对误差为 1.93% ; 基于进口闸室段距离短、局部水头损失远大于沿程水头损失的特点, 控制隧洞桩号 $0+099.25 \text{ m}$ 处水深为隧洞正常水深, 可直接验证其过流能力, 进口闸室段过流量与实测过流量最大误差不超过 1.78% ; 在 30 年一遇洪水时, 推荐方案闸室和隧洞的过流能力相匹配且与模型实测值基本一致, 隧洞的分洪流量达到 $863 \text{ m}^3/\text{s}$, 较设计分洪流量 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 超泄了 $63 \text{ m}^3/\text{s}$, 超泄流量占设计过流量的 7.88% , 完全满足设计要求。

关键词: 长距离分洪隧洞; 糙率不相似; 明渠均匀流; 过流能力; 分段验证; 试验相似性

中图分类号: TV131.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0143-06

Experimental similarity of water delivery model tests of a long-distance flood diversion tunnel

YU Yuanhao, ZHANG Genguang, LI Anbin, MA Huigang, FENG Boyan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Due to the problem that the small-scale physical model of the long-distance flood diversion tunnel is difficult to provide similar resistance conditions with the actual situation, we carried out a small-scale physical model test on the flow capacity of the inlet gate chamber section and the delivery capacity of the tunnel section of a flood diversion tunnel in a county of Shanxi Province. Based on the characteristics that uniform flow can be formed in the tunnel section, the calculation method of open-channel uniform flow is used to verify the measured results. The results show that the minimum difference between the calculated flow and the measured flow is $11.71 \text{ m}^3/\text{s}$, and the relative error is 1.93% . Because the distance of the entrance gate chamber section is short and the local loss is far greater than the on-way resistance loss, the water depth at the stake number $0+099.25 \text{ m}$ of the tunnel is controlled to the normal depth of the tunnel to directly verify its flow capacity; the results show that the maximum error of the calculated flow rate of the entrance gate chamber section does not exceed 1.78% . In the case of the flood once in 30 years, the flow capacity of the gate chamber and tunnel of the recommended scheme are basically consistent with the measured values. The flood diversion flow can reach as high as $863 \text{ m}^3/\text{s}$, which is $63 \text{ m}^3/\text{s}$ higher than the designed overflow of $800 \text{ m}^3/\text{s}$, accounting for 7.88% of the designed overflow, indicating that the recommended scheme can fully meet the design requirements.

Key words: long-distance flood diversion tunnel; roughness dissimilar; open-channel uniform flow; flow capacity; segment verification; experimental similarity

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51879227, 51279170)

作者简介: 余远浩 (1997-), 男, 云南宣威人, 硕士研究生, 主要研究方向为水工水力学。

通讯作者: 张根广 (1964-), 男, 山西夏县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水工水力学。

1 研究背景

近年来,随着我国输水调水工程的大规模兴建,长距离输水隧洞及明渠的应用已较为普遍。糙率作为隧洞和渠道设计的重要参数,其取值是否合理对于隧洞和渠道的过流能力及工程投资影响极大,因而输水建筑物糙率的计算问题得到广泛关注,并结合实际工程取得了大量的研究成果。比如,在南水北调工程中,王光谦团队对中线工程总干渠进行了糙率综合论证,推荐了各渠段的糙率系数并对糙率在一定范围内发生变化后对过流能力的影响进行了分析^[1-3];杨开林等^[4]提出了渠道沿程糙率的系统辨识新方法,以中线工程观测资料为基础,得到了通用的渠道沿程糙率计算公式;郑和震等^[5]对中线工程中的某一渠段采用了 4 种方法进行糙率计算,通过构建水力学数学模型进行检验后推荐出该工程糙率计算的最佳方法;陈文学等^[6]提出了基于神经网络模型和粒子群优化方法进行糙率率定的方法,并以中线工程的某一渠段进行验证,验证结果较好。在引滦入津隧洞工程中,陈耀忠^[7]对隧洞糙率进行了两次原型观测并得出了糙率的平均值为 0.012 5;在引大入秦工程中,胡普年^[8]对盘道岭长距离无压隧洞的糙率进行了原型观测,依据观测结果优化了除险加固设计,提高了隧洞过流能力并节省了大量工程投资。可见,糙率值的选取和计算为长距离输水工程设计的重要环节。

为验证隧洞的过流能力是否满足设计要求,通常采用物理模型试验进行验证^[9-15]。但对于长距离隧洞来说,由于洞身较长,而受试验场地条件所限一般采用小比尺模型,从而难以保证模型的阻力相似条件,导致隧洞过流能力的试验结果有一定偏差。此问题的直接解决方法是打磨制模材料的过水壁面进行减阻处理,以实现阻力相似条件^[16-17]。然而,对长距离隧洞模型,打磨壁面减阻的方法往往难以实现,因此,大多数学者均在既定的试验条件下,对试验结果进行理论修正分析以实现过流能力的相似。杨庆等^[18]采用了变态模型试验和根据雷诺数与沿程阻力系数关系($Re_m - \lambda_m$)两种方法对模型试验过流能力进行修正,通过溪洛渡水电站导流隧洞工程的验证表明,导流隧洞修正后的进口过流能力是模型试验观测值的 1.03 倍;贺昌林等^[19]依托某水电站泄洪洞工程,通过抬高库水位的方式来修正模型试验额外增加的沿程水头损失,实现了泄洪洞出口流速和流量的相似,修正后的泄洪洞过流能

力是模型试验观测值的 1.07 倍;吕宜卫^[20]根据水流能量方程和连续性方程,充分利用局部阻力观测结果和沿程阻力理论分析成果,将模型试验与理论分析相结合,提出了糙率偏差对应的修正公式,结合小浪底导流洞模型试验,导流隧洞修正后的过流能力同样是模型试验观测值的 1.07 倍;苗宝广等^[21]利用有压长隧洞洞内沿程水头损失的变化值修正上游水位,实现洞内过流能力的相似,试验修正值与原型观测值吻合良好,可以很好地满足工程需要;郑小玉等^[22]通过贵州省某水电站溢洪道水工模型试验,提出了水工模型试验中糙率修正的一种新观点,即对已测量的数据进行分析,根据工程需要精度来判断糙率修正的必要性,以此提高工作效率;阎庆斌等^[23]结合引黄入晋工程,通过分析流速分布和水面线的不相似问题,提出了阻力相似修正系数 K ,结果表明,对模型试验数据进行修正是可行的。黄纪忠等^[24]基于明渠定床清水模型,提出了采用模型坡降、几何变态以及糙率延伸等方法进行模型试验以实现阻力相似。

上述对小比尺物理模型试验的相似性研究,大都是基于有压流段以局部阻力和沿程阻力为入手点,通过修正隧洞进口水位来补偿模型试验中额外增加的水头损失,以实现隧洞原型过流能力的相似验证,而对于无压流模型试验的相似性验证研究较少。本文基于陕西省某长距离分洪明流隧洞,对小比尺模型试验相似性进行了分析与探讨,通过对分洪隧洞进口闸室段过流能力和隧洞段输水能力分段进行试验研究,实现了在小比尺物理模型上进行无压流隧洞过流能力的试验相似性验证。

2 工程概况

陕西省某县城分布于某河流两岸,城市挤占河道现象严重。主城区河道狭窄,边界条件复杂,现状河宽为 52 ~ 70 m,且河道县城段呈“上下宽、中间窄”,泄洪能力严重受限。为保证县城 30 年一遇防洪安全,在主城区上游支流布置了分洪工程。经过对多重因素考虑后,支流分洪工程在张家砭镇马家洼村河道的凹岸布置分洪口,穿县城南侧山体布置分洪隧洞,出口位于名州镇芋则沟村,分洪工程示意图见图 1。设计要求通过分洪隧洞将支流 30 年一遇洪水流量 4 540 m³/s 中的 800 m³/s 直接分流至干流主城区段的下游,以减轻该河流两岸主城区的防洪压力,确保县城 30 年一遇防洪安全。

分洪隧洞由进口段(桩号 0+042.11~0+015.00

m)及闸室段(桩号 0-015.00~0+000.00 m)、上游直段(桩号 0+000.00~2+203.00 m)、中间弯道段(桩号 2+203.00~3+438.28 m)、下游直段(桩号 3+438.28~4+602.00 m)以及出口段(桩号 4+602.00 m~4+676.50 m)5 部分组成。分洪隧洞进口为喇叭口布置,底板高程为 815.00 m,在桩号 0-010.00 m 处布设闸门,洞身横断面设计为马蹄形,纵坡坡降为 3.06‰,全长 4 718.61 m。出口为防止干流河水倒灌而设置了防洪闸,闸底板高程为 802.00 m。为保证安全分洪,在分洪进口上游约 900 m 范围河段的左、右岸修建了堤防工程,其设计防洪标准为河道 30 年一遇。分洪隧洞平面布置见图 2。

3 模型相似性设计分析

为保证试验精度,准确反映原型水流情况,模型试验应既要保证分洪隧洞进口流态相似,同时又要充分反映进口分流效果。试验模型主要包括 1 500 m 长度的干流河段及支流分洪隧洞。

由于原型分洪隧洞长 4 718.61 m,糙率为 0.014,若要模型与原型完全满足水流运动相似,就常用的制模材料来看,模型几何比尺应该在 $\lambda_L = \lambda_H = 15 \sim 20$ 之间,仅分洪隧洞模型长度就达到 200 m 以上,模型场地难以满足。因此模型相似设计

放弃阻力相似条件,而采用对进口闸室段过流能力及隧洞段输水能力分别验证的方法,这主要是基于以下两个方面考虑:隧洞段内可以形成均匀流,采用明渠均匀流计算方法对实测结果进行计算验证;进口闸室段距离短、局部损失远大于沿程阻力损失,沿程阻力损失可以忽略,控制进口闸室出口水深为隧洞正常水深可直接验证进水闸室段过流能力。

鉴于上述分析,试验采用正态模型设计,几何比尺 $\lambda_L = 125$,相应的其他主要物理量的模型比尺见表 1,为了对比,表 1 中还列出了几何比尺 $\lambda_L = 15$ 时相应的其他主要物理量模型比尺。

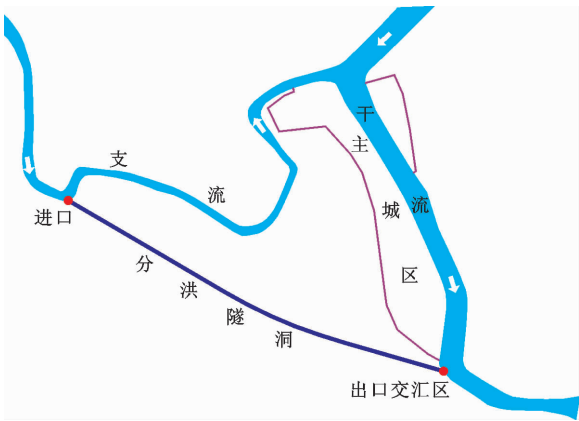


图 1 某县城分洪工程平面示意图(单位:m)

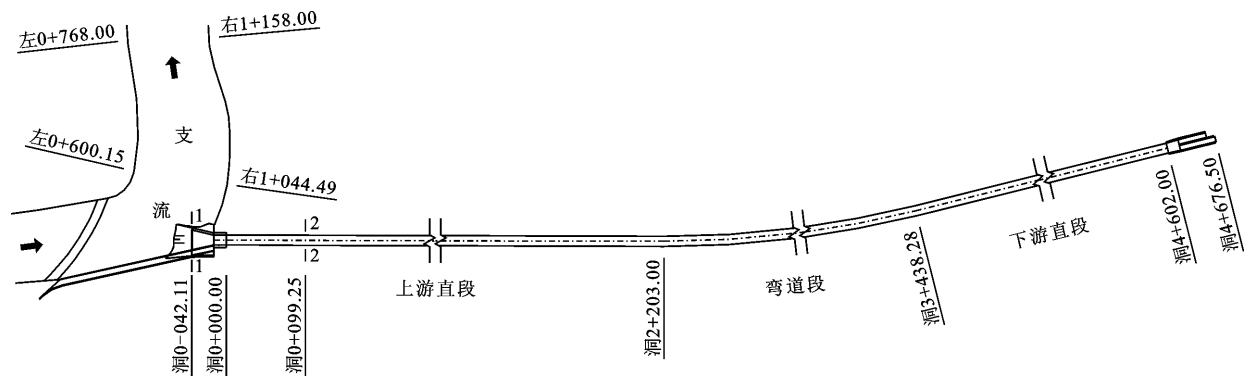


图 2 分洪隧洞平面布置图(单位:m)

表 1 两种几何比尺相应的主要参数模型比尺

几何比尺 λ_L	流速比尺 λ_v	流量比尺 λ_Q	糙率比尺 λ_n	时间比尺 λ_t	原型糙率 n_p	模型糙率 n_m
15	3.87	871.42	1.570	3.87	0.014	0.009
125	11.18	174692.81	2.236	11.18	0.020	0.009

已知原型河道段糙率为 0.033,分洪隧洞糙率为 0.014。模型河道的河床及边坡均为定床,采用水泥抹面,糙率约为 0.014,可满足与原型糙率相似;模型分洪隧洞制作材料为有机玻璃,糙率为 0.009,对应的原型糙率为 0.020,比原型分洪隧洞

糙率 0.014 增大了约 43%。

4 结果与分析

4.1 长隧洞段过流能力验证

基于对隧洞过流量和工程经济成本的考虑,模

型试验共进行了隧洞不同体型及坡降的 3 组方案对比试验。各方案具体设计参数见表 2。

表 2 隧洞段不同试验方案的设计参数

试验方案	进口底板高程 Z/m	坡降 $J/\text{‰}$	洞宽 B/m	断面形式	总长 L/m
1	815	3.06	10.0	门洞型	4718.61
2	811	2.22	10.0	门洞型	4718.61
3	815	3.06	12.2	马蹄型	4718.61

在河道防洪标准为 30 年一遇工况下,通过完全开启分洪隧洞进口闸门,对 3 组方案进行过流能力试验。试验观测发现,进入闸室的水流经过闸室段

及一定长度的隧洞段调整后,水流在分洪隧洞内均能形成稳定均匀流,观测到方案 1 的均匀流正常水深为 7.25 m,方案 2 的均匀流正常水深为 12.50 m,方案 3 的均匀流正常水深为 8.60 m。基于洞内观测的正常水深值,依据明渠均匀流计算方法按公式(1)、(2)计算隧洞段的过流量,计算结果与模型试验实测值的比较见表 3。

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (2)$$

式中:所有参数均为原型值。 Q 为隧洞计算过流量, m^3/s ; A 为隧洞过水断面面积, m^2 ; n 为糙率; R 为水力半径, m ; i 为隧洞坡降。

表 3 各试验方案分洪隧洞过流量的计算值与模型实测值比较

试验方案	正常水深 h/m	模型糙率 n	糙率比尺 λ_n	原型糙率 n	计算流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	试验流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	绝对误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	7.25	0.009	2.236	0.02	406.71	377	29.71	7.90
2	12.50	0.009	2.236	0.02	669.78	690	20.22	2.90
3	8.60	0.009	2.236	0.02	617.71	606	11.71	1.93

由表 3 可知,河道 30 年一遇洪水工况下,与模型糙率 0.009 相匹配的原型隧洞计算过流量与模型实测过流量基本一致。在不同试验方案下,计算所得的过流量与实测过流量最大差值为 $29.71 \text{ m}^3/\text{s}$,最大相对误差为 7.9%;最小差值为 $11.71 \text{ m}^3/\text{s}$,最小相对误差为 1.93%,且从方案 1 到方案 3,模型实测流量与计算流量的差值逐渐减小,究其原因,方案 1 为第 1 观测试验,在模型试验实测河道和隧洞的过流量时,水流没有达到完全平稳,因此误差较大;在方案 2、方案 3 的测量中,观测过程得以尽可能的延长,以确保模型河道和隧洞过流稳定,因此实测值与计算值的差值减小。上述分析表明,根据物理模型观测的正常水深及明渠均匀流计算方法,可以准确计算原型分洪隧洞的过流量。

同理,依据明渠均匀流计算方法可计算得到各试验方案隧洞糙率分别为 0.020、0.014 的过流量,计算结果见表 4。

由表 4 可知,不同试验方案下,糙率为 0.014 的实际过流量均较糙率为 0.020 的过流量增大了 43.7%。方案 2、3 的最大过流量分别可达 962.79、887.94 m^3/s ,大于设计要求的过流量 800 m^3/s 。

4.2 进口闸室段过流能力验证

考虑到隧洞进口闸室段较短,属于急变流段,沿

程阻力损失相对局部阻力损失可以忽略不计。水流经过闸室段调整,在隧洞桩号 0+099.25 m 断面基本形成均匀流,因此以此断面作为控制断面,控制该处水位为洞内观测的正常水深,以验证隧洞进口过流能力,闸室至隧洞桩号 0+099.25 m 断面水流流态见图 3。

表 4 各试验方案分洪隧洞糙率为 0.020 和 0.014 的计算过流量

试验方案	正常水深 h/m	糙率 n	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	7.25	0.020	406.71
		0.014	584.64
2	12.50	0.020	669.78
		0.014	962.79
3	8.60	0.020	617.71
		0.014	887.94

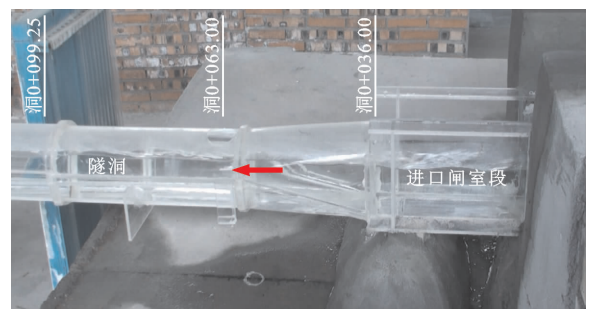


图 3 闸室至隧洞桩号 0+099.25 m 断面水流流态(试验方案 3)

首先从理论上分析计算进口闸室段过流能力,并结合实测资料进行分析比较及验证。针对方案 3 的马蹄形过水断面,选取闸室进口前沿桩号 0 - 042.11 m 处断面为 1 - 1 断面、洞身段桩号 0 + 099.25 m 处断面为 2 - 2 断面(见图 1、3),进行过流能力理论分析计算及验证。在给定河道 30 年一遇工况洪水条件下,控制 2 - 2 断面水深为隧洞实测正常水深,并以 2 - 2 断面出口底板高程为基准面,列出 1 - 1 断面与 2 - 2 断面水流能量平衡方程为:

$$H_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_j \quad (3)$$

式中:所有参数均按相似比尺换算为原型值。 H_1 为 1 - 1 断面总水头,m; $Z + \frac{P}{\rho g}$ 为过水断面的测压管水头,m; $\frac{V^2}{2g}$ 为过水断面的流速水头,m; h_j 为两断面间局部水头损失,m; h_f 为两断面间沿程水头损失,m。

根据方程式(3)及水流连续性方程,可计算出隧洞进口闸室段过流量,计算值与模型实测结果比较见表 5。

由表 5 可知,进口闸室段沿程水头损失小于局部水头损失;在进口闸室底板高程为 811 m 时,实测过流量与计算过流量的差值为 18.53 m³/s,相对误差为 1.78%;在进口闸室底板高程为 815 m 时,实测过流量与计算过流量的差值为 9.91 m³/s,相对误差为 1.64%。说明忽略沿程水头损失对计算结果影响较小,采用此方法直接验证进口段过流能力是可行的。

根据上述分析计算方法,对进口闸室底板高程及隧洞坡降进行了调整,并对闸室过流量与隧洞段过流量进行了匹配计算,最后确定闸室底板高程 812.6 m、坡降 2.55‰作为推荐方案。在 30 年一遇洪水时,推荐方案糙率为 0.014 的闸室过流量与隧洞过流量匹配计算结果见表 6、7。

表 5 不同试验方案进口闸室段过流量计算值与模型实测值比较

底板高程 Z/m	坡降/ ‰	1 - 1 断面/m	2 - 2 断面/m				计算流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	实测流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	绝对误差/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对误差/ %
		H_1	$Z_2 + P_2 / \rho g$	$V_2^2 / 2g$	h_j	h_f				
811	2.22	15.26	9.08	5.32	0.85	0.17	1020.37	1038.90	18.53	1.78
815	3.06	11.11	8.60	2.16	0.35	0.06	615.91	606.00	9.91	1.64

表 6 推荐方案闸室过流量计算结果(糙率 $n = 0.014$)

底板高程 Z/m	坡降/ ‰	1 - 1 断面/m	2 - 2 断面/m				计算流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	实测流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	绝对误差/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对误差/ %
		H_1	$Z_2 + P_2 / \rho g$	$V_2^2 / 2g$	h_j	h_f				
812.6	2.55	13.5	9.08	3.81	0.61	0.14	863.62	800	63.62	7.95

表 7 推荐方案闸室过流量与隧洞过流量匹配计算结果(糙率 $n = 0.014$)

底板高程 Z/m	坡降/ ‰	进口闸室过流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	隧洞段过流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	绝对误差/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对误差/ %
812.6	2.55	863.62	862.88	0.74	0.09

由表 6、7 可知,在闸室底板高程为 812.6 m 时,隧洞过流能力与闸室过流量基本匹配一致,分洪流量为 863 m³/s,较设计过流量 800 m³/s 超泄了 63 m³/s,占设计过流量的 7.88%,满足设计要求。经模型试验实测资料验证,计算的分洪流量与实测值基本一致。

5 结 论

本文基于陕西省某县城长距离分洪隧洞输水模

型,通过对进口闸室段过流能力及隧洞段输水能力分别验证,实现了在小比尺物理模型上进行隧洞过流能力的试验验证,得出的主要结论如下:

(1) 基于隧洞段内可以形成均匀流的特点,采用明渠均匀流计算方法并结合曼宁公式,对计算得到的过流量与其糙率相似匹配的原型隧洞的过流量进行分析对比,在模型观测流量较为稳定的情况下,两者的流量差值最小为 11.71 m³/s,最小相对误差仅为 1.93%。说明该模型设计制作及观测结果无

误,均匀流计算方法可以准确计算原型分洪隧洞的过流量。

(2)基于隧洞进口闸室段距离短、局部阻力损失远大于沿程阻力损失的特点,控制隧洞桩号 0 + 099.25 m 处水深为隧洞正常水深,经理论分析计算得出的进口闸室段过流量与实测过流量基本一致,最大相对误差不超过 1.78%。

(3)对隧洞进口闸室底板高程及洞身坡降进行了调整优化,最后确定闸室底板高程 812.6 m、隧洞坡降 2.55‰ 作为推荐方案。在 30 年一遇洪水时,推荐方案闸室和隧洞洞身的过流量相匹配且与模型实测值基本一致,分洪流量达到 $863 \text{ m}^3/\text{s}$,较设计分洪流量 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 超泄了 $63 \text{ m}^3/\text{s}$,超泄流量占设计过流量的 7.88%,完全满足设计要求。

参考文献:

- [1] 王光谦,黄跃飞,魏加华,等.南水北调中线工程总干渠糙率综合论证[J].南水北调与水利科技,2006,4(1):8-14.
- [2] 黄跃飞,王光谦,魏加华.大型调水工程干渠输水的水力优化分配[J].南水北调与水利科技,2006,4(6):47-50.
- [3] 王开,魏加华,王光谦.大型渠道糙率系数设计取值的不确定性及影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(6):870-878.
- [4] 杨开林,汪易森.南水北调中线工程渠道糙率的系统辨识[J].中国工程科学,2012,14(11):17-23.
- [5] 郑和震,马雄威,雷晓辉,等.南水北调中线工程渠道糙率计算方法研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):158-163.
- [6] 陈文学,崔巍,何胜男,等.输水系统糙率率定方法研究[J].水利水电技术,2019,50(8):116-121.
- [7] 陈耀忠.引滦入津隧洞糙率两次原型观测成果综述[J].水利水电科技进展,2005,25(2):58-61.
- [8] 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.
- [9] 左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:中国水利水电出版社,1984.
- [10] 南京水利科学研究院编.水工模型试验[M].北京:中国水利水电出版社,1985.
- [11] 李薏,李学海,杜泽金.陡坡隧洞不同进口形式的水力特性分析[J].长江科学院院报,2014,31(1):38-41.
- [12] 拜亚茹,赵锦程,邱秀云,等.人工渠道糙率系数影响因素的试验研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):229-232.
- [13] 倪培桐.变化环境下东江干流河源至博罗河道糙率分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):144-148+153.
- [14] 凌永玉,刘立鹏,汪小刚,等.大尺寸水工隧洞衬砌物理模型试验系统研制与应用[J].水利学报,2020,51(12):1495-1501.
- [15] 他金城,谭立新,张宗孝.黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道水力特性试验研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):141-145.
- [16] MIGNOT E, RIVIERE N, LEFEVRE A, et al. Smoother than smooth: Increasing the flow conveyance of an open-channel flow by using drag reduction methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,145(4): 04019011.
- [17] MIGNOT E, RIVIERE N, LEFEVRE A, et al. Reducing Darcy coefficient by using drag reduction methods in open-channel flows: Effect on discharge capacity and potential application to mitigate river flooding impact[C]// E3s Web of Conferences, 2018,40, 05001.
- [18] 杨庆,戴光清,向柏宇,等.水工导流隧洞模型试验中糙率不相似问题的研究[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(4):42-45.
- [19] 贺昌林,余挺,张建民,等.长泄洪洞模型糙率修正方法研究[J].四川大学学报(工程科学版),2007,39(6):26-29.
- [20] 吕宜卫.模型试验中管洞沿程阻力偏差的水力要素修正[J].人民黄河,2015,37(3):113-115.
- [21] 苗宝广,吴沛涛,张苾萃.长有压洞糙率不相似模型的修正方法研究[M]//中南院青年科技论坛组委会.中南院青年科技创新与实践:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院 2011 青年科技论坛.北京:中国水利水电出版社,2011.
- [22] 郑小玉,杨永全.明渠水流模型试验中糙率不相似问题研究[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(4):25-28.
- [23] 阎庆斌,阎英贤.水工模型试验中的阻力相似[C]//中国力学学会.第五届全国实验流体力学学术会议论文集,1995.
- [24] 黄纪忠,杨小亭.明渠清水定床模型试验方法的比较与应用[J].武汉水利电力大学学报,1998,31(4):51-55.