

糙率对长陡坡导流隧洞水力特性的影响研究

董宝顺¹,任坤杰²,戴涓³,周元¹,王峥钢¹,李学海²,陶然¹

(1. 华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122; 2. 长江科学院,湖北 武汉 430010;

3. 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司,湖北 武汉 430010)

摘要:为探究糙率对长陡坡导流隧洞水力特性的影响,依托某导流隧洞工程,采用三维数值模拟,研究隧洞不同壁面糙率($n=0.012\sim 0.016$)对双弯长陡坡导流隧洞内流态、泄流能力及压力等水力参数的影响。结果表明:随糙率减小,明满交替流流量区间增大;明满交替流与明流转换界限的相对作用水头变化范围较小,基本为一定值1.61;而明满交替流与有压流转换界限的相对作用水头变化范围较大,为2.00~2.42;糙率对明流或明满交替流的泄流能力影响较小,对有压流的泄流能力影响较大;随糙率减小,明流测压管水头沿程衰减幅度变化较小,有压流测压管水头衰减幅度大幅减小。

关键词:糙率;长陡坡导流隧洞;上游相对作用水头;明满交替流;压力特性

中图分类号:TV672+.1;TV732+.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1144(2026)03-0151-05

Influence of Roughness on Hydraulic Characteristics of Long Steep Slope Diversion Tunnel

DONG Baoshun¹, REN Kunjie², DAI Juan³, ZHOU Yuan¹, WANG Zhenggang¹, LI Xuehai², TAO Ran¹

(1. East China Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

3. Yangtze River Water Resources & Hydropower Development Group (Hubei) Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In order to explore the influence of roughness on the hydraulic characteristics of diversion tunnels with long steep slopes, and based on the diversion tunnel project with double-bend long steep slope, the influence on the hydraulic characteristics of this tunnel for different wall roughness ($n=0.012\sim 0.016$) is studied by using three-dimension mathematical models. The results show that the discharge interval of mixed free-surface and pressurized flow increases with the decrease of roughness; the variation range of upstream relative acting head H/a corresponding to the lower limit of the mixed flow and free-surface flow is small, which is basically a certain value of 1.61; but the variation range corresponding to the conversion limit of the mixed flow and pressure flow is large, which is 2.00~2.42; the roughness has a relatively small influence on the discharge capacity under free-surface flow or mixed flow conditions, but a significant influence on the discharge capacity under pressurized flow conditions; the attenuation amplitude of the piezometric head along the tunnel under free-surface flow exhibits only minor changes with the decrease of roughness, whereas under pressurized flow, the attenuation amplitude of the piezometric head is substantially reduced.

Keywords: roughness; long steep slope diversion tunnel; upstream relative acting head; bright and full alternating flow interval; pressure characteristics

导流隧洞流量系数是局部损失系数与沿程损失系数的函数,局部和沿程损失系数越大,流量系数越小,泄流能力越小^[1]。对于长陡坡($i > i_k$, i 为洞身底坡, i_k 为临界底坡)导流隧洞^[2],水头损失以沿程损失为主,沿程损失系数决定了隧洞流量系数的大小,而壁面糙率又是影响沿程损失系数的主要因素,其大小直接影响导流隧洞泄流特性。

导流隧洞设计糙率往往与试验研究存在一定偏差,导致隧洞设计泄流能力、流态、压力分布等水力特性与试验研究成果差异较大。如隧洞设计糙率较试验偏小,则隧洞泄流能力较大,当宣泄设计洪水时导流隧洞内可能出现明满交替流现象,导致工程运行不安全,同时也表明设计尺寸偏大造成工程投资浪费;如隧洞设计糙率较试验偏大,则隧洞泄流能力较小,当宣泄设计洪水时可能造成洪水溢漫上游围堰,淹没施工区并危及施工区安全。因此,探明壁面糙率对长陡坡导流隧洞泄流能力及流态的影响,为导流隧洞设计洪水标准的准确性具有重要意义。

随上游水位抬升、来流量增大,长陡坡导流隧洞内依次出现明流、明满交替流、有压流流态,水位升、降顺序对明满交替流的流量区间影响显著,水位上升时明满交替流流量区间较大^[3];在导流期,长陡坡导流隧洞内易产生明满交替流,但其流量区间不宜过大;明满交替流的流量系数介于无压流和有压流流量系数之间^[4]。长陡坡导流隧洞内明满交替流受洞前引渠体型、隧洞体型等布置形式影响^[5-6],对于既定工程,壁面糙率对导流隧洞明满交替流流量区间影响较大。而针对具体工程,受试验条件与模拟材料的限制,往往存在物理模型糙率与实际工程设计糙率不相似问题。鉴于此,学者们开展了系列针对性研究。李兆鹏^[7]针对二滩导流隧洞,采用物理模型试验进行相关研究,洞内为明流时调整模型隧洞底坡至模型糙率与设计相似(洞长不变),从而达到泄流能力相似;洞内为有压流时,调整流量率定水流雷诺数与沿程阻力系数的关系至摩阻相似,修正隧洞泄流能力,达到隧洞泄流能力相似。裴惠年^[8]针对大朝山水电站导流隧洞,通过物理模型试验,采用基于水头损失相似的水位校正法对导流隧洞糙率进行修正。杨庆等^[9]针对导流隧洞模型试验中模型糙率与原型不相似的问题,对比了模拟变态模型试验、依据雷诺数与沿程阻力系数关系曲线的两种修正方法,提出了因考虑了沿程水头损失和局部水头损失误差,模拟变态模型试验方法修正结果较为合理的结论。岳丽霞^[10]依据导流洞原、模型

水头损失相似,通过修正模型洞长,达到糙率相似。李红英等^[11]针对多条有压隧洞联合泄流的糙率修正方法进行研究,提出了采用封闭方程组求解各有压隧洞的水位校正值和实际过流量的方法。以上研究均对原型、模型糙率不相似产生的水头损失的偏差进行了校正,修正后的泄流能力、流态及压力分布等水力特性相互之间不能完全匹配^[12]。因此,采用无缩尺效应的数学模型研究糙率对长陡坡导流隧洞泄流能力及流态的影响是非常必要的。

本文依托某长陡坡导流隧洞工程,采用三维数学模型探讨不同糙率下导流隧洞内流态、泄流能力、压力分布等水力特性,以期为类似工程设计提供理论参考。

1 数学模型的建立

1.1 工程基本情况

某水利枢纽导流洞布置为单侧双洞(1#隧洞布置在内测,2#隧洞布置在外测)双弯道布置,包括进口段、上部直段、上部弯段、中部直段、下部弯段及出口段。隧洞断面形式为城门洞形,标准断面为 15.0 m × 17.0 m(宽 × 高),1#隧洞全长 790 m,底坡为 0.79%,2#隧洞全长 980 m,底坡 0.63%,在过流范围内 2 条隧洞底坡均大于临界底坡^[12],为典型的长陡坡($i > i_k$)导流隧洞。

1.2 基本方程

采用 RNG $\kappa - \varepsilon$ 紊流三维数学模型模拟隧洞内水流流场。RNG $\kappa - \varepsilon$ 紊流模型引入了可变系数,可提高存在较大流速梯度的流场计算精度^[13]。控制方程包括连续方程、动量方程、 κ 方程及 ε 方程,控制方程详见文献[12]。

1.3 模拟区域、边界条件与网格划分

模拟区域从上游至下游依次由上游河道及上游围堰、引水渠段、2 条(1#隧洞居内侧、2#隧洞居外侧)隧洞洞段(包括进口闸门井)、出口段及下游河道段组成。上游河道模拟的最大高程高于隧洞进口 55 m,上游围堰顶高于隧洞进口 50 m,隧洞进、出口落差为 6 m;下游河道模拟的最大高程高于隧洞出口 15 m。模拟范围如图 1 所示。在模拟过程中,上游进口闸门井顶部不封闭,当上游水位超过门井顶高程,门井可自由串流。

边界条件的设定,上游河道来流断面设定流速边界给定来流流速,下游河道出流断面设定压力边界给定水位,其他壁面设定固壁边界。

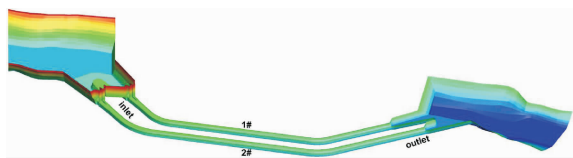


图1 导流隧洞模拟范围

模拟区域采用计算精度较高的六面体网格进行划分,网格总数650万。各部分网格分辨率详见文献[12]。

基于上游来流量 $4\,500 \sim 10\,800 \text{ m}^3/\text{s}$,隧洞糙率 $n=0.012 \sim 0.016$ 条件,数学模型模拟了双洞双弯大底坡长导流隧洞上下游及洞内沿程水流流场。

1.4 方程求解

模型基本方程采用有限体积法对控制方程进行离散,采用VOF方法实现追踪自由面。采用PISO算法耦合速度与压力,可提高计算效率,对瞬态问题计算具有明显优势[12-13]。

1.5 导流隧洞壁面糙率确定

各级计算流量条件下隧洞内水流流动均处于紊流粗糙区。依据式(1)~式(4)[1]计算沿程水头损失,分析隧洞壁面糙率与粗糙度之间的关系。

$$h_f = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$v = C \sqrt{RJ} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\left(2.1g \frac{r_0}{k_s} + 1.74\right)^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (4)$$

式中: h_f 为沿程水头损失; λ 为沿程水头损失系数; l 为隧洞长度; R 为水力半径; v 为流速; g 为重力加速度; C 为谢才系数; J 为水力坡度; r_0 为半径; k_s 为砂粒粗糙高数; n 为壁面糙率。

在数学模型中,通过粗糙高度值来反映导流隧洞的糙率对水流的影响。当粗糙高度 $k_s = 0.07、0.20、0.49、2.12 \text{ mm}$ 时,相应壁面糙率 $n = 0.012、0.013、0.014、0.016$ 。

2 糙率对导流隧洞水力特性的影响

2.1 糙率对洞内流态的影响

以闸门井为分界点,将导流隧洞分为两区段,门井以上为进口段,门井以下为洞身段,分别论述进口段与洞身段水流流态。

图2、图3为导流隧洞进口段明流、有压流流

态。图2、图3中,蓝色表示水体,红色表示气体,介于蓝色与红色之间的过渡色表示自由面。进口段流态,同一糙率下,随来流量增大,隧洞进口段流态依次呈明流、有压流流态,糙率为0.013时,流量 $4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时两条导流隧洞进口段均呈明流流态,流量大于 $6\,730 \text{ m}^3/\text{s}$ 进口段均呈有压流;不同糙率下,随糙率增大,进口流态由明流转为有压流的节点流量减小。

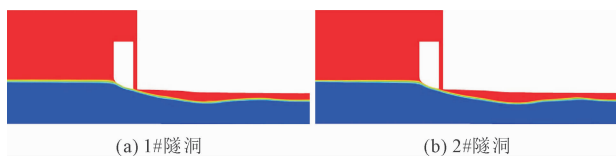


图2 导流隧洞进口段明流流态

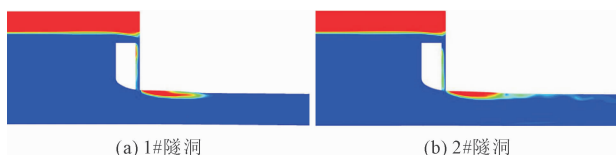
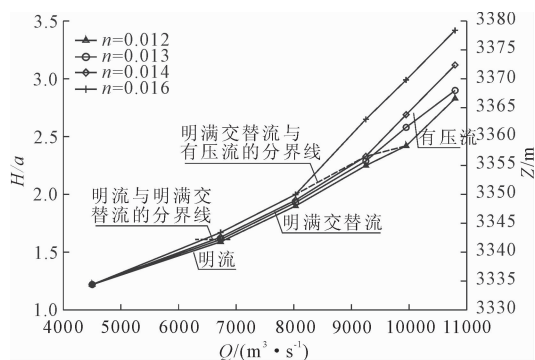


图3 导流隧洞进口段有压流流态

图4为不同糙率下流量与上游相对作用水头(上游水位)的关系曲线。由图4可知,同一糙率下,随流量 Q 增大,上游相对作用水头 H/a 升高,隧洞洞身段依次出现明流、明满交替流、有压流(包括携气有压流)[12]。不同糙率下,随糙率减小,明满交替流流量区间增大。明满交替流与明流的相对作用水头 H/a 下分界线为一水平线,表明明满交替流与明流转换界限的 H/a 变化范围较小,基本为一定值1.61;明满交替流与有压流的 H/a 上分界线斜率较大,表明明满交替流与有压流转换界限的 H/a 变化范围较大,其值为2.00~2.42,且随糙率的减小转



注: Q 为流量; H/a 为上游相对作用水头, H 为隧洞进口断面底板高程算起的上游水深, a 为洞高; Z 为上游水位;上虚线为明满交替流与有压流的 H/a (上游水位 Z)上分界线,下虚线为明满交替流与明流的 H/a (上游水位 Z)下分界线。

图4 不同糙率下流量与上游相对作用水头(上游水位)关系曲线

换界限的 H/a 增大,糙率 n 为 0.016 时,其界限的 H/a 为 2.00;糙率 n 为 0.012 时,其界限的 H/a 为 2.42。当隧洞 H/a 处于明满交替流与有压流的上分界线以上,则洞身段为有压流流态;当隧洞 H/a 处于明满交替流与明流的下分界线以下,则洞身段为明流流态;当隧洞 H/a 位于两分界线之间,则洞身段为明满交替流流态。

2.2 糙率对隧洞泄流能力的影响

由图 4 还发现,同一糙率下,随流量的增大,隧洞洞身段流态依次出现明流、明满交替流、有压流(包括携气有压流),流量与上游水位关系曲线斜率总体呈增大趋势,在明流流量区间,曲线斜率最小;至明满交替流流量区间,曲线斜率有所增大;至有压流流量区间,曲线斜率有较大增长。这说明在其流量区间内,随上游水位的抬升,有压流流量增幅较明流与明满交替流流量增幅小。

不同糙率下,随糙率的增大,同一流量对应的上游水位升高,洞身段流态呈明流或明满交替流时,糙率增大引起上游水位的增幅较小,表明糙率对明流与明满交替流流量区间的泄流能力影响相对较小;洞身段流态呈有压流时,糙率增大引起上游水位的增幅较大,表明糙率对有压流流量区间的泄流能力的影响较大。

2.3 糙率对压力分布的影响

图 5 为洞身段呈明流流态隧洞底部沿程压力分布与测压管水头,图 5 中,虚线表示隧洞沿程底部与顶部位置。从图 5 可知,洞身段呈明流流态,同一糙率下,压力开始快速回升,在上弯段附近压力达到峰值,而在两弯道下游附近受弯道水流的影响压力略有波动,隧洞沿程基本呈减小趋势,出口段为自由出流流态,底部压力出现较大跌落;在计入测点高程后,测压管水头线沿程基本呈单调下降趋势。不同糙率下,沿程压力随糙率的增大而增大,测压管水头随糙率的增大沿程衰减幅度略有减小。

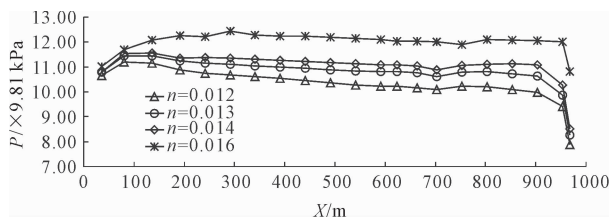


图 5 隧洞洞身段底部沿程压力分布(明流)

图 6、图 7 为隧洞洞身段呈有压流流态洞底部与顶部沿程压力分布与测压管水头。从图 6、图 7 可

知,洞身段呈有压流流态,同一糙率下,底部与顶部沿程压力(测压管水头)分布规律与明流基本一致,但沿程衰减幅度远大于明流,这也是明流与有压流的基本区别,出口压力回升至零压附近,测压管水头回升至或超过顶部高程。不同糙率下,底部与顶部沿程压力随糙率的增大而增大,压力(测压管水头)增幅沿程呈减小趋势,至出口各糙率压力基本一致;随糙率的增大,测压管水头高于洞顶高程的分布范围增大,即洞顶负压分布范围减小,泄流能力减小。

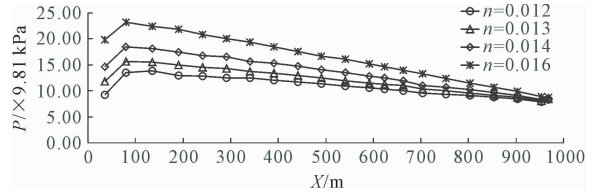


图 6 隧洞洞身段底部沿程压力分布(有压流)

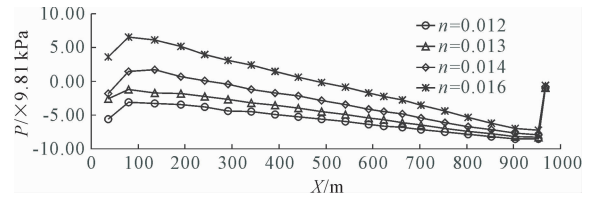


图 7 隧洞洞身段顶部沿程压力分布(有压流)

同一糙率下,上下弯道水流受离心力的影响,横断面压力呈左小右大、内小外大分布,内外侧壁存在一定的压力差,随流量的增大,水流流态由明流过渡至有压流,压力差呈增大趋势,明流上弯段内外压力差较下弯段小,而有压流时上下弯段内外压力差基本一致。不同糙率下,如同一流量下随糙率变化洞内流态没有改变,则上下弯段内外压力差基本一致。

3 结 论

(1) 随糙率减小,隧洞进口流态由明流转换为有压流的节点流量增大。

(2) 随糙率减小,洞身段呈明满交替流的流量区间增大,明满交替流与明流转换界限的相对作用水头 H/a 变化范围较小,基本为一定值 1.61,明满交替流与有压流转换界限的 H/a 变化范围较大, $H/a = 2.0 \sim 2.42$,且随糙率的减小转换界限的 H/a 增大,糙率 n 为 0.016 时,其界限的 H/a 为 2.00,糙率 $n = 0.012$ 时,其界限的 H/a 为 2.42。

(3) 隧洞洞身段流态呈明流或明满交替流,糙率对泄流能力影响相对较小;呈有压流流态,糙率对

泄流能力的影响较大。

(4) 随糙率减小,洞身段呈明流流态,测压管水头沿程衰减幅度变化较小;洞身段呈有压流流态,测压管水头沿程衰减幅度大幅减小。同一流量级下,随糙率变化洞内如流态未发生改变,则上下弯段内外压力差基本一致。

参考文献:

- [1] 清华大学水力学教研组. 水力学[M]. 北京:人民教育出版社,1980.
- [2] 李 炜. 水力计算手册[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [3] 马吉明. 弯道隧洞内的明满流现象及有关水力学问题[J]. 红水河,1997,16(01):23-24.
- [4] 李学海,李 蘅,石教豪. 陡坡隧洞明满交替流成因及改善措施[J]. 长江科学院院报,2013,30(08):40-45.
- [5] 李 蘅,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(01):38-41.
- [6] 王 威,吴时强,黄 标,等. 变坡长隧洞明满流水力

特性研究[J]. 人民黄河,2017,39(06):94-98.

- [7] 李兆鹏. 二滩导流水工模型试验研究[J]. 水电站设计,1994,10(01):62-69.
- [8] 裴惠年. 大朝山水电站枯水期施工导流模型试验研究[J]. 水利水电科技,1997,28(10):20-23.
- [9] 杨 庆,戴光清,白柏宇,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(04):42-45.
- [10] 岳丽霞. 水工模型试验中长导流洞的糙率修正问题[J]. 水电站设计,2009,28(01):34-35.
- [11] 李红英,罗永钦. 水工模型多条有压隧洞联合泄洪糙率矫正方法[J]. 水利水电科技进展,2011,31(06):14-15.
- [12] 何永胜,任坤杰,严 伟,等. 双洞双弯长陡坡导流隧洞明满交替流水力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(01):62-68.
- [13] 刘火箭,徐唐锦,宛良朋,等. 乌东德5号导流隧洞改建体型水力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(03):118-123.

(上接第143页)

- [10] 黄开勇. 软土地区相邻深大基坑同步施工设计实践[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):743-750.
- [11] Fan Shengyuan, Song Zhanping, Xu Tian, et al. Tunnel deformation and stress response under the bilateral foundation pit construction: a case study[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021,21(03):109.
- [12] 范 凡,章红兵,王建华,等. 软土地区分隔型基坑群变形特性实测分析[J]. 上海交通大学学报,2018,52(02):133-140.
- [13] Zhou Feicong, Zhou Ping, Li Jinyi, et al. Deformation characteristics and failure evolution process of the existing metro station under unilateral deep excavation[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,131:105870.
- [14] 杨海滨. 基于小应变模型的软土地区超深基坑开挖模拟与变形特性分析[J]. 中国铁路,2025(07):65-74.

- [15] 吕亚东,林 淋,蒋 进. ABAQUS 软件在深基坑开挖模拟中的应用研究[J]. 天津建设科技,2020,30(04):62-64.
- [16] 刘景锦,谢文嘉,栗晴瀚,等. 软土地区超深超厚地连墙施工的实测与模拟研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):139-144.
- [17] 钟紫蓝,郭 栋,张 卜,等. 衬垫法加固地下连续墙接缝防水与力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2025,57(09):130-139.
- [18] 郑 刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(05):638-643.
- [19] 郑 刚,邓 旭,刘 畅,等. 不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(02):273-285.