

下卧低压长距离输水隧洞水力特性 数值模拟及方案比选

张文皎¹, 胡能明², 武彩萍¹, 赵荣¹

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:长距离输水隧洞线路布置过程中时常遇到缺陷性地层等影响工程安全的不利因素,下卧低压布置法是解决这类问题的一种较优的处置手段。依托某下卧低压长距离输水工程,选取箱涵、分水口、下卧低压洞进出口竖井、下卧低压洞段和部分明流洞段作为研究段,建立三维数值模型,采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型结合 VOF 法开展数值模拟计算,研究下卧低压长距离输水隧洞沿程水力特性分布及变化规律,进行不同隧洞方案比选。研究表明:不同工况下下卧低压隧洞各部位水流衔接均相对平顺,没有出现明满流交替现象,下卧低压洞进出口竖井内的流速分布较为复杂;随着进口竖井直径的增大,隧洞内水气及水面线分布情况变化不大,进口竖井内流速梯度有所降低,出口竖井流速分布变化不大,研究成果可为下卧低压长距离输水隧洞的方案设计提供参考。

关键词:输水隧洞;下卧低压布置;进口竖井;水力特性;数值模拟

中图分类号:TV68

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0123-06

Scheme comparison and numerical simulation of hydraulic characteristics of underlying low-pressure long-distance water conveyance tunnel

ZHANG Wenjiao¹, HU Nengming², WU Caiping¹, ZHAO Xing¹

(1. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In the process of long-distance water conveyance tunnel construction, the unfavorable factors affecting the project safety often occur, such as defective strata. The underlying low-pressure layout method is an excellent approach addressing such problems. Taking a long-distance underlying low-pressure water conveyance project as the research object, a few sections, such as the box culvert, water diversion outlet, inlet and outlet shaft of the underlying low-pressure tunnel, underlying low-pressure tunnel section and some open flow tunnel sections were selected for the establishment of a three-dimensional numerical model. The RNG $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model combined with the VOF method was used to carry out the numerical simulation, and the distribution and change law of hydraulic characteristics along the underlying low-pressure long-distance water conveyance tunnel were studied for the comparison and selection of different tunnel schemes. According to the research, under different working conditions, the flow connection of each part of the underlying low-pressure tunnel was relatively smooth, and the phenomenon of alternating open and full flow did not occur. The velocity distribution in the inlet and outlet shaft of the underlying low-pressure tunnel was rather complicated. With the increase of the diameter of the inlet shaft, the distribution of water, gas and water surface line in the tunnel did not change much, the veloci-

收稿日期:2022-08-29; 修回日期:2022-11-28

基金项目:河南省重大公益专项项目(201300311600); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(HKY-JB YW-2020-18、HKY-JBYW-2021-09)

作者简介:张文皎(1989—),女,河南临颖人,博士,高级工程师,研究方向为水利水电工程。

通讯作者:武彩萍(1964—),女,河南武陟人,学士,正高级工程师,研究方向为水力学及河流动力学。

ty gradient in the inlet shaft decreased, and the velocity distribution in the outlet shaft changed little. The research results can provide some reference for the design scheme of underlying low-pressure long-distance water conveyance tunnels.

Key words: water conveyance tunnel; underlying low-pressure layout; inlet shaft; hydraulic characteristics; numerical simulation

1 研究背景

随着城市化快速发展,经济发展与用水之间的矛盾日益突出,城市的水资源支撑保障能力面临严峻的考验。因此近年来一批全局性、战略性节水供水重大水利工程得到了有序的推进^[1],如珠江三角洲水资源配置工程^[2-3]、南水北调穿黄工程^[4-5]、云南滇中引水工程^[6]等,这些水利工程建设旨在提高水资源利用效率,改善水生态环境,促进区域协调发展。在科技的高速发展下,输水隧洞作为一种主要的输水建筑物呈现出大埋深、长距离、信息化等建设趋势^[7]。

在进行输水隧洞线路布置时,受工程地质、环境等因素的限制,需要通过优化布置避开一些会对工程后期运行安全产生不利影响的缺陷性地层。其中,下卧低压布置法是近几年来开始应用于长距离输水隧洞设计施工中的一种较优的处置手段,从工程布置、施工安全、工期、征地移民、运行检修、环境影响等方面均颇有优势^[8]。下卧低压长距离输水隧洞一般采用无压隧洞结合低压力隧洞输水,无压隧洞与低压力隧洞之间设置竖井连接过渡。输水隧洞在运行过程中可能存在局部水流条件复杂、输水能力不足、洞顶余幅不足等问题,然而,目前对于下卧低压长距离输水隧洞水力特征的研究较少,有必要选取合理的模拟技术对此类输水隧洞的水力特征开展深入研究。

迄今为止,国内外学者就长距离大型输水工程做了许多研究^[9-11],最常用于分析和计算其水力特征的技术手段主要有物理模型试验和紊流数值模拟。在物理模型试验研究方面,王志坤^[12]、张栋梁^[13]利用物理模型模拟观测了无压输水隧洞出口不规则体型连接井内水体掺气与漩涡的水力现象与变化规律;郭锋等^[14]利用正态模型试验研究了输水隧洞进口控制段在不同水流条件下的过流能力、水流流态、消能防冲以及稳流效果等。在数值模拟研究方面,李晨煜等^[15]采用一维特征线法 MOC (method of characteristics),对长距离输水隧洞闸前溢流井的水位波动和溢流过程进行了数值模拟;杨蒙等^[16]采用重整化群紊流模型 RNG $k - \varepsilon$ (renormalization

group $k - \varepsilon$)模拟了孔板消能输水隧洞内的强湍流流态,探讨了孔板消能设计的合理性;张婧镁等^[17]基于窄缝法原理进行了某大型灌区输水隧洞的明满流水力瞬变数值模拟计算,得出了泄水闸合理的设计泄水流量。

从前人的研究成果可以看出,面对长距离大规模输水工程,水工模型试验仅适用于对输水隧洞中的局部建筑物开展研究工作^[18-20],难以模拟完整长度的隧洞,无法剖析整体隧洞布置方案的合理性。而紊流数值模型不受试验场地限制,能够建立全局数值模型,并提供物理模型试验中不便测量的详细水力学数据^[21-22],是研究下卧低压长距离输水隧洞水力特性的有效方法。基于此,本文依托某下卧低压长距离输水工程,利用计算流体力学理论方法,研究隧洞不同部位的水流特性分布规律,复核隧洞输水能力,重点验证工程是否存在明满交替、流速紊乱、过流不畅等问题,从而为下卧低压长距离输水隧洞设计方案提供科学依据。

2 工程概况

本文研究所依托的长距离输水工程总长度约 200 km,根据隧洞沿线地形条件、地质分布情况、地下水分布情况等,该输水隧洞采用无压隧洞结合低压力隧洞输水,无压隧洞与低压力隧洞之间设置竖井连接过渡,属于典型的下卧低压式长距离输水工程。

研究过程中,选取下卧低压长距离输水隧洞中最具代表的隧洞段,建立三维数值模型,包括箱涵段、分水口、下卧低压洞进口竖井、下卧低压洞段、下卧低压洞出口竖井和部分明流洞段,模拟段全长 12.71 km。

3 下卧低压长距离输水隧洞三维数值模型构建

3.1 紊流数学模型及求解方法

RNG $k - \varepsilon$ 紊流模型是一种基于重整化群理论修正后的 $k - \varepsilon$ 紊流模型^[23],能够很好地处理高应变率和大弯曲流场的流体运动^[24-26],笔者通过开展模型试验及原型观测曾多次验证了该方法的准确

性^[23, 27-29]。因此,本文采用 RNG $k - \varepsilon$ 模型对下卧低压长距离输水隧洞进行数值模拟,采用 VOF (volume-of-fluid) 方法追踪隧洞中水气分界面的位置,主要控制方程如下:

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (1)$$

式中: ρ 为液体密度, kg/m^3 ; k 为紊动能, J ; ε 为紊流耗散率; μ_{eff} 为有效黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; α_k 为有效普朗特数; G_k 为平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项; u_i 为速度分量; m/s ; x_i, x_j 为坐标分量, m ; t 为时间, s 。

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: α_ε 为有效普朗特数; $C_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常数项 ($C_{1\varepsilon}^*$ 为 $C_{1\varepsilon}$ 的修正项)。

VOF 方程:

$$\begin{cases} \alpha_w + \alpha_a = 1 \\ \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \alpha_w)}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_w 和 α_a 分别为计算区域内水和气体占计算单元的体积分数。

计算时,采用控制体积有限元法 (control volume finite element method, CVFEM) 进行控制方程离散,采用压力隐式算子分割算法 (pressure implicit with splitting of operators, PISO) 实现压力与流速场的耦合,采用标准壁面函数法模拟壁面处水体流动,选用 PRESTO! 计算压力方程。采用二阶迎风格式 (second order upwind) 计算动量方程和紊动能 k , 其他项

采用一阶迎风格式 (first order upwind) 计算。

3.2 隧洞三维数值模型建立

构建计算模型时,保证数值模型与隧洞原型尺寸相符。图 1 为隧洞三维数值模型示意图,模拟范围包括箱涵 ($3.9 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 1300 \text{ m}$)、分水口 ($1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 100 \text{ m}$)、下卧低压洞进口竖井 (内径为 $6 \sim 12 \text{ m}$, 高度为 30.2 m)、下卧低压洞段 (圆形断面内径为 4.7 m , 长度为 2888 m)、下卧低压洞段 (圆形断面内径为 4.5 m , 长度为 7450 m)、下卧低压洞出口竖井 (内径为 6.0 m , 高度为 39.72 m) 和部分明流洞段 (圆拱直墙断面尺寸为 $3.9 \text{ m} \times 4.7 \text{ m}$, 长度为 1068.3 m), 模型全长为 12.71 km 。

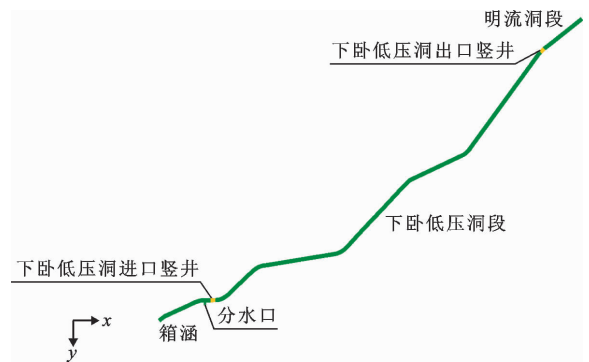


图 1 下卧低压长距离输水隧洞三维模型示意图

3.3 模型网格划分

模型网格划分充分考虑对计算效率及模拟精度的影响,采用结构化网格加局部四面体网格进行分块划分。经网格收敛性分析最终选定隧洞横剖面网格尺寸为 0.3 m , 轴向网格尺寸为 $0.3 \sim 10.0 \text{ m}$, 剖面壁面处设置边界层网格,并对下卧低压洞进出口竖井及竖井上下游连接段、分水口段、明流消力池段进行网格加密处理,网格总数约为 120×10^4 ,图 2 为隧洞数值模型的网格划分示意图。

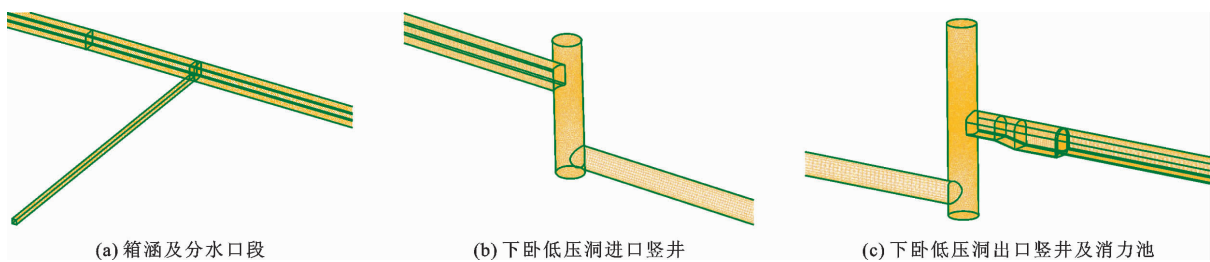


图 2 输水隧洞不同部位数值模型网格划分

3.4 初始条件和边界条件

在设定边界条件时,将箱涵进口设置为压力进口,给定箱涵底高程、水面高程、进口流速;将竖井上表面设置为压力进口,压力值为大气压;将分水口出

口设置为速度进口,水的体积分数设为 1;将明流段出口设置为压力出口,给定出口底高程、水面高程;其他边界设定为无滑移固壁边界。由于原型隧洞采用钢模板施工,依据《水力计算手册》^[30],钢模板混

凝土管的糙率范围为0.012~0.014,对应粗糙度变化范围为0.3~0.9 mm。考虑到输水管道内壁随着运行时间的增加和生物附着物的繁殖,输水隧洞糙率会出现增大现象,而经过停水检修期,附着在隧洞内壁的生物死亡和脱落,人工对隧洞壁面清理后其糙率又可恢复到或接近初始值,因此,输水隧洞糙率是动态变化的。通过参考同类工程输水隧洞糙率取值^[3]以及工程所在地水质情况,取糙率值为0.014作为基本糙率开展数值模拟计算方案比较,对应的粗糙度为0.9 mm。

紊动能 k 和紊流耗散率 ε 初始值按以下经验公式计算得出:

$$\begin{cases} k = 0.00375u_{in}^2 \\ \varepsilon = \frac{Ck^{3/2}}{0.03R} \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{in} 为进口流速,m/s; R 为水力半径,m; C 为经验常数,取值为0.9。

使用非恒定流计算模拟恒定流场计算,时间步长设置为0.01 s,当进、出口流量差值小于0.1%时即说明流场计算稳定,模拟结束。

3.5 模拟计算工况设置

下卧低压长距离输水隧洞三维数值模拟计算工况见表1。通过计算对竖井尺寸进行比选,分析不同工况下的隧洞沿程水力特性。

表1 下卧低压长距离输水隧洞数值模拟计算工况

工况	箱涵进口水位/m	箱涵进口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	分水口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下卧低压隧洞进口竖井直径/m	明流段出口水位/m	备注
1	498.0	23	3	6	493.7	最大设计流量
2	498.0	23	3	8	493.7	最大设计流量
3	498.0	23	3	10	493.7	最大设计流量
4	498.0	23	3	12	493.7	最大设计流量

4 三维数值模拟结果与分析

4.1 隧洞流态分布

图3为隧洞典型部位流态示意图,由于各工况流态相似,图中仅给出了工况1的流态。从图3中可以看出,不同工况下隧洞各部位水流衔接均相对平顺。这也说明使用该紊流模型进行非恒定计算,能较为准确地模拟隧洞过流流态。

4.2 隧洞内水气及水面线分布

经计算分析,得出隧洞内水气分布,图4为最大设计流量 $23 \text{ m}^3/\text{s}$ 下各工况输水隧洞不同部位的水气分布图。由图4可知,进口边界至进口竖井段能形成稳

定的明流,下卧低压洞内则为有压流,出口竖井段、消力池段至出口边界再次转换为明流,沿程整体水流平顺,洞身内部没有明满流交替现象出现。下卧低压隧洞进口竖井直径由6 m(工况1)增大到12 m(工况4)时,隧洞内水气及水面线分布情况变化不大。

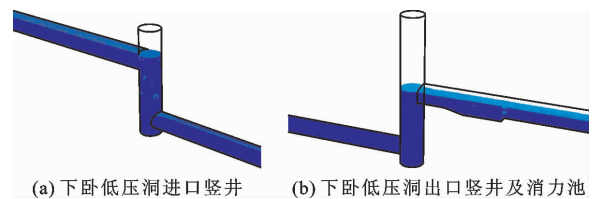
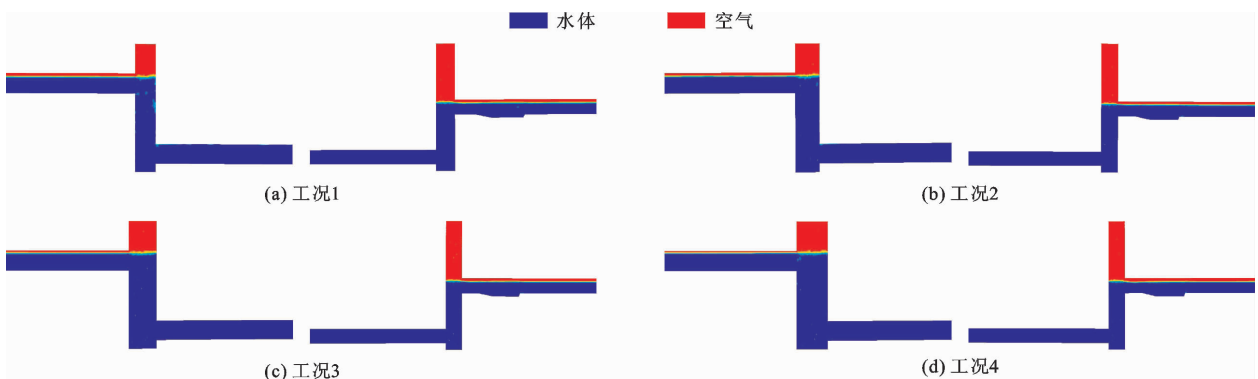


图3 输水隧洞不同部位流态模拟结果



注:各工况左图为下卧低压洞进口竖井段,右图为下卧低压洞出口竖井及消力池段

图4 各工况输水隧洞不同部位水气分布(最大设计流量 $23.00 \text{ m}^3/\text{s}$)

4.3 隧洞沿程流速分布

根据数值计算结果,箱涵、下卧低压洞、明流洞消力池后段的流速分布均匀,而下卧低压洞进出口竖井内的流速分布较为复杂。

图 5 为不同工况下卧低压洞进口竖井段的流场分布。由图 5 可知,水流平顺进入进口竖井后,会有主流冲击竖井下游壁面的现象,随后沿壁面向下进入下卧低压洞,并在低压洞进口顶部一定范围内形成低流速区。对比不同进口竖井直径,进口竖井直径越小,则竖井内流态越复杂。工况 1 进口竖井直径为 6 m 时,竖井内流速梯度大,主流触击竖井下游壁面处流速最大,约为 3.0 m/s,进入低压洞后形成的扰流低流速带范围也最大。工况 2、工况 3、工况

4 进口竖井直径分别为 8、10、12 m 时,竖井内流速分布规律相似,主流未抵达竖井下游壁面之前流速已经减小,下卧低压洞进口的扰流低流速带范围较小,洞内断面流速分布较为均匀。

图 6 为下卧低压洞出口竖井和明流洞消力池段流场分布,由于各工况该部位的流速分布相似,图 6 仅给出了工况 1 的流场分布。与图 5 流速分布规律基本一致,水流从下卧低压洞末端流出后,会冲击出口竖井下游壁面并沿壁面爬升至明流洞段,在明流洞段及消力池底部形成低流速区,水流出消力池后流速分布逐渐趋于均匀。随着上游下卧低压隧洞进口竖井直径的增大,低压洞出口竖井流速分布变化不大。

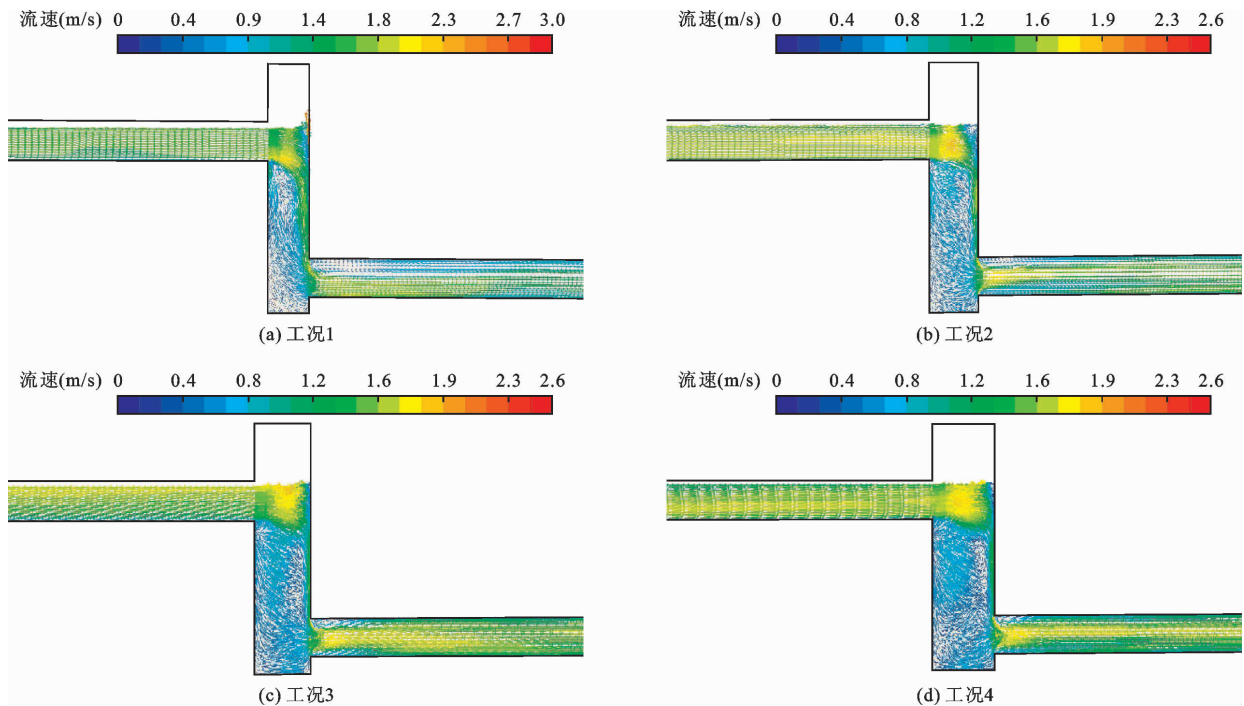


图 5 不同工况输水隧洞下卧低压洞进口竖井段流场分布

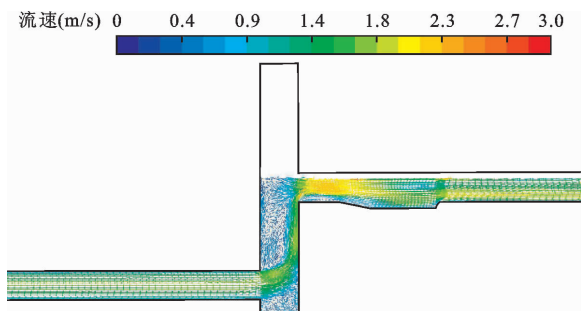


图 6 输水隧洞下卧低压洞出口竖井和明流洞消力池段流场分布(工况 1)

5 讨论

本文利用数值模拟手段分析得出下卧低压长距

离输水隧洞的沿程水力分布特性,模拟结果与肖豫等^[18]、周荣等^[20]通过输水隧洞水力学模型试验取得的研究成果相似;采用 RNG $k - \epsilon$ 双方程紊流模型结合 VOF 法,计算得出了不同方案下卧低压洞进出口竖井的流态、流速变化规律,与杜金威等^[24]、马斌等^[25]选用的模拟方法一致,验证了该模拟方法的可行性。针对下卧低压长距离输水工程可能存在的明满流交替、流态紊乱等问题,本文建立了完整长度的输水隧洞三维数值模型,研究了输水隧洞沿程流态、水面线、流速分布情况,分析了不同工况下隧洞重要部位的水力特性变化规律,为整体隧洞优化布置与方案设计提供了有力支撑。

此外,秦晓川^[3]、沈国梁^[9]通过研究得出输水隧洞实际运行过程中糙率的变化直接带来隧洞水头损失及过水能力的变化,不利于长距离输水隧洞功能的有效发挥,不能合理地控制工程建设投资。本文通过参考同类工程输水隧洞糙率以及工程所在地水质情况来确定输水隧洞糙率的取值,该方法具有一定的局限性,还需结合输水隧洞的结构设计特性,选择已建成的类似工程,通过原型观测及科学研究,对下卧低压长距离输水隧洞糙率问题进行深入讨论。

6 结 论

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型结合 VOF 法对某下卧低压长距离输水隧洞开展了数值模拟计算,得出的主要结论如下:

(1)不同工况下隧洞各部位水流衔接均相对平顺,没有出现明满流交替现象。下卧低压隧洞进口竖井直径由 6 m 增大到 12 m 时,隧洞内水气及水面线分布情况变化不大。

(2)箱涵、下卧低压洞、明流洞消力池后段的流速分布均匀,下卧低压洞进、出口竖井内的流速分布较为复杂。

(3)水流从箱涵进入下卧低压洞进口竖井,会发生主流冲击竖井下游壁面的现象,随后沿壁面向下进入下卧低压洞,并在低压洞进口顶部一定范围内形成低流速区。当进口竖井直径为 6 m 时,竖井内流速梯度较大;当进口竖井直径为 8 m 时,竖井内流速梯度减小;当进口竖井直径继续增大时,竖井内流速分布规律变化不大。

(4)随着下卧低压隧洞进口竖井直径的增加,低压洞出口竖井流速分布变化不大。水流从下卧低压洞末端出流后,会冲击出口竖井下游壁面并沿壁面爬升至明流洞段,在明流洞段及消力池底部形成低流速区,水流出消力池后流速分布逐渐趋于均匀。

参考文献:

- [1] 赖勇,杜强强,郑刚.长距离输水隧洞进度补短板措施与技术创新[J].施工技术,2021,50(6):102-105.
- [2] 杜灿阳,邓鹏,张兆波,等.BIM+GIS技术在珠江三角洲水资源配置工程中的应用[J].人民珠江,2022,43(2):30-39.
- [3] 秦晓川.珠江三角洲水资源配置工程输水隧洞糙率取值范围研究[J].广东水利水电,2021(4):31-34.
- [4] 邢义川,李振,安鹏.南水北调中线穿黄工程南岸黄土强度特性研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):129-132.

- [5] 罗毅,凌霄,代巧枝.南水北调中线一期穿黄工程北岸填筑渠道设计[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):26-29.
- [6] 马晓青.滇中引水工程取水点上游金沙江流域水汽输送及其收支特征研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [7] 陈勃文,魏波.北疆长距离输水隧洞TBM卡机快速解脱措施探析[J].水利水电技术,2020,51(S2):298-305.
- [8] 胡能明,张文皎,曹林顺,等.下卧低压布置法在湿陷黄土地层输水隧洞中的应用研究[C]//中国大坝工程学会.水库大坝和水电站建设与运行管理新进展.北京:中国水利水电出版社,2021.
- [9] 沈国梁.基于水动力学方法的输水隧洞糙率反推及过水能力复核分析[J].黑龙江水利科技,2021,49(4):131-133.
- [10] 王洁.某工程配水枢纽水力特性模型试验研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [11] 丁哲.输水隧洞扩大洞室的水力特性研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [12] 王志坤.无压输水隧洞出口连接井掺气与漩涡水力现象物理模型试验研究[J].水利技术监督,2019(1):17-19.
- [13] 张栋梁.无压输水隧洞出口连接井水力流态试验研究[J].水利技术监督,2021(6):28-31+36.
- [14] 郭锋,魏冰.锦州输水隧洞进口控制段水工模型试验研究[J].水利技术监督,2018(1):125-129.
- [15] 李晨煜,张博然,徐茜.闸前溢流并在长距离输水隧洞中的水锤防护特性研究[J].科技通报,2020,36(12):73-78+91.
- [16] 杨蒙,顾世祥.三维数值模拟在孔板消能输水隧洞设计中的应用[J].中国农村水利水电,2012(12):103-106+111.
- [17] 张婧镁,杜敏,鞠小明.基于明满流瞬变计算方法的大型灌区输水隧洞最优泄水流量计算[J].长江科学院院报,2021,38(6):60-66.
- [18] 肖豫,邢建营,武彩萍.CCS水电站输水隧洞水力特性研究[J].人民黄河,2019,41(6):89-93.
- [19] 罗毅.变水头无压输水隧洞水流特性及洞内消能研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [20] 周荣,周红梅.东河水库溢洪道及输水隧洞水工模型试验[J].水力发电,2003(6):64-65.
- [21] 麻蓉.引汉济渭秦岭输水隧洞水力、水质动态模拟分析[D].西安:西安理工大学,2018.
- [22] 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.
- [23] 张文皎,刘磊,武彩萍,等.开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性及优化布置研究[J].水利水运工程学报,2022(6):25-34.
- [24] 杜金威,王均星,李辉成.阳升观台阶溢洪道水流数值模拟研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(2):110-116.

(下转第 135 页)

- [7] ZHANG Zehui, WU Jin, ZHAO Xin, et al. Life evaluation of organic coatings on hydraulic metal structures[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 148: 105848.
- [8] 李力,魏天酬,刘明维,等. 冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 70-74+91.
- [9] ZENG Liqin, LIU Mingwei, WU Linjian, et al. Erosion characteristics of viscoelastic anticorrosive coatings for steel structures under sand flow[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 120360.
- [10] 崔懂文. 水工结构典型病害修复与防护新材料及应用[D]. 长沙:长沙理工大学, 2021.
- [11] 张俊涛,闵巧玲,李明超,等. 水工混凝土裂缝高强环氧砂浆修复的力学性能评价分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(1): 152-158.
- [12] 彭杰,单韧,黄松,等. 大体积灌浆用环氧砂浆研究[J]. 热固性树脂, 2021, 36(3): 42-46.
- [13] 李冠州,谷源泉,吴祥,等. 专利环氧砂浆在西霞院水库泄洪洞中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(S2): 246-247+250.
- [14] 祝君. 环氧砂浆大面积应用的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.
- [15] 买淑芳,方文时,杨伟才,等. 海岛结构环氧树脂材料的抗冲磨试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1498-1502.
- [16] 张涛,郭双. 新型NE环氧树脂砂浆的研制及其在水利水电工程中的应用[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(11): 94-97.
- [17] 张涛,郭双,黄俊玮. 紫坪铺工程泄洪排沙洞抗高速水流冲磨蚀修补及震后修复[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(10): 85-88.
- [18] 王恺毅. 环氧砂浆抗冲耐磨层施工与质量控制——以龚嘴电站6号冲砂底孔为例[J]. 水电与新能源, 2014, 28(3): 28-31.
- [19] 张达,崔同欢,肖承京,等. CW改性环氧砂浆在西藏地区抗冲磨防护中的应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11): 102-104.
- [20] 邵晓妹,范冬冬,马保国,等. CW弹性环氧砂浆抗冲磨性能及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(6): 166-170.
- [21] 徐雪峰,白银,余熠. 水工泄水建筑物抗冲耐磨高分子护面材料综述[J]. 人民长江, 2012, 43(S1): 177-179+198.
- [22] 田育功. 大坝与水工混凝土关键核心技术综述[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 23-30+52.
- [23] 李珍,熊泽斌. 高寒地区水工混凝土防护修复技术与应用[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 1-8.
- [24] 汤朋,刘兰轩,曹东萍,等. 有机涂层附着机理及附着力提高方法综述[J]. 材料保护, 2020, 53(2): 126-135.
- [25] 张璐,李海洲,张伟. 环氧树脂改性橡胶粉砂浆力学性能的正交试验分析[J]. 混凝土, 2018(5): 106-109.
- [26] 王伟,李少芳,陈海伟,等. 填料级配及掺量对环氧砂浆性能影响的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(2): 106-108.
- [27] 张晓华,朱华,陈晓龙. 环氧砂浆性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 23-25+29.
- [28] 陆旭峰,任敏,韩杰,等. 环氧砂浆填料配方优化研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(3): 101-103+126.
- [29] 孙翠兰. 高强度环氧树脂砂浆的制备与性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(3): 40-43+50.
- [30] 孟旭. 弹性环氧砂浆研发及性能评价[D]. 西安:长安大学, 2012.
- [31] 李春云,薛善彬,张鹏,等. 轻骨料对砂浆力学与毛细吸水性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 41-50.
- [32] 俞亮,张雷,郭家琛. 水性环氧砂浆抗冲磨特性研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(1): 134-138+148.
- [33] 张振忠,汪在芹,陈亮. 改性环氧砂浆抗冲磨材料性能研究[J]. 水力发电, 2016, 42(6): 95-98.

(上接第128页)

- [25] 马斌,叶星宇,缙文娟,等. 燕尾坎水舌冲击特性试验及数值仿真研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 125-133.
- [26] 李昂. 水库放空问题二维数值模拟研究[J]. 四川水利, 2020, 41(2): 12-15.
- [27] 张文皎,赵连军. 管道排沙系统吸泥头优化设计及区域流场数值模拟[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 163-166.
- [28] 张文皎. 高坝泄洪诱发低频声波原型观测与机理研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [29] 张文皎,马斌. 基于3D数值模拟的泄洪洞安全监测及预警指标体系[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 157-161.
- [30] 李炜. 水力计算手册:第2版[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006年.