

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.04.017

地下引水隧洞施工期渗流分析

朱留杰¹, 许伟伟¹, 金洪杰², 李子阳³, 甘磊²

(1. 西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 河南 郑州 450000;
2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 地下水位较高的引水隧洞开挖易受隧洞周围渗流场影响, 存在渗透破坏风险。为研究高地下水位下施工期隧洞渗流场演变规律, 以西霞院穿沁隧洞为依托, 建立隧洞施工期三维渗流有限元分析模型, 开展隧洞五个主要施工阶段渗流分析。结果表明: 各施工阶段隧洞渗流场分布规律合理, 检修井施工对原渗流场位势分布影响较大; 沁河正常蓄水位下, 各施工阶段隧洞渗流稳定满足要求; 当水位上升至设计洪水位时, 洞身开挖至 684 m 和 1 257 m 阶段, 最大渗透坡降超过土体允许渗透坡降, 施工时应错开沁河高水位时期, 并做好渗控措施; 沁河正常蓄水位下各施工阶段隧洞渗流量最大单宽流量为 2.77 m²/d, 随水位上升, 流量增加明显; 隧洞各阶段施工前后, 计算区域最大渗透坡降和单宽流量有所增加。研究成果可为相似引调水工程的设计和施工提供依据。

关键词: 引水隧洞; 施工期; 渗流场; 数值模拟; 渗透稳定

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)04—0113—07

Seepage Analysis of Underground Diversion Tunnel During Construction

ZHU Liujie¹, XU Weiwei¹, JIN Hongjie², LI Ziyang³, GAN Lei²

(1. Water Conservancy and Irrigation District Engineering Construction Administration of Xixia Yuan Water Conservancy Project, Zhengzhou, Henan 450000, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: The excavation of underground diversion tunnel with high groundwater level is easily affected by seepage field around the tunnel, and there is a risk of seepage damage. In order to analyze the variation of seepage field in rock and soil layer with tunnel excavation, based on the Chuanqin tunnel of Xixiyuan, a three-dimensional seepage finite element analysis model during tunnel construction was established to conduct the seepage analysis in the five main construction stages of the tunnel. The results show that the distribution law of tunnel seepage field in each construction stage was reasonable. The construction of manhole had a great influence on the potential distribution of original seepage field. Under the normal water level of Qinhe River, the seepage stability of the tunnel in each construction stage met the specification requirements. When the water level increased to the design flood level and the tunnel body was excavated to 684 m and 1 257 m, the maximum seepage gradient exceeded the allowable seepage gradient of soil mass. During construction, the high water level period of Qinhe river shall be staggered, and corresponding seepage control measures shall be taken. Under the normal water level of Qinhe River, the maximum unit discharge of tunnel seepage at each construction stage was 2.77 m²/d, and the flow increased significantly with the rise of water level. Before and after the construction of each stage of the tunnel, the maximum seepage gradient and unit discharge in the calculation area increased. The research results can provide a basis for the design and construction of similar water diversion and transfer projects.

Keywords: diversion tunnel; construction period; seepage field; numerical simulation; seepage stability

收稿日期: 2022-04-03

修稿日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179130; 51609073); 江苏省自然科学基金项目(BK20201312)

作者简介: 朱留杰(1966—), 男, 正高级工程师, 主要从事水利工程建设和管理方面的工作。E-mail: 1439755924@qq.com

通讯作者: 甘磊(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程渗流等方面的教学与研究工作。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

我国建设了南水北调、引黄入冀、引江入淮、引黄入淀、滇中引水等一大批引调水工程^[1-3],以缓解区域内水资源分布不均现状,优化供水系统配置,满足各大灌区、人口聚居区的生活生产用水需求。为减少地表资源的占用,引调水工程常需建设一定长度的地下引水隧洞。隧洞开挖过程中不可避免会改变周边岩土结构,影响其渗流稳定,导致地下水位发生骤降,增大地下水供应枯竭、地表不均匀沉降及湿地退化等风险^[4-6],如三峡引水工程秦巴段因断裂带聚集、构造岩胶结较差,在隧洞开挖后出现大变形和涌水等问题^[7]。

为保证隧洞施工及运行期的安全稳定,减少渗透破坏事故的发生,许多学者对此进行研究^[8-15]。张凡等^[8]对隧洞开挖后渗流场变化进行分析,结果发现隧洞开挖会导致地下水位连年下降,部分岩土体孔隙水压力减小,增大滑坡失稳的概率;杜泽等^[9]结合滇中引水工程,分析沿线各隧洞段的布置、结构特点及地质情况,提出了一套统一各隧洞监测设计标准的监测设施布置原则;谢小帅等^[10]以深埋引水隧洞为研究对象,分析多种排水方案下隧洞渗流场和衬砌外水压力之间的联系,结果表明排水措施降低衬砌外水压力的效果随排水孔数量增加而显著;朱彬彬等^[11]依托福建龙津溪引水隧洞工程,考虑隧洞穿越富水断层的工程特点,采用基于平面一维渗流微分方程的数值方法计算隧洞涌水量,并结合监测数据进行验证。

本文依托西霞院水利枢纽输水及灌区工程穿沁隧洞标段,建立该隧洞三维渗流有限元模型,考虑沁河典型水位条件,开展隧洞始发井、检修井开挖,洞身开挖至 684 m、1 257 m 和终点五个阶段的施工期隧洞渗流分析,以期类似工程的设计和施工提供理论依据。

1 工程概况

1.1 工程简介

西霞院水利枢纽输水及灌区工程位于河南省黄河北岸,涉及洛阳、焦作、新乡三市,是国务院确定的全国节水供水重大水利工程之一。该工程通过建设一条自西向东,全长 114.283 km 的输水总干渠,在为上游灌区供水的同时,将供水保证率较高的黄河水引调至更多灌区。该工程布置各类渠系共 13 条,新、改建骨干建筑物 570 座,工程等别为 I 等。其中地下隧洞结构建筑物工程级别为 1 级,其余主要建筑物级别为 2 级。

穿沁隧洞建设标段位于武陟县境内,采取盾构法施工,主要由进口连接段、出口检修段和隧洞段三部分构成。进口连接段位于方陵村以北麦苗农田中,建设一个矩形竖井为盾构始发井,围护结构为 1.00 m 厚的地下连续墙;出口检修段位于南贾村以南的一片杨树林、果林及麦苗田中。建设一个检修井作为盾构接收井,检修井直径为 21.80 m,井深约 42.80 m,采用 1.50 m 厚的圆形地下连续墙;始发井和检修井施工均采用明挖逆作法。

隧洞段全长 2 850.00 m,自西向东下穿麦苗田地、滩涂,沁河左右堤坝、沁河以及村庄民房等区域和建构筑物。隧洞段结构采用外径为 6.60 m,内径为 5.90 m 的 C50W12F200 的钢筋混凝土管片错缝拼装,管片厚 0.35 m,隧洞内二次衬砌 0.50 m 厚 C35 钢筋混凝土。该标段全程地下施工,施工条件复杂,且需下穿大片农田果林、村庄、堤坝以及地上河流等区域,水文地质条件较为复杂。

1.2 水文地质条件

隧洞施工穿越的沁河为地上悬河,发源于山西省沁源县二郎神沟村,自武陟县南贾村西南注入黄河,河流全长 450.00 km,总流域面积 13 532.00 km²。河槽段水位变化属水文动态型,有暴涨暴落现象,多年平均水位约为 96.64 m,可视为正常蓄水位,设计洪水位为 101.68 m。

场区地下水分潜水和承压水,地上河河水、潜水和下部承压水存在密切的水力联系,受沁河径流影响,地下水位较高。由 2019 年水位观测相关资料可知,沁河左、右岸地下水均赋存于第⑩层中细砂中,其中左岸埋深 9.20 m ~ 19.80 m,水位为 81.98 m ~ 82.35 m,而右岸埋深 14.20 m ~ 22.10 m,水位为 77.83 m ~ 82.08 m。

2 渗流分析模型

2.1 计算模型

本文采取饱和-非饱和三维渗流计算程序对隧洞模型进行计算,具体原理可参考相关文献^[16-18]。模型坐标系如下: x 方向垂直于沁河走向,与隧洞开挖方向平行,以始发段指向终点段为正; y 方向平行于河流走向,以朝南为正; z 方向垂直地面向上,坐标与高程一致。坐标原点设置于模型的左下角,坐标为(0, 0, 0)。基于设定的计算坐标系,综合考虑渗流分析要求和工程实际情况,对模型的计算范围设定如下: x 方向,以始发井段为起始至检修井段而终,全长 2 900.00 m; y 方向,以隧洞轴线方向为

基准,南、北向各截取 70.89 m,并设最北面为 y 轴零坐标; z 方向以海平面高程($z = 0$ m)为起始至地面高程而终。

结合穿沁工程所处区域的地形地貌、岩土层分布及岩性,建立三维有限元计算模型,依据各层材料渗透特性,对计算模型进行分区,并筛选出施工需挖除的土体单元,隧洞场区三维渗流计算模型如图 1 所示。图 1(a) 渗流计算初步整体模型,超单元总数 20 980 个,节点 21 090 个,加密细分后形成三维有

限元网格,网格节点总数 41 445 个,单元总数 40 450 个;图 1(b)~图 1(d) 分别为隧洞始发井段、检修井段及地下隧洞段的局部模型和地层分布图。鉴于不同工况的隧洞结构存在差异,需结合对应施工阶段实际情况,修正初步模型;对已施工部分,删除拟开挖的土体单元,未施工部分,对拟开挖土体、混凝土单元的材料属性进行修改,使其与原土体材料一致。综上所述,需建立 5 个修正模型以实现穿沁隧洞施工期渗流性态的模拟分析。

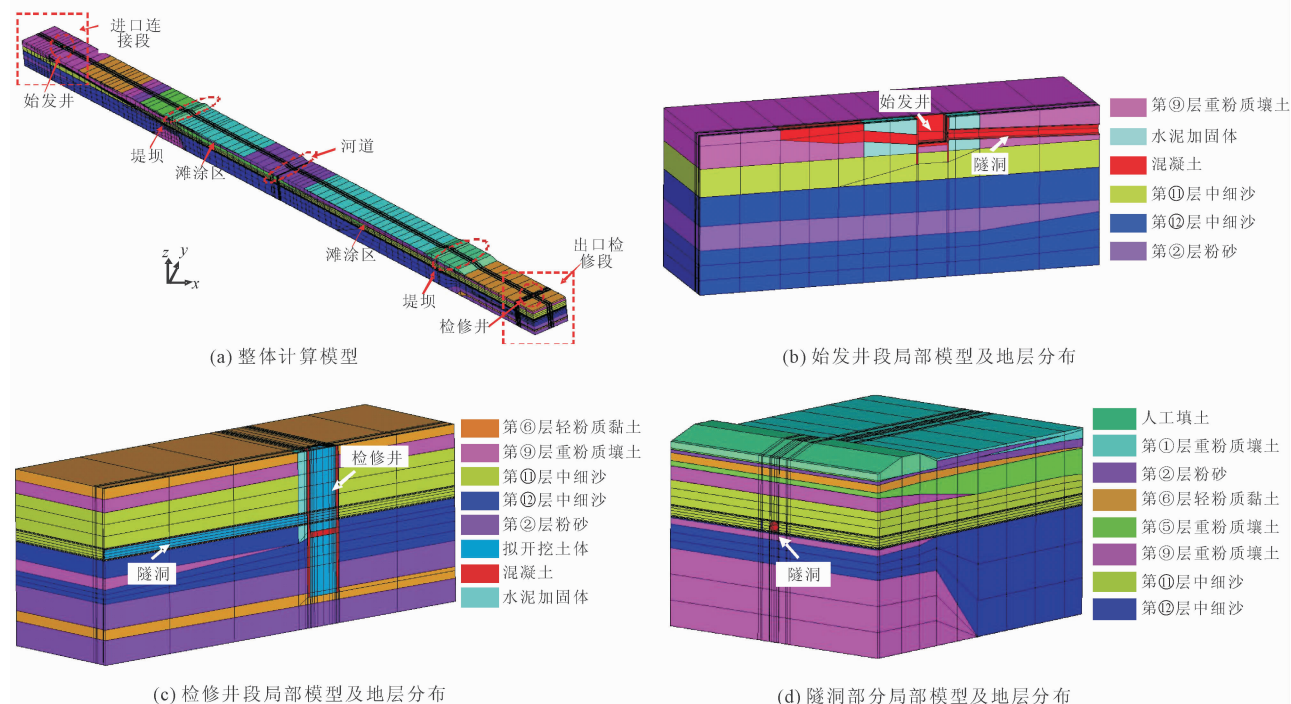


图 1 隧洞场区三维渗流计算模型示意图

2.2 计算工况

该工程选择盾构法开挖隧洞,在隧洞开挖前期,需建设始发井和检修井结构分别作为盾构施工的始发段和接收端,隧洞盾构开挖洞身时会实时安装 1.5 m 长的衬砌管片。根据该工程施工的特点及施工组织计划,选择始发井、检修井开挖,洞身开挖至 684 m、1 257 m 和终点五个典型施工阶段为隧洞施工期渗流场分析的研究对象,结合沁河水位条件设置 10 个分工况,见表 1。

2.3 计算参数及边界

根据隧洞各部分结构及场区岩土层分布特点,结合地勘资料对各土体单元渗透性的评价,现场实验成果和实践经验,将整体模型按材料渗透性大小分为 10 个区域,各区材料渗透系数见表 2。

表 1 隧洞场区渗流分析计算工况表

工况编号	工况说明	水位情况
CQ-1	始发井开挖完成	地上河水位
CQ-2	检修井开挖完成	96.64 m
CQ-3	洞身开挖至 684 m	右侧地下水 82.08 m
CQ-4	洞身开挖至 1257 m	左侧地下水 82.35 m
CQ-5	洞身开挖至终点	
CQ-6	始发井开挖完成	地上河水位
CQ-7	检修井开挖完成	101.68 m
CQ-8	洞身开挖至 684 m	右侧地下水 82.08 m
CQ-9	洞身开挖至 1257 m	左侧地下水 82.35 m
CQ-10	洞身开挖至终点	

穿沁隧洞渗流分析模型的边界包括已知水头边界、出渗边界和不透水边界三种,具体设置如下:沁河水位以下河道和地下水位以下截取边界为已知水头边界;地下水位以上土体、地面和隧洞开挖面等与

大气接触部分为出渗边界；模型底部截取边界为不透水边界。

表 2 场区各材料渗透系数

序号	名称	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	第①层 重粉质壤土	5.30×10^{-5}
2	第②层 粉砂	1.81×10^{-2}
3	混凝土材料	7.29×10^{-7}
4	第④层 粉质黏土	5.27×10^{-6}
5	第⑤层 重粉质壤土	1.03×10^{-5}
6	第⑥层 轻粉质黏土	2.70×10^{-4}
7	第⑨层 重粉质壤土	4.50×10^{-5}
8	第⑩层 中细沙	1.05×10^{-2}
9	第⑫层 中细沙	4.50×10^{-3}
10	人工填土	4.29×10^{-4}

3 结果分析

3.1 位势分布规律分析

隧洞开挖对周边岩土结构及场区渗流特性产生的影响会随着距离的增加逐渐减弱,考虑到隧洞施工涉及的岩土层区域较大,故开展隧洞各施工阶段渗流分析时,截取以各阶段开挖部分为中心,左右延伸 250.00 m 的局部模型,选取三个典型剖面,对隧洞施工各阶段渗流场进行分析,剖面分布如图 2 所示, $y = 70.89 \text{ m}$ 剖面贯穿始发井、检修井及隧洞轴线,为该隧洞模型的中心剖面,可反映隧洞区域岩土层渗流特性; $y = 57.69 \text{ m}$ 剖面平行于洞轴线,距离中心剖面约两倍洞径,可反映受隧洞施工直接影响的岩土层渗流特性; $y = 141.78 \text{ m}$ 剖面为模型的截取边界,距中心剖面超过 10 倍洞径,可反映隧洞开挖前岩土层渗流特性。

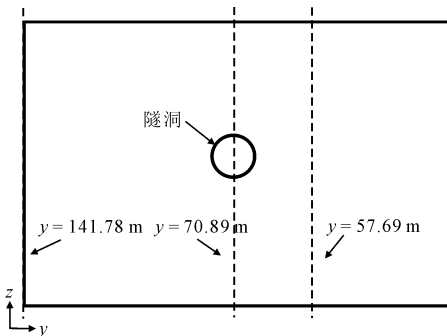


图 2 典型剖面选取示意图

图 3 为始发井开挖后典型剖面水位等值线图,由图可知,始发井开挖会改变施工区地下水位位势分布,但整体渗流场变化较小。为更直观判断开挖

后,周边岩土层地下水位势分布的变化程度,绘制了地下水位等值线图如图 4 所示,其中图 4(a)和 4(b)分别为沁河正常蓄水位和设计洪水位时始发井开挖后的场区地下水位等值线图。由图 4(a)可以看出,场区地下水位位势分布明确,始发井开挖后,周边约 $2\,500 \text{ m}^2$ 面积的圆形区域内,渗流场位势分布特征发生改变,等值线环绕始发井逐渐下降,这是因为始发井开挖之后,该部分岩层与大气连通,使周边地下水更易向此处汇聚,水位下降较之其他区域更加明显。由图 4(b)可以看出,当沁河水位上升至设计水位时,场区地下水位有所上升,等值线分布更密集,但整体分布规律与正常蓄水位时相同。

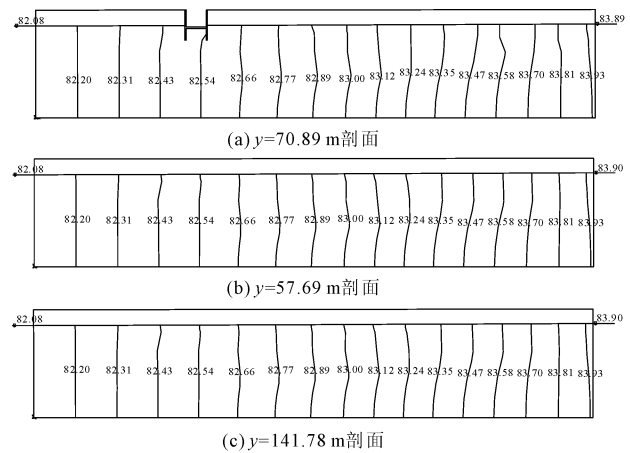


图 3 始发井开挖后场区典型剖面水位等值线分布(单位:m)

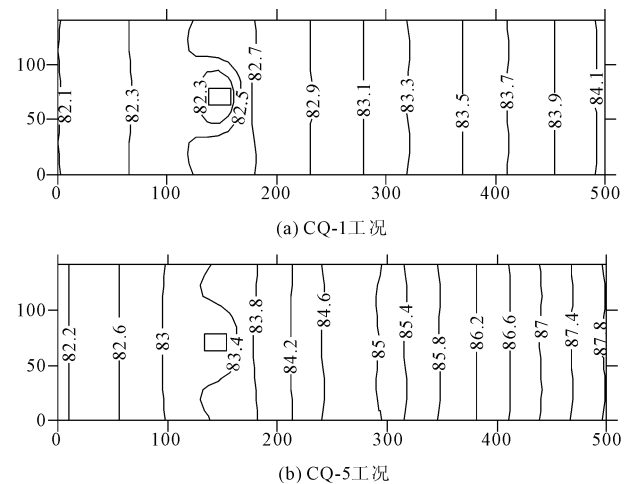


图 4 始发井开挖后场区地下水位等值线分布(单位:m)

图 5 为隧洞洞身开挖各施工阶段 $y = 70.89 \text{ m}$ 剖面水位等值线图。由图 5 可知,隧洞洞身开挖各个阶段对渗流场的影响较小;越接近地上沁河的岩土区域,水位等值线分布越密集;洞身所处区域内水位等值线分布较为稀疏,地下水位变化缓和。图 6

为检修井开挖后场区地下水位等值线图。由图6可知,检修井开挖后,对场区渗流场的影响规律与始发井开挖阶段相似,影响程度较其他阶段最为明显;检修井周边约40 000 m²面积内,地下水位等值线分布密集,呈漩涡状,水位向检修井方向逐渐下降。这是因为检修井大部分井身在浸润面之下,相较于主体位于浸润面之上的始发井和体积较小的隧洞洞身,检修井附近的浸润面下降更为明显。

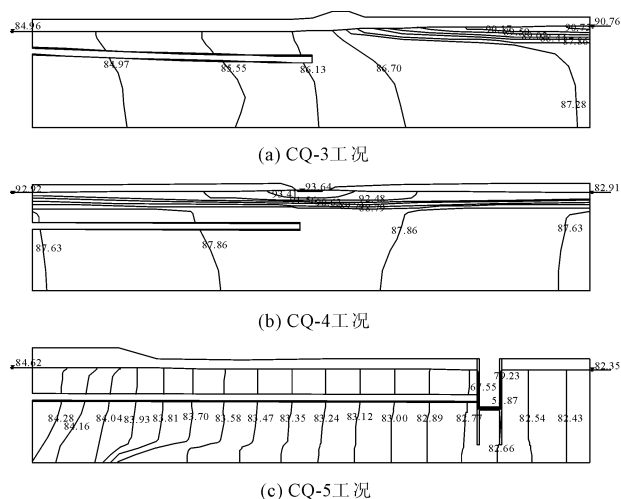


图5 隧洞洞身开挖阶段 $y = 70.89$ m 剖面水位等值线分布(单位:m)

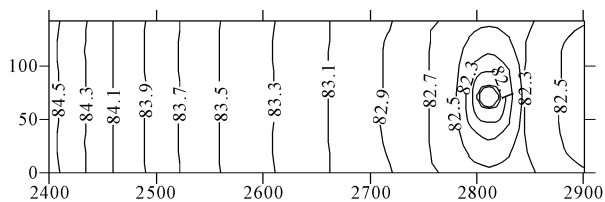


图6 检修井开挖后场区地下水位等值线分布(单位:m)

3.2 渗透坡降

渗透坡降是渗透变形破坏的决定因素之一,当土体实际渗透坡降大于允许最大渗透坡降时,土体会发生渗透变形或破坏。为进一步分析隧洞各施工阶段渗透稳定是否满足要求及典型施工阶段和沁河水位变化对周边岩土区域渗透稳定的影响,列出各工况典型剖面土层最大渗透坡降,见表3。由表3可知,各施工阶段最大渗透坡降均发生在 $y = 70.89$ m 剖面,结合最大渗透坡降发生位置土层,对比各土层允许渗透坡降值,沁河正常蓄水位下工况 CQ-1—CQ-5 最大渗透坡降均小于最大允许坡降,说明该水位下各施工阶段渗透稳定均满足要求。沁河水位上升至设计洪水位时,各施工阶段土体的最大渗透坡降明显增大,工况 CQ-8 和工况 CQ-9 的最大

渗透坡降超过发生位置土体的最大允许渗透坡降值,说明隧洞洞身开挖至 684 m 和 1 257 m 时,土体存在发生管涌、流土等渗透变形或破坏的可能。该阶段施工区域位于沁河下方,受沁河水位影响较为显著,地下水位变化明显,隧洞施工前的土体最大渗透坡降值较高,施工后,岩土结构变化,渗透坡降增大,从而导致岩土体渗透安全存在隐患。隧洞施工时应做好洞身及周边土体的防渗加固及安全监测,尽量避免在沁河水位较高时段进行穿堤施工。图7为各工况下典型剖面最大渗透坡降对比图。

表3 各工况土体最大渗透坡降和允许渗透坡降

工况	剖面			出现土层	最大允许渗透坡降
	$y = 70.89$ m	$y = 57.69$ m	$y = 141.78$ m		
CQ-1	0.006	0.004	0.003	中细沙	0.32
CQ-2	0.029	0.007	0.006	粉砂	0.30
CQ-3	0.199	0.194	0.184	重粉质壤土	0.55
CQ-4	0.492	0.480	0.428	重粉质壤土	0.55
CQ-5	0.080	0.010	0.006	重粉质壤土	0.55
CQ-6	0.016	0.014	0.013	中细沙	0.32
CQ-7	0.416	0.402	0.393	重粉质壤土	0.55
CQ-8	0.662	0.635	0.626	粉质黏土	0.45
CQ-9	0.582	0.561	0.540	重粉质壤土	0.55
CQ-10	0.424	0.416	0.409	重粉质壤土	0.55

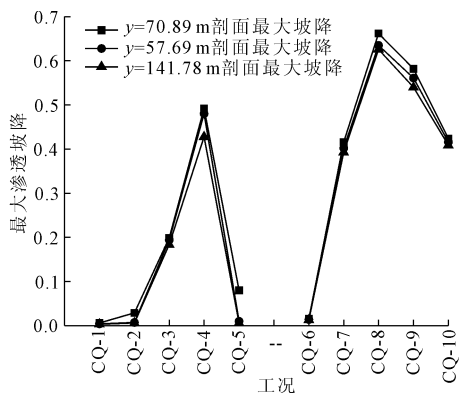


图7 各工况典型剖面最大渗透坡降对比

由图7可知各阶段隧洞施工后会增大区域内土体的最大渗透坡降,但总体增量很小,且不同施工阶段和沁河水位增量相近,说明隧洞施工增大周围土体最大渗透坡降的程度受施工阶段和沁河水位的影 响较小。各施工阶段最大渗透坡降大小分布整体呈现由穿沁阶段向两侧逐渐下降的趋势,其中沁河正常蓄水位下最大渗透坡降处于隧洞开挖至 1 257 m 阶段,而沁河水位上升至设计洪水位时则处于隧洞开挖至 684 m 阶段;各施工阶段土体最大渗透坡降

随沁河水位上升至设计水位的增量分别为 0.01、0.38、0.46、0.09 和 0.34；隧洞开挖至 684 m 阶段土体最大渗透坡降受沁河水位变换的影响最显著，因此该阶段洞身开挖时，应更加关注沁河水位的变化，做好对应区域水位的实时监测。

3.3 渗流量分析

选取 $y = 70.89$ m 剖面为流量计算断面，分析不同水位下隧洞各施工阶段的剖面单宽流量，结果见表 4。由表 4 可知，隧洞各施工阶段剖面单宽渗流量变化符合一般规律。沁河水位处于正常蓄水位时，最大剖面单宽流量为 $2.77 \text{ m}^3/\text{d}$ ，产生于隧洞开挖至终点阶段，检修井开挖阶段的单宽流量明显高于始发井开挖阶段，随着隧洞洞身施工的推进，流量逐渐增大，这是因为检修井主体结构开挖较深，越靠近终点的洞身段埋深越大，受地下水位影响，区域渗透流量越大。沁河水位上升至设计洪水位时，各施工阶段的剖面单宽流量均有较大的增长，最大增量发生于隧洞开挖至终点阶段，为 $10.33 \text{ m}^3/\text{d}$ ，增幅为 374.27%，但各施工阶段流量变化规律相似。

表 4 各工况 $y = 70.89$ m 剖面单宽流量

工况	单宽流量 $/(m^2 \cdot d^{-1})$	工况	单宽流量 $/(m^2 \cdot d^{-1})$
CQ-1	1.64	CQ-6	4.96
CQ-2	2.61	CQ-7	9.67
CQ-3	2.03	CQ-8	7.02
CQ-4	2.42	CQ-9	8.56
CQ-5	2.77	CQ-10	10.33

隧洞施工前、后各施工阶段剖面单宽流量对比如图 8 所示。

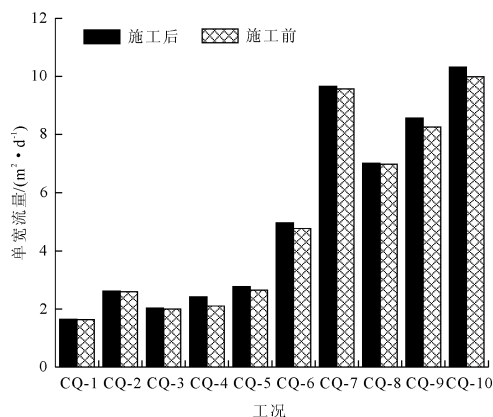


图 8 隧洞各施工阶段施工前后典型剖面单宽流量对比

由图 8 可知，各阶段施工后场区剖面单宽流量有所增大。正常蓄水位和设计洪水位下各施工阶段

最大增量分别为 $0.31 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $0.33 \text{ m}^3/\text{d}$ ，平均增量为 $0.10 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $0.19 \text{ m}^3/\text{d}$ 。隧洞开挖后，地下水更易向洞身等区域汇聚，但开挖的隧洞结构相较于场区岩土层体积较小，且施工过程实时安装衬砌片以增强洞身防渗。因此隧洞各施工阶段不会使场区渗流量显著增加，导致地下水位快速下降。

4 结 论

依托西霞院水利枢纽输水及灌区工程穿沁隧洞，开展了正常蓄水位和设计洪水位下始发井、检修井开挖及隧洞洞身开挖至 684 m、1 257 m 和终点等典型施工阶段的隧洞渗流场分析，主要结论如下：

(1) 各施工阶段场区渗流场位势分布合理，不同施工阶段对开挖区域渗流场分布规律的影响存在一定差异，沁河水位变化对施工后场区渗流场的影响较小。

(2) 正常蓄水位下隧洞各施工阶段渗透稳定均满足要求；设计洪水位下隧洞洞身开挖至 684 m 和 1 257 m 阶段的最大渗透坡降大于土体允许渗透坡降，存在渗透变形或破坏的风险，需提前做好渗控措施。

(3) 隧洞工程开挖后场区渗流量较小，不会导致周围地下水位的快速下降；沁河水位上升会显著增大渗流量，最大增幅为 374.27%，发生于隧洞开挖至终点阶段，沁河高水位施工时，应加强防渗措施和流量监控。

参考文献：

- [1] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 缺水流域用水竞争与协作关系——以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 897-907.
- [2] 袁榆梁, 应乃武, 张文虎, 等. 2018—2019 年引黄入冀补淀工程沉沙池运行效果分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 128-130.
- [3] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1203.
- [4] Golian M, Abolghasemi M, Hosseini A, et al. Restoring groundwater levels after tunneling: a numerical simulation approach to tunnel sealing decision-making[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(4): 1611-1628.
- [5] 侯云乾, 张泽, 朱宝强, 等. 富水岩质隧道开挖稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 19-24.
- [6] Ongör B T I, Shu L C. Groundwater overdraft vulnerability and environmental impact assessment in Arusha[J]. Environmental Geology, 2007, 51: 1171-1176.
- [7] 张杰, 李玮, 李立民, 等. 引汉济渭输水隧洞围岩

- 构造特征对工程地质的影响[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3):23-32.
- [8] 张凡, 韩爱果, 任光明, 等. 隧洞开挖渗流场变化对滑坡稳定性的影响数值模拟分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5):61-65.
- [9] 杜泽快, 胡长华. 滇中引水工程输水隧洞安全监测设计原则研究[J]. 人民长江, 2019, 50(10):157-161, 170.
- [10] 谢小帅, 陈华松, 肖欣宏, 等. 深埋引水隧洞不同排水方案渗流场及衬砌外水压力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1):64-68.
- [11] 朱彬彬, 董道军, 吴立, 等. 穿越富水断层深埋引水隧洞涌水量预测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11):2407-2417.
- [12] 张治国, 程志翔, 张孟喜, 等. 考虑衬砌渗透性的盾构下穿既有隧道纵向结构错台变形研究[J/OL]. 中国公路学报. 2021-11-05; 1-16. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20211105.1018.006.html>.
- [13] 伍国军, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 饱和岩体渗透性动态演化对引水隧洞稳定性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11):2172-2182.
- [14] 张巍, 陈云长, 黄立财, 等. 高压隧洞内外三维有限元分析与渗透稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5):212-217.
- [15] 李宗利, 裴向辉, 吕从聪, 等. 隧道透水性衬砌环渗透系数合理取值与工程措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):1167-1172.
- [16] 杨金孟, 赵兰浩, 沈振中, 等. 某抽水蓄能电站上水库防渗帷幕深度优选研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2):209-216.
- [17] Zhang W B, Shen Z Z, Chen G Y, et al. Optimization design and assessment of the effect of seepage control at reservoir sites under karst conditions a case study in Anhui Province, China[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(5):1831-1855.
- [18] Gan L, Chen G Y, Shen Z Z. A new approach to permeability inversion of fractured rock masses and its engineering application[J]. Water, 2020, 12(3):734.

(上接第97页)

- [18] 李浩平, 贾志营, 黄耀英, 等. 基于重要贡献度的中小型土石坝安全评价指标体系研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5):103-108.
- [19] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册[R]. 南京:水利部大坝安全管理中心, 2018.
- [20] 刘璇. 在役土石坝安全性态隶属度判诊分析研究[D]. 南昌:南昌大学, 2016.
- [21] Saaty T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, USA, 1980.
- [22] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9):51-60.
- [23] Jabbari M, Gholamnia R, Esmaili R, et al. Risk assessment of fire, explosion and release of toxic gas of siri-assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy analytical hierarchy process[J]. Heliyon, 2021, 7(8):e07835.
- [24] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J/OL]. 现代电力:1-7. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0372>.
- [25] Bhadra D, Dhar N R, Salam M Abdus. Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56(5):2618-2629.
- [26] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2741-2746.
- [27] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):143-148, 162.
- [28] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6):15-20.
- [29] 纪静怡, 方红远, 徐志欢. 基于组合赋权云模型的水资源管理综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2020(12):40-45, 56.
- [30] 黄显峰, 陈雪, 刘永强. 基于改进云模型的河道管护效果评价方法[J]. 水利经济, 2022, 40(1):65-70, 88.
- [31] 汪伦焰, 夏晴, 李慧敏, 等. 基于云模型的水环境治理PPP项目可持续性评价——以河南省许昌市水环境治理PPP项目为例[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(1):1-7.
- [32] 张光卫, 李德毅, 李鹏, 等. 基于云模型的协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2007, 18(10):2403-2411.
- [33] 张国栋, 李雷, 彭雪辉. 基于大坝安全鉴定和专家经验的病险程度评价技术[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9):158-166.
- [34] 李琪, 徐裕生, 张志杰. 黄金分割法在水处理实验中的应用[J]. 中国农村水利水电, 1999(12):12-13.