

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220612

深井降水条件下穿沁引水隧洞渗流分析

王长生¹, 赵 亮¹, 冯先伟², 马福恒³, 刘 玉², 甘 磊²

(1. 河南省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. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 深井降水会导致地下水位下降、降低土体强度和稳定性, 从而影响引水隧洞施工安全。为研究深井降水对施工期隧洞渗流场的影响, 以西霞院水利枢纽输水及灌区工程穿沁隧洞为依托, 建立了该隧洞三维渗流有限元计算模型, 考虑隧洞施工计划和沁河水位变化, 分析了深井降水和未降水情况下隧洞渗流特性。结果表明, 深井降水会对隧洞开挖产生影响, 使深井周围渗流场位势分布特征发生改变, 浸润面形成降落漏斗, 水位等值线在深井附近呈回水环状。深井降水相较于深井未降水时的最大渗透坡降、单宽渗透流量分别增加了18.6、3.3倍, 各工况下土层渗透稳定均满足要求。研究成果可为类似引调水工程的设计和施工提供参考依据。

关键词: 深井降水; 引水隧洞; 渗流场; 数值模拟; 渗透稳定; 渗透坡降; 渗流量

中图分类号: TV213. 4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0100-04

1 工程概况

穿沁引水隧洞属于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, 是全国节水供水重大水利工程之一。引水隧洞级别为1级, 隧洞由进口连接段、出口检修段和隧洞段三部分构成。进口连接段为长20 m、宽18 m、井深17 m的矩形盾构始发井, 出口检修段为直径21.8 m、井深约42.8 m的圆形盾构接收井, 进口连接段和出口检修段施工均采用明挖逆作法; 隧洞段采用泥水平衡盾构机施工, 全长2 850 m, 隧洞埋深38 m, 自西向东下穿农业田、滩涂、沁河左右堤坝、沁河及村庄民房等区域和构筑物, 引水隧洞开挖采用边开挖边衬砌方式, 每开挖一个管片长度就进行管片衬砌, 管片采用外径为A6 600 mm、内径为5 900 mm、长度为1.5 m的C50W12F200的钢筋混凝土管片错缝拼装。引水隧洞全程地下施工, 施工条件复杂。沁河左岸深井分布见图1。由图1可看出, 隧洞旁存在许多民用深井, 其中#6、#11、#17为农业取水深井, #19、#20、#22、#23、#26为居民用水深井, 考

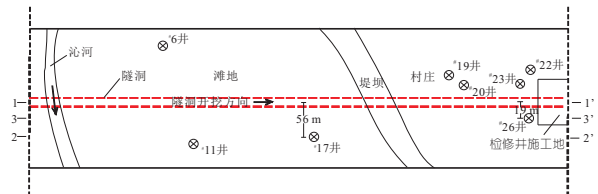


图1 沁河左岸深井分布图

Fig. 1 Distribution of deep wells on the left bank of Qinhe River

考虑到#17、#26深井分别为离滩地和村庄距离最近的隧洞, 选取#17、#26深井开展深井降水渗流分析。#17深井洞径500 mm, 井深50 m, 距离隧洞轴线约56 m; #26深井洞径300 mm, 井深50 m, 距离隧洞轴线约19 m。深井降水会导致地下水位下降, 降低土体的强度和稳定性, 影响引水隧洞施工期的安全。因此, 研究隧洞施工和深井降水条件下施工期引水隧洞的渗流安全具有重要的理论意义和工程价值。为此, 本文依托西霞院水利枢纽输水及灌区工程穿沁隧洞, 建立了该隧洞三维渗流有限元计算模型, 并考虑沁河典型水位条件, 对#17、#26深井降水条件下施工期引水隧洞进行渗流安全分析, 以为类似工程设计和施工提供理论依据。

收稿日期: 2022-03-30, **修回日期:** 2022-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179130, 51609073); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金资助项目(DFZX202003)

作者简介: 王长生(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程建设和管理, E-mail: wchshnl@126.com

通讯作者: 甘磊(1987-), 男, 博士、教授, 研究方向为水工结构稳定分析, E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn.

2 引水隧洞分析模型

2.1 计算模型

采用饱和—非饱和三维渗流计算程序 (CNPM, FOR) 对隧洞模型进行渗流计算^[1-3]。模型坐标系 x 轴为隧洞轴线方向,以始发段指向终点段方向为正; y 轴垂直于穿沁隧洞轴线方向,以朝南方向为正; z 轴为垂直方向,向上为正,与高程一致。坐标原点设置于模型的左下角。计算模型范围设定 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; z 方向以海平面高程 ($z=0$ m) 为起始至地面高程而终。

穿沁隧洞三维有限元计算模型采用空间八节点六面体单元,使用“控制断面超单元有限元网格自动剖分法”进行网格剖分,模型节点和单元总数分别为 41 445、40 450 个。穿沁隧洞部分计算模型及网格剖分示意图见图 2。

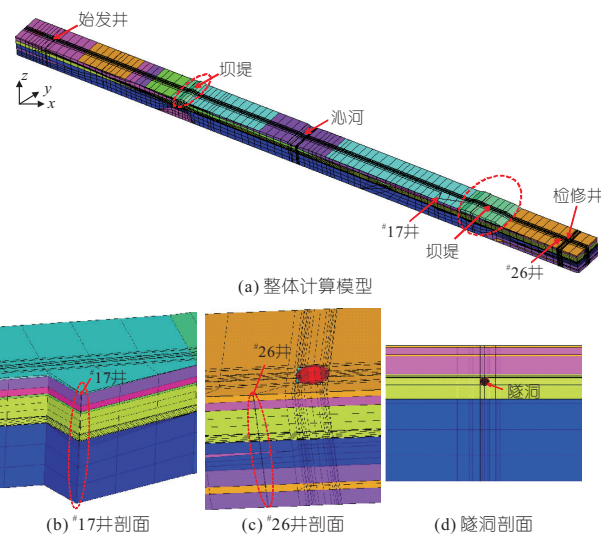


图 2 隧洞场区三维渗流计算模型示意图

Fig. 2 Three-dimensional seepage calculation model of tunnel site

2.2 计算参数与边界条件

根据隧洞结构及场区岩土层分布特点,结合地勘资料、现场试验和工程经验,将场区材料分为 10 个区域,各区材料渗透系数见表 1。

表 1 场区各材料渗透系数

Tab. 1 Permeability coefficient of each material in the field area

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

注:混凝土材料包括始发井、检修井混凝土结构和隧洞混凝土管片。

计算模型边界条件设置已知水头边界包括沁河水位淹没线以下河道和垂直于隧洞轴线左右两侧 ($x=0, 2\ 900$ m) 的地下水位淹没线以下部分;出渗边界包括地下水位淹没线以上的土体、地面、隧洞开挖面和深井井壁等与大气接触部分边界;不透水边界包括模型四周边界及模型底面截取边界。

2.3 计算工况

考虑隧洞开挖和深井降水对隧洞周围土体的渗流影响,选取隧洞开挖至与深井同一垂直平面时刻,分别进行深井未降水和降水条件下的隧洞渗流场分析,同时结合沁河水位条件,共设置 4 个工况,具体见表 2。

表 2 隧洞场区渗流分析计算工况

Tab. 2 Working conditions of seepage analysis and calculation in tunnel field area

工况编号	工况说明	水位情况	工况编号	工况说明	水位情况
CQ-1	隧洞开挖	地上河水位 96.64 m 至 [#] 17井 右侧地下水 82.08 m	CQ-2	隧洞开挖	地上河水位 101.68 m 至 [#] 26井 右侧地下水 82.08 m
CQ-3	[#] 17井降水	左侧地下水 82.35 m	CQ-4	[#] 26井降水	左侧地下水 82.35 m

3 结果分析

3.1 位势分布

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,故开展隧洞施工和深井降水渗流分析,截取以[#]17、[#]26井为中心,左、右各延伸 250.00 m 的局部模型,选取三个典型剖面,分析隧洞施工和深井降水对局部模型渗流场的影响,典型剖面位置见图 1,剖面 1-1' 为隧道中轴线 ($y=70.89$ m),剖面 2-2' 取平行于隧道轴线横穿[#]17 深井剖面 ($y=25.00$ m),剖面 3-3' 为垂直于隧道轴线横穿[#]26 深井剖面 ($y=51.39$ m)。

图 3、4 为隧洞开挖至[#]17、[#]26 井时典型剖面水头等值线分布图。由图 3、4 可知,两种工况下各典型剖面土体浸润面均较为平缓,由于隧洞开挖采用边开挖边衬砌的方式,隧洞内部有一层混凝土管片进行阻渗,有效阻止地下水向隧洞内渗入,计算模型整体渗流场变化较小。

图 5(a)、(b) 为[#]17 井降水时典型剖面水头等值线分布图。由图 5(a)、(b) 可知,深井降水对隧洞周围渗流场产生了一定影响,1-1' 剖面处土体浸润面在[#]17 井附近有所下降,形成降落漏斗,水位等值线在深井附近呈回水环状。图 5(c) 为[#]17 井降水时地下水位等值线分布。由图 5(c) 可知,深井降水时周边约 17 200 m² 面积的

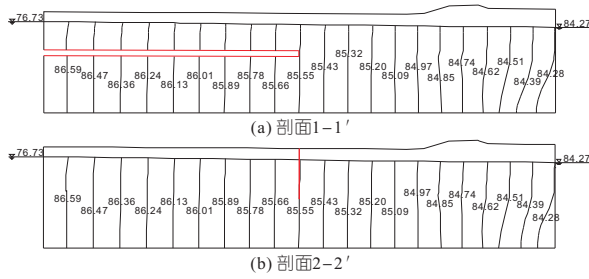


图 3 CQ-1 工况典型剖面水头等值线分布(单位:m)

Fig.3 Contour distribution of hydraulic head in typical section of CQ-1 working condition

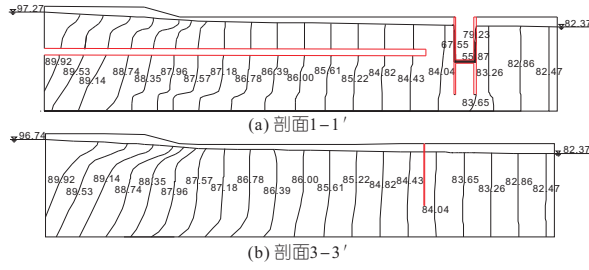


图 4 CQ-2 工况典型剖面水头等值线分布(单位:m)

Fig.4 Contour distribution of hydraulic head in typical section of CQ-2 working condition

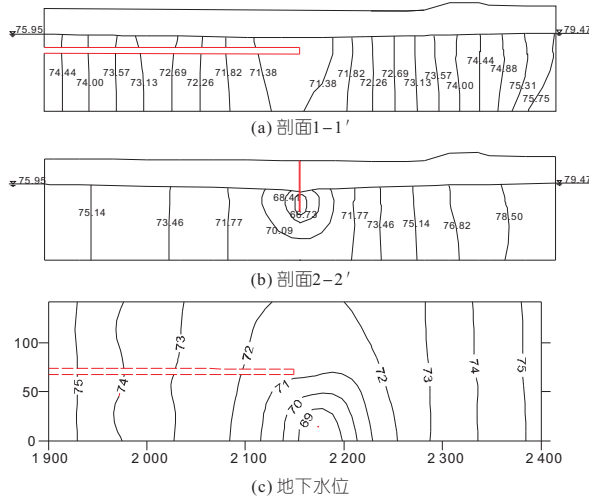


图 5 CQ-3 工况典型剖面水头、地下水位等值线分布(单位:m)

Fig.5 Contour distribution of hydraulic head in typical section and ground water level of CQ-3 working condition

区域内,渗流场位势分布特征发生改变,等值线环绕#17井逐渐下降。

图 6 为#26井降水时典型剖面水头等值线和地下水位等值线分布。由图 6 可知,浸润面在#26井周围形成降落漏斗,水位等值线在深井附近呈回水环状;同时深井降水对隧洞周围渗流场产生影响, #26井周边约 13 000 m² 范围内圆形区域内,渗流场位势分布特征发生改变,等值线环绕#26井逐渐下降。

3.2 渗透坡降

各工况典型剖面最大渗透坡降见表 3。由表

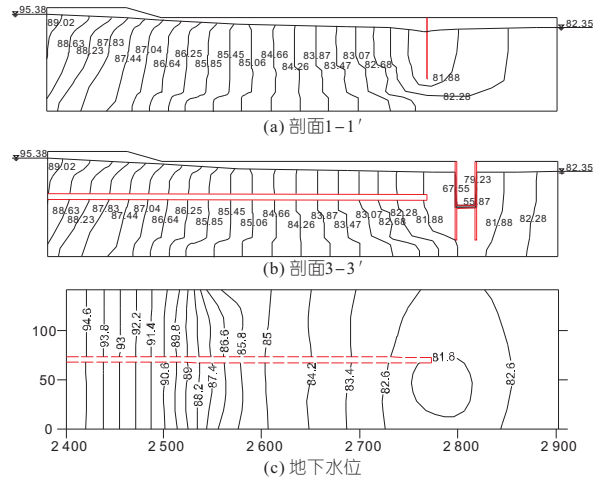


图 6 CQ-4 工况典型剖面水头、地下水位等值线分布(单位:m)

Fig.6 Contour distribution of hydraulic head in typical section and groundwater level of CQ-4 working condition

表 3 各工况土体最大渗透坡降和允许渗透坡降

Tab.3 Maximum and allowable seepage gradient of each soil mass under each condition

工况	剖面	最大渗透坡降	出现土层	土层允许渗透坡降
CQ-1	1-1'	0.016	中细砂	0.45
	2-2'	0.014	中细砂	0.45
CQ-2	1-1'	0.024	中细砂	0.45
	3-3'	0.021	中细砂	0.45
CQ-3	1-1'	0.031	中细砂	0.45
	2-2'	0.275	中细砂	0.45
CQ-4	1-1'	0.035	中细砂	0.45
	3-3'	0.202	中细砂	0.45

3 可知,深井降水时各断面土层最大渗透坡降均大于深井未降水时的最大渗透坡降, #17井降水时 1-1'、2-2'剖面最大渗透坡降值分别为 0.031、0.275; #26井降水时 1-1'、3-3'剖面最大渗透坡降值分别为 0.035、0.202。各工况最大渗透坡降均出现在中细砂层,其允许渗透坡降为 0.45。

深井降水对隧洞开挖时最大渗透坡降的影响显著,相较于未降水工况, #17井降水时 1-1'、2-2'剖面的最大渗透坡降增加了 0.94、18.6 倍, #26井降水时 1-1'、3-3'剖面的最大渗透坡降增加了 0.46、8.62 倍。可见 #17井降水对隧洞开挖时最大渗透坡降的影响大于 #26井降水。

3.3 渗流量

各工况土体单宽流量见表 4。由表 4 可知,深井降水时各断面的单宽流量均大于深井未降水时, #17井降水时 1-1'、2-2'剖面单宽流量分别为 8.430、16.227 m³/(d·m); #26井降水时 1-1'、3-3'剖面单宽流量分别为 15.037、18.329 m³/(d·m)。

表 4 各工况土体单宽流量

Tab. 4 Maximum and allowable seepage gradient of each soil mass under each condition

工况	剖面	单宽流量	工况	剖面	单宽流量
		/(m ³ /d/m)			/(m ³ /d/m)
CQ-1	1-1'	4.351	CQ-3	1-1'	8.430
	2-2'	3.807		2-2'	16.227
CQ-2	1-1'	10.311	CQ-4	1-1'	15.037
	3-3'	9.022		3-3'	18.329

深井降水对隧洞开挖时的单宽流量影响显著,相较于未降水工况,^{#17}井降水时通过 1-1'、2-2'剖面的单宽流量增加了 0.90、3.26 倍,^{#26}井降水时 1-1'、3-3'剖面单宽流量增加了 0.45、1.03 倍。可见^{#17}井降水对隧洞开挖时单宽流量的影响大于^{#26}井降水。

4 结论

a. 各工况下渗流场位势分布合理,由于隧洞采用边开挖边衬砌的方式,隧洞施工对模型的整体渗流场影响较小。^{#16}、^{#27}井降水会使周边分别约 17 200、13 000 m² 范围内的区域内渗流场位势分布特征发生改变,浸润面形成降落漏斗,水位等值线在深井附近呈回水环状。

b. 各工况下渗透稳定均满足要求,深井降水时各断面的最大渗透坡降和单宽流量均大于深井未降水时,最大分别增加了 18.6、3.3 倍,说明深井降水对土层最大渗透坡降和单宽渗透流量影响显著。

c. 深井降水会对隧洞开挖产生一定的影响,但整体影响较小,^{#17}井降水对隧洞开挖的渗流影响大于^{#26}井降水,各降水工况下土层渗流安全能满足规范要求。

参考文献:

- [1] 沈振中,江沅,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1091-1095.
- [2] 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.
- [3] 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.

Seepage Analysis of Chuangqi Diversion Tunnel Under Condition of Deep Well Dewatering

WANG Chang-sheng¹, ZHAO Liang¹, FENG Xian-wei², MA Fu-heng³, LIU Yu², GAN Lei²

(1. Water Conservancy and Irrigation District Engineering Construction Administration of Xixiyuan

Water Conservancy Project, Zhengzhou 450000, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower

Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research

Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Dewatering in deep well would lead to the decline of groundwater level and reduce the strength and stability of the soil, which affects the construction safety of the diversion tunnel. In order to study the influence of deep well dewatering on the seepage field of the tunnel during the construction period, a three-dimensional seepage finite element model of Chuangqi tunnel of Xixiyuan water control project and irrigation area project was established. The construction plan of the tunnel and the change of Qinhe water level were considered to analyze the seepage characteristics of the tunnel under the conditions of deep well dewatering and without dewatering. The results show that the dewatering of the deep wells affects the tunnel excavation, changes the potential distribution characteristics of the seepage field around the deep well, forms a falling funnel on the infiltration surface. The water level contour is in a backwater ring near the deep wells. Compared with the deep well without dewatering, the maximum seepage gradient and unit width seepage flow of deep well dewatering are increased by 18.6 times and 3.3 times, respectively, and the seepage stability of soil layer under all working conditions meets the requirements. The research results can provide a basis for the design and construction of similar water diversion projects.

Key words: deep well dewatering; diversion tunnel; seepage field; numerical simulation; seepage stability; seepage slope; seepage flow