

地铁建设对岩溶水渗流场影响的修复效果模拟

宿庆伟^{1,2}, 邢立亭³, 官亮^{1,2}, 毛玉洁³, 王立艳⁴, 董亚楠⁵, 于苗³, 赵振华¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 山东 济南 250014; 2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014; 3. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022; 4. 山东正元
治达环境科技有限公司, 山东 济南 250014; 5. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 地铁工程因穿越岩溶含水层, 易引起地下水渗流场发生变化, 从而诱发工程及地质问题, 为保护地下水环境, 迫切需要一种简易且安全的疏导方案。为探讨地铁建设对地下水渗流场的影响, 在总结研究区岩性结构及其水文地质特征的基础上, 采用数值模拟方法模拟地铁车站建设前后及增加导流措施后地下水渗流场的变化, 分析不同地质条件下地铁建设对地下水渗流场的影响并验证导流措施的修复能力。结果表明: 研究区地铁车站地下水渗流结构可划分为土层夹卵砾石-岩溶岩孔隙-裂隙渗流双层结构(车站A)、土层夹卵砾石-灰岩孔隙-岩溶渗流结构(车站B)、土层夹碎石厚层单层孔隙渗流结构(车站C)3大类, 地铁基坑建设对周边原有渗流场水动力条件的影响程度与地层结构密切相关。地铁车站的建设导致迎水面水位上升, 背水面水位下降, 车站A、车站B和车站C迎水面水位最大壅高分别为0.40、0.32和0.62 m; 对地下水渗流场的影响范围与地质条件、车站数量以及车站建设方向与水流方向的夹角密切相关, 总体上迎水面影响范围大于背水面。导流措施能最大程度恢复地下水渗流场, 各车站地下水回落后的水位与天然水位的欧式贴近度均大于0.98。但导流措施布设的数量与位置同时受水流夹角、地质结构、水动力条件等多重因素影响, 需结合实际情况设置。该研究成果可为地铁工程建设与地下水环境保护提供依据。

关键词: 岩溶水渗流场; 渗流场修复; 导流措施; 数值模拟; 地铁建设

中图分类号: U231; P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0199-08

Simulation of remediation effect of karst water seepage field influenced by subway construction

SU Qingwei^{1,2}, XING Liting³, GONG Liang^{1,2}, MAO Yujie³, WANG Liyan⁴,
DONG Yanan⁵, YU Miao³, ZHAO Zhenhua¹

(1. 801 Hydrogeological and Geo-engineering Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan 250014, China; 3. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 4. Shandong Zhengyuan Yeda Environmental Technology Co., Ltd., Jinan 250014, China; 5. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: When the subway construction runs through a karst aquifer, it always causes the change of groundwater seepage field, resulting in engineering and geological problems. In order to protect the groundwater environment, a simple and safe diversion scheme is urgently needed. Based on the summary of the lithological structure and hydrogeological characteristics of the area studied, a numerical simulation method is used to simulate the change of groundwater seepage field before and after the construction of the subway stations, as well as after the implementation of diversion measures, so as to investigate the influence of subway construction on groundwater seepage field under different hydrogeological conditions and

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772257、42272288); 山东省交通运输科技计划项目(2021B06); 泉城产业领军人才支持计划项目(济政字[2020]90号); 山东省地矿局山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心开放基金项目(801KY202003)

作者简介: 宿庆伟(1986-), 男, 山东安丘人, 工程师, 主要从事水文地质工作。

通讯作者: 邢立亭(1966-), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 主要从事水文地质教学与研究工作。

to testify the remediation effect of diversion measures. The results show that the subway station structure can be divided into three categories, namely, the double-layer seepage structure with gravel – magmatic rock pores – fissures in the soil layer (station A), the seepage structure with gravel – limestone pores – karst in the soil layer (station B) and the single-layer pore seepage structure with thick gravel in the soil layer (station C). The influence of subway foundation pit construction on the hydrodynamic conditions of the surrounding original seepage field is closely related to stratum structure. The construction of the subway station leads to the rising of the water level on the upstream face and the falling of the water level on the downstream face, the maximum backwater height of the upstream face of station A, station B and station C is 0.40, 0.32 and 0.62 m, respectively. The influence range of groundwater flow field is closely related to geological conditions, the number of stations and the angle between the directions of station construction and water flow. Generally speaking, the influence range of the upstream face is larger than that of the downstream face. Diversion measures can restore the groundwater seepage field to the greatest extent, and the Euclidean closeness between the fallen-back water level and the natural water level at each station is greater than 0.98. However, the number and location of diversion measures are affected by multiple factors such as water flow angle, geological structure, hydrodynamic conditions and so on, which should be considered according to the actual situation. The research results can provide a scientific reference for the harmonious coexistence of subway engineering construction and groundwater environmental protection.

Key words: karst water seepage field; flow field restoration; diversion measure; numerical simulation; subway construction

1 研究背景

随着经济发展和城市化进程的加快,岩溶区的地下空间建设屡见不鲜^[1-5]。建造在含水层中的地铁车站、地铁隧道等大型地下构筑物似一道不透水屏障,改变了原有地下水渗流场,也衍生出如岩溶塌陷^[6]、突水^[7]、壅水^[8]以及地面沉降^[9]等一系列环境地质问题。对于伸入潜水面以下的地铁车站,建设期常常需要长时间、大面积的基坑降水^[10-11]才能保证施工正常进行,这样虽在一定范围内降低了地下水的水位,但却改变了地下水的局部径流方向,易形成降落漏斗。目前主要应用暗挖法^[12]、地下连续墙工法^[13]、人工冻结法^[14]原位修复及动态风险管理^[15]等施工方法减缓地铁建设引发的水文地质问题,但壅水问题一直未能得到有效解决。

关于地下工程对水环境的影响程度已有大量的研究成果,并且地铁建设会引起地下水水位和流场变化这一结论已成为共识^[16-17]。Pujades 等^[18]提出了地下工程对含水层阻挡作用的半经验分析法; Esther 等^[19]通过对比模拟韩国汉城地铁建设前后的地下水状况,发现地铁建设会造成地下水净基流量的减少;熊志涛等^[20]、薛雷等^[21]通过数值模拟分析了地铁修建前后周边流场的变化,发现离地铁越远则地下水渗流状态受影响越小。目前研究主要集

中在地铁建设对地下水水位的影响,并没有定量分析其影响范围。

我国北方地区岩溶分布广泛,地铁建设区地质情况更为复杂,由于地铁建设方向与地下水流向相交或正交,减小了地下水的过水断面^[22],从而阻断了地下水径流,造成迎水面水位上涨,背水面水位下降^[21],给工程安全带来威胁。前人为降低地铁建设对地下水状态的影响,提出地铁建设适宜区^[23]以及在施工降水的同时进行人工回灌补源^[24]措施,但在施工以及运营期间依然会发生雍水及地面沉降等地质灾害,尤其是地下车站围护结构阻挡地下水径流,抗浮水位的变化会给工程建设造成巨大灾难。为确保地铁施工期和运营期的安全,亟需降低地铁建设对地下水渗流场的影响,在保证工程建设的同时不影响泉水持续喷涌和后期地铁安全运行。

本文依据现有钻孔数据、地质剖面资料以及地下水水位动态观测数据,针对地铁建设破坏地下水渗流场问题提出导流修复措施,以研究区典型地铁车站(车站 A、车站 B、车站 C)为例采用数值模拟方法研究在复杂地质条件下地铁建设对地下水渗流场的影响范围以及导流措施的渗流场修复效果,为岩溶大泉保护和富水岩溶区地下水渗流场修复提供理论支撑。

2 研究区概况

研究区地处内陆中纬度地带,属暖温带大陆性气候,多年平均降水量为 646.55 mm。北部岩浆岩分布广泛并发育有较多小型褶曲和断裂;南部以太古界泰山群岩为基底广泛出露,上覆古生界地层,断裂较发育且存在少量褶曲及岩浆活动,倾角平缓。南部山区碳酸盐岩广泛分布,由于长期的溶蚀、冲蚀

形成大量裂隙、溶孔和溶洞,从而组成储存和运移地下水的径流通道,为泉水的补给与排泄提供了路径^[25]。研究区水文地质平面及地质剖面图见图1。

规划线路水文地质条件复杂(图1(a)),地铁施工主要采用明挖和盾构的方式。其中,地铁车站、换乘站采用明挖施工方式,需要进行基坑施工降水,隧道施工以盾构施工方式为主,部分车站及区间位于地下水位以下(图1(b))。

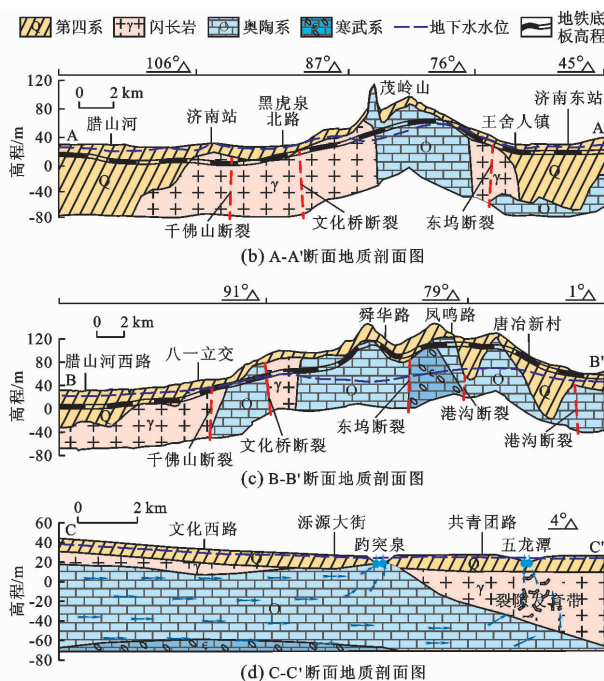
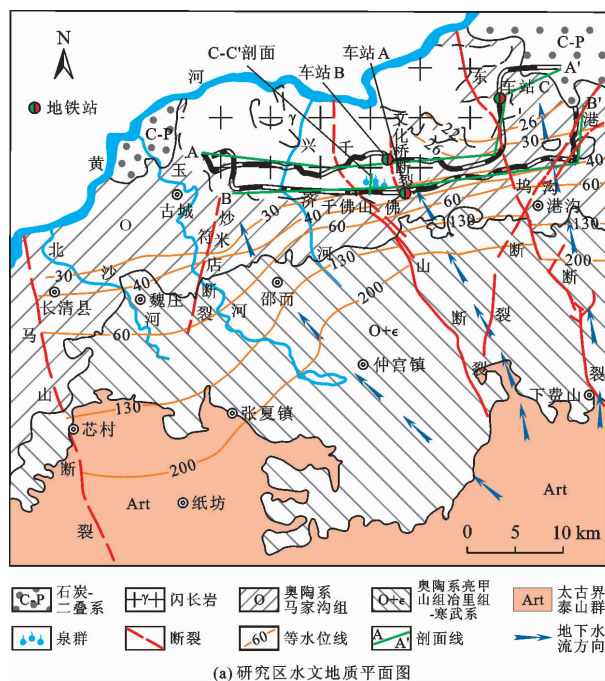


图1 研究区水文地质平面及地质剖面图

3 导流结构设计

3.1 导流设计的必要性

地铁建设与地下水环境保护是相互制约的,如何在地铁建设的基础上兼顾地下水环境保护是目前面临的重大难题。工程建设过程中可能破坏原有的地质结构、水动力条件等,特别是在复杂岩溶地区可能会对泉水出流造成一定影响,而且浅部地下水的径流、排泄或富集对于工程建设以及工程运营中的安全性也会产生一定的威胁。

若地铁建设底板位于岩溶水历史最高水位以上,对岩溶水径流基本无影响。但地铁修建层伸入潜水位以下,第四系孔隙水或上层滞水为主的浅层水对轨道交通建设和后期运营影响较大,可能导致地下水渗流环境的改变以及抗浮等工程问题。在河道渗漏、大气降水等特殊情况下,浅层水的径流和排泄会影响轨道交通的建设和后期运营,易出现壅水现象。若地铁建设底板位于岩溶水位以下,将会阻

挡岩溶水径流,减小岩溶水过水断面面积,有可能诱发水动力条件的变化及水化学场的改变,不利于地下水环境保护,且造成的迎水面水位升高会导致地基土的物理力学性能随含水量的增加而降低,威胁工程安全。所以对地铁工程阻挡的地下水进行排导,是避免地下水对轨道交通线路造成影响,同时减少地铁建设对地下水径流影响的重要措施,具有重要的工程意义。

3.2 导流结构的设计

在岩溶区开展地铁建设会挤占原有岩溶水径流通道,阻隔地下水径流途径,由此产生的壅水问题会严重威胁工程安全。为兼顾工程建设与环境保护,提出U型导流结构措施,其结构如图2所示。在地下建筑物结构底板下方铺设导流管道疏导壅水,减小基坑上游来水压力,修复遭地铁建设破坏的地下水渗流场。U型导流修复结构包括地铁车站基坑侧方的纵向导流管道和基坑上下游间的横向导流管道。横向导流管道的两端分别与纵向导流管道相连

通,导流管道内部填充砂砾层,通过增大导流结构内部填充物的渗透系数使基坑迎水面的壅水顺利进入下游,完成壅水疏导。在下游设置抽水装置,避免上游壅水过高引起的工程安全问题,同时有效解决了导流管道的淤堵问题。

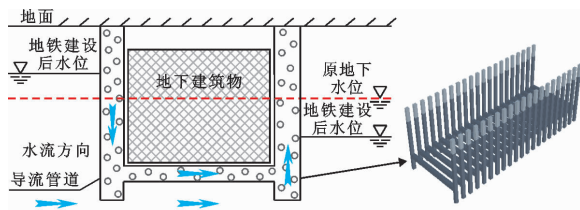


图2 地下建筑物迎水面壅水 U 型导流结构示意图

4 导流措施应用模拟

4.1 复杂地质条件下地铁建设对周边流场的影响

4.1.1 地铁建设地质基础分类 收集研究区内水文地质资料,根据钻孔地层结构分析,以地铁一般埋置深度 18 m 为标准^[26],研究区内地铁穿越的地层岩性主要有第四系土层、岩浆岩以及奥陶系灰岩。研究区地质结构和水文地质条件复杂,第四系在东坞断裂以东区域以及兴济河向西厚度较大,一般在 50 m 左右;在兴济河以东至东坞断裂以西厚度较小,一般为 0~10 m。在兴济河到东坞断裂之间,千佛山断裂和文化桥断裂将其分割为 3 个近东西向排列的断块,岩浆岩在兴济河与千佛山断裂之间地区厚度较大,千佛山断裂和文化桥断裂之间大部分区域岩浆岩厚度较薄,下伏奥陶系灰岩;文化桥断裂以东到浆水泉路大部分岩浆岩厚度在 50~100 m 之间,但浆水泉路到东坞断裂之间第四系较薄,下伏奥陶系灰岩。按地质条件的不同将地铁建设区地质基础分为土层夹碎石厚层单层孔隙渗流结构、土层夹卵石-岩浆岩孔隙-裂隙渗流双层结构、土层夹卵石-灰岩孔隙-岩溶渗流结构 3 大类,如图 3 所示。文化桥断裂以西的趵突泉泉域北部及白泉泉域内王舍人镇以北地区的地下水水位埋深小于 18 m(图 1(b)、1(c)),尤其是千佛山断裂与文化桥断裂之间,距泉群直线距离仅有 1.5 km,且处于四大泉群补给径流区末端,是地铁建设对地下水径流强烈影响区,需要设计导流措施保护地下水渗流场。而在整个研究区南部一带地下水水位埋深普遍大于 30 m(图 1(a)),18 m 的轨道交通线深度远远小于地下水水位埋深,将不会阻挡地下水径流,可考虑不采取导流措施。选择车站 A、车站 B、车站 C 为代表探讨不同地质条件下地铁修建对渗流场的影响,其

地层结构及相关参数见表 1。

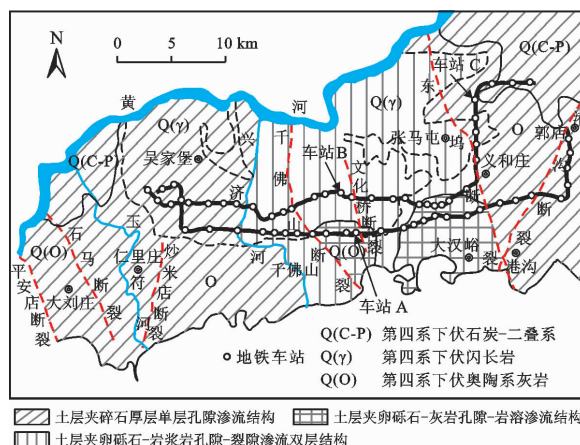


图3 研究区地铁建设地质基础分区图

4.1.2 不同地质条件下地铁建设对周边影响 研究区地下水运动符合达西定律的运动规律,其渗流场控制方程为:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ε 为孔隙度; $\mathbf{u}$ 为达西速度(矢量); k 为渗透率, m^2 ; μ 为流体的动力黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为流体的压力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为高程, m , 表示 y 方向垂直坐标。

在地铁建设径流阻挡区,以地铁建设前天然地下水水流场为初始流场进行模型计算,拟合同时期的流场,识别水文地质参数和边界值,模拟地铁修建后的地下水渗流场特征。车站 A 地铁修建前后地下水水流场模拟结果见图 4。由图 4 可见,地铁修建后,地铁隧道的阻滞作用导致迎水面的水位上升产生雍高,背水面的水位下降,但地下水流向总体上从东南向西北运动。

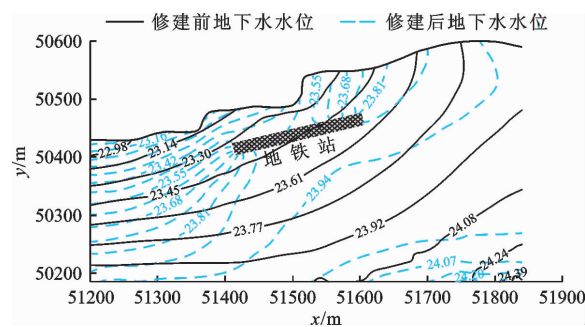


图4 车站 A 修建前后周边流场分布(单位:m)

通过对比基坑修建前后相同位置的水位变化,分析地铁建设对渗流场的影响,将水位变化值的绝对值大于 0.05 m 视为对地下水渗流场有影响,得到 3 个典型地铁车站建设对渗流场的影响范围,如图 5 所示。

车站 A 为土层夹卵砾石 - 岩浆岩孔隙 - 裂隙渗流双层地质结构,车站建设方向与水流夹角约为 90° ,影响半径在迎水面为 200 m(图 5(a));车站 B 为土层夹卵砾石 - 灰岩孔隙 - 岩溶渗流地质结构,车站建设方向与水流夹角约为 135° ,影响半径在迎水面为 150 m,背水面为 50 m(图 5(b));车站 C 是换乘车站,为土层夹碎石厚层单层孔隙渗流地质结构,南北走向和东西走向车站建设方向与水流夹角分别约为 45° 和 135° ,东西走向车站影响半径在迎

水面为 600 m,背水面为 200 m,南北走向车站影响半径在迎水面为 180 m,背水面为 80 m(图 5(c))。车站影响范围受地质条件、车站数量以及车站与水流方向夹角的共同影响,如车站 C 南北走向与水流方向的夹角较小,与东西走向车站相比,阻挡的过水断面面积减小,因而影响范围减小;车站 C 由于多个车站产生地下水径流受阻的叠加效应,渗流场影响半径进一步加大。车站 A、车站 B、车站 C 迎水面水位最大壅高依次为 0.40、0.32、0.62 m(图 5)。

表 1 研究区典型地铁车站的地层结构及相关参数

地铁车站	地质基础结构	地层岩性	层底高程/m	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	孔隙率/%
车站 A	土层夹卵砾石 - 岩浆岩孔隙 - 裂隙渗流双层地质结构	杂填土	24.37 ~ 27.54	0.1 ~ 0.2	0.35
		粉质黏土	17.57 ~ 23.92	0.03 ~ 0.1	0.20 ~ 0.32
		碎石	14.36 ~ 24.15	0.06 ~ 6	0.35
		胶结砾岩	12.81 ~ 17.24	0.03 ~ 3	0.34
		含碎石粉质黏土	13.14 ~ 19.13	0.001 ~ 0.1	0.30
		闪长岩	-2.89 ~ 16.19	0.001 ~ 0.5	0.20 ~ 0.32
车站 B	土层夹卵砾石 - 灰岩孔隙 - 岩溶渗流地质结构	杂填土	75.49 ~ 81.17	0.5 ~ 2.0	0.30
		粉质黏土	72.12 ~ 79.03	0.1 ~ 0.3	0.30
		碎石	69.83 ~ 76.92	3 ~ 10	0.25 ~ 0.30
		灰岩	15.00	1.5 ~ 14.5	0.25 ~ 0.40
车站 C	土层夹碎石厚层单层孔隙渗流地质结构	杂填土	24.21 ~ 29.14	0.001 ~ 0.5	0.25 ~ 0.35
		粉质黏土	14.92 ~ 26.34	0.002 ~ 0.5	0.25 ~ 0.28
		卵石	10.14 ~ 16.22	0.01 ~ 8	0.32
		圆砾	11.31 ~ 16.82	0.015 ~ 1.5	0.36
		粉质黏土	-0.34 ~ 19.74	0.001 ~ 0.5	0.25 ~ 0.26
		碎石	-12.28 ~ 3.13	2 ~ 60	0.30
		胶结砾岩	-15.49 ~ 3.09	0.002 ~ 4	0.34
		含碎石粉质黏土	-16.74 ~ 3.58	0.1 ~ 0.9	0.25

以车站 A 为例,地下水流由东南向西北运动。地铁修建后,地铁车站阻隔了地下水径流,靠近基坑位置渗流场较地铁修建前的原始状态已发生变化。由于车站方向与地下水径流方向近乎正交,因而严重阻碍了地下水径流,使车站南侧地下水水位上涨,北侧地下水水位下降,破坏了原来的地下水径流。由于迎水面地下水水位上涨,导致地基土含水量增加而物理力学性能降低,给地铁带来安全问题;随着地铁迎水侧水位与地铁底板以下水位之间水位差的增大,底板承受的浮力水头会越来越高,当浮托力超过结构抗浮力时,易造成底板起拱开裂渗水甚至梁柱断裂的上浮事故^[27]。

4.2 导流措施对地铁周边流场的修复

为使基坑迎水面壅水及时消散,在基坑上下游方向设置导流管道,并对导流措施的导流效果进行模拟。为进一步探究导流措施的修复效果,引入欧式贴近度^[28]来衡量增加导流措施后基坑周边地下水水位与天然水位的贴近程度,欧式贴近度越大,则基坑周边地下水水位越接近于天然状态。对于两个序列 $X = \{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$, $Y = \{y_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$,欧式贴近度计算公式为:

$$N(X,Y) = 1 - \frac{1}{\sqrt{N}}(\sum_{i=1}^n (X(x_i) - Y(y_i))^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

利用数值模型对不同的导流管道布置方式进行

反复模拟验证,最终确定在车站 A 设置 13 根、车站 B 设置 23 根导流管道,车站 C 南北走向基坑设置 14 根、东西走向基坑设置 16 根导流管道,具体布设方案见表2。加入导流措施后,计算得出迎水面边界水位与天然水位的欧式贴进度分别为 0.995 6、0.981 0、0.996 4,均大于 0.98,表明地下水壅高现象基本消失,迎水面边界地下水水位基本恢复到天然水位。3 个地铁车站在基坑建设后迎水面的水位

壅高以及加入导流措施前后迎水面边界水位变化如图 6 所示。由图 6 也可看出,3 个车站加入导流措施后,迎水面边界水位和地下水渗流场均基本恢复到地铁修建前的天然状态。

3 个典型地铁车站的地质结构、水动力条件以及与水流方向的夹角等均不相同,因而导流管道布设的数量、位置也不同(表 2),导流方案的实施需结合实际情况而确定。

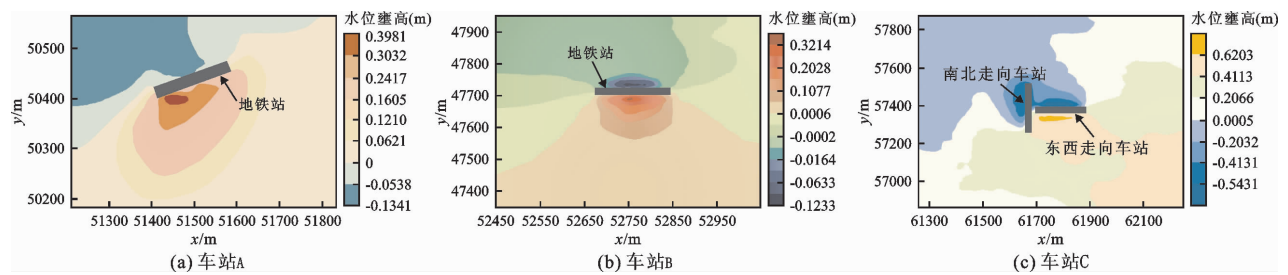


图 5 3 个典型地铁车站建设对地下水渗流场的影响范围

表 2 3 个典型地铁车站的导流管道布设方案

地铁车站	长度/m	宽度/m	导流管道 数量	导流管道 布设深度/m	导流管道 宽度/m	导流管道 厚度/m
车站 A	195	21.1	13	12.2		
车站 B	314	22.2	23	13.2		
车站 C 南北走向	193	23.1	14	14.2	4.5	1
车站 C 东西走向	249	23.1	16			

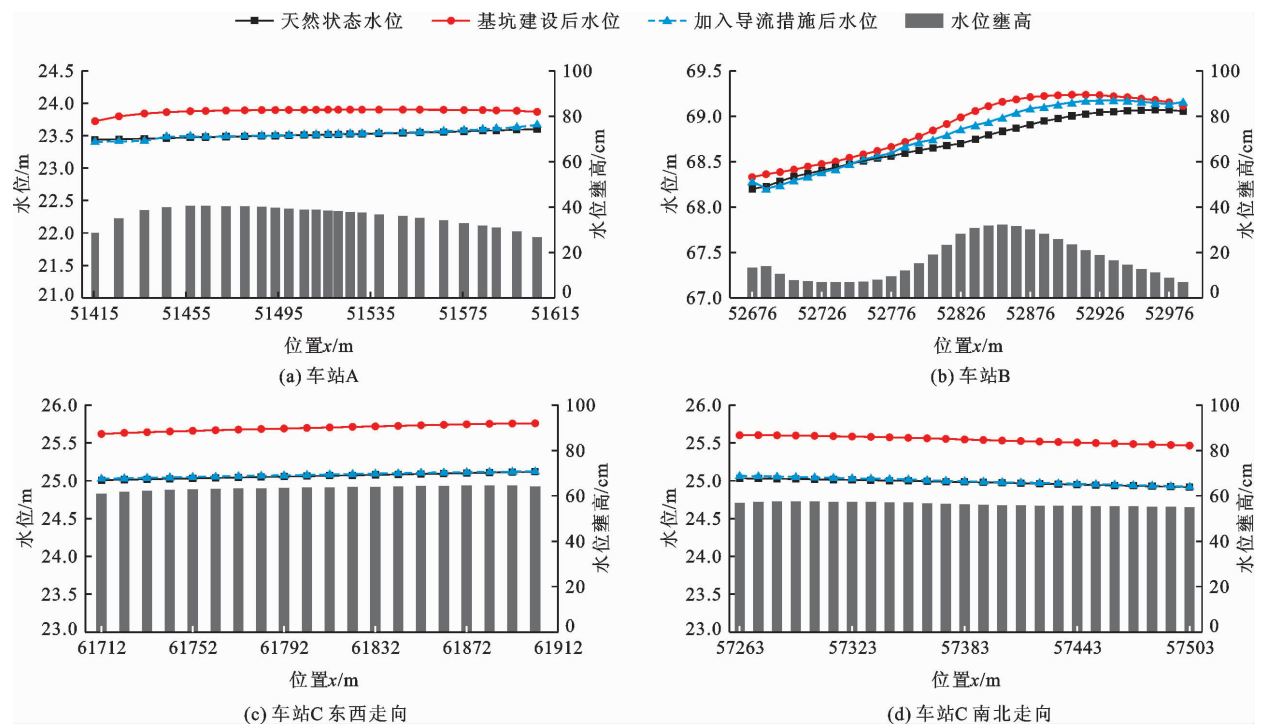


图 6 3 个典型地铁车站迎水面水位壅高及加入导流措施前后迎水面水位变化

4.3 导流装置的运行与维护

本文提出的U型导流方案可将地铁基坑上游受阻的地下水沿导流管道疏导至基坑下游,以及时消散上游壅水压力。整个导流管道均为透水结构,土层换填施工简单,内部填充的砂砾层材料获取方便且环保。在基坑下游采取抽水措施即可解决导流管道堵塞问题,该导流方案可最大程度地减轻地铁车站建设对地下水环境的影响,以实现地铁建设与泉水保护的协调发展和共融共生。但是也应当注意以下问题:

(1)防止产生二次污染。由于目前技术水平与设计方案相比仍存在一定的差距,施工过程中会引起生态及地下水污染问题。因此,需要设计出一种绿色环保、施工操作方便的地下水渗流场疏导方案,达到工程建设与环境保护的双重目的。由于径流通道位置无法精确定位,对于布置的导流装置、站点施工造成的“跑冒滴漏”、可溶性帷幕渗流通道装置^[29]等,建议在其地下水下游方向布置水质监测点,实时监测电导率、pH、氨氮等常规易测组分的变化,建议水质监测点间距设为50 m。

(2)健全监测与减压。由于地下水渗流场极其复杂,尤其是岩溶水渗流场往往分布不均、连通性差,地铁车站地下结构常引起地下渗流场发生变化而无法提前预判,建议健全监测与减压措施。

前人已研发了大量渗流减压疏排水系统^[30],为减小地下工程建设对周边流场的破坏,建议导流装置与渗流减压疏排水系统联合应用,无论导流装置还是盲沟-集水井排水,都需在完善防淤积设计的前提下,在车站地下水上游布置水位监测点,水位监测点的间距不宜大于20 m,孔深应揭露车站底板下第1个含水层。

5 结 论

(1)岩溶区地下工程建设将对地下水渗流场产生阻挡,使迎水面水位上升,背水面水位下降。计算得出车站A、车站B、车站C地下水迎水面水位最大壅水高度分别为0.40、0.32、0.62 m。

(2)地铁车站的地下结构对地下水渗流场的影响与地质条件、车站数量以及车站建设方向与水流方向的夹角密切相关,总体上迎水面影响范围大于背水面。建议在地铁建设时采取单个车站建设以及车站建设方向与水流方向呈小角度的建设方式,以减小对地下水径流的影响。

(3)沿地下建筑物结构上下游方向设置U型导

流管道可有效疏导壅水,修复地下水渗流场。导流管道布置的数量、位置同时受水流夹角、地质结构、水动力条件等多重因素影响,应用时需结合实际情况确定布设方案。

参考文献:

- [1] 李浩,杨强,罗旋,等. 贵安新区生态新城岩溶区地下空间利用适宜性评价[J/OL]. 中国岩溶, (2021-12-01) [2021-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20211130.1737.005.html>.
- [2] 周超. 徐州地铁1号线岩溶处理设计与施工[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 772-777.
- [3] 牛美峰. 杭州地区轨道交通岩溶地层钻探技术工艺分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(18): 149-150.
- [4] YANG Jianhui, KONG Deyi. Deformation of deep and large foundation pit in soft soil of Fuzhou Subway[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(2): 1-10.
- [5] MOOSAVI E, SHIRINABADI R, RAHIMI E, et al. Numerical modeling of ground movement due to twin tunnel structure of Esfahan Subway, Iran[J]. Journal of Mining Science, 2018, 53(4): 663-675.
- [6] 李喜,殷坤龙,陈标典,等. 武汉白沙洲长江两岸岩溶塌陷易发性评价与地铁建设过程中的防治对策[J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 121-130.
- [7] 李军. 地铁突水抢险中粗骨料注浆快速封堵数值模拟研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- [8] 郭红东,魏林森,郑伟,等. 地铁工程对兰州断陷盆地地下水环境的影响分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 119-128.
- [9] 王凌,张声宇,张跃明,等. 南昌河流阶地内地铁车站基坑变形研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 31-40.
- [10] CHEN Zhou, HUANG Jintao, ZHAN Hongbin, et al. Optimization schemes for deep foundation pit dewatering under complicated hydrogeological conditions using MODFLOW-USG[J]. Engineering Geology, 2022, 303(6): 106653.
- [11] SHI Chenghua, CAO Chengyong, LEI Mingfeng, et al. Optimal design and dynamic control of construction dewatering with the consideration of dewatering process[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 21(4): 1161-1169.
- [12] 杜欣. 多跨大空间地铁车站暗挖施工方案比选研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 66-70.
- [13] 张艳芬,莫海军. 地下连续墙工法在某深基坑工程中的应用[J]. 四川建筑, 2020, 40(5): 177-180.
- [14] 李培涛,李典庆,牛会峰,等. 考虑冻结管偏斜与土体导热系数不确定性的隧道人工冻结法数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(5): 435-442.
- [15] 杨长城,王宁,余磊. 地铁施工动态安全风险管控信息系

- 统的构建[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(5): 115 - 119.
- [16] 许烨霜, 沈水龙, 马磊. 地下构筑物对地下水渗流的阻挡效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1902 - 1906.
- [17] JIAO J J, LEUNG C M, DING Guoping. Changes to the groundwater system, from 1888 to present, in a highly-urbanized coastal area in Hong Kong, China[J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16: 1527 - 1539.
- [18] PUJADES E, LOPEZ A, CARRERA J, et al. Barrier effect of underground structures on aquifers[J]. Engineering Geology, 2012, 145 - 146: 41 - 49.
- [19] ESTHER S, HYOUNG - SOO K, KYOOCHUL H, et al. Regional groundwater flow characteristics due to the subway system in Seoul, Korea[J]. Journal of Soil and Groundwater Environment, 2015, 20(3): 41 - 50.
- [20] 熊志涛, 张艺, 文美霞, 等. 武汉地铁三、四号线工程建设对地下水流场的影响分析[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(3): 308 - 312.
- [21] 薛雷, 朱国祥, 尉鹏翔, 等. 北京地铁 16 号线对周边环境的影响分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(1): 37 - 42.
- [22] 赵瑞, 许模, 张强, 等. 成都地铁 7 号线地下水壅高引起的环境地质问题量化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(9): 80 - 86.
- [23] 孙斌. 济南泉域重点地段地铁建设适宜性评价[J]. 山东国土资源, 2015, 31(2): 35 - 39.
- [24] 束龙仓, 王小博, 李虎, 等. 地铁施工对济南白泉泉群流量的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 192 - 200.
- [25] 邢立亭, 李常锁, 周娟, 等. 济南泉域岩溶径流通道特征[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 57 - 65.
- [26] 王沛, 刘彦涛, 刘岩, 等. 天津地铁车站基坑围护结构变形与支撑内力分析[J]. 城市, 2014, (8): 71 - 75.
- [27] 叶安强, 张洋, 杨士友. 岩溶地区地下工程建设对地下水渗流的影响分析[J]. 西部资源, 2020(6): 102 - 104.
- [28] 冯丽莹, 孙泽秋, 梁晓阳, 等. 基于欧式贴近度的悬挂器坐挂失效模糊物元分析[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(14): 270 - 276.
- [29] 李罡, 王国富, 沈水龙, 等. 深层地铁车站维护结构渗流通道装置及方法: 中国, CN 106759268 A [P]. 2017-05-31.
- [30] 郭远翔, 吴晨浩, 沈雪龙. 广州某办公大楼地下室排水减压设计[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2845 - 2850.

(上接第 198 页)

- [23] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1565 - 1574.
- [24] HE Mingming, HUANG Bingqian, ZHU Caihui, et al. Energy dissipation-based method for fatigue life prediction of rock salt[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 1447 - 1455.
- [25] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007 - 2014 [M]. Switzerland: Springer, 2015.
- [26] 郑晓娟, 王云飞, 隋智力. 加卸载应力路径对砂岩能量演化机制的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2937 - 2943.
- [27] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高应力强卸荷条件下大理岩损伤破裂的应变能转化过程机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2483 - 2493.
- [28] KACHANOV L M. Rupture time under creep conditions [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97: 11 - 18.
- [29] 陈鹏, 李楠, 房柳林, 等. 砂岩真三轴分级加载声发射特性与损伤演化研究[J/OL]. 金属矿山. (2022-01-28) [2022-09-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20220127.1453.002.html>
- [30] 李景龙, 朱子涵, 蔚立元, 等. 大理岩峰前卸荷损伤表征及再承载破坏耗能特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2429 - 2438.
- [31] 裴峰, 张军工, 马庆福, 等. 卸荷条件下岩石破坏能量演化试验研究进展[J]. 金属矿山, 2017(5): 1 - 6.