

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.01.011

岩溶区地铁车站地下水导流设计参数探讨

黄永亮^{1,2}, 李虎¹, 胡韬³, 刘凤洲^{1,2}, 门燕青¹, 董亚楠¹, 高扬³

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 济南 250014; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 济南 250002;
3. 山东省地矿工程勘察院(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), 济南 250014)

摘要: 针对通过导流措施降低地铁车站引起的地下水位壅高的设计理论尚不完善问题, 综合运用理论分析、物理模型试验等方法, 研究岩溶区地下水流量求解、导流设计参数取值、水位壅高与水力梯度及导流通道面积之间的关系, 并结合具体工程案例, 运用数值模拟手段对导流设计方案进行效果验证。结果表明: 地铁车站建成后, 受车站阻隔作用, 地下水径流路径增大, 壅高产生, 而采取导流措施后, 径流路径缩短, 壅高消散; 水位壅高与水力梯度呈线性相关关系, 随水力梯度的增大, 壅高相应增大; 渗透系数及水力梯度不变条件, 水位壅高与导流通道面积占比呈指数下降关系, 其临界阈值出现在导流通道面积占比约 20%处, 并据此建议导流设计参数优化系数取不小于 0.2; 采取卵砾石换填导流方案及管涵导流方案, 均可使壅高水头基本回落至原始状态。数值模拟结果验证导流设计参数取值的正确性, 导流设计参数取值方法可行, 满足降低地下水位壅高的要求。

关键词: 城市轨道交通; 地铁车站; 地下水导流; 设计参数; 岩溶区; 地下水壅高

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)01-0087-09

Discussion on the Design Parameters of Groundwater Diversion at Metro Stations in Karst Areas

HUANG Yongliang^{1,2}, LI Hu¹, HU Tao³, LIU Fengzhou^{1,2}, MEN Yanqing¹, DONG Ya'nan¹, GAO Yang³

(1. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250014; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002; 3. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources), Jinan 250014)

Abstract: To address the lack of a well-established design framework for reducing groundwater level rise caused by metro station construction through diversion measures, this study combines theoretical analysis and physical model tests to investigate groundwater flow rate calculation in karst areas, determination of diversion design parameters, and the relationships of groundwater rise with hydraulic gradient and with diversion area ratio. A site case study is incorporated, and numerical simulation was used to verify the effectiveness of the diversion design scheme. Results show that: after metro station construction, the groundwater flow path lengthens due to station obstruction, causing a rise in groundwater; after implementing diversion measures, the flow path shortens and the rise dissipates; the groundwater rise exhibits a linear correlation with hydraulic gradient, increasing correspondingly with higher hydraulic gradients; under constant permeability coefficient and hydraulic gradient conditions,

收稿日期: 2025-04-18 修回日期: 2025-09-17

第一作者: 黄永亮, 男, 硕士, 高级工程师, 从事地铁建设与泉水保护研究, ghy10207@163.com

通信作者: 高扬, 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程建设地下水环境保护研究, gaoyangsdjn@163.com

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023QE339, ZR2024ME059); 山东省交通运输科技计划(2024B02); 泰山产业领军人才工程(tscx202211025, tscx202312129, tscx202306007)

引用格式: 黄永亮, 李虎, 胡韬, 等. 岩溶区地铁车站地下水导流设计参数探讨[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 87-95.

HUANG Yongliang, LI Hu, HU Tao, et al. Discussion on the design parameters of groundwater diversion at metro stations in karst areas[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 87-95.

groundwater rise decreases exponentially with the proportion of diversion channel area, with a critical threshold occurring at approximately 20% proportion, leading to the recommendation that the optimization coefficient for diversion design parameters should be no less than 0.2; both gravel replacement diversion schemes and culvert diversion schemes can essentially restore the elevated hydraulic head to its original state. Numerical simulation results verify the correctness of diversion design parameter values, confirming that the parameter determination method is feasible and meets the requirements for reducing groundwater level rise.

Keywords: urban rail transit; subway station; groundwater diversion; design parameters; karst area; groundwater rise

近年来,随着地铁等城市地下空间开发工程的迅速发展,地下工程建设与地下水相互影响问题越来越受到众多学者的广泛关注。王鑫等^[1]研究了地铁沿线地下水壅高规律,并指出地铁走向与地下水流向夹角、含水层厚度等是壅高的主控因素。张春辉等^[2]指出地下工程建设破坏了原本地下径流通道,阻挡了地下水流动,导致地下水位升高。这种地下水运动状态的变化会反作用于地下结构,引发建筑抗浮、既有结构渗漏风险^[3]等新问题。LIU等^[4]指出地下水位变化对地下结构的稳定性和安全性具有重要影响,并研究了地下水位上升和下降对隧道应力、弯矩、浮力和竖向位移的影响。李欣^[5]基于模糊云贝叶斯网络模型分析,指出运营期地铁车站的地质环境影响风险高于建设期,其风险影响因素主要包括迎水面的水位壅高和背水面的不均匀沉降。

为减弱地下结构对地下水环境造成不利影响,李虎等^[6]提出了一种管涵导流法的工程结构,以大直径管涵代替原地下水渗流通道,利用管涵较大的地下水通过能力实现地下水导流。赵程程^[7]则采用卵砾石换填导流法,通过在车站迎水侧和背水侧施工钻孔透水桩、在基坑底部施工卵砾石换填导水通道以减小地铁车站对浅层地下水径流的影响。邢立亭等^[8]通过数值模拟分析表明,实施导流措施可以显著降低工程建设对地下水环境的影响,并保证水环境处于可控范围内。

目前,众多学者围绕地下工程与地下水的相互影响问题,在地下水壅高规律、风险分析等方面做了大量深入研究,并提出了通过采取导流措施减小工程对地下水径流的影响。然而,目前导流设计时主要依赖于数值模拟,相应的设计理论仍不成熟,特别是由于岩溶区非均质性,地铁车站地下水导流设计存在较大不确定性。因此,有必要对地下水导流设计理论及设计参数进行探讨,以求能对导流设计提供理论支撑。

本研究基于水均衡原理和等效多孔介质理论对地铁车站地下水导流设计参数进行探讨,并基于模型试验的结果,提出设计参数优化建议;最后,对某工程实例

进行导流方案设计,并采用数值模拟验证其合理性。

1 岩溶区地铁车站导流设计参数取值

1.1 地下水导流设计原理

地铁车站阻隔地下水流的本质是原地下水径流通道被阻隔,被阻隔的地下水流量将从车站周围绕流,导致迎水侧地下水位上升,背水侧地下水位下降,进而引发地下水流动不均衡的问题,对周围环境造成一定的影响。为了将工程对地下水渗流的影响降到最低,并避免壅高和绕流,需要确保导流措施处的地下水流量不低于未施工时的地下水流量,即:

$$Q_s \geq mQ_0 \quad (1)$$

式中, Q_0 为拟建车站部位的原始地下水流量, m^3/d ; Q_s 为设计采用的地下水流量, m^3/d ; m 为优化系数。

因此,若求得未进行工程建设时的地下水原始流量和所需的设计流量即可满足导流设计参数取值要求。

1.2 岩溶区拟建车站部位地下水原始流量求解

岩溶发育区具有裂隙、溶孔、溶洞、溶沟等不同形式,且发育不均匀,以至于对岩溶水径流预测存在较大困难。目前,常用于岩溶水运动描述的数学模型有等效多孔介质模型、离散网络介质模型、双重介质模型和三重介质模型等^[9],上述模型各有特点,在解决不同问题时各有优势。由于工程建设涉及的浅表层岩溶发育区揭露溶洞多为黏性土混碎石及黏性土充填,因此,岩溶非均质结构可通过等效多孔介质模型进行概化^[10]。

目前的工程勘察实践中,可以依靠钻探、抽水试验、地震映像、瞬变电磁、跨孔CT等技术^[11]对岩溶发育情况进行识别,并获得不同岩溶发育等级区域的渗透系数。因此,可在工程勘察过程中设法求得不同岩溶发育等级区域对应的渗透参数,便可根据前述等效多孔介质模型得到该场地的岩溶发育的等效渗透系数,从而求得岩溶区地下水原始流量。

1.2.1 岩溶含水层等效渗透系数计算

假设某断面垂直于地下水流向,其工程影响范围内的等效渗透系数 K_d 为不同发育程度岩溶渗透系数的

加权平均, 即满足如下表达式:

$$K_d = \sum_{i=0}^r K_i A_i / A_0 \quad (2)$$

式中, K_d 为等效渗透系数, m/d; A_0 为某截面的总面积, m^2 ; $A_i (i=1, 2 \cdots r)$ 对应不同岩溶发育程度的截面积, m^2 ; $K_i (i=1, 2 \cdots r)$ 为不同岩溶发育程度断面的渗透系数, m/d。

在实际工程中, 获取不同岩溶发育程度的截面积较为困难时, 可采用线岩溶率指标对上式进行简化:

$$K_d = K_1 R + K_2 (1 - R) \quad (3)$$

式中, K_1 为岩溶发育区渗透系数, m/d; K_2 为岩石较完整区域渗透系数, m/d; R 为线岩溶率, %。

1.2.2 通过某截面的原始地下水流量计算

当溶洞被黏性土充填, 即岩溶区地下水径流条件满足达西定律时, 原始地下水流量为:

$$Q_0 = v_0 A_0 = K_d A_0 J_0 \quad (4)$$

当实测地下水雷诺数大于 1 或岩溶发育区具有明显紊流特征时, 可采用谢才公式求得原始地下水流量:

$$Q_0 = v_0 A_0 = K_d A_0 J_0^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中, v_0 为原始工况地下水流速, m/d; J_0 为原始工况水力梯度。

1.3 导流设计参数探讨

1.3.1 卵砾石换填导流方法设计参数探讨

卵砾石换填导流方案拟在车站底板布设渗透系数较大的卵砾石换填层, 达到流量与原始地层接近的效果, 流经卵砾石换填层导流措施的地下水流, 可视作局部承压地下水流, 由式(1)及达西定律可知, 流经卵砾石换填层导流措施的地下水流量为:

$$Q_s = K_s A_s J_s / F_s \geq m Q_0 \quad (6)$$

式中, K_s 为导流措施的设计渗透系数, m/d; A_s 为导流措施的设计截面积, m^2 ; J_s 为车站建成后的水力梯度; F_s 为安全系数, 可取 1.5~2.0。

代入式(4), 则:

$$Q_s = K_s A_s J_s / F_s \geq m K_d A_0 J_0 \quad (7)$$

具体地, 由于采取导流措施后, 车站两侧地下水得以有效连通, 可假设车站建成后的水力梯度与原始工况相同, 因此, 在设计时忽略水力梯度参数, 仅考虑渗流面积和渗透系数的等效处理, 则由式(7)可知, 导流措施的设计截面积为:

$$A_s \geq F_s m \frac{K_d}{K_s} A_0 \quad (8)$$

实际工作中, 导流通道宜分散布设于岩溶较发育区域, 令单道卵砾石换填导流通道的设计面积为 A'_s , 则需布设的通道数量为:

$$n_s = \frac{A_s}{A'_s} \quad (9)$$

式中, n_s 为导流通道数量。

1.3.2 管涵导流方法设计参数探讨

参照 GB 50014《室外排水设计标准》, 结合式(1), 管涵的流量可按式计算:

$$Q_{sg} = n_s A_{sg} v_{sg} / F_s \geq m Q_0 \quad (10)$$

式中, Q_{sg} 为管涵设计流量, m^3/s ; A_{sg} 为单道管涵有效面积, m^2 ; v_{sg} 为管涵内水流设计流速, m/s, 因后期管涵可能发生淤堵导致流速下降, 不宜超过 0.1 m/s。

则由式(10)可知, 需要的管涵数量为:

$$n_s \geq F_s \frac{m Q_0}{A_{sg} v_{sg}} \quad (11)$$

其中, 管涵中水流的流速可按式计算:

$$v_{sg} = \frac{1}{n_c} R_s^{\frac{2}{3}} J_s^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中, R_s 为水力半径, m, 取管涵过水断面面积与湿周之比; J_s 为设计水力梯度; n_c 为粗糙系数。

2 地铁站与地下水渗流互馈影响物理模型试验

2.1 试验准备

根据相似理论分析, 当在常规重力加速度 g 条件下时, 模型尺寸缩减为原型的 1/200, 孔隙水压力缩减为原型的 1/200, 渗透系数缩减为原型的 1/14.1^[12], 水力梯度保持不变, 模型试验物理场与工程原型物理场可保持相似(见表 1), 本次模型试验的地层厚度及物理力学参数详见表 2。若地铁站长度约 300 m, 宽度约

表 1 模型试验参数相似比例表

Table 1 Parameter scales used in model tests

参数	定义	关系	缩小比例
长度	$C_L = L_p / L_m$	$C_L = C_L$	200
密度	$C_\gamma = \gamma_p / \gamma_m$	$C_\gamma = C_\gamma / C_L$	1
摩擦系数	$C_\phi = \phi_p / \phi_m$	$C_\phi = C_\mu$	1
黏聚力	$C_c = C_p / C_m$	$C_c = C_c$	200
泊松比	$C_\mu = \mu_p / \mu_m$	$C_\mu = C_\mu = 1$	1
弹性模量	$C_E = E_p / E_m$	$C_E = C_E / C_c$	200
渗透系数	$C_K = K_p / K_m$	$C_K = \sqrt{C_L} / C_\gamma$	14.14
水力梯度	$C_J = J_p / J_m$	$C_J = 1$	1

表 2 试验地层基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of each layer

地层	实际厚度/m	试验厚度/cm	密度/(g/cm ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/MPa	渗透系数/(cm/s)
地层 1	21	10.5	1.99	0.10	19.71	0.29	0.42~0.47	6.83×10^{-6}
地层 2	14	7	2.17	0.08	36.32	0.25	1.72~1.78	5.67×10^{-3}
地层 3	25	12.5	2.15	0.17	28.11	0.3	7.2~7.8	1.15×10^{-4}

20 m, 根据相似比例条件, 确定车站模型尺寸为: 长×宽=1 500 mm×100 mm; 模型试验箱的尺寸为: 长×宽=1 800 mm×1 500 mm。通过水泵调节模型进水量和出水量, 通过水位控制系统调节模型箱内的水位实现设计水力梯度, 通过在模型箱内铺设相似材料及监测点实现对地下水流场的模拟(见图 1)。

2.2 试验步骤及工况

2.2.1 试验步骤

首先采用防水双面胶将 80 目金属滤网固定于两侧进出水孔处, 防止相似材料流失; 其次将相似材料按照 5 cm 厚度分层砌筑并压实, 确保材料完整, 无较大贯通孔隙, 并将传感器埋设于设计位置; 给模型箱

供水, 通过水位控制系统调节两侧水位差, 保持设计水力梯度, 本次试验各工况试验水力梯度分别取 0.006、0.01、0.02、0.03 进行不同设计工况模拟试验, 实时观测并记录试验过程数据, 并维持水压变化至稳定状态; 最后将孔隙水压力数据按照比例尺换算为实际水位数据进行分析。

2.2.2 试验工况

1) 进行未建地铁车站时原始地层地下水渗流模型试验。根据实际水力梯度的要求计算出模型箱内土体两侧的水位差确定两侧水位高度, 调整水位控制系统和排水箱水头调节装置并使箱内水流稳定, 获得未建地铁车站时的原始地层渗流场。

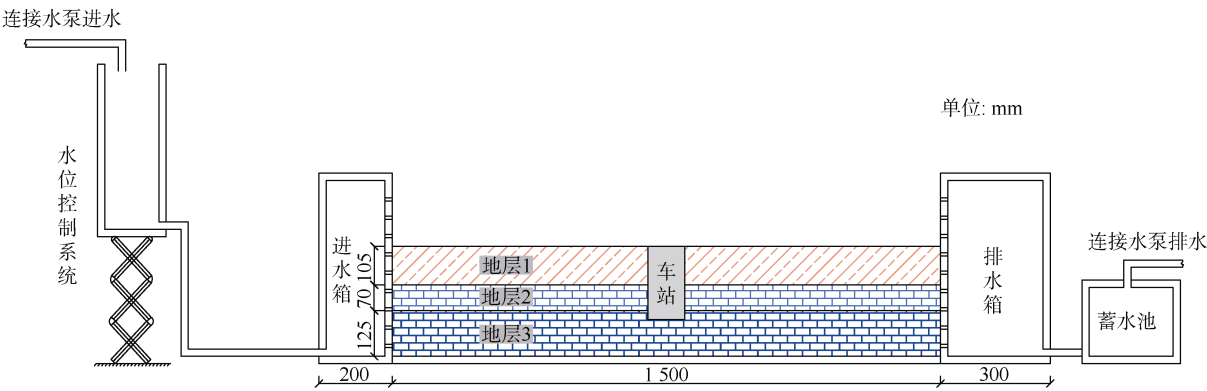


图 1 模型试验装置设计
Figure 1 Design diagram of model testing device

2) 进行车站施工完成未采取导流措施工况时的地下水渗流模型试验(见图 2(a))。本次试验在地层中插入高 200 mm、宽 2 mm 钢板模拟地连墙结构, 观测未采取导流措施工况时的地下水壅高。

3) 进行采取不同导流措施工况时的模型试验。通过拔除不同面积的钢板恢复原始地层的渗流通道模拟不同导流工况。实验过程中钢板围成的基坑尺寸为 1 500 mm×150 mm, 沿长度方向依次拔除 100 mm(见图 2(b))、300 mm(见图 2(c))、500 mm(见图 2(d))钢板恢复渗流通道, 即导流通道面积比例依次为 6.7%、20.0%、33.3%。

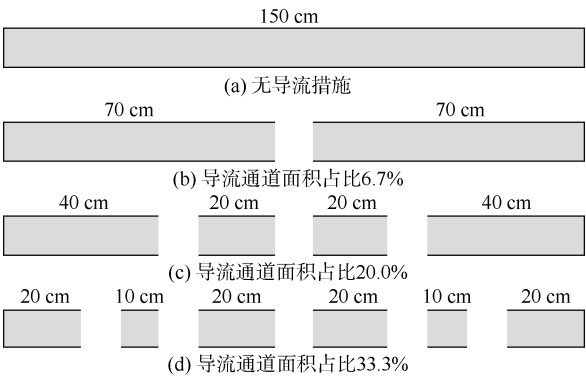


图 2 试验工况示意
Figure 2 Schematic diagram of test conditions

2.3 试验结果

根据监测点的布设位置(见图3)可知, P1、P3 监测点可监测进水口及出水口处的水位变化; P4、P5、P6 监测点位于地铁模型迎水面区域, 能直接监测地下水位壅高情况; P7 位于中间区域, 可监测地下水从地铁模型两侧的绕流情况; P8、P9、P15 位于地铁车站背水面, 能监测到地铁模型背水侧的地下水位情况。由于不同工况条件下各监测点的位置及埋深相同, 故位置水头相等, 所以前后测得的孔压差别就是其水头变化。根据孔压监测数据换算为实际水位数据后, 得到的车站建设前后水头变化情况见表3。

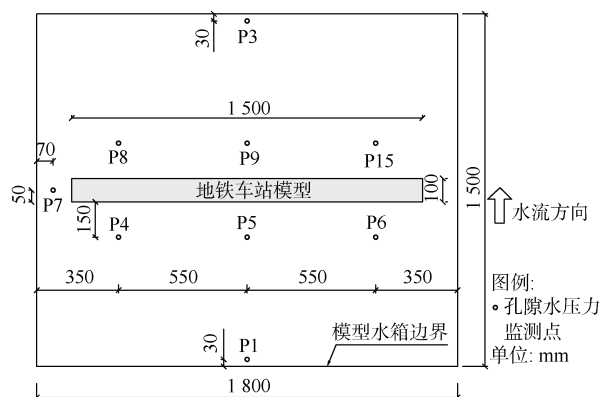


图3 孔隙水压力监测点布置

Figure 3 Layout of Pore Water Pressure Monitoring Points

表3 车站建设前后水头变化

Table 3 Water Head Changes before and after Station Construction

导流通道面积占比	水力梯度	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P15
无导流措施	0.03	0	0	0.66	0.76	0.64	0.44	0.16	-0.22	-1.46
	0.02	0	0	0.56	0.68	0.58	0.32	0.06	-0.2	0.06
	0.01	0	0	0.52	0.60	0.48	0.24	0.06	-0.16	0.04
	0.006	0	0	0.48	0.54	0.48	0.22	0.02	-0.14	0.02
导流通道面积 占比为 6.7%	0.03	0	0	0.14	0.16	0.14	0.06	0.04	-0.04	0.02
	0.02	0	0	0.10	0.14	0.12	0.04	0	-0.04	-0.02
	0.01	0	0	0.08	0.10	0.08	0.02	-0.02	-0.02	-0.02
	0.006	0	0	0.06	0.06	0.04	0.02	0	-0.02	0
导流通道面积 占比为 20%	0.03	0	0	0.08	0.12	0.06	0.06	0.04	-0.04	0.02
	0.02	0	0	0.06	0.08	0.04	0.04	0.04	-0.04	0
	0.01	0	0	0.04	0.06	0.04	0.02	0.02	-0.02	0.02
	0.006	0	0	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0	0
导流通道面积 占比为 33.3%	0.03	0	0	0.04	0.06	0.02	0.02	0	-0.02	0.02
	0.02	0	0	0.04	0.04	0.02	0	0	-0.02	0
	0.01	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0
	0.006	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0

由表3可知, 位于进水口和出水口的 P1、P3 监测点由于水位控制系统的调节, 水位无变化; 位于车站迎水面中间的 P5 监测点水位壅高最大, 背水侧中间的 P9 监测点水位下降最大; 两侧的 P4、P6、P8、P15 监测点水位变化较小; 位于车站旁边中间区域的 P7 监测点有一定程度的水位上升现象, 但水位上升程度小于车站结构迎水侧, 且随着导流通道面积的增大而减小。

由试验结果可知, 受车站阻隔作用, 被阻隔的地下水会从车站周围和底部绕流, 使车站结构迎水侧水位上升, 背水侧水位下降, 且车站中间区域水位变化较大, 两侧水位变化较小, 被阻隔的地下水产生从车

站两侧和底部绕流的现象(见图4), 随着导流通道面积的增大, 两侧绕流效应逐渐减弱。

由图5可知, 随着水力梯度的增加, 地下水壅高也相应增加, 呈近似线性关系, 由此结果可知, 在极端降雨条件下, 水位壅高会迅速增大, 由此产生对工程的影响应受到工程人员的重视。由图6可知, 在渗透系数及水力梯度不变时, 水位壅高与导流面积比例存在相关性。随着导流通道面积的增加, 水位壅高呈指数下降趋势, 随着导流通道面积的继续增加, 水位壅高下降的速度变缓。当导流面积比例达到20%时, 导流通道面积继续增加, 则水位壅高降低比例不明显。因此, 当导流面积比例达到20%时, 可在保证导流效

果的基础上,进一步优化所需导流工程量。因此式(1)中的优化系数 m ,可取不小于 0.2。

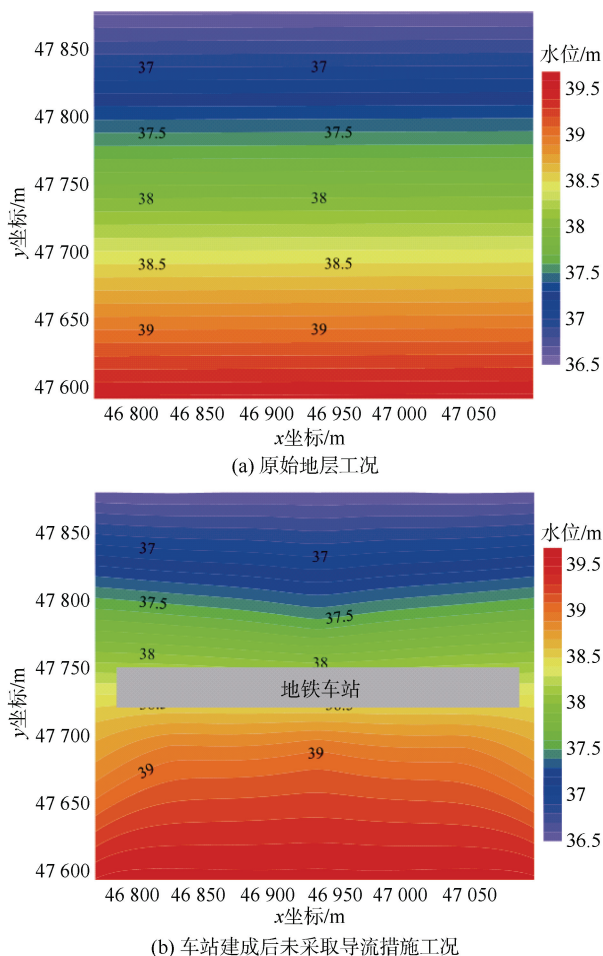


图4 水力梯度为 0.01 时车站建设前后的地下水流场
Figure 4 Groundwater flow field diagram before and after station construction at a hydraulic gradient of 0.01

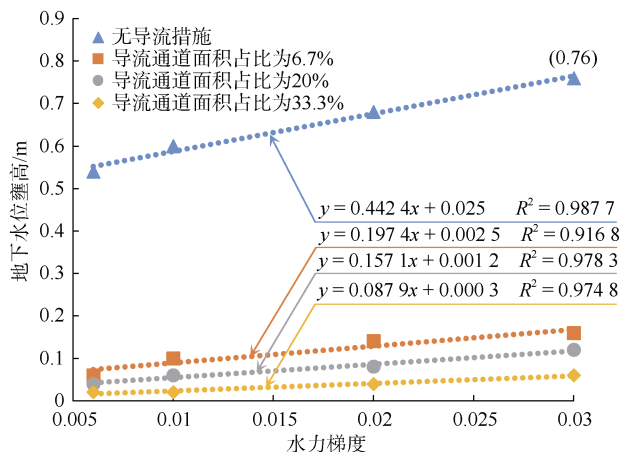


图5 不同工况水力梯度与 P5 监测点水位壅高拟合趋势线
Figure 5 Fitting relationship of hydraulic gradient versus groundwater rise at Monitoring Point P5

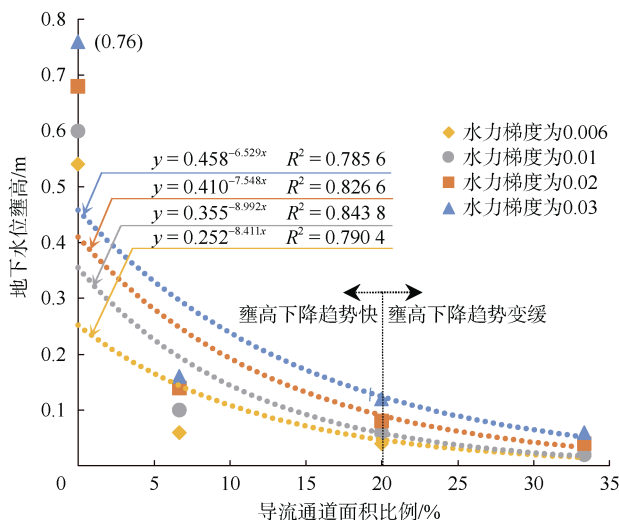


图6 不同导流面积占比与 P5 监测点水位壅高拟合趋势线
Figure 6 Fitting relationship of drainage area proportion versus groundwater rise at Monitoring Point P5

由试验结果可知,无导流措施时,各水力梯度均产生较大壅高,采取导流措施后水位壅高迅速下降,这是因为无导流措施时,受车站阻隔作用,地下水将从车站两侧及底部绕流,由于径流路径的增大,产生水位壅高;而采取导流措施后,地下水将从新的径流通道快速扩散至原地层,径流路径缩短,从而使水位壅高消散。

需要指出的是,受限于模型箱的尺寸,本次试验可能存在一定的边界效应,但从车站旁边中间区域的 P7 监测点可以看出,当导流通道面积占比为 20% 时,因绕流产生的壅高换算为实际高度后仅为 2~6 cm,在误差可接受范围内,因此本试验结果可以指导工程实践;由于车站外围岩溶发育具有变异性,渗透性可能与车站范围内存在一定差异,建议应用时扩大勘察范围,并结合现场监测数据进行校准。此外,上述模型是在渗透系数不变的前提下进行的,实际实施过程中,可通过增大导流通道渗透系数,进一步增大其径流能力,从而降低导流措施工程量。

3 工程应用实例

3.1 导流方案设计

3.1.1 受车站阻隔作用地下水流量计算

济南某地铁车站位于泉域范围内,需采取导流措施减小工程对地下水流场的影响。车站长度约 315 m,深度约 16.85 m,碳酸盐岩类裂隙水在车站底板以上 3.1~5.8 m,水力梯度为 0.07,钻孔揭露溶洞多被黏性土或黏性土夹碎石充填,线岩溶率为 8.5%,岩溶发育

程度中等。根据经验,相对较完整部分岩体渗透系数取 1.5 m/d, 溶洞及裂隙的渗透系数取 100 m/d。故等效渗透系数 $K_d=1.5 \times (1-0.085)+100 \times 0.085 \approx 10.0$ m/d。因此, 拟建车站断面的原始地下水流量为 $Q_0 = K_d A_0 J_0^{\frac{1}{2}} = 10 \times 315 \times 5.8 \times 0.07^{\frac{1}{2}} = 4833.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.1.2 卵砾石换填导流设计

设计时取卵砾石换填层的渗透系数为 100 m/d, 可根据前述方法, 得到设计导流面积 $A_s = F_s m \frac{K_d}{K_s} A_0 = 1.5 \times 0.2 \times \frac{10}{100} \times 315 \times 5.8 = 54.81 \text{ m}^2$ 。取卵砾石换填通道结构尺寸为宽 4.5 m, 深 1 m, 需要的导流通道的数量为 $n_s = \frac{A_s}{A'_s} = \frac{54.81}{4.5 \times 1} \approx 12$ 。因此, 需沿车站走向, 铺设不少于 12 道 4.5 m×1.0 m 粗颗粒卵砾石导流通道。

3.1.3 管涵导流方案设计参数取值

取设计水力梯度 J_s 与原始水力梯度 J_0 相同为 0.07, 圆形管涵内径为 1 m, 为满管状态, 则设计流速为

$$v_{sg} = \frac{1}{n_c} R_s^{\frac{2}{3}} J_s^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.013} \times \left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \times 0.07^{\frac{1}{2}} = 8.1 > 0.1 \text{ m/s}。$$

参照 GB 50014《室外排水设计标准》, 非金属管道最大设计流速宜为 5.0 m/s, 然而由于地下水流速较慢, 且地铁为百年工程, 导流长期运行可能有泥沙沉积, 影响流速及径流量, 故建议取 $v_{sg} = 0.1 \text{ m/s} = 8640 \text{ m/d}$,

$$n_s = F_s \frac{m Q_0}{A_{sg} v_{sg}} = 1.5 \times \frac{0.2 \times 4833.8}{3.14 \times 0.5^2 \times 8640} = 0.21 < 1。$$

根据计算结果, 管涵流量远大于工程影响范围内的原始地下水流量, 但是设计时为考虑实现最大限度的汇排水功能, 建议管涵间距不宜超过 50 m, 因此设计采用管涵数量为 7 道。

3.2 导流效果数值模拟

为进一步研究修建地下工程后地下水过水断面面积减小, 基坑迎水面出现壅水的现象, 本次研究构建了开挖后的三维结构模型以验证导流效果。根据前述分析, 研究区地下水可等效为符合达西定律的运动, 其渗流场控制方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (13)$$

$$u = \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (14)$$

式中, ρ 为水密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ε 为孔隙度; u 为达西速度; 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 。

3.2.1 未采取导流措施时数值模拟

基于实测建设前流场及水文地质参数, 采用稳定流计算程序, 获取地铁车站建设后流场图(见图 7)。

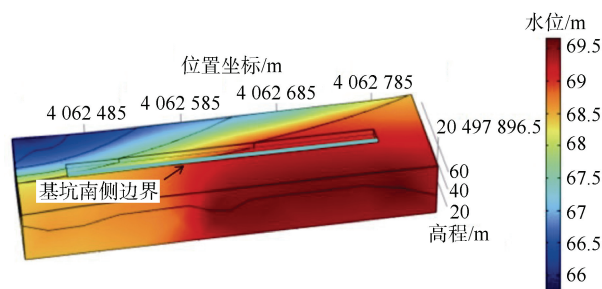


图 7 某地铁车站建设后地下水模拟流场
Figure 7 Simulated groundwater flow field after subway station construction

图 7 可以看出, 车站建成后, 由于过水面积减小, 基坑迎水面水位升高, 出现壅水现象。为进一步研究壅高规律, 按照步长 10 m 分别输出车站建设前后基坑迎水面边界位置水位数据, 并计算壅高(见图 8)。

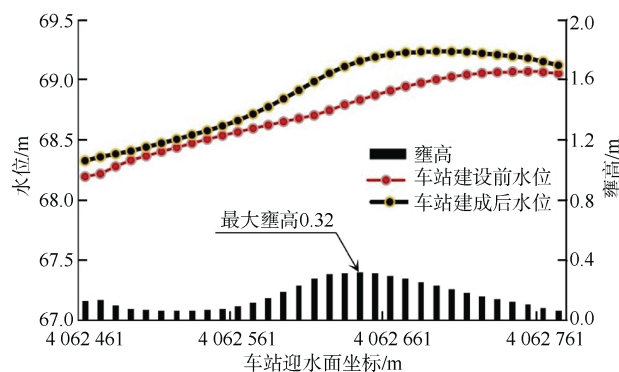


图 8 基坑修建前后基坑迎水面边界水位变化情况
Figure 8 Change of water level at the upstream boundary of foundation pit before and after foundation pit construction

由图 8 可知, 车站建设后, 基坑迎水面水位壅高在 0.06 m~0.32 m 之间, 且中间位置水位壅高最大, 基坑两端由于存在绕流, 水位壅高较小。

3.2.2 卵砾石换填导流方案数值模拟

按照 3.1 节卵砾石换填导流设计方案, 构建导流模型, 采用非稳定流进行模拟计算。结果显示 12 h 内

基坑迎水面壅高基本消失(见图9)。按照10 m步长输出基坑迎水面边界水位数据(见图10),可以看出加入导流措施后基坑迎水面水位基本回落至原始状态。

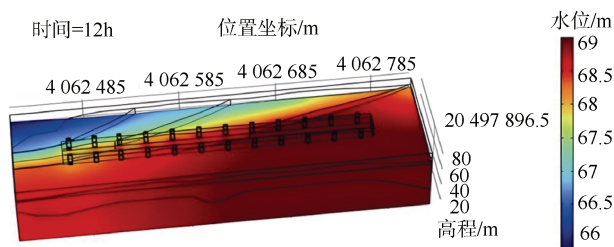


图9 加入卵砾石换填导流措施后模拟流场

Figure 9 Simulated flow field after incorporating gravel backfill diversion measures

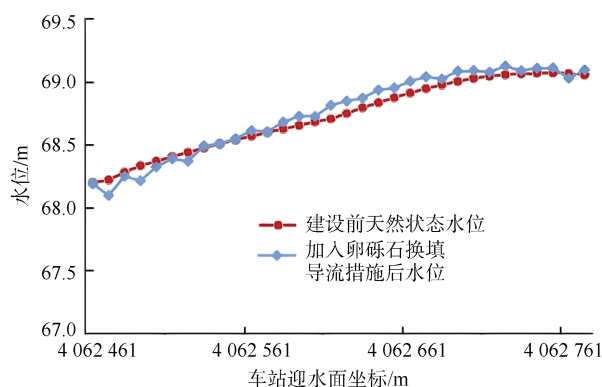


图10 加入卵砾石换填导流措施后基坑迎水面边界水位

Figure 10 Water levels at the upstream face boundary of foundation pit after gravel backfill implementation

3.2.3 管涵导流方案数值模拟

按照3.1节布设箱涵式导流措施,利用稳定流模型对该方案进行模拟验证,当导流管数目为7组,地下水壅高可以基本消失(见图11)。按步长10 m输出增加导流措施前后基坑迎水面边界水头,可以看出,增加导流措施后水头基本回落至原始状态(见图12)。

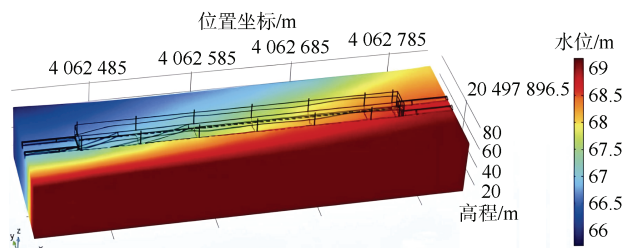


图11 加入管涵导流措施后模拟流场

Figure 11 Simulated flow field after implementing culvert diversion measures

综上,根据数值模拟结果,按照3.1节设计的卵砾石换填导流设计方案及管涵型设计方案,均可满足降低地下水壅高的要求。

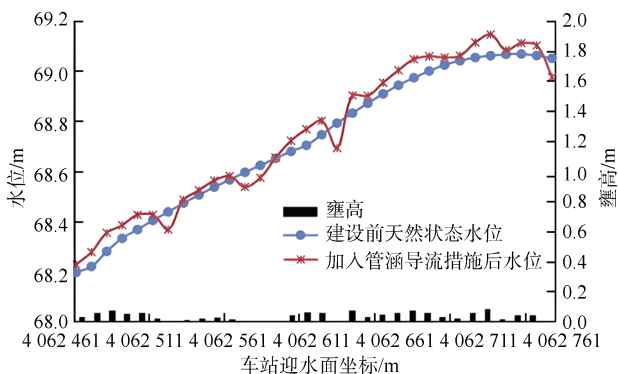


图12 加入管涵导流措施后基坑迎水面边界水位

Figure 12 Water levels at the upstream face boundary of foundation pit after culvert diversion implementation

4 结论

1) 研究揭示了地下水位壅高产生及消散机理。地铁车站建成后,阻隔了原有地下水径流通道,地下水将从车站两侧及底部绕流,由于径流路径增大,产生了壅高,特定工况条件水位壅高与水力梯度呈近似线性关系;通过采取导流措施,可缩短地下水径流路径,使壅高消散,水力梯度及渗透系数不变时,水位壅高与导流通道面积占比呈指数下降关系,其临界阈值出现在导流通道面积占比约20%处。

2) 提出了岩溶区地铁车站导流设计参数取值方法。由于地铁车站影响范围内的浅表层岩溶发育区多被充填,可基于等效多孔介质模型求解岩溶区地下水原始流量;基于水均衡原理提出了卵砾石换填导流和管涵导流设计参数的取值方法,根据模型试验结果提出可对导流设计参数进一步优化,建议优化系数取不小于0.2。

3) 对某工程实例进行了导流方案设计,并采用数值模拟手段进行了效果验证。无导流措施时,壅高呈现中间大、两头小的特点;按照本文提出的设计方法设计的卵砾石换填导流方案及管涵导流方案,均可使水头基本回落至原始状态,满足降低地下水壅高及减小对流场影响的要求。数值模拟结果与设计理论及试验较吻合,验证了导流设计参数取值的正确性。然而,由于岩溶区地下工程的复杂性,地下水导流施工工艺及效果仍需进行相关探索及长期监测验证。

参考文献

- [1] 王鑫, 潘明浩, 李虎, 等. 地铁沿线地下水壅高规律及其对极端降雨事件的响应[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13718-13727.
WANG Xin, PAN Minghao, LI Hu, et al. Pattern of ground-water rising along metro and its response to extreme rainfall event[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(32): 13718-13727.
- [2] 张春辉, 李常锁, 卫如春, 等. 济南龙洞片区某工程区地下水位升高原因及控制措施[J]. 人民黄河, 2025, 47(2): 113-118.
ZAHNG Chunhui, LI Changsuo, WEI Ruchun, et al. Study on the causes and mitigation measures of groundwater level rise in a project in Longdong area, Jinan[J]. Yellow River, 2025, 47(2): 113-118.
- [3] 杨广武, 彭华, 李宇杰, 等. 北京地铁既有结构渗漏风险防控体系研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 75-81.
YANG Guangwu, PENG Hua, LI Yujie, et al. Risk prevention and control system of existing structure leakage in Beijing subway[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 75-81.
- [4] LIU Hanlong, SUN Weixin, ZHANG Yanmei, et al. Experimental analysis on the interaction between underground structures and sand layer under groundwater level change[J]. Underground space, 2023, 10: 15-36.
- [5] 李欣. 济南地铁建设对地质环境的影响机制及风险决策研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
LI Xin. Investigation on the Impact Mechanism and Risk Decision of Jinan Metro Construction on Geological Environment[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [6] 李虎, 王鑫, 商金华, 等. 一种地铁车站地下水导流结构及施工方法: CN113294205B[P]. 2023.01.31.
- [7] 赵程程. 泉域补给区轨道交通车站导流措施的研究与应用[J]. 隧道与轨道交通, 2025(1): 50-53.
ZHAO Chengcheng. Research and application of diversion measures for rail transit stations in spring recharge areas[J]. Tunnel and rail transit, 2025(1): 50-53.
- [8] 邢立亭, 于苗, 宿庆伟, 等. 地下工程建设对岩溶水流场的影响及其修复[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 242-254.
XING Liting, YU Miao, SU Qingwei, et al. Influence and repair of underground engineering construction on Karst flow field[J]. Bulletin of geological science and technology, 2022, 41(5): 242-254.
- [9] 成建梅, 罗一鸣. 岩溶多重介质地下水模拟技术及应用进展[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 220-229.
CHENG Jianmei, LUO Yiming. Overview of groundwater modeling technology and its application in Karst areas with multiple-void media[J]. Bulletin of geological science and technology, 2022, 41(5): 220-229.
- [10] GHASEMIZADEH R, HELLWEGER F, BUTSCHER C, et al. Review: Groundwater flow and transport modeling of Karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico[J]. Hydrogeology journal, 2012, 20(8): 1441-1461.
- [11] 代方园, 高扬, 宿庆伟, 等. 瞬变电磁与跨孔CT成像探测岩溶分布及形态特征的应用: 以山东省济南地区为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 308-317.
DAI Fangyuan, GAO Yang, SU Qingwei, et al. Application of transient electromagnetism and cross-hole CT imaging to detect Karst distribution and morphological characteristics: a case study of Jinan, Shandong Province[J]. Carsologica sinica, 2022, 41(2): 308-317.
- [12] 狄胜同. 地下水开采导致地面沉降全过程宏观演化机理及趋势预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
DI Shengtong. Research on macro-mesoscopic evolution mechanism of whole process and trend prediction of land subsidence caused by groundwater exploitation[D]. Jinan: Shandong University, 2020.

(编辑: 傅依萱)