

岩溶地层地铁车站深基坑渗漏灾害成因分析*

王祥秋 陈世超 肖莹萍

(佛山大学土木与交通学院, 528225, 佛山)

摘要 [目的] 富水岩溶深基坑施工开挖常发生基坑侧壁或底部突涌灾害问题, 应针对富水溶洞地层深基坑开挖时的渗流稳定性进行深入研究。[方法] 依托佛山地铁3号线中山公园站深基坑开挖工程, 对深基坑渗流特性及坑底涌水机理进行深入研究, 建立了基坑-土体-溶洞三维数值模型, 采用等效渗透系数法对岩溶-地层渗流场进行耦合模拟。[结果及结论] 通过仿真模拟分析, 获得了不均匀地层中岩溶区富水程度对基坑渗流场及涌水量的影响规律, 阐明了基坑底部土体竖向平均水力坡降演变特性, 揭示了该地岩溶区基坑底部突涌水机理, 研究结果可为富水岩溶地区深基坑工程的设计与施工提供参考。

关键词 地铁车站深基坑; 富水岩溶地层; 突涌灾害机理; 数值模拟

中图分类号 U456.3⁺²

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.021

Cause Analysis of Seepage Disaster in Deep Foundation Pit of Metro Station in Karst Stratum

WANG Xiangqiu, CHEN Shichao, XIAO Yingping
(School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, 528225, Foshan, China)

Abstract [Objective] In-depth study should be made on the seepage stability during deep foundation pit excavation in water-rich karst stratum in consideration of the water inrush disaster at the side wall or bottom of the pit during excavation construction in water-rich karst areas. [Method] Based on the deep foundation pit excavation project of Zhongshan Park Station on Foshan Metro Line 3, an in-depth research is conducted on the seepage characteristics of the deep foundation pit and the mechanism of water inrush at the pit bottom. A three dimensional numerical model of foundation pit, soil and karst cave is established, and the equivalent permeability coefficient method is used to make a coupling simulation of the seepage field in karst stratum. [Result & Conclusion] Through simulation and analysis, the law of water content in karst area of heterogeneous stratum influencing the seepage field and water inrush

quantity of the foundation pit is obtained. The evolution characteristics of vertical average hydraulic gradient of the soil at the foundation pit bottom is clarified, and the mechanism of water inrush at the foundation pit bottom in karst area is revealed. The research results can provide reference for the design and construction of deep foundation pit project in water-rich karst area.

Key words deep foundation pit of metro station; water-rich karst stratum; mechanism of water inrush disaster; numerical simulation

珠三角地区岩溶是我国覆盖型岩溶的典型代表之一, 其岩溶平面分布主要受岩石化学性质和地质构造综合控制。

由于在岩溶地层中开挖深基坑工程极易诱发涌水渗漏灾害等岩土工程问题, 国内外许多学者针对岩溶地层深基坑渗漏灾害问题开展了大量研究工作。文献[1]运用有限元方法研究了溶洞位置、埋深对支护桩位移、地面沉降及坑底隆起的影响。文献[2]运用有限差分软件对不同溶洞位置的基坑进行模拟, 研究了岩溶区的复杂地质条件对基坑开挖的影响。文献[3]采用数值模拟方法研究了富水地区溶洞直径、埋深、溶洞内承压水头对深基坑开挖稳定性的影响。文献[4]运用有限元方法研究了溶洞的不同位置、大小对深基坑支护桩内力、位移及土体位移的影响。文献[5]运用有限差分法研究了主动区不同位置、不同大小的溶洞对桩体最大水平位移和弯矩、锚索最大轴力以及地表最大沉降位移的影响规律。文献[6]基于穿越富水岩溶区深基坑涌水工程, 采用区域水文地质调查等技术手段分析了场地内岩溶发育特征和岩溶注浆止水机理。文献[7]以某地铁深基坑为例, 就场地区岩溶发育及治理方法对基坑开挖过程的影响进行相关分析。文献[8]结合岩溶地层深基坑变形滑移机理, 提出基坑支护的几种组合形式, 并采用数值模拟和正交

* 国家自然科学基金项目(51278121); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515012085, 2019A1515110837)

试验,对支护方案进行仿真分析。

但现有研究较少考虑岩溶区域富水程度对基坑工程的影响。本文依托佛山地铁3号线中山公园站深基坑工程,针对富水溶洞地层对深基坑开挖渗流稳定性影响进行分析研究。

1 工程概况

1.1 工程简介

佛山地铁3号线中山公园站为中间站,位于文昌路与货站路交叉口。其采用地下两层站台宽14 m的岛式车站,车站全长315.5 m,标准段宽为22.7 m;车站标准段底板埋深约16.88 m,换乘节点段底板埋深24.73 m。车站起终盾构端头宽度27.2 m,底板埋深约17.79 m。基坑围护结构采用地下连续墙+内支撑形式,墙底位于强、中风化岩层中。

1.2 工程地质条件

该工程所在区域地层从上至下依次为素填土、淤泥、淤泥质土、淤泥质粉细砂、淤泥质中粗砂、粉质黏土、中粗砂、强风化砂岩和中风化砂岩。地质纵剖面如图1所示。场地地下水类型主要有第四系孔隙水和基岩裂隙水,主要含水层为海陆交互相淤泥质粉细砂、淤泥质中粗砂和冲洪积粉细砂层,及中粗砂层、砾砂层,该类含水层主要呈层状分布。施工期间钻孔测得地下水静止水位埋深为1.30~5.70 m。地下水稳定水位主要受大气降雨影响,地下水的补给来源主要为相邻场地含水层侧向补给。

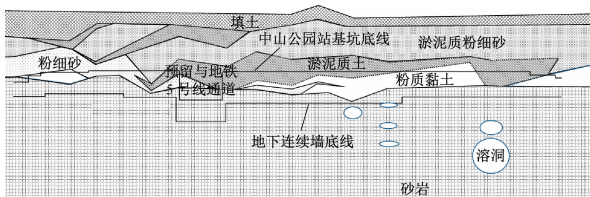


图1 佛山地铁3号线中山公园站左线地质纵剖面图

Fig.1 Left line geological longitudinal section of Zhongshan Park Station of Foshan Metro Line 3

2 岩溶发育特征

车站基坑工程所处区域存在2个岩溶发育区(如图2所示):一个岩溶发育区面积约为2 975.7 m²,另一个岩溶发育区面积约为477.7 m²。岩溶发育区揭露的溶洞高度为0.20~10.60 m,平均洞高2.89 m,溶洞顶部埋深23.40~46.00 m、层底埋深26.00~54.80 m,洞顶离车站结构底板最近距离仅

7 m。各溶洞高度差异大,主要以小于等于2 m的小型溶洞为主,揭露出的大型溶洞较少。

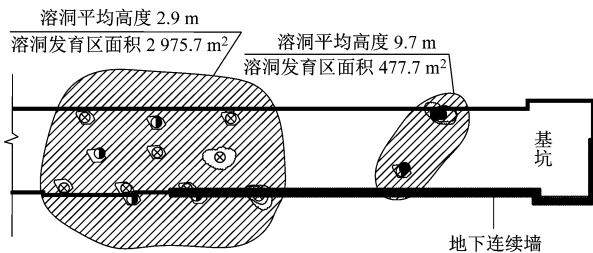
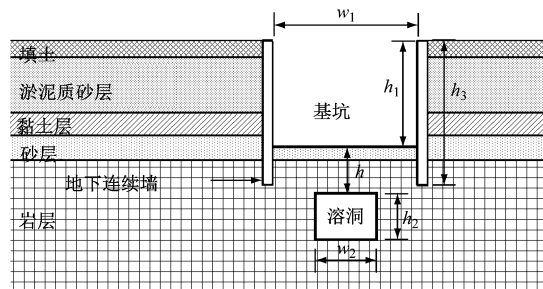


图2 岩溶发育区平面图

Fig.2 Plan of karst development area

3 溶洞的有限元模拟方法

截取溶洞区域车站基坑横断面(如图3所示)。车站基坑位于溶洞上方,溶洞对基坑周围水环境影响的数学模型应包括:①非岩溶区的达西渗流场;②溶洞区域的水流模型。其中,达西渗流场模型已经很成熟,建立溶洞区域的水流模型较困难。为了实现溶洞对基坑水环境影响的近似模拟,提出溶洞-土体系统概化数学模型和数值解决方案:扩大溶洞区域的渗透系数,用达西渗流场对溶洞区和非溶洞区进行统一模拟。



注: w_1 为基坑开挖宽度; h_1 为基坑开挖深度; h_3 为地下连续墙深度; h 为溶洞顶部至基坑底面的距离; h_2 为溶洞高度; w_2 为溶洞宽度。

图3 车站基坑-岩溶体系有限元计算模型(横断面)

Fig.3 Finite element calculation model of the station foundation pit and the karst system (cross section)

利用华南理工大学曹洪教授开发的《多层透水土层渗流计算程序》实现溶洞-土体系统渗流场的可视化数值模拟,以深入分析溶洞富水程度对基坑水环境的影响规律。

4 溶洞对基坑渗流特征的影响分析

为了深入研究溶洞渗透特性和止水帷幕施工质量缺陷对基坑渗透特征耦合影响规律,建立不同

溶洞渗透特性、不同止水帷幕施工质量的基坑三维数值分析模型。

4.1 三维数值模型建立

为简便起见,将各钻孔地层简化为六层,即填土、淤泥、淤泥质砂层、粉质黏土层、砂层和砂岩层,各土层厚度由各钻孔实测层厚确定,具体地层物理力学参数如表1所示。基于基坑周边所有钻孔的地层分布,采用线性插值得到整个区域的地层分布。

表1 中山公园站地层分布及物理力学参数

Tab. 1 Formation distribution and physical mechanical parameters of Zhaoangshan Park Station

地层号	岩性	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	渗透系数/ (cm/s)
1	填土	10.0	10.0	1.16×10^{-3}
2	淤泥	8.5	6.5	5.79×10^{-5}
3	淤泥质砂层	5.0	25.0	6.13×10^{-3}
4	粉质黏土层	16.0	11.0	1.16×10^{-4}
5	砂层	0	25.0	8.10×10^{-3}
6	岩层	25.0	25.0	4.17×10^{-4}

根据项目所在场地及渗流场影响范围来综合考虑模型的分析边界,东侧边界取至佛山水道,南侧边界取至中山公园秀丽湖,西侧和北侧边界分别以基坑向外扩约300 m计。根据勘察报告,车站基坑周边地势较为平坦,稳定水位埋深为1.30~5.70 m(相应标高为-0.87~2.52 m),故将四侧边界水头均取为2.52 m,模型底面为不透水边界。车站基坑数值分析模型及水头边界如图4所示。

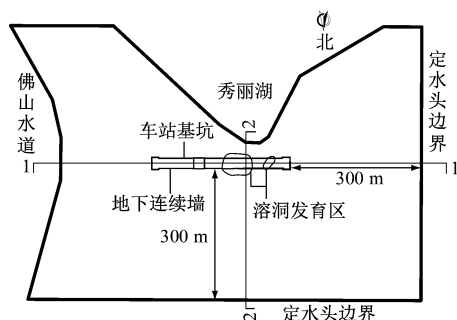


图4 中山公园站基坑数值分析模型及水头边界示意图

Fig. 4 Numerical analysis model and water head boundary of Zhongshan Park Station foundation pit

根据岩溶区填充情况及富水程度,分别取溶洞岩层的渗透系数 K_{karst} 为 4.17×10^{-4} cm/s、 1×10^{-1} cm/s、1 cm/s 和 10 cm/s,以对比分析岩溶富水程度对基坑渗流场的影响。保持溶洞渗透系数不变,研究止水帷幕施工缺陷对基坑-溶洞系统渗流场的影响。

4.2 数值模拟过程

模拟过程与实际施工工序一致,具体过程如下:

1) 建立初始模型,对模型进行分组。分别为各土层赋值,土层参数如表1所示。溶洞渗透系数取为 1×10^{-2} m/s,悬挂式止水帷幕渗透系数取为 4×10^{-6} m/s。

2) 模型的四周采用地表水位作为定水头边界,基坑开挖面使用开挖面水位为水头边界条件,分别计算基坑开挖深度为7.00 m、10.00 m 和 16.88 m (即工况1、工况2、工况3)时的渗流场。

3) 为研究富水地区溶洞对基坑涌水量的影响,改变溶洞渗透性和悬挂式止水帷幕的施工质量,并与无溶洞进行对比,分别建立数值模型进行分析。

4.3 结果分析

分别截取基坑特征纵、横断面,分析基坑周边渗流场分布特征,研究岩溶区对基坑渗流场的影响。

在基坑数值分析模型中截取纵断面,如图4中1-1断面。当基坑开挖深度为16.88 m时, K_{karst} 分别取为 4.17×10^{-4} cm/s、 1×10^{-1} cm/s、1 cm/s 和 10 cm/s 时的基坑纵断面渗流场,如图5所示。当岩溶区 K_{karst} 为 4.17×10^{-4} cm/s 时,即无岩溶区,基坑两侧土体水流流向坑内,因土层厚度不呈均匀分布,基坑四周渗流场不呈对称分布,坑底右侧土体等势线较左侧密集。随着 K_{karst} 增大,岩溶区上部土体等势线越密集,水力坡降越大。

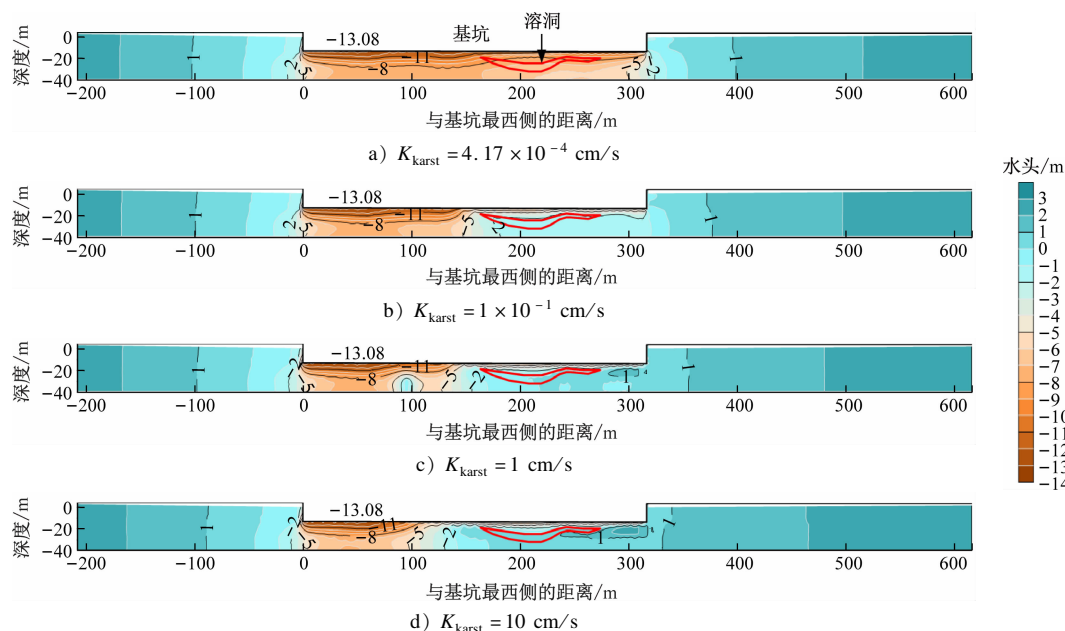
同样,在基坑数值分析模型中截取横断面,如图4中2-2断面。当基坑开挖深度为16.88 m时, K_{karst} 分别取为 4.17×10^{-4} cm/s、 1×10^{-1} cm/s、1 cm/s 和 10 cm/s 时的基坑横断面渗流场,如图6所示。当 K_{karst} 为 4.17×10^{-4} cm/s,即无岩溶区,基坑四周土体水流流向坑内。随着岩溶区等效系数增大,岩溶区上部土体等势线越密集,水力坡降越大。

5 基坑涌水量及坑底涌水机理分析

基于基坑-土体-溶洞三维数值模型,深入分析溶洞富水程度对基坑涌水量的影响规律,研究溶洞-土体系统水力坡降分布特性,以揭示基坑涌水机理。

5.1 溶洞对基坑涌水量影响分析

在止水帷幕施工质量较好情况下,分别取溶洞的 K_{karst} 为 4.17×10^{-4} cm/s、 1×10^{-1} cm/s、1 cm/s 和 10 cm/s 等4种不同数值,分3个工况建立数值分析模型计算基坑涌水量 Q ,计算结果如图7所示。工况1:基坑开挖深度为7 m时,随着 K_{karst} 增大, Q



注:横轴等于0处为基坑最西侧,向东取正,向西取负。

图5 不同 K_{karst} 时基坑 1-1 纵断面渗流场云图

Fig. 5 Seepage field clouding map of the longitudinal section for foundation pit 1-1 with different K_{karst}

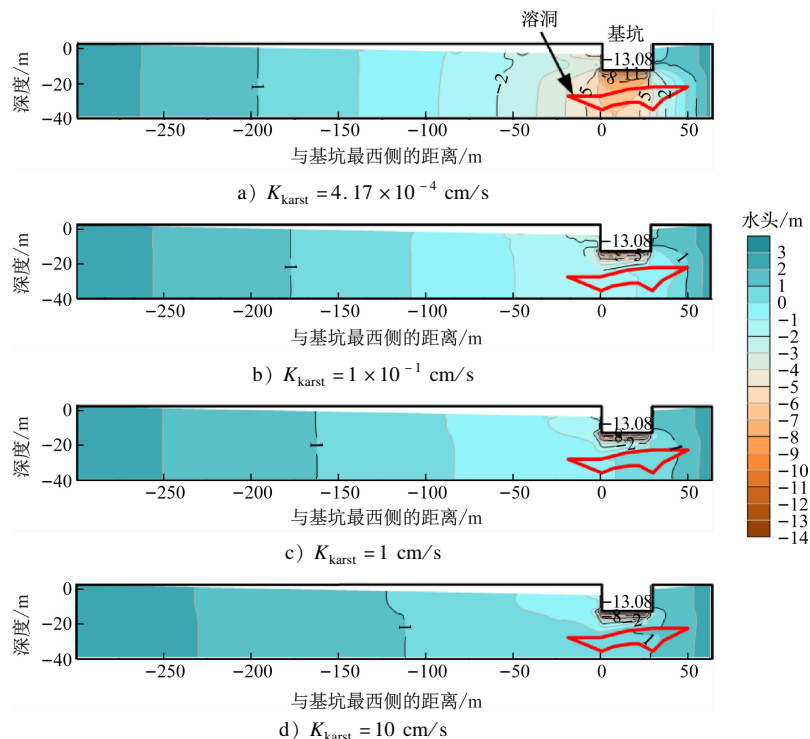


图6 不同 K_{karst} 时基坑 2-2 横断面渗流场云图

Fig. 6 Seepage field clouding map of the cross section for foundation pit 2-2 with different K_{karst}

由 $923.76 \text{ m}^3/\text{d}$ 增大至 $1647.20 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工况 2: 基坑开挖深度为 10 m 时, 随着 K_{karst} 增大, Q 由 $1329.87 \text{ m}^3/\text{d}$ 增大至 $2146.25 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工况 3: 基坑开挖深度为 16.88 m 时, 随着 K_{karst} 增大, Q 由 $2182.60 \text{ m}^3/\text{d}$

急剧增大至 $6485.67 \text{ m}^3/\text{d}$ 。当基坑开挖深度较小时, 岩溶区对基坑涌水量的影响较小。随着基坑深度增大, 其与岩溶区距离越近, 岩溶区域对基坑涌水量影响就越大。岩溶越丰富, 基坑涌水量越大。

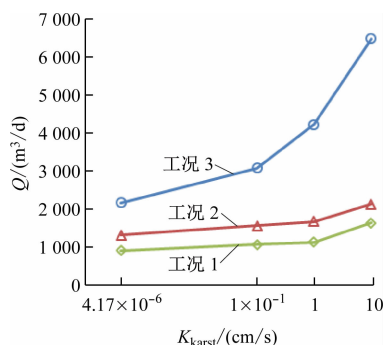


图7 溶洞区对基坑涌水量的影响

Fig. 7 Influence of karst cave area on water inrush in the foundation pit

该车站基坑内设32口降水井,井间距约20 m,井径为0.273 m,降水井进入基坑底以下5 m。采用潜水完整井公式估算基坑涌水量:

$$Q = \pi K(2H - S_d) S_d / \ln(1 + R/r_0) \quad (1)$$

式中:

Q ——基坑降水总涌水量,单位 m^3/d ;

K ——渗透系数,单位 m/d ;

H ——潜水含水层厚度,单位 m ;

S_d ——基坑地下水位降深,单位 m ;

R ——降水影响半径,单位 m , $R = 2S_d\sqrt{kH}$;

r_0 ——基坑等效半径,单位 m , $r_0 = \sqrt{A/\pi}$;

A ——基坑面积,单位 m^2 。

基坑长度为315.5 m,基坑宽度为22.7 m,故基坑面积 $A = 7\,161.85 \text{ m}^2$ 、 $r_0 = 47.8 \text{ m}$ 。

基坑涌水量估算值如表2所示。选取最不利钻孔 M3-Z3-SZS-20 的土层分布及厚度,将各土层渗透系数按厚度加权平均计算渗透系数 K 。随着基坑开挖深度增大, Q 估算值由 $2\,581 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $2\,973.08 \text{ m}^3/\text{d}$ 。 Q 估算值与 K_{karst} 取为 $1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 时的数值计算结果接近。采用潜水完整井公式估算 Q 时,无法考虑岩溶水对 Q 的影响。

表2 基坑涌水量计算表

Tab. 2 Calculation of water inrush in the foundation pit

工况	S_d/m	H	$K/(\text{m}/\text{d})$	R/m	$Q/(\text{m}^3/\text{d})$
工况 1	7.00	21.88	4.3	135.80	2 581.79
工况 2	10.00	21.88	4.3	193.99	2 811.91
工况 3	16.88	21.88	4.3	327.46	2 973.08

为了验证本文提出的岩溶地层渗透性能数值计算方法的模拟效果,取岩溶区域 $K_{\text{karst}} = 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 时,3种典型开挖工况下数值模拟、理论计算与现场实测得到的基坑涌水量进行对比分析(如图8所示)。由图8可知,基坑涌水量数值模拟值与现场实测值比较接近。

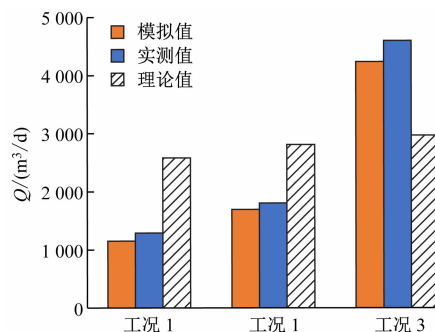


图8 3种不同工况下不同方法得出的基坑涌水量对比图

Fig. 8 Comparison of foundation pit water inrush volume obtained by different methods under 3 different working conditions

5.2 岩溶区坑底涌水机理分析

假设忽略土体之间的黏聚力,基坑底部土体要避免发生渗透破坏,需要满足下式:

$$\gamma_1 \geq i\gamma_w \quad (2)$$

式中:

γ_1 ——土体的浮重度;

γ_w ——地下水的重度;

i ——基坑底部土体的竖向平均坡降。

基于基坑-土体-溶洞三维数值模型中基坑底部土体水头分布计算结果,分析基坑底部土体竖向平均坡降演变规律,以阐明溶洞富水程度对基坑底部土体竖向平均坡降的影响,揭示岩溶区坑底涌水机理。经涌水点截取基坑纵剖面,深入分析工况3中该剖面坑底竖向水力坡降演变规律,具体分析结果如图9所示。

图9 a)~d)为分别取溶洞 K_{karst} 为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 、 1 cm/s 和 10 cm/s 时,基坑底部土体竖向平均水力坡降分布云图,当 K_{karst} 为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 时,即无岩溶区,基坑底部竖向坡降介于0~2之间。随着溶洞区 K_{karst} 增大,基坑底部竖向水力坡降增大,坑底中部和右部局部区域竖向平均水力坡降达到4.0~11.5。图9 a)中坑底右侧区域正是实际涌水点所在的位置,由此可知,基坑下方岩溶区水量越丰富,基坑底部局部区域竖向平均水力坡降就会增大,当增大至临界值时,基坑底部土体便会发生渗透破坏,甚至发生突涌事故。

6 结语

1) 基坑-土体-溶洞三维数值模型分析结果表明,岩溶区对其周围土体渗流场影响较大,岩溶区富水越强,其上方基坑底部土体等势线越密集,竖向水力坡降越大,当坑底竖向平均水力坡降增至临

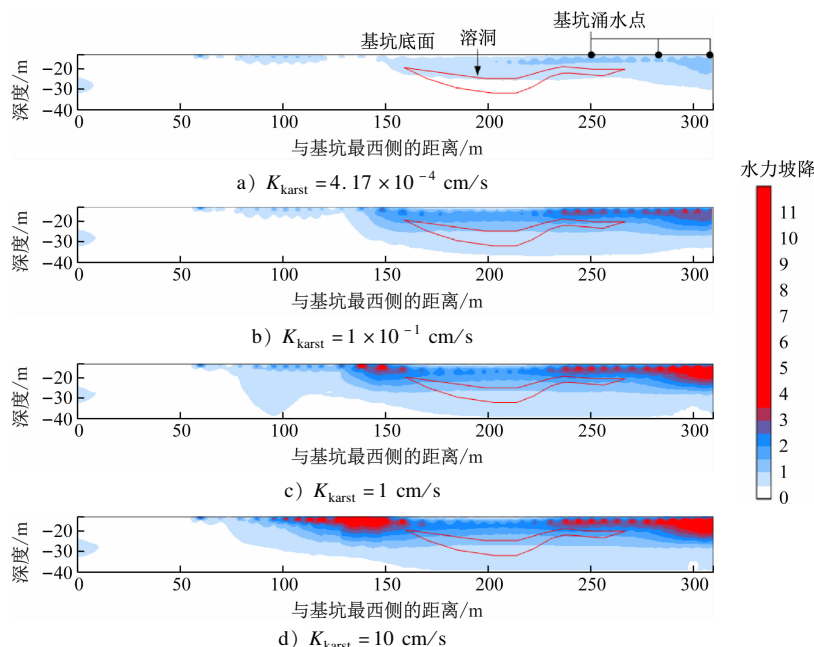


图9 不同 K_{karst} 条件下工况3的坑底水力坡降分布云图

Fig. 9 Clouding map of hydraulic gradient distribution at the pit bottom under working condition 3 with different K_{karst}

界值时,坑底土体发生渗透破坏,继而出现涌水孔洞。

2) 当基坑开挖深度较小时,岩溶区对基坑涌水量的影响较小。随着基坑开挖深度增大,其与岩溶区距离越近,岩溶区对基坑涌水量影响越大;随着岩溶区富水越强,基坑涌水量越大。

参考文献

- [1] 龚朋. 溶洞地区排桩支护方式基坑稳定性研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2018.
GONG Peng. Stability of foundation pit with pile supporting in Karst area [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2018.
- [2] 王孝宾, 姜谔男, 李兴盛, 等. 基于ZSI岩溶溶洞对基坑开挖的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 115.
WANG Xiaobin, JIANG Annan, LI Xingsheng, et al. The influence of ZSI Karst caves on foundation pit excavation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4): 115.
- [3] 陈峰, 吴绍明, 王林枫, 等. 富水地区溶洞对深基坑开挖稳定性影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1882.
CHEN Feng, WU Shaoming, WANG Linfeng, et al. Influence of Karst caves on the stability of deep foundation pit excavation in rich water area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1882.
- [4] 江杰, 王彰庆, 彭远胜, 等. 岩溶区溶洞对基坑稳定性影响及处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊1): 471.
JIANG Jie, WANG Zhangqing, PENG Yuansheng, et al. Study on

the influence of Karst cave on foundation pit stability in Karst area and its treatment technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 471.

- [5] 李金奎, 高家宁. 主动区溶洞对桩锚支护基坑稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5491.
LI Jinkui, GAO Jianing. The influence of Karst cave in active zone on stability of pile-anchor supporting foundation pit[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5491.
- [6] 廖阳, 张可能, 张岳, 等. 富水岩溶地铁深基坑注浆止水机理及效果评价[J]. 工程勘察, 2017, 45(12): 15.
LIAO Yang, ZHANG Keneng, ZHANG Yue, et al. Analysis on groundwater cut-off mechanism and grouting effect of deep Metro excavation in water-rich Karst area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(12): 15.
- [7] 王起飞. 岩溶发育区地铁深基坑施工灾害防治研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Qifei. Study on prevention and control of construction disaster of deep foundation pit of metro in Karst development area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 汲晓锋. 泉域岩溶石灰岩质深大基坑支护参数正交试验研究[J]. 防灾减灾学报, 2019, 35(1): 72.
JI Xiaofeng. Study on support parameters of rock foundation pit based on orthogonal design in Karst water[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2019, 35(1): 72.

· 收稿日期:2022-05-30 修回日期:2022-09-06 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-30 Revised:2022-09-06 Published:2024-09-10
· 通信作者:王祥秋,教授,tongji_wxq@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license