

DOI: 10.7672/sgjs2025110029

岩溶区地铁车站基坑突涌规律研究*

姬凤玲^{1,2}, 吕 慎¹, 彭远胜¹, 俞晶晶¹, 李 伟¹

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 极端环境岩土和隧道工程智能建养
全国重点实验室, 广东 深圳 518060)

[摘要] 以深圳地铁 16 号线岩溶发育区某典型车站基坑为研究对象, 开展岩溶区基坑突涌规律数值计算分析。结果表明, 基坑底部溶洞水平位置、溶洞形状、溶蚀裂隙、溶洞群串通 4 个因素对基坑底部塑性区扩展规律及突涌薄弱位置均会产生影响。单个溶洞情况下, 基坑突涌薄弱位置出现在基坑内边侧的概率较大。横向尺寸大于竖向尺寸的溶洞更易发生基坑突涌。基坑突涌薄弱位置易发生在裂隙倾斜一侧。在基坑开挖过程中, 垂直分层发育的溶洞群串通时, 上下溶洞周围的塑性区扩展规律比单个溶洞复杂。

[关键词] 地铁车站; 基坑; 溶洞; 突涌; 塑性区; 溶蚀裂隙

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0029-05

Rule of Foundation Excavation Inrush of Subway Station in Karst Area

Ji Fengling^{1,2}, Lü Shen¹, PENG Yuansheng¹, Yu Jingjing¹, Li Wei¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;
2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: Taking the foundation excavation of a typical station in the karst development area of Shenzhen Subway Line 16 as the research object, the numerical calculation and analysis of the inrush law of the foundation excavation in the karst area are carried out. The results indicate that the following four factors, the horizontal position of the karst cave at the bottom of the foundation excavation, the shape of the karst cave, the corrosion crack, and the collusion of the karst cave group, will affect the expansion law of the plastic zone at the bottom of the foundation excavation and the location of the weak point of the inrush. In the case of a single karst cave, the weak position of the foundation excavation inrush is more likely to appear on the inner side of the foundation excavation. The karst cave with a transverse size larger than a vertical size is more prone to foundation excavation inrush. The weak position of the foundation excavation inrush is prone to the occurrence on the inclined side of the crack. In the process of foundation excavation, the expansion law of the plastic zone around the upper and lower karst caves is more complicated than that of a single karst cave when the vertical layered karst cave group collides.

Keywords: subway station; foundation excavation; dissolved cavern; inrush; plastic zone; karst fissures

0 引言

岩溶发育区地铁车站及其配线段一般采用明挖法施工。由于岩溶发育的复杂性, 加之现有的钻探、物探技术均存在一定的局限性, 岩溶发育区基坑底部常常会有部分未被查明的溶洞。基坑开挖

在一定程度上改变了围岩应力状态, 从而也改变了原有溶洞的稳定状态, 易带来毫无预兆的风险, 尤其是含高压岩溶水的溶洞常发生突发性、破坏性大的基坑突涌风险。一旦发生险情, 处理难度大, 且延误工期。学者们围绕基坑突涌机理^[1-3]、隔水层防突厚度^[4-6]、基坑突涌治理技术^[7-10]等开展了大量研究工作, 取得了许多具有理论意义和工程应用价值的研究成果, 但在基坑突涌机理方面, 这些研究成果主要针对基坑底部为大范围承压含水层的情况, 鲜有针对岩溶区基坑突涌机理方面的研究。隔

* 国家自然科学基金重点项目(51938008)

[作者简介] 姬凤玲, 副教授, 硕士生导师, E-mail: 2126413839@qq.com

[通信作者] 吕 慎, 副教授, 硕士生导师, E-mail: Lvshen@szu.edu.cn

[收稿日期] 2024-12-15

水层防突厚度方面的研究成果,主要针对岩溶隧道周边防突层稳定性及其安全厚度、隧道工作面前方岩墙稳定性及安全厚度,鲜有针对岩溶区基坑底部抗突层安全厚度的研究成果。随着岩溶地层中修建地铁车站工程实例越来越多,我国学者在岩溶区基坑突涌治理技术方面成果丰硕。但是这些治理技术主要依靠工程经验,缺乏理论指导,属于被动防控技术。只有正确认识岩溶区基坑的突涌规律,才能为基坑突涌风险的主动防控技术提供科学指导。因此,本文利用数值模拟法对岩溶区基坑的突涌规律进行总结分析。

1 工程概况

深圳地铁 16 号线岩溶发育区某典型车站基坑开挖深度 17.14m,宽 22m,支护结构为地下连续墙+3 道内支撑。其中地下连续墙厚 800mm、长 23.5m。第 1 道为钢筋混凝土支撑,截面尺寸为 800mm×1 000mm。第 2,3 道支撑均为 $\phi 609$, $t=16$ mm 的钢管支撑。

2 数值模拟

采用 MIDAS 有限元软件进行数值模拟分析。各土层及支护结构参数如表 1 所示。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	侧压力 系数	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	弹性 模量/ MPa	泊松比
素填土	19.0	0.67	28.0	13.0	8.0	0.40
粉质黏土①	19.0	0.66	24.1	13.9	4.7	0.35
粉质黏土②	19.2	0.67	31.6	16.4	5.0	0.33
粉质黏土③	19.5	0.66	39.2	19.8	6.0	0.31
微风化灰岩	24.0	0.33	500.0	33.0	3 000	0.30
地下连续墙	22.0	—	—	—	30 000	0.30
混凝土支撑	28.0	—	—	—	30 000	0.20
钢支撑	78.5	—	—	—	210 000	0.25

当溶洞埋藏深度 $<5\text{m}$ 时,这些溶洞易于被准确勘察,工程中会预先处理这些溶洞。因此在数值模拟时,应选择距离基坑底部 $>5\text{m}$ 的溶洞进行分析。基坑底部与溶洞之间的岩土体能够起到阻止基坑突涌灾害发生的作用,因此将这部分岩土体称为抗突体。在基坑开挖卸载和承压水压力共同作用下,抗突体中产生塑性区。对于基坑突涌通道的研究,目前的主流研究方法是基于弹塑理论分析基坑内部的塑性破坏区域并将塑性破坏区作为潜在涌水通道^[11]。本文基于塑性区的扩展规律,分析基坑开挖卸载作用下含高压岩溶水溶洞引发的基坑突涌规律。

3 数值模拟结果分析

3.1 溶洞水平位置对基坑底部塑性区的影响

含有承压水的单个溶洞水平位置变化对基坑底部塑性区的影响如图 1 所示。当溶洞位于基坑底部中部时,溶洞周围的塑性区从溶洞两侧沿着一定的角度向上发展。当溶洞位于基坑底部侧边时,基坑底部塑性区易于在溶洞一侧发展。与溶洞位于基坑底部中部的情况相比,当溶洞位于基坑底部内侧边时,塑性区贯通所需的临界水压力为中部的 0.58%,说明相同规模的溶洞位于基坑底部内侧边比位于中部更易发生基坑突涌。与溶洞位于基坑底部中部的情况相比,当溶洞位于基坑底部外侧边时,塑性区贯通所需的临界水压力为中部的 1.79%,这说明相同规模的溶洞位于基坑底部外侧边时不易发生基坑突涌。这主要是由于溶洞位于基坑外侧时,基坑开挖卸载影响小,不利于塑性区贯通。支护结构的屏蔽效应也会抑制溶洞周围塑性区的扩展。

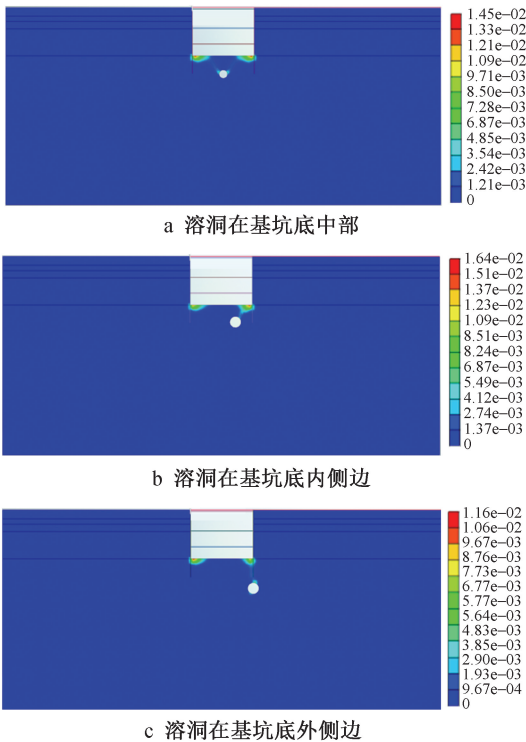


图 1 溶洞水平位置变化时的塑性区贯通云图
Fig. 1 Cloud map of through plastic zone during the horizontal position of cave changing

3.2 溶洞形状对基坑底部塑性区的影响

实际工程中遇到的溶洞形状多种多样,为了考虑溶洞形状的影响效应,对处于基坑底部中心位置、面积相同但形状不同的溶洞塑性区进行研究(见图 2)。由图 2 可知,在相同承压水压力下,溶洞形状对塑性区扩展有明显影响。

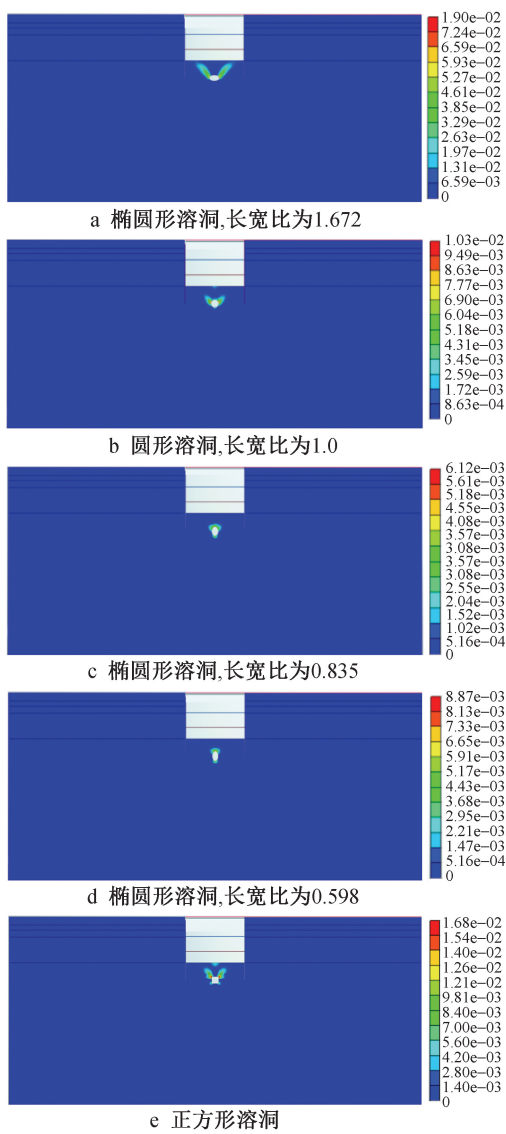


图2 溶洞形状对基坑底部塑性区的影响

Fig.2 Influence of cave shape on the plastic zone at the bottom of foundation excavation

不同形状的溶洞位于基坑底部中心位置时,溶洞周围的塑性区均从溶洞两侧沿着一定的角度向上发展。这说明基坑突涌薄弱点出现在基坑边侧的可能性大于中部。这主要是由于基坑支护结构及开挖卸载效应对基坑底部剪应力分布产生影响所致。基坑支护结构及开挖卸载下基坑底部剪应力等值线图如图3所示。基坑设置支护结构并进行开挖卸载后,靠近坑底两侧的岩土体为高剪应力区域,而坑底中心处的岩土体为低剪应力区,这就意味着与坑底中心位置相比,坑底两侧的岩土体为局部薄弱处。显然,在高岩溶承压水压力作用下,溶洞周围的抗突体塑性区向上扩展延伸时,更易与坑底两侧抗突体的局部薄弱处相联通。因此,在基坑开挖卸荷扰动及岩溶高压共同影响下,基坑边侧

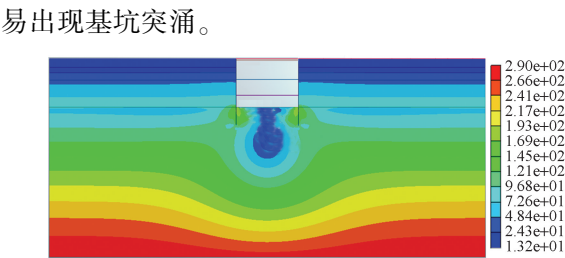


图3 开挖卸载下基坑底部剪应力等值线(单位:kN·m⁻²)

Fig.3 Contour of shear stress at the bottom of foundation excavation under unloading(unit:kN·m⁻²)

对不同形状溶洞塑性区竖向分布最大值进行统计分析,得到溶洞形状对基坑底部塑性区竖向最大范围影响如图4所示,其中,纵坐标代表不同形状溶洞塑性区竖向分布最大值与圆形溶洞的比值。由图4可知,在相同的承压水压力下,横向发育的椭圆形溶洞和方形溶洞周边塑性区范围大于圆形溶洞和竖向发育的椭圆形溶洞,这表明横向尺寸大于竖向尺寸的溶洞更容易发生基坑突涌。这是由于在基坑开挖卸载后,横向尺寸较大的溶洞与基坑底部两侧的高剪应力区域距离较小,塑性区更易扩展。

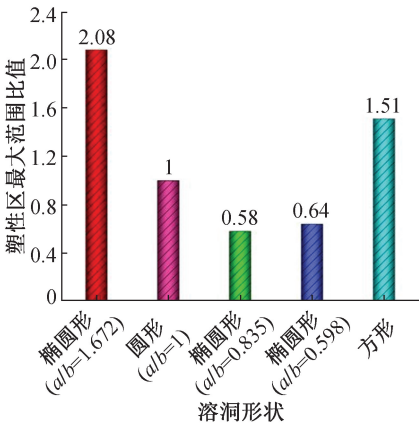


图4 溶洞形状对基底塑性区竖向最大范围的影响

Fig.4 Influence of cave shape on the maximum vertical range of the plastic zone

3.3 溶蚀裂隙对基坑底部塑性区的影响

深圳地铁16号线岩土工程勘察资料表明,岩溶发育区可溶岩中常存在溶蚀裂隙,如图5所示。这些溶蚀裂隙主要是由含有CO₂的侵蚀性地下水流经可溶岩体中构造节理、岩层面时溶蚀而成。采用MIDAS有限元软件中的Jointed Rock模型模拟溶洞上方岩体沿某一方向大量发育的溶蚀裂隙。不同倾角的溶蚀裂隙对基坑底部塑性区的影响如图6所示。

与图1a中基坑底部完整岩体的情况相比,当溶洞上部溶蚀裂隙倾角在15°~75°时,坑底左侧塑性区分布范围更大;当溶洞上部溶蚀裂隙倾角



图 5 岩芯样中的溶蚀裂隙
Fig. 5 Karst fissures in cores

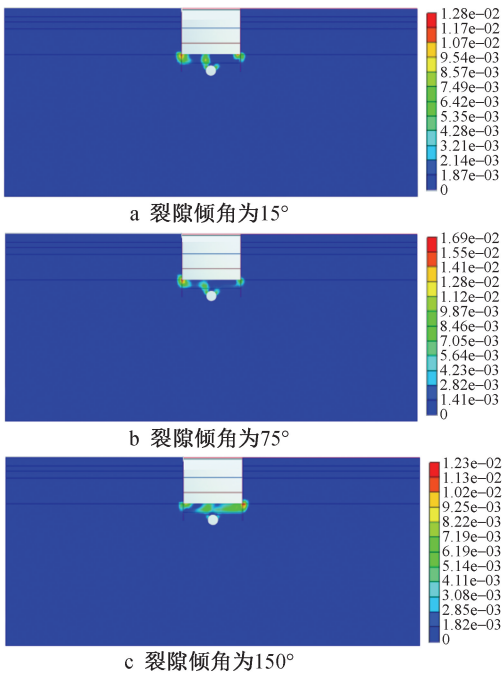


图 6 裂隙倾角变化时的塑性区贯通云图
Fig. 6 Cloud map of through plastic zone during the inclination of fissure changing

在 105°~150°时,坑底右侧塑性区分布范围更大,这说明基坑突涌薄弱位置易发生在溶蚀裂隙倾斜一侧。当溶洞上部溶蚀裂隙倾角在 30°~60°,120°~150°时,基坑底部突涌薄弱范围相对较大,增加了基坑突涌风险应急治理的难度。当基坑底部岩体内所发育的溶蚀裂隙倾角分别为 15°,30°,45°,60°,75°,105°,120°,135°,150°时,发生基坑突涌所需要的临界水压力分别为完整岩体的 85.4%,81.3%,79.2%,80.6%,83.3%,83.3%,80.6%,79.2%,81.3%。这表明基坑底部岩体中溶蚀裂隙的存在降低了基坑突涌风险发生所需的临界水压力,增加了基坑突涌的风险。因此,在岩溶区进行基坑工程建设时,岩溶专项勘察报告应尽可能提供基坑底部岩体中溶蚀裂隙分布及发育情况的详细数据资料,以提高岩溶区基坑突涌风险分析的可靠度。

3.4 串珠状溶洞对基坑底部塑性区的影响

地下水沿着可溶岩的岩面或裂隙发生垂直或

水平渗流,不断溶蚀可溶岩。随着溶蚀作用的不断加强,溶洞系统不断扩大,形成一系列如同连串珍珠形状的溶洞群,即串珠状溶洞^[12]。按照溶洞群串通成因可划分为 2 种类型:①地质历史时期由自然地质作用形成的已串通的溶洞群,对于已串通的溶洞群及水平向发育的连串溶洞群,一般按单个大型溶洞考虑;②后期由于工程施工及溶洞内承压水压力增大而串通的溶洞群。深圳地铁 16 号线岩土工程勘察资料表明,岩溶发育区较多场地存在垂直分层、距离较近但尚未串通的溶洞群,如图 7 所示。本研究重点分析这种溶洞群在岩溶承压水压力作用下相互贯通及塑性区的发展规律。



图 7 基坑底部勘察钻孔
Fig. 7 Foundation excavation bottom survey borehole

基坑底部中心存在 2 个串珠状溶洞,基坑底部塑性区扩展如图 8 所示。由图 8 可知,2 个串珠状溶洞的塑性区范围不同,下部溶洞受到上部溶洞影响,塑性区从溶洞上部两侧开始出现并向上扩展。而上部溶洞的塑性区则从溶洞下部两侧开始出现,并向上部及两侧扩展;随着溶洞内承压水压力的增大,溶洞间岩体逐渐破坏,并导致上下 2 个溶洞的塑性区贯通,且在溶洞两侧首先贯通;当溶洞内承压水压力继续增大,2 个溶洞的塑性区贯通会从溶洞两侧沿着一定的角度向上发展并贯通到基坑底部。当 2 个串珠状溶洞贯通时,溶洞周围的塑性区与单个溶洞的塑性区分布不同。这表明 2 个含有承压水的串珠状溶洞存在应力叠加区,应力叠加使其应力分布与单个溶洞不同,在基坑开挖过程中易引起更加复杂的围岩应力分布。

研究规律表明,岩溶区基坑开挖过程中所产生的基坑突涌风险,不仅要注意单个溶洞,还需注意溶洞群间是否会贯通,尤其要特别注意深部具有高压、大体量和良好补给通道的溶洞。一旦这种溶洞与其上部的小溶洞贯通,对基坑底部抗突岩土体

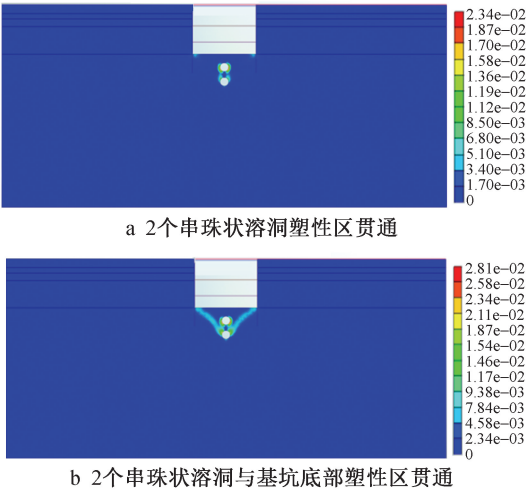


图 8 串珠状溶洞对基坑底部塑性区影响

Fig.8 Influence of on plastic beaded karst caverns zone of foundation excavation bottom

的破坏作用会更强,对基坑工程造成的突涌危害会更严重。

4 结语

- 1)岩溶发育区基坑突涌是在基坑开挖卸荷扰动及溶洞内高承压水压共同影响下发生的。
- 2)溶洞水平位置、形状对基坑底部塑性区扩展方向、塑性区贯通路径会产生不同的影响。相同规模时,基坑底内侧边的溶洞比中部、外侧边溶洞更易发生基坑突涌。横向尺寸大于竖向尺寸的溶洞更易发生基坑突涌。
- 3)基坑底部岩体中溶蚀裂隙的存在增加了基坑突涌风险。基坑突涌薄弱位置易发生在溶蚀裂隙倾斜一侧。
- 4)当基坑底部存在含有承压水的串珠状溶洞时,串珠状溶洞之间存在应力叠加区,在基坑开挖过程中易引起更加复杂的围岩应力分布,增大了基坑突涌风险。

参考文献:

[1] 孙王永,周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(12):2551-2557.
SUN Y Y, ZHOU S H. Mode and mechanism of bursting in foundation pit based on centrifugal model test [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29 (12): 2551-2557.

[2] 李军,李亮亮. 承压水地层基坑坑底压拉突涌评价与物理试验[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(3): 670-674,679.
LI J, LI L L. Compression-tension failure evaluation and physical experiment for confined water foundation pit intruding [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12 (3): 670-674, 679.

[3] 丁春林,朱恺,叶丹. 承压水引发基坑突涌塑性破坏抑制因素分析[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(S2):1594-1599.
DING C L, ZHU K, YE D. Analysis on inhibiting factors of intruding plastic failure caused by confined water in foundation pit [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009, 5 (S2): 1594-1599.

[4] LU Y L, WANG L G. Numerical simulation of mining-induced fracture evolution and water flow in coal seam floor above a confined aquifer [J]. Computers and geotechnics, 2015, 67: 157-171.

[5] 李利平,朱宇泽,周宗青,等. 隧道突涌水灾害防突厚度计算方法及适用性评价[J]. 岩土力学,2020,41(S1):41-50,170.
LI L P, ZHU Y Z, ZHOU Z Q, et al. Calculation method and applicability evaluation of thickness for preventing sudden water influx disasters in tunnels [J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41 (S1): 41-50, 170.

[6] 郭佳奇,陈建勋,陈帆,等. 岩溶隧道断续节理掌子面突水判据及灾变过程[J]. 中国公路学报,2018,31(10):118-129.
GUO J Q, CHEN J X, CHEN F, et al. Water intrush criterion and catastrophe process of a karst tunnel face with non-persistent joints [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31 (10): 118-129.

[7] 郭佑雄,李明,蒙长坤,等. 岩溶地质深基坑涌水封堵技术研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(3): 97-100.
GUO Y X, LI M, MENG C K, et al. Study on water plugging technology of deep foundation excavation in karst geology [J]. Construction technology, 2023, 52 (3): 97-100.

[8] 孟栋,徐壮,罗小刚,等. 岩溶发育区地铁车站基坑突涌影响因素与处理技术研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):133-138.
MENG D, XU Z, LUO X G, et al. Influencing factors and treatment technology for foundation excavation intrush of subway station in karst development area [J]. Construction technology, 2022, 51 (21): 133-138.

[9] 万维燕. 岩溶区地铁基坑涌水治理技术研究[J]. 铁道建筑技术,2017(12):17-19,42.
WAN W Y. Research on the water gushing treatment technology of subway foundation pit in karst area [J]. Railway construction technology, 2017 (12): 17-19, 42.

[10] 金鲍,李俊才,江天玺,等. 岩溶及断层破碎带地层基坑设计与坑底突涌治理[J]. 人民长江,2017,48(19):85-90.
JIN B, LI J C, JIANG T Q, et al. Study on optimization design and intruding control technology for deep-foundation pit in karst and fault fracture zone [J]. Yangtze river, 2017, 48 (19): 85-90.

[11] 丁春林,王东方. 基于塑性破坏的承压水基坑突涌计算模型研究[J]. 工程力学,2007,24(11):126-131.
DING C L, WANG D F. A study on calculation model for piping in foundation pit with confined underground water based on plastic failure [J]. Engineering mechanics, 2007, 24 (11): 126-131.

[12] 陈自飞. 水压充填型串珠溶洞对隧道稳定性影响分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
CHEN Z F. Stability of hydraulic filled bead cave to tunnel impact analysis [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.