

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2023.05.017

无锡浅埋岩溶发育特征及其与隧道安全距离研究

郭书兰^{1,2}, 阎长虹³, 俞良晨³, 闫超^{1,2*}, 李慧⁴, 徐源⁴

(1. 智能地下探测技术重点实验室, 安徽建筑大学, 合肥, 230601; 2. 安徽建筑大学土木工程学院, 合肥, 230601;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023; 4. 南京地铁建设有限责任公司, 南京, 210008)

摘要:在江苏无锡惠山附近修建地铁过程中发现了较多的浅埋岩溶,通过钻孔资料和跨孔地震CT试验对该地的岩溶发育特征进行了详细分析.同时,根据溶洞的大小、位置和填充等情况,将其分为四种类型.为了探讨该场区地铁隧道开挖后的稳定性问题,采用有限差分的方法,研究了隧道与溶洞之间的距离及溶洞填充物对隧道整体稳定性的影响.最后,根据设计规范,确定了隧道与溶洞之间的安全距离.结果表明,场区内大部分溶洞呈扁球形或椭球形,并由含砾石的粉质黏土或淤泥质粉质黏土充填,最发育的溶洞埋深在26~30 m和32~36 m,溶洞直径为1~10 m;综合来看场区内I型溶洞对隧道安全施工的威胁最小;四种岩溶类型与隧道之间的安全距离为5 m或 ≥ 11 m.本研究成果可为江苏省浅埋岩溶地区其他拟建隧道的设计和施工提供技术参考.

关键词:无锡地区,浅埋岩溶,盾构隧道,稳定性,安全距离,数值模拟

中图分类号:P642

文献标志码:A

Characteristics of shallow buried karst and its safety distance to tunnel in Wuxi city, Jiangsu province

Guo Shulan^{1,2}, Yan Changhong³, Yu Liangchen³, Yan Chao^{1,2*}, Li Hui⁴, Xu Yuan⁴

(1. Key Laboratory of Intelligent Underground Detection Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei, 230601, China;
2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, 230601, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 4. Nanjing Metro Group Co., Ltd, Nanjing, 210008, China)

Abstract: During the construction of subway in Wuxi city, Jiangsu province, shallow karst was found near the Huishan mountain. The karst development characteristics of this karst development area were analysed through borehole data and cross hole seismic CT field test. Based on their size, position, and type of filling, we divided these shallow karst caves into four types. Aimed at exploring the instability of the tunnel after excavation, numerical analyses have been developed by using the Finite difference method. Both the effects of the distance between tunnel and karst caves and the effects of the filling of the cavities on the overall stability of the rock mass around the tunnel have been investigated. According to the design criteria, safety distance between tunnel and karst caves was determined. The results show that most of the karst caves in the site are spheroid or ellipsoid and filled with silty clay or muddy silty clay containing gravel. The burial depth of the most developed karst caves is between 26~30 m and 32~36 m, and the diameter of the karst caves is 1m to 10m; By comparison, the type I karst cave poses the least threat to the safe construction of the tunnel; The safe distance is 5m or ≥ 11 m. The research results can provide technical reference for the design and construction of other proposed tunnels in shallow karst areas of Jiangsu province.

基金项目:国家自然科学基金(42077232),安徽省住房和城乡建设科学技术计划(2022-YF017),安徽建筑大学引进人才及博士启动基金(2022QDZ26)

收稿日期:2023-05-13

* 通讯联系人, E-mail: 2904655474@qq.com

Key words: Wuxi city, shallow karst, shield tunnel, stability, safety distance, numerical simulation

近年来,为了缓解交通拥堵,地下隧道工程发展迅速^[1-3]. 而我国是一个岩溶广泛分布的国家,在地下隧道施工过程中经常会遭遇岩溶,导致地面塌陷、隧道突水、掌子面失稳等地质灾害^[4-5],造成重大的人员伤亡和经济损失. 因此,岩溶地区的地下施工安全成为亟待解决的问题,国内外学者对其开展了一系列的研究. Ren et al^[6]依据相关资料对广州市的岩溶地质条件进行分析,总结了广州地铁施工过程中潜在的岩溶地质灾害,提出了相应的应对措施. Zhang et al^[7]则利用模糊评估系统对隧道施工中可能遭遇的岩溶地质问题进行了预测,模糊评估系统中应用探地雷达、瞬变电磁法等物探方法,可以较为准确地提供施工区间的岩溶地质特征,为隧道施工灾害防范提供强有力的技术支撑. 常威等^[8]以张家界—吉首—怀化高速铁路的兰花隧道为例,在岩溶水文地质调查基础上结合地下水多元示踪技术,查明了兰花隧道区各岩溶地下水系统以及地下暗河管道的空间展布,并开展了相关隧道水害预测工作. 吴远斌等^[9]以重庆中梁山地区隧道工程为例,研究了隧道开挖影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策.

在岩溶地区进行地下工程施工时必须了解场区的岩溶发育特征,才能采取对应的预防措施,防止施工过程中岩溶地质灾害的发生^[10-11]. Guo et al^[12]针对无锡地铁隧道施工中遭遇的浅埋岩溶地质问题利用自主研发的CT物探技术对区域岩溶地质特征进行了勘查与分析,得到无锡地区浅埋岩溶发育机理与分布规律,并成功地应用到盾构掘进选线与地质灾害预防中. 李华明等^[13]以峨汉高速的庙子坪隧道为研究对象,开展隧道沿线岩溶发育特征的探测,并通过现场监测数据分析了岩溶发育特征对隧道开挖的影响. 与此同时,在岩溶区查明了岩溶发育特征之后进行隧道施工仍然会遭遇许多地质问题,其中水文地质条件和工程地质条件复杂且具有不确定性尤为突出. 柳林等^[14]结合南宁某地下工程施工过程中遭遇的地面塌陷问题展开机理分析,研究结果表明研究区场区内岩溶强发育,在施工过程中抽水导致发生潜

蚀作用,从而发生了地面塌陷.

无锡地区地处苏南城市群核心地带,近年来随着其地铁隧道的大量建设以及地下空间的不断开发,浅埋岩溶侵蚀灾害问题越来越突出,在施工过程中稍有不慎便会因岩溶地质灾害而引发工程事故. 在过去,由于无锡地区岩溶分布不广泛、规模也较小,只有在工程建设过程中遇到岩溶时才会对其进行探测和治理,缺乏对岩溶的成因、发育规律及其溶蚀作用的系统研究,隧道工程施工更是面临“无经可取”的窘境. 为此,本文针对这一现状,开展无锡典型浅埋岩溶区的岩溶发育特征探测及分类,并结合无锡某地铁隧道具体工程对隧道与溶洞之间的安全距离进行研究,可为无锡浅埋岩溶区隧道工程施工提供指导.

1 地质背景

无锡市位于江苏省南部,北依长江,南临太湖,为长江三角洲冲积平原地貌. 在地铁建设过程中,靠近惠山附近发现了较多的浅埋藏型岩溶,对地铁施工及运营期具有潜在的岩溶灾害危险性. 其中研究区地铁隧道及勘探点的平面布置如图1a,典型工程地质剖面图如图1b所示. 经过调查,研究区基岩由石炭系砂岩组成,上覆二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系地层. 灰岩位于中石炭统(C₂h)-上石炭统(C₃c)内,呈灰白色,隐晶质结构,块状构造,按风化程度可分为强风化灰岩、弱风化灰岩和微风化灰岩,原岩结构构造清晰,主要矿物成分为方解石、白云石等,局部可见方解石脉. 研究区灰岩在地铁线路范围内有一定起伏,标高约为-18~-30 m,地层向东南倾,倾角10°~20°.

通过调查与试验分析发现,场区内含水层由潜水、岩溶水和裂隙水组成,场区内地下水沿地层向东南方向流动,且腐蚀性CO₂含量丰富(平均10.34 mg·L⁻¹). 因为场区地表分布渗透性较差的填土,地表水对岩溶发育的影响不大. 然而,由于离山很近,降雨会沿着山两侧的岩石裂缝和断裂带向下渗透,形成地下水,而且地势陡峭,地下水

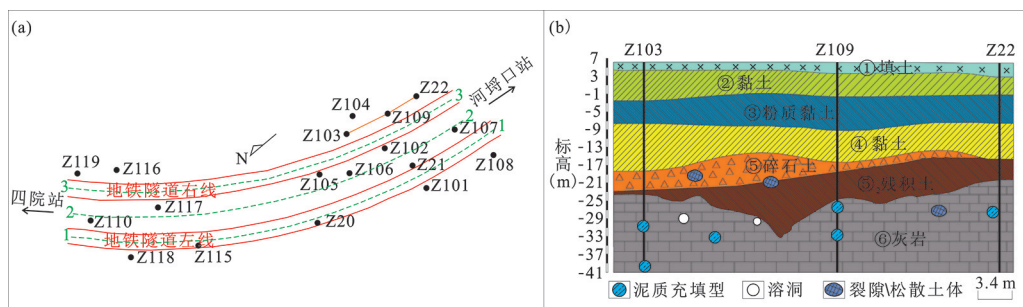


图 1 研究区地铁隧道和勘探点平面布置图(a)及典型工程地质剖面图(b)

Fig. 1 Layout plan of subway tunnel and exploration points (a), typical engineering geological profile (b)

流动性较大. 另外,场区内有两条大型断层:苏锡常断层以及和桥-阳山断层,还有一些向西北倾斜 $50^{\circ}\sim 71^{\circ}$ 的小断层,这些断层的存在为水的运移提供了通道. 因此,活跃的地下水在岩溶形成过程中起着主导作用,为岩溶洞穴和裂缝的形成创造了适宜的环境(图2).

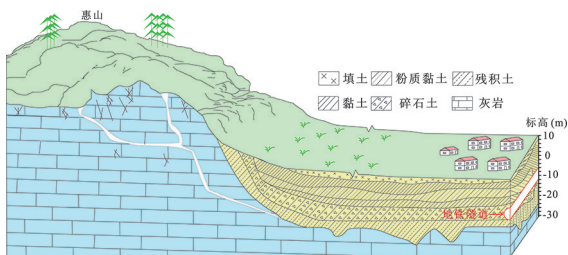


图 2 研究区三维地形示意图

Fig. 2 3D topographic map of the study area

研究区在地铁施工过程中,由于纵坡的需要,隧道的埋深会发生一定程度的变化,隧道穿越的地层主要为黏土、碎石土、粉质黏土,局部底板坐落在强风化灰岩等岩层上,地层的力学性质差异很大;另外,场区位于建筑物密集区,地下管线分布较多,很可能因不均匀沉降问题造成一系列的工程地质问题.

2 浅埋岩溶发育特征

2.1 野外探测 为了探测场区的岩溶发育情况,采用钻探和跨孔CT相结合的方法,对场区的岩溶进行探测. 其中根据周边环境共布置了18个钻孔(图1a),钻孔深度标高达 -42 m. 依据钻孔结果发现溶洞的顶板位于标高 $-17\sim -37$ m处,溶洞的最小球直径(椭球长轴)为 1.56 m,最大直径(长轴)为 12.10 m,如图3所示. 从图中可以看

出,一些溶洞完全由硬塑性黏土填充,另一些溶洞由可塑、流体状的粉质黏土半填充,同时还有空的溶洞存在.

为了详细探测场区内发育的岩溶,研究区采用了跨孔CT技术对溶洞、土洞和岩体破碎位置进行探测. 野外探测设备主要包括电火花激发装置、水下检波器、地震仪和笔记本电脑. 采用一个孔激发,另外一个孔接收的方式,在一个钻孔内放置连接 220 V交流电的电火花激发装置,在另外两个孔内分别放置一串检波器(图4a). 当电火花装置激发后,探头放电产生汽化发生爆炸,通过光电传感器将光信号转化为电信号,地震仪接收电信号,采样频率为 0.125 ms,记录长度为 0.2 s,由笔记本电脑负责记录及数据处理(图4b). 解译方法则根据触发信号为零延的特性,通过地震仪将瞬时激发的人工地震波准确记录下来,利用广义最小二乘法进行剖分单元的波速计算,将CT弹性纵波绘制成波速等值线云图,最后根据弹性波在岩土体内的传播速度变化特征来推断介质的空间分布情况(图4c).

利用上述的跨孔CT技术,在研究区场地内共发现了29个溶洞(图5). 大部分溶洞呈扁圆形或椭圆形,由含砾石的粉质黏土或淤泥质粉质黏土填充,直径(长轴)在 $1\sim 10$ m.

2.2 岩溶发育特征及其分类 岩溶的控制因素包括地形、构造特征、降雨和地下水. 此外,人类活动,尤其是非法开采地下水,在加速岩溶形成方面也发挥了重要作用. 另外,由于岩溶发育在不同时期,岩溶塌陷也会在不同时期发生,导致有些溶洞与第四纪沉积物具有很好的相关性,有时甚至形成土洞.

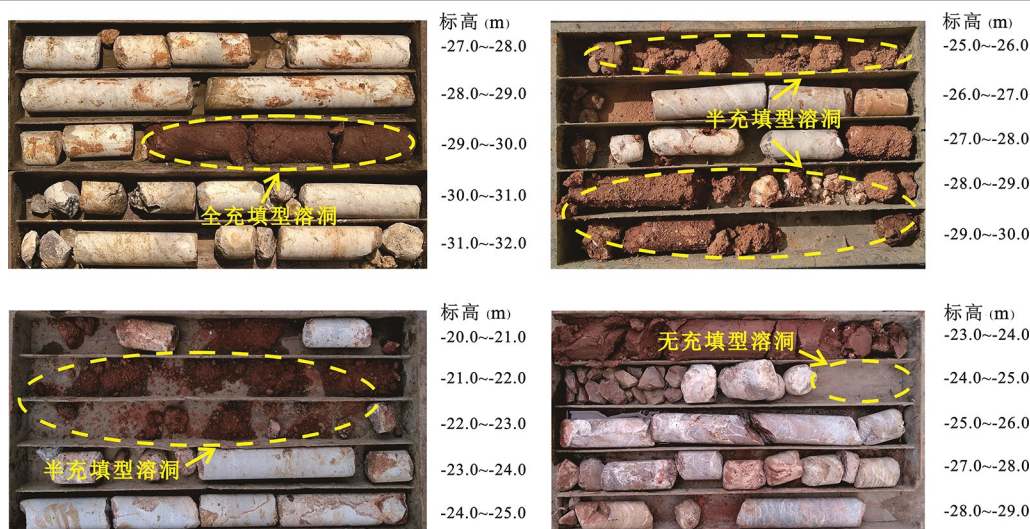


图3 钻孔岩溶照片

Fig. 3 Photos of karst caves in the boreholes

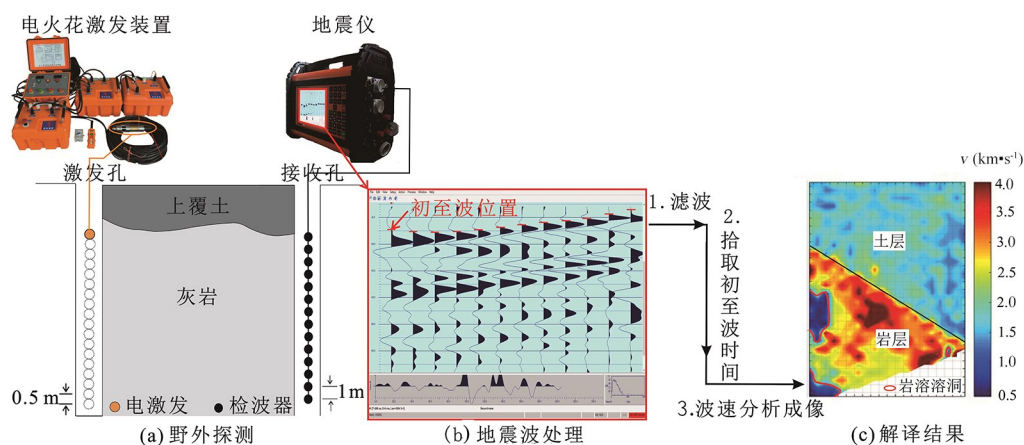


图4 跨孔CT探测系统

Fig. 4 Working flowcharts of the cross-hole seismic CT techniques

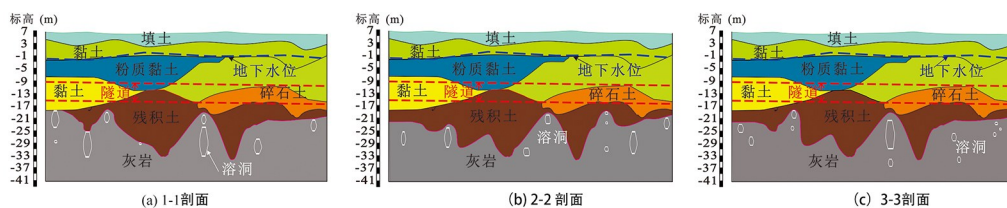


图5 基于跨孔CT解译结果的场区岩溶发育图

Fig. 5 Karst development map of the site based on cross hole CT interpretation results

根据探测得到的溶洞大小、位置和填充类型以及对地铁隧道的潜在影响,本文将研究区内的溶洞分为四种类型,如表1所示,其中Ⅱ型溶洞在研究区内最为发育。

Ⅰ型:在土层和岩石界面下方发育,呈椭球形,填充物主要为含砾石的粉质黏土,其性质与土

覆土层相同。溶洞顶层厚度一般较小,部分地段与第四系地层相连。这些溶洞是在石灰岩暴露并压实 Q_3 层后不久形成的。

Ⅱ型:是由古岩溶进一步侵蚀而成,在土层和岩石界面下方发育,呈现出上部水平椭球形,下部扁球形的特殊形状,并且溶洞之间有良好的连通

表 1 场区溶洞分类表
Table 1 Classification of karst cave

| 岩溶类型 | 直径(长轴) | 溶洞距土岩界面最小距离(m) | 充填物 |
|------|-------------------------------------------------------|----------------|------------|
| I | ≥ 10 m | 0.5 | 含砾石粉质黏土 |
| II | 6 m \leq 上部溶洞长轴 <10 m 4 m \leq 下部溶洞长轴 <8 m | 1.0 | 淤泥质粉质黏土全充填 |
| III | 8 m \leq 长轴 <10 m | 0.0 | 半充填淤泥质粉质黏土 |
| IV | <4 m | 0.5 | 无充填 |

性,很容易进一步侵蚀扩大。

III型:溶洞顶部近乎与土岩界面相切,呈水平椭圆形,是在 Q_3 沉积后形成的,随着时间的推移,它们的规模不断扩大,形成新的岩溶。

IV型:溶洞发育在灰岩的中部,规模较小。周围岩体中节理裂缝发育。它们是典型的新近形成的溶洞,规模在缓慢增加。

3 溶洞与隧道间的安全距离计算

溶洞类型以及溶洞与隧道之间的距离是影响隧道开挖稳定性的重要因素^[15-16]。本文以无锡某地铁隧道为例,利用数值模拟方法对溶洞与隧道间的安全距离进行分析计算。拟建隧道顶板标高为 $-12.84\sim-2.98$ m,底板标高为 $-18.82\sim-9.21$ m,采用直径6 m的圆形盾构施工。根据设计要求,隧道的变形必须控制在 $0.4\%R$ (R :隧道直径)以内,即24 mm,而地表沉降必须小于20 mm。

3.1 数值模拟计算 结合隧道高程和岩溶发育特征,发现研究区内的溶洞几乎都在隧道的下方,

距离隧道底板最近的只有1 m,最远为20 m。影响岩溶区隧道稳定性的因素有很多,包括岩溶分布、溶洞充填物类型、溶洞体积、隧道与溶洞之间的距离等。因此,为了研究四种类型的溶洞对隧道开挖稳定性的影响并进行安全距离的直观的对比分析,本文在模拟分析过程中做了一定的简化。首先取各类型岩溶溶洞距土岩界面距离最小的工况进行模拟分析。其次参考研究区不同类型岩溶溶洞体积分布情况,取四种类型岩溶最典型的溶洞大小进行分析,并通过固定溶洞的直径来达到控制不同类型溶洞的大小的目的(表2)。最后利用FLAC^{3D}数值模拟软件,建立图6所示的模型,对表2所示工况下隧道开挖引起的围岩变形及隧道拱顶位移和地表沉降变化进行模拟分析,得到不同类型岩溶隧道与溶洞之间的安全距离。所有模型尺寸均为 $X\times Y\times Z=72\text{ m}\times 72\text{ m}\times 72\text{ m}$,模拟过程中模型四周约束水平位移,底部约束水平和垂直位移,模型上部为自由边界。地层单元采用摩尔-库仑本构模型,未充填溶洞采用空模型,地层的相关物理和力学参数如表3所示。

表 2 数值模拟工况
Table 2 Conditions considered in numerical simulation

| 溶洞 | 直径(长轴, m) | 充填类型 | 隧道底部-溶洞顶部的距离 D (m) |
|-----|-----------------|------------|----------------------|
| I | 12 | 含砾石粉质黏土全充填 | 1/3/5/7/9/11/13 |
| II | 8(上部溶洞)/6(下部溶洞) | 淤泥质粉质黏土全充填 | 1/3/5/7/9/11/13 |
| III | 8 | 半充填淤泥质粉质黏土 | 1/3/5/7/9/11/13 |
| IV | 4 | 空洞 | 1/3/5/7/9/11/13 |

3.2 模拟结果分析

3.2.1 隧道围岩变形 隧道掘进与支护的施工过程中伴随着应力重分布,会导致围岩应力场发生改变,进而导致围岩及支护结构发生变形,而岩溶类型、隧道与溶洞之间的距离均会对隧道围岩

变形产生影响,表4为隧道开挖后各工况下隧道围岩的最大变形值。从表4可以看出:

(1)对于同一类型的溶洞,隧道围岩变形整体呈现出随着 D 值的增加变形量逐渐减小,但当 $D=3$ m和 $D=5$ m时因隧道局部地层为碎石层,

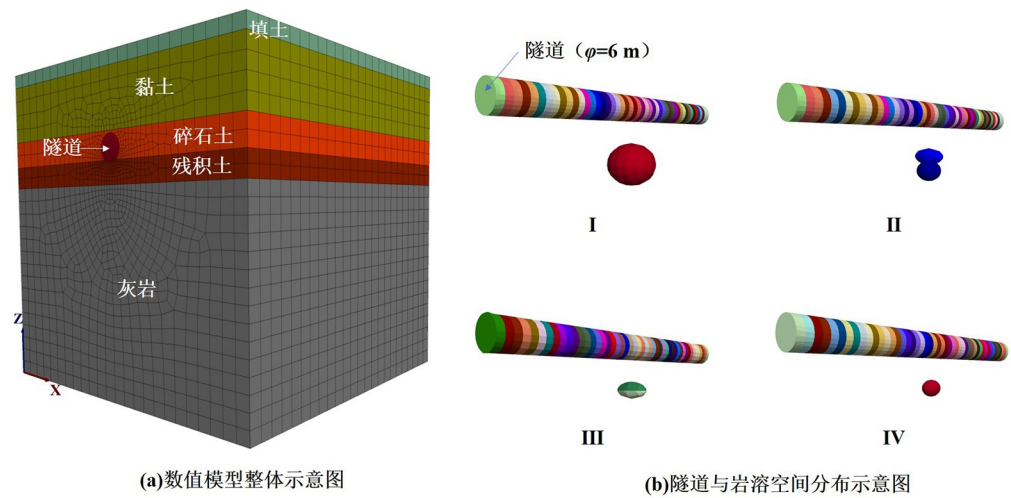


图6 四种类型溶洞的数值模拟模型($D=5\text{ m}$)

Fig. 6 Numerical model of four kinds of karst caves ($D=5\text{ m}$)

表3 地层物理和力学参数

Table 3 The physical and mechanical parameters of the formation

| 地层/充填物 | 厚度(m) | 密度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 黏聚力(kPa) | 摩擦角($^{\circ}$) | 弹性模量(GPa) | 剪切模量(GPa) |
|--------------|-------|--------------------------------------|----------|-------------------|-----------|-----------|
| 填土 | 3 | 18.8 | 34.2 | 12.2 | 0.0293 | 0.01007 |
| 黏土 | 13 | 18.56 | 40.0 | 13.6 | 0.04438 | 0.01686 |
| 碎石土 | 6 | 23.0 | 15.0 | 34.0 | 0.0812 | 0.03416 |
| 残积土 | 5 | 23.0 | 4.28 | 38.5 | 0.1253 | 0.04722 |
| 灰岩 | 45 | 24.2 | 98.6 | 45.3 | 0.4631 | 0.2219 |
| 含碎石粉质黏土(充填物) | — | 18.2 | 12.9 | 10.8 | 0.02427 | 0.00948 |
| 淤泥质粉质黏土(充填物) | — | 18.0 | 10.2 | 8.9 | 0.01386 | 0.00778 |

表4 隧道开挖围岩最大变形值(单位:mm)

Table 4 Maximum Z - displacement (m) of in $y=36\text{ m}$ plane (units: mm)

| 溶洞类型 | $D=1\text{ m}$ | $D=3\text{ m}$ | $D=5\text{ m}$ | $D=7\text{ m}$ | $D=9\text{ m}$ | $D=11\text{ m}$ | $D=13\text{ m}$ |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| I | 35.9 | 28.8 | 21.9 | 30.2 | 27.6 | 23.7 | 18.0 |
| II | 43.7 | 32.6 | 27.2 | 31.3 | 29.6 | 22.0 | 18.3 |
| III | 43.2 | 30.2 | 28.4 | 30.5 | 28.2 | 23.0 | 17.3 |
| IV | 45.8 | 31.9 | 27.3 | 31.2 | 29.8 | 24.7 | 18.0 |

强度较大,变形量不满足上述规律;

(2)当 $D\leq 9\text{ m}$ 时,在相同距离下,在I型溶洞上进行隧道掘进引起围岩形变量最小,而造成围岩形变量最大的岩溶类型不固定.

3.2.2 隧道拱顶位移 在溶洞的影响下,隧道的变形主要包括拱顶沉降、拱底隆起以及拱腰的侧向位移,其中,拱顶的位移最大.因此,在隧道开

挖过程中,考虑施工是否符合标准时,应该首先关注拱顶沉降^[17-18].如图7所示是场区隧道在不同工况下开挖后拱顶的沉降情况,从图7中可以看出:(1)隧道进口($0\sim 3\text{ m}$)、出口($69\sim 72\text{ m}$)和溶洞区($33\sim 39\text{ m}$)的位移最大;(2)当 $D=1\text{ m}$ 时,IV型溶洞引起的隧道拱顶沉降最大,I型溶洞引起的隧道拱顶沉降最小,当 $D=3/7/9\text{ m}$ 时,I型岩溶引起的隧道拱顶沉降最小,引起隧道拱顶沉降最大的岩溶类型不固定, $D=5/11/13\text{ m}$ 时,四种岩溶类型引起的隧道拱顶沉降差距很小;(3)根据隧道变形控制应 $<24\text{ mm}$,因此,溶洞与隧道间的安全距离分别为 $5,11,13\text{ m}$.

3.2.3 地表沉降位移 除了隧道拱顶位移外,地表沉降也是监测施工安全性的重要指标.图8~11是四种类型的溶洞在不同工况下隧道开挖引起地表沉降位移图.

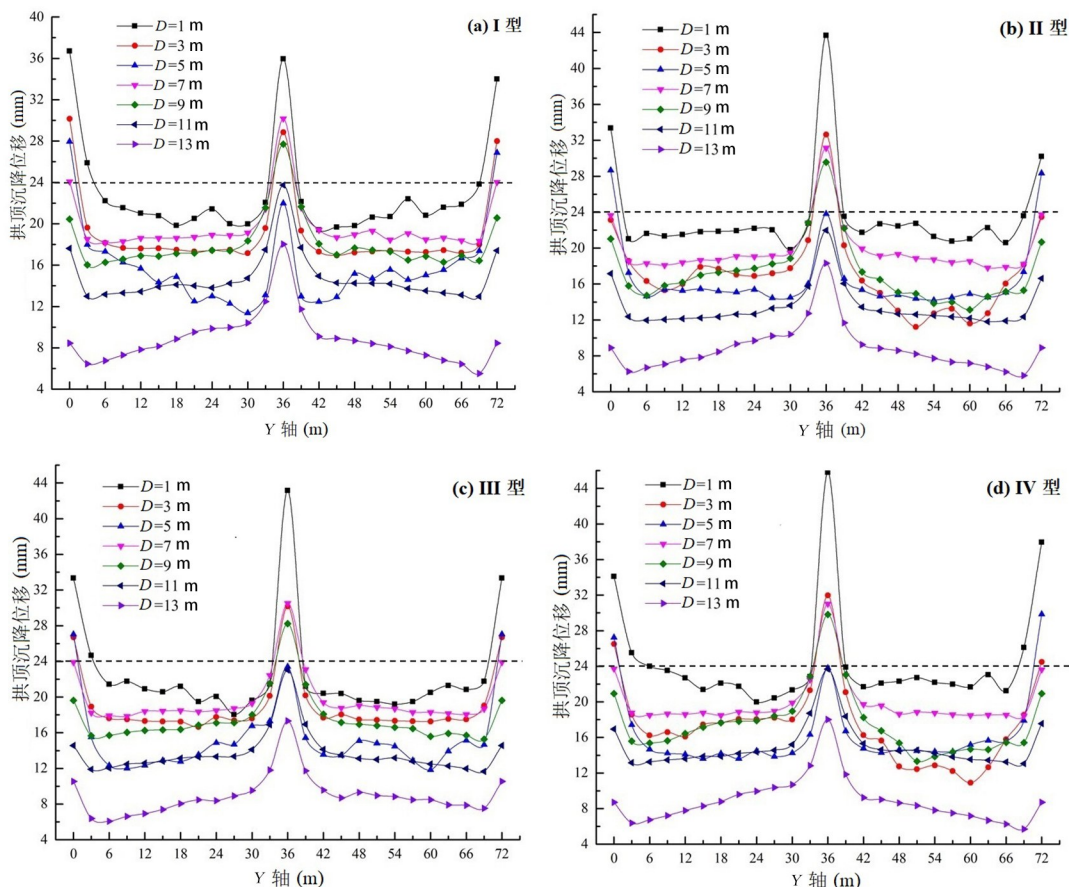


图 7 隧道拱顶沉降位移图

Fig.7 Settlement of top of arch

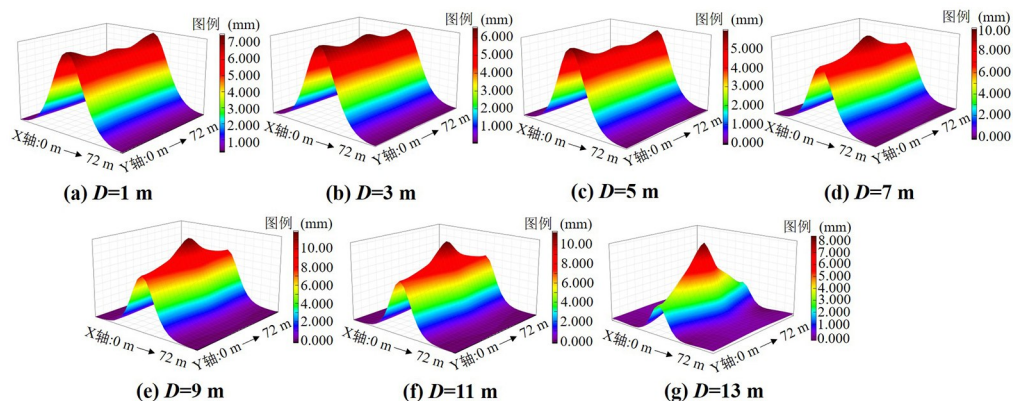


图 8 不同条件下 I 型溶洞引起地表沉降位移云图

Fig.8 Surface subsidence of type I under different distance

结合数值模拟得到的图 8~11 可以看出:

(1) 在隧道与溶洞距离相等且该距离无法保证隧道拱顶位移在安全范围的条件下, I 型岩溶相较于其他类型岩溶引起的变形最小.

(2) 隧道与溶洞之间的距离会影响隧道开挖后地表发生沉降的数值, 在研究区所有类型岩溶中进行隧道施工后均满足: 当 $D=5$ m 时, 地表沉降量最小; 当 $D=9$ m 时, 地表沉降量最大.

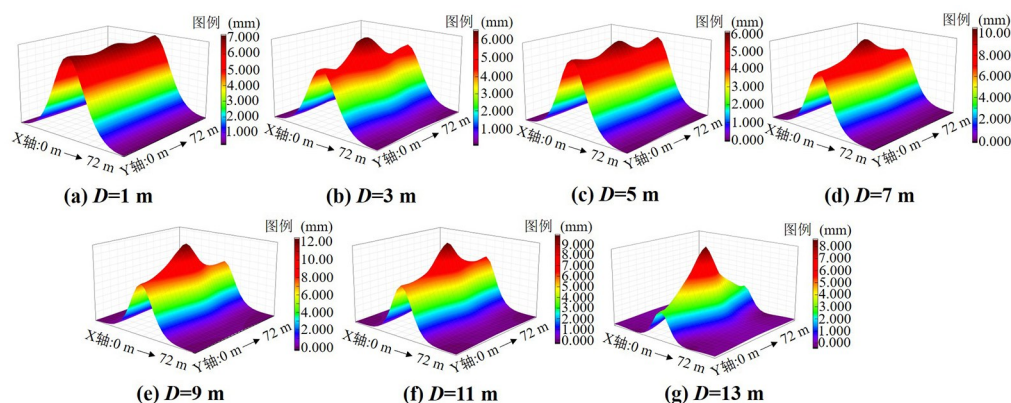


图9 不同条件下Ⅱ型溶洞引起地表沉降位移云图

Fig.9 Surface subsidence of type Ⅱ under different distance

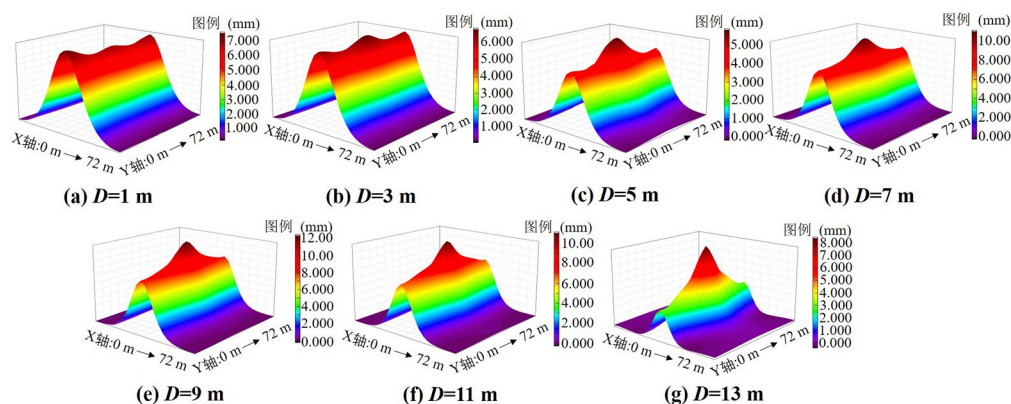


图10 不同条件下Ⅲ型溶洞引起地表沉降位移云图

Fig.10 Surface subsidence of type Ⅲ under different distance

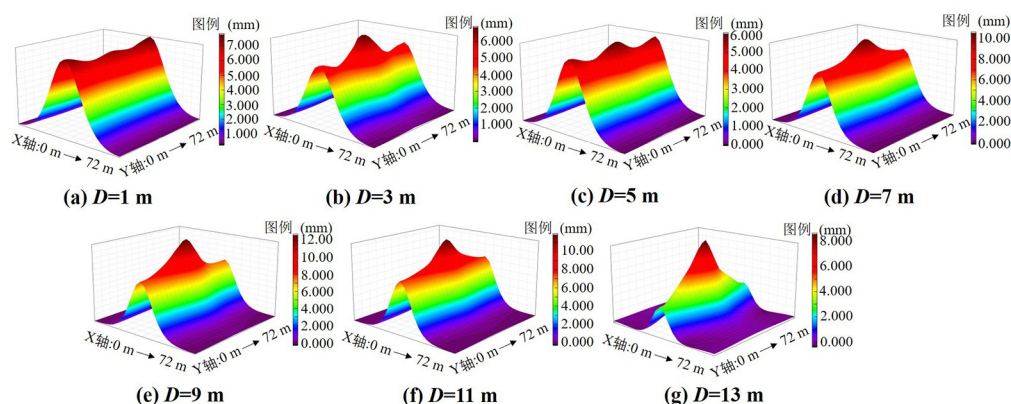


图11 不同条件下Ⅳ型溶洞引起地表沉降位移云图

Fig.11 Surface subsidence of type Ⅳ under different distance

(3)所有的地表沉降均小于20 mm,满足设计和施工要求.

综合上述所有数值模拟结果来看,在隧道与溶洞距离相等且该距离无法保证隧道稳定性的条

件下,Ⅰ型岩溶相较于其他类型岩溶引起的变形最小.造成这种结果的原因是充填物的影响,即Ⅰ型岩溶溶洞虽然较大,但其充填物为含砾石的粉质黏土,其强度高于Ⅱ型和Ⅲ型岩溶中充填的淤

泥质粉质黏土和Ⅳ型岩溶的空洞。此外,根据前面的分析,四种类型溶洞与隧道之间的安全距离均为 $D=5\text{ m}$ 或者 $D\geq 11\text{ m}$ 。相较于安全距离为 $D\geq 11\text{ m}$ 的这种结论,这里需要特别指出 $D=5\text{ m}$ 为安全距离的原因。这是因为当 $D=5\text{ m}$ 时,隧道所在地层为碎石层,强度较大,溶洞对其影响较小,所以当 $D=5\text{ m}$ 时隧道开挖引起的变形要小于 $D=7\text{ m}$ 和 $D=9\text{ m}$ 。

4 结论

确定溶洞的空间分布、大小和填充类型对地铁隧道的安全施工以及预防岩溶塌陷具有重要意义。溶洞与隧道间安全距离的计算不仅可以为隧道的选线提供指导,还可以节约施工成本。通过对无锡市典型浅埋岩溶区进行岩溶探测及其与隧道间的安全距离计算,得出以下结论:

(1)场区位于低洼补给区,地下水循环活跃,富腐蚀性 CO_2 ,为岩溶的形成提供了理想的地质条件。场区内大部分溶洞呈扁球形或椭球形,并由含砾石的粉质黏土或淤泥质粉质黏土充填,最发育的溶洞埋深在 $26\sim 30\text{ m}$ 和 $32\sim 36\text{ m}$ 之间,溶洞直径为 $1\sim 10\text{ m}$ 。

(2)根据溶洞的大小、位置和填充类型可以把场区内的溶洞分为四种类型,其中Ⅰ型溶洞对隧道安全施工的威胁最小。四种溶洞与隧道之间的安全距离为 5 m 或 $\geq 11\text{ m}$ 。

(3)依据岩溶发育特征及溶洞与地铁隧道之间的距离来看,该地区的大多数溶洞都在安全距离之内。对于那些不在安全距离内的洞穴,可以采取灌浆的方式进行处理。在江苏省浅埋岩溶地区进行隧道施工时,可参考该计算结果中的安全距离进行隧道选线。

参考文献

- [1] Dobashi H, Shiratori A, Miyama D, et al. Design and construction of enlarging shield tunnel sections of large dimensional shield tunnels for the non-open-cut method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, DOI: 10.1016/j.tust.2005.12.111.
- [2] Filippini M, Squarzon G, De Waele J, et al. Differentiated spring behavior under changing hydrological conditions in an alpine karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 2018(556):572—584.
- [3] Gong W, Huang H, Juang C H, et al. Improved shield tunnel design methodology incorporating design robustness. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(10):1575—1591.
- [4] Alija S, Torrijo F J, Quinta-Ferreira M. Geological engineering problems associated with tunnel construction in karst rock masses: The case of Gavarres tunnel (Spain). *Engineering Geology*, 2013 (157):103—111.
- [5] Li X, Li Y. Research on risk assessment system for water inrush in the karst tunnel construction based on GIS: Case study on the diversion tunnel groups of the Jinping II Hydropower Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014(40):182—191.
- [6] Ren D J, Shen S L, Cheng W C, et al. Geological formation and geo-hazards during subway construction in Guangzhou. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11):934.
- [7] Zhang K, Tannant D D, Zheng W B, et al. Prediction of karst for tunnelling using fuzzy assessment combined with geological investigations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018(80):64—77.
- [8] 常威,谭家华,黄琨,等.地下水多元示踪试验在岩溶隧道水害预测中的应用——以张吉怀高铁兰花隧道为例. *中国岩溶*, 2020, 39(3):400—408. (Chang W, Tang J H, Huang K, et al. Application of groundwater multi-element tracing tests to water hazard prediction of karst tunnels: An example of the Lanhua tunnel on the Zhangjiajie-Jishou-Huaihua high-speed railway. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 400—408.)
- [9] 吴远斌,殷仁朝,雷明堂,等.重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策. *中国岩溶*, 2021, 40(2):246—252. (Wu Y B, Yin R C, Lei M T, et al. Triggering factors and prevention-control countermeasures of karst collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2):246—252.)
- [10] 杨培涛.穿越溶槽区隧道进出口岩溶的超前探测与分析. *工程勘察*, 2021, 49(12):68—74. (Yang P T. Advanced detection and analysis on karst in tunnel entrance and exit through karst trough area. *Geotech-*

- nical Investigation & Surveying, 2021, 49(12): 68—74.)
- [11] 李向全,马剑飞,张春潮,等.川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究.水文地质工程地质,2021,48(5):34—45. (Li X Q, Ma J F, Zhang C C, et al. Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan-Xizang Railway. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 34—45.)
- [12] Guo S L, Yan C H, Yu L C, et al. Characteristics, controlling factors, and formation of shallow buried karst in eastern China: A case study in the Wuxi metro areas, Jiangsu province. Environmental and Engineering Geoscience, 2020, DOI: 10.2113/eeg-2281.
- [13] 李华明,张永辉,胡志平,等.峨汉高速庙子坪隧道岩溶发育特征及工程效应分析.中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):92—98. (Li H M, Zhang Y H, Hu Z P, et al. Analysis of karst development characteristics and influence of Miaoziping tunnel in E-Han expressway. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 92—98.)
- [14] 柳林,姜伏伟,张发旺,等.岩溶地下工程施工抽水诱发黏土层地面塌陷机理及临界条件探讨.中国岩溶,2019,38(5):752—758. (Liu L, Jiang F W, Zhang F W, et al. Discussion on the mechanism and critical condition of ground collapse of clay layer induced by karst groundwater pumping in underground engineering construction. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 752—758.)
- [15] Li S C, Zhou Z Q, Ye Z H, et al. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel. Journal of Applied Geophysics, 2015(116): 247—257.
- [16] Zini L, Chiara C, Franco C. The challenge of tunneling through Mediterranean karst aquifers: The case study of Trieste (Italy). Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 281—295.
- [17] Bizjak K F, Petkovšek B. Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec. Engineering Geology, 2004, 75(1): 89—106.
- [18] Alejano L R, Rodríguez-Dono A, Veiga M. Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012(30): 169—182.

(责任编辑 杨贞)