

文章编号:1005-0523(2018)03-0023-06

充填型浅层岩溶隧道溶洞处理技术研究

王康^{1,2}, 孙熔正³, 杨新安^{1,2}

(同济大学 1. 交通运输工程学院; 2. 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
3. 中国交建第三航务局, 上海 200120)

摘要:浅层岩溶多发育于隧道拱部,并且由于溶洞充填介质的复杂多变,隧道往往会发生坍塌冒顶的现象。文章结合宣曲高速海德隧道对充填型浅层岩溶隧道进行失稳以及力学特征分析,通过直剪试验分析了含水率对充填红黏土物理力学性质的影响,结合有限元数值模拟对隧道坍塌冒顶进行分析,根据分析结果提出三台阶预留核心土法开挖配合“超前管棚+小导管注浆”超前支护的综合处理方案,结合现场给出了详细的施工技术措施。在处理段增设监测断面,通过位移、围岩压力角度来判断充填塌陷段的处理效果,数据表明,充填型溶洞的综合处理方案效果良好,对类似工程具有一定的借鉴作用。

关键词:充填型溶洞;超前支护;浅层岩溶;塌方处理;隧道施工

中图分类号:U456.3

文献标志码:A

岩溶是隧道工程较常见的不良地质之一^[1],浅层岩溶^[2]是其中特殊的一种。浅层岩溶对隧道、路基、桥梁基础等工程均有不同程度的影响,根据其对设计与施工的影响,国内外学者开展了一系列研究,倪宏革等^[3]分析了浅层岩溶路基塌陷机理并提出注浆加固措施,黄焰^[4]结合广州地铁二号线三元里折返线工程,研究了浅层岩溶地区浅埋隧道工程的设计、施工技术,康勇等^[5]对浅层岩溶隧道地质灾害的关键致灾因子及相互关联进行理论分析,并结合现场岩溶处治实践,对实施效果进行了评价。

在浅层岩溶隧道施工中,常揭露有充填介质的溶洞,例如宣曲高速海德隧道揭露的205个溶洞中有87.3%是充填型,且充填介质90%为红黏土,可见,浅层岩溶隧道充填型溶洞是一种典型的工程问题。由于充填物本身如红黏土所具有的工程特点,易导致充填型浅层岩溶隧道围岩发生支护受力过大、变形超限、塌方冒顶等工程问题。关于充填型岩溶隧道塌方处理及预防措施,国内外也有一些研究。李世贵等^[6]针对岩溶引起的隧道塌方问题,提出了三台阶七步开挖法,同时对支护加强以稳定塌方土体,孙柏林^[7]根据塌方处治实例,比较现有塌方处治方案的优缺点后,给出了护拱法配合砂浆锚杆稳固塌腔岩面的优化处治方案,王迎超^[8]重点研究了山岭隧道塌方机制及防灾方法。但目前关于浅层岩溶隧道充填型溶洞这种典型工程问题的处理方案研究还很少,缺乏针对性技术措施,为此,本文结合宣曲高速海德隧道工程对充填红黏土溶洞的隧道失稳特征进行了分析,给出了塌方冒顶处治方案,并进行了现场实测验证与整治效果评价。

1 海德隧道工程概况与特点

宣曲高速海德隧道因长度和地质条件的复杂程度成为全线控制性工程,该隧道设计为上、下行分离的双向四车道隧道,其简况如表1所示。

表1 海德隧道简况

Tab.1 The basic information about Haide tunnel

隧道名称	布置形式	起点桩号	终点桩号	隧道长度/m
海德隧道	两车道分离式	ZK118+652	ZK120+800	2 148.0
		YK118+665	YK120+900	2 138.1

收稿日期:2017-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178336)

作者简介:王康(1994—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程;杨新安(1964—),男,教授,博士生导师,研究方向为隧道与地下工程。

通讯作者:孙熔正(1989—),男,工程师,研究方向为隧道与地下工程。

海德隧道的地质条件极为复杂,主要表现为以下三个方面:①隧道两端洞口段为全断面红粘土地层,松散,稳定性极差,进洞难;②洞身大部分位于浅层岩溶中,溶洞发育程度高,溶洞大小与发育部位多变,充填类型多样,导致围岩及上覆地层易松动、坍塌、冒顶,围岩压力大,变形控制难度大;③设计阶段勘察工作欠缺,施工图设计未对岩溶发育特征与部位等给予说明,导致施工阶段风险等级高,单靠超前地质预报与施工地质难以完全探明隧道施工前方地质条件,隧道施工难度极大。

2 充填红黏土溶洞隧道失稳及其力学特征分析

海德隧道浅层岩溶大多为充填型并且以充填红黏土介质为主,分析其冒顶现象、原因及其力学特征,可以为进一步的整治措施制定提供依据和条件。

2.1 充填红黏土溶洞隧道冒顶现象与特点

海德隧道浅层岩溶多发育于隧道拱部,在有充填物的情况下极易发生冒顶,本文结合海德隧道左线K120+367~K120+363处坍塌冒顶实例进行说明。坍塌冒顶位置埋深为64 m,爆破开挖过程中,出现初支钢架坍塌、冒顶的现象,揭露的充填型溶洞介质为散体状红黏土。物探推测该溶洞位于隧道拱部正上方,溶腔发育贯穿隧道横断面。溶洞大小近似为长轴,短轴分别为16 m,6 m的椭圆,溶洞面积接近隧道开挖面的面积,其规模和位置如图1所示。

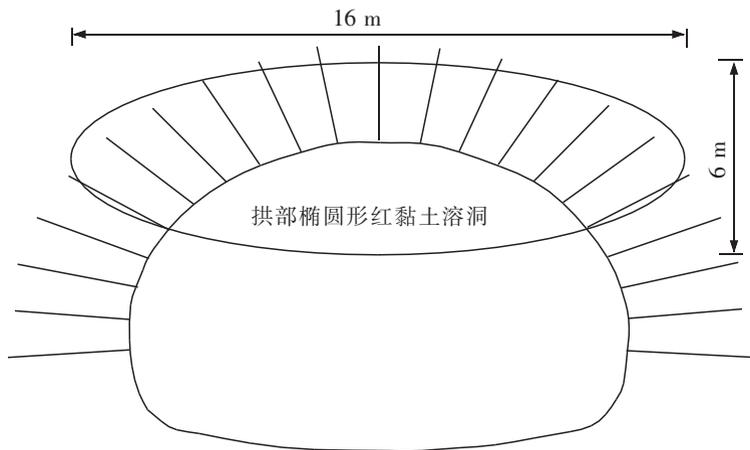


图1 拱顶溶洞示意图

Fig.1 The location and schematic diagram of karst cave

塌方溶洞充填的红黏土呈现散体状态,较为潮湿,爆破开挖后受自重而发生塌落,充填红黏土中掺杂着少量大、小不等的碎石块,根据超前地质预报得到溶洞的示意图,溶洞发育规模较大,贯穿了隧道的横断面,导致隧道承受较大的荷载,变形控制难度大。

2.2 失稳原因分析

1) 浅层岩溶拱部溶洞发育。隧道坍塌位置位于浅层岩溶垂直循环带,与地面存在着直接水力联系,地面降水导致土体自身重度增加,自稳能力下降。同时溶洞发育规模较大,并且位于隧道拱顶部位,充填物在超前支护强度不足的情况下引起拱顶下沉,进而导致初期支护受力过大,在自重荷载作用下发生冒顶塌方。

2) 红黏土本身松散潮湿粘聚力低。考虑到浅层岩溶与地面存在着直接的水力联系,地面降水对充填红黏土的影响主要表现在含水率变化对其物理力学性质的影响上。

现场取洞内充填红黏土,按照《土工试验规程》SL237-1999^[9]进行土样在不同含水率下的抗剪强度实验,通过粘聚力大小的变化来分析洞内充填的红黏土对隧道稳定性的影响。经过含水率实验得到原状土天然含水率为32.4%~37.6%。试样的风干含水率为3.3%,压实后要求干密度为1.20 g/cm³。加水使土样吸湿,拌匀配制含水率为15%,25%,35%,45%,55%,65%的土样,每一种含水率的土样制作四个环刀试样,得到充填红黏土的粘聚力与含水率之间的关系如图2所示。

从图 2 可见,随着试样含水率的增加,红黏土的粘聚力急速上升,在 35%左右达到峰值 18 kPa,而后下降,在 55%左右又出现次峰值 5 kPa,所以当地面降水渗入溶腔时,一方面导致红黏土自重增加,另一方面导致充填红黏土粘聚力下降,自稳能力下降。

2.3 数值模拟分析

为了进一步分析充填型溶洞的隧道失稳特征,采用 Midas NX 软件对上述实例进行模拟分析。该处理深 64 m,隧道跨度 12.9 m,将溶洞简化为位于隧道拱部的椭圆,其长轴,短轴分别为 16 m,6 m,短轴以下部分位于隧道拱顶断面内,为保证隧道建模产生的误差在容许范围内^[10],左、右边界分别取至距离隧道轴线 50 m 的位置。

围岩计算参数按 V 级围岩进行取值,充填红黏土参数根据直剪实验结果进行取值,围岩以及充填红黏土参数如表 2 所示。初期支护采用 I18 钢拱架喷射混凝土,喷射混凝土厚度为 250 mm,锚杆采用型螺纹钢锚杆,长度 4 m,直径 25 mm,壁厚 3.5 mm。

表 2 围岩及红黏土参数

Tab.2 Parameters of the surrounding rock and red clay

围岩	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
V 级围岩	1 900	1 000	0.44	0.15	24
红黏土	1 930	8.78	0.42	0.01	11.8

隧道开挖采用三台阶开挖法,由于溶洞位于上台阶拱部,故模拟计算时着重分析上台阶开挖后各个位置的位移以及初期支护的受力情况。

图 3(a)为上台阶开挖之后围岩的位移云图,可以看出拱顶位移达到了 2.7 m,这显然意味着充填型拱顶溶洞已经塌方,并且塌方造成地面塌陷,数值模拟计算结果显示拱顶溶洞正上方地表塌陷 0.46 m,实际施工中该处地表也造成了深度达半米的塌陷坑;图 3(b)为初期支护承受的弯矩值,整个支护承受较大弯矩,有的部位弯矩值达到了 106 kN·m,在爆破震动下,充填红黏土进一步塌落造成初期支护和上覆地层的失稳垮塌。

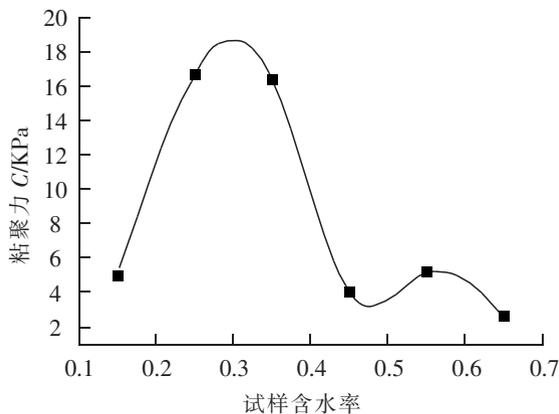
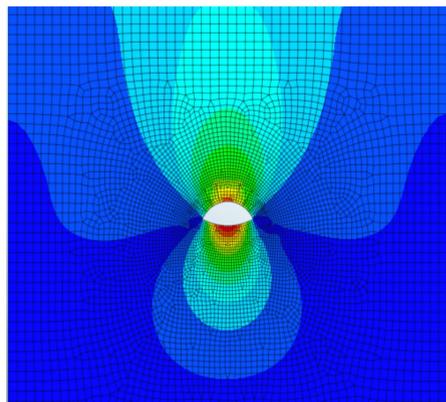
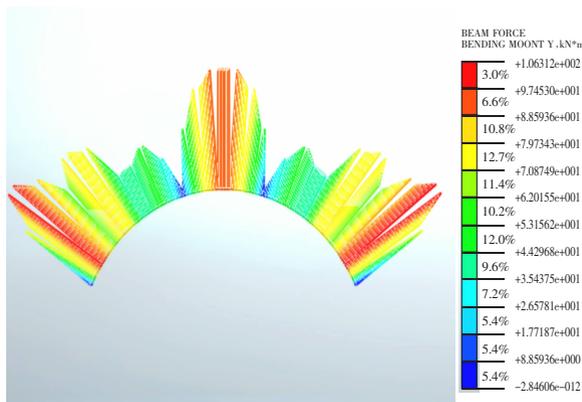


图 2 黏聚力与试样含水率之间的关系

Fig.2 Cohesive forces of different water content



(a) 上台阶开挖后围岩位移云图



(b) 上台阶初期支护弯矩值

图 3 充填型岩溶隧道数值模拟结果

Fig.3 The results of numerical simulation

3 充填红黏土隧道溶洞塌方冒顶处治方案与技术

结合上述实例,综合超前地质预报结果及数值计算结论,提出充填红黏土溶洞隧道冒顶处治方案及技术措施。

3.1 充填型溶洞塌方处理方案

塌方的充填红黏土溶洞形态为长轴、短轴分别为 16 m、6 m 的椭圆状,溶洞面积接近隧道开挖的面积,采取常规方法对充填溶洞进行支护、锚喷已无法实施。根据浅层岩溶充填红黏土的特性,大量出土会导致坍塌冒顶范围进一步扩大,不仅延误工期,而且严重威胁施工安全,所以处理方案首先确定合理的超前支护方案以稳定塌落土体^[11-12],根据失稳原因分析,超前支护采用“超前管棚+小导管注浆”加固掌子面前方土体,而后开挖采用三台阶预留核心土开挖,对坍塌体碴面低于设计拱顶标高的地段进行回填,施工过程中加强监控量测,及时反馈。

3.2 充填型溶洞塌方处理施工技术

处治采用包括三台阶预留核心土法+超前预支护+加强隧道支护衬砌结构+回填注浆+加强监控量测等的综合技术措施,核心处治措施如下所述:

1) 三台阶预留核心土法:采用三台阶预留核心土法进行开挖,在上台阶溶洞及松散土层带中施作简易导向墙,对开挖面拱顶初期支护所使用的 I18 钢拱架进行加密,间距 30 cm,联立 2 榀拱架。该步骤是为了初步稳定开挖面,防止坍塌范围进一步扩大,为后续处理提供安全保障。

2) 超前预支护:采用 13.5 m ϕ 89 无缝钢管在环向 120°范围内施作超前管棚,插入角度为 1°~3°管棚之间环向间距为 40 cm,钢管施工误差径向不大于 15 cm,相邻钢管之间环向不大于 10 cm。超前支护的布置如图 4 所示。图 4(a)表示超前支护的纵断面图,大管棚长度一般为 10~30 m,用每节长 4~6 m 的 ϕ 108 \times 6 mm 热轧无缝钢花管以丝扣连接而成,同一断面内接头数量不得超过总钢管数的 50%;图 4(b)为超前支护的横断面图,表示超前大管棚的布设位置,按照扇形角度 120°内布置。长管棚设置导向套拱,套拱采用 C20 混凝土,其截面厚 60 cm、纵长 200 cm,钢架外缘设 ϕ 140 \times 8 mm 导向钢管。

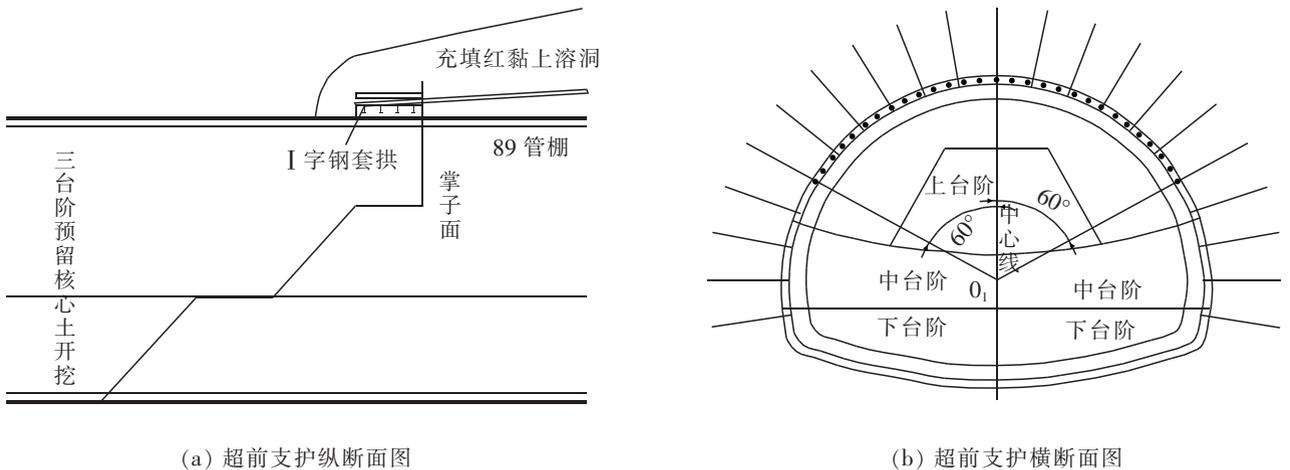


图 4 超前支护示意图

Fig.4 The schematic diagram of advanced support

3) 加强隧道支护衬砌结构:在拱顶部位向上埋设 3 根分别为 ϕ 150 \times 3 m、 ϕ 150 \times 6 m、 ϕ 150 \times 9 m 注浆管,分别用作注 C35 混凝土以稳定溶洞土体,布设完毕后,完成初期支护喷锚支护,初期支护完成后增加 I18 钢拱架临时支护加强支护,间距 60 cm。并根据超欠情况判断是否需要拆除临时支护,同时采用 ϕ 89 管棚内加筋来加强管棚支护强度,钢筋笼采用 4 根 ϕ 22 钢筋与 ϕ 42 \times 4 mm 固定环焊接,送入管棚内。

4) 溶洞回填注浆:多层分次注 C35 混凝土,直至 ϕ 150 \times 3 m 注满后。待混凝土达到初凝后,往 ϕ 50 \times 6 m 注浆管吹沙,直至 ϕ 150 \times 9 m 管有沙漏出,回填完成。在管棚端头焊接止浆阀,用于注浆过程中控制浆液流量

以及注浆完毕后关闭止浆阀防止浆液外流,安装完毕后采用双轮双液液压注浆机对管棚内注浆,注浆压力初始压力 0.5~1.0 MPa,终止压力为 2.0 MPa,直至注不进去为止,使浆液充分渗入掌子面前方的松散土体。

5) 加强监控量测:回填完成后,在溶洞部位每两循环全环设置监控量测点,每日进行拱顶沉降及周边收敛观测,同时在后续施工过程中,每循环增设 27 根 4.5 m $\phi 42 \times 4$ mm 超前小导管,逐榀开挖,待监控量测数据趋于稳定后方可正常施工。

4 充填红黏土隧道溶洞处理效果与评价

为了评价充填红黏土隧道溶洞塌方冒顶处治方案的处理效果,分别从位移和围岩压力两个方面进行评价。一方面,在该里程处增设了围岩变形量测断面,量测隧道拱顶下沉及洞周收敛。如图 5 所示,正方点曲线为隧道坍塌及变形段采用“超前管棚 + 小导管注浆”方案处理后拱顶下沉随时间的变化规律,拱顶下沉在处理完成一个月之内围岩累积变形量较大,随后很快趋于稳定值 28 mm,由于预留较大变形量,拱顶处位移能够满足设计安全要求;三角点曲线表示洞周收敛随时间的变化规律,可以看出,处理初期 20 天内变化较大,后期趋于稳定值 5 mm,综合来看,处理段围岩位移量符合公路隧道施工规范要求。

另一方面,为了监测处理好的充填土体是否稳定,在后续施作二次衬砌过程中,塌方处理断面埋设土压力盒,用来监测初期支护与二次衬砌之间的压力,在一个月的监测周期内各部位接触压力如图 6 所示。左侧拱腰处接触压力有一定增长,但在一个月内稳定在 400 kPa,其他部位接触压力均小于 100 kPa,故判断该断面受力较为稳定。

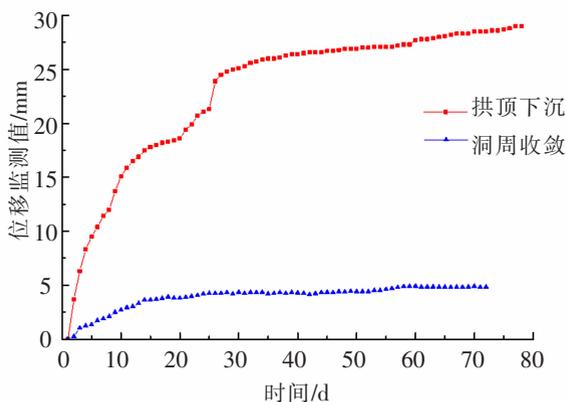


图 5 位移监控量测结果

Fig.5 Displacement monitoring measurement

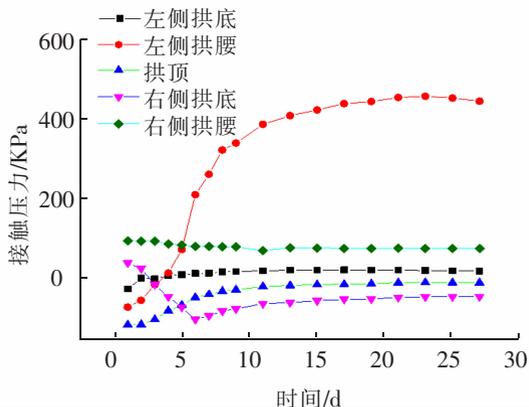


图 6 塌方处理段初支与二衬间压力监测曲线

Fig.6 Contact stress of the initial and second lining for tunneling landslide area

综合位移监控量测结果与断面各部位接触压力来看,冒顶塌方段基本稳定,隧道初期支护变形与围岩压力达到稳定状态,坍塌及变形处理达到了预期的目的。

5 结论

1) 对于充填型的浅层岩溶隧道,由于埋深相对较浅,溶洞多发育于隧道拱部,且充填介质与地面渗流之间存在直接水力联系,尤其是充填红黏土溶洞受含水率变化影响性质变化较大,故隧道失稳一方面是因为溶洞所处位置以及形态,另一方面充填介质的性质也对隧道支护稳定产生很大影响。

2) 溶洞内充填红黏土粘聚力与含水率之间存在双峰值的关系,即随着含水率的增加,红黏土的粘聚力急速上升,在 35%左右达到第一峰值后随之下降,并在 55%左右又出现次峰值而后进入流体状态。

3) 采用“超前管棚 + 小导管注浆”方案以及一系列技术措施,充分利用注浆的加固效应和钢管的梁效应,有效稳定隧道上覆土体,对拱部发育有充填型溶洞的隧道坍塌及变形处理后,顺利通过了坍塌及变形地段。并通过现场监控量测结果评价了“超前管棚 + 小导管注浆”方案的效果,对类似工程事故处理有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范 JTG D70-2004 [S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 邓启江,李星宇,吕琼,等. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. 中国岩溶,2009,28(1):23-29.
- [3] 倪宏革,周庆坡,贾少立,等. 浅埋隐伏型岩溶路基塌陷机理与注浆加固方法[J]. 铁道工程学报,2005(6):17-19,36.
- [4] 黄焰,伍永胜. 岩溶地区城市地下浅埋隧道工程技术研究[J]. 土木工程学报,2005,38(8):107-113.
- [5] 康勇,杨春和,张朋. 浅埋岩溶隧道灾变机制及其防治[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):149-154.
- [6] 李世贵. 山区岩溶隧道坍塌处治方案[J]. 北方交通,2013(6):108-110.
- [7] 孙柏林,王升,徐学军,等. 岩溶区隧道充填型溶洞的塌方处治优化研究[J]. 公路工程,2015,40(5):187-192.
- [8] 王迎超,尚岳全,靖洪文,等. 隧道塌方段施工方案优化及效果评价[J]. 岩土力学,2011,32(Z2):514-520.
- [9] 南京水利科学研究院. 土工试验规程 SL237-1999[S]. 中国水利水电出版社,1999.
- [10] 吴梦军,许锡宾,赵明阶,等. 岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(9):1525-1529.
- [11] 吴东鹏,杨新安. 超浅埋隧道下穿冲沟边坡塌方分析与处治[J]. 华东交通大学学报,2014,31(5):24-29.
- [12] 台启民,张顶立,房倩,等. 软弱破碎围岩隧道超前支护确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(1):109-118.

Study on Karst Cave Treatment Technology of Filling-Type Superficial Karst

Wang Kang^{1,2}, Sun Rongzheng³, Yang Xin'an^{1,2}

(1.College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. The Third Harbor Engineering Company of China Communications Construction, Shanghai 200120, China)

Abstract: Superficial karsts typically develop in the arch of tunnels. Due to the complexity and uncertainty of filling medium, tunnel collapse and roof fall frequently occur. This paper analyzed the instability and mechanical characteristics of the Haide tunnel, which is a superficial karst tunnel with filling medium. The effect of water content on the physical and mechanical properties of filled red clay was analyzed by direct shear test. The process of instability was analyzed by numerical simulation. Based on the above analysis, the excavation method called three-step and reserved core soil was put forward to treat the karst cave, paired with “Advanced Shed-pipe Support + Advanced Small Pipe Grouting”. Then, the detailed construction technical measures were put forward based on the construction site. A monitoring cross section was added to the specific treatment section to judge the treatment effect to the roof fall section by displacement and surrounding rock pressure. The research results show that the comprehensive treatment plan of the filling karst cave is of good effect, and is referential for similar projects to some extent.

Key words: filling-type karst cave; advanced support; superficial karst; treatment of tunnel collapse; tunnel construction