

超前水平钻探在岩溶隧道地质预报中的应用研究

韦建昌¹, 邵羽^{1*}, 梁铭¹, 翟少磊¹, 蓝日彦², 黄彬华¹

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530011; 2. 广西新发展交通集团有限公司)

摘要:如何精准确定岩溶区隧道施工掌子面前方是否存在岩溶破碎带、溶腔、赋存水状态,并据此判断是否可能造成瞬间突水、涌泥及冒顶塌方的灾害,成为岩溶地区山岭隧道施工中亟待解决的关键问题。传统地质预报方法因预报距离短、受主观影响大使得预报准确率偏低。该文以在建岩溶区某隧道突泥涌泥事故为工程依托,采用超前水平钻探技术对里程桩号 ZK451+810~ZK873 段范围内的围岩地质情况进行预报,详细阐述超前水平钻探地质预报的实施流程,并根据预报结果提出相应的处治措施,保障处治施工时的安全,同时避免了更大规模的突水突泥事故。

关键词:超前地质预报;岩溶隧道;水平钻探;处治措施

岩溶地区的山区隧道建设因不良地质严重制约着施工工期、影响施工质量,使施工造价大幅度攀升,并对人员财产构成重大威胁。岩溶地区隧道施工事故屡见不鲜。王梦恕曾指出“在岩溶地区探明岩溶情况直接关系到人身安全,超前地质预报应该也必须作为工序列入工程成本”。岩溶发育复杂多变、形态各异,虽然宏观上可以预见和推定,但由于岩溶地质的随机性和不可预见性以及隧道环境的复杂性,导致预报准确率难以满足安全施工要求,使得岩溶区隧道事故频发。

多功能水平钻探超前地质预报是目前工程中常被应用的准确率较高的预报方法,通过采集钻进过程中的推进速度、推进力、扭矩、旋转速度来确定掌子面前方地层的展布、地层岩石的软硬程度、岩体的完整性及可能存在的断层、孔洞的分布位置。其具有钻进速度快、施工质量高等优点,在进行高风险隧道施工过程中,可有效保证施工的安全性,且具有良好的环保性。

多功能水平钻探超前地质预报的预报流程、预报原理、数据解译标准等问题也一直是学者和工程师们关注的焦点。李哲等基于能量守恒原理提出了可用于耦合4种钻探参数的钻进功速比的概念,并对围岩岩性与钻进功速比的关联性开展相关研究;岳中琦通过对现场钻探过程中的监测,提出一种能够优化现有工程岩体质量评定体系的新方法;田昊以围岩的可钻性

指标、钻机能量和参数为基础,对各参数指标与地层界面特性、不良地质体的识别和围岩等级的相关性开展了系统研究;赵鹏宇将由4种钻探参数推断的围岩分布情况与实际施工揭露后掌子面的围岩分布情况进行对比,指出推进速度是判断岩层软硬、节理裂缝发育程度的主要依据;谭卓英等通过对钻进过程中的数据进行分析,对风化花岗岩地层界面进行识别,较好地揭示了地层变化;周轮等、祁伟、舒森等、徐豹之采用多功能超前水平钻超前地质预报手段对实际隧道工程掌子面前方围岩地质展布情况进行预报分析,取得了较好的效果。目前已有研究较少采用多功能水平钻超前地质预报对岩溶区公路隧道突水突泥事故原因开展预报分析,并根据预报结果提出有针对性的处治措施。该文以广西都(安)巴(马)高速公路设吉隧道突泥涌泥事故为工程依托,采用C6-XP多功能钻机对事故掌子面前方围岩分布情况开展水平钻探超前地质预报工作,通过对预报结果进行分析,提出处治方案,并对方案的可行性进行讨论。

1 工程概况及事故发展历程

该隧道为分离式越岭特长隧道。隧道右线长2 967 m,最大埋深357 m;左线长2 933 m,最大埋深

收稿日期:2020-04-01(修改稿)

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2019M663874XB);国家自然科学基金重点资助项目(编号:51738004)

作者简介:韦建昌,男,大学本科,高级工程师。

*通信作者:邵羽,男,博士,工程师。

359 m。隧道区属丘陵及低山地貌,山体连绵起伏,地形起伏较大,地形地貌主要受地层岩性及地质构造控制,山脉走向多呈南东—北西向,与隧道走向基本一致。2019 年 10 月 24 日隧道左线掘进至 ZK451+819 时,掌子面左侧遇到溶洞[图 1(a)],经参建各方现场勘查后,将该段支护类型由 S4—B(VI 级围岩 B 类支护等级)变更为 S5—A(V 级围岩 A 类支护等级)。10 月 30 日开挖至 ZK451+824 处时,掌子面左侧近边墙部位揭露半填充性溶槽,沿隧道纵向延伸 2 m,宽约 3.5 m,左侧边墙涌水[图 1(b)]。11 月 4 日开挖至 ZK451

+831 处,出渣过程中掌子面顶部有泥浆和石块掉落,致使一榀拱架、钢筋网片、连接筋等压坏,从掌子面往外数第 2 榀拱架也出现变形[图 1(c)、(d)]。11 月 5 日掌子面继续往外涌泥,ZK451+825~ZK451+831 范围内拱架发生严重的变形和垮塌[图 1(e)、(f)]。11 月 10 日再次发生塌方、突泥事故,塌方体继续往外涌至 ZK451+780 桩号处[图 1(g)]。11 月 19 日施工单位组织实施回填反压[图 1(h)],第三方检测单位于现场采用 C6—XP 型钻机对掌子面前方溶洞分布情况开展了超前水平钻探地质预报工作。

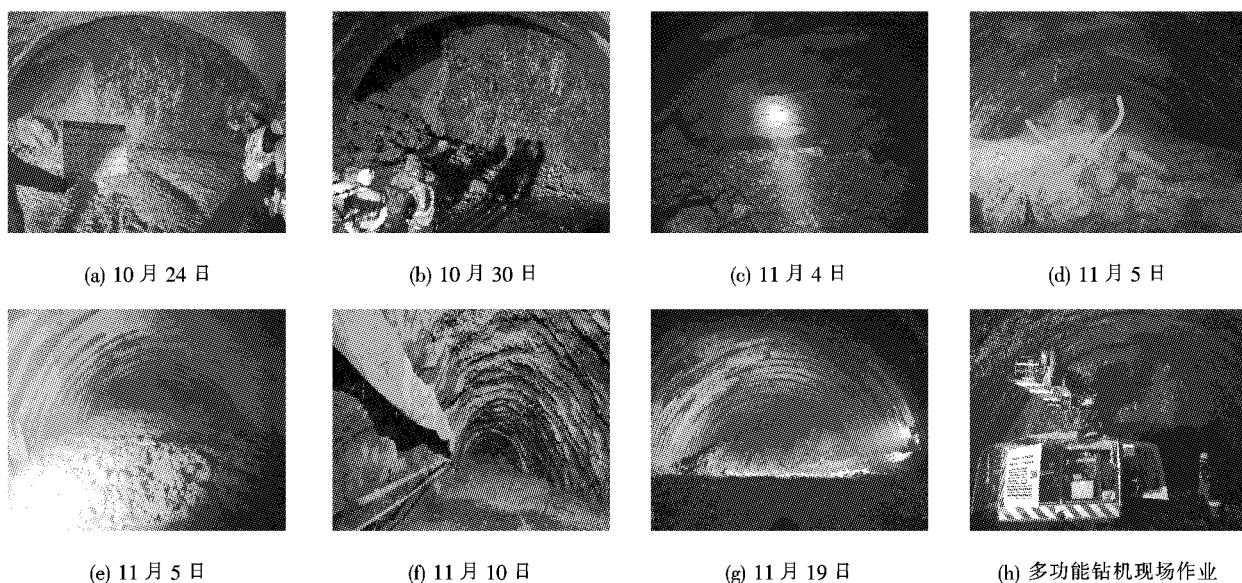


图 1 突砂突泥现场情况及多功能钻机现场作业图(2019 年)

2 超前水平钻探地质预报现场工作

2.1 已揭露围岩情况

此次探测工作区为:ZK541+810~ZK541+873。据勘察报告知,该段围岩为中风化辉绿岩,裂隙发育,岩体破碎,物探结果显示为电阻率低阻异常区。洞壁涌水方式以雨淋状为主,易出现坍塌。该次作业前,现场已发生突泥灾害,并已采用堆土反压进行控制,堆土相对较高,呈湿润状。

2.2 超前水平钻探地质预报的目的

为减少占用掌子面作业时间并保证预报的效率及准确率,该项目拟采用不取芯水平冲击钻进行超前预报作业,钻探所用钻杆直径 54 mm,钻头直径 65 mm。钻进过程中主要根据施工用水颜色、返水量、排屑颗粒、钻速变化、扭矩变化及卡钻、突进、塌孔等现象判断

地层岩性、岩石强度、岩层完整性以及地下水发育情况等。

2.3 钻孔布置

钻孔的目的是探明隧道周边溶洞范围。由于事故掌子面 ZK451+831 桩号前方反压土层较高且堆填范围较大,难以于掌子面附近清理出合适的钻机工作平台。现场实际钻探预报是除 1# 孔外,其余各孔折衷以 ZK541+810 作为工作基准掌子面,一定角度斜向隧道周边进行探测。最终钻孔布置如表 1 及图 2 所示。

3 探测数据及结果对比分析

多功能超前水平钻传感器的测量值及相应的预报结果均是以钻进时掌子面的围岩情况作为基准参考面。钻进里程前 0~2 m 范围内通常为开孔作业,多夹杂手动操作,因此以掌子面向内钻进 0~2 m 后的

表 1 超前水平钻探地质预报钻孔位置

钻孔编号	钻孔位置
1 [#]	探测范围 ZK451+831 ~ ZK451+863,距拱顶约 2 m,处于断面中线,向下偏转约 2°
2 [#]	探测范围 ZK451+814 ~ ZK451+867,位于拱顶,处于断面中线,向上偏转约 10°
3 [#]	探测范围 ZK451+814.5 ~ ZK451+869,距拱顶约 1.7 m,距断面中线向左约 4.2 m,向上偏转约 5°,向左偏转约 10°
4 [#]	探测范围 ZK451+812 ~ ZK451+873,距拱顶约 2 m,距断面中线向右约 4.6 m,向上偏转约 10°,向右偏转约 15°
5 [#]	探测范围 ZK451+814 ~ ZK451+867,距拱顶约 0.6 m,距断面中线向右约 2.8 m,向上向右均偏转约 10°
6 [#]	探测范围 ZK451+814 ~ ZK451+867,距拱顶约 0.5 m,距断面中线向左约 2.3 m,向上偏转约 15°,向右偏转约 10°

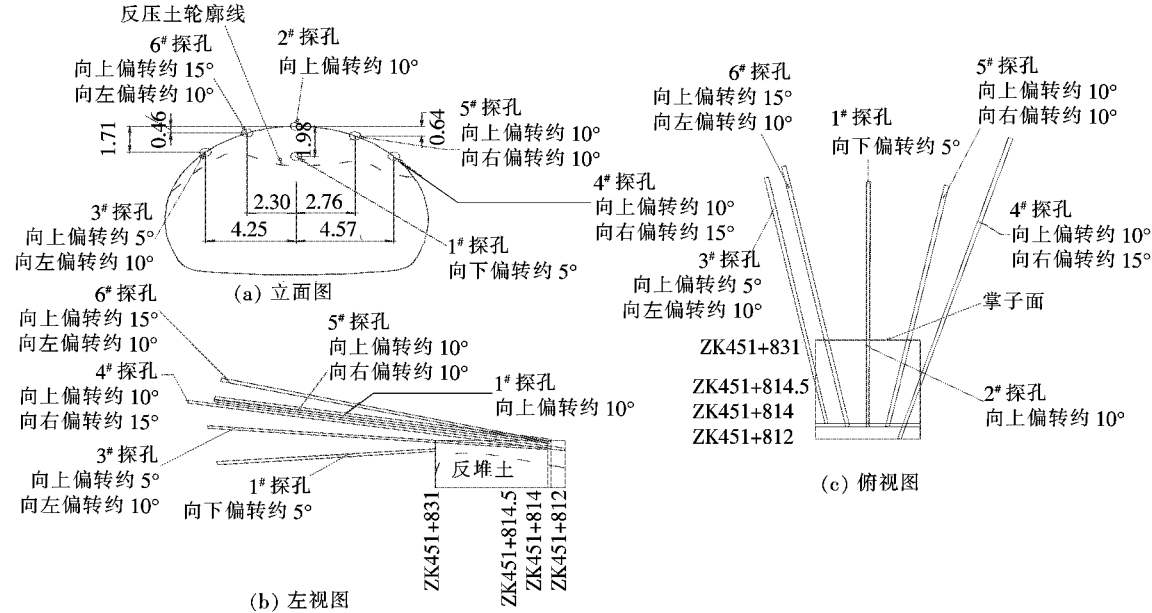


图 2 钻孔布置图(单位:m)

位置作为之后钻探范围内围岩的参考基准。尽管各钻孔带一定角度偏斜,但考虑到各钻孔在隧道开挖方向上的投影差距较小,且钻杆悬空过长、在钻进过程中会产生一定不可预测的偏转,为表述方便,仍以纵向里程号表述各钻孔在各自钻孔轨迹线上的点。由于篇幅限制,这里仅给出 6[#] 钻孔 0~19 m 的传感器数据,如图 3 所示。从图 3 可以看出:4 个参数随着探测深度的不同变化幅度剧烈,此为钻孔存在溶洞的典型变化趋势。同时结合现场钻探过程中钻杆的返水情况(图 4),现场钻探过程中的记录,综合分析后给出探测数据分析及相关结论(表 2)。图 5 为超前水平钻探地质预报所得各钻孔范围内围岩分布情况,由图 5 可知:岩溶区主要位于掌子面左侧,右侧岩溶分布范围较小。

综合以上结果分析,可知各孔预测围岩变化趋势大体一致,但仍有所不同。预报段基本工程地质分布情况如表 3 所示。

在实际施工过程中对预报段的开挖揭露情况进行

了跟踪。如图 6 所示,为 6[#] 探孔所探测的掌子面左上方的实际揭露情况,所揭露的溶洞分布里程范围为 ZK541+829 ~ ZK541+835,溶洞沿隧道轴线方向长约 6 m,高约 6.5 m,沿隧道径向往外厚度约 1.5 m。实际揭露的溶洞位置、规模与预测结果基本吻合。

4 处治方案

通过对前期事故发展历程的调研并结合超前水平钻探预报结果,经多方论证后提出两种处治方案。

4.1 处治方案 1

针对预报结果显示隐伏型岩溶多分布于掌子面左侧的特点,方案 1 的主要处治方案如下:如图 7 所示,对掌子面进行封闭,同时对回填反压区外露部分采用小导管注浆法进行径向补强注浆,并采用 4 台阶侧导洞开挖法对反压区及超前钻探预报的隐伏溶洞分布段进行开挖施工,施工过程中加强临时护拱及隧道轮廓

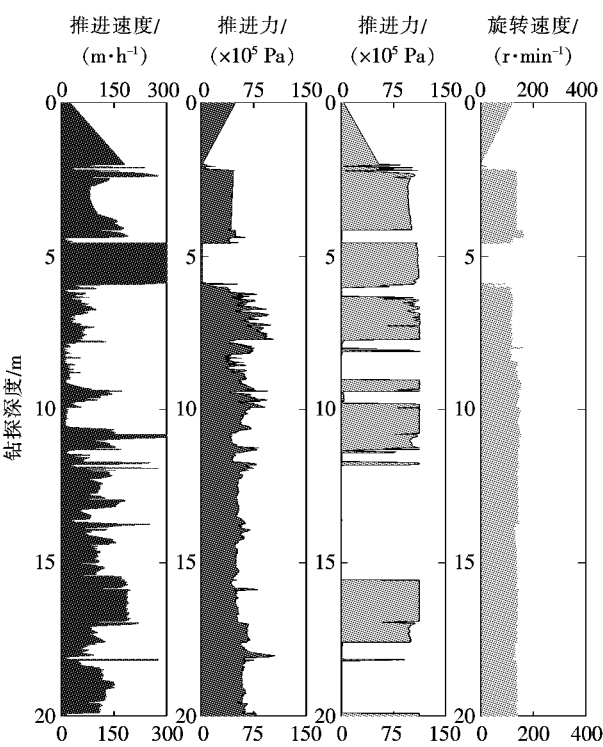


图3 6# 钻孔传感器采集数据

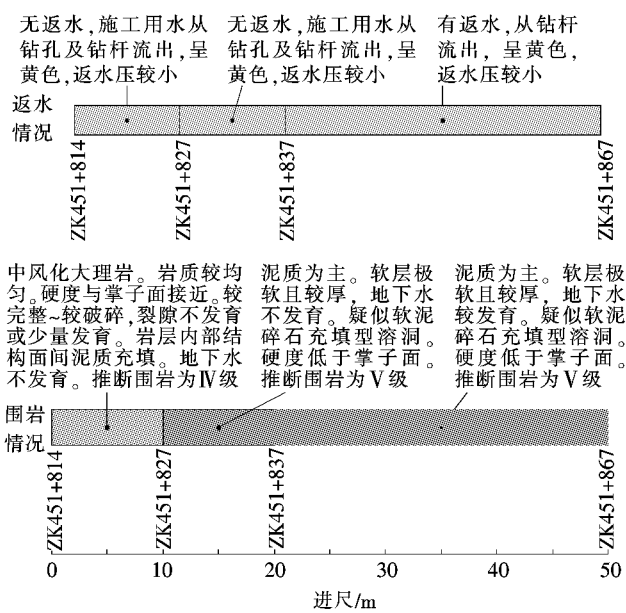


图4 6# 钻孔围岩返水及围岩分布情况

线外径向补强,同时对掌子面进行全范围超前注浆直至超前隐伏溶洞分布段不小于10 m,各开挖段支护形式如图8所示。

表2 6# 探孔地质超前预报现场记录表及预报结果

孔深/m		单杆耗时/min	现场记录	钻探信号分析	预报结论
开始	结束				
0	2	2	排屑为细颗粒,岩层内部结构面间泥质充填。硬度与掌子面接近。局部偶有突进现象。钻速较平稳。无返水,施工用水从钻孔及钻杆流出,呈黄色,返水压较小。手动推进	钻速整体上未有明显大波动。钻速曲线近似呈较密集锯齿状,小幅度跳动频率高,钻速突增现象偶有发生且数值较大。扭矩及转速曲线近似呈较密集锯齿状,数值增大且小幅度跳动频率高。钻速突增处推进力有一定降低或降低明显,整体基本稳定	ZK541+814 ~ ZK541+827 段钻进时排屑为细颗粒,结合掌子面揭露情况推测围岩为中风化大理岩。钻进时钻速较平稳,结合电子数据知岩层岩质较均匀,硬度与掌子面接近。钻探过程中局部偶有突进现象,结合电子数据知较破碎~破碎,裂隙不发育或少量发育。全程无明显返水特征,返水压较小,即地下水不发育。而施工返水呈黄色,表明岩层结构面间泥质充填。该段完整性及稳定性一般,岩土体可能发生局部掉块、滑动或变形。推断围岩为IV级
2	4	2			
4	6	2			
6	8	2			
8	10	2	基本无排屑。岩层内部结构面间泥质充填。硬度低于掌子面。无突进现象。钻速突增至较大数值并维持不变,一定时间后又突降。无返水,从钻杆流出,呈黄色,返水压较小	局部钻速突增,而后钻速曲线波峰呈平台状,维持一定距离后又突降至原先水平。波峰平台钻速曲线整体相对较平滑,小幅度跳动频率相对较低,扭矩及转速曲线近似呈锯齿状,数值较高且小幅度跳动频率较高。推进力无明显降低,整体基本稳定	ZK541+827 ~ ZK541+837 段钻进时基本无排屑。结合掌子面揭露情况推测围岩以泥质为主,而钻进时钻速突增至较大数值并维持不变,一定时间后又突降,钻机推进力未明显减小,钻探过程中无突进现象,结合电子数据知岩层软层极软且较厚。此外钻进过程无较明显的返水特征,施工返水呈黄色,结合现场开挖情况,推测存在为软泥充填型溶洞。该段完整性及自稳性较差,推断为充填型溶洞。且岩层内地下水有一定发育,推断围岩为V级
10	12	4			
12	14	4			
14	16	6			
16	18	4			
18	20	5			

续表 2

孔深/m		单杆耗 时/min	现场记录	钻探信号分析	预报结论
开始	结束				
32	34	11			ZK541+851 ~ ZK541+867 段钻进时基本无排屑。结合掌子面揭露情况推测围岩以泥质为主,而钻进时钻速突增至较大数值并维持不变,一定时间后又突降,钻机推进力未明显减小,钻探过程中无突进现象,结合电子数据知岩层极软且较厚。此外钻进过程有较明显的返水特征,返水压一般,返水呈黄色,结合现场开挖情况,推测存在软泥充填型溶洞。该段完整性及自稳性较差,推断可能为充填型溶洞。且岩层内地下水有一定发育,推断围岩为 V 级。钻头尚未探到软层边界,而钻杆由于悬空过长发生碰撞折断,终止作业
34	36	5	基本无排屑。岩层内部结构面间泥质充填。硬度低于掌子面。无突进现象。钻速突增至较大数值并维持不变,一定时间后又突降。有返水,从钻杆流出,呈黄色,返水压较小	局部钻速突增,而后钻速曲线波峰呈平台状,维持一定距离后又突降至原先水平。	
36	38	1		波峰平台钻速曲线整体相对较平滑,小幅度跳动频率	
38	40	1		相对较低,扭矩及转速曲线	
40	42	9		近似呈锯齿状,数值较高且	
42	44	4		小幅度跳动频率较高。推进力无明显降低,整体基本	
44	46	2		稳定	
46	48	16			
48	50	4			

注:钻孔时间:2019/11/21,孔号:6#,工作概况:全程 54 钻杆,向上偏转约 15°,向左偏转约 10°,钻孔位置:探测范围为 ZK451+814 ~ ZK451+867,距拱顶约 0.6 m,距断面中线向右约 2.8 m。

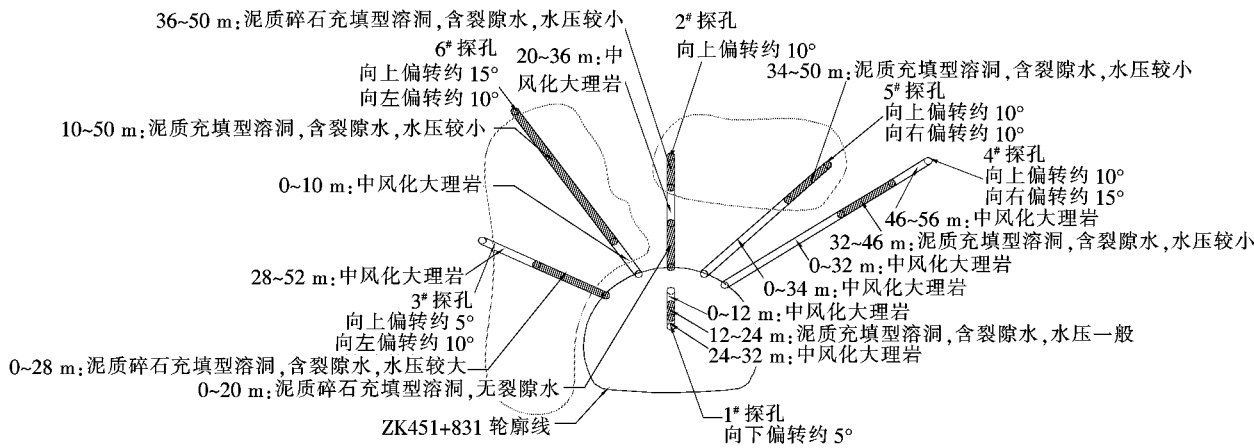


图 5 超前水平钻探地质预报所得各钻孔范围内围岩分布情况

表 3 预报段围岩分布情况

里程	长度/m	围岩分布情况
ZK541+817~ ZK541+873	56	围岩以中风化大理岩为主,硬度与掌子面接近。较完整~较破碎,裂隙不发育或少量发育,但溶蚀空腔尺寸较大、分布范围较广,特别是隧道上方分布较为密集,且溶洞内部充填软泥碎石,含一定地下水。整体稳定性较差。推断围岩等级为 V 级

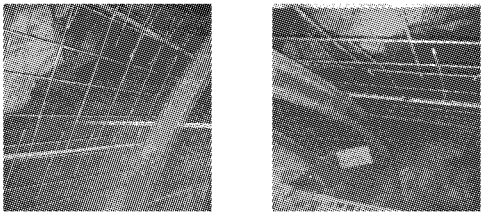


图 6 预报段实际施工溶洞揭露情况

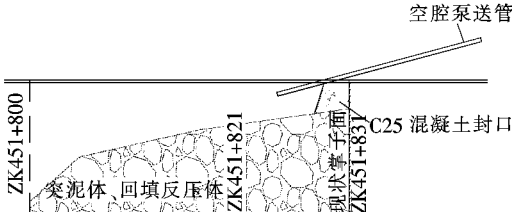


图 7 掌子面前方封口注浆

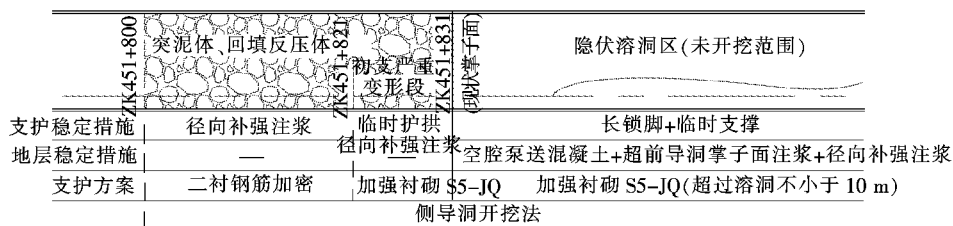


图 8 各开挖段支护形式示意图

4.2 处治方案 2

针对前期超前水平钻预报结果,并结合 C6—XP 多功能水平钻机在超前大管棚施工方面的优势,方案 2 拟定以下处治方案:与方案 1 相同,对掌子面处进行注浆封闭,采用超长探洞大管棚+补强小导管的方法

对隧道轮廓线以外围岩进行加固支护,同时采用 4 台阶侧导洞开挖法对反压区及隐伏溶洞分布段进行施工。其中,超长探洞大管棚需保证进入安全岩盘至少 10 m,如图 9 所示。

经各方研究讨论后最终采用方案 1 的处理措施,

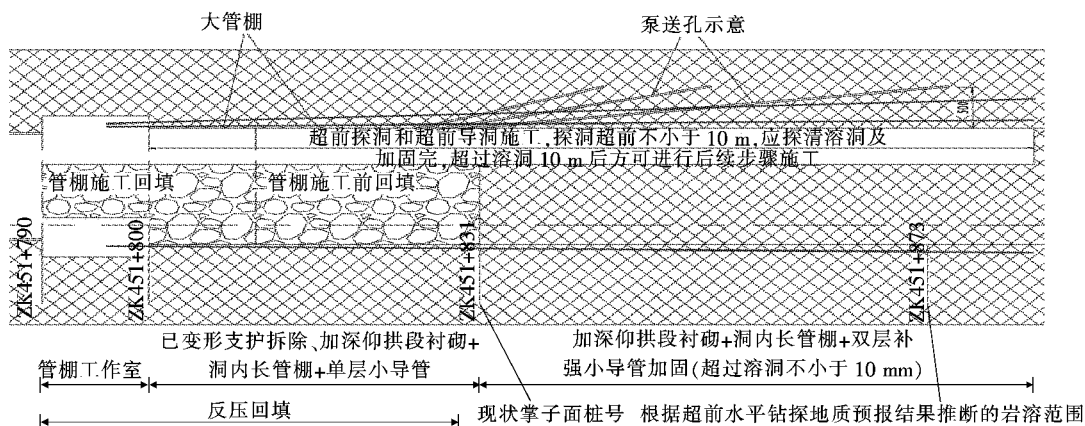


图 9 各开挖段支护形式示意图

其主要原因如下:① 超前大管棚的长度超过 80 m,施工难度过大,且对于超前大管棚而言,其自重过大难以保证施工精度;② 难以保障超前大管棚端头进入岩质情况较好的岩盘,且之后也较难采取有效措施摸清溶洞情况以保证超前大管棚的施工质量。

针对方案 1 的处治要求,现场施工单位进行了精细组织和管理,虽然在超前探洞初期开挖阶段发生了小规模突泥事故,但经对反压段土体及超前探洞轮廓外一定范围内的围岩进行补强注浆加固,并加强临时支护措施后,未有突泥事故发生。同时,当某一区段内掌子面前方全断面注浆施工及隧道轮廓线外围岩补强注浆施工完成后,现场继续采用了超前水平钻探地质预报手段对注浆效果进行了检验,预报结果显示注浆效果较好,开挖后的洞渣显示浆液分布较均匀,实际施工中也未发生突水突泥事故。

5 结论

以岩溶区实际隧道突泥事故为依托工程,采用超

前水平钻探地质预报技术对事故掌子面后方的围岩分布情况进行钻探,并提出了相应的处治措施,得到以下结论:

(1) 在采用超前水平钻探地质预报技术开展隧道地质预报工作时,应注意加强钻探过程中的排屑情况、钻杆返水情况、围岩变化情况的观察和记录,同时后期应根据观察和记录情况,结合钻进过程中所采集的推进速度、推进力、扭矩、旋转速度等参数对掌子面前方围岩分布情况进行综合分析。

(2) 超前水平钻探地质预报技术可较好地应用于岩溶区隧道地质预报工作,预测结论可靠,且可有效指导岩溶区突水突泥事故后期处治工作。

(3) 超前水平钻探地质预报结果可作为岩溶区隧道突泥事故处治方案合理提出的重要参考依据,且在实际处治施工过程中也应采用超前水平钻探地质预报技术对掌子面前方围岩分布情况进行钻探预报,以便适时调整处治方案。

(4) 对于岩溶地区隧道突水突泥事故处治方案的制定,应在采用较为可靠的预报手段摸清掌子面前方

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.048

地震反射波法在复杂地层跨海盾构隧道中的应用

陈建福

(中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要:厦门轨道交通2号线海东区间跨海修建,隧址沿线地质条件多变,地质勘探难度较大。地震反射波法在勘察岩土界面及地层分布,寻找断层、海底孤石、软弱破碎带等不良地质上都有着显著效果。该文结合海东区间跨海段勘察实例,通过对比地震反射波法勘察结果与钻探勘察结果,分析地震反射波法在跨海隧道勘察中的适用性。研究表明:地震反射波法对常规水土岩分界面具有较好的辨识度,可初步识别破碎带等不良地质,但对海底孤石及局部碎块状强风化基岩段,物探结果与钻孔实际揭示情况存在一定偏差。因此在跨海盾构隧道勘察过程中,尤其在进行孤石及破碎带密集地层,为获得较好的勘察效果,应采取物探和钻探结合的勘察方式,在物探发现的不良地质密集段,应进行针对性加密钻孔勘察。

关键词:地震反射波法;跨海盾构隧道;孤石;适应性分析

近年来,随着中国地铁项目的增多,施工过程中面临的不良地质情况也愈发复杂。厦门地铁2号线海东区间跨海修建,其最大埋深达60 m,隧址沿线海底淤积较厚,海床起伏较大且穿越孤石密集、基岩凸起及断裂带地层,施工过程中勘察难度较高。

施工中物探多以地震反射波法为主,该方法已被广泛应用于基桩动测、岩溶地区勘探、桥墩选址勘察、海底珊瑚岛礁探测、地裂缝勘察、地质灾害调查、煤层采空区勘探等方面,其具有预测范围广、效率及精度较

高、能大致判断不良地质体性状的特点。

在中国大部分隧道施工过程中,地质勘察一般都采取以物探为主,钻探为辅的综合勘察方法。但中国国内在地铁隧道尤其是跨海地铁隧道的修建过程中,地震反射波法的应用先例极少。在地质条件复杂的海底隧道施工过程中,地震反射波法的适用性及使用方式均亟待研究。

该文基于厦门地铁2号线海东区间,深入对比海底孤石段分别采用地震反射波法、钻孔勘探法和加密

及隧道轮廓线外一定范围岩溶分布情况的基础上,采取有针对性的处治措施,且在实际处治施工中应保证临时支护系统的施工质量,以免处治过程中再次发生事故。

参考文献:

- [1] 王梦恕.对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].铁道勘察,2014(1).
- [2] 张彦龙,田卿燕,林海山.姚双垌隧道运营期地质综合探测技术研究[J].中外公路,2017(6).
- [3] 李哲,徐豹之,农骥.隧道超前水平钻进功速比与围岩响应特征分析[J].地下空间与工程学报,2018(S1).
- [4] 岳中琦.钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J].岩石力学与工程学报,2014(10).

- [5] 田昊.隧道地质数字钻进精细化识别方法研究.[D].山东大学博士学位论文,2015.
- [6] 赵鹏宇.公路山岭隧道超前钻探地质预报研究.[D].长安大学硕士学位论文,2014.
- [7] 谭卓英,蔡美峰,岳中琦,等.钻进参数用于香港复杂风化花岗岩地层的界面识别[J].岩石力学与工程学报,2006(S1).
- [8] 周轮,李术才,许振浩,等.隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J].山东大学学报(工学版),2017.
- [9] 祁伟.超前钻探法在隧道超前地质预报中的应用研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.
- [10] 舒森,王树栋,李广.瞬变电磁法指导复杂地质隧道超前水平钻探应用[J].物探与化探,2018(6).
- [11] 徐豹之.基于多小波分析及证据推理的隧道超前水平钻孔参数预报方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2019.

收稿日期:2019-09-29

作者简介:陈建福,男,高级工程师.