

宜万铁路马鹿箐隧道高压富水岩溶治理技术

杨 兵¹, 肖广智²

(1. 中铁十一局集团公司, 武汉 430071; 2. 中华人民共和国铁道部工程管理中心, 北京 100866)

[摘要] 岩溶灾害严重危及隧道施工的安全, 影响施工的进度, 是目前国内外隧道建设面临的重点和难点问题。首先对马鹿箐隧道历次涌突水特征进行了分析, 主要阐述了超前地质预报技术、水文观测、反坡追排水清淤技术和泄水释能工法等技术在本工程中的应用, 最后对溶腔揭示后隧道跨越溶腔段的工程处治措施进行了详细介绍。马鹿箐岩溶隧道成功的施工经验, 为今后类似隧道工程中大体量高压富水隐伏岩溶问题的处理提供参考和借鉴。

[关键词] 隧道; 岩溶突水; 超前地质预报; 帷幕注浆

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)12-0069-08

1 前言

1.1 工程概况

中铁十一局承建的马鹿箐隧道位于宜万铁路八座一级风险隧道前列, 地质极为复杂, 地下暗河、岩溶高压富水溶腔等不良地质广布, 多次遭遇岩溶溶腔特大型突泥突水, 为目前世界铁路建设史上瞬间突涌水量最大的隧道, 其工程艰巨程度、工程施工难度和安全风险之大实属罕见, 其建设被称为“世界级难题”, 受到国内外工程界的高度关注。

马鹿箐隧道为双线隧道, I 线隧道全长 7 879 m, I 线左侧 30 m。设置全长为 7 850 m 的平行导坑, 增建的 II 线为平导扩挖而成, 全长 7 836 m, 自进口至出口为连续上坡, 纵坡为 1.53%。为了保证施工和运营期间的安全, 经相关单位多方论证, 在隧道进口位于 II 线左侧 20 m 设置长 4 701 m 泄水洞一座, 泄水洞与平导间增设泄水支洞、泄水分支洞以排放 +978 溶腔水。

1.2 工程地质及水文地质

1.2.1 工程地质

马鹿箐隧道地处鄂西南喀斯特高原, 新华夏构造的溶蚀侵蚀中高山区^[1]。分布的地层主要有二

叠系 (P1q, P1m, P2w, P2c)、三叠系 (T1d, T1j) 的碳酸盐岩地层。隧道处于金子山复向斜中的四方洞向斜的南东翼, 呈单斜构造, 岩层倾向平缓, 一般 5°~15°。隧道区未见明显断裂构造, 主要发育两组节理: 一组产状 300°~340°∠80°~90°, 另一组产状 210°~270°∠60°~80°。前者为纵张节理, 后者为横张节理, 这两组节理对区内岩溶发育有较明显的控制。

1.2.2 水文地质

隧道穿越碳酸盐岩地区, 地表岩溶强烈发育, 断层、漏斗、落水洞、地下暗河、溶洞、溶槽、溶管星罗棋布, 处在小溪河暗河系统的箐口暗河子系统中, 岩溶管道、溶隙与上部暗河构成复杂的网络系统, 岩溶水文地质条件极为复杂。

箐口暗河子系统, 由东部云雾山台原和斜坡补给区来水, 通过鸟腊河、小马滩河明流和相应的地下充水管道 (暗河) 汇入凉风洞, 沿层面、节理裂隙至龙潭、蝌蚂口。地下水总体形成向西北方向运移汇集的流态。

隧道地区暗河系统四通八达, 隧道穿越油竹一垮岩湾暗河及小溪河地下河系统中的箐口子系统中的多个分支暗河, 共发育 5 条暗河系统, 对隧道有直

[收稿日期] 2009-10-30

[作者简介] 杨 兵 (1974-), 男, 湖北京山县人, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程的施工技术管理工作; E-mail: zt11yangb@163.com

接影响的暗河系统有2条。一条为进口附近隧道上方约32 m的油竹—跨岩湾暗河系统;另一条为小马滩暗河系统,高于隧道上方148 m。+978特大型富水溶腔处于凉风洞—小马滩暗河系统。

据地表暗河出露口龙潭、蝌蚪口水文点长期观测资料,蝌蚪口暗河系统岩溶水的流量动态与降雨关系密切,对降雨的反应较敏感,一般在中、大雨的第二天,地下水流量明显增长,第四天达到峰值。反映了岩溶水系统补给条件良好,径流途径较长,径流较通畅,马鹿箐隧道暗河示意图见图1。

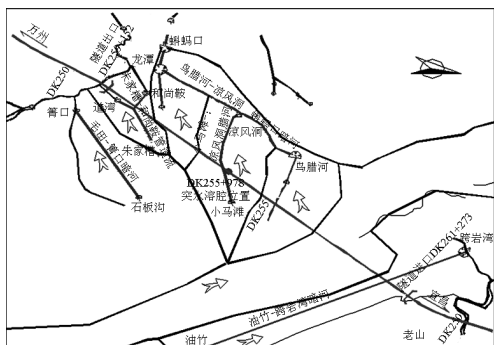


图1 马鹿箐隧道暗河示意图
Fig.1 Underground river diagram of Maluqing Tunnel

1.2.3 工程难点

隧道从+978高压富水溶腔管道底部的溶腔充填物中穿越,由于降雨的间歇性、降雨组合强度的变化,溶腔充填物在地下水流的作用下时而疏通,时而淤积,形成反复突(涌)水现象。如何化解突涌水的风险、突破+978溶腔是本隧道的工程重难点。

2 +978岩溶水突涌情况

2.1 历次突涌水情况

2006年1月21日,出口平导掘进至PDK255+978,遭遇中国铁路建设史上前所未有的特大突水地质灾害,之后又发生了18次特大涌水事故,具体见表1。

2.2 历次突水分析得出的结论

1)“+978溶腔”岩溶水主要通过管道径流至溶腔,岩溶水在汇集过程中,除在“+978溶腔”附近产生聚集外,在“+978溶腔”外岩溶发育部位也可能产生聚集;由于降雨的间歇性、降雨组合强度的变化,溶腔充填物在地下水不同压力、流速的作用下产生疏通、淤积,形成反复突(涌)水。

2)泄水洞揭穿溶腔后经历了14次突(涌)水,反复突水,反复冲洗,特别是经过主汛期的冲洗,岩

表1 历次突(涌)水情况表

Table 1 Preventive circs of karst water burst

序号	突涌水日期	突(涌)水持续时间/min	突(涌)水总量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	突(涌)水流量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	突水前马2孔水位/m
1	2006年1月21日	140	70	30	1 070 ~ 1 110 (实测水压0.8 ~ 1.2 MPa)
2	2006年1月24日	15	3	12	无法测
3	2006年7月23日	正洞170;平导3 360	32.5	5.4	1 104
4	2006年8月13日	900	2.7	0.2	1 046
5	2006年8月18日	1 200	54.6	0.8	1 070
6	2008年4月11日	20	1.5 (当日涌水量 $19.5 \times 10^4 \text{ m}^3$)	4.5	1 028 (从旱季到雨季的季节变化)
7	2008年4月19日	90	18.4 (当日涌水量 $25.6 \times 10^4 \text{ m}^3$)	25.2	突水前未测到水位,突水后为1 047
8	2008年5月10日	125	14 (当日涌水量 $23 \times 10^4 \text{ m}^3$)	25.7	1 054
9	2008年5月23日	10	4.3 (当日涌水量 $13.4 \times 10^4 \text{ m}^3$)	17.6	测线断落
10	2008年5月26日	5	2.5 (当日涌水总量 $11.9 \times 10^4 \text{ m}^3$)	19.7	1 036.354
11	2008年6月12日	85	10	6.76	1 022.004
12	2008年6月18日	18	5	16.7	1 022.004
13	2008年6月20日	20	4	1.026	1 022.004
14	2008年6月21日	180	14	1.1	1 022.004
15	2008年7月4日	840	29	6.8	1 010.454
16	2008年7月5日	660	21	1.78	1 010.454
17	2008年7月22日		因进场道路被冲毁,无法观测		1 010.454
18	2008年8月15日	965	25	2.25	1 010.454
19	2008年8月28日	1 805	37	1.2	1 010.454

溶管道变得愈加通畅,突水滞后时间已由勘察时的4 d 缩短至1 d,以后还会随着岩溶水的排泄进一步缩短,峰值涌水量也会不断增大,突(涌)水的特征为“来势缓、峰值低、时间长”。突水所产生的涌水均为动态补给水。

3) 发生溃(涌)水(突泥)的决定性因素有两个:一个是溶腔内蓄积的水体量(可根据降雨量及放水量推算),另一个是溶腔内水流通道的淤塞条件(淤塞物及淤塞的程度)。溶腔内蓄积的水量可以根据预测涌水量及泄水洞的排水量进行推算。溶腔内水流通道的淤塞情况(淤塞程度)永远是个未知情况且是个不确定的变化情况。只能通过相关水文观测数据推算出溶腔内是否在蓄积水体及蓄积的水体量,如果溶腔内正在蓄积水体,且达到了会造成危害性事故的容量,就可能会发生突水,提前进行预警,并采取相应的措施避免发生安全事故。

3 +978 岩溶水治理措施

为彻底治理水患,铁道部组织国内地质、水利、煤

炭、土木工程等各界专家多次进行勘察会商,采取了两项重要措施:临时措施和永久措施。临时措施为出口抢险创造条件,永久措施为揭示溶腔创造条件^[2]。

3.1 临时措施

临时措施是出口抢险救援阶段采取的主要措施,采用洞外向洞内注浆封堵的方案,在高出隧道顶350 m 的山坡上向平导内灌注水泥浆液作止水塞,以隔断溶腔水源。洞内进行抽水、清淤、逐个封堵横通道、再抽水、清淤方案。

3.1.1 地表深孔精确定位注浆封堵技术

由意大利 Schramm 公司生产的 T685WS 车载顶驱钻机施钻,采用定向钻进的地面、井下监控系统进行纠偏,向平导内充填骨料作为注浆介质,确保浆液结石体的堵水效果。注浆遵循“先两侧、后中间”的顺序,形成注浆堵水塞,隔断溶腔与隧道之间的联系。注浆孔布置平面图如图2所示。

3.1.2 自制抽水列车反坡追踪技术

采用自制抽水列车进行反坡追踪快速排水排泥,详见图3。

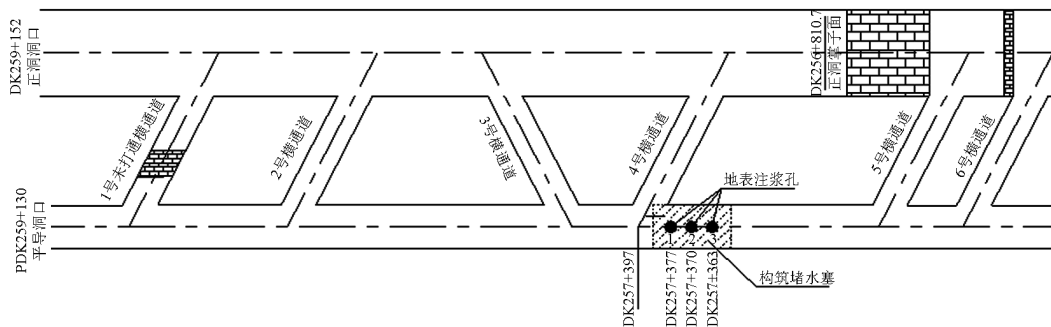


图2 地表深孔注浆孔平面布置图

Fig. 2 Floorplan of surface grouting deep hole

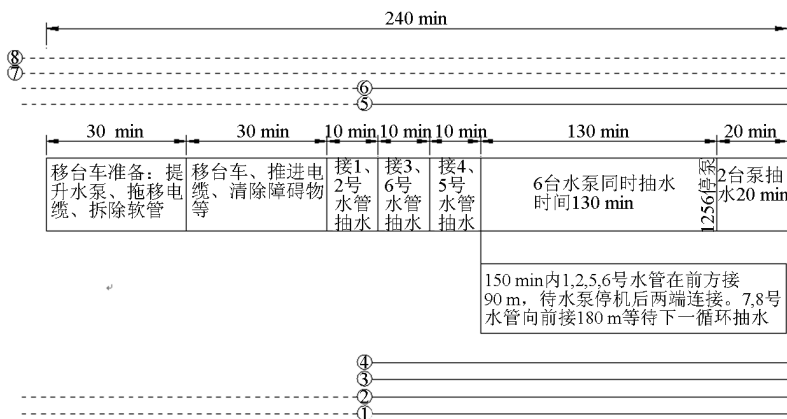


图3 工序循环流程图

Fig. 3 Flow diagram of process cycle

3.1.3 横通道快速封堵技术

每露出一个横通道后,立即封堵正洞和平导横通道,根据横通道封堵墙承受的水压,分别采取碎石袋码砌、混凝土封堵,如图4所示。

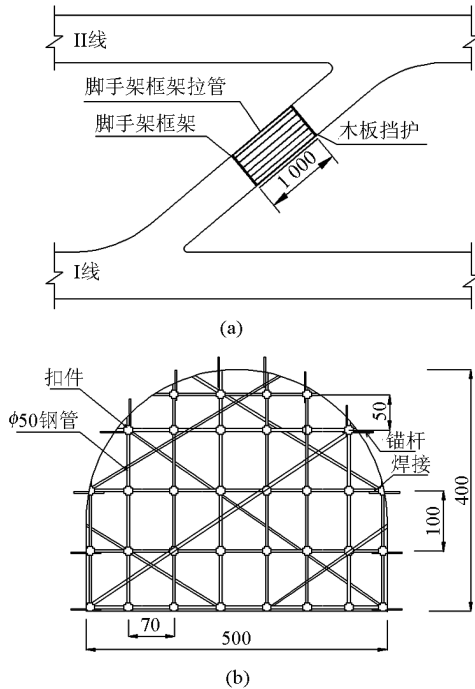


图4 横通道封堵设计(单位:cm)

Fig. 4 Block design of cross channel(unit:cm)

3.2 永久措施

3.2.1 监测措施

1)超前地质预测预报:施工中采用了TSP203、地质雷达、红外线探测仪等多种先进的探测仪器和科学的超前地质预测预报手段,采用有效钻距可达350m的国内先进钻机,进行长距离超前地质探孔,提高了工效,有效地规避了风险,在超前地质预报结合物探技术方面积累了巨型溶腔超前地质预测预报方面的宝贵经验。

2)水文观测:2006年1月以来,一直坚持对龙潭、蝌蚪口、马2孔、隧道进出口等多个水文观测点位以及洞外降雨情况进行3个水文年不间断水文观测。主要收集出水的颜色、水量、水质、水压等水文资料,水文观测时认真做好记录,及时进行分析、归纳、总结。提炼了富水岩溶隧道进洞条件的的基本标准(马鹿箐隧道进洞作业条件是日降雨量小于20mm);并得出了枯水季节是处理富水溶腔的黄金季节的基本结论。

3.2.2 泄水措施

马鹿箐隧道+978溶腔泄水及释能降压具体实施

分三个阶段进行:泄水不泄泥(泄水洞、平导钻孔泄水)、泄水支洞方式及在高位直接揭示溶腔低位直接揭开溶腔方式。在泄水洞逼近溶腔时采用“钻孔排水降低水压、高位支洞揭通溶腔”的排水方案,进行了四期泄水工程,在四期泄水的最后阶段,确定了溶腔爆破揭开放水放泥释放能量的技术方案^[3]。

1)泄水不泄泥阶段:泄水洞钻孔泄水(第一期泄水)及平导钻孔泄水(第二期泄水)为泄水不泄泥阶段。

通过钻孔泄水方式将溶腔水位由1120m降至1020m以内。出口“1·21”溃水后,在进口平导左侧20m设置泄水洞一座。泄水洞XDK255+900掌子面设置15个泄水孔,2007年6月30日开始泄水。因泄水量达不到预期要求,后在平导DK255+886掌子面增设50个泄水孔,从2007年9月27日完成。

第一期泄水,自从2006年8月至2007年6月30日,从隧道进口施工了长达4673m的泄水洞,在XDK255+900施钻15个放水孔,最大泄水量70000m³/d,如图5和图6所示。

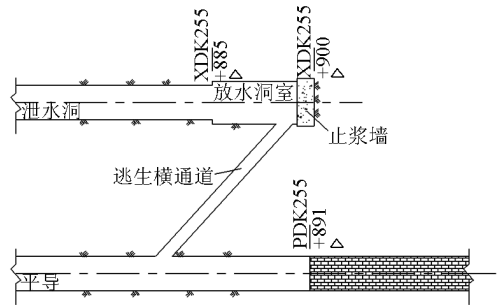


图5 泄水洞泄水(第一期)平面布置图

Fig. 5 Floorplan of water release(first stage)

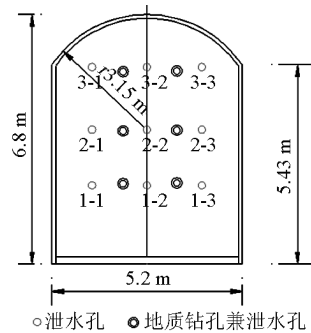


图6 泄水洞泄水孔布置图

Fig. 6 Arrangement diagram of water release hole

第二期泄水,2007年7月至9月,在平行导坑PDK255+891掌子面前方开挖扩大洞室,施作了50个φ200mm的泄水孔,进一步增加了泄水流量,

最大泄水量 123 000 m³/d,如图 7 和图 8 所示。

2) 泄水支洞泄水阶段:采用泄水支洞方式(第三期泄水),在高位直接揭示溶腔。泄水支洞位于泄水

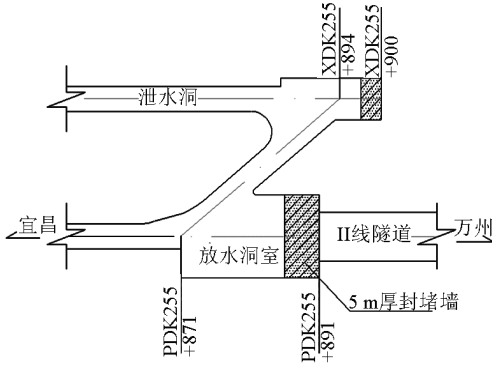


图 7 平导泄水(第二期)平面布置图
Fig. 7 Floorplan of plane-divert water release(second stage)

2007 年 10 月 5 日开始在泄水洞与平导之间横通道内开凿了长度 89 m,坡度 35°的泄水支洞,有效降低了溶腔水位,泄水支洞最大泄水量 72 000 m³/d。

3) 低位直接揭示溶腔方式:采用低位直接揭示溶腔方式(第四期泄水)。将泄水洞由 XDK255 +

洞与平导之间,终点里程 XZDK255 + 960,坑底标高 1 016.8 m(距隧道拱顶以上 16 m),如图 9 所示。2007 年 9 月 27 日开始,2007 年 12 月 13 日完成。

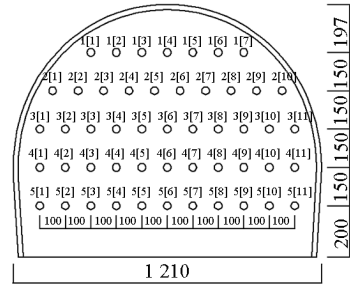


图 8 平导泄水孔布置图
Fig. 8 Arrangement diagram of plane-divert water release hole

900 延长至 XDK255 + 985,如图 10 所示。2007 年 12 月 28 日开始,2008 年 4 月 3 日完成。此后经过 4 月—9 月一个雨季的洗礼,7 万多立方淤泥巨石突出溶腔,彻底解除了高压水的风险,为 I 线和 II 线快速施工创造了条件。

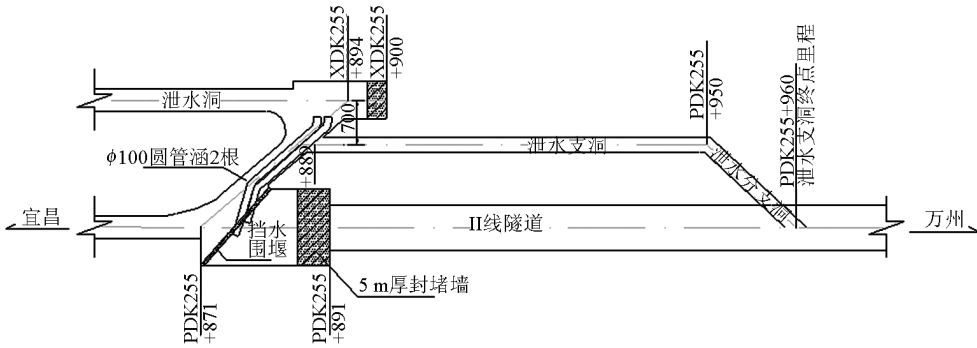


图 9 泄水支洞(第三期泄水)平面布置图

Fig. 9 Floorplan of water release adit hole(third stage)

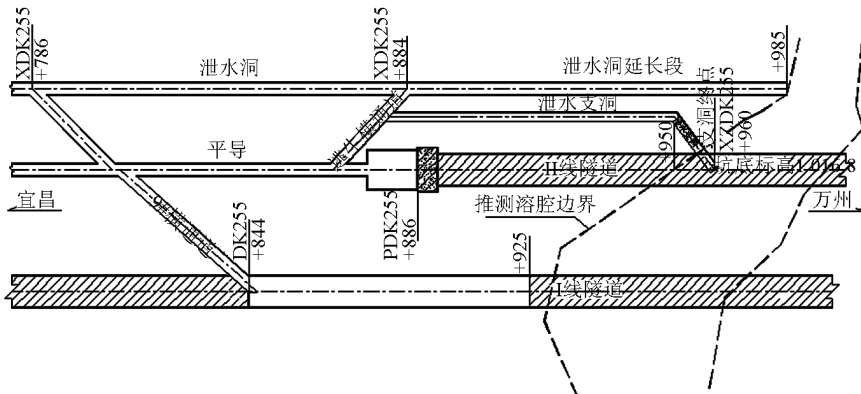


图 10 泄水洞延长段平面布置图

Fig. 10 Floorplan of extension of water release hole

4 +978 溶腔工程处理措施

4.1 揭示溶腔发育情况

根据“4·11”突水前后地质分析及超前钻探补探地质情况,基本探明了溶腔充填介质以及溶腔发育大致范围:+978 溶腔发育范围为 DK255+928~+974。DK255+928~+965 段在隧道开挖范围内发育溶腔,DK255+965~+974 段在隧道拱顶正上方 3~8 m 处发育溶腔;取芯的情况发现充填物为淤泥夹碎石、砾石,局部夹块石,偶有大块孤石。

I 线隧道开挖揭示的地质与超前探测揭示的地质基本一致;DK255+928~+946 段为灰岩,围岩较破碎,溶隙、节理发育;DK255+946~+964 段充填以淤泥质黏土夹碎、块石为主,局部见有少量水泥浆液,局部偶有渗水;DK255+964~+974 段为灰岩,围岩较好。

II 线隧道从溶腔里穿过,溶腔与线路斜向呈锐角相交。溶腔顶部在隧道拱顶处以上 30~40 m,且隧道拱顶标高以上部分为空腔;溶腔平均宽 13 m 左右,泄水洞口处宽 17 m,线路左侧 70 m 处开始变窄,宽 9 m。溶腔在线路左侧发育约 400 m 长后缩小为一约 1 m² 的出水口。由于流坍,线路左侧 PDK255+980~+968 段堆积了大量的从大里程往小里程方向呈仰角、淤泥黏性较大的泥夹石溶腔充填物,充填巨石顺着远离线路方向呈斜坡堆积,

PK255+980 处竖向高于隧道拱顶开挖线以上 3 m 左右,横向宽于隧道开挖线 3~5 m,纵向长 12 m;线路右侧溶腔堆积体位于 II 线隧道开挖线外 3~5 m,溶腔边壁有体积较大的孤石悬空,边壁的上部发育一个内部形态不详的约 20 m² 的天窗口,并有一股约 10 m³/h 的流水顺溶腔壁流入 II 线。泄水洞口露出约 30 cm,比溶腔充填物标高低,两侧主要为巨石充填;在泄水洞上方约 20 m 处有一个约 40 m² 的天窗口,从线路左侧的孤石堆流出一股约 200 m³/h 的流水,经泄水洞排走。

4.2 工程处理措施

在泄水洞逼近溶洞时采取“钻孔排水降低水压、高位支洞揭通溶洞”的四期泄水方案后,在泄水支洞内增设了泄水分支洞,确保运营期间隧道结构安全;I 线溶腔采取超前预支护、加强支护、分部开挖通过,II 线溶腔段采取盖挖逆筑法通过。

4.2.1 泄水分支洞

为保证运营期间隧道结构安全,保持泄水洞排水通畅,泄水洞进水口设置混凝土围堰,采用塔式进水,保证溶洞低水位情况下排水通畅,并在泄水洞内设置型钢混凝土拦污栅,防止块石冲入泄水洞(见图 11)。增加泄水分支洞,泄水(分)支洞进水口处设置型钢混凝土拦污栅,与泄水洞在空间上形成低、中、高位分区泄水,保证溶洞排水通畅(见图 12)。

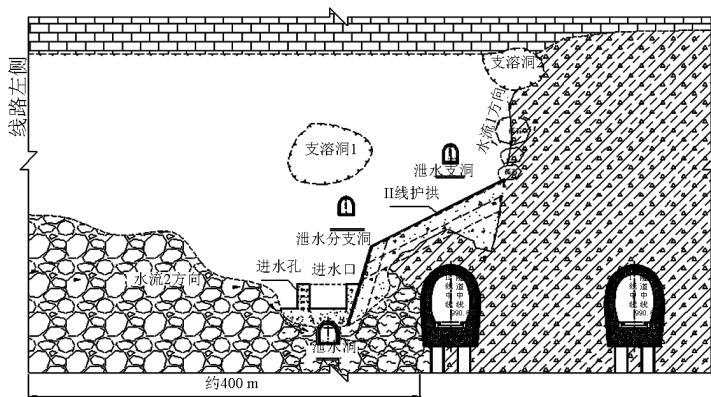


图 11 泄水洞进水口处理横断面图

Fig. 11 Intake floorplan of water release hole

4.2.2 I 线溶腔段

DK255+925~+976 段采取“帷幕注浆+拱墙大管棚+小导管超前预注浆”超前支护加固溶腔体,采用加固圈 5~8 m 的帷幕注浆加固溶洞充填物,拱墙设置密排超前 ϕ 108 大管棚、 ϕ 42 超前小导管等超前预支护,初期支护采取间距为 50 cm 的 20b 工字钢拱架(溶腔段双层)、30cm 厚锚喷钢纤维

砼。采用三台阶分部开挖工法,钢筋混凝土二次衬砌的加强型隧道结构,隧底采用桩基础跨越。详见图 13~图 16。

4.2.3 II 线溶腔段

通过 II 线出口向溶洞内泵送回填混凝土,在隧道拱顶形成混凝土护拱,采用盖挖施工。

采用小导管超前预注浆超前支护加固溶腔体

后,采用同 I 线隧道的开挖、支护、隧底处理措施。

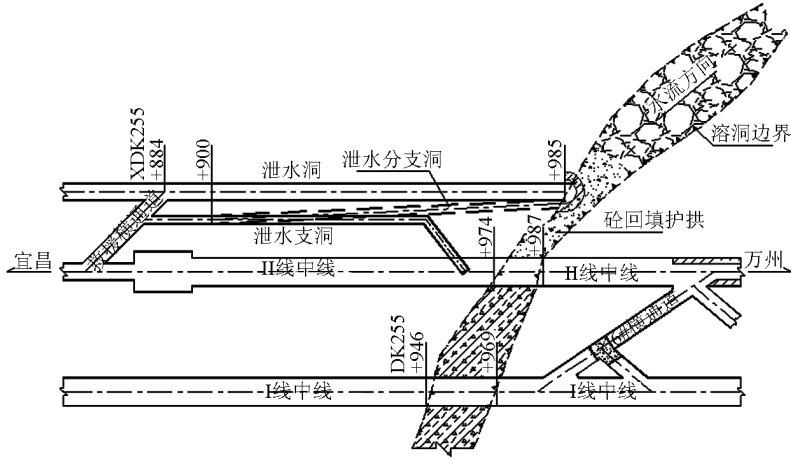


图 12 泄水分支洞平面示意图

Fig. 12 Floorplan of water release branch hole

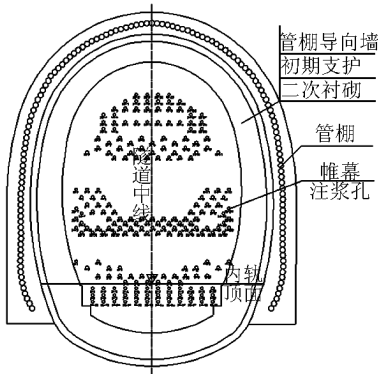


图 13 进口帷幕注浆、管棚布孔图

Fig. 13 Floorplan of hole layout for import purdah grouting and pipe roofing

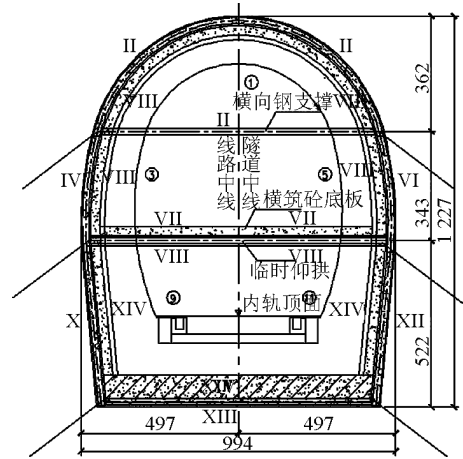


图 15 三台阶五步开挖施工方法

Fig. 15 Construction method of three sidestep five-step excavation

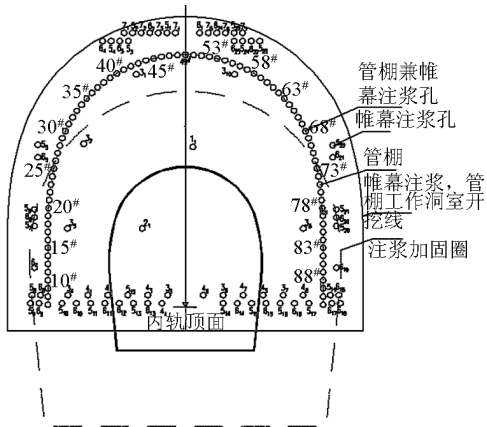


图 14 出口帷幕注浆、管棚布孔图

Fig. 14 Floorplan of hole layout for export purdah grouting and pipe roofing

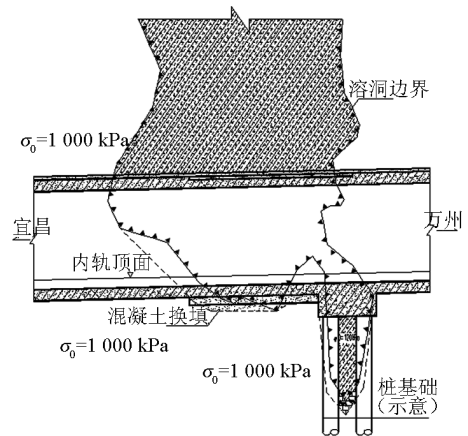


图 16 +978 溶腔段隧底处理剖面图

Fig. 16 Profile diagram of treatment of +978 Karst cave tunnel base

5 社会经济效益

马鹿箐隧道的贯通,成功破解了治理特大高压隐伏富水充填溶腔的世界级难题,开创了我国富水地带隧道施工的先河。在超前地质预报综合物探技术、复杂地质长大隧道安全质量控制、过岩溶高压富水段堵水施工技术、突水突泥治理施工研究等技术研究方面取得了历史性突破,实现了巨型溶腔风险处理、水文地质判释、技术方案制订和安全监控措施等宝贵的技术探索和积累,提炼了富水岩溶隧道进洞条件的基本标准,首创了高压富水溶腔“释能降压”隧道修建工法,填补了我国岩溶隧道修建技术空白。

从社会和经济效益看,马鹿箐隧道的贯通,突破了宜万铁路最大的施工瓶颈;成功运用超大体量高压隐伏溶腔“泄水释能降压”工法,节约建设资金,使马鹿箐隧道的工期较原定计划提前1年,取得了显著的社会效益和经济效益。

6 结语

1)对于可能存在多种地质灾害的隧道施工,首先要把综合超前地质预报技术放在首位,特别是中长距离的钻孔取芯工作,在工程概算中应设立专项科目,加大这方面的投入。隧道施工中需要不间断地进行动态地质预报,这是防止或减少地质灾害发

生的基础工作。目前情况下,超前地质预报方法、手段,预报的准确度亟需进一步提高。

2)对于“泄水释能降压”工法运用,具有一定的适应性条件。工法的使用先要将溶腔特征分析清楚,对于特大体量富水溶腔采用泄水释能降压;对于高压管道流、裂隙带、破碎带,宜采用“以堵为主,限量排放”的治理方法。富水岩溶地带施工宜在设计中考虑增设泄水洞方案。

3)对于注浆加固土层作业,涉及设计、施工方法、施工工艺、施工材料等方面,技术性很强、操作性要求很高。在实施过程中要根据隧道地质情况变化,实施动态设计与施工,并在实践中不断完善优化。

4)马鹿箐隧道实施抢险救援的技术中的深孔注浆技术是在溃水后溶腔处于低水位的前提下进行的。在更高水压和更高涌水量的条件下,其注浆堵水方案、工艺、材料需要在今后的工程中进一步探索。

参考文献

- [1] 铁道第四勘察设计院宜万铁路建设指挥部. 宜万线重点岩溶隧道专家组现场调研—地质汇报材料[R]. 武汉:铁道第四勘察设计院,2006:1-2,82-84
- [2] 铁道部工程管理中心. 宜万铁路马鹿箐隧道工程技术方案论证会[R]. 北京,2008
- [3] 铁道第四勘察设计院. 宜万铁路宜昌至万州段新建工程施工图—马鹿箐隧道设计图[R]. 武汉,2004

Treatment techniques for Karst disaster of Maluqing Tunnel on Yichang-Wanzhou Railway

Yang Bing¹, Xiao Gangzhi²

(1. The 11th Railway Engineer Bureau Ltd., Wuhan 430071, China;

2. Ministry of Railways P. R. C, Beijing 100866, China)

[Abstract] Karst disaster is badly endangering the safety of tunnel construction and impedes the construction schedule seriously. In present, it is an important and difficult problem in tunnel construction all over the world. The feature of karst water burst in Maluqing Tunnel is analyzed first, and then advanced geological forecasting technology, hydrological observation, reverse slope drainage technology and water release technology in the treatment for the +978 Karst cave are introduced separately; what is more, disclosure progress and the status after disclosing of the +978 Karst cave are depicted detailedly. Finally, curtain grouting technology for stratum consolidation and pile-cap technology for spanning karst cave after the +978 Karst Cave disclosed are introduced too. Successful experience for the karst treatment in Maluqing Tunnel will provide a reference to the treatment for karst cave with large quantity water during the similar tunnel construction in the future.

[Key words] tunnel; Karst water burst; advanced geological forecast; curtain grouting