

宜万铁路大支坪隧道 + 990 岩溶治理技术

马 栋¹, 李庚许²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018)

[摘要] 主要介绍宜万铁路大支坪隧道 DK133 + 990 岩溶异常体水文地质特征、岩溶发育规模、高压富水溶腔突水突泥经过及特点, 并根据溶洞工程、水文地质条件及历次突水突泥机理, 综合考虑施工及运营安全等多种因素, 遵循“释能降压、注浆加固、超前支护、综合治理”的原则进行溶洞治理。

[关键词] 岩溶隧道; 工程及水文地质; 突水突泥; 综合治理

[关键词] U459 [文献标识码] A [文章编号] 1009 - 1742(2009)12 - 0053 - 08

1 工程概况

大支坪隧道位于湖北省巴东县大支坪镇, I 线全长 8 775 m, II 线全长 8 789 m, 最大埋深 495 m,

纵坡为人字坡; 进口段 II 线先期按平导断面快速超前 I 线施工, II 线右侧 30 m 设置长 3 991 m 的排水洞。图 1 为大支坪隧道纵断面图。

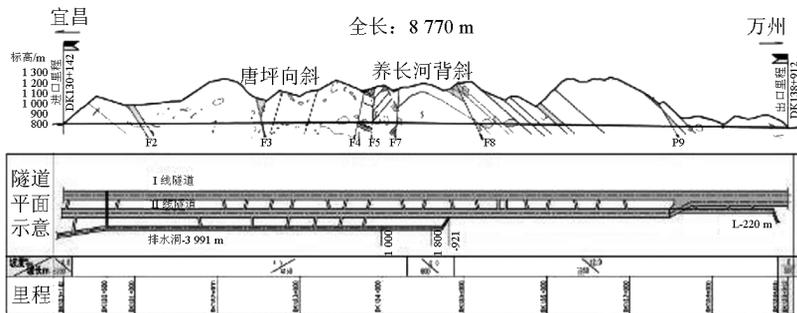


图 1 大支坪隧道纵断面图

Fig. 1 Sectional drawing of the Dazhiping Tunnel

大支坪隧道是全线地质条件最复杂的 I 线风险岩溶隧道之一, 不良地质多表现为: 岩溶裂隙极发育, 溶腔、暗河多, 出水点多、涌水量大, 受地表水补给影响极为严重, 易形成突水, 设计最大涌水量 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 断层破碎带影响范围广, 地质软弱, 岩溶裂隙发育, 多为泥砂填充, 易形成突泥。施工先后遭

遇溶腔 82 处, 其中大规模突水、突泥 30 次, 最大涌水量达 $36.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。雨季期涌水期间多造成隧道各工作面全面停工。特别是位于 DK132 + 900 ~ DK133 + 030 段受断层影响多发育为易发生突水突泥的 990 大型异常体, 施工曾多次遇岩溶管道突水突泥, 累计突泥约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 最大涌水量 $10 \times$

[收稿日期] 2009 - 10 - 30

[作者简介] 马 栋 (1963 -), 男, 河南方城县人, 教授级高级工程师, 主要从事隧道与地下工程的施工、科研工作; E-mail: madong@ crcc. cn

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,施工难度高、风险大。大支坪隧道区地下

水流向图如图2所示。

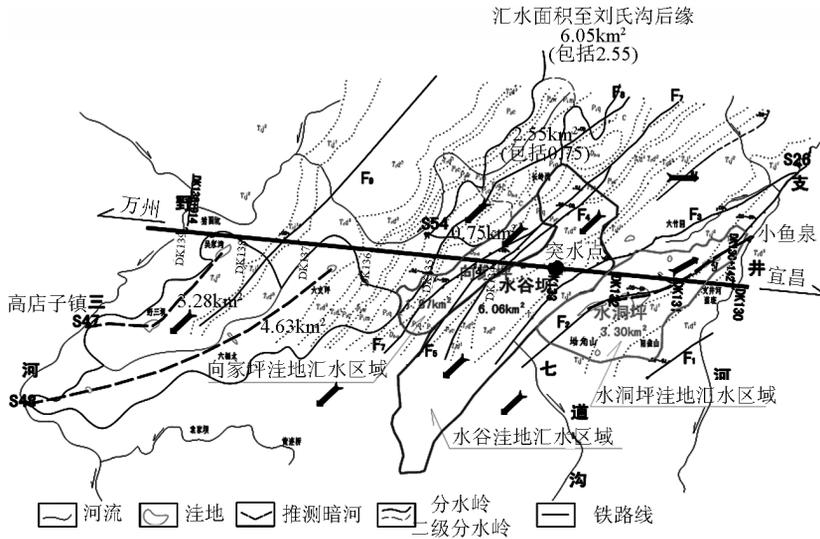


图2 大支坪隧道区地下水流向图

Fig. 2 Groundwater flow map of the Dazhiping Tunnel area

2 +990 富水充填溶腔突水突泥情况

2.1 平导 PDK132 + 960 突水

2006年9月4日,平导开挖至 PDK132 + 960 处,掌子面爆破开挖后发生大规模突水,夹带少量泥砂,瞬时涌水量达 $1\,500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。随后经观察, PDK132 + 960 位置发育岩溶裂隙,裂隙沿隧道纵向宽 $0 \sim 2 \text{ m}$,横向长约 10 m ,溶洞周围岩层完整。9月8日暴雨后,岩溶裂隙涌水量达 $4\,200 \text{ m}^3/\text{h}$,无雨期正常涌水量约为 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 平导 PDK132 + 990 突水突泥

2006年9月29日,平导开挖至 PDK132 + 988 处,掌子面爆破开挖后,发现掌子面拱顶掉块并有淤泥从拱部挤出,安全员立即撤离洞内人员。随后掌子面发出轰隆巨响,大量软塑状淤泥涌出。半小时涌水量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,至10月1日02:30,水量变小,涌水量稳定为 $400 \text{ m}^3/\text{h}$,涌泥至 PDK132 + 480 处停止,涌泥量约 $7\,000 \text{ m}^3$ 。突水突泥照片如图3。

2007年2月22日,平导清淤至 PDK132 + 960 处,再次发生突水突泥,瞬时涌水量 $5\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,2 h后稳定为 $350 \text{ m}^3/\text{h}$,涌泥量约 $8\,000 \text{ m}^3$ 。

2.3 II DK132 + 914 突水突泥

2008年4月30日21时,II线掌子面掘进至 II DK132 + 914 发生突水突泥,持续10余分钟,突泥至掌子面后方约 200 m 处,掌子面涌泥砂高度约 3 m ,



图3 平导 PDK132 + 990 突水突泥

Fig. 3 Water inrush and mud burst of Ping I. PDK132 + 990

涌泥砂量 $3\,000 \text{ m}^3$,后水量稳定在 $300 \text{ m}^3/\text{h}$,未造成人员伤亡。

2.4 I线 DK133 + 005 ~ + 017 突水突泥

2009年5月15日大支坪地区突降暴雨,至5月16日7时累计降雨量 51.7 mm ,降雨后8~12 h后洞内涌水量变大。5月16日18:46时I线 DK133 + 005 ~ + 017 段初支溃破发生大型突水突泥,19:05时涌水量异常增大至峰值 $35.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,突泥总量 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,主要为泥沙、砾石、淤泥等。突泥段落部分初期支护破坏,溃破口位于统一线右侧拱顶上约 10 m ,并延伸至II洞顶 25.7 m 处与原990突水突泥通道连通。5月15日晚强降雨后不满足进洞条件后人员及时撤离,无人员伤亡。突水突泥照片见图4。



图4 突水突泥淤积 I 线正洞及破坏双层初支

Fig. 4 Siltation of water inrush and mud burst and damage I line is the beginning of double support

3 +990 岩溶形态及水文地质特征

3.1 溶洞形态及充填物特征

当大支坪隧道 II 线先期按平导开挖 PDK132 +990 掌子面时,两次发生大规模突水突泥,由于该溶腔影响洞身纵向 130 m,横向约 280 m,且直接或间接连通,故得名 990 岩溶异常体。该岩溶异常体根据综合超前地质预报及开挖揭示的地质情况,探明

I 线 DK132 +947 ~ +958,DK133 +004 ~ +027 间, II 线 II DK132 +913 ~ +921, II DK132 +973 ~ +997 间发育大型富水充填溶腔,溶腔基本上沿层面及岩层走向发育, I, II 线溶腔贯通,尖灭于排水洞左边墙。溶腔充填物主要为砂卵石及黏土。溶腔形态如图 5。

3.2 水文地质特征

+990 岩溶发育地层为三叠系嘉陵江组下部和 大冶组上部灰岩,向斜构造。地表为水谷坝洼地,发育多个落水洞,洞身穿越处发育有 F_3 断层。岩溶和地下水发育主要受构造和地层控制,由于大冶组底部为泥岩和页岩地层,为相对阻水层,有利于处于阻水层上部的灰岩地层岩溶和地下水发育。地下水流向由北东流向南西,排泄于野三河下游。地下水主要接受大气降水补给,地表深孔测得的地下水埋深 100 m 左右(标高 943 m),洼地汇水面积 6.06 km^2 。水文地质纵断面见图 6。

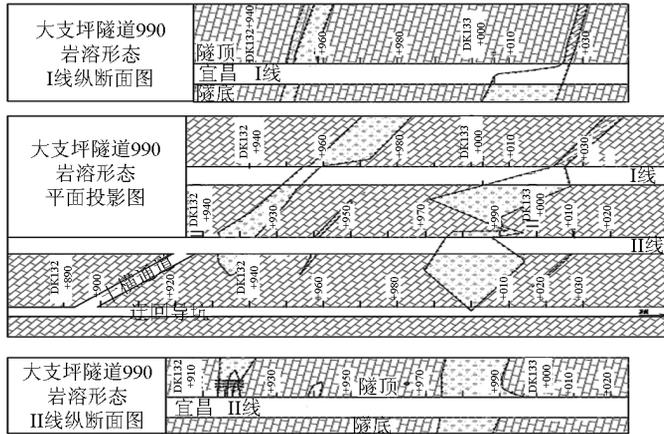


图5 +990 大型充填溶腔形态图

Fig. 5 +990 a large cavern filled with shape diagram

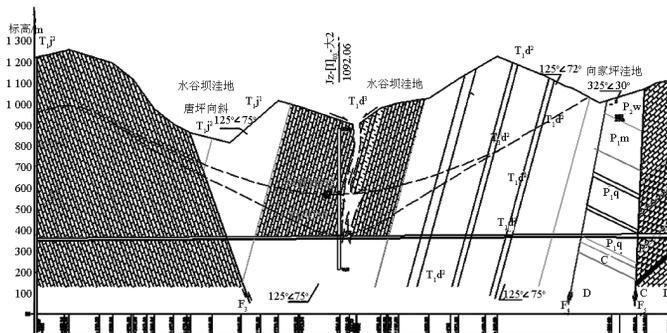


图6 大支坪隧道 PDK132 +990 溶腔段水文

Fig. 6 PDK132 +990 caverns hydrology section of the Dazhiping Tunnel

3.2.1 涌水量及水压观测

通过对 990 异常各掌子面揭示后的涌水观测,该溶洞最大涌水量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (II 线 II DK132 +973 处,2006 年 10 月 1 日),正常涌水量 $3\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于该段水文地质条件复杂,可能原自然排泄通道存在作用,隧道穿越揭示段可能未完全袭夺全部洼地地下水。

溶腔与地表岩溶洼地通过岩溶管道、裂隙相通,地下水受大气降水补给明显,降雨后雨水补给地下水迅速,一般雨后 8~12 d 洞内涌水开始明显增大,停雨后 1~3 d 内洞内涌水恢复正常。图 7 为 +990 溶腔降雨量、涌水量与时间关系曲线图。溶洞段水压虽受降雨影响,由于溶腔被泥砂充填排水通畅性差,监测水压为溶腔充填物渗透水压力,监测最大水压 0.24 MPa。图 8 为 +990 溶腔降雨量、水压与时间关系曲线图。

3.2.2 +990 岩溶腔体地质评价

1) I 线 DK133 +004 ~ +027, II 线 II DK132 +973 ~ +997 段主溶腔体。根据综合超前地质预报、开挖揭示、水文地质观测及充填物特征, I 线 DK133 +004 ~ +027, II 线 II DK132 +973 ~ +997 段主溶腔体在洞身为同一岩溶发育带,具有较强的水文地质联系。由于该段洞身影响宽度大,充填物量极大,突水突泥后排泄通道仍不通畅,强降雨易造成水压积聚后发生多次突水突泥风险,施工中应高度关注 I, II 线相互干扰及安全影响。

2) II 线 II DK132 +914 溶腔。在 II DK132 +913 ~ +920 间发育两段充填溶洞,分布在 II DK132 +913 ~ +917.5 及 II DK132 +918 ~ +920 间,简称“+914 岩溶腔体”。

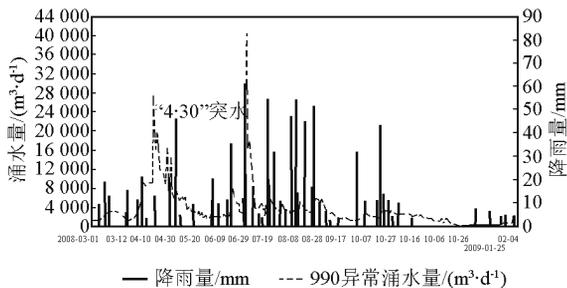


图 7 +990 溶腔降雨量、涌水量与时间关系曲线
Fig. 7 Rainfall, water yield and time curve of +990 caverns

在 II DK132 +913.9 ~ +915.8 距隧道顶约

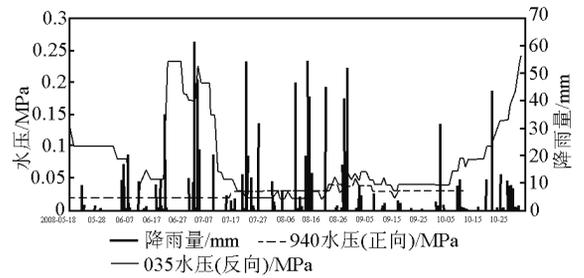


图 8 +990 溶腔降雨量、水压与时间关系曲线
Fig. 8 Rainfall, pressure and time curve of +990 caverns

3.3 m 处被完整块石封住。“+914 岩溶腔体”具有相对独立性,其与“+990 溶洞”的水力联系较弱,但都处于水谷坝洼地水文地质单元中,接收大气降雨补给。突水突泥后无雨期溶腔稳定。

3) I 线 DK132 +947 ~ +958, II 线 II DK132 +947 溶腔。在洞身为同一岩溶发育带,且有较强的水文地质联系,由于发育为宽张裂隙,施工安全相互影响较小。

4 +990 溶腔处理

根据溶腔工程水文地质条件、岩溶充填规律及突水突泥特点,综合考虑施工及运营安全等多种因素,遵循“释能降压、注浆加固、超前支护、综合治理”的原则进行溶腔处理。

4.1 爆破揭示开挖前岩溶段帷幕注浆加固地层

针对岩溶充填物性质及溶腔规模易发生重大突水突泥安全风险,为降低施工风险及下步爆破揭示后易于安全快速突破,前期对 990 异常体 I 线正、反向, II 线正、反向 4 个作业面实施了超前帷幕注浆及管棚预加固地层方案。其中 I 线正向注浆加固长度 30 m (DK132 +940 ~ +970),开挖轮廓线外 8 m; I 线反向注浆加固长度 30 m (DK133 +035 ~ +005),开挖轮廓线外 8 m; II 线正向注浆加固长度 18 m (II DK132 +912 ~ +930),开挖轮廓线外 8 m; II 线反向注浆加固长度 25 m (II DK133 +006 ~ II DK132 +981),开挖轮廓线外 8 m。

施工中加大帷幕注浆科研攻关力度,引进有经验的专业注浆施工队,购置意大利产 C6 钻注一体机 1 台,2 台 MZ-200 钻机,配置与钻孔能力相匹配注浆设备 2 台配套,增加超细水泥、硫铝酸盐水泥可注性材料。经开挖揭示,超前帷幕注浆预加固地层对岩溶充填地层加固改良效果明显,为下一步揭示

处设置临时横撑加固。

2) 结构处理。考虑地下水纵向串流, 溶洞影响段采用单层支护加强型复合式衬砌, 初期支护采用 30 cm 厚 C25 喷钢纤维混凝土, 内置全环 I20 型钢架, 岩溶裂隙发育地段钢架间距 0.5 m/榀, 破碎灰岩地段钢架间距 1 m/榀, 一般地段钢架局部设置, 二次衬砌采用 75 cm 厚 C35 防水钢筋混凝土结构。

4.3.2 溶腔充填稳定段施工

1) 施工工法。溶洞段采用三台阶分部开挖法, 必要时掌子面预留核心土, 人工风镐配合机械开挖。中台阶开挖前在上台阶钢架基脚处设置 I20 横向水平支撑, 间距 0.5 m, 横撑与钢架采用连接板连接, 两端焊接牛腿, 纵向采用三道 I14 钢架连接, 必要时设置立柱或扇形支撑; 中台阶开挖后及时施作临时仰拱封闭, 临时仰拱采用 30 cm 厚 C25 网喷混凝土, 内设 I20 钢架, 间距 0.5 m, 钢架与初期支护内钢架采用连接板连接; 下台阶开挖后及时施作 70 cm 厚 C25 砼底板封闭。岩溶充填段分部开挖预留核心土施工工法如图 10。

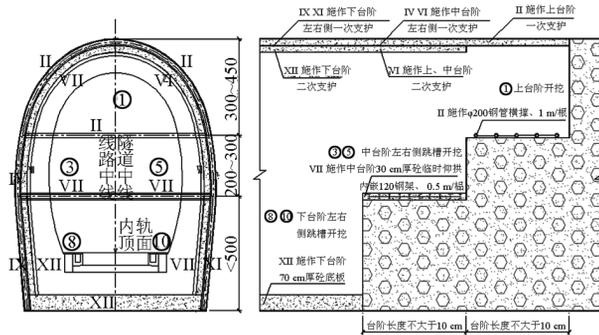


图 10 岩溶充填段分部开挖预留核心土施工工法示意图

Fig. 10 Section division karst filling the core of earth excavation reserved schematic diagram of construction method

2) 超前预支护。在岩溶裂隙发育、岩体破碎部位拱部采用 $\phi 42$ mm 超前小导管注浆预支护, 小导管长 4.5 m, 环向 40 cm, 纵向 2.4 m 一环。在 +990 主溶洞充填段采用长 5 m 的 $\phi 32$ mm 自进式锚杆预支护, 环向 0.2 m, 纵向 3 m 一环。必要时采用超前长管棚注浆预支护, 确保开挖支护安全。

3) 结构处理。溶洞段采用双层支护加强型复合式衬砌, 一次支护采用 30 cm 厚 C25 喷钢纤维砼, 拱墙设 I20 型钢架, 间距 0.5 m, 每台阶基脚垫设通长 25 号槽钢, 每榀钢架基脚处设置 4 根 $L = 4$ m

$\phi 42$ 锁脚锚管, 二次支护结构同一次初支; 二次衬砌采用 75 cm 厚的 C35 防水钢筋混凝土结构, 混凝土抗渗等级不低于 P8。

+990 溶腔支护结构如图 11, 其中断面(一)适合于破碎围岩、裂隙发育地段; 断面(二)适合于溶洞充填物稳定性差、隧底充填物较深的地段。

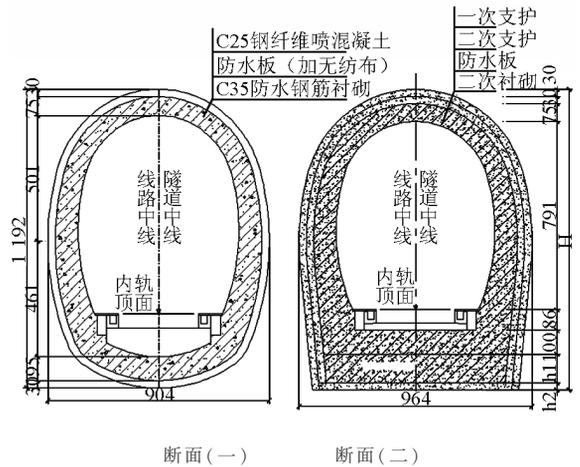


图 11 +990 溶洞支护结构施工图

Fig. 11 +990 cave drawings supporting structure

4) 台阶法施工措施。a. 钢架基脚锁脚锚杆或锁脚小导管及时补设到位, 并与钢架锁牢抱紧; b. 临时水平支撑到位, 做到设置在初支钢架两端处凿除砼, 横撑底端设置牛腿, 两端采用连接板与钢架连接, 且与钢架楔紧连接牢固, 纵向加设连接增强刚性; c. 溶腔空腔部位及时回填砼到位; d. 径向注浆及时施作到位。

4.3.3 充填物坍塌地段

采用清淤释能降压方案通过。清淤后, 采用对溶腔进行砼回填再暗挖施工方案, 支护结构参照“充填物稳定地段结构施工方案”。

4.3.4 隧底结构处理

根据隧底下溶洞发育规模、充填物性质, 分几种情况进行处理: 如隧底下溶洞发育规模较大、充填物性质复杂, 采用桩基跨越, 如图 12(a); 如隧底溶洞充填物发育深度小于 10 m, 且充填物稳定或隧底大部分为破碎灰岩, 局部发育溶蚀沟槽, 采用仰拱调整板 + 钢管注浆加固, 如图 12(b); 如隧底溶洞充填物介质较单一, 块石含量较小, 采用素砼桩复合地基跨越, 如图 13(a); 如隧底下仅局部发育小型溶沟溶槽, 采用换填方案; 如隧底下溶洞发育规模较小, 采用注浆加固 + 板跨结构跨越如图 13(b)。+990 溶腔除 DK132 + 943 ~ +960 溶腔采用注浆 + 板梁跨

越方案外,其他溶腔段由于充填物深度不大且有一定稳定性,均采用仰拱调整板+钢管注浆加固方案。

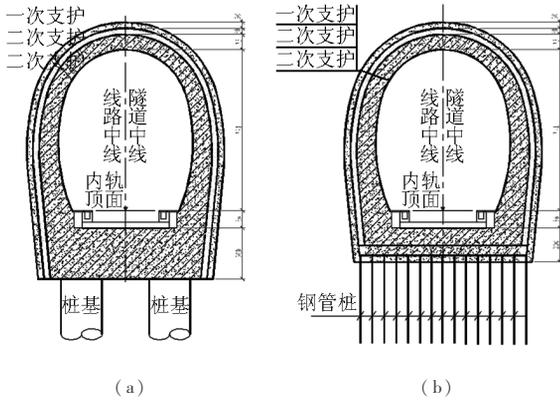


图 12 桩基础及钢管桩注浆加固方案

Fig. 12 Steel pipe pile foundation and grouting program

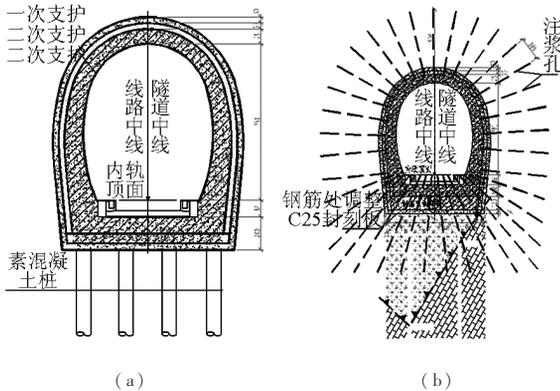


图 13 素混凝土复合地基及注浆+板跨方案

Fig. 13 Plain concrete composite foundation and grouting + concrete plate span program

4.3.5 防排水措施

衬砌前设复合式防水板,施工缝采用两道防水,在防水板与二次衬砌之间外侧设置外贴式橡胶止水带,内侧设置复合式止水带。防排水措施如图 14。

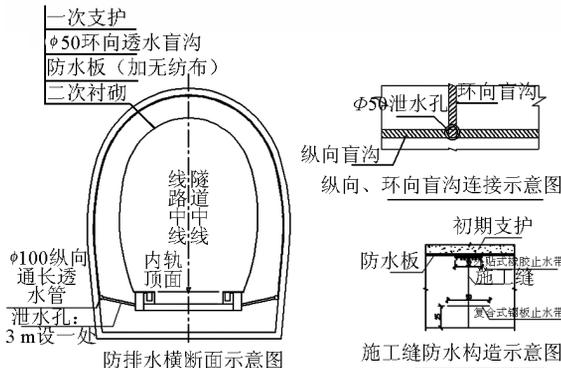


图 14 防排水施工图

Fig. 14 Anti-drainage construction drawings

4.3.6 安全措施

1) 结构安全性监测。为验证支护结构的安全性,总结工程经验,完善设计分析理论,对溶洞段支护结构进行安全性监测,项目包括:水压力、围岩压力、接触压力、支护内力、渗水量及隧底沉降等。安全性监测测点布置如图 15。

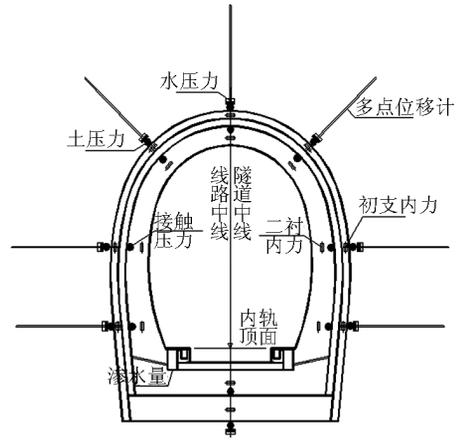


图 15 安全性监测测点布置图

Fig. 15 Safety monitoring layout of measuring points

2) 安全进洞条件设定。根据高压富水溶腔水文地质条件及释能降压能力,以水压、降雨量、涌水量及涌水颜色变化等指标分阶段制定安全进洞作业条件。

990 溶腔高位排水支洞释能降压成功前安全进洞作业条件为: I, II 线 24 h 降雨量不超过 50 mm; 总涌水量在降雨后峰值过后不超过 3 000 m³/d; 释能降压高位排水洞 24 h 降雨量不超过 20 mm。

5 结语

1) 施工中加强水压、水量、降雨量监测,严格安全进洞作业条件是安全控制重点;

2) 安全监控和预警体系完善到位,确保洞外对掌子面有视频监控,洞内外有声光联运报警和电话报警,应急逃生系统工作正常;

3) 高度重视岩溶隧道释能降压技术、超前预支护及临时支撑在高压富水溶腔施工中的应用。

参考文献

[1] 刘招伟,张民庆,王树仁. 岩溶隧道灾变预测与处治技术[M]. 北京:科学出版社,2007. 76-98

Treatment techniques for +990 Karst of Dazhiping Tunnel of Yichang–Wanzhou Railway

Ma Dong¹, Li Gengxu²

(1. School of civil Engineering, Beijing Jiaotong university, Beijing 100044, China;

2. China Railway 16th Group Co., Ltd, Beijing 100018, China)

[**Abstract**] This paper mainly introduced Yichang–Wanzhou Railway Dazhiping Tunnel DK133 + 990 karst excrescent body's hydrogeology characteristics, karst development scale, water inrush and mud burst processes and characteristics of high-pressure water-rich cavern. According to karst cave project, hydrogeology condition and water inrush and mud burst mechanisms, cave processing should comprehensively take many factors, such as construction and operation safety, ect. into consideration, and abide by the principle of “releasing energy to reduce pressure, reinforcing by grouting, supporting in advance and processing comprehensively”.

[**Key words**] Karst tunnel; engineering and hydrogeology; water inrush and mud burst; comprehensive processing

(上接 46 页)

Study on construction mechanical behavior of silt filled karst cave tunnel

Miao Dehai, Mo Yangchun, Wang Wei, Chen Tao

(China Railway 4th Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063 China)

[**Abstract**] When tunnel is constructed in karst cave zone, all kinds of filled caverns will be inevitably meet. The construction method and tunnel structure's stability becomes the key problem for the design and construction. The range of DK255 + 925 ~ + 976, filled with crushed rock and silt, for I line of Maluqing tunnel on Yichang – Wanzhou Railway is taken as an example. The mechanical responses of excavation and support are studied by using the three – dimensional fast Lagrangian analysis of continua method. The numerical simulation reveals the distribution characteristics of displacement for surrounding rock and displacement and interial stress for the shotcrete and the maximum axis force for locking anchor pipe under the condition of dynamic step excavation and support. The obtained conclusions offer a guideline for the design and construction of tunnels in similar underground projects.

[**Key words**] tunnelling engineering; silt filled Karst cave; mechanical behavior; numerical simulation