

高压富水断层“外堵内固注浆法” 设计新理念与工程实践

张民庆, 张 梅

(铁道部工程管理中心, 北京 100866)

[摘要] 宜万铁路齐岳山隧道 F11 断层由断层角砾岩、破裂岩、断层泥组成, 断层内富含高压水, 超前探孔单孔最大涌水量 1 800 m³/h, 水压力 2.5 MPa。针对 F11 高压富水断层, 前期按“以堵为主、限量排放”施工原则, 采取全断面帷幕注浆措施, 注浆工程量大、进度慢。为及早攻克 F11 高压富水断层, 建设单位多次邀请院士、专家现场踏勘、研讨, 提出“注浆加固、分水降压、快挖快封、加强监测、综合治理”施工技术方, 将全断面帷幕注浆调整为外堵内固注浆。对于高压富水断层, 通常的设计是加固圈厚一些、加固体强一些, 而外堵内固注浆是将隧道周边岩体、水量及水压力分布假定为不均匀性, 从而通过超前探孔锁定弱水区和强水区, 针对弱水区采取基本注浆, 对强水区采取加强注浆, 注浆机理为“封堵裂隙、减少水量; 固结围岩、改良地层。”注浆时, 先通过区域定位孔进行无约束注浆堵水, 从而使地层中水量得到有效控制, 然后按“合理步距、封堵水流, 由外到内、环环相扣, 间隔跳孔、锁定水源, 增加补孔、区域加强”的注浆理念进行注浆施工。通过现场实践, 外堵内固注浆能达到注浆堵水和加固效果。外堵内固注浆与全断面帷幕注浆相比, 注浆孔数量和注浆量减少 50%, 在水量大时, 注浆进度提高 80%, 一般情况下提高 50% 以上, 因此, 外堵内固注浆具有广阔的推广应用价值。

[关键词] 高压富水断层; 不均匀性; 注浆堵水加固; 外堵内固注浆; 创新

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)12-0026-09

1 工程概况

宜万铁路齐岳山隧道全长 10 528 m (DK361 + 255 ~ DK371 + 783), 隧道最大埋深 670 m。如图 1 所示, 齐岳山隧道穿越中下侏罗统上下沙溪庙组、新田沟组、自流井组、珍珠冲组和三叠系须家河组、巴东组、嘉陵江组、大冶组, 以及二叠系长兴组、吴家坪组、茅口组等地层, 其中可溶岩长 4.7 km, 占隧道总长度的 45%, 可溶

岩均处在隧道进口端。齐岳山隧道穿越区段可分为中山区 (进口 ~ DK364 + 900)、中山谷地 (DK364 + 900 ~ DK365 + 150) 和低中山区 (DK365 + 150 ~ 出口), 3 个区域分别对应齐岳山构造溶蚀地貌、中部得胜场溶蚀槽谷地貌和西部碎屑岩剥蚀地貌, 主要地质构造为齐岳山背斜、箭竹溪向斜, 以及规模较大的断层 15 条。其中, 隧道中部得胜场槽谷区施工难度最大, 与齐岳山背斜合称该隧道施工的两大难题。

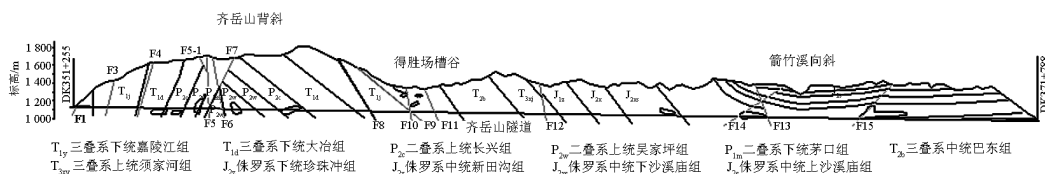


图 1 齐岳山隧道工程地质图

Fig. 1 The geological map of Qiyueshan Tunnel

[收稿日期] 2009-10-28

[作者简介] 张民庆 (1970-), 男, 河南孟县人, 教授级高级工程师, 主要从事隧道及地下工程监控量测、注浆防水的科研、设计施工工作; E-mail: zskzmq@vip.sina.com

得胜场槽谷呈狭长带状展布(见图2),长68 km,宽550 m,槽谷下发育F11断层。F11(得胜场逆断层)垂直切割线路,断裂带地表出露在DK365+030~+145,走向35°~45°NE,倾角50°~70°,断层破碎带宽60~100 m,局部可达150 m左右,发育T₁⁴灰岩、角砾状灰岩与T₂¹页岩、泥灰岩分界面附近。断层带由断层角砾岩、破裂岩、断层泥等构成,局部可见角砾的圆化现象,并在角砾状灰岩的角砾上可见擦痕,胶结物以钙泥质为主,易被溶蚀。该断层显示有多期活动性,规模大,发育多条次级分支断层。沿断层岩溶洼地、漏斗、泉水十分发育。断层破碎带及其附近张裂隙是控制岩溶水管道发育,甚至导致隧道施工中与管道水贯通的关键因素。预测F11断层地段正常涌水量11 292 m³/d,最大涌水量114 632 m³/d。F11断层地表钻孔取心照片见图3。

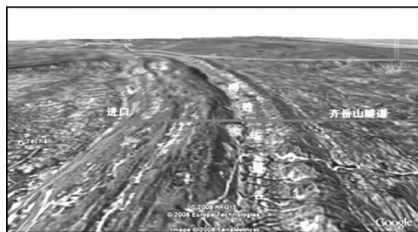


图2 得胜场槽谷地形地貌

Fig.2 Physiognomy of Desheng field groove



图3 F11断层地表钻孔取心照片

Fig.3 The surface drilling photo of F11 fault

2 技术方案论证

2.1 F11断层前期施工

齐岳山隧道出口平导于2007年10月5日自PDK365+359进入F11断层施工。超前深孔钻探表明:断层由构造角砾岩、泥灰岩夹断层泥、碎屑状泥质灰岩夹灰岩组成,岩体极其破碎,断层内富含高压水,超前探孔单孔最大涌水量为1 800 m³/h,水压2.5 MPa。

齐岳山隧道出口正洞于2008年7月16日自DK365+355进入F11断层施工。超前深孔钻探表明:断层由构造角砾岩、泥质灰岩夹页岩、断层泥组成,岩体极其破碎,断层内富含高压水,超前探孔单孔最大涌水量为51 m³/h,水压力1.6 MPa。针对F11高压富水断层,采取全断面帷幕注浆堵水措施。现场施工技术数据统计如表1。

表1 F11断层前期全断面帷幕

注浆施工技术数据统计表

Table 1 Data of full-face curtain grouting of F11 fault

位置	里程	帷幕厚度 /m	注浆孔数量/个	大管棚/根	合计孔数/个	注浆时间/d
平导 第一循环	PDK365+367~+342	5	63	35	98	21
第二循环	PDK365+344~+319	8	103	35	138	116
第三循环	PDK365+330~+308	8	103	35	138	191
正洞 第一循环	DK365+355~+327.5	8	122	51	173	44

2.2 技术方案论证

针对高压富水断层,按照“以堵水为主、限量排放”的施工原则,采取全断面帷幕注浆技术措施,达到了堵水效果,满足了工程安全开挖要求。但不能否认的事实是,全断面帷幕注浆时间长、工效低、造价高。齐岳山隧道F11断层长度约200 m,按全断面帷幕注浆方案实施,工期是难以保证的。因此,必须寻求更加合理的技术方案。

2009年2月20日,铁道部宜万铁路建设指挥部邀请10位院士在湖北宜昌召开“宜万铁路复杂岩溶隧道释能降压专项技术及齐岳山隧道F11断层技术方案研讨会”,建设指挥部提出对F11断层采取“注浆加固、分水降压、交替推进、带水作业”的施工原则。2009年5月17日,铁道部宜万铁路建设指挥部再次邀请相关院士等5位专家在湖北恩施召开“齐岳山隧道F11断层施工技术研讨会”,建设指挥部继续完善F11断层施工原则,提出“注浆加固、分水降压、快挖快封、加强监测、综合治理”的施工技术方案。专家们对F11断层采取以注浆加固为主的方案予以了肯定,认为只有摒弃全断面帷幕注浆方案,采取“外堵内固”注浆技术方案才能从根本上解决齐岳山隧道F11断层快速施工难题。

针对高压富水断层,采取“外堵内固”注浆技术

方案,在国内外文献中无先例可以借鉴,是否可行?如何实施?这需要在工程实践中进行研究、验证。

3 外堵内固注浆新技术设计思路与理念

3.1 全断面帷幕注浆技术

日本青函隧道全长 53.85 km,其中海底段长 23.3 km。在海底段施工中,针对高压富水断层破碎带,为了隧道安全施工,采取超前预注浆以阻止高压涌水。1969 年 2 月,本州端斜井开挖到 1 225 m 处遇到 F15 断层,由于超前预注浆堵水效果差,发生突涌水,水压力 2.6 MPa,水量 660 m³/h,涌水将斜井淹没 150 m。之后,经反复研究,首先采用水泵将水排走,然后在掌子面施作混凝土止水墙,钻孔 230 余个,注入 715 t 水泥和 260 m³ 水玻璃浆液,用了 7 个月时间才通过该断层。在青函隧道施工中,尽管采取了预注浆措施,但仍发生了 4 次涌水灾害。日本青函隧道针对高压富水断层,研究了全断面帷幕注浆技术^[1,2]。

全断面帷幕注浆的基本思路如图 4。设定随着隧道开挖,将要产生一定的松动范围,在松弛区外侧一定范围内进行注浆并形成止水地带,用该止水带与水压抗衡,这样强大的水压就不能直接作用于衬砌或支护上^[3]。全断面帷幕注浆设计时,假定地层是均匀的,外侧水压力均匀分布。因此,需要对松弛区进行注浆堵水加固,注浆堵水加固范围与水压力有关,水压力越高、水量越大,加固范围也就越大。根据日本青函隧道研究结果,对于高压富水断层,注浆加固半径 R 与隧道半径 a 的关系为: $R = (4 \sim 6)a$ ^[4]。

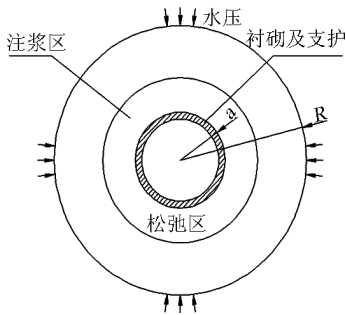


图 4 全断面帷幕注浆设计思路

Fig. 4 Design of full-face curtain grouting

3.2 外堵内固注浆设计理念

外堵内固注浆设计思路如图 5。同样,设定随着隧道开挖,将要产生一定的松动范围,在松弛区外侧一定范围内进行注浆并形成止水地带,用该

止水带与水压抗衡,这样强大的水压就不能直接作用于衬砌或支护上。但对于止水地带的形成,外堵内固注浆设计与全断面注浆设计存在着本质的不同。外堵内固注浆设计时,假定地层是不均匀的,受不均匀地层所影响,具有不均匀的透水性,因此,外侧水压力不是均匀分布。

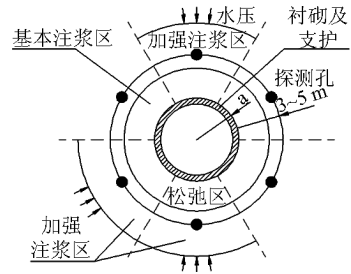


图 5 外堵内固注浆设计思路

Fig. 5 Design of grouting of outside blocking and inside solid

3.2.1 灰色地层、分区定位

- 1) 假定地层不均匀,处于灰色状态。
- 2) 按注浆加固的理念进行基本注浆区设计。注浆加固范围为隧道开挖轮廓线外 3~5 m,即隧道周边 0.5~1 倍洞径范围。注浆设计时,按内外两圈注浆孔设计,外圈孔为隧道开挖轮廓线外 3~5 m,内圈孔为隧道开挖轮廓线外 1~3 m。

3) 选取 4~6 个外圈注浆孔,对隧道周围灰色地层进行分区探测(如图 5 中分为 6 个区)。通过探测,根据探孔的水量和水压力,将隧道外划分为弱水区和强水区。探孔作为注浆孔应严格按照要求进行注浆。

3.2.2 外堵内固、区域强化

1) 对于超前探孔,根据水量大小确定注浆参数。对于水量大的孔,以顶水注浆为原则,采取定压注浆,注浆压力为水压力的 2~3 倍,从而有效地封堵地下水裂隙通道。经过顶水注浆,使强水区的水量和水压力降低。

2) 按基本注浆区设计进行注浆。注浆时,严格按“先外圈后内圈,同圈孔间隔跳孔”的注浆顺序进行。

3) 注浆严格采取前进式分段注浆。根据钻孔出水量和钻孔成孔状况,对注浆分段长度(注浆步距)采取三级控制标准进行等级管理。

按钻孔出水量分为三档:≤10 m³/h 为第一档;10~30 m³/h 为第二档;>30 m³/h 为第三档。按钻孔成孔状况分为三档:无坍孔为第一档;轻微坍孔为

第二档;严重坍孔为第三档。等级划分按红、黄、绿3种情况进行控制管理(见表2)。钻孔注浆分段长度按管理等级选择(见表3)。

表2 钻孔注浆等级划分表
Table 2 Classification of drilling grouting grading

管理等级	钻孔出水量			
	≤10 m ³ /h	10~30 m ³ /h	>30 m ³ /h	
钻孔成孔状况	无坍孔	绿	黄	红
	轻微坍孔	黄	黄	红
	严重坍孔	红	红	红

表3 钻孔注浆等级划分参数选择表
Table 3 Parameters of drilling grouting grading

等级	分段长度选择
绿	5~8 m
黄	3~5 m
红	立即注浆

4)基本注浆区注浆完成后,将强水区作为加强注浆区,增加钻孔进行补注浆,同时检查区域出水情况,加强范围为基本注浆区外1~2 m。

3.2.3 环环相扣、过程控制

外堵内固注浆设计的总体注浆机理为:堵裂隙、减少水量;固围岩、改良地层。注浆时,先通过区域定位孔进行无约束注浆堵水,从而使地层中水量得到有效控制,然后按“合理步距、封堵水流;由外到内、环环相扣;间隔跳孔、锁定水源;增加补孔、区域加强”的注浆理念进行注浆施工。

环环相扣注浆顺序:外圈孔→内圈孔→稳面孔→补强孔→检查孔→管棚孔。

过程控制:为确保注浆效果,应严格按注浆顺序进行注浆施工。注浆过程中,每个注浆孔都必须严格执行注浆参数。

3.2.4 注浆效果检查评定标准化

针对高压富水断层,注浆的作用既要达到堵水要求,又要满足加固地层的需要,因此,检查项目必须包含对堵水和加固双重作用的检查,同时注重过程控制的检查。对堵水作用的检查主要应进行堵水率和注浆后地层渗透水能力的检查。对加固作用的检查主要进行地层密实度检查和注浆后地层稳定性检查。结合目前国内、外注浆效果检查评定方法,确定采取 $p-Q-t$ 曲线分析法、钻孔出水量分析法、注浆量分析法、检查孔出水量测定、检查孔稳定分析

(成孔试验)^[5-7]。其中,钻孔出水量分析法和检查孔出水量测定是对堵水作用的检查, $p-Q-t$ 曲线分析法、注浆量分析法和检查孔稳定分析是对加固作用的检查。F11断层注浆效果检查评定方法如图6。

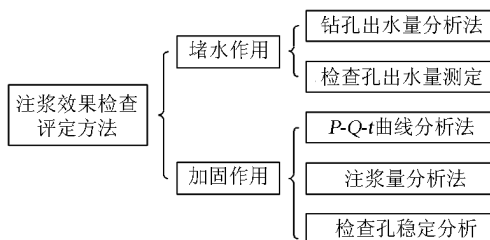


图6 F11断层注浆效果检查评定方法
Fig. 6 Evaluation method of F11 fault grouting effect

1) $p-Q-t$ 曲线法:对于注浆过程 $p-Q-t$ 曲线,一般要求 $p-t$ 曲线呈上升趋势, $Q-t$ 曲线呈下降趋势,注浆结束时,注浆压力必须达到设计终压,注浆速度达到设计速度,只有这样,才能证明原地层已被浆液填充饱满,达到注浆加固效果。

2)钻孔出水量分析法:钻孔出水量分析法通过分析钻孔出水量时间效应分布和注浆堵水率变化,评判注浆堵水效果。总体来说,随着钻孔注浆的进行,地层被逐渐填充密实,透水率越来越小,因此,钻孔出水量应呈逐渐减少趋势,注浆堵水率会不断地提高,最终注浆堵水率应达到80%以上。

3)注浆量分析法:注浆量是地层吸浆能力的直接反映,地层注浆量越大,说明地层越松软,透水能力也越强,因此,钻孔注浆过程注浆量时间效应分布可以说明随着注浆的进行,地层加固密实度的变化规律,从而达到对注浆加固效果的检查评定。注浆量分析法是通过按注浆顺序绘制注浆量时间效应分布直方图。直方图应呈下降趋势,注浆结束时,后序注浆孔基本应达到吸不进浆液的状态。

4)检查孔出水量标准:检查孔法是分析钻孔注浆效果最直接的方法,也是目前被认为最可靠的方法。对注浆可能存在的薄弱环节(一般为注浆量少的孔、涌水量大的孔、注浆终孔交圈位置等)钻检查孔,测定检查孔出水量,从而判断注浆堵水效果。检查孔原则上钻孔深度小于钻孔注浆段落长度1 m,检查径向加固厚度小于预设计加固厚度1 m范围。检查孔允许出水量采用2 L/(min·m)标准。

5)检查孔稳定分析法:对检查孔进行观察,判断检查孔是否完整,检查孔放置一段时间后是否不

坍孔,从而判定经注浆加固后地层的稳定性。目前,可采用更先进的孔内成像技术,对检查孔进行孔内摄像,要求检查孔完整、不坍孔、不缩孔,从而检查评定注浆加固效果。

4 外堵内固注浆设计与应用

在提出外堵内固注浆设计理念后,通过研究,在齐岳山隧道出口 DK365 + 318 ~ + 293 段注浆循环为例进行试验研究及应用。

4.1 超前深孔钻探

2009年6月16日,齐岳山隧道出口正洞开挖到 DK365 + 318,通过6个超前加固注浆孔兼超前探孔对隧道前方地质进行超前深孔钻探,探测表明:隧道前方0~10 m(DK365 + 318 ~ + 308)段地层较为破碎,主要以碎石及碎屑为主,卡钻严重,钻进速度较慢,出水量较小。10~18 m(DK365 + 308 ~ + 300)段地层以中厚层状分布为主,钻进速度较快,出水量随着钻深而增加。18~25 m(DK365 + 300 ~ + 293)段为主要集中涌水带,地层软弱破碎,根据冲出物分析,该区段主要为碎石夹泥层,水量发生突变明显,地层吸浆能力较强。25 m(DK365 + 293)以后地层出水量有所减小,地层较为破碎。通过超前钻孔并结合后续注浆孔施工分析,该加固段主要在 DK365 + 302 ~ + 295 段存在明显集中涌水带,工作面右侧地层含水量较左侧强。探测段钻孔最大出水量 $84 \text{ m}^3/\text{h}$,实测水压为 1.2 MPa。

4.2 注浆设计

采取堵水加固注浆设计,注浆设计参数如表4,注浆设计如图7。

表4 DK365 + 318 ~ + 293 段注浆设计参数表

Table 4 Parameters of DK365 + 318 ~ + 293 grouting

参数名称	参数值	
止浆墙厚度/m	2.5	
纵向加固长度/m	25(DK365 + 318 ~ + 293)	
终孔位置/m	一圈孔位于开挖轮廓线外 4 m,二圈孔位于开挖轮廓线外 1.3 m	
浆液扩散距离/m	2	
终孔间距/m	2.5 ~ 3	
钻孔数量/个	外圈孔	18
	二圈孔	13
	补断面孔	18
	注浆孔小计	49
	掌子面稳定孔	12
	管棚孔	21
合计	82	

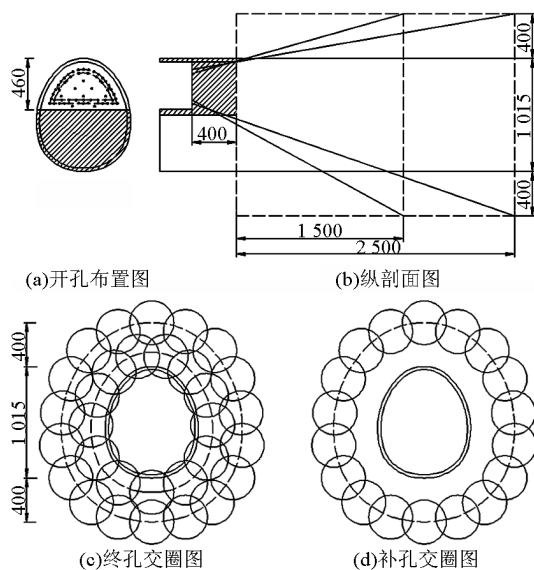


图7 DK365 + 318 ~ + 292 段注浆设计图(单位:cm)

Fig. 7 Design of DK365 + 318 ~ + 292 grouting (unit: cm)

4.3 注浆施工

2009年6月17日开始进行钻孔注浆施工,7月5日完成,历时19天。现场钻孔注浆照片如图8。

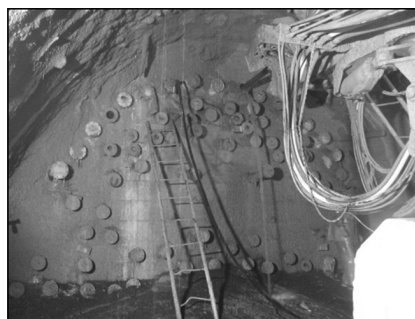


图8 注浆结束后照片

Fig. 8 Photo after grouting

4.4 注浆效果检查评定

4.4.1 $p-Q-t$ 曲线分析法

该循环注浆仍以封堵裂隙水为主,曲线与前循环趋势一致,注浆流量随着注浆压力上升逐渐减小,压力上升到5 MPa后,产生明显突变,迅速上升达到设计终压,注浆流量降低到5~10 L/min 结束单孔注浆。

4.4.2 钻孔出水量分析法

绘制钻孔过程中各钻孔出水量时间效应曲线如图9所示。由钻孔出水量时间效应图可以看出:各钻孔最大出水量存在一定的差异,最先施工的6个注浆孔兼超前探孔出水量最大达到 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,平均

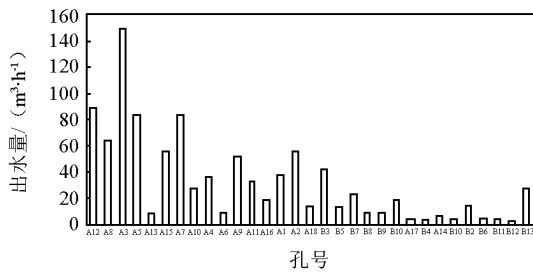


图9 钻孔出水量时间效应

Fig.9 Time effect of bored out water

达90 m³/h,注浆后水量明显减小,主要的出水裂隙被有效封堵。外圈孔施工完成后,二圈孔钻孔出水量有明显的减小,大部分在20 m³/h,这说明采取“环环相扣、由外到内”的注浆方式对提高注浆效果十分明显。对施工过程中不同阶段钻孔中最大涌水量进行统计,分析各阶段堵水率,如表5。

表5 各阶段注浆堵水率

Table 5 The grouting blocking water rate of all stages

施工时段	单孔平均最大水量 / (m ³ ·h ⁻¹)	注浆孔数/个	注浆量 / m ³	堵水率/%
初始探测阶段	90	5	86.61	
外圈孔阶段	50	13	76.63	45
二圈孔阶段	14.8	13	49.82	83.6
补充注浆阶段	5.4	8	10.24	94
效果检查阶段	2	8	6.00	97.8

从表5可以看出,前期5个注浆孔兼超前探孔钻孔施工过程中,平均涌水量达到90 m³/h,最大150 m³/h。注浆结束后,在外圈孔施工过程中,单孔平均最大涌水量为50 m³/h,堵水率达到45%。随着由外及内注浆施工的逐渐推进,二圈孔施工完成后堵水率达到83.6%,补充注浆孔后进行检查孔施工过程中堵水率达到97.8%,达到了预期的堵水效果。另外,由外及内的施工工序,后续钻孔出水量减小后,有利于快速施工,也达到了约束注浆的目的。

4.4.3 注浆量分析法

绘制注浆过程各钻孔注浆量时间效应图如图10,从中可以看出:

1) 注浆仍以封堵岩层出水裂隙为主,出水量和注浆量有明显的对应关系,涌水量大的孔注浆量也大。随着注浆进行,出水裂隙逐渐被封堵,地层吸浆量明显降低,堵水效果明显。

2) 先施作的孔吸浆量明显大于后施作的孔,外圈孔吸浆量大于二圈孔,这说明随着注浆进行,透水裂隙被封堵后,地层逐渐密实,达到堵水与加固的目的。

对超前加固注浆孔各段吸浆量进行统计,计算各段地层延米吸浆量及所占比例,计算结果见表6。

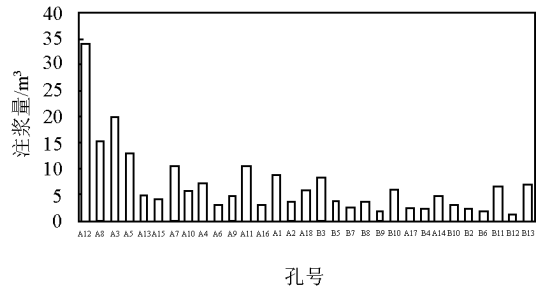


图10 钻孔注浆量时间效应

Fig.10 Time effect of drilling grouting amount

表6 注浆量纵向分布表

Table 6 Vertical distribution of grouting amount

项目	注浆段				合计
	0~10 m	10~18 m	18~25 m	25 m 到终孔	
注浆量 / m ³	44.8	64.48	91.02	43.68	243.98
延米注浆量 / (m ³ ·m ⁻¹)	4.5	8.1	13	10.9	36.5
延米注浆比例/%	13	23	34	30	100

由表6可以看出,地层吸浆能力与超前探孔揭示的地质情况基本对应,18 m前地层较为致密,出水量小,吸浆能力低,18 m以后裂隙发育,地层破碎富水,吸浆能力强,占总注浆量的64%,进一步印证了该段地质情况及注浆堵水效果。

4.4.4 检查孔出水量分析法

注浆结束后,根据该循环钻孔注浆施工过程中出水区域分布情况,全断面布设8个检查孔兼补充注浆孔,并重点对工作面右侧一定范围进行检查,检查孔终孔位置如图11。检查孔设计深度为25 m,终孔在开挖轮廓线外3 m处,为了进一步对薄弱区域加强补充注浆,钻深到25 m对检查孔出水情况进行评判后,继续钻进至终孔28 m再次进行补充注浆,检查孔检查结果如表7。

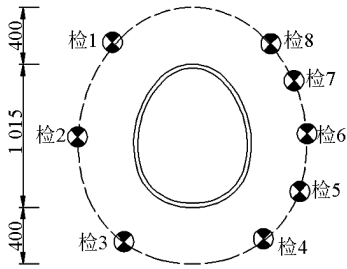


图 11 检查孔终孔断面布置(单位:cm)

Fig. 11 The final - hole section layout of check - hole (unit :cm)

表 7 检查孔检查结果表

Table 7 Test results of check - hole

检查孔编号	检查孔出水量 $/(L \cdot (m \cdot \min)^{-1})$	检查孔完整情况
检 1	1.33	无坍孔
检 2	1.60	无坍孔
检 3	1.00	无坍孔
检 4	0.67	无坍孔
检 5	0.80	无坍孔
检 6	1.00	无坍孔
检 7	1.33	无坍孔
检 8	1.67	无坍孔

经注浆效果检查,符合检查孔出水量小于 $2 L / (\min \cdot m)$,检查孔无坍孔的注浆效果检查评定标准要求。

4.4.5 检查孔稳定性分析法

对 3 个检查孔进行孔内摄像,从孔内摄像可以明显看出,前方破碎岩层以及裂隙被浆脉充填,除局部存在缩孔外,大部分区段孔壁顺滑,不坍孔,自稳能力较强。孔内成像及孔底成像照片如图 12,图 13 所示。

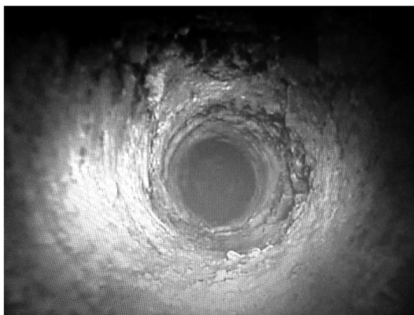


图 12 孔内成像照片

Fig. 12 Photo of hole imaging

4.5 开挖施工

钻孔注浆及管棚施作完成后进行开挖,2009 年

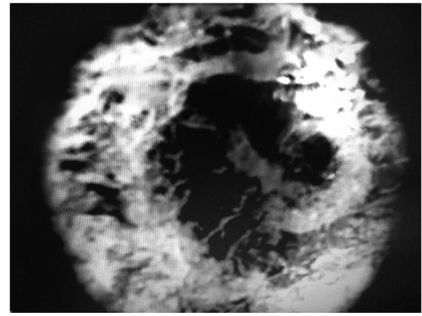


图 13 孔底成像照片

Fig. 13 Photo at the end of hole

7 月 6 日开挖开始,到 7 月 25 日开挖到 DK365 + 300 封闭掌子面进入下一循环钻孔注浆施工。现场开挖照片如图 14。

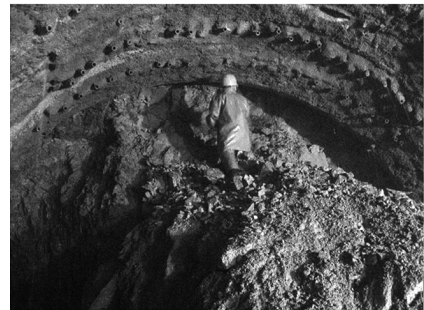


图 14 开挖照片

Fig. 14 Photo of excavation

5 进度与经济效益评价

以齐岳山隧道 F11 高压富水断层为例,外堵内固注浆技术与全断面帷幕注浆技术进度与经济效益进行比较(见表 8)。

6 结语

1) 依托齐岳山隧道 F11 高压富水断层,采取外堵内固注浆设计理念,打破了高压富水地层全断面帷幕注浆设计理念,这是在院士和专家指导下一次巨大的思想创新和技术进步。外堵内固注浆设计理念以地层的不均匀性、地下水量和水压力分布的不均匀性为假定条件,这个条件符合实际。通过齐岳山隧道工程实践,该技术具有巨大的应用推广价值。

2) 外堵内固注浆技术是一项综合技术,它包括灰色地层、分区定位;外堵内固、区域强化;环环相扣、过程控制;注浆效果检查评定标准化 4 个部分的内容。外堵内固注浆设计的总体注浆机理为堵裂隙、减少水量;固围岩、改良地层。注浆时,先通过区

域定位孔进行无约束注浆堵水,从而使地层中水量得到有效控制,然后按“合理步距、封堵水流;由外到内、环环相扣;间隔跳孔、锁定水源;增加补孔、区域加强”的注浆理念进行注浆施工。

3)与全断面帷幕注浆相比,由于注浆理念调整

和注浆设计的变化,外堵内固注浆孔数量为全断面帷幕的50%左右,延米注浆量减少约50%,循环时间在水量大时缩短80%以上,中等水量时缩短50%以上。

表8 外堵内固注浆与全断面帷幕注浆技术参数比较表

Table 8 Parameters comparison of outside blocking and inside solid grouting with full section curtain grouting

方案比选	平导			正洞		
	注浆孔数量/个	延米注浆量/m ³	循环时间/d	注浆孔数量/个	延米注浆量/m ³	循环时间/d
全断面帷幕注浆	138	50.2	116	173	63.8	44
外堵内固注浆	61	21.3	17	82	36.1	19
所占比例/%	44.2	42.4	14.7	47.4	56.6	43.2
效益提高/%	55.8	57.6	85.3	52.6	43.4	56.8

注:1. 注浆孔数量含管棚孔数量;2. 注浆量计算时,地层孔隙率取15%,浆液填充率取80%,浆液损失率取5%;3. 外堵内固注浆按10%的加强注浆考虑;4. 方案比较所占比例=外堵内固注浆/全断面帷幕注浆;5. 效益比例=1-方案比较所占比例

致谢:现场试验及应用研究由中铁隧道集团科研院所孙国庆、肖盛能负责,同时得到了中铁十二局集团公司齐岳山项目部的支持,在此一并表示感谢。

参考文献

[1] 崔玖江. 隧道与地下工程修建技术[M]. 北京:科学出版社, 2005
 [2] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京:人民交通出版社, 2004
 [3] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 北京:中国建

筑工业出版社, 2004
 [4] 姜玉松. 现代注浆技术的开拓应用及发展[J]. 现代隧道技术, 2008, (02): 6-10
 [5] 张民庆, 彭峰. 地下工程注浆技术[M]. 北京:地质出版社, 2008
 [6] 张民庆. 圆梁山隧道深埋充填粉质粘性土溶洞注浆加固技术[J]. 铁道工程学报, 2004, (1): 99-104
 [7] 张民庆, 孙国庆, 邹冲, 等. 圆梁山2#溶洞正洞施工技术[J]. 铁道工程学报, 2004, (4): 68-76

Design new ideas and engineering practice of high-pressure water-rich fault “outside block and inside strengthen grouting”

Zhang Mingqing, Zhang Mei

(Ministry of Railways Project Management Center, Beijing 100866, China)

[Abstract] Qiyue Mountain Tunnel F11 fault on Yichang-Wuanzhou Railway is formed by breccia, broken rocks and fault gouge composition. It is rich in high-pressure water, with the biggest single whole water inflow of 1 800 m³/h and water pressure of 2.5 MPa. In earlier stage, F11 fault followed the principle of “mainly blocking up and limiting discharge” and grouted the whole cross-section, the construction quantity was huge and the progress was slow. To overcome F11 fault early, the construction technology of “grouting to make solid, using water segrating, excavating and sealing quickly, strengthening monitoring and managing comprehensively” was proposed and

whole cross-section grouting was changed into “outside block and inside strengthen grouting”. The common design for high-pressure water-rich fault is thicker reinforced ring and stronger reinforced body. While “outside block and inside solid grouting” assumes the distribution of surrounding rock, water quantity and pressures is uneven, then finds out weak water area and strong water area through advanced prospecting holes, and adopts normal grouting for weak water area and strengthened grouting for strong water area, following the principle of “blocking cracks to reduce water quantity, strengthening supporting rock and improving strata”. Firstly, unconstrained grouting is used through area location holes to effectively control water quantity in strata, then grouting is adopted abiding by the principle of “appropriate drawing pace, blocking water flow, from outside to inside, finding water source by interval holes, and adding holes in necessary areas”. Engineering practices show that “outside block and inside solid grouting” can effectively blocking water and strengthen. The grouting holes and grouting quantity of “outside block and inside solid grouting” are 50 % less than those of whole cross section grouting, and the grouting speed is 80 % higher when water quantity is large, at least 50 % higher in usual condition.

[**Key words**] high-pressure water-rich fault; unevenness; blocking water and strengthen by grouting; outside block and inside solid grouting; innovation