

# 圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术

刘招伟<sup>1</sup>, 张顶立<sup>1</sup>, 张民庆<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程试验研究中心, 北京 100044; 2. 中铁隧道集团有限公司 科学技术研究所, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 渝怀铁路圆梁山隧道毛坝向斜段高水压富水区的地质条件极其复杂, 曾经被认为是隧道修建的禁区。系统介绍了该地段的岩溶发育特征, 对地质及岩溶构造进行了分类; 采用红外线超前地质预测预报、TSP超前地质预测预报、超前探水孔钻探和地质素描综合判断等先进方法对溶洞的位置、形态以及充填物的状况进行了探测, 并作出可靠的预报。在对充填物结构和强度分析的基础上, 选择和确定了合理的注浆材料和注浆工艺; 分别实施了超前预注浆、隧道围岩径向注浆和衬砌背后补充注浆, 并提出了注浆效果的检测和评价方法, 以保证注浆加固效果的可靠性。上述措施实施后, 取得了非常满意的效果, 保证了复杂地质条件下隧道施工的安全。该成果对岩溶地区的隧道修建具有重要的指导作用和参考价值。

**关键词:** 隧道工程; 圆梁山隧道; 溶洞; 地质预报; 注浆; 管棚

**中图分类号:** U 455.49

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)10-1728-07

## GROUTING TECHNIQUE FOR HIGH-PRESSURE AND WATER-RICH AREA IN MAOBA SYNCLINE AT YUANLIANGSHAN TUNNEL

LIU Zhao-wei<sup>1</sup>, ZHANG Ding-li<sup>1</sup>, ZHANG Min-qing<sup>2</sup>

(1. Research Center of Tunneling and Underground Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Science and Technology, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The geologic condition of the high-pressure and water-rich area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel of Chongqing—Huaihua Railway is complex and regarded as a for bitten area of tunnel construction. The karst development characteristics of this area is systematically introduced; and the geologic and karst structure is classified. The distribution and shape of karst caves and the filling in them are investigated by the advanced investigation means, and reliable forecast is made accordingly. Based on analysis of structure and intensity of the filling, the reasonable grouting materials and grouting technology are determined. Pre-grouting, radial grouting in surrounding rock and reinforcing grouting behind lining are implemented respectively according to the geologic condition; and inspecting method and estimating method of grouting effect are also brought forward to ensure the grouting reliability. Satisfying results are achieved; and safety of tunnel construction is ensured through adopting these measures. The results can provide references to tunnel construction in karst region.

**Key words:** tunneling engineering; Yuanliangshan tunnel; karst cave; geology forecasting; grouting; pipe shed

## 1 引言

圆梁山隧道是新建铁路重庆—怀化线最长的隧道, 全长 11 068 m, 为全线十大控制工程之首。隧

道穿越的毛坝向斜构造区为高水压富水地段, 是圆梁山隧道施工中岩溶水防治的重点地段<sup>[1, 2]</sup>。毛坝向斜高水压区为 DK353+200~355+400, 总长 2 200 m。毛坝向斜高水压富水区易发生大范围的坍塌和涌水涌砂, 若大量排水还将引起岩溶地下水水

收稿日期: 2004-02-12; 修回日期: 2004-04-15

基金项目: 铁道部科技计划项目(2001G009-3)

作者简介: 刘招伟(1962-), 男, 1984年毕业于西南交通大学土木工程系隧道与地下铁道专业, 现为中铁隧道集团有限公司科学技术研究所所长、教授级高级工程师、北京交通大学在站博士后, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: liuzhaowei@tom.com。

位大幅度下降，增加居民生产、生活用水的困难；同时还可能造成大面积岩溶塌陷或地面开裂。为避免隧道修建对环境造成过大危害，拟按“以堵为主、限量排放”的原则实施各项工程措施。

毛坝向斜高水压富水区衬砌结构体系由围岩注浆固结圈、初期支护、排水系统和抗水压衬砌结构 4 个部分组成。其中：围岩注浆固结圈起控制排水量、加强岩体结构性能、承受水压及保护洞室稳定等作用；排水系统是尽量排除通过围岩注浆固结圈的渗透水；抗水压衬砌结构承受因排水系统不畅而产生的水压力。隧道围岩注浆包括超前预注浆、径向注浆和补充注浆 3 个部分，并且在不同的地质段各有侧重。

在圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区施工时，为保证围岩注浆固结圈的可靠性，在现场超前地质预测预报的基础上，依据揭示的地质结构按施工原

则进行注浆施工<sup>[1]</sup>。

现场注浆施工主要分为 3 种形式。

(1) 非溶洞区富水地层，其地质构造主要表现为破碎的灰岩，地层中有大量的地下水构造，开挖后可能会造成大量地下水涌出，从而形成危害。

(2) 非溶洞区含裂隙水地层，其地质构造主要表现为较完整的灰岩结构，地层中含有裂隙水，开挖完成后可能使地下水构造体系发生变化，对于毛坝向斜这样极其复杂的地质构造宜采取开挖后径向注浆的加强措施，限流排放标准为  $5\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 。

(3) 溶洞区段，毛坝向斜揭示出了 5 个溶洞体构造。即 DK354+230~+290 溶洞体、PDK354+255~+280 溶洞体、PDK354+435~+470 溶洞体、DK354+460~+490 溶洞体和 DK354+879 溶洞体，所揭示的溶洞体位置分布纵剖面 and 平面图分别如图 1，2 所示。

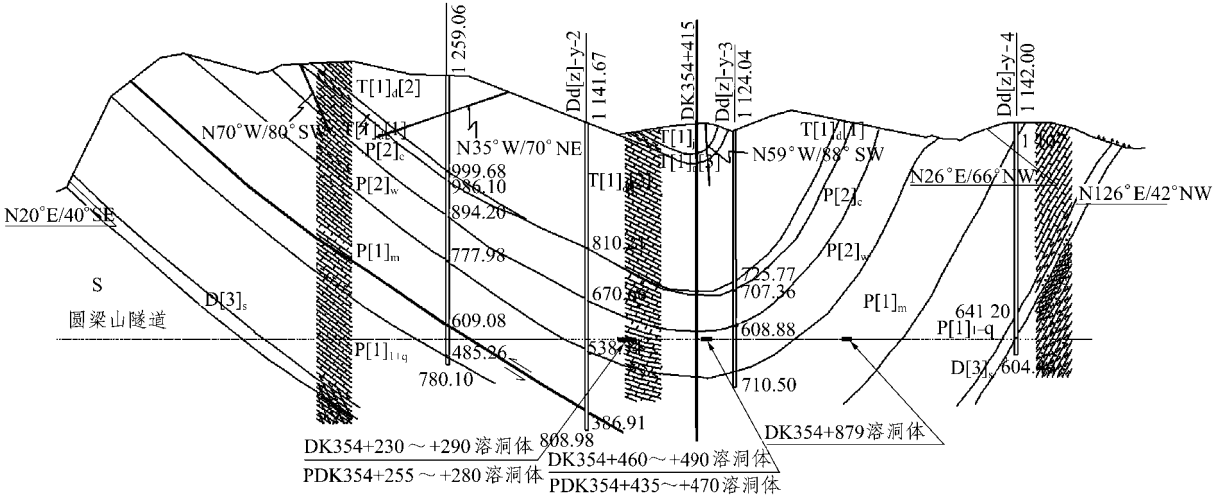


图 1 圆梁山隧道毛坝向斜核部溶洞体位置分布纵剖面图

Fig.1 Longitudinal section of distribution of karst cave in core of Maoba syncline of Yuanliangshan tunnel

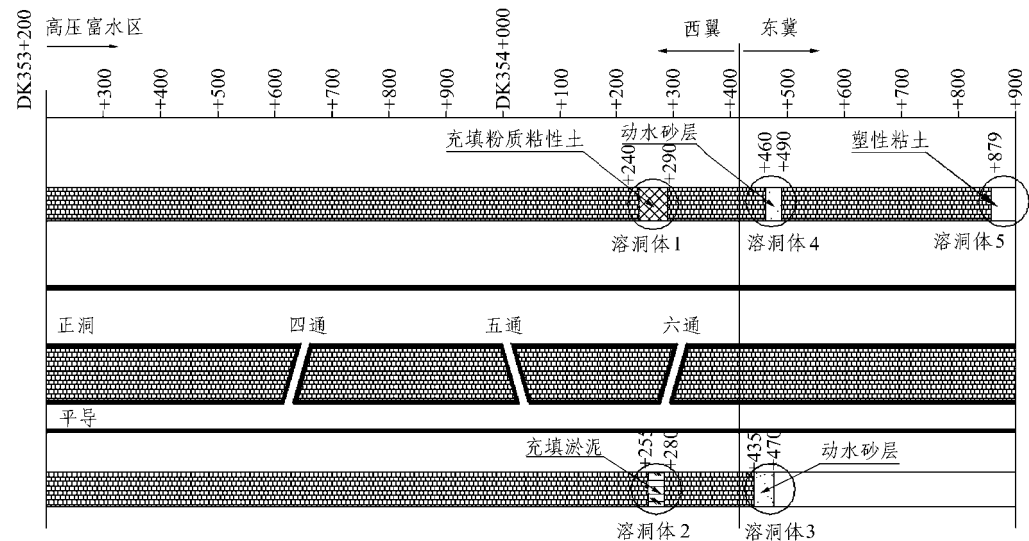


图 2 圆梁山隧道毛坝向斜核部溶洞体位置平面分布图

Fig.2 Horizontal section of distribution of karst cave in core of Maoba syncline of Yuanliangshan tunnel

毛坝向斜区所揭示的溶洞体构造基本上可分成 3 种类型,即淤泥质溶洞体、粉细砂层溶洞体和硬塑状粘性土溶洞体。这 3 种类型的溶洞体地质条件差异较大,且由于隧道全断面穿越溶洞体构造,因而应采取不同的注浆加固施工工艺,以取得最佳的注浆加固效果<sup>[2]</sup>。

## 2 非溶洞区富水地层超前注浆

在平导 PDK353+580 断面的超前钻孔探水结果表明,涌水量基本保持平衡,在超前探水孔施工结束后前期开挖过程中涌水量有减少趋势,但不十分明显。这说明涌水补给源较强,短时间内排完的可能性不大,但涌水有逐渐变清趋势。根据地质资料及现场情况可以推断,该透水层可能是断层破碎带,但由于无法判断断面的涌水范围,因而,不能排除开挖后发生大涌水的可能性。现场决定对涌水状况继续观察测试,平导施工至 PDK353+590 时,停止开挖待方案确定后,进行下一步工作。

平导开挖至 PDK353+590,由于涌水量有增大趋势,且施工中出现了原残余炮眼孔冒水现象,随后停止开挖施工。经讨论论证,决定实施全断面超前预注浆堵水。注浆加固范围为开挖轮廓线外 3 m,注浆材料选用普通水泥-水玻璃双液浆,注浆参数及浆液配比根据现场具体情况确定。由于涌水范围尚未确定,因此注浆设计中将注浆孔设计为一孔两用(注浆孔并探水孔),达到探水、堵水的目的,并继续对涌水量及水压力进行测试。注浆设计如图 3 所示。

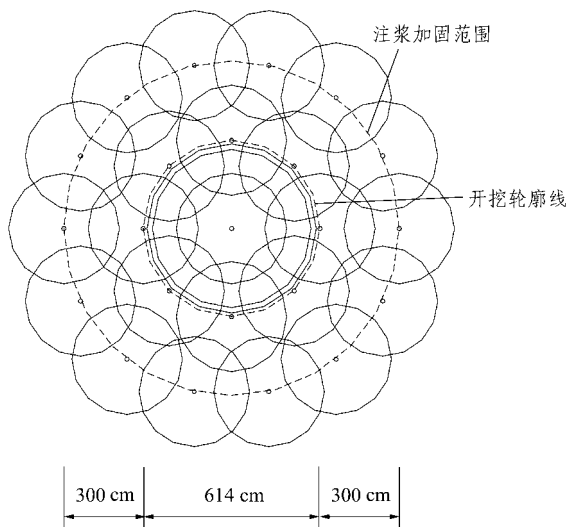


图 3 注浆孔终孔交圈图

Fig.3 Join circle of final grouting holes

按注浆设计图进行注浆施工,注浆完成后进行了开挖。开挖后,实测该溶洞段涌水量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。注浆加固效果较好。其他非溶洞区富水地段也采取了超前堵水注浆施工,注浆施工均取得了较好的效果。

## 3 非溶洞区含裂隙水地段径向注浆

在平导及正洞一般富水地段,开挖后采取如图 4,5 所示的径向注浆加固方案进行注浆施工,在平导的径向注浆范围是隧道轮廓线外 3 m,正洞的注浆范围则为 5 m。实施径向注浆后也取得了较好的注浆加固效果。

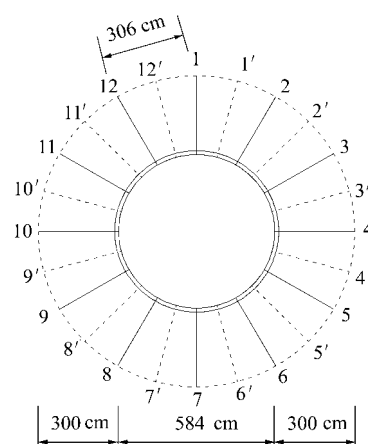


图 4 平导径向注浆加固设计图

Fig.4 Radial grouting holes of parallel leading tunnel

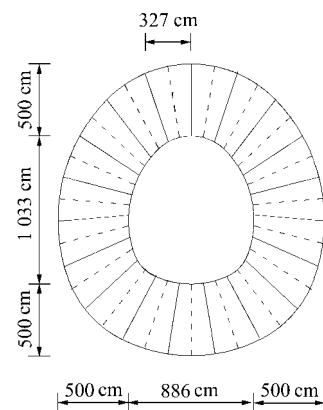


图 5 正洞径向注浆加固设计图

Fig.5 Radial grouting holes of main tunnel

## 4 平导 PDK354+255 ~ +280 溶洞段施工

### 4.1 地质预测预报

在圆梁山隧道施工中采取 4 种地质超前预测预

报手段,即红外线超前地质预测预报、TSP 超前地质预测预报、超前探水孔钻探和地质素描综合判断<sup>[3-5]</sup>。

根据已开挖的地质状况,结合红外线超前探水预测预报、TSP 超前地质预测预报及超前探水孔钻探等技术手段,参照设计部门提供的地质资料,并结合大管棚施工、注浆钻孔施工等状况,经综合分析得出:在圆梁山隧道进口端平导里程为 PDK354+255~+280 地段范围内发育一贯通性强、近 EW 向,宽 12~15 m 的大型溶洞,内含大量淤泥、砾石,富水。地层岩性为泥岩和灰岩的接触带,岩体破碎、裂隙发育、自稳能力较差。根据地层岩性判断,该段地层可能处于吴家坪组地层向长兴组地层过渡的地段。该溶洞在平导横断面及平面的分布如图 6、7 所示(图 6 中 1~88 为管棚编号)。

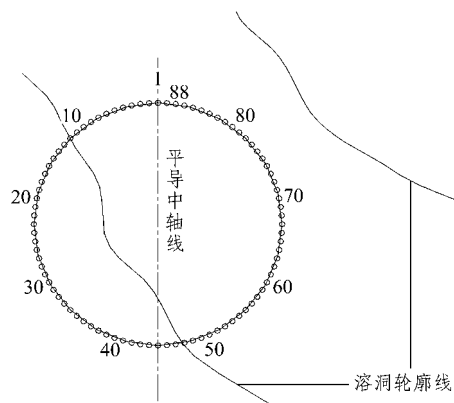


图 6 溶洞横断面分布图

Fig.6 Longitudinal section of karst cave

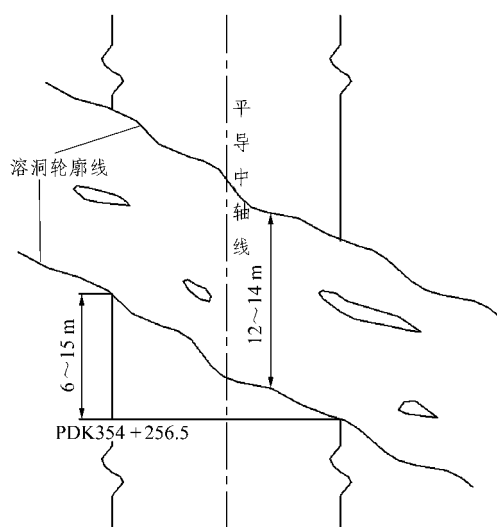


图 7 溶洞平面分布图

Fig.7 Horizontal section of karst cave

## 4.2 现场钻孔注浆施工

在探测到溶洞存在后,对于该处大型溶洞及溶洞内填充淤泥质粘土,在具体溶洞范围较难确定的情况下,防止施工过程中发生涌泥应是安全穿越该溶洞的首要问题;其次在穿越过程中强支护手段应是确保安全施工的重要因素。因而针对该大型溶洞,从施工实际出发,宜按“超前长管棚支护,小导管注浆加强”方案进行施作,以达到“安全稳妥,防止突泥”的目的。

鉴于此,决定采取全断面超前预注浆方案,同时扩大注浆加固范围,以达到“固泥堵水、安全施工”的目的<sup>[6,7]</sup>。

### (1) 后部加固

对已开挖的 PDK354+240~+255 段采取型钢+喷射混凝土进行初期支护,对已开挖的 PDK354+245~+255 泥岩段进行小导管径向注浆加固,加固范围为开挖轮廓线外 3 m,以达到稳固后方的目的。

### (2) 大管棚施工

通过管棚进行注浆加固,一则增加管棚支护刚度,二则通过管棚注浆,加固管棚周围淤泥质粘土,形成连续密闭管棚喇叭桶形支护结构,避免或减少施工期间淤泥和岩溶水通过管棚间隙涌入开挖空间形成危害。大管棚安设及注浆施工共注入双液浆 4 228.8 m<sup>3</sup>。

### (3) 全断面超前预注浆

为确保溶洞区的安全施工,进行全断面超前预注浆施工,加固开挖面及开挖轮廓线外 5~8 m。首先施工止浆墙,采用水囊式止浆塞进行注浆施工。注浆工艺采取前进式分段注浆,注浆分段长度 5 m,即钻孔 5 m,注浆 5 m,以此循环下去,直到完成整个注浆段。钻孔深度以钻入岩层 3 m 为原则。注浆结束标准以定压为主,注浆终压为水压 2~3 MPa,当注浆过程中长时间压力不上升时,应缩短浆液的凝胶时间,并采取间歇注浆措施,同时控制注浆量。

### (4) 小导管超前支护

超前预注浆完成后,在进行开挖施工前,应对注浆不足部位或注浆盲区进行小导管补充注浆。注浆结束标准采用定压定量相结合原则,注浆终压为 2~3 MPa,单孔注浆量为 0.2~0.3 m<sup>3</sup>。注浆施工过程中应加强监控量测,以防注浆压力过大造成结构变形。

### 4.3 隧道开挖

经过注浆并对其效果进行可靠的评价后, 决定进行隧道开挖。在试开挖过程中, 开挖取样试验及现场观察表明注浆效果极佳, 因而采用微弱爆破全断面开挖, 在开挖过程中围岩稳定<sup>[8]</sup>。

在开挖过程中, 将开挖揭露的地层和预测预报状况进行对比分析, 基本上符合的, 因而可以说该段地质的超前预报对该溶洞的正确处理起到了保证作用。

### 4.4 注浆效果检查评定

注浆效果检查评定是确定开挖施工方案的依据。注浆效果检查评定主要有分析法、钻检查孔法和开挖后取样测试 3 种方法。

#### (1) 注浆施工前后涌水量对比分析

注浆前探测过程中涌水量为  $50 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$ , 在注浆施工过程中也出现了涌水量超过  $10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$  的情况, 经注浆后, 该溶洞段涌水量只有  $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{h}$ , 注浆堵水效果是很明显的, 堵水率是比较高的。

#### (2) 钻检查孔法

根据注浆状况, 选择注浆范围内可能存在薄弱环节的注浆部位布设检查孔。检查孔垂直于开挖工作面钻设, 终孔深度稍短于注浆加固段长度。

绘制检查孔注浆  $P-t$ ,  $Q-t$  曲线, 如图 8 所示。

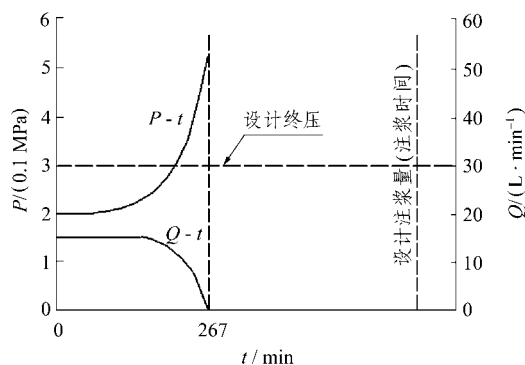


图 8 检查孔注浆  $P-t$ ,  $Q-t$  曲线

Fig.8  $P-t$  and  $Q-t$  curves of grouting checking hole

由检查孔注浆  $P-t$ ,  $Q-t$  曲线来看, 在注浆施工前期, 注浆初压为 2 MPa, 此时注浆速度为 15 L/min, 随着注浆施工的进行, 注浆压力和注浆速度基本保持不变, 这主要是起到了补充注浆作用, 并进一步劈裂强化注浆效果。维持一段时间后, 注浆压力突然上升, 超过设计注浆终压 3 MPa, 同时注浆速度急剧下降, 当注浆压力达到 4 MPa 时, 地

层基本注不进浆, 而此时注浆量远小于设计注浆量, 可见检查孔区域已饱和和密实, 达到了注浆设计要求, 满足注浆设计的填充、挤压、劈裂再挤压的堵水固泥的目的。

#### (3) 开挖取样分析评定

在开挖过程中, 观察浆液对地层的加固状况, 如图 9 所示。浆液加固溶洞地层, 主要表现为 2 种方式, 即填充挤压方式和剪切劈裂方式。填充挤压方式主要是当粘土孔隙(洞)较大时, 浆液直接填充空隙(洞), 以达到固结目的, 该加固方式主要发生在破碎围岩和粘土的交界面, 以及由于涌泥造成的部分空隙率较大的部位。剪切劈裂方式主要是针对未扰动的粘土地层, 浆液在较高压力条件下形成劈裂脉, 以脉状扩散方式形成网状加固结构, 以达到固泥堵水的目的。

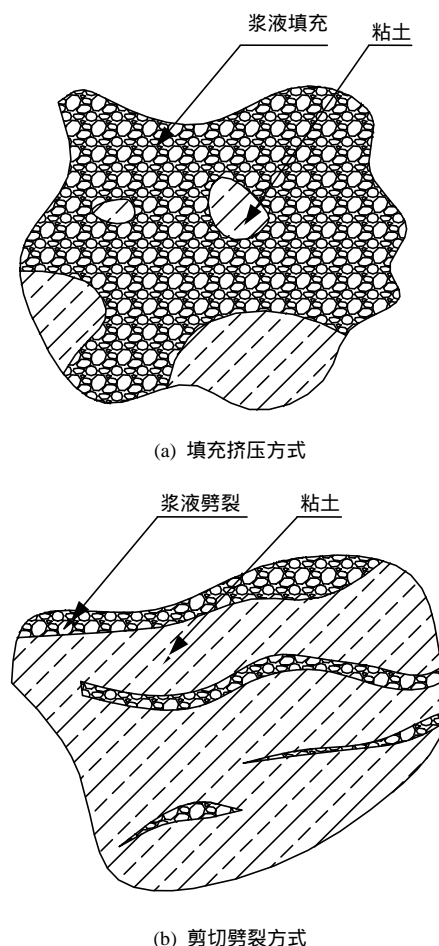


图 9 浆液加固方式图

Fig.9 Reinforcing modes of slurry

物理力学指标测试结果表明, 浆液的固结强度达到 0.2 MPa 左右, 这是固结体内压密粘土的抗压强度反映。注浆前地层为软塑状粘土, 不能自稳,

注浆后地层抗压强度得到了改善, 达到了固泥目的<sup>[9]</sup>。注浆前地层含水量为 120.3%, 地层空隙率为 82.8%, 注浆后地层含水量降低到 15.7%~29.1%, 地层空隙率降低到 18.3%~44.2%。注浆后地层的含水量和空隙率均较注浆前有较大幅度降低, 这主要是浆液通过填充、挤压、劈裂作用, 挤走地层中的一部分游离水份, 取而代之, 使地层的结构产生了变化, 达到了固泥堵水目的<sup>[10]</sup>。

溶洞区经注浆加固后, 在大管棚和超前小导管及浆液固结体的共同作用下, 采取了全断面开挖, 开挖后测试围岩变形情况, 围岩极其稳定, 其水平收敛和拱顶下沉仅为 3~5 mm, 可见注浆效果是很好的, 这对安全施工及施工后的工程质量有较好的保证作用。

## 5 正洞下导 DK354+460~+490 深埋填充粉细砂层溶洞段施工

### 5.1 地质预测预报

超前探孔表明圆梁山正洞下导前方 DK354+460~+490 段为一溶洞区, 溶腔内充填大量的水和含粉质的粉细砂。该段地处毛坝向斜核部, 地质资料显示向斜西翼~核部 P[1]<sub>m</sub> 及 P[2]<sub>c</sub> 层因 F<sub>02</sub> 层间断裂和层间滑动等影响, 深部局部地段溶蚀-构造裂隙相当发育, 结合核部附近地质钻孔抽水试验资料。岩溶从上向下呈增强趋势。由于毛坝向斜段存在两层高压承压水, 因而推断在向斜核部 DK354+400~+500 存在高压富水区域。根据物探资料, 其岩溶和岩溶水相对发育, 结合下部隔水层分析, 推断该段是向斜东翼最大的蓄水构造。

### 5.2 现场钻孔注浆施工

结合前方溶洞地质状况, 根据超前探孔过程中所暴露出的“成孔困难”这一特点, 从经济性、时效性角度考虑, 结合该工程具体实际情况, 针对前方出现的溶洞, 经过参建参研各单位的共同讨论分析, 形成“以堵为主”的施工原则, 制定了“固砂堵水, 稳定地层”的总体施工方案。根据溶洞区工程及水文地质复杂, 施工难度大, 选用“长短结合复式注浆”施工方案。如图 10 所示, 图中 为全断面深孔注浆的区域, 为 TSS 管注浆而深孔注浆未达到的区域。

(1) 首先选择采用普通水泥-水玻璃浆液作为注浆材料, 采用 MKD-5S 地质钻机作为钻孔机械, 采取后退式分段注浆工艺, 实施全断面超前预注浆。

(2) 针对深埋填充砂层选择采用超细水泥-水玻璃作为注浆材料, 采用风钻钻进成孔, 采用 TSS 管, 采取后退式分段注浆工艺。实施全断面 TSS 管超前补充注浆。

## 6 结 语

圆梁山隧道毛坝向斜段高压富水, 其岩溶条件极为复杂、施工难度之大为国内外罕见, 经过设计、施工以及科研单位的共同努力, 目前已顺利贯通。采用各种先进技术手段对溶洞的位置、形态以及充填物状况进行了可靠的预报, 经过反复试验, 选择了合理的注浆材料并确定了相应的注浆工艺, 分别进行了超前预注浆、径向注浆和衬砌背后补充注

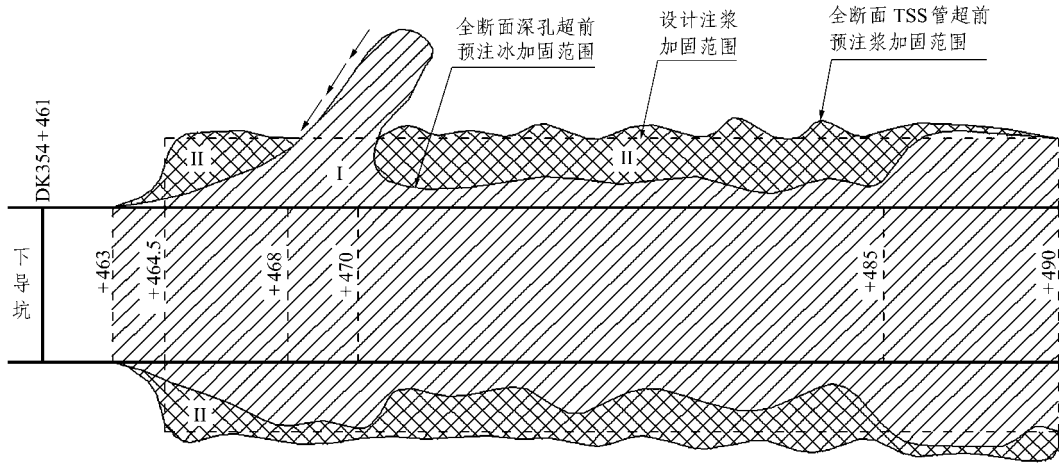


图 10 长短结合复式注浆施工方案图

Fig.10 Implementation of multiple grouting

浆,实现了对围岩,包括充填物的加固和阻水。不仅保证了施工安全,而且也为日后隧道的运营消除了隐患。

### 参考文献(References):

- [1] 李治国. 隧道岩溶处理技术[J]. 铁道工程学报, 2002, (4): 61 – 67.(Li Zhiguo .Technology of treatment for karst encountered in tunnel construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, (4): 61 – 67.(in Chinese))
- [2] 张顶立, 李治国, 张民庆. 圆梁山隧道高压富水区帷幕注浆及止浆技术[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 27 – 31.(Zhang Dingli, Li Zhiguo, Zhang Mingqing. Curtain grouting and choking slurry technology for high-pressure and water-full area in Yuanliangshan tunnel[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 27 – 31.(in Chinese))
- [3] Cooley T. Engineering approaches to conditions created by a combination of karst and faulting at a hospital in Birmingham, Alabama[J]. Engineering Geology, 2002, 65(2): 197 – 204.
- [4] Gabrovsek F, Dreybrodt W. A model of the early evolution of karst aquifers in limestone in the dimensions of length and depth[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 206 – 224.
- [5] Cooper A H, Saunders J M. Road and bridge construction across gypsum karst in England[J]. Engineering Geology, 2002, 65(1): 217 – 223.
- [6] Veni G. A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas[J]. Geomorphology, 1999, 31(1/2/3/4): 151 – 180.
- [7] Sterba H, Blab A, Katzensteiner K. Adapting an individual tree growth model for Norway spruce in pure and mixed species stands[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 159(1/2): 101 – 110.
- [8] 周书明, 陈建军. 软流塑淤泥质地层地铁区间隧道劈裂注浆加固[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 222 – 224.(Zhou Shuming, Chen Jianjun. Hydrofracture grouting in soft flowing mucky ground for a metro tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 222 – 224.(in Chinese))
- [9] 朱 晟, 顾淦臣, 白永年. 劈裂注浆改善土坝坝体应力状态研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997, (25): 8 – 14.(Zhu Sheng, Gu Ganchen, Bai Yongnian. Improvement of stress in earth dam by splitting grouting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1997, (25): 8 – 14.(in Chinese))
- [10] 葛中华. 土体裂缝注浆防渗的临界水力梯度及其防渗机理[J]. 南京大学学报(自然科学), 1997, 33(4): 571 – 578.(Ge Zhonghua. The criteria hydraulic gradient and the anti-seep mechanism of the injection into the soil fracture[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1997, 33(4): 571 – 578.(in Chinese))

## 《岩石力学与工程学报》2005 年第 3 期被 EI 收录论文(28 篇)(I)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用	张均锋 丁 桦	365 – 370
2	基于遗传算法的岩体结构面的模糊 C 均值聚类方法	蔡美峰 王 鹏 赵 奎等	371 – 376
3	岩体地下结构围岩稳定非概率可靠性的凸集合模型分析方法	苏永华 何满潮 曹文贵	377 – 383
4	龙滩工程岩石试件在拉伸条件下的变形特性试验研究	代高飞 夏才初 晏 成	384 – 388
5	红山窑膨胀岩的膨胀和软化特性及模型研究	朱珍德 张爱军 邢福东	389 – 393
6	特殊软岩软化的微观机制研究	周翠英 谭祥韶 邓毅梅等	394 – 400
7	块状结构岩体在一般水压分布模式下的不连续变形分析	姜清辉 周创兵 罗先启等	401 – 405
8	金川二矿某巷道围岩力学参数对变形的敏感性分析	侯哲生 李 晓 王思敬等	406 – 410
9	岩爆综合预测评价方法	杨 健 武 雄	411 – 416
10	双面加筋土高挡墙的离心模型试验	雷胜友	417 – 423
11	高速滑坡中的热效应分析	鲁晓兵 矫宾田 张金来等	424 – 429
12	土石粗粒料的强度和变形特性的试验研究	谢婉丽 王家鼎 张林洪	430 – 437
13	植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献	徐则民 黄润秋 唐正光等	438 – 450
14	松散岩块压实破碎规律的试验研究	张振南 缪协兴 葛修润	451 – 455
15	大理岩加卸载力学特性的研究	高春玉 徐 进 何 鹏等	456 – 460
16	节理岩体结构的分形几何研究	卢 波 陈剑平 葛修润等	461 – 467