

覃剑文, 李海波, 潘光明, 等. 岩溶基底隧道拱顶沉陷三段四层关键技术研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 746-758.
DOI: 10.11932/karst20220508

岩溶基底隧道拱顶沉陷三段四层关键技术研究

覃剑文¹, 李海波², 潘光明², 田月明¹

(1. 广西地质环境监测总站, 广西 贵港 537100; 2. 山东省煤田地质局第四勘探队, 山东 潍坊 261200)

摘要:为有效治理岩溶基底城市隧道拱顶地层沉陷地质灾害,在充分探明沉陷区水文地质、工程地质特征的基础上,提出了“三段四层控制技术”,将治理区划分为沉陷区重点加固段、影响区次重点加固段和超前加固段;再根据治理深度和治理顺序进一步把沉陷区重点加固段分为顶部阻浆层、拱顶止浆垫层、拱顶加固层和中间加固层,研究了每段、每层注浆加固机理、浆液类型选择和控制注浆参数。研究成果表明,采用孔内复合止浆技术满足不同深度地层分段注浆为主、垂直孔和定向斜孔相结合,充填注浆、劈裂-挤密注浆相结合,以速凝浆液为主、单液水泥浆为辅,严格控制安全注浆参数,是“三段四层控制技术”安全有效注浆的技术关键,该技术方案在岩溶基底城市隧道拱顶地层沉陷地质灾害治理方面,取得了较好的注浆加固效果,有良好的推广应用价值。

关键词:岩溶基底;隧道;地层沉陷;灾害治理;分段注浆

中图分类号: U457; TU761.1+1 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)05-0746-13 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

以岩溶地层为基底的地下工程施工中,会遇到溶洞、岩溶裂隙、土洞,工程施工可能引发岩溶塌陷地质灾害。蒋小珍等^[1]、罗小杰等^[2]研究认为岩溶上覆土体形成土洞的机理和规模,是由地下水位动态变化、地下水侵蚀能力以及土体工程地质性质决定的,近地表土洞还受降雨、管道渗漏影响形成塌陷或地层沉陷。张健等^[3]、刘强等^[4]提出利用充填和注浆的方式可以阻断岩溶通道,加固土体,有效阻止地下水对覆盖层土体的侵蚀。在岩溶裂隙水或降雨入渗的作用下,隧道围岩易产生变形。在有效控制围岩变形上,专家学者提出了超前预注浆或全断面帷幕预注浆加固方案^[5-7];在黄土^[8-9]、粉细砂层^[10]、软弱富水渗流地层^[11]或砂性地层^[12]内,可采用深孔注浆或

超前注浆、管棚支护加小导管注浆等联合治理防护措施;在有外水影响下,可外设截水沟^[13]、排水降压^[14-15]、注浆加固及联合支护措施;在淤泥质地层可采用“CRD+大管棚+地表旋喷洞顶局部加固”的方案^[16]。在注浆加固机理上,张连震^[17]研究了富水砂层内渗透、劈裂-压密及渗透-劈裂-压密三种注浆模式,及相应的浆液选择及注浆参数控制。孙锋^[18-19]提出在黏土、粉细砂等致密土体内形成网状骨架浆脉的劈裂注浆压力是土体改性的主控因素。在注浆工艺上,陈立生^[20]、葛以衡^[21]公开了一种隧道内微扰动特殊浆液注浆控制方法,王松根等^[22]提供了一种分层多次调压调浆注浆方法。

上述文献对岩溶基底隧道工程揭穿溶洞、岩溶裂隙,受施工疏排地下水影响,导致上覆土体坍塌、产生新土洞,通过注浆控制围岩变形,提供了很多成

第一作者简介:覃剑文(1972—),男,高级工程师,长期从事地质灾害防治工程勘查、设计工作。E-mail: 631680292@qq.com。

通信作者:李海波(1983—),男,高级工程师,主要从事地质勘查、地球物理勘探、地下空间探测、地质灾害防治和隧道突发性地灾应急救援治理等技术管理及研究工作。E-mail: ppbo@163.com。

收稿日期:2022-02-10

功经验和有益的启示。但在对岩溶基底城市隧道已开挖段,上覆土层沉陷导致隧道拱顶变形的应急系统治理上鲜有研究报道。本文分析了济南某岩溶基底隧道开挖中导致地面沉陷、隧道拱顶变形的致灾因素和关键技术难点,研究了不同深度地层注浆加固机理、浆液类型选择和控制注浆参数,提出了“三段四层技术”系统注浆加固方法,以及相应的浆液选择和控制注浆参数,实施后取得了较好的治理效果。

1 研究背景

1.1 沉陷概况

济南某道路南延工程主线采用地下形式,沿城

市道路居中布设,全长 3.26 km。其中暗挖段长 2 335 m(隧道埋深 10.5~17.5 m)。隧道右线开挖至 YK2+693 里程时,底部遇到溶洞并涌水,对溶洞进行了充填和注浆处理。2017 年 6 月 12 日,当隧道掌子面开挖至 YK2+702 里程时,在 YK2+692~702 段出现了拱顶沉降变形,隧道上方路面沉陷约 70 cm 的地质灾害。灾害发生后,施工单位采用应急措施对受影响的地下管线进行了修理和保护。隧道内 YK2+683~702 段用水泥砂浆充填反压,反压体表面距拱弧顶 1.5 m,并用钢拱排架支撑拱顶;路面沉陷区用砖石回填,上覆混凝土恢复路面,注浆治理前采取了防雨、防渗措施。沉陷区位置及其危害情况如图 1 所示。



图 1 路面沉陷及拱顶破裂沉降情况

Fig. 1 Situation of pavement subsidence and the rupture and settlement of vault

自 2017 年 6 月 17 日开始历时 10 天,把 YK2+683~710 段作为治理段,利用地面钻孔对隧道上覆地层进行了应急抢险系统注浆加固。共完成钻孔 287 个,其中垂向孔 197 个,避障或定向斜孔 90 个,钻探进尺 3 191.5 m,注入 C-GT 浆液 723.07 m³。治理后经钻孔检验和隧道开挖验证,注浆加固效果良好。

1.2 沉陷区地质背景

1.2.1 工程地质

该地为覆盖型岩溶区,勘查结果表明岩溶裂隙发育。地表为多层结构土体。从地表往下分别为杂填土、冲洪积成因的粉质黏土、溶余堆积成因的红黏土,下伏为埋藏型灰岩,灰岩表面受风化程度差异等影响,形成凹凸不平的基岩面。隧道修建主要位于灰岩基岩面上,局部切穿基岩、岩溶裂隙,隧道排水也会造成岩溶水疏干,施工期间区域水位下降。

1.2.2 水文地质

治理区地下水类型分为第四系松散岩类孔隙水、岩溶溶洞裂隙水,两类型地下水相互联通,形成互补关系。第四系松散岩类孔隙水主要接受降雨、地表水补给,赋存于第四系土层孔隙、裂隙中,向下通过岩溶裂隙补给岩溶水。岩溶水主要赋存于下伏基岩溶洞、裂隙中,接受孔隙水补给,地下水位高于基岩平面时,岩溶水进入第四系松散岩类孔隙、裂隙中,补给孔隙水。局部第四系黏土层透水性差,形成相对隔水层,岩溶水、孔隙水连通性差,形成了不同的地下水位,岩溶水有微承压性。在治理段不同位置地面注浆钻孔揭露的地下水位具有差异性(图 2(a))。采用空气潜孔锤钻进时,部分钻孔揭露地下水并产生串孔喷水现象(图 2(b))。上述钻孔相关数据见表 1,各钻孔位置、遇水及连通深度如图 3 所示。

1.2.3 路面沉陷、拱顶破裂沉降的原因分析

天然状态下,在岩溶裂隙地下水位上下动态变



(a) 钻孔内揭露地下水 (b) B4-3 施工 6 m 处, B3-4 串喷水

图 2 地下水位差异及钻孔喷水图

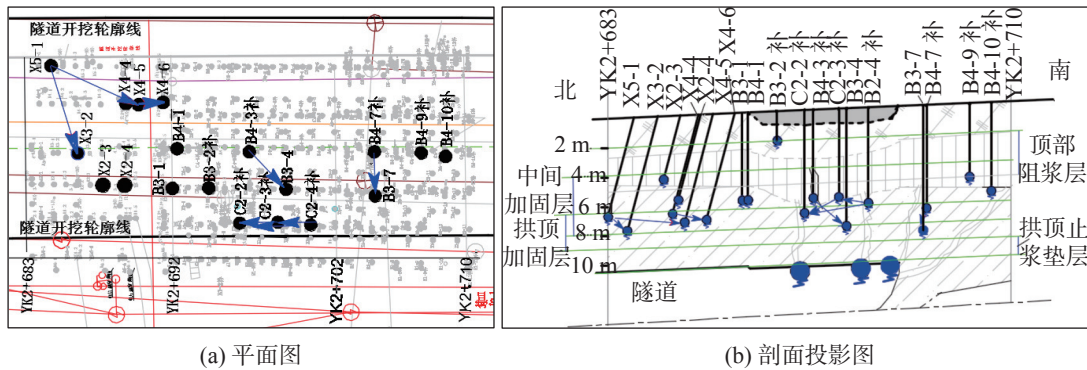
Fig. 2 Diagram of groundwater level differences and borehole water spray

表 1 治理段部分钻孔地下水位及互相串通情况

Table 1 Groundwater levels and the interconnection of some boreholes in the treatment section

喷水孔号	喷水深度/m	串喷水孔号	串喷水深度/m	喷水孔号	喷水深度/m	串喷水孔号	串喷水深度/m
B3-2补	2.0			X4-4	7.2	X4-6	7.5
B3-1	6.3			C2-3补	6.1	C2-2	7.0
B4-1	6.1			C2-4补	6.5	C2-2补	7.0
						C2-3补	6.2
X5-1	7.2	X3-2	8.0	B4-7补	6.9	B3-7	8.5
		X4-5	7.5				
X2-4	6.3			B4-10补	6.3		
B4-9补	5.0			B4-3补	6.1	B3-4	8.0
X2-3	4.5						

注: B3-2补是指原设计B3-2孔遇到障碍无法施工, 移位重打的钻孔编号, 以下同。



(a) 平面图

(b) 剖面投影图

图 3 揭露地下水的部分钻孔位置及其连通串喷深度

Fig. 3 Locations of some boreholes of exposed groundwater and the depth of the interconnected spray

化的过程中, 形成对土层的潜蚀作用。土体颗粒被地下水携带, 进入岩溶裂隙流失掉后形成土洞, 地下水进一步作用于土洞顶板和侧壁, 使其坍塌, 土洞得以扩展。由于基岩面上红黏土孔隙度小, 形成相对隔水作用。降雨、管道渗漏等地表水下渗, 在红黏土之上形成上层滞水, 对粉质黏土层形成软化作用, 局部饱和形成软塑状。由于基岩面上覆土层厚度大, 地下水位相对稳定, 土洞内空气压力、地下水浮力等

保持平衡的情况下, 土洞顶板稳定, 区域内没有出现地面沉陷、岩溶塌陷等现象(图 4(a))。隧道基本沿基岩面向前开挖至土洞发育的部位, 一方面岩溶地下水需要疏干, 导致区域水位降低, 水力坡度增大, 地下水潜蚀能力增强, 土洞发展加速; 另一方面, 隧道施工揭穿土洞, 土洞内空气压力、地下水浮力失去平衡; 受两方面因素影响, 土洞顶板承载力减弱, 出现一些导水裂隙, 地表水开始加快下渗。黏土内部

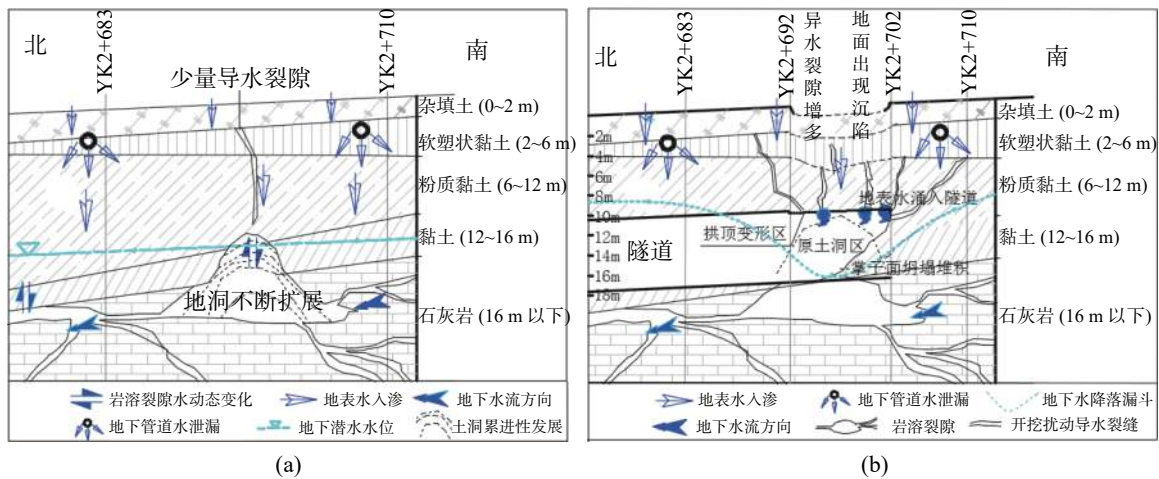


图 4 路面沉降、拱顶破裂沉降的原因分析图

Fig. 4 Reasons of pavement subsidence and the rupture and settlement of vault

粘结力和自稳结构遭破坏,在地表荷载、饱和土等重力作用下,隧道施工掌子面出现坍塌,该区域地面出现沉降,土体压力增大,致使隧道产生拱顶破裂沉降(图 4(b))。

2 沉陷区注浆治理关键技术及应用

2.1 关键技术分析

(1)富水的软塑状土体内的钻孔止浆关键技术。在富水的软塑状土体中钻孔施工时,因土体结构不稳定造成孔壁坍塌、缩径、不规则以及沉陷造成的网状空隙互相连通的影响,钻孔止浆难度很大。

(2)注浆机理选择、注浆浆液选型和注浆参数的控制等关键技术。因为沉陷地层网状空隙明显增多,空隙之间的连通性强且被水充满,土体结构崩解破坏。如何把地层内的水用浆液替换,并改善土体结构,提高被加固地层的整体强度和稳定性存在难度。在不同性质的地层内,如何正确选择注浆加固机理、注浆浆液类型和对注浆参数(注浆压力、注浆速率)的安全控制是关键。

(3)钻孔合理避障、精准安全施工和控制注浆压力防止地层严重变形的关键技术。治理区域各种地下管线隐秘性强,分布错综复杂,实际埋设位置与设计图存在较大差异,地下管线成为注浆钻孔施工的最大障碍。如何使钻孔安全避之,且注浆时如何防止地层的错动和抬升破坏地下管线成为安全施工的关键。

2.2 三段四层治理方案

2.2.1 横向三段划分

把 YK2+683~YK2+710 段作为应急抢险治理区。根据地层塌陷的影响和破坏程度以及治理难度,把治理区划分为沉陷区重点加固段(YK2+692~YK2+702)、影响区次重点加固段(YK2+683~YK2+692)和未开挖超前加固段(YK2+702~YK2+710)。对沉陷区重点加固段采用四层注浆加固方案,对影响区次重点加固段和未开挖超前加固段仅选择 1 个关键层注浆加固(图 5—图 8)。

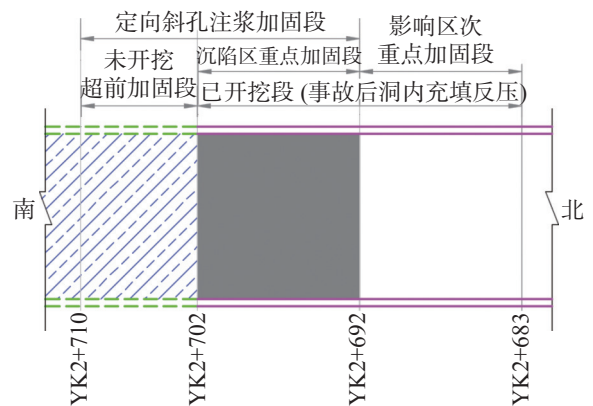


图 5 治理区横向三段划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the horizontal three-section division of the treatment area

2.2.2 重点加固段四层划分

在沉陷区重点加固段,根据地层的性质和富水深度,划分为浅部阻浆层、拱顶止浆垫层、拱顶加固

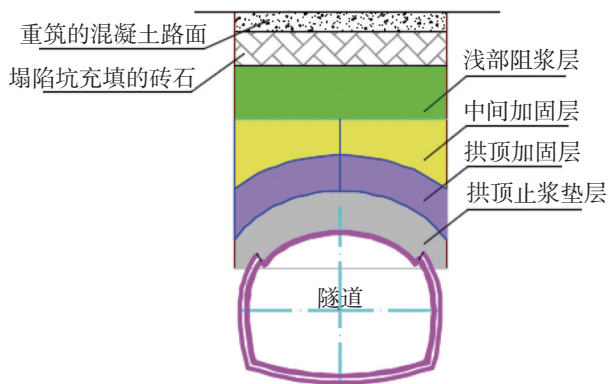


图 6 沉陷区重点加固段分层治理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of layered treatment of the key reinforcement sections in subsidence areas

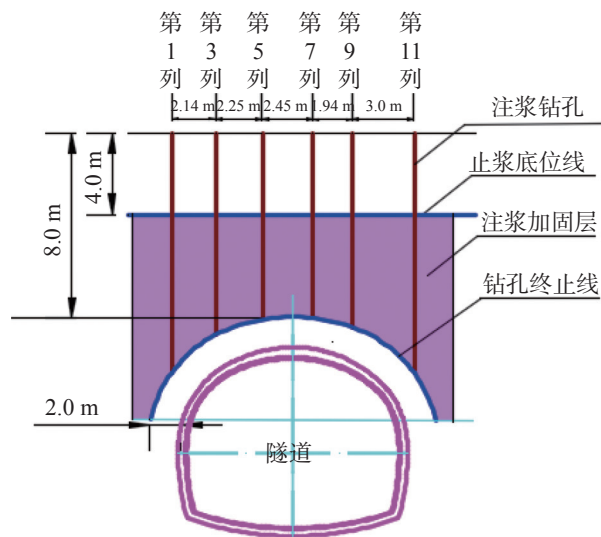


图 7 影响区次重点加固段注浆加固层示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the grouting reinforcement layer in the sub-key reinforcement section in the affected area

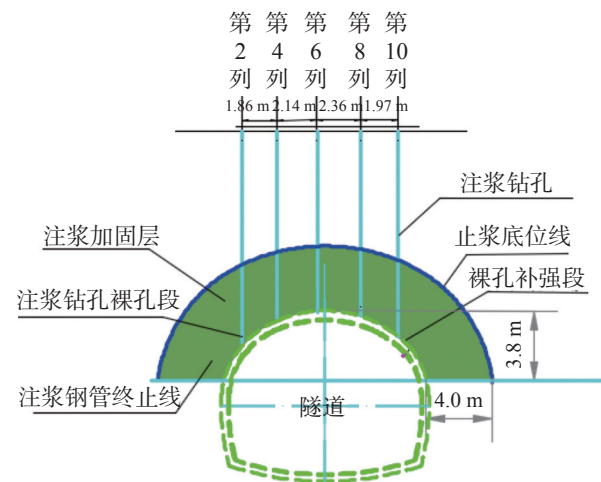


图 8 未开挖超前加固段注浆加固层示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the grouting reinforcement layer in the pre-excavated reinforcement section

层和中间加固层等 4 层(图 6, 图 3(b), 图 4)。

2.2.3 影响区次重点加固段

影响区次重点加固段路面及拱顶均没有出现沉陷和变形, 但会受沉陷的动载牵引影响。根据该段土体分布及地下水赋存深度(图 3(b)), 可把深度 4 m 到隧道开挖轮廓线以上 2 m 的地层作为核心注浆加固层, 可以有效避免注浆压力对拱顶和路面的结构破坏。该层注浆钻孔为垂向孔, 钻孔编号、孔径结构、止浆位置与沉陷区重点加固段的中间加固层要求一致, 因该地层沉陷扰动较小, 应以劈裂—挤密注浆为主。注浆浆液类型及控制注浆参数见表 2, 技术原理如图 7, 加固地层及深度如图 3(b)所示。

2.2.4 未开挖超前加固段

未开挖超前加固段大部分为沉陷未扰动区域, 应对拱顶进行重点注浆加固, 提高地层的整体强度和稳定性, 满足隧道开挖的安全需要。根据该段土体性质及地下水赋存深度(图 3(b)), 把拱顶轮廓线以上厚度 4 m 呈拱形的区域作为核心重点加固区域。钻孔为定向斜孔, 钻孔编号、钻孔倾向和顶角、孔径结构、止浆位置等与沉陷区重点加固段的拱顶加固层要求一致, 但钻孔终止线位于隧道开挖轮廓线处。注浆机理宜用劈裂—挤密注浆, 注浆浆液类型和注浆参数见表 2。其加固原理如图 8、图 12(b), 加固地层及深度如图 3(b)所示。

2.2.5 地面注浆钻孔避障间隔布置

为保护地下管线, 平面上应在管线走向间隙, 间隔布置不同类型的注浆钻孔, 定向斜孔平行管线走向倾斜, 可以满足对不同深度加固层位, 不同水平位置和不同角度钻孔的施工。相同类型的钻孔间距为 2 m 左右, 相邻钻孔间距为 0.5 m 左右(图 9)。

2.3 重点加固段四层注浆治理技术及应用

2.3.1 顶部阻浆层

(1)顶部注浆层为第 1 注浆加固层, 为富水软塑状黏土层。该土层孔隙度较发育, 透水性强且富水, 土层内可能存在土洞。注浆完成后, 可有效改善地层结构, 形成具有一定加固强度的阻浆抗压层, 形成其下注浆层的盖板, 同时也可以给其上塌陷坑充填物和混凝土路面提供有效支撑。第 1 注浆加固层宜

表 2 各加固层注浆机理、浆液类型和控制注浆参数表

Table 2 Grouting mechanism, slurry type and grouting control parameters of each reinforcement layer

序号	注浆加固层位	注浆类型	浆液类型	水泥浆平均密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Vc : Vgt	混合浆液初凝时间/s	注浆速率/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	终压 (不大于)/MPa
1	顶部阻浆层	充填注浆	C-Gt混合浆液	1.5	1 : 1	50~90	40	0.3
2	拱顶止浆垫层	劈裂—挤密注浆	C-Gt混合浆液	1.6	2 : 1	30~50	20	0.8
3	拱顶加固层	充填注浆	C-Gt混合浆液	1.6	1 : 1~2 : 1	30~50	20	0.5
4	拱顶加固层	充填注浆	C-Gt混合浆液	1.5	1 : 1	50~90	40	0.5
5	拱顶加固层	劈裂—挤密注浆	C-Gt混合浆液	1.5	1 : 1	30~50	20	0.8~1.0
6	中间加固层	充填—劈裂—挤密	单双液交替	1.5	1 : 1	90~150	20~40	1.0~1.5
7	未开挖超前加固层	劈裂—挤密	单双液交替	1.5	1 : 1	50~90	20~40	1.0~1.2
8	影响区加固层	劈裂—挤密	单双液交替	1.5	1 : 1	50~90	20~40	1.0~1.2

注：配浆使用普通硅酸盐水泥，水泥标号P.O 42.5R；GT浆液密度控制在 $1.2\sim 1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。单液浆密度平均 $1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

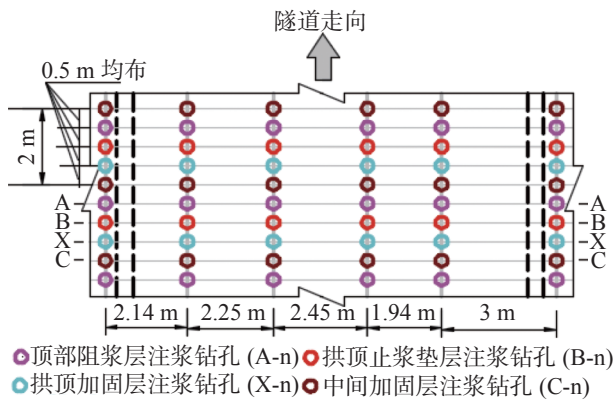


图 9 不同类型注浆钻孔间隔布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of interval layout of different types of grouting boreholes

采用充填注浆、劈裂—挤密注浆模式。注浆时尽量减少地层的错动和抬升，防止破坏地下管线和路面结构层。

(2)该层注浆钻孔为垂直孔，钻孔编号 A-n，钻孔内 2 m 以上止浆，治理深度 2~5 m。钻孔分两序次隔排隔孔施工。第一序为充填注浆钻孔，第二序为劈裂—挤密注浆钻孔。注浆时应根据钻孔序次，合理控制浆液的扩散距离，浆液类型、控制注浆参数见表 2，其技术原理如图 10，治理地层及深度如图 3(b)。

2.3.2 拱顶止浆垫层

(1)拱顶止浆垫层为第 2 注浆加固层，处于富水的粉质黏土和黏土内。在下部岩溶水和拱顶沉降作用后，该层网状裂隙发育，整体自稳能力基本消失。注浆加固后可形成具有一定强度的底部阻浆抗压层，可以提高抵抗上部拱顶加固层注浆时压力破坏的能力，并阻挡拱顶加固层注浆时浆液的流失，应以充填

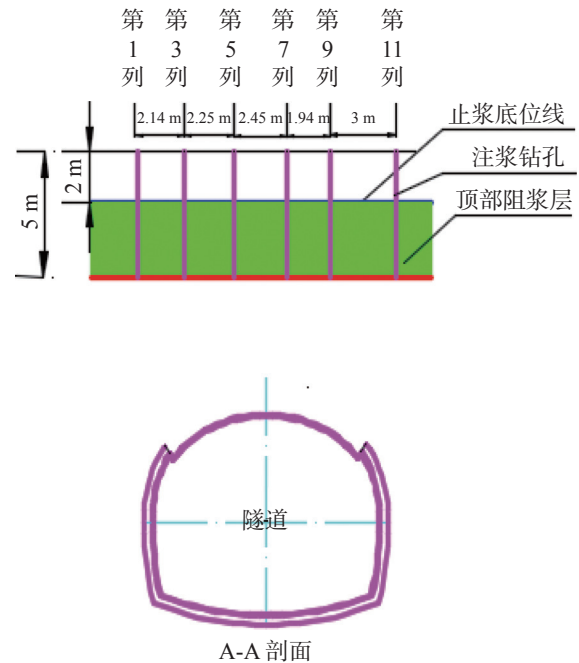


图 10 顶部阻浆层钻探注浆原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the drilling grouting principle of the top slurry barrier layer

注浆为主。因拱顶由钢排架支撑，具有一定的抗压能力，注浆终压可略高于顶部阻浆层充填注浆压力。

(2)该层注浆钻孔为垂直孔，编号 B-n，钻孔深度以接触到初支结构为准。孔内止浆深度为止浆底线以上，即距离隧道开挖轮廓线 1.5 m 左右，注浆后可形成 1.5 m 厚的拱顶止浆垫层，应合理缩短浆液的扩散距离，其浆液类型和控制注浆参数见表 2，技术原理如图 11、治理层及深度如图 3(b)。

2.3.3 拱顶加固层

(1)拱顶加固层为第 3 顺序施工的核心加固层，

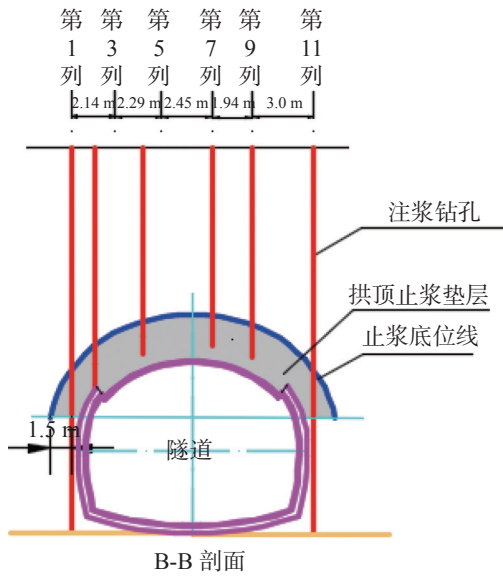


图 11 拱部止浆垫层注浆原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the drilling grouting principle of the vault cushion layer of slurry stopping

厚度约 2.5 m。处于粉质黏土层内，上部富水，下部饱水，如图 3(b)该层加固完成后，不仅使拱顶具有更高的强度和稳定性，还可抵御其上部中间加固层注浆压力和浆液自重给拱顶附加的压力破坏，并对拱顶止浆垫层起到补注浆加强作用。采用定向斜孔的目的是利用了注浆后孔内钢管的系统抗剪能力，应采用充填注浆和劈裂—挤密注浆的复合注浆模式。

(2)该层注浆钻孔编号 X-n，为定向斜孔，正北倾斜，顶角 15°，钻孔内均下入 42 mm 钢花管，钢花管低端位于各自钻孔位置处的注浆钢管终止线上；钢花管以下为裸孔段，进入拱顶止浆垫层内 0.7 m 终孔；止浆底位线以上止浆，在拱顶可形成厚度约 4 m 的注浆加固层(含 1.5 m 厚止浆垫层)。钻孔分两序次隔排隔孔施工，第一序次主要以沉陷裂缝内充填注浆为主，第二序次对第一序次被充填注浆的地层进一步劈裂—挤密注浆，浆液固结后在治理层内形成立体网状骨架结构。技术原理如图 12，治理地层及深度如图 3(b)所示，浆液类型和控制注浆参数见表 2。

2.3.4 中间加固层

(1)中间加固层为最后施工的核心注浆加固层。上部为富水的软塑状黏土，下部为富水的粉质黏土，是被水侵害、地层沉陷最严重的地层(图 3(b))。注浆的目的是驱水和对地层系统加固。注浆机理为充填—劈裂—挤密注浆的连续复合注浆，最终在治理层内形成浆脉固结体的立体网络骨架结构。

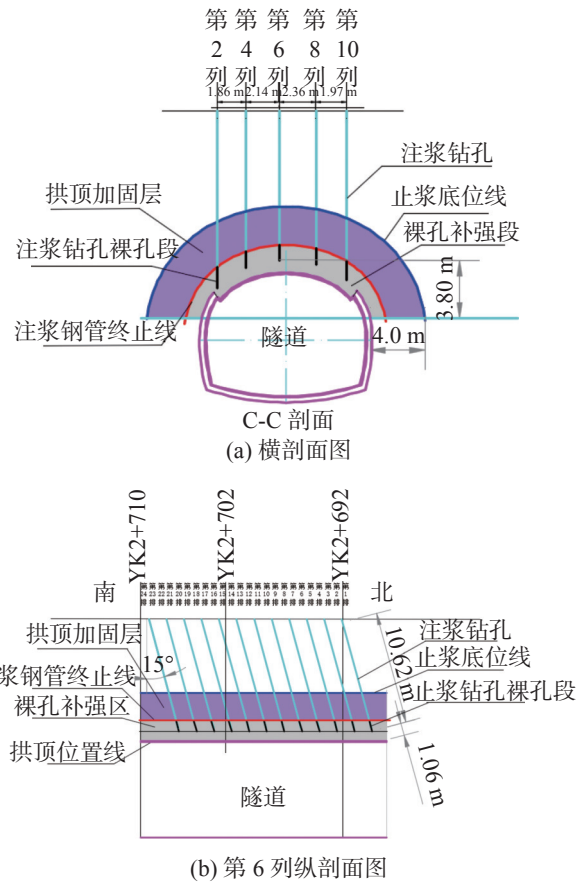


图 12 拱顶加固层钻孔注浆原理图

Fig. 12 Schematic diagram of drilling and grouting of the reinforcement layer at the top of vault

(2)该层注浆钻孔为垂直孔，钻孔编号 C-n，均进入拱顶加固层内 0.5 m 终孔，在止浆底位线即孔深 4 m 以上止浆(与顶部阻浆层重叠 1 m，与拱顶注浆加固层重叠 1.5 m)。注浆时应提高浆液的扩散距离，使用较高注浆压力。其技术原理如图 13，治理地层及深度如图 3(b)，浆液类型和控制注浆参数见表 2。

2.3.5 各注浆加固层浆液类型及控制参数

为有效控制注浆浆液的扩散距离，保持良好的固结强度，选用了 C-GT 速凝浆液(一种易操控、水中抗分散、不易造成注浆管路堵塞或钻孔堵塞、强度高的膏状速凝注浆材料^[23])。根据各加固层的目的和技术要求，不同加固层内的浆液类型和控制注浆参数见表 2。

2.3.6 钻孔防塌及定向孔轨迹控制

研究采用了空气潜孔锤跟钢套管钻进防塌技术，较好解决了富水的软塑泥质地层内塌孔和下管困难

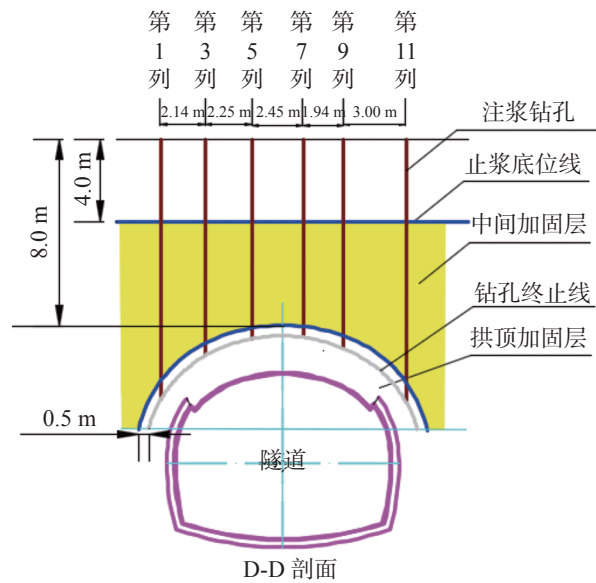


图 13 中间加固层钻探注浆原理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of drilling and grouting principle of intermediate reinforcement layer

的难题。即把钢套管跟钻深度到止浆底位线处后，停止跟管，然后正常继续钻进到终孔位置，即钻孔上部为钢套管，下部为裸孔段。把钻头提离钻孔后，分别在钢套管和裸孔段内下入自适应止浆器和注浆钢花管。止浆器底端位于钢套管内的止浆底位线深度处，注浆钢花管位于钻孔裸孔段内。然后把钢套管拔出钻孔，自适应止浆器内注入速凝浆液后膨胀止浆，止浆合格后经钢花管对裸孔段地层注浆。

在定向孔轨迹控制方面，一是利用了钢套管的定向作用；二是通过对顶部阻浆层的注浆加固，提高了顶部阻浆层的强度和稳定性，给穿层钻孔的轨迹

的精准控制提供了较好的地质条件。

2.3.7 钻孔内复合式止浆

自适应止浆器可以根据不规则的钻孔孔径自由调整膨胀形状，使之紧密地和孔壁贴合，达到良好的止浆效果。但当不规则钻孔孔径超出自适应止浆器最大膨胀极限时，会出现注浆串浆、止浆失败的结果(图 14(a))。复合式止浆技术可弥补此弊端，即在出现因上述原因的止浆失败后，可在自适应止浆器上端处捣入编织袋，然后在编织袋以上钻孔内灌入速凝浆液。固结后的速凝浆液、编织袋和自适应止浆器共同完成复合式止浆，技术原理如图 14(b)。

3 注浆监控及效果分析

3.1 注浆量及注浆终压

沉陷区重点加固段四层钻探注浆完成工程量见表 3，治理区三段注浆量如图 15 所示，图 15 中浅部指孔深 2~7 m，深部指孔深 7~13 m。塌陷区重点加固段注浆量明显高于其他两段，足以说明地层被破坏严重，空隙率增加明显。

3.2 注浆过程拱顶沉降监测分析

为研究注浆对拱顶变形的影响规律，分别在 YK2+677、YK2+682、YK2+693、YK2+698 和 YK2+702 等 6 个断面拱顶处设置沉降监测点，用全站仪每日监测。6 月 17 日到 6 月 27 日注浆期间的每日拱顶沉降监测数据如图 16。

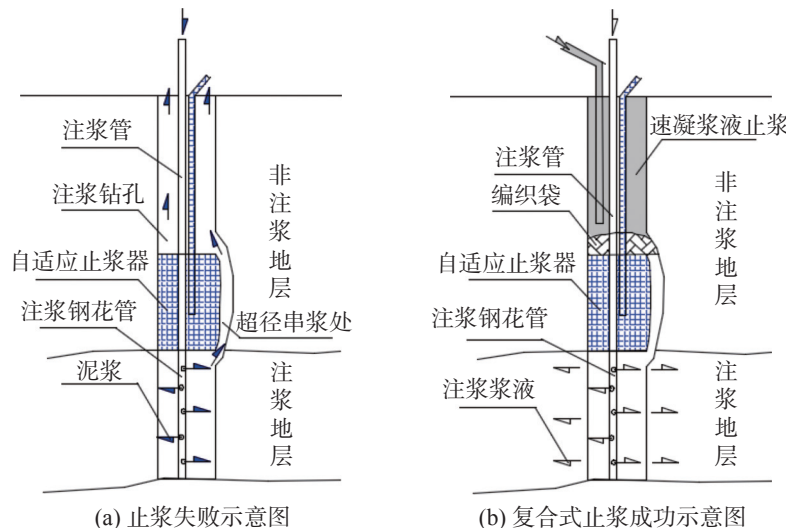


图 14 孔内复合式止浆技术原理图

Fig. 14 Schematic diagram of the combined technology of slurry-stopping in the hole

表 3 沉陷区重点加固段各加固层钻孔数量、注浆量和注浆终压统计表

Table 3 Statistics of drilling quantity, grouting quantity and final grouting pressure of each reinforcement layer in the key reinforcement section of the subsidence area

钻孔种类	设计钻孔数/个	优化后钻孔数/个	注浆量/m ³	注浆终压范围/MPa
顶部阻浆层(A序)/垂直孔	30	26	91.59	0.3~0.8
拱顶止浆垫层(B序)/垂直孔	30	28	42.72	0.3~0.5
拱顶加固层(C序)/定向斜孔	35	31	96.60	0.5~1.0
中间加固层(D序)/垂直孔	30	24	108.63	1.0~1.5
补强孔/垂直孔	6	6	10.06	0.8~1.0
共计	131	115	349.54	

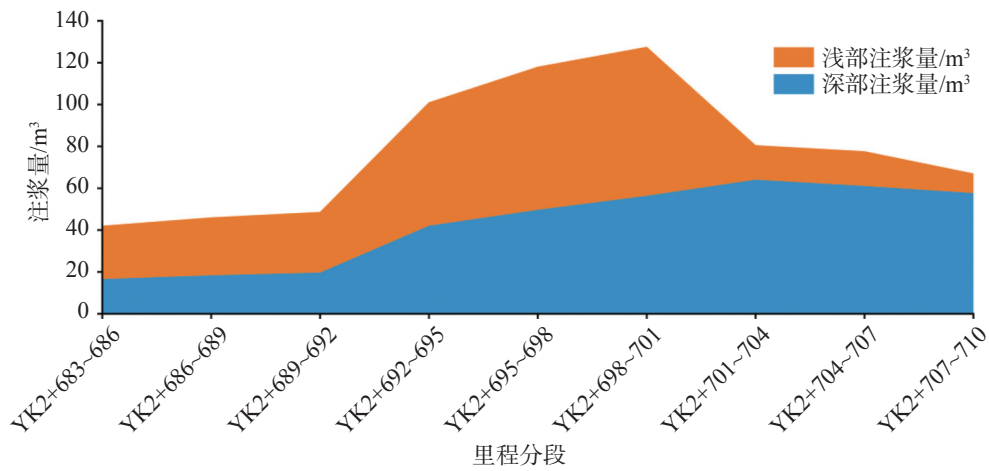


图 15 YK2+683-YK2+710 治理区域三段注浆量分布图

Fig. 15 Distribution of grouting amount in the third section of YK2+683-YK2+710 treatment area

YK2+702、YK2+698 两点 6 月 18 日—6 月 20 日期间拱顶沉降变化较大,均超过 12 mm,最高达 55.2 mm。断面 YK2+693 处分别在 6 月 18 日、6 月 21 日、6 月 22 日拱顶下沉相对较大。分析认为 3 个监测点均位于沉陷区内,且靠近地层沉陷两端的断挫点,地层因自身重力作用仍处于活动期外,钻探作业扰动、注浆压力及浆液的重力附加是变形较大的主要原因。

因 YK2+702、YK2+698 两监测点位于最前端且拱顶下沉较大的高风险区为保证监测人员的安全,6 月 22 日以后取消了对该两断面的监测。

3.2.1 拱顶沉降与注浆压力的关系

以变形量较大的 YK2+693 为例(图 17)。每日拱顶沉降量与当日注浆压力具有一定的相关性。6

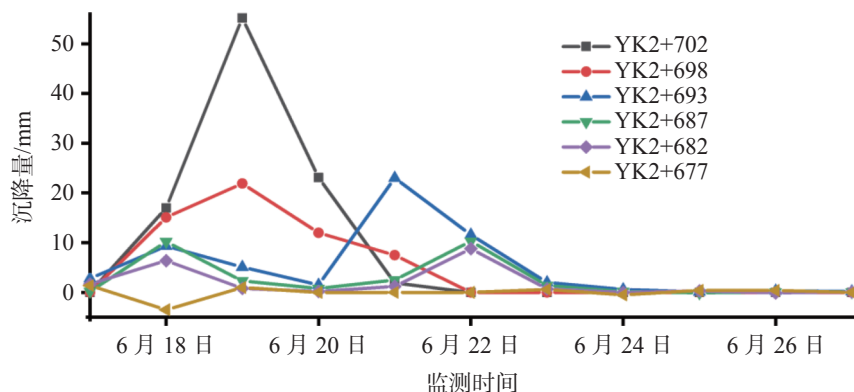


图 16 拱顶各监测点每日沉降数据曲线

Fig. 16 Daily settlement curve of each monitoring point of the vault

月 21 日、22 日该桩号附近进行拱顶加固层劈裂—挤密注浆，注浆终压均达到了 1.3 MPa，拱顶最大沉降量分别为 23 mm、11.6 mm，说明拱顶沉降与注浆压力关联密切。后变形恢复趋于稳定，应为拱顶加固层注浆后的整体支撑强度提高，能抵抗中间加固层注浆压力和浆液自重压力的影响。

3.2.2 单日注浆量与拱顶沉降的关系

拱顶沉降量与每日注浆量正相关。6 月 18 日为顶部阻浆层充填注浆，注浆量较大为 134 m³，拱顶最大沉降量达 10.2 mm；6 月 21 日为拱顶加固层充填、劈裂—挤密注浆，注浆量 124.33 m³，拱顶最大沉降达到 23 mm(图 18)。原因应是地层中单日注入大量浆液，浆液自重压力作用于拱顶使其产生较大沉降，其他时间段注浆量相对较少，且拱顶加固层及顶部阻浆层之前注入的浆液固结后形成了较高强度的自撑

体，故以后中间加固层注浆时对拱顶影响较小。

经对上述监控数据分析，认识到较高的注浆压力和较大的单日注浆量均会在一定程度上引起拱顶的较大沉降变形。因此前期注浆时，在满足注浆加固要求的前提下应尽量减少注浆终压和单日注浆量，待被注地层浆液固结使其整体自撑强度提高后，再逐渐提高注浆压力和单日注浆量。

3.3 注浆效果

注浆结束后，治理区共布置了 3 个检查孔，在注浆加固层内取芯，重点检查中间加固层和拱顶加固层的注浆质量。3 个钻孔取芯率均高于 80%。芯样均显示被加固地层内浆脉分布广泛，充填饱满，岩芯致密，含水量低，注浆后的地层结构改善良好(图 19)。图 19(a)中 J-1 孔 6~9 m 粉质黏土芯样内劈裂浆脉，图 19(b)中 J-2 孔 4.5~5 m 软塑状黏土层

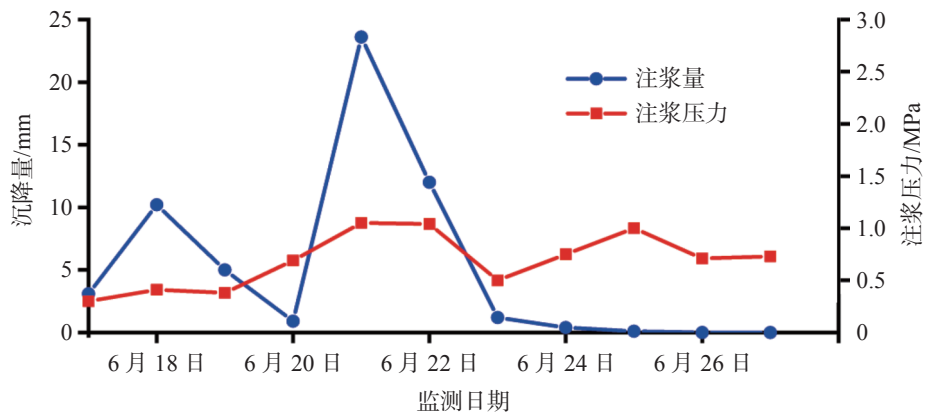


图 17 YK2+693 处注浆压力与拱顶沉降量关系曲线

Fig. 17 Relationship between grouting pressure and vault settlement at YK2+693

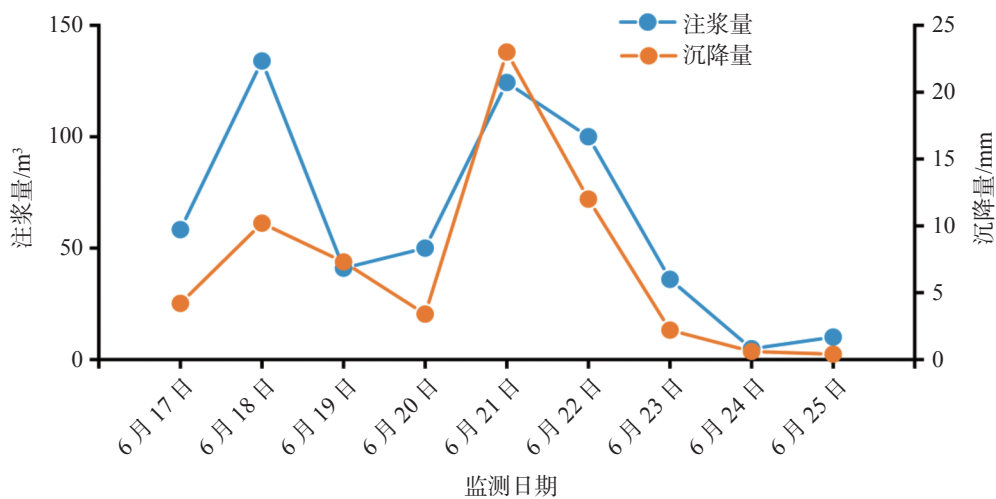


图 18 YK2+693 处每日注浆量与拱顶沉降量关系曲线

Fig. 18 Relationship between daily grouting amount and vault settlement at YK2+693

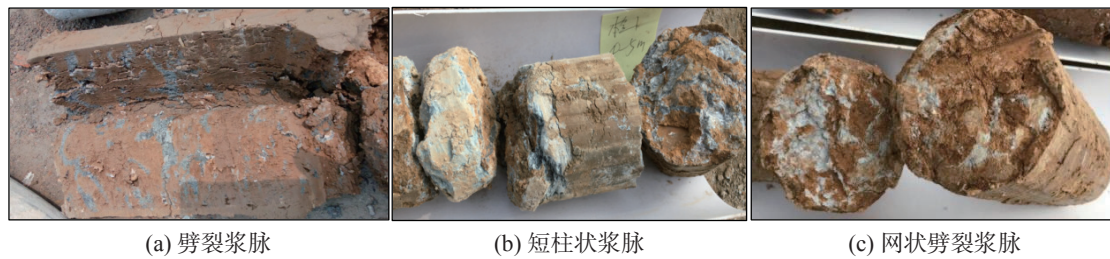


图 19 检查孔芯样内浆脉分布情况

Fig. 19 Distribution of grout veins in the core sample

内充填短柱状和宽大劈裂浆脉, (c) J-3 孔 6~9 m 粉质黏土层内的网状劈裂浆脉。

4 结 论

(1) 根据隧道拱顶变形程度、隧道上覆土层沉陷程度及不同层位的富水性, 采用“三段四层治理技术”, 对不同部位土体实施了针对性治理。对顶部阻浆层、中间加固层采用了充填注浆和劈裂—挤密注浆, 对中间加固层实施了充填—劈裂—挤密复合式交替注浆模式, 对拱顶止浆垫层选用了充填注浆模式。对未开挖超前加固段和影响区次重点加固段注浆层内实现了劈裂-挤密方式注浆;

(2) 为减少拱顶止浆垫层和顶部阻浆层浆液的漏失, 均选择了 C-GT 速凝混合浆液, 并把浆液的初凝时间控制在 30~50 s, 注浆终压不超过 0.5 MPa 和 0.8 MPa。为实现拱顶加固层、中间加固层内浆液的有效扩散, 则把 C-GT 混合浆液的初凝时间延长到 50~90 s, 甚至高达 150 s, 注浆终压提高到 0.8~1.2 MPa 不等。为提高未开挖超前加固段和影响区次重点加固段注浆层内的浆液扩散和整体加固质量, 利用了单液水泥浆较高的固结强度和 C-GT 混合浆液的速凝特性, 实施了单双液交替复合式连续注浆。以上是保证注浆加固成功的关键;

(3) 利用复合式止浆方式解决了因孔壁坍塌、缩径及钻孔严重超径处的分段有效止浆, 实现了对四层不同深度处的隔离注浆;

(4) 采用定向斜孔有效避开了隐秘的地下管线, 并利用注浆管作为管棚提高地层的抗剪切能力。结合注浆可有效提高隧道拱顶注浆加固地层的整体强度和稳定性。

参考文献

[1] 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 单层土体结构岩溶土洞的形成机

理[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 426-432.

JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Formation mechanism of karst soil cave with single-layer soil structure[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 426-432.

[2] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 171-188.

LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three mechanism theory of karst ground collapse and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 171-188.

[3] 张健, 李术才, 张乾青, 李亮亮, 贺鹏. 覆盖型岩溶地基注浆处理与效果检测分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 167-173.

ZHANG Jian, LI Shucan, ZHANG Qianqing, LI Liangliang, HE Pen. Analysis of covered karst foundation treatment and grouting effect[J]. *Journal of Building Structure*, 2017, 38(9): 167-173.

[4] 刘强, 张可能, 彭环云, 张云毅, 汪洋. 高速公路岩溶路基注浆效果综合评价[J]. 沈阳工业大学学报, 2014(5): 591-595.

LIU Qiang, ZHANG Keneng, PENG Huanyun, ZHANG Yunyi, WANG Yang. Comprehensive evaluation of grouting effect of expressway karst subgrade [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014 (5): 591-595.

[5] 甘鹏路. 富水软弱地层浅埋暗挖隧道地层变形规律及预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

GAN Penglu. Study on formation deformation law and prediction of shallow buried tunnel in water rich soft stratum [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[6] 王鹏超. 贵阳浅埋暗挖地铁施工引起的地表变形规律及控制措施研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.

WANG Pengchao. Study on the deformation law and control measures of surface deformation caused by the construction of Guiyang shallow buried underground excavation subway [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.

[7] 牟翔. 地表注浆下浅埋暗挖地铁车站超前小导管支护参数研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

MOU Xiang. Study on advance small conduit support parameters of shallow buried underground excavation subway station under surface grouting [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.

[8] 郑钦文. 浅埋暗挖黄土隧道下穿火车站场区变形控制技术研

- 究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
- ZHENG Qinwen. Research on deformation control technology of shallow buried and concealed excavated loess tunnel under railway station [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [9] 王国强. 浅埋暗挖地铁隧道特殊黄土地层注浆预加固技术应用研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2015, 41(5): 31-34,52.
- WANG Guoqiang. Study on application of grouting pre-reinforcement technology in special loess stratum of shallow buried and concealed metro tunnel[J]. *Sichuan Institute of Architectural Sciences*, 2015, 41(5): 31-34,52.
- [10] 赵朋. 粉细砂地层浅埋暗挖车站施工关键技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2016.
- ZHAO Peng. Research on key technology of shallow buried and concealed excavation station construction in silty fine sand stratum [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2016.
- [11] 宗振宇. 浅埋暗挖软弱富水渗流地层变形特征及控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- ZONG Zhenyu. Study on deformation characteristics and control of weak water-rich seepage stratum in shallow buried and concealed excavation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] 于兆成. 砂土地层大断面浅埋隧道地表沉降规律及控制研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
- YU Zhaocheng. Study on surface settlement law and control of large section shallow buried tunnel in sandy soil [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [13] 王师. 地铁车站暗挖通道施工监测及数值模拟[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2019.
- WANG Shi. Construction monitoring and numerical simulation of underground tunnel in subway station [D]. Shenyang: Shenyang Architecture University, 2019.
- [14] 彭悦. 浅埋扩挖隧道大变形处治技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- PENG Yue. Research on large deformation treatment technology of shallow buried expanded tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [15] 刘鹏. 浅埋暗挖隧道衬砌外水压力分布及堵水限排技术研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2016.
- LIU Peng. Study on external water pressure distribution and water plugging and drainage restriction technology of shallow buried and concealed tunnel lining [D]. Qingdao: Qingdao University of technology, 2016.
- [16] 程飞. 淤泥质隧道暗挖施工加固方案优化分析[D]. 西安:长安大学, 2018.
- CHENG Fei. Optimization analysis of reinforcement scheme for mucky tunnel excavation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [17] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 济南:山东大学, 2017.
- ZHANG Lianzhen. Mechanism and engineering application of grouting diffusion and reinforcement of subway crossing sand layer [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [18] 孙锋, 张顶立, 王臣, 房倩, 李兵. 劈裂注浆抬升既有管道效果分析及工程应用[J]. *岩土力学*, 31(3): 932-938.
- SUN Feng, ZHANG Dingli, WANG Chen, FANG Qian, LI Bing. Effect analysis and engineering application of splitting grouting to lift existing pipeline [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2010, 31(3): 932-938.
- [19] 孙锋, 张顶立, 陈铁林, 张晓平. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 32(3): 474-480.
- SUN Feng, ZHANG Dingli, CHEN Tielin, ZHANG Xiaoping. Meso-simulation of soil splitting grouting process[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 32(3): 474-480.
- [20] 陈立生, 沈成明, 彭惠, 廖少明, 孙连元. 一种复杂环境条件下隧道内微扰动注浆控制方法[P]. CN101255798A, 2008年.
- CHEN Lisheng, SHEN Chengming, PENG Hui, LIAO Shaoming, SUN Lianyuan. A micro disturbance grouting control method in tunnel under complex environmental conditions [P]. CN101255798A, 2008.
- [21] 葛以衡, 赵国强, 夏晨欢, 廖少明. 隧道内微扰动注浆工艺[P]. CN 101255799A, 2008.
- GE Yiheng, ZHAO Guoqiang, XIA Chenhuan, LIAO Shaoming. Micro-disturbance grouting technology in tunnel [P]. CN101255799A, 2008.
- [22] 王松根, 宋修广, 李英勇, 张思峰, 张宏博, 管延华. 分层多次调压调浆注浆方法[P]. CN 101230570A, 2008.
- WANG Songgen, SONG Xiuguang, LI Yingyong, ZHANG Sifeng, ZHANG Hongbo, GUAN Yanhua. Layered multiple pressure and slurry regulating grouting method [P]. CN101230570A, 2008.
- [23] 刘人太, 张庆松, 李术才, 李海燕, 原小帅, 张霄, 韩伟伟, 张伟杰, 王凤刚. 一种膏状速凝注浆材料及其制备方法[P]. CN102001847A, 2010.
- LIU Rentai, ZHANG Qingsong, LI Shucan, LI Haiyan, YUAN Xiaoshuai, ZHANG Xiao, HAN Weiwei, ZHANG Weijie, WANG Fenggang. The invention relates to a paste quick setting grouting material and a preparation method [P]. CN102001847A, 2010.

Study on "three-section and four-layer" reinforcement technology of tunnel vault subsidence in the karst basement

QIN Jianwen¹, LI Haibo², PAN Guangming², TIAN Yueming¹

(1. Guangxi Geological Environment Monitoring Station, Guigang, Guangxi 537100, China; 2. No. 4 Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Weifang, Shandong 261200, China)

Abstract In order to effectively control the geological disaster of tunnel vault subsidence in the karst basement, the "three-section and four-layer" control technology is proposed, based on the full analysis of engineering geology and hydrogeological characteristics of the subsidence stratum. In this technology, the treatment area is divided into the key reinforcement section, the sub-key reinforcement section of the affected area and the pre-excavated reinforcement section. According to the treatment depth and order, the key reinforcement section of the subsidence area is divided into the top slurry barrier layer, the vault cushion layer of slurry-stopping, the vault reinforcement layer and the intermediate reinforcement layer.

In terms of grouting mechanism, filling grouting and splitting-compacting grouting are adopted in both the top slurry barrier layer and the intermediate reinforcement layer. The alternate mode with filling-splitting-compacting grouting is implemented in the intermediate reinforcement layer, and the filling grouting mode is adopted in the vault cushion layer of slurry-stopping. Splitting-compacting grouting is conducted in both the pre-excavated reinforcement section and the sub-key reinforcement section in the affected area. In order to reduce the leakage of grout in the top slurry barrier layer and vault cushion layer of slurry-stopping, C-GT quick setting mixed grout is selected, and the initial setting time of the grout is controlled at 30-50 seconds, while the final grouting pressure is no more than 0.5 MPa and 0.8 MPa. In order to realize the effective diffusion of slurry in the vault reinforcement layer and intermediate reinforcement layer, the initial setting time of C-GT mixed slurry is extended to 50-90 seconds, even up to 150 seconds, and the final grouting pressure is up to 0.8-1.2 MPa. To improve the slurry diffusion and overall reinforcement strength of the pre-excavated reinforcement layer and the sub-key reinforcement layer in the affected area, the alternate and continuous grouting mode of single and double cement slurry is implemented based on the high consolidation strength of single cement slurry and the quick setting characteristics of C-GT mixed slurry. The above-mentioned technology is the key to the success of grouting reinforcement. Besides, the combined grout-stopping method is used to effectively deal with the segmented grout-stopping at the place where the hole wall collapses and shrinks, and the diameter of borehole is greatly oversized. Hence, the isolated grouting at different depths of those four layers is realized. The directional inclined hole is used to effectively avoid the hidden underground pipeline, and the grouting pipe is used as the pipe roof to improve the shear resistance of stratum. Combined with grouting, this technology can effectively improve the overall strength and stability of the reinforcement stratum by tunnel vault grouting.

Research results indicate that "the three-section and four-layer" treatment scheme is the basis to effectively control the subsidence of soil overlying the tunnel. The combined grout-stopping technology in the hole is the guarantee to meet the requirement of segmented grouting at different depths. The combination of vertical hole and directional inclined hole and of filling grouting and splitting-compacting grouting, taking quick setting slurry as the primary part supplemented with single cement slurry, and the strict control of safe grouting parameters are the technical keys of safe and effective grouting. The application of the above technology has achieved good grouting reinforcement effect and hence should be popularized.

Key words karst basement, tunnel, stratum subsidence, disaster control, segmented grouting

(编辑 张玲)