

富水软弱围岩浅埋微断面隧道 快速开挖综合施工技术

徐璐

(中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京 101500)

摘要: 通过中俄原油二线呼玛河隧道的工程实践,总结了富水圆砾石软弱围岩浅埋微断面隧道快速开挖综合技术,该技术利用改进的长螺旋钻机施作高压旋喷搅拌咬合排桩止水幕墙、高压旋喷搅拌桩+袖阀管注浆对松散圆砾石软弱围岩进行地表加固和止水补强,同时运用斜眼掏槽的光面水压爆破技术,采用扒渣机+小型农用自卸车组合出渣方式实现“软隧硬打”和微断面隧道的快速开挖。

关键词: 隧道;软弱围岩;富水;浅埋;微断面;快速开挖

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0147-05

随着隧道及地下工程建设的迅猛发展,三臂凿岩台车、移动仰拱栈桥、湿喷机械手等工装设备不断推陈出新,水压爆破、带模注浆等施工技术日趋成熟,针对浅埋、软弱围岩、断层破碎带、大变形等不良地质条件和高海拔、高纬度、高寒、富水等特殊环境下的隧道建造开发了一系列施工方案和技术措施。但不同隧道所处地理位置、地质条件和水文环境各不相同,施工中需克服的重点、难点也有很大不同。该文结合中俄原油二线呼玛河隧道工程,在无法使用大型工装设备的前提下,采用长螺旋高压旋喷桩咬合桩止水幕墙对高渗水性圆砾石、卵石地层进行止水,解决富水圆砾石地层中止水幕墙施工困难的问题;采用高压旋喷搅拌桩辅以袖阀管注浆技术对隧道洞口浅埋段进行地表加固,解决隧道浅埋、围岩软弱进洞安全的问题;采取斜眼掏槽水压钻爆技术解决微断面隧道临空面小、爆破效果差的问题;使用扒渣机+小型农用自卸车联合出渣,实现微断面隧道的快速开挖。

1 工程概况

呼玛河隧道位于黑龙江省塔河县,桩号为 K0+047.1—K1+517.7,总长 1 470.6 m。进出口斜巷长约 600 m,设计坡度 10%,为 3 m×3 m 微断面下穿河底长隧道。根据区域地质资料及现场调查结果,呼玛河河床底部多为砾石、卵石,其下为强风化花岗岩。其中进口段 K0+047.1—166.8、出口段 K1+442.2—517.7 分别为 VI、V 级围岩,长 195.12 m,占

隧道全长的 13.3%;IV 级围岩 443 m,占隧道全长的 30.1%;其余为 III 级围岩,占隧道全长的 56.6%。隧道进出口处顶部覆盖层厚度约 12 m,进口处地表厚 0~2 m 为腐殖土、粉砂,其下为厚度 8~15 m、最大粒径不大于 8 cm 的圆砾石和卵石,再往下为强~弱风化花岗岩。

2 项目特点及重点、难点分析

2.1 项目特点

- (1) 隧道穿越大型水域,且河床底多为圆砾石、卵石,渗透系数大,裂隙水丰富。
- (2) 隧道洞口覆盖层为厚约 12 m 的圆砾石、卵石堆积层,属于软弱围岩浅埋隧道。
- (3) 隧道断面尺寸仅 3 m×3 m,为微断面隧道,作业空间狭小。
- (4) 合同工期仅 12 个月,考虑施工准备及二次衬砌的影响,有效开挖时间不足 7 个月,工期紧张。

2.2 重点和难点

- (1) 隧道洞口位于废弃水塘中,且为浅埋软弱围岩,结构松散,施工中易出现垮塌,如何保证快速安全进洞是项目实施的重点。
- (2) 圆砾石和卵石具有高渗水性,渗水将加大隧道开挖难度,如何止水及止水效果好坏是隧道能否实现快速开挖的关键,隧道止水方案是项目的又一重点。
- (3) 微断面隧道受空间限制,大型工装设备无法使用,且隧道开挖、出渣、初期支护、二次衬砌无法

同步平行作业,设备选型及施工顺序安排是项目的第三个重点。

(4) 项目合同工期仅 12 个月,考虑施工准备期 2 个月、二次衬砌及附属工程(必须在隧道贯通后施工)3 个月,实际隧道开挖工期仅 7 个月。在双头掘进情况下每口每天平均进尺应不少于 3.5 m,而根据以往工程经验,Ⅵ、Ⅴ级围岩月进度指标一般为 35 m,进出口段共 195 m 施工时间将近 3 个月,严重影响隧道施工的总进度。且该隧道开挖断面小、作业空间狭窄、临空面较小,爆破夹制作用大,极易出现欠挖情况,特别是岩性较差的Ⅵ、Ⅴ级围岩段可能因控制不当出现较大超挖现象。因此,如何加强隧道洞口Ⅵ、Ⅴ级围岩自稳能力,采用科学合理的施

工方案、选择合适的工装设备,并利用简便有效的施工方法快速施工,提升效率,是项目成败的关键。

3 施工方案确定及实施

3.1 “软隧硬打”施工方案

经多方分析论证,确定如下“软隧硬打”施工方案(见表 1):隧道洞口圆砾石围岩段采用长螺旋高压旋喷搅拌桩帷幕注浆方案,并对洞顶及洞身外 3 m 范围内地表采用旋喷搅拌桩+袖阀管注浆进行加固处理,改善洞身四周围岩物理性能,增强围岩自稳能力;在隧道开挖时按照Ⅲ级围岩全断面钻爆开挖循环进尺控制,加速洞口段软弱围岩施工进度,确保项目总工期。

表 1 隧道止水方案优缺点对比及方案确定

方案名称	适用地层	优点	缺点	方案选择
钻孔灌注桩	软土、黏土、砂土;圆砾石、卵石层慎用	刚度大,变形小	桩间缝隙易透水,止水效果差	否
地下连续墙	各种复杂地质条件地层	刚度大,止水效果好	造价高,社会依托差(无大量砼供应)	否
钢板桩	软土、黏土、砂土	施工速度快	振动大,圆砾石地层施工困难,止水效果一般	否
普通高压旋喷桩	软土层;地下水流速过大地层不宜	振动小,噪音低,设备轻便	动力小,扭矩小,圆砾石地层成桩困难	否
长螺旋高压旋喷搅拌桩	黏土、砂土、圆砾石、卵石层	动力大,扭矩大,振动小,噪音低,成桩快	设备体积大、质量重,对作业空间有一定要求	是

3.1.1 长螺旋高压旋喷搅拌桩基坑止水

采用竖向高压旋喷搅拌桩对基坑进行止水,竖向旋喷搅拌桩封闭成环。旋喷搅拌桩采用 3 层结构,桩径 600 mm、间距 400 mm,施工至中风化基岩面以下 2 m,其平面布置见图 1。

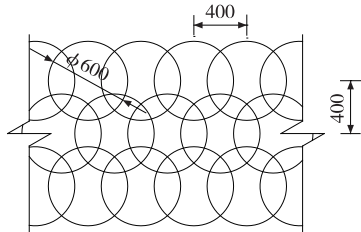


图 1 基坑止水旋喷桩平面布置示意图(单位:mm)

普通旋喷桩机由于动力不足、扭矩小等,在圆砾石、卵石层施工中往往出现打不进、钻不动、搅不动、喷不动、成本高、易塌孔等问题。因此,采用改进的长螺旋钻机(动力头最大输出扭矩在 40 kN·m 以

上,改装钻杆增加旋喷短节,同时改进调频装置),依靠双电机动头(2×55 kW)带动中空螺旋钻杆及单锥单螺截齿钻头切削成孔,水泥、水玻璃双液浆(体积比为 1:1)随着钻进通过旋喷短节上设置的 2~3 个喷嘴喷出,并与周围土体搅拌形成圆柱状固结体。又由于前后序桩施工完成后能相互咬合,可有效解决基坑止水防渗问题,同时对坑壁起到一定支护作用。基坑开挖后揭示,高压旋喷搅拌咬合排桩结构致密、成桩质量好,基坑内无涌水,坑壁无坍塌,止水效果显著。

长螺旋高压旋喷搅拌桩施工注意事项:1) 钻进过程中,压缩空气、水泥和水玻璃浆液经旋喷短节上的喷嘴形成高速喷射流束完成冲击、切削、破碎周边土体,并与土体进行充分搅拌,完成初次旋喷注浆+搅拌。2) 旋喷至设计标高后,只旋不进,将泵压增到施工设计值,坐浆 30 s 后按照 20 r/min 反向旋转,并以不大于 0.2 m/min 的速度提钻,同时高压泵

喷射 30~50 MPa 压力的浆液,并与 0.5~0.7 MPa 压缩空气共同作用完成土体切削、旋喷、搅拌、混合,最终完成二次旋喷高压注浆。注浆过程中高压旋喷作业不得停喷或中断,确保成桩连续、质量均匀。

3.1.2 洞顶高压旋喷桩地质改良及袖阀管注浆止水

为避免出现浅埋软弱围岩隧道塌方、冒顶现象,解决软弱围岩开挖进尺小、工效低等问题,采用竖向旋喷搅拌桩对进口圆砾地层进行注浆地质改良,桩径 600 mm、间距 500 mm,施工至中风化基岩面以下 2 m。同时对地质改良旋喷桩帷幕区域周边垂直钻孔进行袖阀管注浆堵水,注浆深度自地表下 1 m 至入中风化岩层 2 m,共设两环,梅花形布置,间距 1.5 m×1.5 m,浆液扩散半径 1.0 m。高压旋喷桩加固及袖阀管注浆止水设计见图 2、图 3。

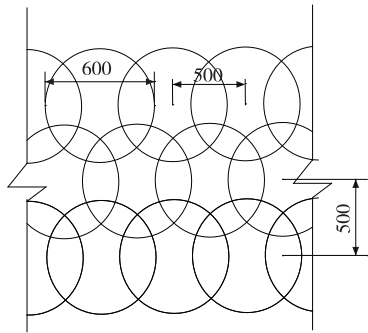


图 2 高压旋喷桩加固示意图(单位:mm)

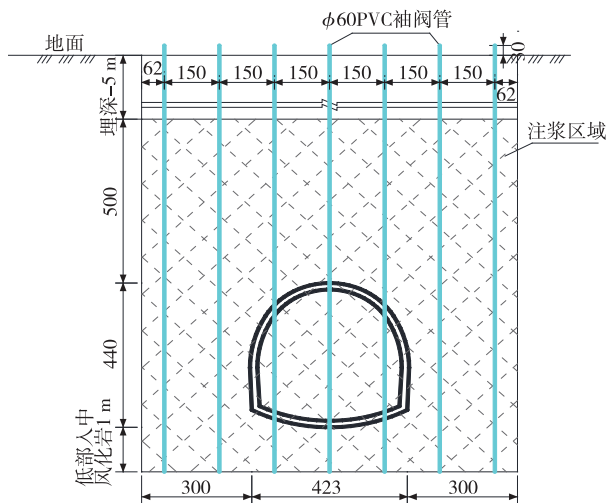


图 3 袖阀管注浆止水示意图(单位:mm)

洞顶高压旋喷桩进行地表加固的施工方法与高压旋喷桩基坑止水防护施工方法基本相同。在洞顶高压旋喷桩地表加固范围外侧采用袖阀管注浆对该区域可能存在的渗漏水部位进行补充加固,确保隧道开挖土层强度、自稳能力、隔水性能等得到加强。袖阀管注浆管采用 $\phi 48$ PVC 管,水泥采用 42.5# 硫铝酸盐双快水泥或 P.O.42.5# 普通硅酸盐水泥,水玻璃(硅酸钠)浓度为 40 Be' (施工中根据试验结果调至 30~35 Be'),模数为 2.4~2.8。袖阀管注浆主要技术指标见表 2。

表 2 袖阀管注浆的主要技术指标

项目	技术指标
普通水泥单液浆	$W : C = (0.6 \sim 0.8) : 1$
普通水泥—水玻璃双液浆	$W : C = (0.8 \sim 1) : 1; C : S = 1 : 1;$ 水玻璃浓度为 30~35 Be'
注浆压力/MPa	2~4
注浆顺序	先外环后内环,间隔跳孔施工
检查及评定标准	渗透系数不大于 10^{-5} cm/s

袖阀管注浆施工注意事项:1) 严格按制浆要求按顺序投料配制浆液,不得随意增减;严格按注浆参数进行施工,不得随意更改配合比;2) 为确保加固体的连续性,施工中严格执行分段长度,严禁超长、超速提升注浆管;3) 注浆压力从低到高逐渐加大,但不宜过高,达到设计注浆压力时即停止注浆,避免过多地扰动地层;4) 跑浆、漏浆现象严重时,可通过间歇注浆或调整浆液配比缩短凝胶时间进行封堵,若仍无效,则暂停该孔注浆,分析原因并采取其他措施进行处理。

螺旋高压旋喷桩及袖阀管注浆施工完成 14 d 后对桩的咬合部位进行钻孔取芯、标准贯入及注水试验,芯样直径 86 mm、长度 7~25 cm。加固施工前后地质特征对比见表 3。

3.2 扒渣机+小农用自卸车运渣方式出渣

隧洞初期支护完成后断面宽度仅 3.4 m,装载机与出渣车无法会车装渣,故采用适合于微断面隧道的 150 型液压电动扒渣机装渣、小农用自卸车运

表 3 高压旋喷桩加固施工前后地质特征对比

时间	岩心性状	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准贯入度/($\text{击} \cdot \text{cm}^{-1}$)
加固前	黄褐色,松散,圆砾石,饱水	$5.7 \times 10^{-2} \sim 3.5 \times 10^{-1}$	2.77
加固后	灰色,胶结致密,7~25 cm 柱状	$1.9 \times 10^{-5} \sim 2.4 \times 10^{-6}$	10.90

渣的方式。同时根据避车洞(原设计 500 m 一个)设置情况增设并改造成会车道,每 150 m 设置一处,长×宽×高为 12 m×3.0 m×3.5 m。在第一台车装渣期间,第二台车倒车至距掌子面最近一个避车洞等待,以减少倒车及装车时间。每循环人工出渣的平均时间为 7 h/(12 人),而采用液压装渣机后每循环出渣时间压缩到 3 h/(4 人),在时间、劳动力节省及工作强度降低方面均优于人工出渣,为加快施工进度发挥了重要作用。

3.3 斜眼掏槽水压光面爆破设计

高压旋喷搅拌桩+袖阀管注浆加固施工完成后,开挖揭示高压旋喷搅拌咬合排桩结构致密、成桩质量好,基坑内无涌水、坑壁无坍塌,止水效果显著;隧道开挖后拱部无支护时偶有小坍塌(1~5 m³),侧壁基本稳定;现场试验验证地层单轴饱和抗压强度>30 MPa,修正的围岩基本质量指标为 320~440。据此判断加固后圆砾石地层为硬岩,按照硬岩(Ⅲ级)进行钻爆设计。

3.3.1 Ⅲ级围岩钻爆设计

采用毫秒延时爆破,掏槽孔和周边孔的合理布置是取得理想光面爆破的重要条件,特别是小断面掏槽孔的布置。掏槽孔采用斜孔掏槽,分 3 排小间距布置,采取耦合连续装药,采用 I 段同时起爆。因间距较小,需确保钻孔质量。辅助孔共 19 个炮孔,采取不耦合连续装药,分两段(Ⅱ、Ⅲ段)起爆。底板孔及周边孔采用间隔装药,分两段(Ⅳ、Ⅴ段)起爆,孔内导爆索起爆。炮孔布置与掏槽方式见图 4、图 5。采用炮泥+水袋填塞,炮眼中的水袋在炸药爆炸的作用下会产生“水楔”效应,有利于围岩的进一步破碎,大大减少炸药能量消耗,提高炮眼利用率和隧道开挖经济效益。同时水袋在爆炸作用下产生雾化作用,可降低爆破后的粉尘浓度,减少爆破对环境的污染。爆破器材见表 4。

3.3.2 光面水压爆破参数

V 级、Ⅵ级围岩在地表加固后均采用全断面水压光面爆破控制技术,并按Ⅲ级围岩进行钻爆设计。根据现场实际情况,结合经验,选用 YT28 气腿式凿岩机钻孔,炮孔直径 38 mm;采用 $\phi 32$ RJ-2 乳胶炸药、多段位毫秒雷管进行网路设计。考虑到开挖断面小及围岩情况,设计开挖循环进尺为 2.2 m,炮孔深度为 2.5 m,掏槽孔加深 0.2 m。按表 5 进行装药控制,光面爆破参数见表 6。

按上述钻爆设计,在 V、Ⅵ级围岩地层加固段每

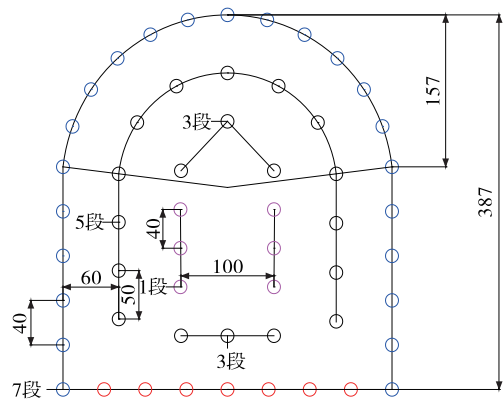


图 4 Ⅲ级围岩钻爆设计示意图(单位:cm)

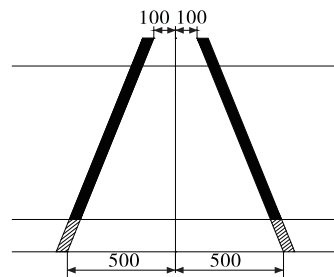


图 5 Ⅲ级围岩斜眼掏槽布置示意图(单位:mm)

表 4 爆破器材

爆破器材名称	规格	备注
RJ-2 乳胶炸药	$\phi 32 \times 200$ mm	有水地段,风动凿岩机钻眼
毫秒雷管	3~11 段	
导爆索	$\phi 5.7 \sim 6.2$ mm	周边眼用
塑料导爆索	$\phi 3.0$ mm	
水袋	$\phi 35$ mm,长 200 mm	厚 0.8 mm 聚乙烯塑料袋,不渗漏
炮泥	$\phi 35$ mm,长 300 mm	土:砂:水=0.75:0.1:0.15

表 5 Ⅲ级围岩装药参数

炮孔名称	孔深/m	孔数/个	单孔装药量/kg	总装药量/kg	备注
掏槽眼	2.7	6	0.81	4.86	底部 1 个水袋,
辅助眼	2.5	19	0.75	14.25	眼口 2 个水袋,
底板眼	2.5	7	0.75	5.25	眼口专用炮泥堵眼
周边眼	2.5	23	0.75	17.25	底、口各 1 个水袋,眼口专用炮泥堵眼
总计		55		41.61	

表 6 光面爆破参数

项目	参数值
周边眼间距 E/cm	40~55
周边眼抵抗线 W/cm	50~60
相对距离 E/W	0.8~0.85
装药集中度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	0.25~0.35

24 h 可完成 1.5~2.0 个工作循环,平均掘进进尺为 4.0 m 左右;在Ⅲ、Ⅳ级围岩地段每 24 h 可完成 2.0~2.5 个循环,每循环掘进进尺 5 m 左右。与加固前平均进尺 1.2 m/d 相比,隧道进口软弱围岩段掘进速度显著提高,节约工期将近 2/3。按该方法进行隧道开挖,围岩只发生少量弹性变形,无塑性流动变形、破坏和坍塌,偶有小掉块,拱顶下沉量在规范及设计要求范围内,自稳性良好。爆破后Ⅴ、Ⅵ级围岩地层加固段开挖面周边钻孔痕迹保存率达 75%,Ⅲ、Ⅳ级围岩地段周边钻孔痕迹保存率达 85%。

4 结语

富水圆砾石软弱围岩浅埋微断面隧道快速开挖综合技术的关键为:1) 通过改进的长螺旋钻机按照高压旋喷原理,通过旋喷+搅拌方式在原始圆砾石地层中形成咬合排桩幕墙结构体系,解决富水圆砾石地层条件下的止水问题,并满足防护体系受力要求,达到快速进洞条件。2) 应用竖向旋喷搅拌桩+外侧袖阀管注浆技术使原本松散结构的圆砾石地层形成较密实的钙质胶结致密整体或块状结构,改善隧道围岩的稳定性。加固后的Ⅴ、Ⅵ级围岩段按照Ⅲ级围岩进行光面水压爆破设计,实现“软隧硬打”,

解决进度缓慢的难题。3) 采用斜眼掏槽水压爆破技术解决炮眼深度受微断面限制及爆破夹制作用大、效果差、效率低的难题,提升钻爆效率,同时解决隧道内扬尘问题,实现微断面隧道的快速、环保施工。4) 采用 150 型电动液压扒渣机+小型农用自卸车组合出渣,并在微断面隧道中改造并增设避车洞形成会车道,解决洞内交通问题,减少循环作业时间,大幅度提高出渣效率。

参考文献:

- [1] 徐伟.水压爆破在铺子山隧道施工中的应用[J].公路与汽运,2014(3).
- [2] 李沛盈.软弱围岩浅埋隧道施工工法研究[J].东北水利水电,2016(1).
- [3] 陈发本,杨卓,黄德镛.考虑渗流场作用下的富水隧道稳定性影响因素分析[J].交通科学与工程,2013,29(3).
- [4] 张拥法.高寒冬季富水圆砾石地层长螺旋旋喷搅拌桩止水幕墙施工技术[J].市政技术,2018(2).
- [5] 杨兆仁.袖阀管注浆加固地层原理浅析[J].科技信息,2011(8).
- [6] 李得,杨溢,李睿,等.多级复式楔形掏槽在大断面隧洞掘进中的应用研究[J].爆破,2017,34(1).
- [7] 胡海英.小断面隧道施工关键技术[J].山西建筑,2009,35(17).
- [8] 李拉普.水压光面爆破在隧道掘进中的应用[J].铁道建筑技术,2009(5).
- [9] 张春涛.浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道施工动态过程研究[J].公路与汽运,2018(5).

收稿日期:2018-06-05

(上接第 77 页)

研究[D].西安:长安大学,2014.

- [9] 仰建岗,刘燕,林天发.玄武岩纤维沥青混凝土路用性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,40(1).

(上接第 146 页)

ground Space Technology,2005,20(3).

- [12] 林存刚,夏唐代,梁荣柱,等.盾构掘进地面沉降虚拟镜像算法[J].岩土工程学报,2014,36(8).
- [13] 施有志.双孔平行地铁隧道开挖的复变函数解析解与数值分析[D].泉州:华侨大学,2013.

- [10] 于斌.纤维沥青胶浆流变特性及纤维沥青混合料路用性能研究[D].西安:长安大学,2010.

收稿日期:2018-05-10

- [14] 韩凯航,张成平,王梦恕.浅埋隧道围岩应力及位移的显式解析解[J].岩土工程学报,2012,36(12).

- [15] 魏纲,徐日庆.软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J].岩土工程学报,2005,27(9).

收稿日期:2018-08-15