

文章编号: 1007-2993(2022)04-0323-06

# 超前自进式锚杆对断层角砾岩 隧道稳定性影响研究

王岩<sup>1</sup> 任东伟<sup>2</sup> 李涛<sup>2</sup> 陈代琨<sup>1</sup>

(1. 北京住总集团有限责任公司, 北京 100029; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 对于强风化断层角砾岩隧道, 超前支护时易出现卡钻及难以成孔等问题, 隧道开挖易引起掌子面坍塌, 造成安全隐患。为解决断层角砾岩隧道超前施工难题, 结合北京玉渡山隧道自进式中空注浆锚杆超前施工技术成功应用, 阐述了在断层角砾岩隧道施工中自进式中空注浆锚杆代替普通超前小导管作为超前支护的施工优点, 并结合现场情况建立了断层角砾岩隧道力学模型对围岩塑性区进行分析。通过分析得出: 合理增加断层角砾岩隧道初始支护强度可以一定程度上抑制隧道围岩塑性区的扩展, 提升围岩稳定性。针对该情况, 通过试验对比确定了自进式锚杆合理的支护参数与注浆压力。并根据掌子面开挖后超前支护效果验证了上述参数的合理性, 为同类地层提供参考依据。

**【关键词】** 超前支护; 断层角砾岩; 塑性区; 自进式锚杆

**【中图分类号】** TU 476

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.04.012

## Study on Stability of Advance Self-propelled Anchor Rod for Fault Breccia Tunnel

Wang Yan<sup>1</sup> Ren Dongwei<sup>2</sup> Li Tao<sup>2</sup> Chen Daikun<sup>1</sup>

(1. General Contract Department of Rail Transit and Municipal Engineering, Beijing 100029, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**【Abstract】** For heavily weathered fault breccia tunnel, advance support is prone to problems such as jamming and difficulty in forming holes, and tunnel excavation can easily cause tunnel face collapse, resulting in safety hazards. In order to solve the problem of advance construction in fault breccia tunnel, a successful application of self-propelled hollow grouting anchor rod advanced construction technology in Beijing Yudushan Tunnel was introduced, and the advantages of self-propelled hollow grouting anchor rod as advanced support in fault breccia tunnel instead of ordinary advanced small conduits was analyzed. It is concluded that a reasonable increase in the initial support strength of the fault breccia tunnel can inhibit the expansion of the plastic zone of the tunnel surrounding rock to enhance the stability of the surrounding rock. Combined with the field situation, the mechanical model of fault breccia tunnel was established to analyze the plastic zone of surrounding rock. The reasonable support parameters and grouting pressure for the self-propelled anchor rod were determined by test comparison. The reasonableness of these parameters was also verified based on the effect of the advanced support after excavation of the tunnel face, which provides a reference for similar strata.

**【Key words】** advanced support; fault breccia; plastic zone; self-propelled anchor rod

### 0 引言

在隧道施工过程中, 围岩性质及地质条件会发生变化, 松散破碎岩石地质条件下的隧道, 岩体空隙发育, 结构松散, 胶结力不足, 自稳能力差<sup>[1]</sup>。若工程处治不当, 掘进面易产生较大的坍塌和冒顶, 造成极大的安全隐患和经济损失。

超前支护是保证隧道施工安全的重要施工步骤

之一。目前围岩加固处治方法中, 常规采用超前小导管或自进式锚杆, 或常规管棚, 或无工作室管棚。但传统的超前小导管、管棚支护技术, 要求围岩有一定的自稳能力且能成孔, 不能有效满足松散堆积体和围岩风化破碎严重等复杂地层条件下隧道围岩控制的要求<sup>[2-4]</sup>。目前, 国内针对松散岩堆体及其类似地层条件下的隧道施工方案, 取得了一定的成果。杜国明<sup>[5]</sup>

**作者简介:** 王岩, 男, 1981年生, 汉族, 河南信阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事城市地下工程施工技术及管理工。E-mail: 4500820@qq.com

结合大河湾隧道自进式锚杆超前短管棚施工技术成功应用,阐述了自进式锚杆在松散破碎围岩下作为超前支护的优点。罗兴建<sup>[6]</sup>以福建某人防工程引水隧洞施工为例,介绍了自进式锚杆结合钢拱架支护处理隧洞塌方的成功方案。杨文平等<sup>[7]</sup>在浙江省道磐安段岗头隧道施工中,采用自进式锚杆加固软弱围岩的施工工艺,较好地解决了工程施工中的安全及质量问题。魏文阳<sup>[8]</sup>采用无工作室长管棚、自进式锚杆和小导管注浆综合处治隧道塌方冒顶病害。周杰<sup>[9]</sup>结合自进式锚杆在玄武岩松散堆积体中施工中的应用,总结了其工艺流程和施工要点。何玉龙<sup>[10]</sup>通过采用双层自进式锚杆进行预支护,使得云南大圆子隧道右洞顺利通过碎石堆积体地段,有效节约了施工工期,确保了进洞的安全。但目前的研究中关于断层角砾岩隧道施工建设的工程实例还比较少,且研究该岩性隧道的经验和理论也比较少。

基于此,以玉渡山隧道为依托,对其原设计方案进行改进,选用自进式锚杆进行超前支护<sup>[11]</sup>,并通过试验段超前支护效果确定自进式锚杆在断层角砾岩条件下的合理支护参数、注浆压力及相应的施工方法,提高围岩整体稳定性及力学性能,降低施工风险。

## 1 自进式锚杆的研究及应用

### 1.1 自进式锚杆介绍

自进式锚杆杆体采用良好的厚壁无缝钢管材料,钻杆及锚杆合而为一,锚杆前配有穿透力强的钻头(见图1),在一般凿岩机械的作用下,可以轻易穿透各类岩石,在风化岩、碎岩层、回填区、砂、黏土、园卵石层(软岩、土层、断裂带等)等不需套管护壁,即能形成锚孔<sup>[12]</sup>。钻杆的锚杆体无需拔出,其中空可作为注浆通道,从里至外进行注浆保证锚固与注浆效果,操作简便,快捷省时<sup>[13]</sup>。

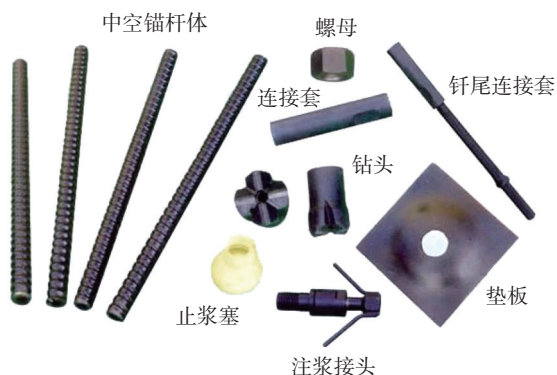


图1 自进式锚杆组成

连续的螺纹自进式中空锚杆可任意切割、连接,适合在狭窄的工作场地施工。同时,连续的螺纹使自进式中空锚杆比光滑的钢管具有更强的黏结阻力。

### 1.2 自进式锚杆研究历程

自进式锚杆注浆支护理念起源于1970年的奥地利,设计理念符合新奥地利隧道施工法中将锚杆和喷射混凝土组合作为主要支护手段的理论,且适应能力强,可保证在软弱、破碎围岩地层中的锚固效果。自进式锚杆于20世纪90年代初引入中国,经不断发展改进,已成功运用到我国地基与基础工程、边坡、隧道等多个岩土工程领域。

### 1.3 自进式锚杆工程应用情况

自进式锚杆主要用于复杂地层(断裂带、破碎带、软岩、土层等难以打钻成孔)条件下开挖支护施工,克服了普通砂浆锚杆在松散破碎围岩下诸如塌孔、插杆困难、注浆不饱满等难题,解决了管棚施工时的塌孔问题,能够保证复杂地质条件下的注浆效果,发挥锚杆支护的作用,提高围岩的承载能力,保证围岩的整体稳定,在水利水电、公路、铁路、隧道、城市地铁等多个行业中应用效果较好,已成为处理隧道塌方、冒顶、大变形等地质灾害的行之有效的常用工法。

## 2 自进式锚杆在隧道断层角砾岩实践

### 2.1 工程概况

延崇高速是北京冬奥会重点工程,玉渡山隧道洞口距延砢断裂边缘约30m,隧道进京线ZK16+415—ZK16+620段范围内发育6条断层,围岩为强风化断层角砾岩,岩体破碎,无自稳能力。按设计要求在断层角砾岩段采用小导管进行超前支护,实施过程中发现存在以下问题:该地层难以成孔、钻孔后钻杆拔出困难、拔出钻杆后因出现塌孔无法插入小导管,导致隧道开挖掌子面超前支护效果差,自进入该地层施工以来发生多次小塌方,导致施工安全风险增加、进度缓慢、成本增加,现场塌方如图2所示。

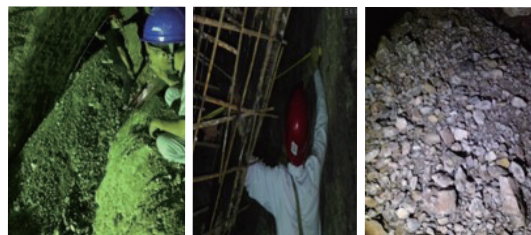


图2 隧道塌方现场图

为降低施工安全风险、加快施工进度、减少施工成本,改用自进式锚杆进行超前支护,选定隧道进京线ZK16+418—ZK16+528段进行试验性施工并对施工效果进行评定。

### 2.2 断层角砾岩粒径确定

岩石粒径分析是判别地质环境以及水动力条件的标志,也是隧道确定合理安全施工方法的重要参考。

如图3所示,在隧道进京线 ZK16+415—ZK16+620 段范围内,围岩在构造应力作用下破碎成角砾状,沿延积断裂面线性分布,伴生断层泥、碎裂岩,胶结疏松,多为泥质、钙质胶结,散体状结构,破碎一极破碎,无自稳能力,隧道穿越断层破碎带段定为V级围岩,主要为断层角砾岩。

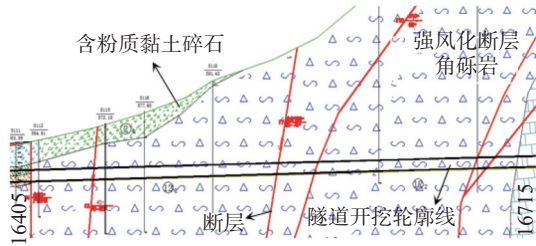


图3 ZK16+415—ZK16+620段纵断面图

为确定本隧道强风化断层角砾岩的粒径范围,选取塌方体处的塌落物进行筛分试验,通过大量筛分试验确定已施工段断层角砾岩粒径范围为5~60 mm,由此推断后续段落断层角砾岩粒径同样在此范围之内,断层角砾岩颗粒级配筛分曲线见图4。

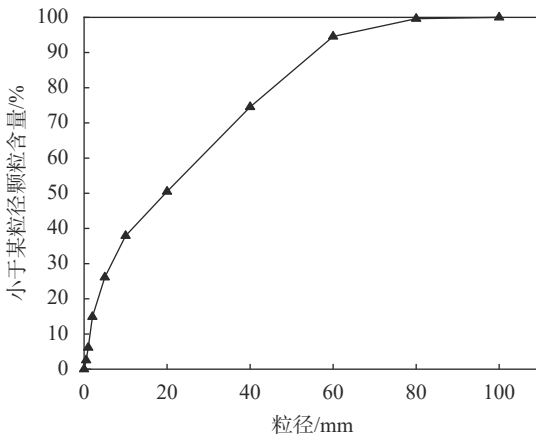


图4 断层角砾岩颗粒级配曲线

### 2.3 断层角砾岩隧道塑性区分析

根据弹塑性力学对断层角砾岩隧道塑性区范围进行分析。首先,根据现场情况建立隧道塑性区力学分析模型。如图5所示,选取角砾状岩石中半径为 $a$ 的圆形隧道,在无穷远处分布均匀压力场,围压为 $P_\infty$ ,在隧道边界处,施加正压力 $P$ 来模拟隧道的支护强度。并采用轴对称方式进行分析,模型中位移是径向的,岩体为各向同性、均匀的弹塑性介质。

当隧道半径为 $a$ ,塑性区的半径 $s$ 计算公式<sup>[15]</sup>如下:

$$s = a \left[ \frac{2p_\infty}{(k+1)p} \right]^{1/(k-1)} \quad (1)$$

式中: $k$ 为三轴应力因数; $\theta$ 为岩石内摩擦角,满足:

$$2k^{1/2} = (1+k)\cos\theta \quad (2)$$

解得

$$k = \frac{1 + \sin\theta}{1 - \sin\theta} \quad (3)$$

根据现场情况以及相关地质勘查资料,确定本隧道圆形等效半径 $a$ 为6.5 m,岩层初始参数 $\theta$ 为 $27^\circ$ ,由公式(3)可得 $k$ 为2.663,由公式(1)可获得塑性区半径 $s$ 与 $P/P_\infty$ 的关系曲线,如图6所示。

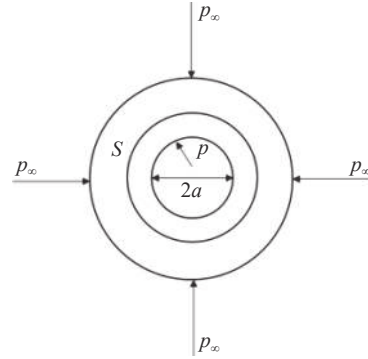


图5 断层角砾岩隧道力学模型

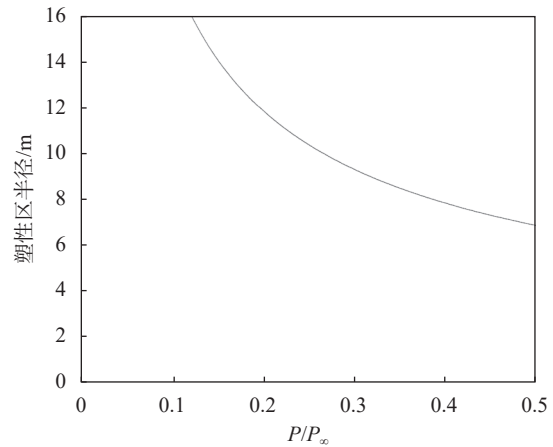


图6 塑性区半径 $s$ 与 $P/P_\infty$ 关系曲线

由于岩体出现塑性变形后围岩强度会随之降低,在松散破碎围岩条件下的隧道采用超前小导管支护容易出现塌孔,导致无法安装小导管,不能为后续注浆工艺创造条件,不利于提高围岩的物理力学性能。据图6,塑性区半径 $s$ 随隧道初始支护强度与初始原岩应力比值的增加而逐渐减低,且减低幅度随比值的增大逐渐减小并最终趋于平稳。合理增加隧道初始支护强度可以一定程度上抑制隧道围岩塑性区的扩展。因此采用自进式锚杆来抑制隧道围岩塑性区的扩展。

#### (1) 试验段自进式锚杆布置

如图7所示,试验段为标准断面,断面开挖尺寸为 $13.76\text{ m} \times 11.83\text{ m}$ ,自进式锚杆沿拱部 $120^\circ$ 范围内布置,每环49根,管径为25~51 mm,单根长度为3~6 m。锚杆外插角控制在 $10^\circ \sim 15^\circ$ ,若锚杆杆体外插角过大,注浆加固范围有限;若外插角太小,锚杆

钻进时存在施工空间狭小导致无法钻进情况。

如图8所示,锚杆打设顺序采用跳2孔打设施工,若采用跳1孔打设,相邻锚杆间距小、干扰大,注浆时容易串浆。

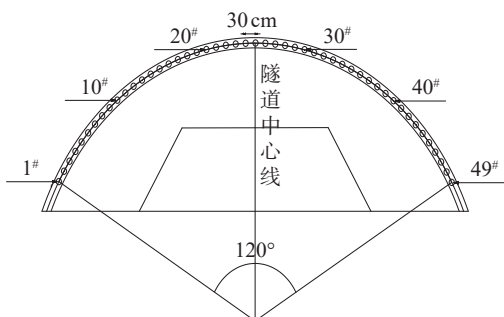


图7 自进式锚杆钻孔孔位布置示意图

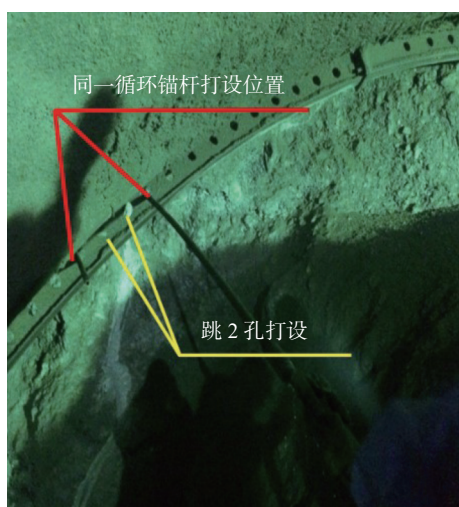


图8 自进式锚杆打设位置示意图

## (2) 施工工艺

如图7所示,上台阶掌子面120°范围内,自进式中空锚杆从钢架腹部穿过,测量放样出开挖轮廓线,在120°范围拱部钢架画出锚杆孔位置,用红漆喷点做上标记,并按顺序编号。

钻头对准已布设的锚杆孔红漆点,角度10°~15°,凿岩机与自进式中空锚杆轴线保持成直线。锚杆头外露长度不大于30 cm。

自进式锚杆搭设采用跳孔施工,跳孔施工一个循环后,及时注浆(按钢架上所设置的孔位顺序,先依次钻进孔1、孔4、孔7、孔10...,第一轮钻孔后及时注浆;然后依次钻进孔2、孔5、孔8、孔11...,第二轮钻孔后及时注浆,最后依次进行钻进孔3、孔6、孔9、孔12...,第三轮钻孔后及时注浆,完成整个自进式锚杆注浆加固),具体流程如图9所示。

## (3) 试验段锚杆支护参数试验

根据隧道施工现场实际情况、塌落物的粒径,以及类似工程的施工经验,自进式锚杆常用的管径、长度如表1所示。

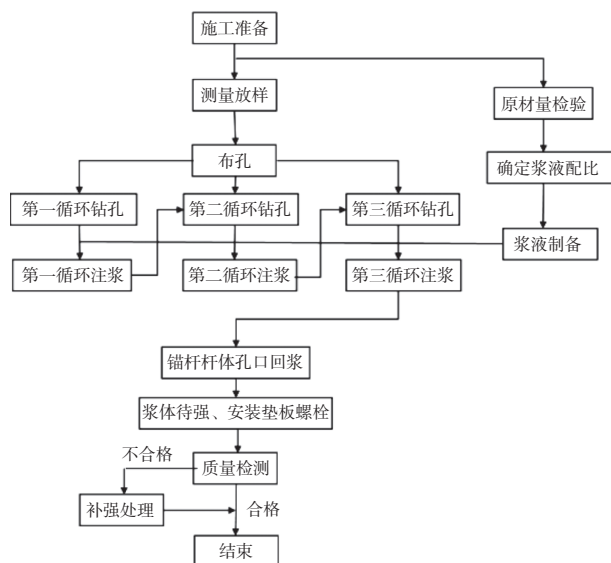


图9 自进式锚杆施工工艺流程图

表1 自进式锚杆常用管径、长度表

序号	管径/mm	长度/m	壁厚/mm
1		3	5
2	25	4	5
3		6	5
4		3	5
5	32	4	5
6		6	5
7		3	5
8	51	4	5
9		6	5

为验证不同型号自进式锚杆在现场施工过程中的可操作性,在试验段第一个断面上台阶钢拱架处选用不同型号的自进式锚杆打设两根,沿钢拱架拱面均匀分布打设,总计18根。

如图10所示,经现场试验发现 $\phi 25$  mm、 $\phi 32$  mm长6 m自进式锚杆因自重导致挠度变形较大,且钻进时受挤压作用力可看到杆体有明显弯曲变形,钻孔时抖动过大,不易控制,无法钻进。 $\phi 51$  mm自进式锚杆单个钻孔时间较长,且容易产生卡钻现象,调用履带式钻进机械则钻进功效低,因此排除长度为6 m的自进式锚杆和管径为51 mm的自进式锚杆。

综上所述根据试验断面钻进效果,决定在ZK16+418—ZK16+425试验段,采用以下4种试验方案进行施工。

方案(一)选用锚杆直径为25 mm,长度为3 m,纵向间距为1 m(分步开挖2榀,每榀0.5 m),环向间距0.3 m进行施工,单孔钻孔时间为2.5~3.2 min。



图 10 自进式锚杆打设试验现场图

掘进里程为 ZK16+418—ZK16+420, 用时 41.4 h, 共施工 2 个循环, 总进尺 2 m, 平均施工进度为 1.16 m/d。打设自进式锚杆过程中局部因超前注浆加固不到位, 掌子面开挖过程中出现塌方 2 次, 且循环用时长、功效低, 不满足每月进尺不小于 45 m 的施工进度要求。

方案(二)选用锚杆直径为 25 mm, 长度为 4 m, 纵向间距为 1.5 m(分步开挖 3 榦, 每榦 0.5 m), 环向间距 0.3 m 进行施工, 单孔钻孔时间为 3.3~4 min。掘进里程为 ZK16+420—ZK16+423, 用时 51 h, 共施工 2 个循环, 总进尺 3 m, 平均施工进度为 1.41 m/d。 $\phi 25$  mm 自进式锚杆在注浆时存在小部分堵管现象, 注浆效果不能达到扩散要求, 掌子面开挖时拱部有掉渣现象, 过程中出现塌方 2 次。

方案(三)选用锚杆直径为 32 mm, 长度为 3 m, 纵向间距为 1 m(分步开挖 2 榦, 每榦 0.5 m), 环向间距 0.3 m 进行施工, 单孔钻孔时间为 2.5~4 min。掘进里程为 ZK16+423—ZK16+425, 用时 32.5 h, 共施工 2 个循环, 总进尺 2 m, 平均施工进度为 1.48 m/d。施工过程中出现拱部掉块、局部小规模坍塌产生空洞, 自进式锚杆上部载荷堆积导致杆体出现较小的挠度变形。掌子面开挖过程中共出现塌方 4 次, 开挖风险高, 坍塌处需进行喷射混凝土封闭, 再进行注浆回填, 从而导致功效降低、成本增加。

方案(四)选用锚杆直径为 32 mm, 长度为 4 m, 纵向间距为 1.5 m(分步开挖 3 榦, 每榦 0.5 m), 环向间距 0.3 m 进行施工, 单孔钻孔时间为 3.5~5 min。掘进里程为 ZK16+425—ZK16+428, 用时 48 h, 施工 2 个循环, 总进尺 3 m, 平均施工进度为 1.5 m/d。现场开挖注浆效果良好仅有少许碎石滑落, 未见塌方, 可保证施工进度要求。

根据 4 组试验, 得出采用  $\phi 32$  mm 自进式锚杆, 长度 4 m, 环向间距 30 cm, 纵向间距 1.5 m, 每榦开挖间距 0.5 m 最为合适。

#### (4) 注浆压力与浆液配比

##### ① 注浆压力试验

合理的注浆工艺是实现注浆目的保证。在综合考虑安全、造价、工程进度、施工便利性四个方面因素的前提下, 通过试验来确定合理的注浆压力。

如图 7 所示, 在每环自进式锚杆注浆过程中, 根据钻孔孔位编号分别采用 1、4、7…、2、5、8…、3、6、9…三个循环进行注浆, 注浆浆液选用水泥浆, 水:水泥=1:1(质量比), 注浆压力从 0.5~1.0 MPa、1.0~1.5 MPa、1.5~2.0 MPa 三个范围中选取, 终压时间相同均为 2 min。

第一组循环(0.5~1.0 MPa), 平均每根锚杆注浆量为 0.11 m<sup>3</sup>, 平均注浆时间为 11.8 min, 由于注浆压力最低, 浆液使得钻孔近距离的裂隙快速“闭合”, 浆液扩散受到抑制, 导致锚杆注浆时间最短, 注浆量达不到设计注浆量(0.14 m<sup>3</sup>)。

第二组循环(1.0~1.5 MPa), 平均每根锚杆注浆量为 0.18 m<sup>3</sup>, 平均注浆时间为 12.3 min, 注浆量略超过设计注浆量(0.14 m<sup>3</sup>), 注浆时间较短。

第三组循环(1.5~2.0 MPa), 平均每根锚杆注浆量为 0.21 m<sup>3</sup>, 平均注浆时间为 15.7 min, 由于注浆压力较高, 浆液使得钻孔的裂隙快速“张开”, 使得浆液向远处裂隙扩散, 导致锚杆注浆量的增大, 注浆量超过设计注浆量(0.14 m<sup>3</sup>)。

三组试验注浆量、注浆时间统计见图 11, 综合比较得出注浆压力在 1.0~1.5 MPa 时最为合适。

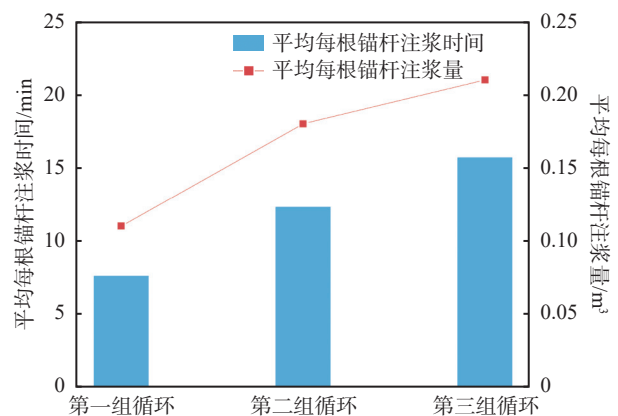


图 11 试验段锚杆的注浆量、注浆时间统计图

##### ② 浆液配比

为缩短注浆浆液初凝时间, 首先要适当提高水泥的强度等级并增加水泥的用量, 其次需加入合适的外加剂(速凝剂等)。试验段利用制作的注浆浆液样本进行试验(见表 2), 通过与表 3 注浆浆液规定标准试验数据相比, 注浆浆液在比重、结实率、稠度、初凝时间方面均达到了相关要求。

表2 现场注浆浆液试验数据表

试验项目	浆液比重/(kg·l <sup>-1</sup> )	结实率/%	稠度/mm	初凝时间/h
试验数据	1.60	93	10.3	6.2

表3 浆液实验数据规定标准

试验项目	浆液比重/(kg·l <sup>-1</sup> )	结实率/%	稠度/mm	初凝时间/h
试验数据	1.55~1.65	≥90	9~11	6~8

### 3 采用自进式锚杆施工与小导管施工的效果对比

玉渡山隧道在原方案中采用小导管进行超前支护,因钻孔完成后容易塌孔造成小导管无法插入,进而导致无法对前方围岩进行有效注浆加固,造成掌子面开挖时产生大量塌方。

在ZK16+428—ZK16+528段,依照“超前支护采用 $\phi 32$  mm自进式锚杆,长度4 m,环向间距30 cm,纵向每三榀打设一环,外插角 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,注浆压力1.0~1.5 MPa,注浆浆液采用水泥浆(质量比水:水泥=1:1)”进行超前支护施工时,拱顶最大沉降最终稳定在8 mm左右,周边最大收敛最终稳定在7~8 mm,围岩加固效果良好(见图12)。根据施工段统计数据得到平均每10延米塌方量的实际控制值为6.9 m<sup>3</sup> 低于预期目标值的10 m<sup>3</sup>,符合控制标准。



图12 自进式锚杆开挖实施效果图

改进方案实施前后隧道施工塌方量差异明显,由最初的平均每10延米塌方32.3 m<sup>3</sup>降低至6.9 m<sup>3</sup>,由此可知采用自进式锚杆可以有效加固前方围岩,降低施工风险。综上所述,玉渡山隧道断层角砾岩段采用自进式锚杆超前支护参数合理可行,达到了预期的围岩控制目的与施工要求。

### 4 结论

(1)通过对断层角砾岩隧道塑性区分析得到:断层角砾岩隧道塑性区半径随隧道初始支护强度与初始原岩应力比值的增加而逐渐减低,且减低幅度随比值的增大逐渐减小并最终趋于平稳。合理地增加断层角砾岩隧道支护强度可以有效抑制隧道塑性区扩展,保证施工安全。

(2)经工程实践,对于粒径范围5~60 mm的强风化断层角砾岩隧道,采用自进式锚杆代替超前小导管进行超前支护,可以有效解决超前小导管塌孔,插杆困难、无法对隧道前方围岩进行有效注浆加固等难题。突显自进式锚杆的优越性,保证了隧道工程本身质量及安全。

(3)通过玉渡山断层角砾岩隧道实验段施工效果对比,在粒径在5~60 mm的断层角砾岩隧道施工中,采用长4 m、直径 $\phi 32$  mm的自进式锚杆,环向间距30 cm,纵向间距1.5 m,注浆浆液选用水泥浆,注浆压力选用1.0~1.5 MPa,进行施工最为合适。此方案能够有效减少隧道塌方,控制隧道围岩变形,为同类条件隧道超前支护方案提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 崔博. 自进式锚杆在隧道不良地质段施工中的应用[J]. 山西交通科技, 2014, (6): 71-73.
- [3] 张航,彭雪峰,周扬,等. 松散岩堆体地层下城市隧道洞口段施工方案变更合理性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S1): 265-275.
- [4] 史东志,王建光,乌呢日. 自进式锚杆在松散堆积体隧道施工中的应用[J]. 铁道勘察, 2014, 40(3): 79-81.
- [5] 杜明国. 自进式锚杆超前短管棚施工技术[J]. 铁道标准设计, 2005, (7): 83-84.
- [6] 罗建兴. 自进式锚杆在隧洞塌方处理中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2011, 47(2): 54-55.
- [7] 杨文平,郁存正,张根法. 自进式中空注浆锚杆在软弱围岩中的应用[J]. 四川建筑, 2006, (6): 74-75.
- [8] 魏文阳. 无工作室长管棚与自进式锚杆组合处治隧道洞顶塌陷分析[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 246-250.
- [9] 周杰. 自进式锚杆在玄武岩松散堆积体隧道中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(24): 82-83.
- [10] 何玉龙. 双层自进式锚杆在碎石堆积体隧道中的应用[J]. 公路, 2019, 64(1): 295-299.
- [11] 张利娜,李晋宝. 自进式中空注浆锚杆在砾岩层中的应用[J]. 市政技术, 2011, 29(5): 99-101.
- [12] 陈二平. 自进式锚杆在隧道超前支护中的应用[J]. 价值工程, 2014, 33(10): 143-145.
- [13] JTG/T 3660—2020 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [14] 邹胜勇,傅善俊,寿忠华. 自进式中空注浆锚杆在隧道围岩支护中的应用[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2010, 11(1): 17-19.
- [15] 张继华,王连国,朱双双,等. 松散软岩巷道围岩塑性区扩展分析及支护实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 433-438.