

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.050

# 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

魏文阳

(湘西土家族苗族自治州交通科学技术研究院,湖南 吉首 416000)

**摘要:**隧道围岩软弱松散、自承能力差时掘进面易发生塌方冒顶,甚至引起地面塌陷形成漏斗。根据经验一般采用长管棚进行支护,但施工中发现成孔困难,管棚前支点不稳定,为了解决相关难题,该文结合某工程实践,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,施工过程中对施工参数进行了优化,并对其加固后的围岩进行数值模拟计算和开挖过程的监控量测,结果表明该方法安全、经济,可行,具有很好的应用推广价值。

**关键词:**无工作室长管棚;自进式锚杆;隧道塌方冒顶;数值模拟;处治方案

## 1 前言

隧道开挖中,围岩性质及地质条件发生变化,岩质由硬变软,或出现破碎带、软弱带等不良地质情况时,围岩的自承能力差,掘进面易发生塌方冒顶,甚至引起地面塌陷形成漏斗,工程处治不当就会造成诸多安全隐患和重大经济损失。

国内外许多学者在隧道洞顶塌陷病害处治技术等方面进行了诸多研究,取得了一定的成果。史东志等介绍了自进式锚杆的施工技术原理、施工工艺流程和自进式锚杆的特点及适用范围;魏杰阐述了在穿越松散塌方体时用大直径自进式锚杆作为管棚,配合超前小导管注浆的超前支护方案;付重君探讨了某隧道地表凹陷与洞内坍塌的成因,针对洞内坍塌情况,分段采取注浆加固、超前管棚、弧形预留核心土分楸开挖等措施进行处理,在地表凹陷处浇筑3 m混凝土护拱、并用片石回填、黏土封顶的处理方案;柳长奔以齐岳山隧道为例,介绍了无工作室管棚技术在隧道超前支护施工中穿越断层复杂地质段的应用,论证了该技术与常规管棚施工相比的技术可行性、经济合理性;敖贵勇等以彭水摩围山隧道工程为背景,介绍了无工作室管棚在处理岩溶地区块石土地层隧道掌子面及地表坍塌中的应用,剖析了该工艺的工序和技术要点,论证了该技术在处理坍塌等情况下的优越性;王晓星、杨志强通过理论分析、现场试验和数值模拟,对大跨度土质隧道围

岩和支护结构的受力与变形状态以及监控量测数据进行了分析;刘艳明以石牛岭隧道为背景,结合现场观测状况及监控量测数据对造成塌陷的原因进行分析,并采用曲线拟合的方法分析监控数据,对隧道围岩未来的发展趋势进行预测,初步推断出地下水与地表水是造成塌陷的重要原因,提出了具体的处理方案;王江飞以具茨山隧道为背景,对超前管棚配合小导管改良土体、用径向小导管注浆加固塌方体处理方案数值模拟分析,检验处理方案中结构的可靠性;张龙重等运用多物理场耦合模拟软件对典型断面进行流固耦合数值计算,定量分析了富水软弱围岩隧道塌方过程中围岩和支护结构的应力、位移以及渗流场响应特征,研究了塌方发生机理,提出了塌体稳固、塌方影响段加固、塌方情况物理探测、管棚支护参数设计、塌方段洞内管棚注浆支护、短开挖强支护的综合治理技术措施。但以上研究采用自进式锚杆与管棚联合处治洞顶塌陷的文献相对较少,该文结合秀吉隧道洞顶塌陷病害工程处治成功案例,探讨采用自进式锚杆深孔预注浆加固围岩配合无工作室长管棚跨越塌陷区的方法在实践中的应用价值。

## 2 工程概况

秀吉隧道为湖南保靖秀沙至吉首二级公路改建工程中新建双向两车道隧道工程,隧道平面位于直线上,里程桩号为K4+195~K5+005,长度810 m,为中隧

收稿日期:2020-11-25

作者简介:魏文阳,男,大学本科,高级工程师, E-mail:1059592236@qq.com

道,纵坡为 $-1.803\%$ ,隧道最大埋深为 $240.05\text{ m}$ 。隧道净空限界净宽 $9.0\text{ m}$ 、净高 $5.0\text{ m}$ ,内轮廓采用三心圆曲边墙结构形式。进口为端墙台阶明洞,长 $3\text{ m}$ ,出口为端墙式普通明洞,长 $16\text{ m}$ 。隧道围岩分级见表1。

表1 隧道围岩分级参数

里程桩号范围	长度/m	围岩分级/级
K4+195~K4+880	685	IV
K4+880~K4+930	50	V
K4+930~K4+975	45	IV
K4+975~K5+005	30	V

### 3 洞顶塌陷病害及原因分析

#### (1) 洞顶塌陷病害

隧道施工过程中K4+917处掌子面最先出现拱顶渗水,继而出现小范围的冒顶,随后冒顶速度加快,最终导致地面塌陷形成一倒圆锥形漏斗,洞顶塌陷坑深度约 $15\text{ m}$ ,坍塌总体积约 $5\ 000\text{ m}^3$ 。洞顶塌陷将部分超前小导管冲压弯曲损毁,坍塌体在隧道内向隧道出口方向涌入约 $48\text{ m}$ (至K4+965处,已施工的二衬

端头),并在隧道前进方向右侧(板房区) $25\text{ m}$ 范围内形成了多条地表裂缝。

#### (2) 洞顶塌陷原因分析

秀吉隧道K4+917塌陷区附近,洞顶围岩从上而下为碎石、泥质白云岩;拱顶围岩主要为碎石层,泥质白云岩围岩厚度极薄(拱顶厚度为 $1.53\sim-0.29\text{ m}$ );碎石层 $20\text{ mm}$ 粒径以上粗颗粒占 $60\%$ ,细颗粒主要为粉质黏土,颗粒之间较松散,围岩自承能力差,在掌子面施工期间连续强降雨和地下水作用下诱发了该次不良地质灾害。

### 4 工程处治方案比选

根据塌陷病害的位置、规模、地质条件及成因,工程处治方案有明挖、地表注浆、洞内加固围岩等方法,其中洞内加固围岩处治方案中,超前支护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。

秀吉隧道洞顶塌陷处治经过对明挖、地表注浆、洞内加固围岩(超前支护采用无工作室长管棚与自进式锚杆组合方案)共3个工程处治方案进行经济技术比较,工程实施采用方案3(推荐方案),方案比较见表2。

表2 隧道顶塌陷工程处治方案比较

方案	工程处治 方案要点	处治范 围/m	工程方案 主要优点	工程方案 主要缺点	工程造 价/万元	方案比 较结论
方案1: 明挖	① 对塌陷漏斗区明挖;② 拆除已施工的上导坑 $5\text{ m}$ ;③ 施工明洞(加厚);④ 明洞顶回填	长度 $42$	暗洞变为明洞施工	① 高边坡分级开挖后需临时边坡支护;② 工期长、费用相对高	$2\ 166.723\ 4$	
方案2: 地表 注浆	① 洞外地面处治;② 地表 $\phi 108\times 6\text{ mm}$ 钢花管注浆补强,钢花管间距 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 梅花形布设	长度 $40$ , 宽度 $22$	① 注浆钢花管可起到地表锚杆悬挂岩土体的作用,防止塌方冒顶;② 缩小围岩松弛区范围,提高隧道围岩自稳性	① 注浆加固半径为隧道开挖半径的 $2\sim 3$ 倍,注浆工作量大;② 注浆孔较深,难以准确掌握松散体浆液渗透、扩散情况;③ 工期长、费用相对较高	$1\ 823.361\ 9$	
方案3: 洞内加 固围岩	① 洞外地面处治;② 洞内分循环自进式锚杆+无工作室长管棚注浆加固围岩超前支护	长管棚 长度 $39.3$	① 围岩注浆加固,整体稳定性增强,确保施工安全;② 管棚超前支护和注浆管双重作用,跨越能力大;③ 工期短;④ 投资相对较低	需要多个循环才能跨越碎石松散围岩段	$1\ 441.505\ 4$	推荐 方案

## 5 洞顶塌陷处治方案设计

### 5.1 总体方案

遵循治塌先治水、治塌先加强的原则,采取临时支护和永久性支护综合处治方案,临时支护是为了防止塌方继续发展,永久支护是为了安全度过塌陷区和松散软弱围岩区。

隧道洞顶塌陷病害发生在洞身段,围岩以碎石松散体为主,永久工程采用综合工程处治方案,长管棚超前支护作为支撑结构跨越碎石围岩区,为确保超前支护工程不侵界,采用无工作室方案;为实现长管棚成孔,采用超前自进式锚杆深孔预注浆加固碎石松散围岩;再采用小导管注浆加强,确保围岩注浆体密实,提高围岩强度与稳定性。

### 5.2 工程处治范围确定

K4+894 处洞顶围岩岩层厚度约为 2.42 m(根据工程地质勘察资料推测),以此位置作为长管棚最后一环打入点,管棚前段伸入至稳定岩层(约 K4+885 处,此处洞顶围岩岩层厚度约 9.7 m);洞内临时钢桁架的中间位置(K4+924.3 处)作为长管棚的后支承点起点,长管棚超前支护长度约为 39.3 m。

为确保长管棚有后支承点,并确保后支承位置临时钢桁架的稳定性,方便长管棚施工,临时钢桁架长度设计为 10 m(K4+919.30~K4+929.30)。

超前自进式锚杆自 K4+922.8 开始施作,K4+901 处(根据工程地质勘察资料推测此处洞顶围岩岩层厚度为 0.11 m)作为自进式锚杆最后一环打入点,自进式锚杆前端伸入至 K4+895.2 处(根据工程地质勘察资料推测此处洞顶围岩岩层厚度约为 0.89 m,此处灌注浆液后管棚已能成孔),自进式锚杆超前支护长度约为 27.6 m。

### 5.3 临时支护方案

#### 5.3.1 洞内塌方处理

清除洞内塌方体至 K4+919 掌子面处后,喷射厚 10 cm 的 C20 混凝土对掌子面土体进行封闭,再采用长 2 m  $\phi 42$  mm $\times$ 3.5 mm 注浆小导管对坍塌体进行灌注水泥浆加固,确保掌子面稳定。

#### 5.3.2 洞内初支已施工段临时加固

锚杆的后支点位置,原施工的初支工程没有考虑承载塌陷段锚杆固结环及其上岩土体荷载。K4+919.30~K4+929.30 段(10 m 长)临近塌陷区已完成初期支护的上导坑内壁增设间距为 0.5 m 的 18# 工字

钢临时拱架支撑,增设间距为 0.5 m 的 3.5 m 长  $\phi 42$  mm $\times$ 3.5 mm 注浆小导管对临近塌陷区已完成段的上导坑拱部和侧壁进行注浆加固处理,共 21 环,作为洞内无工作室长管棚超前支护杆件后端受力支点和确保处理塌陷段施工作业人员安全作业的洞室。

待塌陷段上导坑施工完毕后拆除临时钢支撑,并对影响二次衬砌空间的杆件进行割除,以确保超前支护杆件不侵界。

### 5.4 永久支护方案

#### 5.4.1 洞外地面处治

对塌陷影响区周围松散的地表进行清除,设置截水沟;对塌陷漏斗影响区拱顶塌陷体及松散碎石层清除至隧道拱顶 5 m 以上位置,对地基土进行压实,然后采用 1.5 m 厚 5% 水泥稳定碎石+8.5 m 厚外借普通土进行分层压实回填至地表,回填压实完成后在回填体周围设置截水沟,并与已施工的截水沟连接成一个完整排水系统。确保塌陷影响区地表不积水,避免因积水影响塌陷区工程处治施工安全。

#### 5.4.2 洞内工程处治方案

##### (1) 分循环超前自进式锚杆

碎石围岩松散,长管棚处治施工钻孔易塌孔,管棚成不了孔,利用自进式锚杆钻孔、注浆锚杆一体化、锚杆不需拔出的特点,采用自进式锚杆深孔预加固围岩,为长管棚的施工创造条件。

K4+895.2~K4+922.8 段采用双层 6 m 长  $\phi 51$  mm 超前自进式锚杆沿隧道开挖掘进方向呈 30°~15° 布设,超前自进式锚杆最后一环打入位置为 K4+901,纵向间距为 3.0 m,共 8 环,每环设置范围为衬砌中线两侧各 60° 区域,锚杆注浆扩散半径为 0.5 m,环向间距为 0.5 m,然后进行注浆处理。超前自进式锚杆设计图如图 1 所示。

由图 1 可知:超前自进式锚杆施工时,锚杆与衬砌中线平行,上、下层锚杆分别以 30°、15° 仰角锚入拱部围岩;自进式锚杆遇初期支护安装的钢桁架时,在钢桁架上打孔穿过。第 1 环锚杆尾端支承在钢桁架上,锚杆注浆采用水泥浆液+水玻璃双液浆。

##### (2) 分循环洞内无工作室长管棚

K4+885~K4+924.3 段采用 9 m 长  $\phi 108$  mm $\times$ 6 mm 洞内长管棚支护,长管棚最后一环打入位置为 K4+894,纵向间距为 3 m,共 11 环,每环设置范围为衬砌中线两侧各 60° 区域,环向间距为 0.4 m。同时为防止长管棚之间有大掉块,在 K4+899~K4+905 段长管棚之间采用 6 m 长  $\phi 42$  mm $\times$ 3.5 mm 注浆小

导管对围岩进行注浆加强,纵向间距为3.0m,共3环,环向间距为0.4m。注浆加固采用水泥浆液+水玻璃双液浆。洞内长管棚设计图如图2所示。

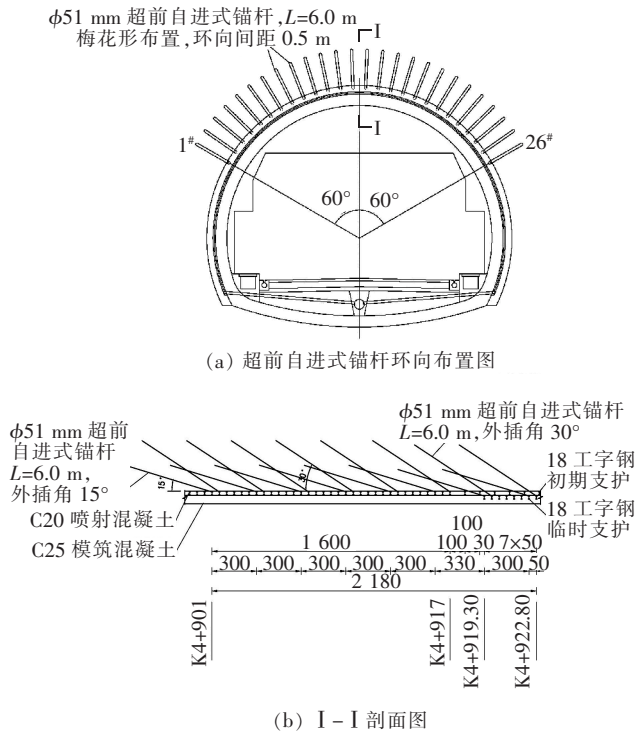


图1 超前自进式锚杆设计图

(除里程桩号单位为m外,其余:cm)

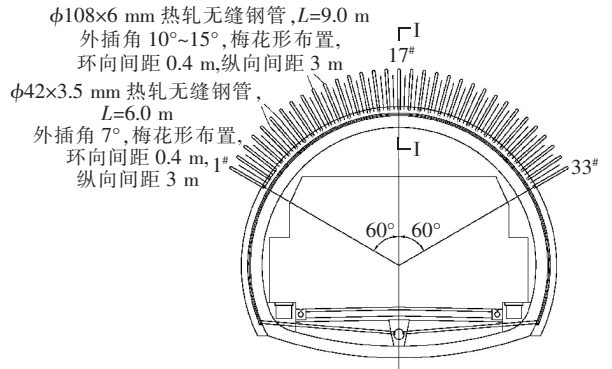
由图2可知:洞内长管棚施工时,管棚与衬砌中线平行,管棚外插角为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ;管棚遇初期支护安装的钢桁架时,在钢桁架上打孔穿过。第1、2环管棚尾端支承在钢桁架上。

采用管棚注浆法进行超前预加固围岩,管棚沿隧道开挖轮廓周边布设形成加固圈,加固圈起到承载拱的作用;管棚前端伸入较为稳定围岩中,后端支承于钢桁架上,形成稳定的简支梁支撑结构。

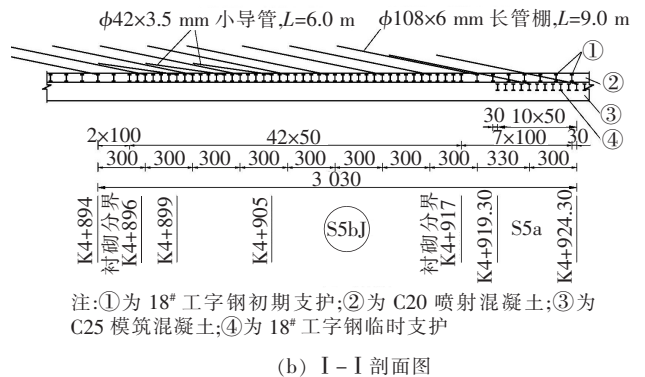
## 6 处治后隧道围岩数值模拟

### 6.1 单元的选取

选用 Ansys 提供的 Solid186 单元模拟围岩、开挖土体以及锚杆加固部分,采用映射网格划分赋予单元不同的属性。Ansys 提供的 DP 模型是一种理想的弹塑性模型,可以通过输入与实际相对应的黏聚力、摩擦角和膨胀角模拟围岩情况。选用 Shell63 单元模拟初期支护,通过设置实常数确定初期支护厚度。应用“生、死单元”命令和时间步进行隧道施工阶段模拟。围岩两侧施加水平约束,围岩底部节点全部施加约束。

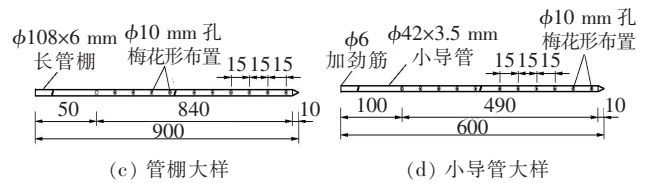


(a) 洞内长管棚与超前小导管环向布置图



(b) I-I 剖面图

注:①为18#工字钢初期支护;②为C20喷射混凝土;③为C25模筑混凝土;④为18#工字钢临时支护



(c) 管棚大样

(d) 小导管大样

图2 洞内长管棚设计图

(除里程桩号单位为m外,其余:cm)

### 6.2 三维有限元模型建立

根据夯吉隧道塌方的实际情况,采用 Ansys 有限元软件进行数值建模分析。在实际模型中,根据圣维南原理,开挖只在洞周围一定范围内引起应力重分布,实践和理论分析表明,应力重分布范围为洞室周围中心点3~5倍开挖宽度(或高度),在该模型中取3倍开挖宽度,该隧道宽度为9m,所以模型的总宽为63m,隧道上方则按照实际地形设置到地表面。其长度方向取塌方区主要加固长度30m。其加固层厚度根据实际加固设计方案,以管棚插入高度为加固层厚度,在模型计算中取2m。

### 6.3 设计参数选取

依据工程地质报告、设计资料以及 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范》,选取的围岩物理、力学参数如表3所示。

为了模拟管棚和注浆的作用,将管棚作用范围内

表 3 围岩、支护结构物理参数

材料名称	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性		内摩		黏聚 力/ kPa
		模量/ GPa	泊松比	擦角/ ( $^{\circ}$ )		
V级围岩	24	1.5	0.35	35		100
加固区	24	2.6	0.35	35		100
喷射混凝土	24	15.0	0.20	—		—
锚杆	78	210	0.25	—		—

加固层厚度的材料参数提高 75%，而塌方段的岩层虽然进行了加固处理，但为了安全考虑，在计算模拟中全看作荷载，荷载由隧道的初次衬砌全部承受。

#### 6.4 分析结果

在模型中，通过生死单元模拟隧道的开挖过程，每次向前开挖进尺 1 m，共分为 31 个施工阶段，进行最后一个施工阶段开挖后，拱顶最大下沉为 2.35 cm，远小于设计允许变形量 12 cm，通过软件计算，初步确定此加固方案可行。

### 7 处治效果施工监测数据比较

在工程处治施工过程中，对处治段多个断面的变形进行了连续监控量测，选取发生塌陷部位 K4+915 断面监测数据进行分析，拱顶沉降及周边收敛变化时态曲线如图 3、4 所示。

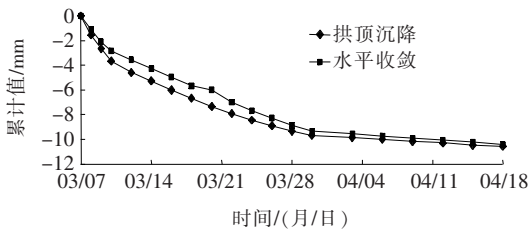


图 3 K4+915 拱顶沉降及水平收敛变化曲线图

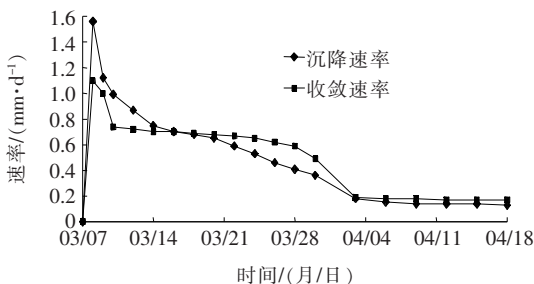


图 4 K4+915 拱顶沉降及水平收敛速率变化曲线图

从图 3、4 可以看出：塌陷段处治施工过程中，拱顶沉降与周边收敛变化趋势基本一致。工程处治施工 6 d 后，拱顶沉降与周边收敛值均在允许范围内，围岩变形处于缓慢变化状态；28 d 后拱顶下沉与周边位

移速率均小于 0.2 mm/d，围岩变形基本稳定。最终拱顶沉降 10.56 mm，周边位移 10.41 mm，均小于规范允许变形量。监测结果表明：对隧道洞顶塌陷采用无工作室长管棚与自进式锚杆组合超前支护处治方案，技术措施合理，处治效果良好。

### 8 结论

合理选择处治隧道塌陷方案，不仅可以减少工期、节约造价，更能保障作业人员的安全和结构安全。该文隧道采用无工作室长管棚与自进式锚杆组合处治隧道洞顶塌陷，实践证明安全可靠有效。研究得到如下结论：

(1) 自进式锚杆注浆加固碎石等软弱松散围岩体，解决碎石等松散围岩长管棚不能成孔问题。

(2) 利用自进式锚杆实现深孔预注浆，增大了围岩性能改良层的长度，提高了改良层加固带的刚度，为长管棚前端提供较长范围的围岩注浆体支承，保证了管棚前支点的稳定性。

(3) 洞身内采用无工作室长管棚，可实现超前支护工程不侵界，具有一定的先进性。

(4) 优化后的自进式锚杆深孔预注浆加固与无工作室长管棚跨越超前支护组合的方法，处治技术方案科学合理，具有很好的应用价值。

#### 参考文献：

- [1] 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(3).
- [2] 魏杰.自进式锚杆管棚在隧道塌方中的应用[J].山西交通科技,2014(6).
- [3] 付重君.隧道洞内坍塌及地表凹陷的成因分析及处理方案[J].黑龙江交通科技,2016(11).
- [4] 柳长奔.齐岳山隧道无工作室管棚施工技术及应用[J].山西建筑,2010(7).
- [5] 敖贵勇,张存根.无工作室管棚处理溶蚀区块石地层掌子面及地表坍塌技术[J].河南建材,2018(6).
- [6] 王晓星.大跨度土质隧道施工监控量测及支护效果研究[D].长安大学硕士学位论文,2009.
- [7] 刘艳明.石牛岭隧道地表坍塌原因分析及处理方案探讨[J].中外公路,2018(3).
- [8] 王江飞.具茨山隧道塌方处理方案数值模拟分析[J].交通标准化,2007(7).
- [9] 张龙生,翁贤杰.富水软弱围岩隧道塌方机理及治理技术研究[J].中外公路,2017(1).
- [10] 杨志强.大断面隧道中三台阶五步法的数值模拟分析与监控量测研究[J].中外公路,2020(1).