

# 公路隧道穿越软弱破碎围岩综合施工及监测

陈三生

岳阳市公路桥梁基建总公司 湖南岳阳 414000

**摘要:** 伴随着经济社会的快速发展,我国公路事业不断发展,但在通常在公路项目建设过程中,不可避免会遇到一些复杂的地质地形,不仅增加施工难度,还增加施工风险。本文以公路隧道施工为研究对象,对其施工过程中面临的技术难点进行分析,主要为隧道穿越软弱破碎围岩地段时面临的技术难题。在研究过程中,结合具体的工程,针对施工现场面临的难题,从施工与监测这两个方面提出具体的施工方案与措施,在施工方面,主要包括超前地质预报、三台阶七步法开挖、地表预注浆这三项技术,在施工监测方面,依托先进技术构建了隧道破碎围岩变形综合实时监测体系。旨在通过综合施工措施及监测技术,确保隧道顺利穿越软弱破碎围岩地段。

**关键词:** 隧道施工; 软弱破碎围岩; 综合超前地质预报; 注浆加固; 变形监测

## Comprehensive Construction and Monitoring of Highway Tunnel Crossing Soft Broken Surrounding Rock

CHEN Sansheng

Yueyang Highway and Bridge Infrastructure Corporation, Yueyang, Hunan 414000

**Abstract:** With the rapid development of economy and society, China's highway industry continues to develop, but usually in the process of highway project construction, it is inevitable to encounter some complex geological terrain, not only increase the difficulty of construction, but also increase the construction risk. This paper takes the highway tunnel construction as the research object, and analyzes the technical difficulties faced in the construction process, mainly the technical problems faced when the tunnel passes through the weak and broken surrounding rock. In the process of research, combined with specific projects, in view of the problems faced by the construction site, specific construction plans and measures are put forward from the two aspects of construction and monitoring. In terms of construction, it mainly includes the three technologies of advanced geological prediction, three-step and seven-step excavation, and surface pre-grouting. In terms of construction monitoring, Based on advanced technology, a comprehensive real-time monitoring system for tunnel surrounding rock deformation is constructed. The aim is to ensure that the tunnel can pass through the soft and broken surrounding rock area smoothly through the comprehensive construction measures and monitoring technology.

**Keywords:** Tunnel construction; Weak broken surrounding rock; Comprehensive advanced geological forecast; Grouting reinforcement; Deformation monitoring

### 引言:

隧道工程是公路建设中较为重要的一项内容,近些年随着我国公路事业的不断发展,隧道工程项目也逐渐增多。但由于公路隧道施工往往跨度较大,不可避免会遇到一些复杂的地质地形。其中,软弱破碎围岩是公路隧道施工中常见的一种不良地质,这种类型的地质具有强度低、易破碎、不稳定等特征,不仅会增加隧道开挖的难度,还会增加隧道开挖的风险,若不能及时得到处

理从而引发安全事故,将会带来不可估量的经济损失和伤亡。因而,有必要开展隧道穿越软弱破碎围岩的安全综合施工技术的研究。

在学术领域,许多学者就对软弱破碎围岩地段的隧道开挖施工进行研究,并获得了丰厚的研究成果。肖黔以某高速公路隧道施工为背景,在软弱破碎围岩隧道开挖施工中应用了三台阶七步法的施工技术,保证了隧道开挖的安全性<sup>[1]</sup>。王恩奎以某隧道为背景,对不同岩性

地层中隧道施工方法进行了分析,在实际施工中,综合应用了开挖与支护施工措施,如短台阶开挖、钢格栅支护等,同时在初期支护施工完成后进行量测和观测,保证了软弱破碎围岩隧道施工顺利完成,整个过程安全稳定<sup>[2]</sup>。耿博铭在分析隧道软弱破碎围岩分布特征的基础上,提出了超前预报、超前支护的施工措施及对隧道软弱围岩开挖实时监测为一体的施工方案,使得隧道软弱破碎围岩隧道的处理有良好的效果<sup>[3]</sup>。马兴林从隧道施工安全着手,结合软弱破碎围岩特征及施工难点,对软弱破碎围岩加固及支护技术、隧道洞口开挖、施工技术以及支护后围岩稳定性测量技术进行了分析,通过有效的支护加固技术,提高了软弱破碎围岩的结构稳定性<sup>[4]</sup>。高玉明针对软弱破碎围岩卸荷特性,以5%的水泥改良土模拟软弱围岩,在全断面与两台阶开挖的两种工况下分析隧道模型围岩时效特性,结果表明两台阶开挖要比全断面开挖围岩自稳性更好,同时总结了软弱围岩隧道施工技术的要点,包括管棚加固、劈裂注浆、变形监测及排水防水等工作<sup>[5]</sup>。

本文在这些研究的基础上,以具体的项目为背景,在分析项目地质条件的基础上,通过现场试验方式,总结了软弱破碎围岩隧道施工技术要点,包括综合超前地质预报、综合开挖加固技术、破碎围岩变形综合实时监测技术,旨在保证公路隧道快速安全通过破碎带,同时为类似隧道工程提供参考。

## 一、项目概况

### (一) 工程概况

某高速公路隧道总长为4.6km,该隧道设计为双向四车道,属于分离式中等跨度隧道。隧洞口尺寸规格为11.0m×5.5m,隧道进出口平面设计为纵向坡度2.6%的单向坡,抗震设防烈度为8级。

### (二) 水文地质概况

在正式施工前,对项目所处地的地质条件进行勘察,勘察结果表明隧道施工现场地质条件较复杂,地层类型多样,主要包括第四纪坡积、洪积层、长城系及太古界等地层。同时,分析隧洞围岩得知,围岩等级主要为IV和V。在隧道下方有褶皱与断裂带构造发育,其中有一条软弱断层破碎带,断层宽度为150m,对应桩号为YK20+450~YK20+600。在该断层破碎带中,存在裂隙结构发育,加之地下水丰富,使得围岩强度较低,自稳性较差,如果进行隧道开挖,必须要采取有效的措施加以处理和防护,否则容易出现塌方、突泥涌水等灾害。

### (三) 施工难点

由于该断层破碎带的围岩强度较低,围岩等级为V,自稳性较差,使得隧道开挖施工的难度较大,若施工操作不当,或受到扰动影响,容易引起塌方、突泥涌水等风险。此为该隧道施工的难点。为解决这一难题,施工单位须深入分析研究断层破碎带的开挖施工与支护技术,并加强破碎围岩变形实时监测,及时了解围岩变形的特性,确保隧道安全穿过破碎区。

## 二、软弱破碎围岩地段隧道施工技术分析

### (一) 超前地质预报技术

在隧道开挖施工前,开展超前地质预报工作是不可或缺的环节,也是保证隧道施工安全的关键措施,通过超前地质预报,充分掌握隧道掌子面前方的地质情况及围岩等级等,以便选择适宜的施工方法。结合项目地勘报告及该断层带现场实际施工情况,在实际工作中,主要采用了以下几种探测方法进行综合超前地质预报。

1.地震预报。其主要是利用弹性波进行探测,有效探测距离在100~150m之间,可实现长距离的探测。将地震预报法应用至隧道施工中,其原理为:借助人工激发地震波的方式,使断层产生反射波,通过分析反射波的特点预判隧道掌子面前方的地质条件。在数据采集与处理环节,采用的是TSPwin软件进行数据的采集和处理。探测结果见下图1,从图1中可得知,该断层破碎带中(里程为YK20+450~YK20+600),岩体力学参数变化幅度大,有明显的局部震荡,反映了该断层破碎带围岩裂隙发育较严重,裂隙结构分布广泛,地下水发育,围岩稳定性较差。对此,需要在隧道开挖施工中,缩短开挖进尺,并做好开挖支护和实时监测工作,以保证隧道开挖施工的安全。

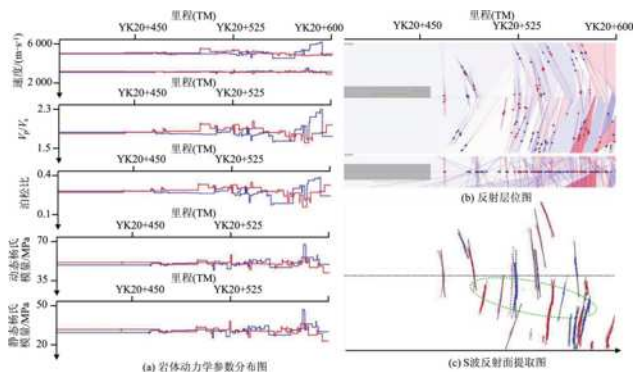


图1 TSP超前地震预报结果

2.雷达探测。在隧道施工现场,在开展地质预报工作时,还采用了雷达探测法,该方法属于电磁波探测,

主要利用电磁脉冲波的反射进行探测,有效探测距离为15~30m,属于短距离探测方法。在隧道施工现场,利用地质雷达对隧道掌子面YK20+486.5里程进行预报,探测结果见下图2。从图2显示的结果来看,在掌子面前方的2~15m范围,电磁波信号振动幅度较大,且分布不均匀,局部还存在散射、绕射的现象,这反映出该断层破碎带的围岩破碎较为严重,整体稳定性较差,岩体强度难以满足实际施工的要求。同时,在隧道掌子面前方15~30m范围,电磁波信号具有一定的连续性,振幅波动不明显,但反射信号较紊乱,这说明该断层破碎带围岩整体性稍好,有局部裂隙发育的现象,可能含水,也可能是软弱带或夹层。针对这一情况,需要在隧道施工中及时做好支护工作,避免出现塌方、突泥涌水等灾害出现。

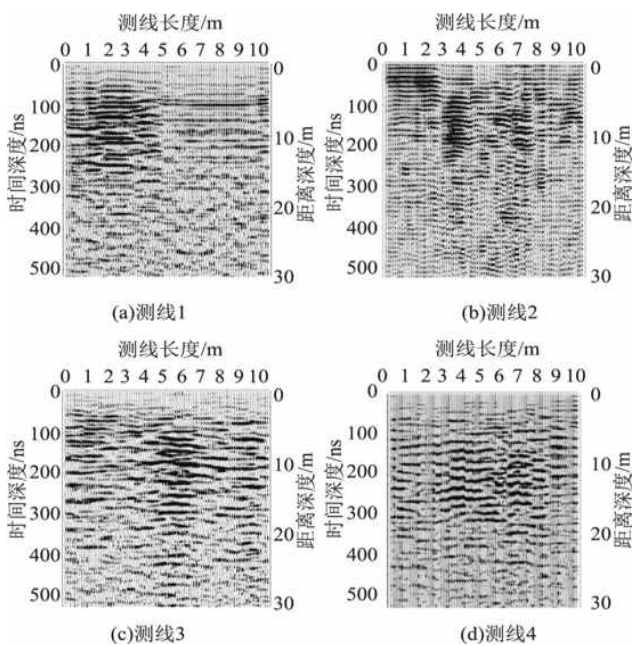


图2 雷达探测结果

3. 钻探法。为进一步掌握隧道掌子面前方的地质情况,在地震预报和雷达探测的基础上,还采用了钻探法进行超前探测。在具体的探测过程中,先在掌子面布设三个孔径为120mm的水平地质钻孔,对应编号为1#、2#、3#,然后通过孔内成像的方式进行探测,探测结果见下图3所示。从图3显示的情况来看,30m处水量明显增大,表明岩体破碎严重,围岩整体强度较低,存在严重的裂隙发育。

综合上述探测结果,该软弱断层破碎带围岩破碎较为严重,整体稳定性较差,且受到风化与地下水的影响,围岩强度较低,不利于保证隧道开挖施工的安全性,需要及时超前支护加固,并提高支护作业的效率。在

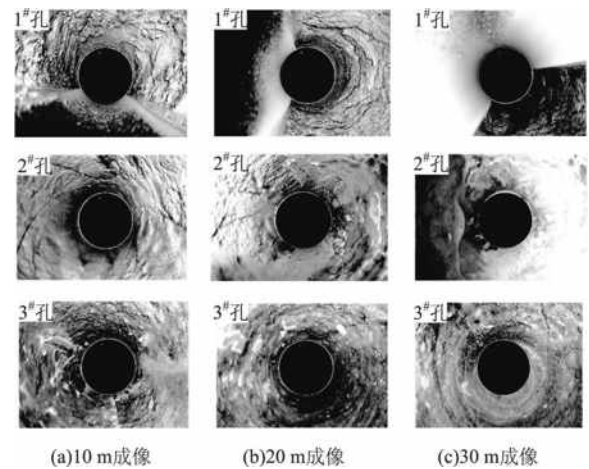


图3 钻探孔内成像

隧道开挖施工过程中,应尽可能地利用围岩自承力,采用适宜的开挖方法,降低施工对围岩的影响,确保整体施工安全顺利进行。

### (二) 三台阶七步法开挖技术

综合隧道超前地质预报结果,项目组决定采用三台阶七步法进行隧道开挖,这一开挖方法,将隧道分为七个开挖面相互错开,并同时开挖和支护,围岩段采用三台阶法开挖,将隧道分层三部分跳槽开挖,先跳槽开挖上台阶,待开挖至一定长度后,再跳槽开挖中台阶和下台阶,形成山中下三个台阶,且能同时施工。在隧道施工中利用三台阶七步开挖法,可缩短下层开挖台阶的长度,利用初期支护让围岩温度能尽快达到适宜的温度,且能尽早地完成隧道二次衬砌,从而形成稳定的支护闭环。

### (三) 地表预注浆技术

针对该软弱断层破碎带埋深大于60m的区段,为保证施工安全,在隧道开挖之前,采用地表预注浆技术对破碎围岩进行加固处理,提升围岩体的力学性能。在具体的施工中,主要采用直径为50mm的PVC注浆管进行注浆,主要设置了帷幕孔和内部孔,在最外层布置帷幕孔,通过注浆形成帷幕墙,注浆采用的材料为普通水泥-水玻璃双液浆,并加入一定量的速凝剂,加快浆液凝固时间。设置帷幕孔的目的在于避免内部孔注浆有浆液流失的问题。在帷幕孔注浆结束后,对内部控注浆,注浆材料为掺HPC同性能的普通水泥,在注浆时用刚性材质的袖管从孔底向孔口注浆。地表预注浆的详细施工参数见表1所示。

### (四) 双层小导管超前注浆技术

在隧道施工中,除了要在洞外进行地表预注浆作业以外,还需要在洞内采用双层小导管超前注浆技术,由



表1 地表预注浆施工参数

| 参数名称                        | 具体数值           |
|-----------------------------|----------------|
| 注浆管直径 (mm)                  | 50             |
| 注浆范围 (m)                    | 隧道两侧各 10.8m 宽度 |
| 帷幕孔间距 (m)                   | 0.6            |
| 内部孔间距 (m)                   | 1.2            |
| 内部孔布置形式                     | 梅花形交错布置        |
| 注浆分段步距 (m)                  | 1.0            |
| 注浆压力 (MPa)                  | 0.5~1.0        |
| 注浆速度 (L·min <sup>-1</sup> ) | 20~60          |
| 注浆终止压力 (MPa)                | 2.0            |

此加固隧道周围岩体，避免隧道周围岩体出现变形、位移的情况。在隧道开挖前进行双层小导管超前注浆，钻孔布置在开挖边缘，并埋入一定长度的小导管，浆液通过注浆孔进入破碎围岩中，并注浆填充岩体中的孔隙，固结后形成一圈密实实的加固圈，从而改变隧道围岩的力学性能，提升隧道周围围岩的抗变形能力。双层小导管超前注浆施工参数具体见表2。

表2 双层注浆小导管施工参数

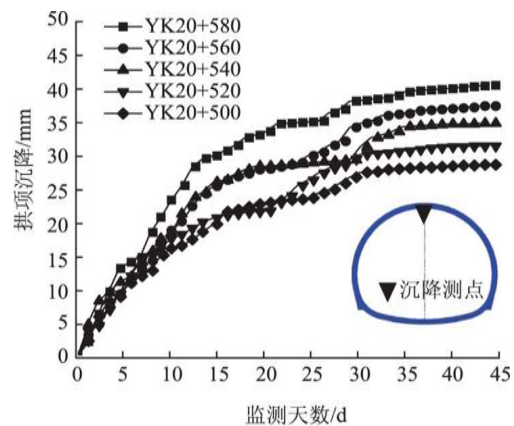
| 参数名称         | 具体数值                    |
|--------------|-------------------------|
| 双层小导管布设范围    | 拱部 150° 范围              |
| 小导管长度 (m)    | 4.5                     |
| 注浆材料及参数      | 普通水泥砂浆单液，水灰比0.6: 1~1: 1 |
| 注浆管直径 (mm)   | 50                      |
| 注浆管壁厚 (mm)   | 5                       |
| 导管搭接长度 (m)   | > 1.0                   |
| 注浆压力 (MPa)   | 0.5~1.0                 |
| 注浆终止压力 (MPa) | 2.0                     |

### 三、隧道穿越软弱破碎围岩地段变形综合监测技术

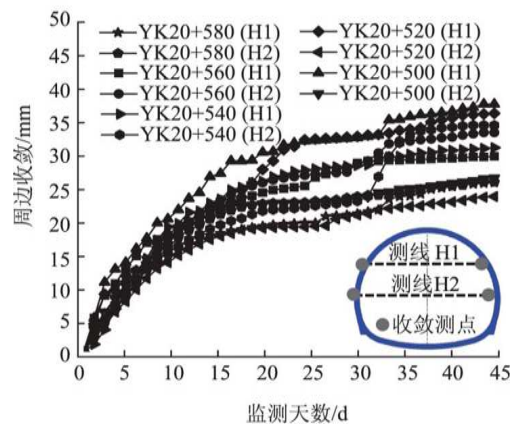
在隧道施工过程中，为确保整体施工的安全性，有必要开展监控量测工作，其中就需要进行隧道围岩变形监测，这也是有效保证隧道施工安全的一项关键措施。虽然该断层破碎带在采用上述超前加固措施后，围岩力学性能发生了改变，但由于岩土工程的赋存条件较为复杂，有许多不确定性，因而需要在施工过程中对围岩体的变化情况进行实时监测，充分确保隧道施工的安全。本项目在隧道围岩变形监测中，主要采用了以下监测方法。

#### (一) 全站仪+反光片监控测量

在隧道施工中，沿着隧道轴线布置了10个监测断面，共50个监测点，间距10m布置。在施工期间，采用全站仪+反光片对围岩的变形进行实时监测，监测结果见图4所示。



(a) 拱顶沉降监测结果



(b) 周边收敛监测结果

图4 基于全站仪+反光片围岩变形监测结果

从图4中可得知，测量的断面累计拱顶沉降呈现出初期急剧增加，随后短暂稳定，接着小幅度增加，最后趋于稳定的规律。其中，测线H1累计周边收敛最大值为37.5，结合监控量测规范得知，变形值符合设计的要求。

#### (二) 三维激光扫描监控测量

采用全站仪+反光片进行监测，仅能获得隧道断面的部分的围岩变形规律，为一次获得整个隧道断面轮廓的变形特性，在测量施工中，采用三维激光扫描方法进行监控测量。该方法应用在隧道初支混凝土后，用三维激光扫描仪对断面轮廓进行第一次扫描，待初期支护变形稳定后，对同一个断面轮廓进行第二次扫描，对比第一次测量与第二次测量的结果，二者之间的差值便是施工时间内围岩的累计变形量。对比传统的监测测量方法，三维激光扫描测量方法具有测量精度高、测量范围大、可获得更多空间信息等优势。下图5为两次三维激光扫描图，从图5中可得知，断面在上台阶开挖15d后，围岩累计变形整体呈现增大后减少的变化规律，其中在拱顶位置附近出现最大变形。这一测量结果与全站仪测量结

果吻合。

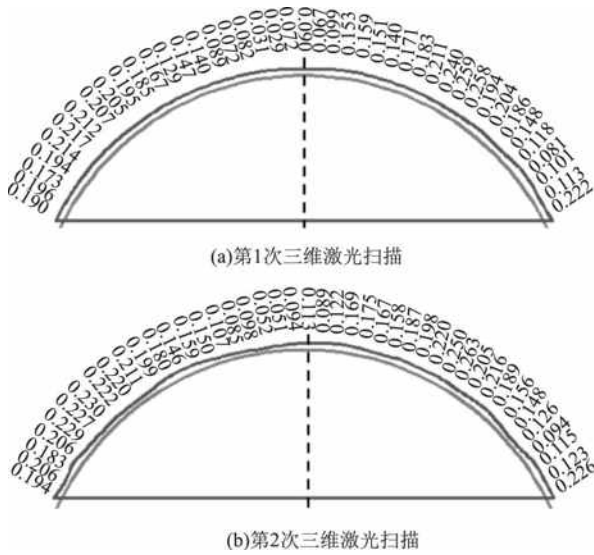


图5 三维激光扫描断面位移情况

#### 四、结语

在公路隧道施工中,不可避免会遇到软弱破碎围岩地带,为保证隧道施工安全,需要加强软弱破碎围岩综

合施工技术的研究,同时需要重视隧道围岩变形综合监测,为隧道施工顺利通过软弱破碎带提供指导。本文结合具体的工程,研究了一种隧道通过软弱破碎围岩的综合施工技术,包括超前地质预报、三台阶七步开挖施工、地表预注浆、双层小导管注浆等,并建立了一套基于全站仪和三维激光扫描技术手段的隧道围岩变形监控测量体系,充分保证了隧道施工的安全性。

#### 参考文献:

- [1]肖黔.软弱破碎围岩隧道三台阶七步法开挖施工技术研究[J].运输经理世界,2021(12):62-64.
- [2]王恩奎.软弱破碎围岩隧道施工技术研究[J].交通世界,2020(35):143-144.
- [3]耿博铭.新高坡隧道穿越软弱破碎围岩施工技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):1075-1079.
- [4]马兴林.软弱破碎围岩隧道施工技术探讨[J].工程技术研究,2020,5(11):115-116.
- [5]高玉明.软弱破碎围岩卸荷特性与施工要点研究[J].公路工程,2018,43(01):181-185.