

公路隧道围岩大变形段处治措施

矣发润

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650217

DOI:10.61369/ETQM.2026010020

摘 要： 随着我国交通基建向复杂地质推进，长隧道修建增多，软弱围岩大变形严重，影响施工安全与进度，造成成本增加、工期延误等问题。本文以思澜高速大尖山隧道为研究对象，探究围岩大变形成因机制，创建“监测预警—分级处置—加固补强—效果验证”全流程处治技术体系，通过优化监控量测、细化处置标准、完善加固措施等手段，为公路隧道围岩大变形段处治给予理论及实际参照，尤其为穿越断裂带、破碎带等复杂地质条件下的隧道工程提供关键技术支撑，该体系有益于改进隧道工程建设品质和安全性。

关 键 词： 公路隧道；围岩大变形；监控量测；分级处治；加固技术

Treatment Measures for Rock Mass Deformation in Highway Tunnel

Yi Farun

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650217

Abstract： With China's transportation infrastructure advancing into complex geological formations, the increasing construction of long tunnels has led to severe deformation of surrounding rock masses, posing challenges to construction safety and schedule while causing cost increases and project delays. This study investigates the deformation mechanisms of surrounding rock masses in the Dajianshan Tunnel of the Silan Expressway, establishing a comprehensive treatment system encompassing "monitoring and early warning, graded response, reinforcement and consolidation, and effectiveness verification". Through optimizing monitoring and measurement techniques, refining response standards, and improving reinforcement measures, the framework provides theoretical and practical references for addressing large deformation sections in highway tunnels. Particularly, it offers critical technical support for tunnel engineering in complex geological conditions such as fault zones and fractured zones, thereby enhancing the quality and safety of tunnel construction projects.

Keywords： highway tunnel; rock mass large deformation; monitoring and measurement; graded treatment; reinforcement technology

引言

围岩大变形是公路隧道软弱围岩施工的难点，其本质是应力失衡下的非线性响应。随着隧道工程向复杂地质延伸，多重因素叠加会引发初期支护失效、断面侵限等风险。思澜高速大尖山隧道穿越断裂带，K25+371 ~ K25+466段的大变形现象正是复杂地质施工风险典型例子。目前，研究大多只针对单一技术展开，并未进行“监测—处置—验证”的全流程研究与工程论证工作。本文结合大尖山隧道实践，在对地质成因分析的基础上构建处治体系，围绕监控量测、分级处置、加固技术和效果验证展开论述，其成果为类似工程提供实际解决方案并促进处治技术发展。

一、公路隧道围岩大变形成因机制

围岩大变形产生的原因是由地质条件、施工扰动和支护设计等诸多因素综合作用的结果。从地质本质上看，岩体自身特性是基础诱因。例如大尖山隧道微风化灰岩由于断层揉皱作用导致岩体完整性受损，结构面发育使自稳能力严重下降。叠加上述岩体

特性后，由地质构造作用形成的破碎带、软弱夹层使得岩体力学性能进一步降低，岩体在开挖卸荷后极易产生塑性变形。

施工扰动是造成变形的直接原因，隧道开挖时形成的应力重新分布，若支护结构未及时约束，就会使围岩发生持续性变形。同时，支护设计参数不合适、支护时机延迟等情况也会加重变形风险，初期支护强度不够难以抵挡住围岩压力，导致喷射混凝土

剥落、钢支撑扭曲、初期支护侵限等病害发生。

二、公路隧道围岩大变形监测预警技术

（一）监测方案优化原则

在隧道围岩大变形迹象显现时，常规的监控量测方案，已无法满足反馈设计、引导施工的需求。在工程中，需要借助加密监测点、改良监测项目，来实现准确预估。监测方案改良的关键准则，在于“有针对性、精度达标、数据及时”，需依照实际变形段的地质状况与施工进度同步进行，随时作出改变，从而全面掌握围岩的变动规律^[1]。

（二）关键监测内容与技术要求

监测点布设方面，拱顶下沉监测按5m间距设置断面，在每个断面上分别布置3个测点，即隧道中心线及两侧横向距离2~3米处，以确保覆盖拱顶受力关键部位。周边收敛监测也采用5m间距断面，每个断面均设置两条水平测线，测线高度应高出起拱线1.5m以上，以免受到下台阶施工扰动的影响。

除必测项目外，还要增设选测项目以加深监测程度，围岩体内位移、钢架内力与外力、围岩压力以及锚杆轴力等均属此列，以全面掌握围岩和支护结构的受力变形情况，所用监测仪器需满足精度要求，如水准仪、全站仪及专用传感器等，在数据搜集频次方面也需依循变形速率调整，当变形剧烈时更要加强观测力度，从而确保能迅速捕捉到变形特征。

（三）监测数据应用标准

监测数据的核心作用在于处治决策，需确立起判断准则：当监测显示围岩变形趋于稳定，并且初期支护未侵限或者侵限之处，能保障二次衬砌90%检查点厚度不少于设计厚度、最小厚度不低于0.5倍设计厚度时，在加固之后，便可开展二次衬砌施工；若变形持续处于不稳定状态并符合侵限标准，需启动换拱处理流程，从而确保结构安全。同时，应结合监测数据对换拱处理的时机进行精准把控，避免因过早或过晚实施而带来额外风险。

三、公路隧道围岩大变形分级处治策略

（一）分级处置标准制定

基于监测数据和工程实际，围岩大变形处治采取“分级施策”，主要依据是变形是否稳定、初期支护是否存在侵限及衬砌厚度能否满足要求^[2]。一级处置，适用变形趋于稳定、缺乏侵限或轻微侵限且符合衬砌厚度要求的地段，以加固处理为主；二级处置，适用变形不稳定、初期支护侵限且不能满足衬砌厚度要求的地段，以换拱处理为主；三级处置，适用换拱后仍不稳或围岩自稳能力极差的地段，需要结合设计优化进行综合处治。分级标准制定要兼顾科学性和实操性，需结合施工现场实际操作经验，确定各级处置的触发阈值，不能因为判断标准不明确，而造成处置太迟或者过度处置。以侵限判断标准为例，二次衬砌厚度的要求是核心：90%检查点厚度不低于设计厚度，最小厚度不少于0.5倍的设计厚度，这个标准既确保了结构安全，又为施工处置提供

了一个清晰的操作指南。

（二）分级处治核心措施

一级处置，主要是通过加固手段控制变形发展，加固方案由施工单位根据现场实际情况提出，需经设计单位进行结构受力及安全验算、建设单位审批同意后方可实施，以确保加固方案的科学性和可行性。针对不同的变形情况采取相应的加固措施：对初期支护喷射混凝土剥落处补喷，钢支撑变形处局部加强，增设锚杆、锚索等增强围岩约束能力，采取有针对性的措施阻止其继续变形。

二级处置，换拱施工必须严格按照专项方案执行，且该专项方案须经监理工程师签字并报建设单位同意。在开展换拱施工前应先行向注浆加固围岩，注浆浆液要按照围岩性质来选择：一般情况下常规围岩选用水泥浆，特殊情况可采用双液浆或化学浆，防止浆液分布不均造成变形加剧。换拱施工应遵循“先加固后换拱、分段分幅施工”原则（可细化为：分段、分幅对称施工），在换拱过程中控制开挖进尺，防止一次开挖面积过大造成围岩应力集中，并做好临时支护工作以确保换拱过程中的结构安全，在换拱施工时，现场技术员、专职安全员要全程在场指导，确保施工依照批复方案执行；完工后立即开展监控量测，跟踪变形情况。

三级处置，须采取综合方法，加大二次衬砌钢筋密度，在二衬内部增设钢架改善刚性受力能力；对掌子面前方围岩进行采样试验分析，若围岩自稳能力不足，需反馈至建设单位，由设计单位改良初期支护参数，施工单位按新图纸施工。改良初期支护参数时，可以依据围岩岩性分析的结果，减小钢支撑间距、增大喷射混凝土强度等级或增多锚杆布置数量，通过加强初期支护体系，来提升围岩控制效果。同时，三级处置也要重视施工工艺的改进，采用台阶法开挖以减小对围岩的干扰，缩减支护滞后的时间等手段，从施工环节降低变形风险^[3]。

四、公路隧道围岩大变形关键加固技术

（一）仰拱及仰拱填充加固技术

仰拱是隧道结构的“基础”，其稳定关系到整个结构的安全。在变形段处置中，要对仰拱填充进行专项观测：观测范围为变形段前后各100m，监测断面每5~10m一个，测点沿垂直于隧道中心线方向按1m间距布设，使用满足精度要求的水准仪或全站仪测量，确保能捕捉到仰拱填充顶面的变形特征。当发现仰拱开裂、底部隆起时，则说明原设计的仰拱不能承受围岩反力，此时，需要对未施工的仰拱重新设计，优化图纸由设计单位验算、建设单位认可后方可实施。优化方向包括增加仰拱厚度、增设仰拱钢架数量、提高混凝土强度等级，在仰拱底部增设隔水层，降低地下水对围岩软化的影响等措施，通过上述措施，从设计上提升仰拱承载能力。

对于已经发生病害的段落，在变形稳定后进行加固处理，加固范围为病害段落及前后50~100米。核心工艺是设置锁脚管棚或者沿仰拱填充面垂直打入钢花管注浆，注浆材料可与拱部加固浆液相同，确保加固效果的一致性、协同性，提高仰拱承载能力

和抗变形能力^[4]。锁脚管棚施工,要控制好管棚角度和间距,一般采用 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 倾角,间距控制在1~5米之间,确保管棚能锚固到稳定的围岩中,形成良好的支撑作用。注浆施工要严格控制好注浆压力以及浆液的扩散范围,防止注浆压力过大扰动围岩或压力过小导致浆液填充不足。

(二) 二次衬砌裂缝加固技术

二次衬砌裂缝的处置要依靠准确检测的结果,以目测法为主,结合尺量、刻度放大镜和超声波做全面检测。用超声波检测混凝土缺陷的主要根据是超声波在传播过程中产生的声时变化、能量衰减、频率差别以及波形畸变等现象,采用平面测试与钻孔测试相结合的方法来精确判定裂缝长度、宽度和深度^[9]。在开展检测时,要对裂缝实施编号标注,并按照裂缝的发展方向布置检测点,确保检测数据能够充分反映裂缝特点,为加固方案制订提供可靠依据。例如,遇到疑似深层裂缝的情形需利用钻孔测试方法,将径向振动式换能器放入钻孔之中,凭借超声波传播的数据,判断裂缝深浅及其延伸范围,防止因为检测不周全,致使加固举措缺乏针对性。^[6-10]

根据检测结果采取差异化加固措施:钢筋混凝土结构裂缝宽度 $<0.2\text{mm}$ 或混凝土结构裂缝宽度 $<0.4\text{mm}$,且裂缝发展趋于稳定时,可采用注射环氧树脂方法进行加固,利用浆液填充裂缝恢复结构整体性。注射环氧树脂施工应按照“清缝、封缝、注浆、固化”顺序开展:先使用高压气流清除裂缝内杂物,再用封缝胶封闭裂缝表面,通过注浆嘴将环氧树脂浆液注入裂缝,确保浆液能充分填充到裂缝末端处;待其固化后应对加固效果重新检查验收,确保裂缝闭合达到要求。当裂缝宽度大于上述规定值时,项目法人应当组织专家进行结构安全分析论证,并依据论证结论采取加固补强措施,确保结构受力安全。

对于宽裂缝加固,可采用粘贴钢板加固法:在裂缝两侧粘贴钢板,依靠钢板与混凝土的粘结传递应力,提高衬砌结构承载能力;或采用增设钢筋网加固法:凿除裂缝处部分混凝土,在增设钢筋网后重新浇筑混凝土,形成新的受力体系。同时,对因结构受力不平衡而产生的裂缝,要结合初期支护加固、围岩注浆等措

施,从源头上消除产生裂缝的原因,确保加固后的结构长期稳定可靠。在完成加固施工之后,需要持续开展裂缝监测工作,跟踪裂缝发展变化情况,确保加固效果符合工程要求。

五、处治效果验证与质量控制

(一) 效果验证核心指标

围岩大变形处治效果,要凭借监测数据和结构检测结果来加以证实,重点指标包含围岩变形速率、衬砌结构完整性及承载能力。通过持续监控量测,若围岩的变形速率逐渐趋于稳定,并且处于可接受范围之内,这就体现出加固措施是有效的;借助超声波探测、断面测量这些方法,可以检验二次衬砌的厚度、裂缝是否已经闭合等指标,确保其符合设计标准及质量要求。

(二) 全流程质量控制措施

质量控制要覆盖处治全过程:方案设计时,要将地质调查和围岩岩性分析结合起来,做到经济、合理、安全的目标;施工阶段,要严格遵守技术交底制度,重点把控注浆压力、钢架安装、钢筋安装、混凝土浇筑等重要环节;验收时,要组织设计、监理、施工等单位一起验收,对监测数据、施工记录、检测报告进行全面核查,确保处治效果符合工程需求。

六、结论

本文基于思澜高速大尖山隧道工程展开,深入探究公路隧道围岩大变形段处治技术,建立起“监测预警-分级处置-加固补强-效果检验”全流程处治体系。通过改良监测规划以准确抓住变形状况,凭借分级处置策略妥善应对,在仰拱加固、二次衬砌裂纹修复等关键技术助力下稳固结构。通过实践证实,该体系可以掌控围岩变形速率并保证衬砌品质,为软弱围岩大变形地段的类似处理赋予理论与工程典范参照,对于改善隧道工程建设安全及质量很有帮助。

参考文献

- [1] 张舜,蒋云东,王余.公路隧道软弱围岩大变形的注浆加固施工分析[J].建筑安全,2022,37(10):70-73.
- [2] 杨辉.穿越断层破碎带隧道围岩大变形机理及控制技术研究[D].辽宁工程技术大学,2022.
- [3] 付廷波.软岩长大公路隧道围岩大变形控制措施及其应用[J].建筑技术开发,2022,49(01):95-98.
- [4] 陈俊权.公路隧道软弱围岩大变形处治对策[J].公路交通技术,2018,34(05):106-112.
- [5] 叶雄,卢超波,姜洪亮.某隧道堆积体出洞段大变形控制与侵限处治研究[J].西部交通科技,2024(12):141-144.
- [6] 卢阳,邓修甫,鲁志强.云南华丽高速公路隧道大变形处治措施[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2020,29(1):15-19.
- [7] 谢雄耀,蔡杰龙,周应新,等.浅埋软弱围岩隧道施工塌方及处治措施研究[J].建筑施工,2022,44(3):545-549.
- [8] 高峰,郑东书.隧道软弱围岩大变形机理分析与加固措施研究[J].科学技术创新,2017(27):148-149.
- [9] 郑先奇.浅埋偏压软弱围岩大断面隧道综合处治措施[J].山西建筑,2012,38(8):198-200.