

全风化花岗岩公路隧道浅埋施工技术研究

郑贺楠

(中铁十一局集团第二工程有限公司, 湖北 十堰 442000)

摘要: 依托某在建全风化花岗岩地区公路隧道, 提出了一种针对复杂地质条件下的隧道支护优化技术, 并借助隧道围岩变形现场监测数据分析了支护效果。研究表明, 综合采用超前小导管支护、钢拱架加固、锚杆支护、喷射混凝土及水文控制等技术, 能够有效减少围岩变形、提高施工稳定性, 并解决地下水涌水问题。通过优化支护密度、调整开挖顺序以及加强排水系统设计, 支护方案的改进使隧道拱顶下沉量减少了约38.1%, 周边收敛值降低了47.9%。该优化方案有效增强了围岩稳定性, 控制了水文条件的影响, 改善了施工环境。研究成果为类似地质条件下的公路隧道施工提供了技术参考, 并为类似隧道支护设计与施工提供参考。

关键词: 浅埋隧道; 公路隧道; 隧道施工; 围岩支护; 支护优化

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0349-05

Research on construction techniques for shallow - buried highway tunnels in completely weathered granite

ZHENG Henan

(China Railway 11th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Shiyan 442000, China)

Abstract: Based on a highway tunnel under construction in a fully weathered granite area, a tunnel support optimization technology is proposed for complex geological conditions, and the support effectiveness through on-site monitoring of tunnel surrounding rock deformation is analyzed. The research indicates that the comprehensive application of advanced small pipe roofing, steel arch reinforcement, bolt support, shotcrete, and hydrological control technologies can effectively reduce surrounding rock deformation, enhance construction stability, and address groundwater inflow issues. By optimizing support density, adjusting excavation sequences, and strengthening drainage system design, the improved support scheme reduces tunnel crown settlement by approximately 38.1% and peripheral convergence by 47.9%. This optimized solution significantly enhances surrounding rock stability, mitigates the impact of hydrological conditions, and improves the construction environment. The research results provide technical references for highway tunnel construction under similar geological conditions and offer valuable insights for the design and construction of similar tunnel supports.

Keywords: shallow-buried tunnel; highway tunnel; tunnel construction; surrounding rock support; support optimization

0 引言

随着公路隧道建设在复杂地质条件下的逐步深化, 如何在全风化花岗岩等软弱岩土条件下开展浅埋隧道施工, 成为工程技术领域面临的核心问题之一。全风化花岗岩在隧道施工中具有地质条件复杂、围岩自稳性差、施工风险高等特征, 尤其在浅埋隧道的开挖过程中, 围岩的稳定性及支护设计的有效性成为影响施工安全和进度的关键因素^[1-2]。

近年来, 国内外针对浅埋隧道施工中支护设计和围岩稳定性控制研究逐步深入。许多学者对全风

化花岗岩等软弱岩土条件下的支护方式进行了探讨, 并提出了不同的优化方案。李明等^[3]指出通过增加喷射混凝土厚度和锚杆密度, 能够将围岩变形控制在设计范围内, 且支护结构受力分布更加合理。张伟^[4]认为通过改进钢支撑的设计与布局, 可以有效降低支护结构的整体变形量, 围岩压力最大值减少20%以上, 支护系统安全性得到保障。吴浩等^[5]发现结合喷射混凝土与锚杆的双重支护方式, 在更好地适应复杂地质条件的同时, 减少了施工期间的围岩变形。王磊^[6]通过采用实时监测技术对围岩压力进行动态监测, 及时反馈支护系统的受力性能及变形特征, 避免支护过度或不足的情况发生。

此外, 徐勇等^[7]从围岩-支护耦合作用角度出发, 系统总结了复杂围岩条件下的隧道稳定性控制

收稿日期: 2025-02-27

作者简介: 郑贺楠(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁与隧道施工管理工作。

机制。陈海鹏等^[8]提出基于多功能拱架安装台车的微台阶快速施工技术,实现复杂山岭隧道开挖工法灵活转换与机械化智能施工,显著提升效率与安全性。贾思桢等^[9]通过室内试验与现场验证,分析了全风化花岗岩地层中泡沫渣土注浆改良技术的适应性,提出了合理的配比与加固参数。在涌水控制方面,周辉^[10]归纳了高水压条件下浅埋隧道易突水、渗压扰动强的特点,强调“封堵+引排”组合治理在工程中的关键作用。张恒等^[11]构建了基于实测数据的变形监测与预警模型,在高渗透围岩中实现了超前控制。沈佳锋等^[12]则结合数值模拟与现场监测对比,验证了分步开挖工法在强风化段中的变形协调能力。此外,王建华等^[13]提出将信息化监测与围岩支护体系联动控制作为提升浅埋段围岩稳定性的关键技术路径,进一步强调了围岩响应实时调控的重要性。

尽管现有研究提供了较为成熟的支护设计方法,但针对全风化花岗岩等特殊地质条件下的支护系统优化和围岩稳定性控制的系统性研究仍有待深入。因此,本文以某公路隧道全风化花岗岩浅埋段为研究对象,通过对现有支护方案的分析,提出了改进的支护方案,分析了优化措施对围岩变形控制的影响。本研究可为类似地质条件下的隧道施工及风险控制提供参考。

1 工程概况

1.1 项目背景

某高速公路隧道为上、下行分离的6车道长隧道,设计长度约为2.1 km,其中浅埋段约占全长的12%。隧道所处区域地形复杂,地质条件以全风化花岗岩为主,具有低强度、高变形性和高渗透性等特点,施工过程中极易出现围岩坍塌和超挖等问题。隧道埋深较浅,浅埋段最小覆土厚度仅为7 m,致使围岩稳定性控制成为该工程的主要技术难点。

该隧道依据新奥法施工原则,结合区域地质特点,通过分部开挖和动态调整支护设计来应对围岩的复杂变化。此外,隧道浅埋段处于公路与居民区的交汇区域,施工扰动可能对周围环境产生影响,因此需兼顾环境保护和施工风险控制。

1.2 工程地质条件

隧道浅埋段位于全风化花岗岩地质带,该区域岩体的风化程度较高,地质构造复杂。全风化花岗岩的强度较低,抗压强度通常为5~20 MPa,远低于原

生花岗岩的强度。全风化花岗岩浅埋段围岩等级如表1所示,岩层变形较大,围岩变形量可达到10~15 cm,且具有较强渗透性。隧道开挖过程中,围岩常常出现较大的塑性变形,并伴随有较强的水涌现象,特别是在施工初期,局部围岩容易发生突发性坍塌。该区域地下水位较高,地下水主要以裂隙水和孔隙水形式存在。水流速度较慢,但水体渗透性较强,局部地区在开挖过程中出现了涌水现象。

表1 全风化花岗岩浅埋段围岩级别分类表

起止里程	围岩级别长度/m			
	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	合计
ZK56+565~ZK57+870	190	250	305	760
DK430+485~DK431++425	237	450	253	940

2 原开挖、支护方案及主要工程问题

2.1 隧道原开挖支护方案

隧道浅埋段支护设计结合全风化花岗岩地质条件的特点,隧道开挖采用双侧壁导坑法施工,支护采用超前小导管、钢拱架、锚杆、喷射混凝土等多种形式的组合方案,以确保施工过程中围岩的稳定性与安全性。使用外径89 mm、长度12 m的超前小导管,按0.4~0.5 m的环向间距布置形成超前支护;钢支撑系统被用于进一步加固围岩,防止在开挖过程中产生过大的变形。钢拱架间距为0.5 m,截面面积为168.9 cm²,预留变形量为60~80 mm;锚杆支护作为二次加固措施,在支护体系中起到了稳定围岩的作用。锚杆采用φ22 mm热轧钢筋,锚固长度为4.5 m,间距为0.5 m×0.8 m;喷射混凝土用于提供初期支护,形成围岩的临时支护层,并有效防止围岩局部塌方。喷射混凝土厚度为28 cm,强度等级为C25,并配备双层钢筋网。为增强施工中的局部稳定性,在关键节点设置I18工字钢临时支护,间距0.5 m,配合C25混凝土喷射厚度22 cm。

2.2 主要工程问题

隧道施工过程中,由于全风化花岗岩的特殊地质条件和浅埋隧道的结构特点,施工中暴露出一系列工程问题,这些问题直接影响了施工的安全性和施工进度。

(1)开挖段围岩为Ⅴ级,全风化粗粒黑云母花岗岩呈散体状结构,岩石颗粒间胶结极弱,几近土化。掌子面岩体松散破碎,自稳时间极短,加之存在地下水活动,渗水普遍、局部区域出现柱状涌水,导致掌子面多次发生小规模垮塌,严重影响作业安全。

(2)全风化花岗岩具有强烈的变形特性,抗剪强度低、模量小,易在施工扰动及荷载作用下产生大变形,施工日沉降速率及累计沉降量较大,拱架闭合前的日沉降量最高达60 mm/d,累计沉降量最大达1 095 mm,远超常规可控范围,存在支护失稳风险。

(3)隧道拱顶和边墙区域的围岩压力显著高于设计预测值,部分区域的围岩压力超过了原设计值的1.2倍,造成支护结构局部变形较大,尤其是喷射混凝土和钢支撑受力分布不均的问题突出。

(4)隧道区域地下水位较高,渗透系数约为 1.0×10^{-5} m/s,在掌子面及结构接缝处多次发生集中涌水(见图1),部分段落最大涌水量达1 200 L/min,极易引发突水突泥灾害,对支护结构形成冲刷破坏。

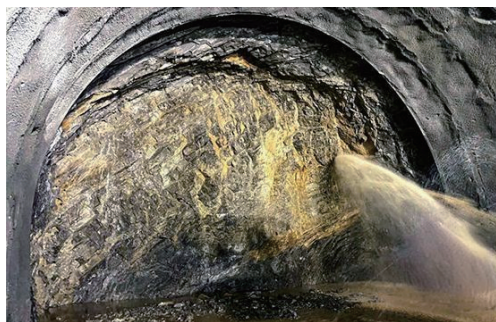


图1 隧道掌子面涌水

3 隧道开挖及支护方案优化设计

针对隧道浅埋段施工过程中暴露出的围岩变形过大、围岩压力集中、水文条件复杂等问题,对前期开挖支护方案和施工工艺进行了优化设计,以提升施工安全性和支护系统的稳定性。

3.1 优化开挖工法,提升掌子面稳定性

由于岩体松散、扰动面大、封闭时效慢,易引起围岩变形和掌子面垮塌。优化后改为微台阶临时仰拱法,该工法具有扰动小、封闭快、掌控掌子面变形能力强等优点^[14-15]。

此外,在开挖前布设超前短管棚或小导管注浆体,对掌子面前方岩体进行预加固处理,增强岩体抗剪强度与整体性;水量丰富段落,优先实施环形预注浆,控制突水风险。

3.2 优化超前支护参数,增强掌子面稳定控制力

原超前小导管设计导管间距0.5 m,考虑围岩松散性及掌子面失稳频发问题,优化后将环向间距调整为0.4 m,导管插入长度由12 m增至15 m。

3.3 加强初期支护构造,提升结构协同承载能力

优化拱架落地结构,在支脚位置设置40 cm×40 cm×

15 cm的C30混凝土块,提升基础稳定性。拱架纵向连接筋环向间距控制为0.5 m,以增强整体稳定性。掌子面顶部区域设置6根 $\phi 89$ mm×6 mm、长9 m的仰斜钢花管,用于水流引排,防止掌子面失稳。同步设置系统锚杆与径向注浆,对围岩进行整体加固处理,并在必要位置预留泄水孔,构建“封堵+引排”相结合的地下水控制体系。

3.4 支护技术对比与创新性分析

本次优化充分结合了全风化花岗岩岩体结构松散、水敏性强、渗透性高、初始稳定性差的特点,从“掌子面稳定控制、支护刚度匹配、水害联动治理”3方面同步强化,建立了以预支护—快速封闭—刚柔组合支护—排水引导为主线的综合支护体系。同时优化设计不仅考虑各支护手段的独立作用,更注重其耦合作用机制,如注浆对钢拱架基础承载力的增强、仰拱闭合对掌子面围压释放的约束等,形成了全过程、多手段、多因子协同控制变形与渗透的支护模式。该方案在现场试段中已显著改善围岩稳定性和施工安全性,为后续隧道施工提供了有效支撑。

4 隧道变形监测分析

4.1 监测方案

隧道施工过程中,沿隧道纵向方向设置4个监测断面,4个监测断面间距为35~45 m,涵盖了隧道最小埋深段(7 m)至最大浅埋段(15 m)区间,能够反映不同埋深条件下围岩与支护体系的变形响应特征。其中3个断面位于支护优化前的隧道区域,分别为DK430+540-GD00、DK430+575-GD00和DK430+595-GD00,1个断面位于优化后的断面区域,为DK430+620-GD00。每个监测断面拱顶设置一处监测点,以拱顶所在位置为中轴线,左右侧墙对称位置各设置一处监测点,如图2(a)所示,每个断面布设3个测点,共12个监测点。周边收敛测量与拱顶下沉收敛在同一断面上进行。周边位移利用收敛计测量隧道周边某两点相对位置的变化。每个断面共布设3条水平测线,每个测线两个收敛测点,如图2(b)所示,共12个水平测线。对于涌水量的监测,采用流量计对每个监测断面进行监测。数据采集频率及仪器精度如表2所示。

4.2 隧道拱顶下沉

图3所示为4个不同部位断面的监测结果,从图2可以看出,断面DK430+540-GD00、DK430+575-GD00和DK430+595-GD00的累计拱顶下沉量分别达到了

表2 数据采集频率

监测仪器	精度	采集频次	平行观测频次
激光位移仪	0.01 mm	1次/4 h	1次/d
数显式收敛计	1 mm	1次/(1~2)d	1次/月
流量计		1次/d	1次/d

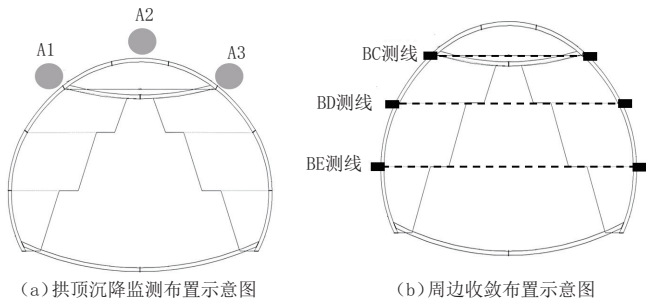


图2 隧道断面监测布置示意图

约79.3、87.1、81.9 mm,表现出较大的变形,各断面的累计沉降值均超过了《铁路隧道监控量测技术规程》(Q/CR921—2024)^[16]中V级围岩沉降变形的规定。尤其在DK430+575-GD00断面累计下沉量最为显著。这些变形主要由于全风化花岗岩围岩结构松散、抗剪强度低、水敏性强,极易在开挖扰动下发生大范围变形,故此对隧道的支护结构进行了优化。而在支护优化后的区域,选取的断面DK430+620-GD00显示出累计下沉量保持在53.9 mm以内,相比断面DK430+595-GD00其拱顶累计下沉量减少了约38.1%。从约第35 d起,沉降趋于稳定,围岩塑性区发展受到明显遏制,说明“超前支护密度加密+微台阶+快速初期支护”组合工法对围岩早期失稳控制具有明显效果。

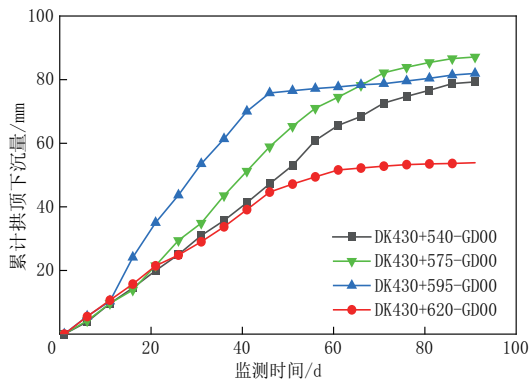


图3 隧道累计拱顶下沉量历时曲线

4.3 隧道周边收敛

图4所示为隧道施工过程中不同监测断面的累计周边收敛值随时间变化的曲线。支护优化前的断面DK430+540-GD00、DK430+575-GD00、DK430+595-GD00累计收敛值分别为77.4、80.4、84.9 mm,各断面的累计沉降值也均超过了规范中对隧道沉降变形的规定,对于这是由于优化前的支护方案未能有

效应对全风化花岗岩的特殊地质条件,导致围岩变形较大。而支护优化后的断面DK430+620-GD00的累计收敛值显著较低,累计周边收敛值为44.2 mm,相比断面DK430+595-GD00减小了47.9%,曲线斜率明显降低,初期收敛速率降至1.1 mm/d以内,下降幅度近50%;曲线拐点出现在约第40 d,较优化前提前15~20 d,说明围岩变形更早趋稳。表明优化方案中小导管密度由0.5 m调整为0.4 m,插入长度延长至15 m,系统锚杆加密及拱架闭合时间前置,有效增强了早期支护刚度和抗扰动能力。

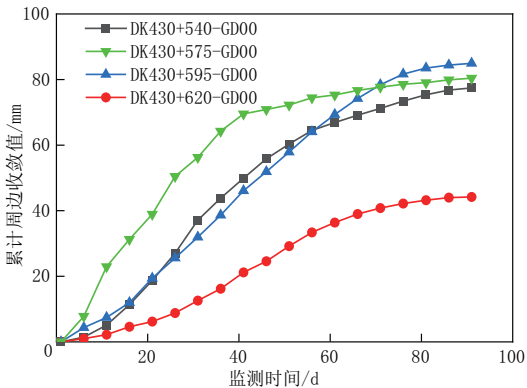


图4 隧道累计拱顶下沉量历时曲线

4.4 隧道涌水监测

图5所示为隧道施工过程中不同监测断面的涌水量随时间变化的曲线。优化前的DK430+540-GD00、DK430+575-GD00、DK430+595-GD00断面涌水量普遍处于22 000~30 000 m³/d,波动较大,最高达约31 000 m³/d,表明围岩渗透性强、水压扰动剧烈。而支护优化后的DK430+620-GD00断面涌水量显著降低,初期控制在15 000 m³/d以内,稳定期降至约11 000 m³/d,波动幅度小,总体下降幅度超60%。结合拱顶沉降与周边收敛数据,优化断面在涌水趋稳的同时,围岩变形速率同步减缓,说明预注浆、仰斜钢花管引排与泄水孔等措施有效释放水压、减缓塑性区扩展,显著提升了围岩稳定性。由此可见,水文控制在优化支护体系中发挥了关键作用。

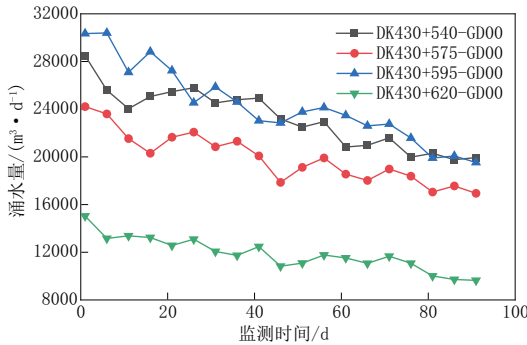


图5 隧道涌水量历时曲线

5 结 论

本文依托某全风化花岗岩浅埋段公路隧道,分析了隧道施工中的技术问题,并针对性的提出了隧道开挖及支护优化措施,借助现场监测对比分析了优化效果。主要结论如下。

(1)采用微台阶临时仰拱法,支护参数优化及早期导水等措施,可有效解决全风化花岗岩地区隧道施工中遇到的隧道局部变形过大、涌水等问题。

(2)原隧道开挖支护条件下,隧道拱顶下沉量和周边收敛值均表现出较大的变形,3个月内的最大累计下沉量和周边收缩值分别达到87.1 mm和84.9 mm,原支护方案无法应对全风化花岗岩的复杂地质条件。

(3)优化后的支护方案通过增加超前支护密度、调整开挖顺序和加强排水系统等,使隧道拱顶下沉量减少了约38.1%,周边收缩值降低了47.9%,涌水量总体下降幅度超60%,满足设计要求,确保了全风化花岗岩地区浅埋隧道的正常施工。

(4)本研究通过对传统支护技术的组合应用进行机制优化与过程耦合,提出了适用于全风化花岗岩浅埋段的系统支护模式。该模式在施工扰动小、支护响应快、水压控制强等方面展现出综合优势。

参考文献:

[1] 杨维彬,张幸,靳昊,等.大岗山隧道近库区富水全风化花岗岩地

层综合施工技术[J].公路工程,2023,48(5):29-35;51.
[2] 茶增云,朱涛,沈孟龙,等.浅埋富水全风化花岗岩公路隧道塌方数值模拟分析[J].施工技术(中英文),2022,51(4):128-132.
[3] 李明,张涛,王力.全风化花岗岩隧道支护设计与施工技术研究[J].岩土工程学报,2021,43(5):1120-1135.
[4] 张伟,刘俊.钢支撑在浅埋隧道中的应用与优化[J].隧道与地下工程,2019,41(8):2334-2345.
[5] 昊浩,赵峰,陈晓.喷射混凝土与锚杆组合支护方案在隧道中的应用研究[J].隧道建设技术,2020,42(4):860-870.
[6] 王磊.基于实时监测的隧道支护优化设计及风险控制[J].土木工程学报,2020,53(12):52-64.
[7] 徐勇,王强.隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J].力学学报,2022,54(4):459-478.
[8] 陈海鹏,魏斌,张场.围岩多变隧道微台阶快速施工技术研究[J].山西建筑,2024,50(16):174-177;189.
[9] 贾思桢.基于剪切试验的全风化花岗岩地层泡沫渣土改良研究[J].四川建筑,2024(1):45-50.
[10] 周辉.高水压水文条件下隧道施工涌水控制技术[J].地下工程与水文地质,2022,50(4):45-54.
[11] 张恒,李浩,刘建.大断面岩隧施工变形监测与预警技术研究[J].隧道与地下工程,2022,42(6):78-88.
[12] 沈佳锋,陈英杰.台阶法数值模拟与现场监测对比分析[J].土木工程学报,2023,56(7):101-110.
[13] 王建华,赵东元,刘志强,等.浅埋隧道施工中围岩稳定控制及信息化施工技术研究[J].岩土工程技术,2021,39(5):88-93.
[14] 张传智,侯羿腾,张辉傲,等.全断面法和微台阶法对大断面隧道Ⅲ级围岩适用性研究[J].四川建筑,2021,41(6):154-158.
[15] 杨家松.单线铁路隧道新微台阶带仰拱一次爆破开挖施工技术研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):83-89.
[16] Q/CR 9218—2024 铁路隧道监控量测技术规程[S].

(上接第319页)

异常的具体位置。

(3)通过提前探测异常位置,做好注水试验,分阶段、控压力进行袖阀管注浆,能够有效填充富水砂卵石地层松散区域和空洞,提高地层的整体稳定性,从而避免发生滞后沉降。

参考文献:

[1] 彭正杰.砂卵石地层地铁隧道盾构施工地面沉降控制探讨[J].甘肃科技,2023(9):14-16;25.
[2] 杜聿笙.砂卵石地层地铁盾构施工沉降处理技术[J].科学技术创新,2023(5):121-124.
[3] 彭斌,徐明鸣,曾子昆.砂卵石地层电力管廊盾构下穿地铁隧道结构稳定分析与安全控制研究[J].工程技术研究,2024,9(20):1-4.
[4] 冯坤伟,龙斌.微动技术在城市轨道交通采空区探测中的应用[J].中国水运,2023(11):143-145.
[5] 田忠,马振硕,伍毅敏.基于马鞍山隧道的预收敛变形监测结果分析及施工优化[J].建筑安全,2025,40(9):14-18.
[6] 张华,王静怡,阮梦.电网工程电缆隧道地质勘察费用组成及控制

措施分析[J].石河子科技,2025(5):22-24.
[7] 张经强.超深埋高承压水复合地层土压盾构下穿西溪湿地保护区建筑物施工技术[J].国防交通工程与技术,2022,20(2):38-42.
[8] 樊芸芳.高铁隧道地表袖阀管注浆加固方法应用研究[J].现代工程科技,2025,4(3):141-144.
[9] 潘勇,刘玉勇.砂卵石地层地铁盾构隧道施工地表沉降变化规律及影响因素[J].四川建筑,2016(6):111-112;116.
[10] 刘亚辉,王亚飞,黄运生,等.小半径曲线隧道盾构施工地面沉降分析[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2020(2):20-25.
[11] 邵建国,汪丹丹.富水砂卵石地层盾构施工沉降控制技术[J].现代职业教育,2018(23):170-172.
[12] 万朝栋.卵石地层盾构施工地层分层沉降特点及减沉技术[J].四川建筑,2021(1):123-125.
[13] 朱玺.袖阀管注浆加固技术在公路隧道砂砾层施工中的应用[J].交通世界,2025(增刊1):218-220.
[14] 荆艳丽.地铁施工袖阀管注浆施工关键技术研究[J].工程机械与维修,2023(4):78-80.
[15] 王瑞强,郭彬彬,梁桃.上跨既有地铁盾构区间地铁工程结构变形控制技术[J].粉煤灰综合利用,2025,39(4):90-94.