

DOI: 10.7672/sgjs2026130140

隧道穿越断层遭遇大型突泥注浆加固与 开挖时空效应分析*

党 亮

(中交建筑集团第五工程有限公司, 陕西 西安 710065)

[摘要] 以跑马山2号隧道穿越F21活动断层过程中多次发生大型突泥为工程背景,系统分析了突泥处治、围岩注浆加固及工后开挖过程中的时空效应。研究表明,断层破碎带内的糜棱岩与断层泥具有一定的自稳性和相对阻水性能;采用管束挤密注浆与刚性管束相结合的固结锚固体系,显著增强了围岩整体性,将每循环开挖支护时间由19h缩短至12~13h,为隧道快速开挖与拱效应形成争取了关键时间窗口。研究进一步揭示,隧道开挖与支护过程受时空效应影响显著,表现为不可逆的非线性演化特征,掌子面围岩暴露12~18h为初期支护的关键期;围岩收敛与暴露时间呈正相关,最大累积沉降为4.5mm,沉降速率不超过0.04mm/d。施工中应综合考虑围岩先期变形与掌子面挤出变形,采用微台阶法结合强支护与早期闭合措施,有效控制后方围岩变形。

[关键词] 隧道;围岩;断层;加固;注浆;时空效应

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0140-05

Analysis of Time-space Effect of Grouting Reinforcement and Excavation when Tunnel Passes Through Faults Encounters Large Mud Bursts

DANG Liang

(CCCC Construction Group Fifth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Based on the engineering background of large-scale mud inrush in the process of Paomashan No. 2 tunnel crossing F21 active fault, the time-space effect in the process of mud inrush treatment, surrounding rock grouting reinforcement, and post-construction excavation is systematically analyzed. The research indicates that the mylonite and fault gouge in the fault fracture zone have certain self-stability and relative water resistance. The consolidation anchorage system combined with tube bundle compaction grouting and rigid tube bundles significantly enhances the integrity of surrounding rock and shortens the excavation support time from 19h to 12~13h per cycle, which secures a critical window of opportunity for the rapid excavation of the tunnel and the formation of the arch effect. The study further reveals that the tunnel excavation and support process is significantly affected by the time-space effect, which is characterized by irreversible nonlinear evolution. The exposure of the surrounding rock of the tunnel face for 12~18h is the critical period of the initial support. The convergence of surrounding rock is positively correlated with the exposure time. The maximum cumulative settlement is 4.5mm, and the settlement rate does not exceed 0.04mm/d. In the construction, the early deformation of surrounding rock and the extrusion deformation of the tunnel face should be considered comprehensively, and the micro-bench method combined with strong support and early closure measures should be adopted to effectively control the deformation of the surrounding rock in the rear.

Keywords: tunnels; surrounding rock; faults; reinforcement; grouting; space-time effect

* 中交建筑集团第五工程有限公司科研课题;川藏高速公路深埋隧道穿越宽富水活性断层超前全封闭支护成套技术研究与应用

[作者简介] 党 亮,项目经理,高级工程师,E-mail:1585639753@qq.com

[收稿日期] 2025-10-21

0 引言

隧道在断层及破碎带等不良地质围岩中施工,开挖过程极易出现突泥、突水情况。一旦发生突泥、突水,需要根据围岩的不同类型,寻求对应的加固方式进行处治。研究隧道穿越活断层的糜棱岩注浆改善技术与开挖时空效应分析尤为重要。为保证隧道发生突泥后的安全高效清淤和溃口处治以及前方围岩的超前预加固,相关人员进行大量研究。张民庆等^[1]在铁路隧道不良地质突水突泥治理技术与工程应用中提出引进专业化队伍,按照“注浆加固、减压排水”的原则,采取“注浆改良+加筋锚固+超前管棚”的注浆技术和专业化管理模式进行综合处理。杜茜^[2]在扬武隧道3号横洞发生突水突泥后的原因分析及治理措施中提出:由于现有探测技术手段的局限性,很难准确预测和防治隧道突水突泥的发生,建议采取超前预加固措施预防突水突泥的发生。孔少波等^[3]提出一种水平袖阀管深孔注浆辅助工法,并将其与超前小导管注浆进行多方面综合对比,发现水平袖阀管深孔注浆效果优于超前小导管注浆。以上研究为隧道发生突泥后的安全、高效清淤和溃口处治以及前方围岩的超前预加固研究提供了参考。

在隧道采取管束注浆处治后,如何开挖快速形成初期支护体系拟制变形,相关研究认为,隧道在开挖掘进和支护过程对围岩周边应力存在强烈影响^[4]。随着隧道工程向深部、复杂地质条件延伸,突泥灾害的预测与防控研究不断深入。李术才等^[5]系统总结了隧道与地下工程灾害防控理论与技术体系,提出了“预报-防控-治理”一体化的治理思路,为断层带突泥治理提供了理论支撑。王梦想等^[6]针对高压富水断层提出“以堵为主、限量排放”的注浆治理原则,并在多个深埋隧道中成功应用。此外,刘泉声等^[7]通过模型试验研究了断层破碎带注浆加固体的力学特性,揭示了注浆压力与浆液扩散半径的关系,为精准注浆设计提供了依据。

掌子面对隧道围岩变形有很大影响,随着掌子面距离的增加,掌子面提供的抗力作用减小,围岩需要的抗力逐渐由衬砌提供,这就是围岩应力释放的空间效应^[8-9]。另外,围岩衬砌支护时间与围岩应力释放程度有关,确定围岩应力释放程度和衬砌获得抗力程度,这就是围岩支护的时间效应。根据围岩类型和隧道洞形,进行时空效应分析,能够确定支护位置、方式和时间,确保围岩稳定。但是,时空分析需要对围岩现状具有足够的判断能力、对支护结构的选择能力和工程经验,对于工程技术人员

是一种挑战。

本文以跑马山2号隧道为工程背景,在发生大型突泥后进行时空效应分析,采用刚性管束注浆改善围岩,采用微台阶开挖支护法成功处治了隧道穿越活断层造成的突泥问题,研究成果可为类似隧道穿越断层发生的突泥处治及开挖提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

跑马山2号隧道隧址区位于由鲜水河NW向构造带、龙门山NE向构造带、川滇SN向构造带3个构造带组成的“Y”字形构造中心,区域地质构造十分复杂,隧道施工需穿越2条较大断裂带(F20-120m,F21-500m),其中F21断层为压扭性活性断层,断层核心区破碎带宽度278~287m,由糜棱岩、断层泥、构造角砾等组成。糜棱岩呈粉末状,遇水迅速软化成泥,亦称断层泥,极软弱,易崩解,为相对隔水层。糜棱岩、断层泥、构造角砾在高压水作用下一旦遭到破坏,其后的断层破碎带岩体在掌子面及拱部极易形成塌方体,暴发涌水突泥。

1.2 不良地质

隧址区内以基岩裂隙含水层为主,对隧道施工有影响的地下水类型主要为榆林压扭性断层(F21)及跑马山断层(F1)破碎带裂隙水,其主要补给源分别为榆林沟(F21断层)及黄家沟(F1断层)地表水及冰雪融水。地质构造受区域性构造的影响,岩体破碎、裂隙十分发育,呈不规则的带状相互连通,加之地表水或冰雪融化的补给,导致探测区富水性强。

隧道施工有影响的工程地质岩组主要为软弱~极软弱榆林压扭性断层(F21)及跑马山断层(F1)破碎带及热液蚀变岩岩性组。破碎带较宽,构造活动及热液蚀变强烈,岩石结构松散,加之富水性强,为隧道施工时大涌水、突泥涌水提供水源的同时提供泥源。

2 突泥处治及地层改善技术

受F21断层影响,跑马山2号隧道左幅BZK15+988m,右幅BYK15+889m处已发生多次突水、突泥地质灾害,累计方量约40 000m³,突泥物质为泥砂+小颗粒+块石。

2.1 隧道突泥原因分析

隧址区受川西地域气候影响,突泥发生在地下水系活动复杂的断层带附近。由于围岩的不均匀性,岩体易形成不同的相对隔水层,地表水渗流通道形成储水囊体,无外力扰动时处于稳定状态。由于洞室开挖破坏了原有稳定的局部地质体,而超前支护未能提供足够的抗力以平衡破坏后的地质结构,导致拱顶部位泥化砂层坍塌后突泥。最开始的

突泥、涌水产生后,破坏了原有地下水平衡状态,上游水体、泥浆下泄,造成大规模突泥涌水状态。突泥、涌水泄压导致地质体受力状态进一步变化,还可能形成局部塌方。

2.2 隧道突泥处治技术

突泥处治总体遵循“探、泄、固、挖”的方式进行,即:采用地质雷达、TSP-3D、EM3D 等进行地质探测,查明隧道周边围岩及塌腔范围;对富水位置采用钻孔泄水泄压,减少周边围岩压力;双层支护内层拱架进一步稳固初期支护,必要时施作径向注浆加固周边围岩;掌子面处进行超前帷幕注浆+管棚后采取微台阶法开挖。

淤泥体表面采用厚度 50cm 喷射混凝土封闭,采用管长 9~15m 的 2 排 $\phi 89\times 4$ 钢管花管或 PVC 管进行滤土排水、纵坡 $\geq 5\%$,如图 1 所示。

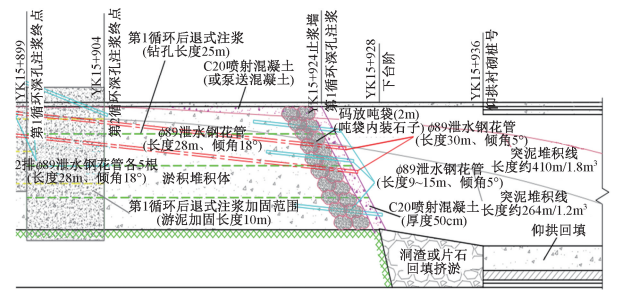


图 1 超前循环注浆稳固淤泥体

Fig. 1 Pre-circulating grouting to stabilize the silt body

掌子面加固采用上半段 25m 水平袖阀管束帷幕注浆+超前中管棚处治。结合地质岩性情况,在 0~10m 松散塌孔段采用前进式注浆。为避免造成掌子面后返浆以及保证止浆墙和初期支护的稳固性,采用 0~6MPa 注浆压力填充加固松散体,达到预控注浆区域加固的目的。在 10~25m 采用袖阀管注浆,注浆压力逐步提高至 10~12MPa,通过引孔下置 15,20,25m 刚性袖阀管束靶向注浆,以控制注浆量并做到精准加固地层,从而达到高压劈裂注浆加固效果。通过刚性袖阀管与地层相互受力,形成锚杆效应,在后期开挖掌子面过程中,可保持其稳固,约束周边地层松弛变形。

设置拦泥坝进行前段清淤后,后段剩余淤积体高度约 7m,充分考虑清淤风险后,在距掌子面 35m 处采取循环注浆固结淤泥体清淤。采用洞渣或片石回填挤淤对淤泥体进行反压回填。沿淤积体坡面布设约 2m 厚吨袋进行抗阻和滤土,如图 2 所示。

2.3 隧道极软岩地层改善技术

经过区域资料、遥感分析、补充地质调查、物探成果及钻孔、施工开挖及超前钻探资料综合分析,

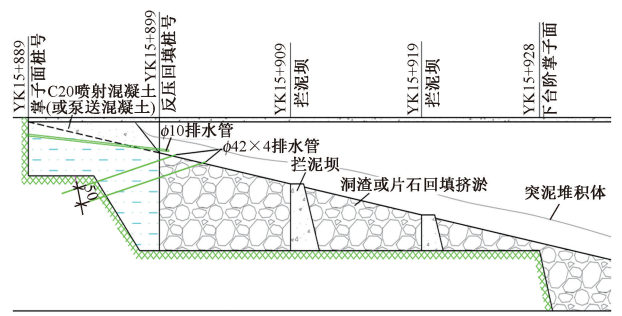


图 2 突泥清淤及残余物质加固

Fig. 2 Mud dredging and residual material reinforcement

F21 榆林压扭性断层影响带宽度约 400m、产状为 $78^\circ\angle 75^\circ$ 。上盘影响带宽度岩性主要为花岗岩,竖向裂隙及羽状裂隙发育,为富水岩层。下盘影响带宽度岩性主要为绿泥片岩、铝土质泥岩等软质岩石,岩体软弱破碎,为相对隔水层。工程区于 2022 年 9 月 5 日发生 $M_s\geq 6.8$ 级地震,受此影响,原本完成的初期支护出现渗水现象,采取一定的措施改善地层是必要的。隧道穿越断层破碎影响带采用掌子面注浆加固和工后周边围岩注浆补强措施。破碎影响带掌子面在施作 30cm 厚网喷混凝土后,利用 6m 长 $\phi 42$ 钢花管或 PVC 管采用双液浆全孔深一次性注浆。先注外侧圈后注内侧圈,同一圈先注上部孔后注下部孔、间隔跳孔,逐渐加密。先注有水区,钻一孔注一孔,注浆压力 0.5~4MPa,开挖 5m,搭接 1m。破碎影响带工后径向注浆范围为拱部 120° ,采用 $\phi 42$ 小导管间距 1.5m 梅花形布置,注浆范围开挖轮廓外 5m,注浆压力 0.5~2MPa。

3 工后开挖时空效应分析

突泥的整个处治过程采用“先帷幕、后管棚”的原则,帷幕注浆施工采取“先外圈、后内圈、外圈预留补充注浆”的顺序进行。水平袖阀管束和管棚施工完成后对掌子面及周边围岩具有一定的锚固和棚架作用。从工后掌子面围岩稳定性的角度分析,采取合理的微台阶开挖工法能够快速形成掌子面初期支护形成拱效应,避免了围岩开挖过程中的多次扰动,在有限的时间内利用时空效应以空间换时间完成初期支护。

3.1 突泥工后特定开挖工法及分析

通过对跑马山 2 号隧道突泥处治工后特定条件下采用开挖工法的实践分析(见表 1),采取单侧壁导坑法开挖时断面小,时空效应转化较慢。开挖轮廓范围内拆除注浆管束用时较长,掌子面开挖支护用时约 19h,围岩暴露时间长。围岩松动圈在长时间临空后应力重新分布,易产生渗水通道,继而破坏注浆加固体,且在围岩加固不均匀时易形成偏

压。其次,单侧壁开挖主要是控制沉降,而几次突泥发生,均是由拱部前方形成较小溃口产生,并不是由于沉降产生裂缝而形成,小空间内掌子面人工作业强度较大,风险较高。

表 1 工后各循环开挖工法及时长

Table 1 Time length of each cycle excavation method after construction			
工作内容	第 1 循环	第 2 循环	第 3 循环
处治长度/m	25	25	25
开挖工法	三台阶预留核心土/侧壁导坑法	微台阶预留核心土	微台阶预留核心土
工后开挖时间及长度	10d/8m	11d/11m	5d/5m
每榀开挖支护时间/h	19	12	13
突出问题	穿越塌腔区	基本正常	多种地层地震影响

采用微台阶法易快速完成上断面初期支护,围岩暴露时间短,以空间换时间,开挖轮廓范围内拆除注浆管束用时短,便于机械化快速施工。掌子面开挖支护用时约 12h,围岩能尽早形成承载拱效应,可相对减小掌子面人工作业数量从而降低风险。

3.2 掌子面工后开挖围岩稳定时效规律

水平袖阀管束注浆处治突泥后,在掌子面开挖时均要进行开挖范围内的管束割除,在开挖围岩暴露 1/3 后进行管束割除施工。通过对跑马山 2 号隧道 3 个循环的工后开挖时长和围岩稳定情况分析发现,工后掌子面开挖过程中随围岩暴露时间的变化,各断面的周边收敛值呈现出有规律的增加,如图 3 所示。

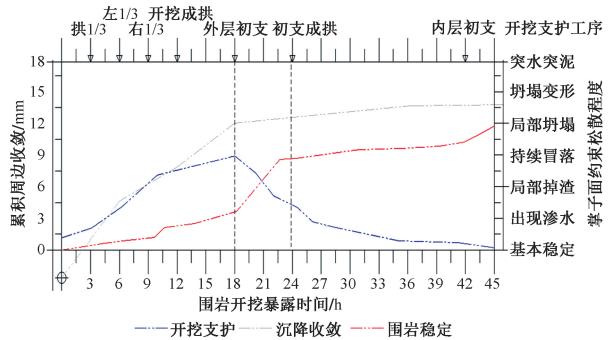


图 3 工后开挖时空效应

Fig. 3 Time-space effect of post-construction excavation

由图 3 可知,当掌子面开挖时长超过 18h,掌子面在局部渗水位置出现掉渣,随围岩暴露时间的增加,掉渣会持续增加达到一定数量继而形成冒落。围岩收敛在开挖后随围岩暴露时间呈持续增长态势,在开挖支护前 6h 增长较为快速,在 12~18h 支

护施工中速率有所增加,在完成上台阶初期支护形成承载拱后,速率明显呈减弱态势。

由此可见,掌子面围岩开挖 12~18h 为围岩完成初期支护的关键期。在此之前围岩呈开挖后向临空面应力释放性变化,之后呈围岩失去锚固约束的扰动变化。周边围岩的收敛与掌子面围岩开挖暴露的时间呈正比,与围岩的初期支护时间呈反比。围岩松散程度与掌子面暴露时长呈正比关系,但在初期支护形成后各项速率均呈下降趋势。上台阶初期支护形成后,围岩监测数据表明上台阶初期支护基本稳定,如表 2 所示,说明采取的工法是有有效的。管束帷幕注浆后掌子面前方核心土的约束效应显著,位移分布较为均匀,掌子面后方围岩变形速率增加。在完成双层拱架支护后,各阶段变形分布呈现明显的相似特征。

表 2 工后围岩监测数据

Table 2 Monitoring data of surrounding rock after construction			
点号	累积沉降/mm	沉降速率/(mm·d ⁻¹)	相对上次变化值/mm
K15+914(拱顶)	4.5	0.03	0.5
K15+914(左侧)	2.2	0.04	0.7
K15+914(右侧)	2.6	0.01	0.1
K15+910(拱顶)	4.4	0.01	0.2
K15+910(左侧)	4.3	0.03	0.5
K15+910(右侧)	3.1	0.02	0.3
K15+908(拱顶)	3.8	0.03	0.6
K15+908 左侧)	2.1	0.02	0.3
K15+908(右侧)	4.0	0.03	0.6

由表 2 中可知,工后围岩沉降收敛速率不大,但多集中于拱脚,结合现场实际开挖分析,帷幕注浆薄弱点多集中于拱顶两侧 2m 左右,呈现局部掉块,围岩拱脚变形相对上部较大。处治后隧道上导洞围岩变形分布较为均匀,最大值出现在拱顶或拱肩位置,拱顶径向位移可作为隧道工程重要的安全指标。

3.3 各工序周边收敛变化规律

隧道突泥处治后各工序施作效果如图 4 所示。围岩开挖在上、下台阶施工影响段内围岩拱顶沉降及收敛接近峰值。在下台阶施工影响段内累积沉降和收敛略有增加。

各工序开挖周边收敛时程曲线如图 5 所示,上台阶宜在 18h 内完成,间距控制在 3m 左右,且双层拱架安装宜在 18d 完成,在上台阶双层拱架施工后围岩沉降收敛暂时稳定。下台阶间距控制在 6m 左右,仰拱控制在 14m 左右,下台阶及仰拱在围岩初期支护稳定约 36d 内完成。

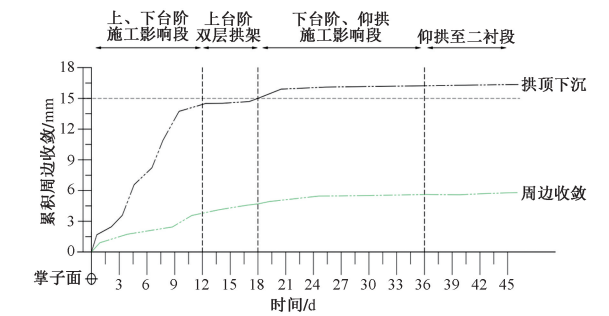


图 4 工后开挖各影响段围岩收敛

Fig. 4 Surrounding rock convergence of each affected section after excavation

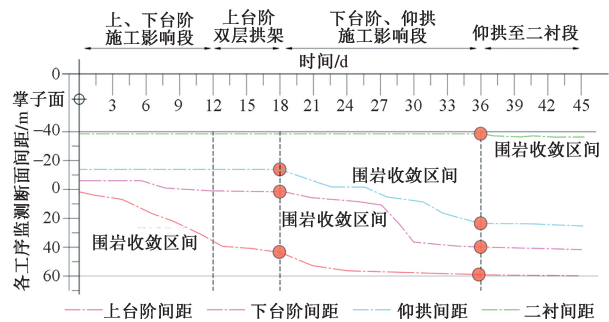


图 5 各工序开挖周边收敛时程曲线

Fig. 5 Convergence time history curves of excavation periphery in each process

由此可见,周边围岩的收敛与各工序之间距掌子面的距离密切相关,围岩周边收敛在上下台阶施工影响段变化速率呈类直线型变化;在双层拱架完成后至二衬施作前变化速率明显变缓,趋于稳定;围岩周边收敛随上台阶距掌子面距离呈反向类直线变化,速率小于上下台阶影响段变化速率;下台阶及仰拱施工影响段随时间及工序开挖时段变化,完成后速率渐缓趋于稳定。

4 结语

1)突泥成因主要为断层带内相对隔水层在施工扰动下失稳破坏,导致泥化砂层坍塌形成。采用“水平袖阀管束帷幕注浆+刚性管棚”体系,可实现高压劈裂与靶向加固,有效约束围岩松弛变形。

2)微台阶法施工显著缩短围岩暴露时间,每循环支护时间由 19h 降至 12~13h,利于快速形成承载拱效应,降低施工风险。围岩收敛与暴露时间呈正相关,最大累计沉降为 4.5mm,沉降速率 $\leq 0.04\text{mm/d}$ 。

3)围岩变形具有明显时空效应:掌子面暴露 12~18h 为初期支护关键期;上台阶宜在 18h 内完成,间距控制在 3m 左右;双层拱架宜在 18d 内闭合;下台阶与仰拱应在 36d 内完成,以有效控制后方围岩变形。拱顶径向位移是关键的变形控制指标。

参考文献:

[1] 张民庆,彭峰,邹明波,等. 铁路隧道不良地质突水突泥治理技术与工程应用[J]. 铁道工程学报,2013(9):65-71.
ZHANG M Q, PENG F, ZOU M B, et al. Control technology for water and mud bursting of railway tunnel under unfavorable geological conditions and its engineering application[J]. Journal of railway engineering society,2013(9):65-71.

[2] 杜茜. 扬武隧道 3 号横洞工区突水突泥原因分析及治理措施[J]. 城镇建设,2021(2):65-66.
DU Q. Cause analysis and control measures of water intrush and mud outburst in No. 3 transverse tunnel work area of Yangwu tunnel[J]. Urban and rural studies,2021(2):65-66.

[3] 孔少波,王兴猛,张玉川. 水平袖阀管深孔注浆在广州地铁的应用[J]. 现代隧道技术,2003(4):46-51.
KONG S B, WANG X M, ZHANG Y C. Application of deep hole grouting with horizontal sleeve valve pipe in Guangzhou metro[J]. Modern tunnelling technology, 2003(4): 46-51.

[4] 周子寒,何川,陈子全,等. 基于围岩变形主动控制理念的隧道支护时机虚拟支撑力法[J]. 中国铁道科学,2022,43(6):76-88.
ZHOU Z H, HE C, CHEN Z Q, et al. Virtual supporting force method for tunnel support timing based on the concept of active deformation control of surrounding rock [J]. China railway science,2022,43(6):76-88.

[5] 李术才,刘人太,张庆松,等. 隧道与地下工程灾害防控理论与技术体系[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(7):1297-1316.
LI S C, LIU R T, ZHANG Q S, et al. Theory and technical system for disaster prevention and control in tunnel and underground engineering[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(7): 1297-1316.

[6] 王梦想,黄宏伟,张志强,等. 高压富水断层隧道注浆治理关键技术研究[J]. 岩土力学,2021,42(3):789-800.
WANG M X, HUANG H W, ZHANG Z Q, et al. Key technologies of grouting treatment for high-pressure water-rich fault tunnels[J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 789-800.

[7] 刘泉声,黄震,刘建平,等. 断层破碎带注浆加固体力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(5):882-894.
LIU Q S, HUANG Z, LIU J P, et al. Experimental study on mechanical properties of grouting-reinforced body in fault fracture zone[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2022, 41(5): 882-894.

[8] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):123-127.
FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation[J]. Construction technology,2025,54(9):123-127.

[9] 危皓,张帅,李庆鑫,等. 隧道两台阶预留核心土法施工参数优化研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(1):54-61.
WEI H, ZHANG S, LI Q X, et al. Study on optimization of tunnel construction parameters of two-step reserved core soil method[J]. Construction technology,2025,54(1):54-61.