

DOI: 10.7672/sgjs2026130122

软弱围岩变形开裂机理与整治措施分析*

范胜元

(中铁二十局集团有限公司博士后工作站,陕西 西安 710016)

[摘要] 针对软弱隧道围岩变形与初支开裂问题,针对软岩地层中隧道初支喷混开裂、剥落的工程灾害,采用机理分析、数值模拟和现场实测相结合的方法开展了相关研究。基于灾变机理分析和数值模拟验证提出了优化开挖步距参数,并辅以围岩注浆和加强支护结构刚度的综合措施来防治软岩变形和初支开裂。结果表明:通过优化支护参数,提升系统整体刚度,能够有效改善支护结构应力分布,抑制裂缝的扩展;采取围岩注浆和强化初支纵向刚度的同时缩短开挖进尺(取1.0m),既保证了隧道施工进度又有效控制了围岩变形开裂。围岩最大水平收敛和拱顶沉降实测值分别为84.58mm和144.85mm,围岩与拱架最大内力分别为432.16kPa和32.95kN,确保了隧道结构安全顺利施工。

[关键词] 隧道;软弱围岩;支护;开裂;变形;数值模拟

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0122-05

Analysis of Deformation and Cracking Mechanism of Weak Surrounding Rock and Remedial Measures

FAN Shengyuan

(Post-doctoral Research Workstation of China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: To address the issues of deformation in soft rock tunnel surrounding rock and cracking in initial support, research was conducted by combining mechanism analysis, numerical simulation, and field measurements, based on engineering failures such as cracking and spalling of sprayed concrete in initial support within soft rock formations. Based on the analysis of failure mechanisms and validation through numerical simulation, optimized excavation advance parameters were proposed, supplemented by comprehensive measures such as grouting of the surrounding rock and enhancing the stiffness of the support structure to prevent deformation in soft rock and cracking of the initial support. The results indicate that optimizing support parameters to enhance the overall stiffness of the system can effectively improve the stress distribution within the support structure and suppress crack propagation. Implementing ground grouting and strengthening the longitudinal stiffness of the initial support while shortening the excavation advance (set to 1.0m) ensures both the progress of tunnel construction and effective control of ground deformation and cracking.

Keywords: tunnels; soft rock; supports; cracking; deformation; simulation

0 引言

隧道工程建设面临着日益复杂的地质与施工难题,如围岩变形、支护失稳、冒顶坍塌等^[1-2];特别是软弱围岩地层中,受复杂应力与施工扰动共同作

用,围岩极易发生变形失稳^[3-5]。刘勇等^[6]基于深埋隧道渐进塌落机制探讨了偏压作用下围岩坍塌演化过程,对隧道拱顶塌方过程进行了有效预测。疏梓宸等^[7]通过模型试验分析了卸荷扰动下隧道支护结构受力演化规律,并提出了针对性控制措施以解决实际工程问题。

合理的开挖与支护工法对确保围岩稳定和工程施工安全意义重大^[8-10]。张弘智等^[11]关于软弱围岩的大变形问题,提出了“强化支护+分步开挖+

* 中国博士后科学基金(2024M763843);陕西省博士后科学基金(2025S349406);陕西省岩土与地下空间工程重点实验室开放课题(2025002)

[作者简介] 范胜元,博士后,工程师, E-mail: fanshengyuan@xauat.edu.cn

[收稿日期] 2026-01-20

围岩注浆”的软弱围岩变形综合防控技术。王凯^[12]和陈孔福等^[13]针对实际问题,探究了偏压隧道围岩失稳机理并提出注浆加固措施,为解决类似工程问题提供了参考。

针对软弱围岩变形和初支开裂问题,本研究基于病害机理分析,提出了优化施工参数、进行围岩注浆和强化拱架结构整体刚度等措施来防治围岩变形。现场实测数据表明:减小开挖进尺并进行围岩注浆和加强拱架结构刚度的控制措施可保证围岩变形稳定和施工安全。

1 工程概况

依托隧道全长 1 860m,埋深约 160m,隧道设计断面净空面积为 30.26m²,属于小断面隧道。隧道上覆土层依次为残坡积土(厚 2~9m),强风化泥岩(节理裂隙发育),基岩为中风化灰质泥岩(局部岩体破碎)。地下水主要包括孔隙渗水与裂隙水,流量约为 0.1L/s,极易引起围岩软化。隧道灾变段地质剖面如图 1 所示,土体参数如表 1 所示。

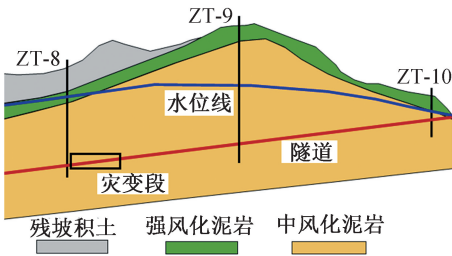


图 1 灾变段地层剖面

Fig. 1 The stratigraphic section of the disaster section

表 1 岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters

土层	弹性模量 <i>E</i> /GPa	重度 γ /(kN·m ⁻³)	泊松比 μ	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /(°)
残坡积土	2.18	17.8	0.19	12.8	20.5
强风化泥岩	13.25	19.2	0.36	18.5	21.8
中风化灰泥岩	40.55	23.5	0.27	11.2	25.5

隧道进口段为 VI 级围岩,岩体破碎且承受偏压作用、稳定性较差,失稳、坍塌风险较高。受构造运动影响,泥岩地层中裂隙发育并被泥质填充,围岩破碎,开挖扰动后容易变形、坍塌,加大了隧道灾害风险。

2 病害特征和机理分析

2.1 病害特征分析

进口段左、右边墙喷混存在非对称混合裂缝,局部伴有剥落现象。斜裂缝宽度为 0.5~2mm,且具有一定的扩展性;受顺层偏压挤压作用,纵向裂缝(宽度在 1~2mm)主要集中在拱肩位置,拱顶张拉裂缝宽度超过 2.5mm,局部裂缝伴有渗水现象。现

场喷混病害如图 2 所示。

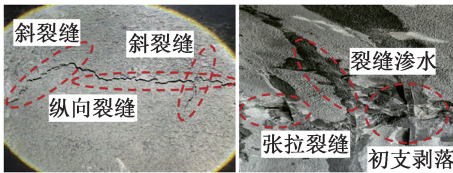


图 2 现场喷混病害

Fig. 2 On-site spray mixing disease

2.2 病害机理分析

2.2.1 复杂地层条件

围岩埋深较浅且风化严重,同时在偏压作用下岩体受力不均,稳定性较差;洞身段岩体构造发育,存在断层和破碎带等不良地质,稳定性差。此外,地下水溶蚀作用引起围岩强度和承载力降低,易发生大变形和初支开裂。

2.2.2 设计与施工参数

受地质勘探局限性约束,施工设计和现场地质条件存在偏差,导致施工方法和支护措施选取不准确;开挖进尺等参数会引起围岩卸荷剧烈,增加了围岩变形和开裂的风险。

2.3 软弱围岩变形和初喷开裂防治措施

- 1)改用微台阶开挖法施工,分别选取开挖步距 *B* 为 0.8,1.0,1.2m 开展参数优化。
- 2)进行围岩注浆以增强围岩的整体性。
- 3)加密设置钢架并通过钢筋连接来提高钢拱架整体刚度。
- 4)增设锁脚锚杆以控制围岩变形。

本研究将开展数值模拟分析,探讨上述综合加固措施下软弱围岩、支护结构的稳定性并指导施工;同时,根据现场监测结果评价基于病害机理分析提出的工法优化和综合控制措施。

3 数值验证分析

3.1 模型构建

3.1.1 模型尺寸

本研究采用岩土工程专用有限元软件进行围岩变形和支护受力分析。为充分考虑现场地层偏压作用的影响,结合地勘资料顺隧道开挖方向(*y* 轴方向),在模型顶面沿隧道中轴线左右两侧施加非对称荷载(见图 3)。为保证计算结果可靠有效,充分考虑隧道开挖影响范围,模型轮廓尺寸为:*x* = 60m,*y* = 100m,*z* = 80m,3D 数值模型如图 3 所示。

3.1.2 材料参数

结合地勘资料和室内试验数据得到模型材料参数如表 2 所示,其中注浆后围岩取等效强度参数。

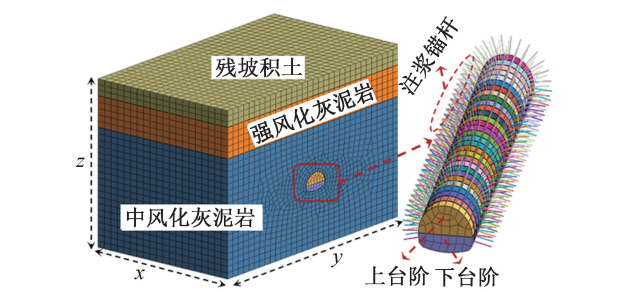


图 3 3D 数值模型

Fig. 3 3D numerical model

表 2 支护结构材料参数

材料	弹性模量	重度 γ /	泊松比	厚度/长度	直径
	E/GPa	$(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	μ	L/mm	d/mm
原岩参数	7.8	18.6	0.35	—	—
等效强度参数	10.3	20.5	0.28	—	—
注浆锚杆	200.0	76.5	0.32	4 500	28
喷混	30.0	24.5	0.25	300	—
钢拱架	220.0	78.0	0.33	22	—
二衬	35.0	25.5	0.25	500	—

3.2 结果分析

3.2.1 围岩变形分析

提取并整理围岩变形数据,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,不同开挖参数下的围岩变形演化过程相似,累积变形量随开挖步距 B 的加大而增加明显。刚开挖完成时岩体的变形速率与开挖步距成正比,前 11 个施工步下 1.2m 开挖步距对应的围岩收敛变形 81.27mm,较其他两种步距分别高 233.21% 和 94.80%;对应的拱顶沉降变形为 135.29mm,较其他两种步距分别高 56.39% 和 16.01%。施工完成后,0.8 和 1.0m 步距下的围岩变形趋于稳定,而 1.2m 步距下的围岩仍产生变形。监测结束时,1.2m 步距下围岩累积收敛变形达到 114.65mm,较其他两种步距分别高 41.86% 和 20.72%;对应的围岩累积沉降变形为 159.95mm,较其他两种步距分别高 17.20% 和 9.92%。

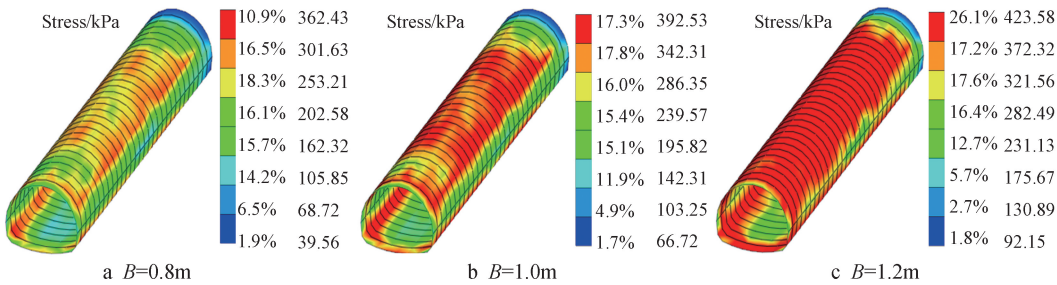


图 5 初支应力云图

Fig. 5 Cloud map of initial support stress

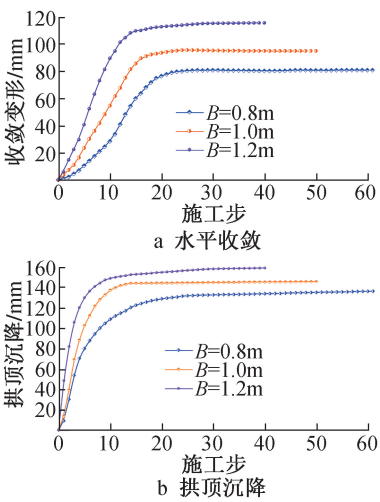


图 4 不同步距下围岩变形结果

Fig. 4 Deformation results of surrounding rock under asynchronous distance

3.2.2 初支应力分析

统计不同步距下初支应力情况,结果如图 5 所示。由图 5 可知,在开挖扰动和挤压应力联合作用下,隧道拱顶与拱肩部位的初支应力发展最快且累计应力值最大;开挖步距 $B=1.2\text{m}$ 时的初支累积应力分别比其他两种步距提高了 16.87% 和 7.91%。受后续开挖扰动影响,沿隧道纵向不同断面处初支应力呈非均匀分布,增大了初支结构环向开裂风险。

各步距下的隧道围岩和支护结构累积受力变化过程相似,1.2m 开挖步距下的围岩变形和初支受力均较大,威胁隧道的施工稳定;围岩变形和初支受力结果表明另外两种步距均满足隧道的安全施工需要,考虑隧道工程施工进度和成本,本工程选取开挖步距 B 为 1.0m。

4 现场施工及监测结果分析

4.1 现场施工及监测

施工时通过布设压力盒和钢筋计等元器件来获取围岩和钢拱架的受力变化结果;同时采集围岩沉降和收敛变形数据进行隧道结构稳定性分析。具体控制措施施作和监测点布设结构如图 6 所示。

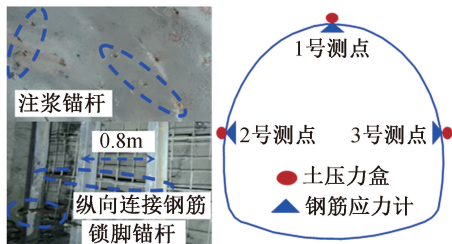


图 6 控制措施和监测点布设情况

Fig. 6 Control measures and layout of measurement points

4.2 围岩变形分析

隧道围岩变形和应力实测结果如图 7 所示。

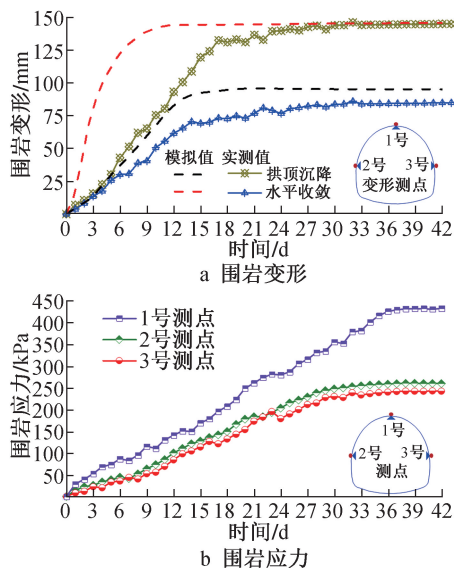


图 7 围岩变形和应力实测结果

Fig. 7 The measured results of deformation and stress of surrounding rock

由图 7a 可知,开挖前期围岩收敛和沉降变形发展较快,前 12d 两种变形分别占累积变形量的 59.74%和 51.98%。钢拱架施作后变形速率减小,但累积变形仍继续增大,在 11~20d 内累积收敛和沉降变形分别为 22.38,50.55mm。成环后的支撑结构整体刚度得到加强,可有效约束围岩变形;最终两种变形累积达到 84.58,144.85mm,控制了围岩稳定和初支的开裂失稳。实测围岩整体收敛和沉降变形仍较大,施工过程中应加强围岩变形监测,必要时停工并采取专项控制措施确保施工安全。

由图 7b 可知,各测点围岩压力波动变化且呈非均匀分布特征;开挖初期围岩应力增大较快,开挖第 7 天时 3 个测点位置围岩压力值为 86.48,44.7,35.82kPa,累积增加较快。持续开挖并施作支护结构,上部位置围岩的压力不断累积;开挖 29d 后,拱顶和左右拱腰处的压力值均超过各测点应力累积值的 76%。支撑结构施作并成环后,下部围岩的应

力逐渐趋稳,但拱顶处围岩压力仍不断增大。开挖完成(39d)后的围岩体应力变得稳定,最大压力发生在拱顶位置,为 432.16kPa;考虑地层偏压的不利因素,拱腰位置的围岩受压明显,最大应力为 259.79,242.11kPa,保证了围岩稳定^[14]。

4.3 拱架内力分析

处理元件采集数据获得拱架内力变化过程,结果如图 8 所示。

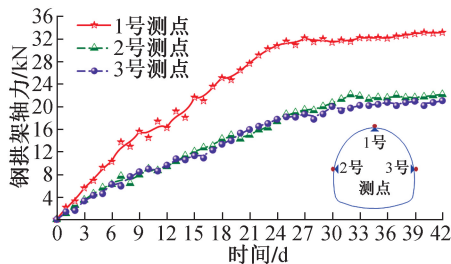


图 8 拱架内力变化

Fig. 8 Change of arch internal force

由图 8 可知,拱架内力演化规律和围岩受力结果一致,初期的钢拱架即刻发挥承载约束作用,其轴力快速增大并有效抑制了围岩变形;初支施作 9d 时,3 个测点的钢拱架轴力分别达到 12.93,6.35,7.56kN。仰拱施作后,钢拱架累积内力不断增大;第 29 天时,拱顶与拱腰部位钢拱架轴力分别占累积值的 94.94%,87.11%,84.37%。随着围岩应力调整和变形完成,钢拱架内力趋于稳定;监测结束后,3 个测点的拱架轴力分别为 32.95,22.12,20.99kN,保证了隧道支护结构安全。

5 结语

针对隧道软弱围岩变形与初支开裂问题,本研究依托实际工程软弱围岩地层中隧道喷混开裂、剥落问题,结合灾变机理分析和数值模拟方法,确定了辅以综合加固措施的微台阶开挖工法(开挖步距 $B=1.0\text{m}$)。结合实测数据分析了围岩变形和支护结构受力特征,探讨并评价了综合控制措施的有效性,主要结论如下。

1) 围岩变形和应力均随开挖步距的增加而增大,两种结果均先快速增大后逐渐趋于稳定。当步距 B 为 1.0m 时,围岩收敛和沉降变形分别为 94.97,144.08mm,初支应力为 392.53kPa,确保了围岩稳定与结构安全;结合施工进度要求,选取步距 $B=1.0\text{m}$ 进行施工。

2) 开挖初期围岩变形累积增长较快且呈波动式增加,前 12d 围岩的两种变形分别为累积变形量的 59.74%和 51.98%。支护结构封闭成环后整体刚度提高保证了围岩变形稳定;最终围岩收敛和沉

降值分别为 84. 58mm 和 144. 85mm,避免了初支开裂、失稳。

3)钢拱架受力演化规律和围岩相似,施作初期拱架内力快速增大,待其与仰拱封闭成环后内力慢慢变得稳定。表明钢拱架能够充分发挥承载作用并有效约束了围岩变形。

4)受偏压和后续施工扰动作用,不同测点位置的围岩和支护结构受力呈非均匀分布,拱顶位置的围岩和拱架内力最大,分别为 432. 16kPa 和 32. 95kN;拱腰处两种内力值次之且分布均匀;实际施工过程中应加强围岩拱顶处变形和支护结构受力监测,以确保隧道施工安全。

参考文献:

[1] 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.

[2] 谭忠盛,赵金鹏,张宝瑾. 超大埋深软岩隧道大变形机理及控制技术研究——以滇藏铁路丽香线哈巴雪山隧道为例[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(12):2307-2315.
TAN Z S,ZHAO J P,ZHANG B J. Mechanism and control of large deformations in super-deep soft rock tunnels;a case study of haba snow mountain tunnel on Lijiang-shangri-la line of Yunnan-Xizang railway [J]. Tunnel construction, 2024, 44 (12): 2307-2315.

[3] 付大喜,李世鑫,翁效林. 复杂工况下高地应力软岩隧道变形特征与影响机制[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):345-354.
FU D X,LI S X,WENG X L. Deformation characteristics and influence mechanism of soft rock tunnel with high in-situ stress under complex working conditions [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology,2022,54(3):345-354.

[4] 陶志刚,于海军,雷啸天,等. 构造应力作用下软岩隧洞大变形机理及控制技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2025,7(5):118-131.
TAO Z G,YU H J,LEI X T,et al. Large deformation mechanism and control technology of soft rock tunnel under tectonic stress [J]. Journal of mining and strata control engineering, 2025, 7 (5): 118-131.

[5] 陶志刚,许闯,李勇,等. 深埋高应力隧道软岩大变形开挖补偿控制研究[J]. 西安科技大学学报,2025,45(1):86-97.
TAO Z G,XU C,LI Y,et al. Research on compensatory control of large deformation excavation in soft rock of deep buried high stress tunnel [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2025,45(1):86-97.

[6] 刘勇,田野,宋玉香,等. 深埋软岩隧道纵向塌落拱形态特征及影响因素研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(2):50-57.
LIU Y,TIAN Y,SONG Y X,et al. Study on the shape characteristics and influencing factors of longitudinal collapse

arch in deep buried soft rock tunnel [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (natural science edition), 2025, 38 (2): 50-57.

[7] 疏梓宸,刘阳,张建经,等. 深埋软岩隧道围岩力学响应及支护受力特性模型试验研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(3):184-193.
SHU Z C,LIU Y,ZHANG J J,et al. Mechanical response of surrounding rock and supporting structure stress characteristics in deep-buried soft rock tunnel;a model test study [J]. Modern tunnelling technology,2024,61(3):184-193.

[8] 郑可跃,施成华,杨益,等. 顺层偏压挤压性软岩隧道让压预留变形角支护技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(10):2058-2068.
ZHENG K Y,SHI C H,YANG Y,et al. Yielding support technology with a reserved deformable angle for squeezing soft rock tunnels in layered biased strata [J]. Tunnel construction, 2024,44(10):2058-2068.

[9] 王耀龙,梁庆,尹帆. 软岩大变形公路隧道施工控制技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):135-139.
WANG Y L,LIANG Q,YIN F. Construction control technology of soft rock large deformation highway tunnel [J]. Construction technology,2025,54(9):135-139.

[10] 邓祥辉,贺海龙,王睿,等. 深埋软岩隧道上中台阶开挖锁脚锚管倾角优化研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(6):1152-1161.
DENG X H,HE H L,WANG R,et al. Optimization of inclination angle of locking anchor pipe during excavation of upper and middle steps of deeply buried soft rock tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2025,47(6):1152-1161.

[11] 张弘智,王德远,吴克华,等. 洞口隧道与洞旁支护体同步开挖施工工况研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):139-143.
ZHANG H Z,WANG D Y,WU K H,et al. Construction condition of synchronous excavation of entrance tunnel and supporting beside [J]. Journal of water resources and architectural engineering,2019,17(3):139-143.

[12] 王凯. 深部高应力巷道破碎围岩注浆加固技术研究[J]. 石化技术,2025,32(10):184-185.
WANG K. Study on grouting reinforcement technology of broken surrounding rock in deep high stress roadway [J]. Petrochemical industry technology,2025,32(10):184-185.

[13] 陈孔福,申玉生,赵何霖,等. 基于破碎带围岩变形受力特征的偏压隧道控制措施研究[J]. 工程地质学报,2025,33(2):621-631.
CHEN K F,SHEN Y S,ZHAO H L,et al. Study on control measures in bias tunnel based on de-formation and mechanics characteristics of surrounding rock in fracture zone [J]. Journal of engineering geology,2025,33(2):621-631.

[14] 杨星智. 软弱围岩变形开裂机理与控制技术研究[J]. 铁道建筑技术,2025(8):164-167,180.
YANG X Z. Research on the mechanism and control technology of deformation and cracking in soft surrounding rock [J]. Railway construction technology,2025(8):164-167,180.