

原位扩挖隧道围岩参数对松动圈蝶形分布影响分析

魏世恭¹, 张路凯², 蒋望涛², 王建望³

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410000; 3. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 原位扩挖是深埋输水隧洞施工中常见的断面调整方式, 在复杂地质及高地应力条件下对围岩稳定性影响显著。为此, 以滇中地区某深埋输水隧洞单隧道原位扩挖工程为例, 结合数值模拟与理论计算等手段, 分析原洞与扩洞施工过程中围岩位移、塑性区及松动圈的演化特征, 探讨围岩松动圈的蝶形分布规律及其影响因素。研究结果表明: 扩洞施工显著放大围岩松动圈范围, V级围岩条件下松动圈最大半径由原洞的约5.3 m增至6.5~7.0 m, 增幅约25%~30%, 松动圈沿拱肩、拱顶方向扩展最为明显; 侧压系数对松动圈形态及主控扩展方向具有决定性影响, 侧压系数 $\lambda = 0.4$ 时角向非均匀性最强, 而 $\lambda = 1.0$ 时松动圈趋于轴对称; 内摩擦角和黏聚力的提高可使松动圈整体尺度分别减小约20%~30%和15%~25%。

关键词: 原位扩挖; 深埋隧洞; 围岩松动圈; 蝶形分布; 参数影响分析

中图分类号: TU455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0025-08

Analysis of Butterfly-shaped Distribution of Surrounding Rock Loose Zone and Parameter Influence under the Condition of In-situ Expansion Excavation of Tunnel

WEI Shigong¹, ZHANG Lukai², JIANG Wangtao², WANG Jianwang³

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410000, China;

3. School of Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: In-situ expansion excavation is a common cross-section adjustment method in deep-buried water conveyance tunnels, which has a significant impact on the stability of surrounding rock under complex geological and high in-situ stress conditions. By taking a single-tunnel in-situ expansion excavation project of a deep-buried water conveyance tunnel in central Yunnan as an example, a combined approach of numerical simulation and theoretical analysis was adopted to investigate the evolution characteristics of surrounding rock displacement, plastic zone, and loosening zone during original tunnel excavation and expansion excavation. The butterfly-shaped distribution of the surrounding rock loosening zone and its influencing factors were further analyzed. The results show that expansion excavation significantly enlarges the loosening zone of surrounding rock. Under Grade V surrounding rock conditions, the maximum radius of the loosening zone increases from approximately 5.3 m in the original tunnel to 6.5~7.0 m after expansion, with an increase of about 25%~30%, and the expansion is most pronounced in the spandrel-crown direction. The lateral pressure coefficient plays a dominant role in controlling the shape and principal expansion direction of the loosening zone; when $\lambda = 0.4$, the angular non-uniformity is the most significant, while the loosening zone tends to be axisymmetric at $\lambda = 1.0$. Increasing the internal friction angle and cohesion can effectively reduce the overall scale of the loosening zone by about 20%~30% and 15%~25%, respectively.

Keywords: in-situ reaming; deep-buried tunnel; surrounding rock loosening zone; butterfly-shaped distribution; parameter sensitivity analysis

随着山区交通基础设施和地下工程建设的不断推进,隧道工程在复杂地质条件下面临的施工风险日益突出^[1]。受地形、地质及既有结构条件限制,部分隧道工程在施工过程中需采用原位扩挖方式以满足断面调整或功能提升的需求^[2]。与一次成型开挖相比,原位扩挖施工在原有洞室基础上进一步扰动围岩,应力重分布过程更为复杂,围岩稳定性问题尤为突出。

近年来,国内外学者围绕围岩松动圈展开了大量研究。在松动圈半径计算准则研究方面,王睿等^[3]基于 Drucker-Prager 准则,考虑地下水渗流与软化效应推导松动圈半径公式。经来旺等^[4]对比四种强度准则,发现中间主应力系数与内聚力对松动圈影响显著。石磊等^[5]基于能量耗散理论建立力学模型,证实松动圈范围与能量耗散量正相关。地质环境方面,张鹏强等^[6]发现平巷水平布置方向越大、埋深越深,松动圈越大,埋深 ≥ 500 m 时围岩破碎范围激增。高林等^[7]指出 20 m 矿柱形成的“双峰”应力导致围岩破坏更严重,10 m 矿柱的“单峰”应力场破坏较小。黄成年等^[8]模拟表明,围岩松动圈随围岩等级降低呈“点-耳-蝶”形演化,扩建隧道松动圈大于新建隧道。施工支护方面,管德鹏等^[9]试验表明,预应力锚索加固与内层拱架滞后施作可减小松动范围。薛亚东等^[10]采用分块多步开挖法,使 V 级围岩拱顶沉降降低 21.7%。张文翔等^[11]测试发现 1 438 m 水平巷底板松动圈最大,且随黏聚力、内摩擦角增大呈指数减小。支护优化方面,王树明等^[12]提出“分层掘进+滞后注浆+锚索补强”方案,有效控制高应力大断面巷道变形。帅平^[13]通过正交试验确定最优锚网喷参数,喷层厚度对支护效果影响最大。王成帅等^[14]采用锚杆-锚索-锚网联合支护+注浆加固,解决倾斜煤层巷道非对称大变形。工程应用方面,任兆丹等^[15]基于极限平衡法推导围岩压力计算公式,平均误差仅 12.85,指导竖井施工设计。凡兴禹等^[16]采用 PSO-XGBoost 模型预测松动圈,实测与预测误差小于 10%。雷显权等^[17]指出岩体强度是影响围岩稳定性的关键因素,锚杆有效长度应匹配关键承载区内边界深度。综上所述,现有研究在围岩松动圈判定准则、影响因素及支护优化等方面取得了丰富成果,但多侧重于整体松动范围或单一工况分析,对扩挖条件下松动圈沿周向非均匀分布特征及其演化规律关注不足。

基于此,以单隧道原位扩挖工程为对象,采用数

值模拟与理论分析相结合的方法,研究围岩松动圈的分布特征及其影响因素。通过数值模拟分析原洞与扩洞施工过程中围岩位移及松动区演化规律,并基于修正芬纳公式和卡斯特奈近似公式计算不同工况下的松动圈范围,与数值结果进行对比验证。重点从围岩自身力学参数及地应力条件出发,研究原位扩挖条件下围岩松动圈的分布特征及其演化规律,研究成果可为原位扩挖隧洞围岩稳定性评价及支护设计中重点加固部位的判定提供参考依据。

1 工程概况与数值模型

1.1 工程概况

滇中地区水资源配置工程是区域重要基础设施,其输水系统多采用深埋隧洞形式穿越复杂地质条件。受地形及施工组织限制,部分隧洞需通过既有洞内通过局部断面扩挖设置错车洞,以满足施工与运输需求。然而,现有研究尚未厘清此类局部扩挖引发的围岩二次扰动规律,对其导致的围岩稳定性劣化程度及松动圈扩展范围的定量表征存在明显研究不足。

以滇中地区某深埋输水隧洞单隧道原位扩挖工程为研究对象。错车洞通过在原洞基础上局部扩挖形成,属典型二次扰工况,使围岩经历多阶段应力调整,其松动圈分布特征不同于一次成型隧洞。研究隧洞为中小断面,原洞断面尺寸较小,难以满足双向施工车辆通行需求,沿洞线间隔布置错车洞,具体施工设计断面图与平面图如图 1、图 2 所示。扩挖后断面宽度和高度均有所增加,最大埋深约 500 m,高地应力条件下易引起应力重分布及塑性区扩展。工程区地质条件复杂,差围岩占比较高,为原位扩挖条件下围岩松动圈演化提供了复杂背景。

1.2 围岩力学参数与分级设置

为系统研究不同围岩条件下单隧道原位扩挖施工对围岩松动圈分布特征的影响,选取五组典型围岩力学参数进行数值模拟与理论计算分析。五组参数分别对应由强至弱的不同围岩条件,涵盖了隧洞工程中常见的围岩力学性质变化范围,详细见表 1。

围岩力学参数依据工程地质勘察资料,并结合相关规范及已有研究成果选取。通过设置五组具有代表性的围岩参数,反映不同围岩等级在强度与变形特性方面的差异。为保证计算结果的可比性,各围岩工况均采用统一埋深条件及相同支护压力进行分析。

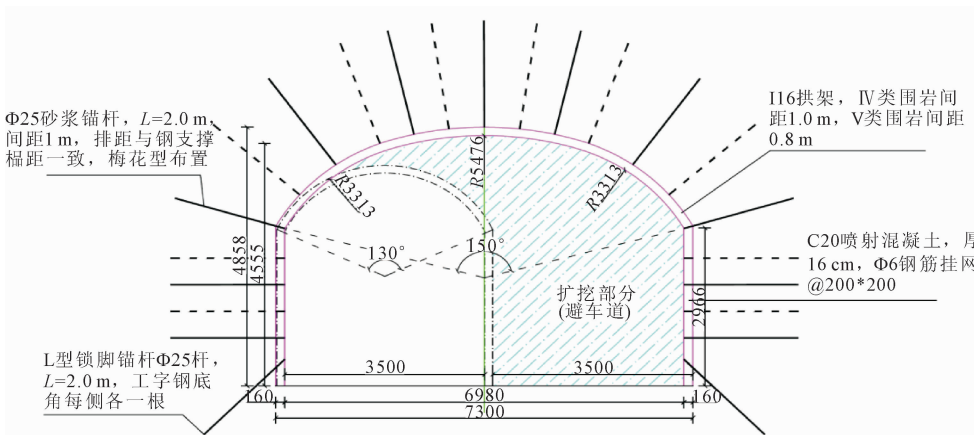


图 1 隧道避车道断面图

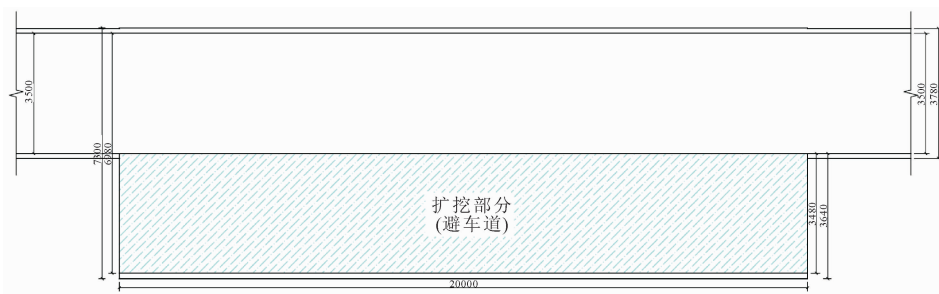


图 2 隧道避车道平面图

数值模型中围岩采用摩尔-库仑弹塑性本构模型描述,其中弹性阶段由弹性模量与泊松比控制,塑性阶段由内摩擦角和黏聚力共同决定围岩强度特征。不同围岩等级通过调整相应力学参数加以区分,其余计算条件保持一致。围岩参数如表 1 所示,表 1 中围岩分级参数依据规范设置,主要用于不同围岩等级条件下松动圈分布规律的对比研究。

表 1 围岩参数

组别	围岩等级	重度 / (kN · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)
第一组	V级	22	2.0	0.35	0.1	45
第二组	IV级	23	2.0	0.32	0.4	55
第三组	III级	24	13.0	0.28	1.1	64
第四组	II级	26	26.0	0.22	1.8	74
第五组	I级	27	35.0	0.15	2.3	82

1.3 数值模型

利用 midas GTS/NX 软件,建立隧洞工程错车洞施工开挖模型,3D 数值模型如图 3 所示,共计 533 989 个单元,290 522 个节点,模型网格采用混合四面体单元。为更好更完整的观察整个开挖与支护过程洞室周围云图变化情况,将模型高设定为 100 m,整体模型尺寸为 100 m × 100 m。

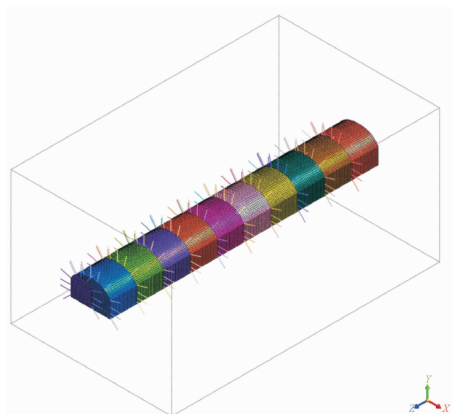


图 3 3D 数值计算模型

模型土层为 V 级白云质灰岩,采用四面体网格,土体本构模型采用修正摩尔-库伦,其它隧道结构采用弹性本构,土体采用 3D 实体单元,锚杆和临时钢架采用 1D 梁单元,锚杆长度 20 m。

模型边界定义:上边界为自由边界,Z 分量和 X 分量皆可存在位移;下边界的 Z 分量位移为 0;左右两侧边界无 X 分量位移,后续计算结果以开挖中部位地表横向沉降为准。隧道围岩、支护结构的计算参数依据国家现行相关规范和场区地质勘察报告数据综合选取。模型参数如表 2 所示,表 2 中所列

V级白云质灰岩参数来源于研究工程的实际地质勘察资料,用于数值模拟中工程工况的计算分析。

表 2 模型参数

材料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
V级白云质灰岩	2000	2.0	0.35	100	45
锚杆及临时钢架	7900	210.0	0.20	—	—
衬砌	2300	32.5	0.30	—	—

1.4 施工过程模拟

为反映单隧道原位扩挖条件下围岩受力与变形的演化特征,采用 midas GTS 的施工阶段分析功能,对隧洞开挖及扩挖过程进行阶段化模拟,通过逐步释放围岩应力模拟施工扰动。施工过程划分为两个阶段;第二阶段为扩挖施工阶段。扩挖过程在同一模型中连续进行,以保证围岩应力与变形演化的连续性。

通过上述施工阶段设置,可有效反映原洞与扩洞施工过程中围岩松动区的形成与扩展规律,具体施工步骤如表 3 所示。

表 3 施工开挖步骤

施工步	工况	描述
1	初始应力场分析	考虑整个场地初始应力,设置初始围压条件
2	3.5 m 隧洞开挖	对 V 级围岩隧洞开挖
3	3.5 m 隧洞衬砌施工	施作 400 mm 厚初期支护及锚杆
4	3.5 m 隧洞扩挖为 7.0 m	对 V 级围岩隧洞扩挖
5	7.0 m 隧洞初支施工	施作 400 mm 厚初期支护及锚杆

2 数值模拟结果与分析

2.1 地表沉降与洞周位移特征

开挖引起的地表沉降如图 4 所示,由图 4 及计算结果可知,原洞开挖与扩洞开挖条件下的地表沉降曲线均呈现以隧洞中线为对称轴的单峰分布特征,最大沉降均出现在隧洞轴线附近,符合深埋隧洞开挖引起地表沉降的一般规律。原洞开挖工况下,地表沉降幅值较小,最大沉降约为 0.20 m,对应横向距离约 13.5 m,沉降槽形态较为平缓,影响范围有限。

扩洞开挖后,地表沉降幅值显著增大,最大沉降增至约 2.01 m,出现于横向距离约 16.0 m 处,较原洞工况增大约 10 倍。同时,沉降槽明显加深,横向影响范围进一步扩大。但两种工况下沉降曲线整体形态基本一致,均保持良好的对称性,表明扩挖施工主要加剧了围岩变形程度和松弛范围,而未改变围

岩变形的基本分布模式。

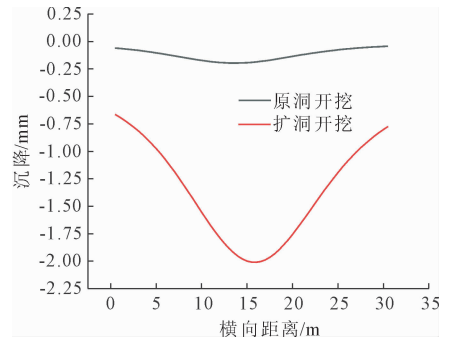


图 4 开挖引起的地表沉降

开挖引起的洞周位移如图 5 所示,由图 5 可知,在扩洞开挖条件下,拱顶点位位移变化最为显著,整体表现为明显下沉。拱顶最大下沉位移约为 4.0 ~ 4.2 mm,且在距监测面约 5 ~ 10 m 之后逐渐趋于稳定,表明扩洞施工对拱顶围岩的扰动范围有限但影响强烈。相比之下,拱底点位位移以抬升为主,其最大位移约为 6.0 mm,且随监测距离增加呈现先快速增长、后缓慢稳定的变化特征。

左右拱点位的位移幅值明显小于拱顶与拱底,其中左拱最大位移约为 0.8 ~ 1.0 mm,右拱最大位移约为 -0.3 ~ -0.5 mm,整体变化较为平缓,且二者在数值和趋势上具有较好的对称性。这表明扩洞开挖后围岩虽发生明显变形,但整体仍以轴对称变形特征为主。

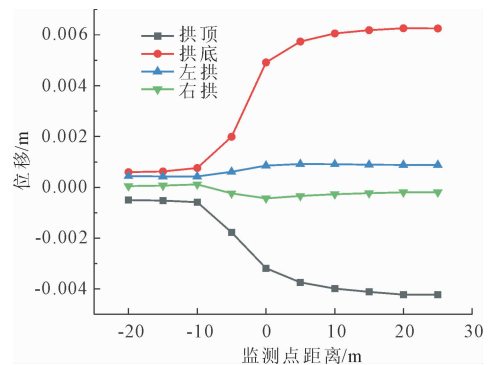


图 5 开挖引起的洞周位移

2.2 围岩塑性区演化特征

原洞塑性区计算云图如图 6 所示,由图 6 可知,原洞工况下围岩塑性区主要集中分布于洞周近场,沿洞周轮廓呈带状展开,且具有明显的非均匀性特征。图 6 中不同颜色表示围岩进入塑性状态的区域分布,其中着色区域为围岩发生剪切屈服的塑性区,反映围岩松弛与破坏范围,未着色区域为弹性区。其中,拱顶及拱肩区域塑性区最为发育,塑性区厚度约为 1.0 ~ 2.0 m,而侧墙及底板区域塑性区范围较小,厚度多

小于 0.5~1.0 m,表明围岩破坏主要受竖向应力释放及洞室几何形态共同控制。

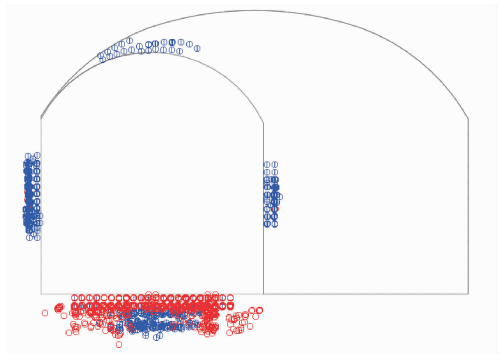


图 6 原洞塑性区计算云图

扩洞塑性区计算云图如图 7 所示,由图 7 可知,在扩洞工况下围岩塑性区沿洞周呈连续分布,但不同方位的发育程度差异明显。拱顶区域塑性区最为发育,向围岩上方延伸深度约为 2.0~2.5 m;拱肩区域次之,塑性区外扩明显,延伸深度约 1.5~2.0 m。相比之下,侧墙及底板区域塑性区分布较为集中,其发展深度普遍小于 1.0 m。

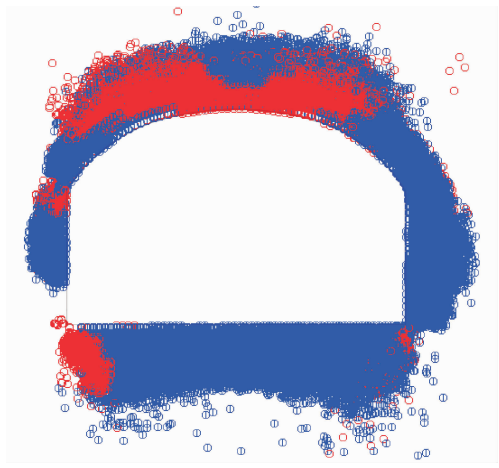


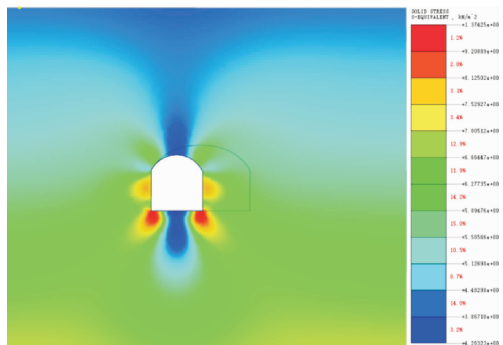
图 7 扩洞塑性区计算云图

2.3 围岩松动区分布

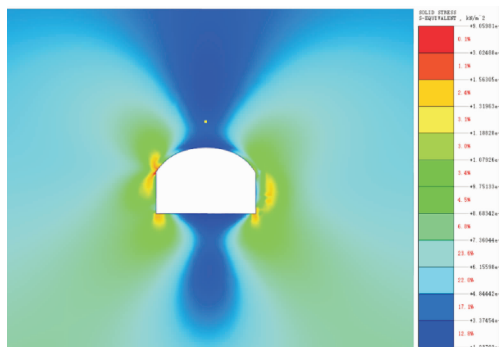
本研究围岩松动圈以数值模拟中围岩单元满足摩尔-库仑屈服准则并进入塑性状态作为判定依据,发生剪切屈服的区域判定为松动区,其外边界即为围岩松动圈范围。数值模拟松动圈云图如图 8 所示,由图 8 可知,围岩松动圈在不同方向上的扩展具有明显差异,均以拱顶-拱肩方向向深部发展最为显著,侧墙及底板方向相对较小,体现出明显的角向非均匀性。松动圈云图仅用于直观展示其空间形态特征,具体范围由塑性区计算结果确定。

原洞工况下,围岩等效应力主要集中在 4.0×10^2

$\sim 9.0 \times 10^2$ kN/m²,拱顶-拱肩方向松动圈扩展深度约 1.5~2.0 m,侧墙与底板方向多小于 1.0 m。扩洞后等效应力峰值提高至约 9.1×10^3 kN/m²,拱顶-拱肩方向松动深度增至 2.5~3.0 m,增幅约 40%~60%,而侧墙及底板变化不明显。整体来看,松动圈轮廓呈拱顶外凸、侧墙内收的“蝶形”分布。扩洞施工增强了松动圈的非均匀性,但未改变围岩松动的主控扩展方向。



(a) 原洞



(b) 扩洞

图 8 数值模拟松动圈云图

3 理论松动圈计算及对比

3.1 修正芬纳公式计算结果

修正芬纳公式是一种基于弹塑性理论的经典围岩松动圈计算方法,综合考虑初始地应力、支护反力及围岩强度参数,可用于确定隧洞开挖后围岩进入塑性状态的平均范围,因其形式简洁、物理意义明确,常被用于工程估算。

鉴于弱围岩条件下原位扩挖对稳定性影响更为显著,选取第一组围岩力学参数作为代表工况,采用修正芬纳公式(1)计算围岩松动圈半径,在考虑支护反力作用下,其表达式为:

$$R_p = r_0 \left[\frac{(P + c \times \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + c \times \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: R_p 为松动圈半径; P 为初始地应力; r_0 为初始等效半径; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; p_i 为支护反

力。

在原洞工况下,围岩松动圈半径为 R_p (原) = 3.135 m;在扩洞工况下,松动圈半径增大至 R_p (扩) = 4.792 m。与原洞相比,扩洞施工引起的松动圈半径增加约 $\Delta R = 1.657$ m,增幅约为 52.85%,说明原位扩挖施工对弱围岩条件下围岩稳定性具有显著影响。其结果如图 9 所示。

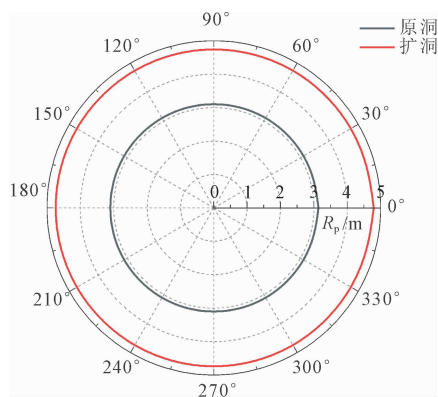


图 9 修正芬纳松动圈

3.2 卡斯特奈近似公式计算结果

基于卡斯特奈近似公式,采用五组不同围岩力学参数,对单隧道原洞与扩洞条件下围岩松动圈范围进行了角向计算分析,不同围岩级别下原洞与扩洞松动圈的计算结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 原洞计算结果

围岩等级	R_{\max} /m	角度 /(°)	R_{\min} /m	角度 /(°)	$(R_{\max} - R_{\min})$ /m
V级	5.3	45	4.0	270	1.3
IV级	4.4	45	3.5	270	0.9
III级	3.8	45	3.0	270	0.8
II级	3.2	45	2.6	270	0.6
I级	2.8	45	2.3	270	0.5

由表 4 可知,原洞情况下,V级围岩条件下松动圈范围最大,其最大松动圈半径 R_{\max} 约为 5.3 m,主要出现在约 45°附近,最小半径 R_{\min} 约为 4 m,出现在约 270°附近,最大与最小半径差值达到 1.3 m,角向差异显著。

随着围岩条件逐渐改善,松动圈范围及角向差异均呈现逐级减小趋势。IV级围岩原洞松动圈半径分布在 3.5~4.4 m 之间,III级围岩减小至 3.0~3.8 m;II级与 I级围岩条件下,松动圈半径进一步收缩,分别控制在 2.6~3.2 m 与 2.3~2.8 m 范围内,其 $R_{\max} - R_{\min}$ 差值均小于 0.6 m,松动圈形态趋于规整。

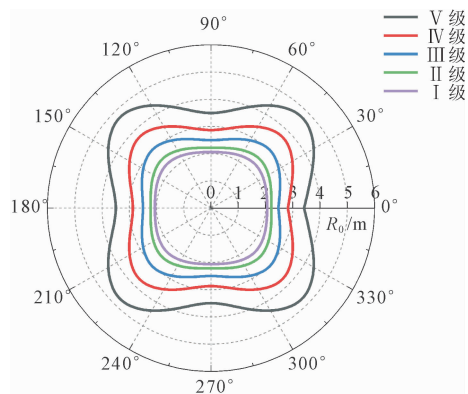
表 5 扩洞计算结果

围岩等级	R_{\max} /m	角度 /(°)	R_{\min} /m	角度 /(°)	$(R_{\max} - R_{\min})$ /m
V级	6.9	45	5.0	270	1.9
IV级	5.5	45	4.5	270	1.0
III级	4.8	45	4.0	270	0.8
II级	3.8	45	3.2	270	0.6
I级	3.3	45	2.8	270	0.5

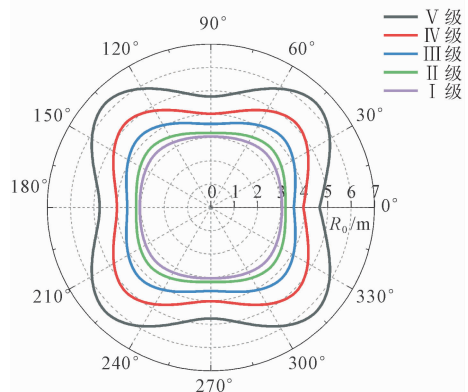
由表 5 可知,扩洞情况在 V级围岩条件下,扩洞后松动圈最大半径增大至 6.9 m,仍主要分布于 45°方向,最小半径约为 5.0 m,对应 270°方向,最大与最小半径差值扩大至 1.9 m,蝶形分布特征尤为突出。

IV级围岩扩洞松动圈半径分布在 4.5~5.5 m 之间,III级围岩为 4.0~4.8 m;II级与 I级围岩扩洞后的松动圈半径分别约为 3.2~3.8 m 和 2.8~3.3 m。相比原洞工况,扩洞条件下各围岩级别的 R_{\max} 均有不同程度增大,但高等级围岩的增幅相对有限。

松动圈对比如图 10 所示,由图 10 可知,在原洞条件下,松动圈半径随围岩等级由 I级向 V级逐级



(a) 原洞对比图



(b) 扩洞对比图

图 10 松动圈对比图

增大: I 级围岩松动圈半径约为 2.3~2.8 m, III 级增至 3.0~3.8 m, V 级达到 4.0~5.3 m, 最大半径较 I 级增大 90%, 曲线整体呈由内向外扩展。

在扩洞条件下, 各围岩等级松动圈进一步外扩: I 级围岩半径约为 2.8~3.3 m, III 级增至 3.8~4.6 m, V 级扩大至 5.2~6.8 m, 相较原洞工况整体增幅约 20%~30%, 且围岩等级越差, 增幅越明显。

4 参数分析

4.1 侧压系数 λ 的影响

基于卡斯特奈近似公式, 采用第二组围岩参数, 对扩洞工况下不同侧压系数 λ 的围岩松动圈进行了角向计算分析, 结果如图 11 所示。由图 11 可知, 扩洞条件下松动圈半径随角度变化明显, 整体呈典型“蝶形”分布, 且其尺度与主控方向随 λ 发生系统性变化。

当 $\lambda = 0.4$ 时, 松动圈非均匀性最为显著, 最大半径出现在拱肩方向 ($\theta \approx 45^\circ$), 约 6.90 m, 最小半径位于拱顶方向 ($\theta \approx 0^\circ$), 约 4.10 m, 二者差值达 2.80 m, 表明低侧压系数条件下松动范围主要向竖向集中发展。当 $\lambda = 1.0$ 时, 各方向松动圈半径趋于一致, 最大半径约 4.95 m ($\theta \approx 45^\circ$), 最小半径约 4.80 m ($\theta \approx 0^\circ$), 差值仅 0.15 m, 松动圈形态接近轴对称, 蝶形特征明显减弱。当 $\lambda = 1.5$ 时, 松动圈主控扩展方向发生转移, 最大半径出现在拱顶方向 ($\theta \approx 0^\circ$), 约 5.90 m, 最小半径位于拱肩方向 ($\theta \approx 45^\circ$), 约 4.20 m, 最大与最小半径差值增大至 1.70 m。

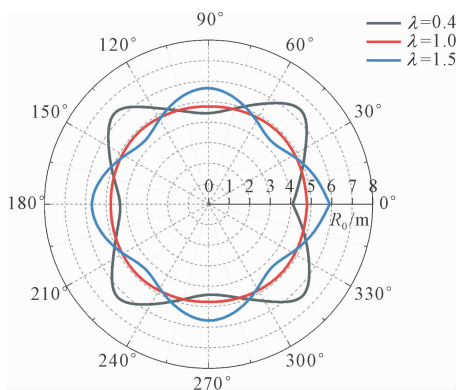


图 11 参数 λ 松动圈半径影响

4.2 内摩擦角 φ 的影响

在相同工况下, 选取不同内摩擦角 φ , 对扩洞条件下围岩松动圈半径进行了计算分析, 结果如图 12 所示。由图 12 可知, 随 φ 增大, 松动圈整体尺度逐

步减小, 但分布形态始终保持稳定的“蝶形”特征, 其最大值与最小值对应角度基本一致, 主要集中在拱肩 ($\theta \approx 45^\circ$) 与拱顶 ($\theta \approx 0^\circ$) 方向。

当 $\varphi = 35^\circ$ 时, 扩洞松动圈范围最大, 最大半径约 6.2 m (拱肩), 最小半径约 4.0 m, 角向差值约 2.2 m。当 φ 增大至 55° , 最大松动圈半径降至约 5.2 m, 较 $\varphi = 35^\circ$ 减小约 16%, 各方向半径差值明显缩小。继续增大至 $\varphi = 65^\circ$ 时, 松动圈进一步收缩, 最大半径约 4.6 m, 最小半径约 3.3 m, 整体较 $\varphi = 35^\circ$ 缩小约 25%, 周向变化幅度最小。

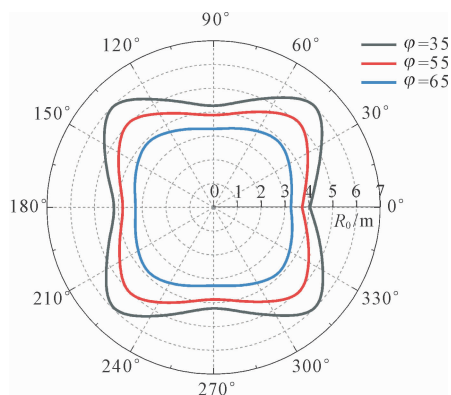


图 12 参数 φ 松动圈半径影响

4.3 黏聚力 c 的影响

在其余参数保持不变的条件下, 改变围岩黏聚力 c , 对扩洞工况下围岩松动圈进行了对比分析, 结果如图 13 所示。由图 13 可知, 黏聚力主要控制松动圈的整体尺度, 而对其周向分布形态影响较小, 各工况下松动圈均保持稳定的“蝶形”分布。

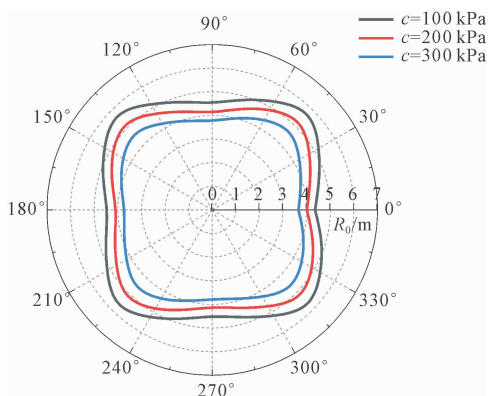


图 13 参数 c 松动圈半径影响

当 $c = 100$ kPa 时, 扩洞松动圈范围最大, 最大半径约 6.0 m, 主要出现在拱肩方向 ($\theta \approx 45^\circ$), 最小半径约 4.2 m, 角向差值约 1.8 m。当 c 增大至 200 kPa, 松动圈在各方向明显收缩, 最大半径降至约 5.0 m, 整体范围较低黏聚力工况缩小约 15%~20%。

当 c 进一步增大至 300 kPa 时,松动圈继续收敛,最大半径约 4.5 m,最小半径约 3.8 m,周向差异进一步减小。

综合不同参数变化引起的松动圈最大半径变化幅度可知,侧压系数 λ 对松动圈分布形态及角向非均匀性影响最为显著,其次为内摩擦角 φ ,黏聚力 c 主要控制松动圈整体尺度变化。相比之下,侧压系数是影响原位扩挖条件下围岩松动圈蝶形分布特征的主控因素。

5 结 论

以单隧道原位扩挖为研究对象,结合工程背景,采用数值模拟方法与修正芬纳公式、卡斯特奈近似公式,对不同围岩条件下围岩松动圈范围及其空间分布特征进行了系统研究,并进一步分析了侧压系数 λ 、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 等关键参数对扩洞松动圈的影响规律。主要结论如下:

(1) 原位扩挖使围岩松动圈范围明显增大,且扩展主要集中在拱肩、拱顶方向。以 V 级围岩为例,松动圈最大半径由原洞的约 5.3 m 增至扩洞后的 6.5~7.0 m,增幅约 25%~30%,但松动圈主控扩展方向保持不变,非均匀性明显增强。

(2) 围岩条件对松动圈规模具有显著控制作用。围岩等级由 I 级劣化至 V 级时,原洞松动圈半径由 2.3~2.8 m 增大至 4.0~5.3 m,扩洞条件下进一步扩大至 6.0~7.0 m,且围岩越差,松动圈角向差异越明显。

(3) 侧压系数对松动圈形态影响显著。扩洞条件下, $\lambda = 0.4$ 时最大与最小半径差值达 2.8 m,蝶形特征最明显; $\lambda = 1.0$ 时半径集中在 4.8~5.0 m,松动圈近似轴对称; λ 增至 1.5 后,松动圈主控扩展方向由拱肩向拱顶转移。

(4) 提高围岩强度参数可有效抑制松动圈发展。内摩擦角由 35°提高至 65°时,扩洞松动圈最大半径减小约 20%~30%;黏聚力由 100 kPa 增至 300 kPa 时,松动圈整体尺度缩小约 15%~25%,但其蝶形分布特征基本保持不变。

参考文献:

[1] 李介立,高亮,张伟,等.大断面隧道扩挖上覆地层沉降规律试验研究[J].科学技术与工程,2025,25(20):8632-8640.

[2] 沈富鑫,邴其春,张伟健,等.基于 CEEMD-GRU 组合

模型的快速路短时交通流预测[J].河北科技大学学报,2021,42(5):454-461.

- [3] 王睿,周雨松,邓祥辉,等.地下水作用下隧道围岩松动圈分析[J].西安理工大学学报,
- [4] 经来旺,尚佳乐,黄旭,等.基于 Mogi-Coulomb 准则的深部巷道围岩松动圈分析[J].矿业研究与开发,2024,44(2):110-115.
- [5] 石磊,武超,吕冬,等.基于能量耗散理论的深部巷道围岩松动圈范围分析[J].煤矿安全,2024,55(10):150-157.
- [6] 张鹏强,朱大铭,宋家乐,等.金川三矿区平巷空间位置对围岩松动圈大小影响研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):123-131.
- [7] 高林,高昌思,吴延平,等.大型铝土矿山综采工作面区段回风巷围岩破坏特征实测研究[J].金属矿山,2025(4):12-20.
- [8] 黄成年,吴逸飞,许煜林,等.隧道原位扩建施工力学与围岩松动圈演变规律:以广西贺州-巴马高速公路延心隧道原位扩建工程为例[J].科学技术与工程,2024,24(24):10520-10527.
- [9] 管德鹏,朱建林,康万鹏,等.陡倾薄层状软岩隧道围岩变形控制技术研究[J].现代隧道技术,2025,62(S1):949-959.
- [10] 薛亚东,张庆雨,郭永发,等.长水机场下穿隧道悬臂掘进机施工路径规划及围岩损伤特征分析[J].隧道建设(中英文),2025,45(6):1076-1089.
- [11] 张文翔,王文杰,朱大铭,等.金川三矿区 1438 m 水平围岩松动圈分布特征和变化规律研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):117-124.
- [12] 王树明,冯友良.高应力大断面巷道围岩注浆加固机理及其应用[J].中国矿业,2024,33(4):209-216.
- [13] 帅平,陈俊智,任春芳,等.围岩松动圈理论在某矿巷道支护优化中的应用[J].金属矿山,2024(8):64-69.
- [14] 王成帅,姚辉苗.倾斜煤层回采巷道围岩变形特征及控制技术优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):174-181.
- [15] 任兆丹,冀成,史育峰,等.考虑松动圈影响的公路隧道大直径竖井围岩压力计算方法[J].科学技术与工程,2024,24(15):6448-6458.
- [16] 凡兴禹,王雪林.基于改进 XGBoost 算法的深部巷道松动圈智能预测研究[J].黄金科学技术,2024,32(1):109-122.
- [17] 雷显权,刘福春,严庆文,等.超埋深高应力复杂地层巷道围岩损伤分区与承载结构特征研究[J].金属矿山,2023(8):171-180.