DOI: 10.7672/sgjs2025070144

节理组合围岩失稳机理分析及塌方风险管控建议*

费伦林1,江 炜1,杨晓秋2,3

(1. 江西交通投资集团有限责任公司,江西 南昌 330003; 2. 上海同岩土木工程科技股份有限公司,上海 200092;
 3. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心,上海 200092)

[摘要] 在节理岩体中修建隧道,围岩稳定性与节理组合条件密切相关。为深入理解隧道开挖时围岩稳定性与节 理特征间的关系,依托赣南地区在建的武功山、龙南西等隧道工程,借助离散元仿真分析手段建立不同节理倾角组 合计算模型,以塌方区域、塌方部位、洞周围岩剪应力分布为研究对象,重点研究不同节理倾角组合下围岩可能发 生的失稳风险及失稳机理,总结失稳模式和塌方面积,针对性提出对应的风险管控措施。通过研究得到以下结论: 两组节理组合工况下,围岩失稳情况可分为4种模式,即弯折破坏型、顺层滑移型、拱顶塌落型、垂直塌落型;塌方 风险的发生、发生部位及范围受节理倾角控制,0°/90°倾角组合对围岩稳定性影响最大,其次是对称型节理组合; 非线性拟合能够较好地对塌方面积进行预测;锚杆应针对可能的失稳部位进行布设,布设角度应尽可能与节理组 大角度相交,重点覆盖塌方范围及节理张开区域。研究结果显示节理倾角组合围岩失稳可总结为固定4种模式, 且受节理倾角特征控制。

[关键词]隧道;围岩;失稳模式;数值模拟;锚杆;加固;风险
 [中图分类号]U455 [文献标识码]A [文章编号]2097-0897(2025)07-0144-07

Instability Mechanism Analysis of Jointed Surrounding Rock and Suggestions on Collapse Risk Control

FEI Lunlin¹, JIANG Wei¹, YANG Xiaoqiu^{2,3}

(1. Jiangxi Highway Investment Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330003, China; 2. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Underground Infrastructure Detection and Maintenance Equipment, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the construction of a tunnel in a jointed rock mass, the stability of the surrounding rocks is closely related to the joint combination conditions. To deeply understand the relationship between the stability of surrounding rocks and joint characteristics during tunnel excavation, based on the Wugongshan and Longnanxi Tunnel Projects under construction in Ganzhou City, Jiangxi Province, the calculation models of different joint inclination angles are established by means of discrete element simulation analysis. Taking the shear stress distributions of collapse area, collapse site, and surrounding rock as the research objects, the possible instability risk and instability mechanism of surrounding rocks under different joint inclination angles were studied, the instability modes and collapse areas were summarized, and the corresponding risk control measures were proposed. The following conclusions are obtained through the research that under the combined conditions of two groups of joints, the instability of surrounding rocks can be divided into four modes, namely, bending failure mode, bedding slip mode, vault collapse mode, and vertical collapse mode. The occurrence, location, and range of collapse risk are controlled by joint inclination angle. The 0°/90° inclination angle combination has the greatest influence on the stability of surrounding rocks, followed by the symmetrical joint combination. Nonlinear fitting can better predict the collapse area. The bolts should be arranged for the possible instability parts, and the layout angle should intersect with the large angle of the joint group as much as possible, focusing on the

^{*} 江西省交通运输厅科技项目(2020C003)

作者简介]费伦林,博士,正高级工程师,E-mail:331526800@ qq. com

[[]收稿日期] 2024-08-18

scope of the collapse and the joint opening area. The results indicate that the instability of surrounding rocks with joint inclination can be summarized into four fixed modes, which are controlled by the characteristics of joint inclination.

Keywords: tunnels; surrounding rock; instability mode; simulation; bolt; reinforcement; risk

0 引言

在实际隧道工程中,对隧道的稳定性评价贯穿 整个工程,从超前地质预报到施工期监控量测到运 营期结构检测,掌握隧道稳定性状态是保证隧道安 全施工与推进的关键性工作。然而由于复杂的地 质条件,隧道施工过程中失稳塌方事故不断发生, 特别是在节理裂隙发育的破碎、较破碎围岩情况 下,节理分布的随机性以及节理面的力学特性对隧 道稳定性具有重要影响。

目前,国内外专家借助室内试验、数值模拟、案 例调查等研究手段,在节理裂隙发育条件下的围岩 稳定性分析方面做了大量研究[1-5],结果显示:节理 面极大削弱了岩体力学性能,节理面性能对围岩稳 定性起到关键控制作用。对于多组节理组合条件 的研究目前也是重点。张鹏等^[6]针对节理面不利 组合发育的围岩,分析了围岩塌方的影响因素,构 建了节理面不利组合下围岩塌方安全评价指标体 系。彭双喜^[7]通过使用有限元强度折减法计算破 坏状态和节理岩体隧道的安全系数建立起节理组 合与稳定性间的定量化关系。石益东等[8]采用离 散元软件 UDEC 建立二维计算模型,通过计算不同 工况下的拱顶塌落高度值,研究了两组节理耦合工 况下节理倾角、间距对隧道变形的影响。索超峰 等^[9]基于相似比1:50的模型试验研究单组及多组 节理条件下的围岩稳定性状态。杨忠民等^[10]基于 块体离散元软件 3DEC,对节理法向刚度、剪切刚度 以及内摩擦角等参数对隧道塌方范围的影响规律 进行研究。梁晓丹^[11]以围岩自承载为研究对象,研 究不同节理倾角及间距下的围岩压力拱变化形态。 王伟力[12]采用二维数值计算分析手段,分析节理倾 角、间距参数对隧道围岩压力分布的影响规律。

在节理围岩支护方面,谢尚邮等^[13]基于将军山 隧道工程,开展节理围岩锚杆支护计算,提出节理 岩体隧道锚杆支护设计建议。陈力华^[14]采用室内 试验手段,制作带节理的长方体岩块试件,研究节 理张开情况下锚杆轴力分布变化情况。王同旭 等^[15]以单节理组为研究对象,研究不同节理倾角下 巷道围岩的变形破坏特点,并对锚杆均匀支护方案 和非均匀支护方案进行了对比分析。

目前大量研究主要集中在节理特征参数对围

岩稳定性、变形、支护体系的影响规律研究^[16-18],在 节理组合条件下的围岩失稳机制方面缺少总结。 本文依托赣南地区在建的武功山隧道、龙南西隧道 等工程,针对破碎~较破碎的地质情况,通过设置不 同角度的节理组合计算工况,研究塌方发生机理, 总结不同失稳模式及发生条件。

1 数值计算模型

1.1 工程概况

本文依托赣南地区在建的武功山隧道、龙南西 隧道等多座隧道,选择代表性地质区段的相关信 息,作为模型建立及参数取值依据。依托工程为双 向六车道隧道,断面内轮廓采用三心圆曲边墙结构 设计,拱顶半径 *R*₁ 为 8.4m,拱墙半径 *R*₂ 为 5.05m, 仰供半径 *R*₄ 为 22m。

根据地质调查结果,结合区域地质资料,隧址 区岩性为泥灰岩、白云岩、页岩,褶皱断裂构造发 育,各隧道隧址区地质构造复杂,以Ⅳ级围岩为主。 同时对隧道掌子面围岩信息进行了现场详细采集 工作,统计结果显示:岩体节理裂隙发育,被多组节 理相互切割呈碎块状、块状,整体破碎程度为破碎~ 较破碎,深部节理闭合,节理间距小于1cm,多为构 造节理。现场掌子面素描工作揭示,优势节理倾角 多集中在40°~90°,节理组合情况多变。

1.2 计算模型

基于隧道IV级围岩区段的节理发育特征,借助 UDEC 离散元软件对不同节理组合下隧道围岩稳定 性进行定量化分析。模型以隧道上圆弧的圆心为 坐标原点,左右两侧各取2.5D(D为隧道洞径)作为 两侧边界,向下取1.5D作为底部边界(模型试算发 现下部边界范围对计算结果影响不大,考虑到拱 顶、拱肩为主要研究对象,同时考虑计算效率问题, 下边界取1.5D),上边界延伸至地表(见图1)。

模型采用标准约束设置,即两侧为水平约束、 底部为垂直约束,顶部自由。

1.3 参数取值

计算模型采用弹塑性本构,考虑围岩块体间结构面作用,围岩和节理均服从 M-C 破坏准则。

围岩力学参数依照工程地质勘察报告力学试验选取。节理力学参数以节理形态为基础,参考 JTG D70—2011《公路隧道设计细则》内给定参数取



值范围的均值进行选取,具体取值如表1,2所示。

表1 围岩力学参数取值

Table 1Value of mechanical parameters

of surrounding rock

材料	弹性模量/	密度/	黏聚力/	内摩
	MPa	(kg·m ⁻³)	kPa	擦角/ (°)
风化白云岩 (I V级)	5	2 300	600	35

表 2 节理参数取值

Table 2 Value of parameters of rock joints

节理	法向刚度/ (GPa・m ⁻¹)	切向刚度/ (GPa·m ⁻¹)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)
第1组 节理J1	1	4	870	30
第2组 节理J2	1	4	870	30

2 节理组合条件下隧道围岩失稳分析

基于隧址实际地质情况,围岩受两组节理切割 呈块状,整体为破碎~较破碎程度,节理间距小于 1.0m。以现场实测为基准,计算模型选取围岩节理 间距0.8m,主要研究不同倾角节理组合下的围岩失 稳机制。具体计算工况如表3所示。

表 3 计算工况设置 Table 3 Calculating mode setting

节理间距/	节理组 J1	节理组 J2	支护形式
m	()") (()	(◎) (◎)	
	0	30	
0.8	0	60	
	0	90	王士拉
	30	90	儿又扩
	30	120	
	60	120	

2.1 围岩破坏机理分析

首先对无支护条件下节理组合工况的计算结 果进行分析,重点分析围岩失稳模式及其对应的力 学机理。隧道围岩在无支护措施条件下的计算结





Fig. 2 Unstable area of tunnel excavation without supporting measures

1)0°/30°倾角组合条件下,围岩整体较稳定;围 岩破坏位置出现在左侧拱肩部位,破坏程度轻微, 主要表现为轻微的局部掉块。

2)0°/60°倾角组合条件下,围岩稳定性相对于 0°/30°组合工况下降,塌方面积明显增大。随着倾 角增大,塌方部位逐渐向拱顶部位移动。

3)30°/90°倾角组合条件下,围岩整体较稳定, 顶部出现轻微的局部掉块;由于受到90°节理控制, 块体呈现竖直掉落,同样受到30°斜向节理的控制, 掉块部位集中在拱顶左侧。

4)30°/120°倾角组合条件下,围岩出现了大面 积的塌方现象,塌方部位位于右侧拱肩部位;塌方 块体受节理倾角控制,节理岩体沿着节理倾角大的 方向运动,产生顺层滑移。

5)60°/120°倾角组合条件下,隧道顶部围岩出 现大面积塌落。60°节理与120°节理在拱顶处产生 对称切割,开挖后岩体在重力作用下掉落,以直接 的竖向坠落为主。

6)0°/90°倾角组合工况为所有计算工况中稳定 性最差、潜在塌方范围最大的节理组合,塌方范围 覆盖整个隧道断面,向地表延伸;隧道顶部围岩在 节理粘结作用下形成岩桥,在围岩块体自身重力作 用及岩桥上部围岩压力共同作用下,形成大面积的 上述对应计算工况的隧道围岩剪力分布如图 3 所示。



Fig. 3 Shear force distribution of surrounding rock around the tunnel(unit:N)

1)0°/30°倾角组合条件下,围岩最大剪应力区 域出现在拱腰两侧。与均质围岩计算结果不同的 是,因为受到倾斜节理的影响,两侧受剪区域呈现 略微的不对称现象,左侧受剪区相较右侧上移向拱 肩处发展。所以,相较于均质围岩经常表现出的由 拱腰处剪切破坏而言,0°/30°倾角组合条件下围岩 呈现出左侧拱肩的破坏。

2)0°/60°倾角组合条件下,左侧受剪区域上移 明显,同时右侧受剪区域向下移动至右侧拱脚部 位。相较于0°/30°倾角组合,0°/60°倾角组合条件 下围岩受剪区域更大、剪应力更大,因此拱顶塌方 区域更大。

3) 对于 30°/90°, 30°/120°, 60°/120°倾角组合, 同样表现出剪切区域受节理倾角影响而位置变化 的情况。对于 0°/90°倾角组合,拱顶上部围岩出现 条带状剪切带,表明该情况下,围岩块体在节理黏 聚力作用下逐层形成岩桥,在上部围岩作用下,岩 桥间脱开并压溃,形成塌方。 2.2 围岩失稳模式探讨

综合上述分析,可以从破坏模式及破坏机理的 角度,将两组节理组合条件下的围岩失稳总结为4 种主要模式,如图4所示。



图 4 围岩失稳模式 Fig. 4 Instability mode of surrounding rock

1) 失稳模式 1: 弯折破坏。如图 4a 所示, 倾角 组合条件为两组节理倾角 θ<30°且非对称, 失稳位 置发生在拱肩~拱顶处。失稳机制为在围岩外挤作 用下超过抗弯刚度, 切向应力下发生弯折。

 2)失稳模式 2:顺层滑移。如图 4b 所示,倾角组 合条件为两组节理倾角至少存在一组节理倾角 θ≥
 60°,且非对称,失稳位置发生在拱腰处。失稳机制为 开挖卸荷后陡倾节理剪切力超过抗剪强度发生剪切 滑移。

3) 失稳模式 3: 拱顶塌落。如图 4c 所示, 倾角 组合条件为对称节理, 失稳位置发生在拱顶处。失 稳机制为开挖后重力作用下垂直掉落。

4) 失稳模式 4: 垂直塌落。如图 4d 所示, 倾角 组合条件为水平垂直节理。失稳位置发生在拱顶 处。失稳机制为开挖后重力作用下垂直掉落。

3 围岩塌方面积预测

为准确指导围岩潜在失稳区域的加固处置,在 获知失稳模式的基础上,还需要精确掌握塌方规 模,对于二维计算模型来说,即模型的塌方面积。

以节理参数、围岩参数、结构面参数为研究指标,调整指标参数取值,交叉组合设置 50 组计算工况,提取各自工况下塌方面积。部分典型计算结果如表4所示。

考虑到现场使用的方便性,本文采用多元非线

表 4 塌方面积计算结果 Table 4 Calculation results of collapse area

疟早	J1 倾角/	J2 节理倾角/	J1 间距/	J2 间距/	黏聚力/	内摩擦角/	剪切刚度/	法向刚度/	塌方面积/	
细石	(°)	(°)	m	m	kPa	(°)	GPa	GPa	m ²	
1	53	120	0.8	0.6	87.0	25	3.8	11.36	43. 570	
2	45	135	0.8	0.8	52.2	18	1.0	3.0	13.789	
3	45	135	0.8	0.8	17.4	6	0.2	0.6	15.070	
4	60	120	1.0	1.0	87.0	30	1.0	3.0	38.899	
5	30	120	0.6	0.6	87.0	30	1.0	3.0	17.430	
6	45	135	0.8	0.8	34.8	12	0.4	1.2	14.960	
7	30	120	0.8	0.8	180.0	40	1.0	3.0	15.861	
8	0	60	0.6	0.6	87.0	30	1.0	3.0	27.447	
9	40	120	0.8	0.8	180.0	40	1.0	3.0	15.692	
10	40	0	0.8	0.8	180.0	40	1.0	3.0	0.165	

性拟合的手段对数据进行拟合,以获得能够快速计 算的显示公式。多元非线性回归主要通过对多个 影响参数建立数学模型、求解模型中的未知参数、 判断模型是否可靠、对目标结果进行预测。所建立 的多元非线性回归模型主要有以下3种数学模型。

纯二次模型:

$$y = \sum \beta_{jj} x_j^2 \tag{1}$$

交叉模型:

$$y = \sum \beta_{jk} x_j x_k \tag{2}$$

完全二次模型:

$$y = \sum \beta_{jj} x_j^2 + \sum \beta_{jk} x_j x_k \tag{3}$$

在对上述3种形式模型都进行拟合对比的情况 下,最终选定效果最好的完全二次模型,得到的拟 合公式如式(4)所示,拟合效果如图5所示。

$$E(Y) = -5.1X_1^2 - 17.9X_2^2 - 6.6X_3^2 + 179.3X_4^2 - 2546.1X_5^2 - 1553.3X_6^2 + 7472X_7^2 - 7588.2X_8^2 + 43.9X_1X_2 - 0.3X_2X_3 - 154X_3X_4 - 76.2X_4X_5 + 4126.1X_5X_6 + 103.8X_6X_7 + 65.7X_7X_8$$
(4)

式中: X_1 为第1组节理倾角; X_2 为第2组节理倾角; X_3 为第1组节理平均间距; X_4 为第2组节理平均间 距; X_5 为结构面黏聚力; X_6 为结构面内摩擦角; X_7 为结构面剪切刚度; X_8 为结构面法向刚度。

4 节理组合岩体风险管控措施

4.1 全长粘结型锚杆受力机制

以本工程中采用的全长粘结型锚杆为例,这种 锚杆一般不带锚头,首先进行钻孔穿透围岩松动圈 至围岩塑性区,甚至达到弹性区,然后采用先灌后 锚方法采用风动灌浆器向锚杆孔内灌入早强水泥 砂浆,最后插入锚杆杆体使之与围岩粘结在一起, 让杆体牵制围岩变形,以达到增强围岩稳定性和减 少围岩变形的目的。锚杆受力如图6所示。



图 5 塌方面积预测效果

Fig. 5 Prediction effect of landslide area



锚杆在实际工作时,既作为受拉构件,也作为 受弯构件,杆体同时承受轴力和剪力作用。即锚杆 同时发挥抗拉拔作用和阻滑抗剪作用。工程中常 根据锚杆的这两种功能,制定对应的支护方案。

4.2 节理岩体支护建议

基于上节对节理组合岩体失稳机制的分析,节 理岩体的破坏主要表现为结构面的破坏,不同节理 组合模式对应不同的破坏机制,锚杆布设区域及深 度应覆盖全部塌方范围。针对各类破坏类型,提出 对应的锚杆支护措施(见表5)。

 1)对于缓倾节理(节理倾角 0°≤θ<30°),易在 拱肩~拱顶部位处发生弯折破坏,应在弯折破坏区 域垂直于缓倾节理布设锚杆,发挥锚杆轴向抗拉拔 作用,提高该区域内节理岩体的抗弯刚度。

149

表 5 节理组合条件下隧道围岩失稳风险及管控措施

Table 5 Risk and control measures of tunnel surrounding rock instability under joint combination conditions

风险源	风险			凤吟德校建议	
节理组合条件	破坏模式	破坏机制	发生位置	风险官控建议	
两组节理倾角 θ<30° 且非对称	弯折破坏	在围岩外挤作用下超过抗弯刚 度,切向应力下发生弯折	拱 肩 ~ 拱 顶 区域	在弯折破坏区域可不布设锚杆,锚布设应垂 直于缓倾节理	
网组节埋倾角至少存在 一组节理倾角 $\theta \ge 60^\circ$, 日ませな	顺层滑移	开挖卸荷后陡倾节理剪切力超 过抗剪强度发生剪切滑移	拱腰区域	在顺层滑移区域不设锚杆,锚杆的布设应与 节理面大角度相交	
对称节理	拱顶塌落	开挖后重力作用下垂直掉落	拱顶区域	拱顶部位布设锚杆,且应竖直向上	
水平垂直节理	垂直塌落	开挖后重力作用下垂直掉落	拱顶区域	拱顶、拱肩可不布设锚杆,锚杆的布设应与节 理面大角度相交	

2)对于两组节理倾角中至少有一组陡倾节理 (60°≤θ<90°)时,随着节理倾角的增加,隧道围岩 沿节理面产生顺层滑移,隧道拱顶部位的变形逐渐 增大。锚杆的打设应与节理面尽量大角度相交,将 不同的节理岩体串在一起,锚杆轴力分解为部分抗 滑力,减小节理面的相对滑动,阻止围岩沿节理面 发生顺层滑移。

3)对于对称节理,围岩失稳部位主要位于拱顶 部位,锚杆应在顶部重点加密布设,可竖直向上布 设,同时发挥抗拉拔与阻滑抗剪作用。

4) 对于水平垂直组合节理,失稳模式表现为垂 直塌落,锚杆的打设应与节理面尽量大角度相交, 将不同的节理岩体串在一起,阻止围岩块体发生掉 落;同时拱肩处可适当加密,发挥阻滑抗剪作用,阻 止竖向节理面剪切破坏。

5 结语

本文基于节理组合围岩数值仿真计算模型,研 究了隧道围岩塌方机理,总结了典型的塌方模式, 拟合出围岩塌方面积公式,提出对应的处置建议, 主要结论如下。

1)节理组合条件下,围岩失稳可总结为4种模式,即弯折破坏型、顺层滑移型、拱顶塌落型、垂直 塌落型。失稳破坏主要是由于开挖卸荷后,洞周围 岩应力重分布,导致局部节理面破坏,引起切割块 体的滑动。

2)塌方风险的发生、发生部位及塌方区域受节 理倾角控制。0°/90°倾角组合下,塌方风险最大,对 称型节理组合次之;两种节理组合条件破坏位置均 位于拱顶。对于其他倾斜节理,可分为缓倾节理与 陡倾节理,缓倾节理组合失稳区域较小,陡倾节理 组合失稳区域较大,两种组合失稳部位均位于拱肩。

3)采用完全二次型的非线性拟合能够较好建 立起节理参数、围岩参数、结构面参数对塌方面积 的预测公式,进一步指导后续锚杆处置的范围及 深度。 4) 锚杆支护应根据节理组合特征对应设计, 针 对可能的失稳部位进行布设, 布设角度应尽可能与 节理组大角度相交, 重点覆盖塌方范围及节理张开 区域, 确保锚杆的受力性能能够充分发挥。

参考文献:

- [1] 任伟中.节理围岩特性及其锚固效应模型试验研究[J].地球科学,1997,22(6):660-664.
 REN W Z. Model test study on characteristics of jointed surrounding rock and anchoring effect[J]. Earth science, 1997, 22(6):660-664.
- [2] 朱维申,任伟中,张玉军,等. 开挖条件下节理围岩锚固效应的模型试验研[J]. 岩土力学,1997,18(1):1-7.
 ZHU W S, REN W Z, ZHANG Y J, et al. Model test study on anchoring effect of jointed surrounding rock under excavation conditions[J]. Rock and soil mechanics, 1997, 18(1):1-7.
- [3] 袁亮,李晓昭,章杨松,等. 软弱敏感结构面控制的隧道围岩 变形失稳模式研究[J]. 中国水运,2010(9):180-182.
 YUAN L, LI X Z, ZHANG Y S. Study on deformation and instability mode of tunnel surrounding rock controlled by weak and sensitive structural plane[J]. China water transport,2010,10 (9):180-182.
- [4] 杜帅.城区复杂环境下节理岩体隧道施工力学研究[D].重 庆:重庆大学,2014.

DU S. Study on construction mechanics of jointed rock mass tunnel in urban complex environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

- [5] 张宝玉. 断续节理围岩开挖卸载变形破坏及支护作用分析
 [D].太原:太原理工大学,2021.
 ZHANG B Y. Analysis of unloading deformation and failure and supporting effect of non-persistent jointed surrounding [D].
 Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [6] 张鹏,刘学增,米东阳. 围岩节理面不利组合条件下隧道塌方的模糊安全评价[J]. 现代隧道技术,2013,50(2):72-78.
 ZHANG P,LIU X Z, MI D Y. Fuzzy safety evaluation of tunnel collapse under unfavorable combination of surrounding rock joint surface[J]. Modern tunneling technology,2013, 50(2):72-78.
- [7] 彭双喜.节理岩体隧道的稳定性分析及破坏机理[J].公路工程,2014,39(5):295-299.
 PENG S X. Stability analysis and failure mechanism of jointed rock tunnel[J]. Highway engineering,2014,39(5):295-299.
- [8] 石益东,李志忠,李军,等.两组耦合节理工况下隧道变形的

数值研究[J].现代隧道技术,2014,51(6):89-93,107.

SHI Y D, LI Z Z, LI J. Numerical study of tunnel deformation under two sets of coupled joint conditions [J]. Modern tunneling technology,2014,51(6):89-93,107.

[9] 索超峰,石益东,李军.节理特征对破碎围岩稳定性影响的模型试验[J].公路交通科技,2013,30(4):82-87.

SUO C F, SHI Y D, LI J. Model test of effect of joint characteristics on stability of broken rock mass [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30 (4): 82-87.

 [10] 杨忠民,张玉芳,李健,等.软弱围岩节理性质对隧道塌方范 围影响研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(12): 143-149.

> YANG Z M,ZHANG Y F,LI J, et al. Study on influence of joint properties of weak surrounding rock on range of tunnel collapse [J]. Journal of safety science and technology, 2020, 16(12): 143-149.

[11] 梁晓丹,赵坚,宋宏伟. 围岩自调节成拱特性的实验与数值分析[J]. 工程地质学报,2012,20(1):96-102.
 LIANG X D, ZHAO J, SONG H W. Experimental and numerical analysis on the arching action from stress adjusting in surrounding

rocks[J]. Journal of engineering geology, 2012, 20(1):96-102.
[12] 王伟力.节理特征对隧道围岩压力的影响规律研究[J].中国 水运, 2015, 15(5):209-210.
WANG W L. Study on the influence of joint characteristics on tunnel surrounding rock pressure [J]. China water transport,

[13] 谢尚邮,吴建勋,陈亮.将军山隧道节理特征对围岩稳定性的 影响及锚杆支护机理研究[J].公路与汽运,2018(3):169-173,190.

2015, 15(5): 209-210.

XIE S Y, WU J X, CHEN L. Research on the influence of joint

characteristics on the stability of surrounding rock and bolt support mechanism of Jiangjunshan Tunnel [J]. Highways & automotive applications, 2018(3):169-173, 190.

- [14] 陈力华. 公路隧道节理围岩锚杆荷载传递规律及锚固功效研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
 CHEN L H. Study on the load transfer behavior of the rock bolt and its anchoring efficacy in jointed rock mass around highway tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University,2016.
- [15] 王同旭,马德鹏,郝清旺.节理巷道变形非均匀性与锚杆支护 优化[J].山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(6):
 1-5.

WANG T X, MA D P, HAO Q W. Heteropical deformation in joint roadway and supporting optimization of rock bolt [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (natural science), 2012, 31(6):1-5.

- [16] 宋鹏飞,张程,李智,等. 岩石质量指标对隧道稳定性的影响 研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(21):90-95.
 SONG P F, ZHANG C, LI Z, et al. Study on the influence of rock quality designation on tunnel stability [J]. Construction technology,2024,53(21):90-95.
- [17] 唐德密,邓乃夫,李庆文.基于机器视觉算法的隧道岩体质量 智能评估方法[J].施工技术(中英文),2024,53(20):42-50.
 TANG D M, DENG N F, LI Q W. Intelligent evaluation method of tunnel rock mass quality based on machine vision algorithm
 [J]. Construction technology,2024,53(20):42-50.
- [18] 方磊. 沙特 NEOM 隧道项目 Q 系统围岩分类及支护体系研究
 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(7):29-34.
 FANG L. Research on surrounding rock classification and support system by Q-system of Saudi Arabia NEOM Tunnel Project[J].
 Construction technology, 2024, 53(7):29-34.