

# 节理裂隙发育诱导的隧道围岩 不稳定块体的预测

张力<sup>1</sup>, 王晓羽<sup>2</sup>, 李鲢<sup>3</sup>, 傅鹤林<sup>3\*</sup>, 于归<sup>3</sup>

(1. 中交第四公路工程局有限公司, 北京 100022; 2. 湖南交通职业技术学院 道路工程学院, 湖南 长沙 410132;  
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 围岩中节理裂隙发育形成的不稳定结构体是诱发冒顶和塌方的原因之一, 为了预测围岩中的不稳定块体, 首先通过块体棱矢量与结构面法向量点乘所得到的矢量判别矩阵判断块体的运动形式, 然后根据不同形式块体的受力方式, 给出相应的稳定性系数计算方法, 最后以江玉高速公路马章岭隧道为依托, 利用块体理论预测潜在的不稳定块体. 研究表明: 在不同节理裂隙组合下, 块体可分为不可动块体、脱离岩体运动块体、沿单面滑动块体、沿双面滑动块体. 所提的块体理论可有效地预测出不稳定块体的存在, 实现节理裂隙发育工况下的围岩稳定性分析. 另外, 研究结果可为类似工程冒顶塌方的预测提供借鉴.

**关键词:** 节理裂隙; 发育; 隧道围岩; 冒顶塌方; 预测

**中图分类号:** U459.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2022)03-0020-06

## Prediction of Unstable Blocks in Tunnel Surrounding Rock Induced by Joints and Fissures

ZHANG Li<sup>1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>2</sup>, LI Jie<sup>3</sup>, FU Helin<sup>3</sup>, YU Gui<sup>3</sup>

(1. CCCC Fourth Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2. School of Road Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The unstable structure formed by the development of joints and fissures in the surrounding rock is one of the reasons for roof fall and collapse. In order to predict the unstable blocks in surrounding rock, the motion form of the block is clarified firstly by the discrimination vector matrix obtained by the point multiplication between block edge vector and structural plane normal vector. Then the corresponding calculation method of the stability coefficient is given according to the force mode of different forms of the block. Finally, based on the Mazhangling tunnel of Jiangyu expressway, the potential unstable block is predicted by using the block theory. Results show that blocks can be divided into immovable blocks, moving blocks separated from rock mass, sliding blocks along one side, and sliding blocks along two sides under different joint fissure combinations. The block theory proposed in this paper can effectively predict the existence of unstable blocks, and realize the stability analysis of surrounding rock under the condition of developed joint fissure. In addition, this paper can provide references for the prediction of roof fall and collapse in similar projects.

**Keywords:** joint fissure; development; tunnel surrounding rock; roof collapse; prediction

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978668); 中交四公局课题“江玉高速公路隧道群施工关键技术研究”资助项目(JYXM-JSHT-2020-49)

\* 通信作者, E-mail: fu.h.l@csu.edu.cn

隧道冒顶与塌方是隧道开挖过程中不可避免的地质灾害之一,这对地下工程的设计和施工都带来极大的挑战<sup>[1-6]</sup>.

有关隧道稳定性的研究较为丰富,张建军等<sup>[7]</sup>采用数值模拟的方法探究了隧道塌方全过程;张远荣等<sup>[8]</sup>、石磊<sup>[9]</sup>从二维角度分析了围岩失稳发生的原因,并给出了相应的施工建议;王伟锋等<sup>[10]</sup>对几种不同的隧道开挖工法导致的围岩塑性区进行了数值模拟对比计算;贾晓旭等<sup>[11]</sup>考虑围岩与隧道的耦合作用,研究了中隔壁法(Center Diaphragm, CD工法)和台阶法施工下的围岩变形特性;邹金杰等<sup>[12]</sup>对松散体可能发生的失稳,采用超前小导管注浆加固的方式缓解了隧道冒顶塌方,并分析了加固效果;针对隧道围岩失稳导致的冒顶和塌方,学者们采取了一系列风险管理手段,包括风险识别<sup>[13]</sup>、风险分析<sup>[14]</sup>、风险综合评价<sup>[15]</sup>以及建立风险评估综合模型<sup>[16]</sup>;Mollon等<sup>[17]</sup>利用三维数值建模分析了盾构隧道的掌子面破坏过程,并进行了稳定性分析.

综上所述,前人对塌方段施工工法进行了较为广泛的研究,但对塌方机制及塌方预测研究较少.基于此,本文以江玉高速公路马章岭隧道为工程背景,分析隧道拱顶节理块体组合,利用块体理论预测围岩潜在的不稳定块体,供类似工程参考及借鉴.

## 1 岩体结构分析

在分析围岩结构稳定性的问题中,块体理论是有效的研究理论与分析方法.

### 1.1 块体理论的基本假定

块体滑移通常发生在坚硬或半坚硬的围岩中,且围岩被不同产状的节理裂隙切割形成块体,依据工程中围岩块体滑移的实际情况,为简化计算做出假定:(1)岩体中的结构面视为平面;(2)忽略结构体的变形;(3)块体剪切位移首先沿结构面发生.

### 1.2 块体分类

块体的分类见表1,各块体类型的二维示意图如图1所示.

表1 块体分类及其特征

块体大小	块体可动性	块体稳定性	块体含义
有限块体	不可动块体		外力作用下不可滑动的块体
无限块体	可动块体	稳定块体	在滑动面抗剪强度较低的情况下,滑动仍然较小的块体
		可能失稳块体	在滑动面的抗剪强度较低时,可能会发生较大相对位移而失稳
	关键块体	在外界诱导滑动作用下,会发生失稳,需要采取加固措施的块体	
	不可动块体		自由度受周围块体限制,不会发生位移的块体

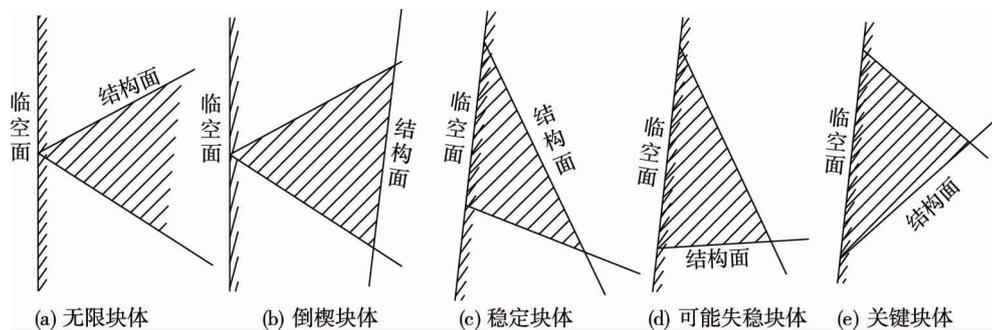


图1 块体类型的二维示意

### 1.3 块体理论的矢量判别步骤

#### 1) 结构面的表达方式

设块体有  $n$  组结构面  $P_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ),其产状包括倾角  $\alpha_i$  和倾向  $\beta_i$ ,则结构面  $P_i$  的方向指向块体外部的单位法向量  $n_i$  为

$$n_i = (A_i, B_i, C_i) = (\sin \alpha_i \sin \beta_i, \sin \alpha_i \cos \beta_i, \cos \alpha_i). \tag{1}$$

#### 2) 块体可动性判别

设结构面  $P_i$  与  $P_j$  的交线对应的矢量为棱矢量  $I_{ij}$ , 其表达式为

$$I_{ij} = \mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j = \begin{vmatrix} x & y & z \\ A_i & B_i & C_i \\ A_j & B_j & C_j \end{vmatrix} = (B_i C_j - B_j C_i, A_j C_i - A_i C_j, A_i B_j - A_j B_i). \quad (2)$$

判断空间某一矢量与结构面的关系, 可以通过该矢量与结构面的方向向上的法向量的数量积来表示: 当数量积大于 0 时, 该矢量指向结构面上方; 当数量积小于 0 时, 该矢量指向结构面下方; 当数量积等于 0 时, 该矢量与结构面平行. 按照该思路, 利用结构面  $P_i$  和  $P_j$  的棱矢量  $I_{ij}$  与结构面  $P_k$  的法向量  $\mathbf{n}_k$  的数量积来判断棱矢量与结构面之间的关系, 其判断变量用方向参量  $I_k^{ij}$  表示, 如式(3)所示.

$$I_k^{ij} = \text{sgn}[(\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j) \cdot \mathbf{n}_k], \quad (i \neq j). \quad (3)$$

其中  $\text{sgn}$  函数的含义如式(4)所示.

$$\text{sgn } L = \begin{cases} +1 & L > 0; \\ 0 & L = 0; \\ -1 & L < 0. \end{cases} \quad (4)$$

$n$  个结构面若两两相交可构成  $C_n^2$  个棱矢量, 将每个棱矢量与各结构面的单位法向量的方向参量组成一个矩阵  $(I_k^{ij})_{C_n^2 \times n}$ , 该矩阵中, 每一行代表一个棱矢量与  $n$  个结构面单位法向量组成的方向参量. 另外, 此处用符号编号法来表示结构面和块体之间的关系, 用  $a_i$  表示块体的第  $i$  个结构面,  $I(a_i)$  则为该结构面的符号编号, 其值可以取 +1 和 -1,  $I(a_i) = +1$  表示块体在该结构面的上半空间,  $I(a_i) = -1$  表示块体在该结构面的下半空间. 将  $n$  个结构面的符号编号组合成矩阵的形式, 从而形成符号编号矩阵  $\mathbf{D}$ , 如式(5)所示.

$$\mathbf{D}_{n \times n} = \begin{bmatrix} I(a_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I(a_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I(a_n) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

判定块体是否可动的判别矩阵为  $\mathbf{T}$ , 如式(6)所示.

$$\mathbf{T}_{C_n^2 \times n} = (I_k^{ij})_{C_n^2 \times n} \cdot \mathbf{D}_{n \times n}. \quad (6)$$

由此可以得到判别矩阵  $\mathbf{T}$  中各元素  $T_k^{ij}$  为

$$T_k^{ij} = I_k^{ij} I(a_k) = \text{sgn}(\mathbf{I}_{ij} \cdot \mathbf{n}_k) I(a_k). \quad (7)$$

根据判别矩阵  $\mathbf{T}$  中某一行的元素情况, 可以推断块体是否可动, 判别方法如表 2 所示.

表 2 块体可动的判别方法

$\mathbf{T}$ 中某行元素 $T_k^{ij}$	棱矢量 $\mathbf{I}_{ij}$ 的情况判定
皆为“0”或同时含“+1”和“-1”	$\mathbf{I}_{ij}$ 不是块体的真实棱矢量, 块体可动
皆为“0”和“+1”	$\mathbf{I}_{ij}$ 是块体的真实棱矢量, 块体不可动
皆为“0”和“-1”	$\mathbf{I}_{ij}$ 为块体的真实棱矢量, 块体不可动

### 3) 可动性块体的运动形式

依据块体的受力情况分析块体是否可动. 由于块体与结构面相接触, 其受力情况如图 2 所示.

由图 2 可知, 块体所受的力主要包括: 主动力合力  $\mathbf{r}$ 、结构面  $P_i$  的法向反作用力  $\mathbf{N}_i$  和切向摩擦力  $\mathbf{T}_{fi}$ .

其中, 主动力合力由自重、惯性力以及锚杆作用力组成. 结构面  $P_i$  的法向反作用力  $\mathbf{N}_i$  的计算式为

$$\mathbf{N}_i = N_i \mathbf{v}_i. \quad (8)$$

式中:  $N_i$  为结构面  $P_i$  的反作用力的大小, 且  $N_i \geq 0$ ;  $\mathbf{v}_i$  为结构面  $P_i$  的单位法向量, 方向指向结构块内部.

结构面  $P_i$  的切向摩擦力  $\mathbf{T}_{fi}$  为

$$\mathbf{T}_{fi} = N_i \tan \varphi_i \hat{\mathbf{s}}. \quad (9)$$

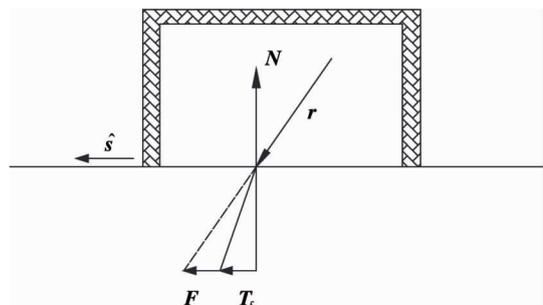


图 2 可动块体受力分析

式中: $\varphi_i$  为结构面  $P_i$  的内摩擦角; $\tan \varphi_i$  相当于结构面  $P_i$  的摩擦系数; $\hat{s}$  为指向块体相对运动方向的结构面切向单位向量.

设滑动面上虚设切向力为  $F$ , 根据力的平衡原理, 可以得到式(10).

$$F = F \cdot \hat{s} = r + \sum_{i=1}^n N_i - \sum_{i=1}^n T_{fi}. \quad (10)$$

根据  $F$  的值可以判断块体的状态: 当  $F < 0$  时, 块体为稳定块体; 当  $F = 0$  时, 块体处于极限平衡状态; 当  $F > 0$  时, 块体为关键块体, 会发生失稳运动, 通常这类块体需要采取加固措施.

块体运动形式一般可以分为 3 种情况, 其运动形式如图 3 所示.

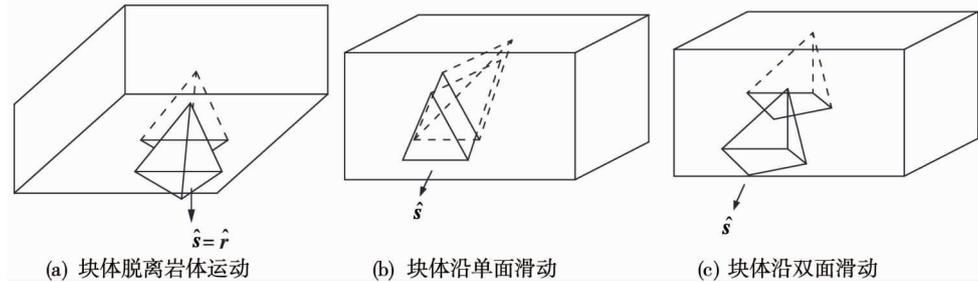


图3 块体运动形式

块体脱离岩体运动的充要条件为块体向主动力合力方向运动, 即满足式(11), 其中  $\hat{r}$  为主动力合力方向的单位矢量.

$$\hat{s} = \hat{r}. \quad (11)$$

块体沿单面滑动的充要条件为  $\hat{s}_i = \hat{s}$  且  $v_i \cdot r \leq 0$ , 其中  $\hat{s}_i$  为主动力合力  $r$  在结构面  $P_i$  上的投影.

若可动块体同时沿结构面  $P_i$  和  $P_j$  进行双面滑动, 则该块体需满足条件

$$v_i \cdot \hat{s}_j \leq 0, v_j \cdot \hat{s}_i \leq 0; \quad (12)$$

$$\hat{s} = \frac{\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j}{|\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j|} \text{sgn}[(\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j) \cdot \mathbf{r}]. \quad (13)$$

式中:  $\hat{s}_i$  和  $\hat{s}_j$  为主动力合力  $r$  在结构面  $P_i$  和  $P_j$  上的投影.

## 1.4 可动块体稳定系数的计算

### 1.4.1 可动块体自重计算

考虑到块体是由结构面切割而成, 可将块体近似看成四面体. 设四面体四个顶点的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 其中  $i=1, 2, 3, 4$ , 则其体积  $V$  的计算式为

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

四面体的顶点坐标可通过 4 个结构面的平面方程求解. 设其中 3 个结构面的平面方程为

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = D_1; \\ A_2x + B_2y + C_2z = D_2; \\ A_3x + B_3y + C_3z = D_3. \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)即可求得四面体的一个顶点坐标. 类似地, 可以求出其余 3 个顶点坐标, 进而求出块体体积.

可动块体自重的计算式如式(16)所示.

$$W = V\gamma. \quad (16)$$

式中:  $W$  为可动块体自重;  $\gamma$  为岩体容重.

### 1.4.2 可动块体稳定系数计算

1) 当可动块体直接崩塌时, 其稳定系数  $K=0$ .

2) 当可动块体沿单面滑动时,其稳定系数为

$$K = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi + cS}{W \sin \alpha} \quad (17)$$

式中: $\alpha$  为滑动面倾角; $\varphi$  为内摩擦角; $c$  为黏聚力; $S$  为滑动面面积.

3) 当可动块体沿双面(此处假定两个滑动面为  $P_1$  和  $P_2$ ) 滑动时,其稳定系数为

$$K = \frac{W \cos \eta (\sin \theta_2 \tan \varphi_1 + \sin \theta_1 \tan \varphi_2) + (c_1 S_1 + c_2 S_2) \sin(180^\circ - \theta_1 - \theta_2)}{W \sin \eta} \quad (18)$$

式中: $\eta$  为这两个滑动面的交线与水平面的夹角; $\theta_1, \theta_2$  分别为两滑动面的交线与其法线的夹角; $\varphi_1, \varphi_2$  分别为滑动面  $P_1, P_2$  的内摩擦角; $c_1, c_2$  分别为滑动面  $P_1, P_2$  的黏聚力; $S_1, S_2$  分别为滑动面  $P_1, P_2$  的面积.

## 2 工程实例

### 2.1 地质构造调查

马章岭隧道是江玉高速公路上一条长大分离式隧道,其区间里程为 ZK9+320—ZK11+710. 据区域地质资料及地质调绘,调查区共发现断裂 7 条,受断层构造影响,区内地层大多被肢解分割,岩层以单斜地层为主,局部破碎杂乱. 根据现场调查,隧址区灰岩、页岩大面积出露,在隧道洞身段选取 4 个结构面,对其岩体节理裂隙发育情况进行统计,其结果为(1)  $P_1$ : 产状  $75^\circ \angle 53^\circ$ , 为层间裂隙,线密度 5~7 条/m,裂隙长度大于 3.0 m,呈闭合状;(2)  $P_2$ : 产状  $174^\circ \angle 48^\circ$ ,线密度 5~8 条/m,裂隙长度大约 4.0 m,呈闭合状;(3)  $P_3$ : 产状  $217^\circ \angle 81^\circ$ ,为层间裂隙,线密度 1~3 条/m,裂隙长度大于 4.0 m,呈闭合状;(4)  $P_4$ : 产状  $136^\circ \angle 78^\circ$ ,线密度 2~5 条/m,裂隙长度大约 5.2 m,呈闭合状.

### 2.2 可动块体的预测

对该隧道地层 4 个结构面和 1 个临空面进行统计分析,绘制各平面的赤平极射投影图,如图 4 所示. 其中,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  为结构面,  $P_5$  为临空面, JP1111, JP0111, JP1101 为块体编号.

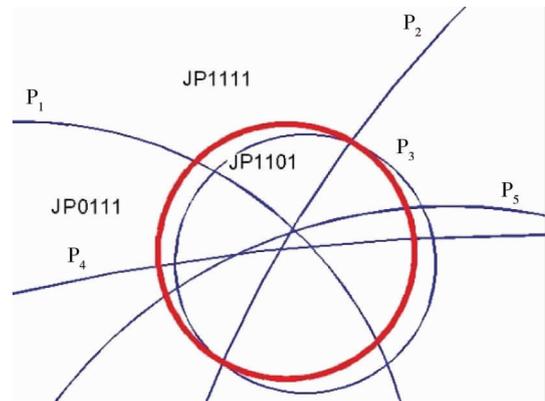


图 4 赤平投影及块体编号

结构面  $P_1, P_2, P_3, P_4$  和临空面  $P_5$  的方向指向块体外部的单位法向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1 = (-0.6686, -0.6686, 0.3256); \\ \mathbf{n}_2 = (0.8613, -0.4973, 0.1045); \\ \mathbf{n}_3 = (0.1456, -0.0946, 0.9848); \\ \mathbf{n}_4 = (0.1044, -0.9932, 0.0523); \\ \mathbf{n}_5 = (0.3304, -0.9077, 0.2588). \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入式(3)和式(4),可得到结构面的方向参量矩阵,如式(20)所示.

$$(I_k^j)_{C_3 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

在方向参量矩阵的基础上,便可以根据结构面与块体的位置关系及式(5)和式(6)得到判别矩阵  $T$ ,以此来判断块体是否为可动块体.以块体 JP1111 为例,其判别矩阵如式(21)所示.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

由式(21)可以看出,其判别矩阵每行均含有“+1”和“-1”项,由此可以判断该块体为可动块体.

根据本方法对所有节理进行分析,通过计算确定与上述结构面和临空面有关的可动块体分别为 JP1111,JP0111,JP1101.根据分析结果,对隧道与结构面接触的临空面进行撬顶处理,并打设锚杆,确保洞顶安全,为隧道安全施工提供技术支持.

### 3 结论

1) 基于隧道围岩中结构面与块体之间的位置关系,利用矢量分析法和块体理论构建的块体可动性判别方法,可有效地鉴定出不稳定块体的存在,进而分析节理裂隙发育围岩的稳定性.

2) 采用所提的判别方法对马章岭隧道的4个结构面和1个临空面进行分析,判别出隧道洞顶的3个可动块体.为防止洞顶塌方,采取合适的工程措施,确保了洞顶和隧道施工的安全.

### 参考文献:

- [1] 王洪明,王强,杜维锋.双连拱隧道浅埋段冒顶塌方原因分析与处治措施[J].工程技术研究,2020,5(6):107-108.
- [2] 郑兴水,张森,宋宁.隧道塌方处理工程技术方案研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(1):291-292.
- [3] 秦辉辉,赵占厂,李晓博.某公路隧道塌方原因分析及处治方案研究[J].公路,2013(1):302-307.
- [4] 卢义玉,陈凌云,冯卫强,等.锚喷支护及小导管注浆在隧道塌方中的应用[J].重庆大学学报(自然科学版),2009,32(5):572-576.
- [5] 甘小江.隧道贯通段塌方处理施工技术[J].现代隧道技术,2012,49(6):168-171.
- [6] 李志强,杨涛.浅埋黏土层大跨度隧道施工技术与塌方风险分析[J].公路交通科技,2020,37(2):116-122.
- [7] 张建军,马吉倩.高速公路隧道洞口浅埋段塌方冒顶分析与治理[J].公路工程,2017,42(2):187-190.
- [8] 张远荣,裴国禄,谢惜谦.白石岭隧道塌方冒顶的处理与经验体会[J].隧道建设,2008,28(2):232-236.
- [9] 石磊.那马隧道塌方处理施工方案[J].隧道建设,2008,28(1):89-92.
- [10] 王伟锋,毕俊丽.软岩浅埋隧道施工工法比选[J].岩土力学,2007,28(10):430-436.
- [11] 贾晓旭,赵玉成.软弱围岩隧道CD法和台阶法施工力学行为分析[J].铁道标准设计,2016,60(7):121-125.
- [12] 邹金杰,顾鑫杰,章立峰,等.浅埋暗挖原理在西部某隧道冒顶塌方治理中的应用[J].现代隧道技术,2016,53(2):202-206.
- [13] 陈韶光.青山岗隧道施工塌方的风险评价[J].公路工程,2008,33(5):91-95.
- [14] 郭鹏,李志强,张凤爱,等.程家沟隧道施工阶段塌方风险辨识及评估技术研究[J].中外公路,2012,32(4):218-222.
- [15] 陈洁金,周峰,阳军生,等.山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J].岩土力学,2009,30(8):2365-2370.
- [16] 张晨曦,吴顺川,吴金.山岭隧道施工中塌方风险评估模型研究及应用[J].中国安全生产科学技术,2019,15(9):128-134.
- [17] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,136(1):215-229.