

# 乌池坝隧道围岩不定位块体稳定性分析

李成磊<sup>1, 2</sup>, 晏鄂川<sup>2</sup>, 李 英<sup>1, 2</sup>

(1. 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074 2. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 乌池坝隧道是沪蓉西高速公路恩施至利川段的控制性工程。随着隧道的开挖, 岩体沿其切割结构面或临空面产生整体或局部移动, 导致围岩失稳而不能施工。针对隧道施工揭露的围岩地质信息, 通过几何分析和力学分析, 研究该隧道 ZK 259+ 738~ ZK 259+ 768段围岩不定位块体的空间分布, 识别关键块体及其破坏类型, 并对比运用 UNWEDGE 软件建立了该段隧道和围岩块体的三维模型, 对其中关键块体进行稳定性评价, 计算加固所需的锚固力。研究表明, 在超前预报中根据隧道施工的围岩地质信息可以有效地识别围岩块体, 获得不定位块体分布状况、查明关键块体, 在工程实际块段能确定相应块体稳定性系数及工程安全所需锚固力。

**关键词:** 乌池坝隧道; 围岩; 超前预报; 不定位块体; 块体稳定性

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

自然界中岩体被结构面切割成大小不同、形状不一的岩块, 随着地下工程开挖, 引起岩体卸荷回弹和应力重分布。当回弹应力和重分布应力超过围岩承受能力时, 将使暴露临空面上的某些块体沿着结构面滑移或局部掉块, 造成一定范围内岩体失稳, 因此研究块体的稳定性是工程中一项极为重要的内容。

1980年代石根华与 Goodman 正式提出了块体理论<sup>[1]</sup>, 标志着这一理论作为岩体工程分析的一种有效方法已进入了应用阶段。国内外应用块体理论在相关领域取得进展, 如: 考虑结构面随机分布的关键块体分析与可靠度分析、赤平投影的解析化、块体理论软件的开发, 使得块体理论在三峡等重大工程中得到推广与应用<sup>[2- 5]</sup>。在地下工程中, 运用块体理论可以预测不同开挖面上可移动的关键块体, 分析其几何特性和稳定性状况, 并提出相应的支护措施。本文以乌池坝隧道为例, 研究 ZK 259+ 738~ ZK 259+ 768段围岩不定位块体的空间分布及其稳定性状况。

## 1 乌池坝隧道围岩块体几何分析

### 1.1 块体理论简介

块体理论假定岩体结构面为平面, 结构面切割成的块体为刚体, 块体的失稳为掉块与沿着结构面产生的剪切滑移。根据上述假设, 利用几何拓扑方法分析, 找出岩体工程中由岩体结构面及临空面所形成的块体, 排除其中的无限块体及不可动体, 找出可动块体。然后, 根据结构面的物理力学性质, 结合刚体力学平衡分析, 确定在工程作用力及自重作用下工程开挖面上的所有关键块体, 并计算其稳定性及其所需要的锚固力, 从而指导工程加固。

### 1.2 可移动块体判别

根据赤平投影原理, 分别对结构面和临空面进行下极点全空间赤平投影。一个结构面的全空间赤平投影为大圆, 其圆内域相应于结构面的上盘岩体, 圆外域相应于下盘岩体。再利用块体的数字编号法, 就可将全空间赤平投影图上所有的区域既方便

收稿日期 (Received date): 2008- 09- 21; 改回日期 (Accepted): 2008- 12- 01。

基金项目 (Foundation item): 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET- 07- 0775)。[Supported by New Century Excellent Talents in the Ministry of Education Support Program (NCET- 07- 0775).]

作者简介 (Biography): 李成磊 (1984- ), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事岩土体稳定性研究。[Li Yuke (1984- ), male, Graduate student  
Study on the stability of rock & soil]

又无遗漏地标注出来。根据可动性块体定理, 应用赤平投影法能直观地判断可移动块体的类型和移动方式。

在建的乌池坝隧道位于湖北省恩施市白果坝镇乌池坝(进口端)与利川市团堡镇箐口(出口端)境内, 设计为上下行分离式隧道, 另设竖井与斜井各一座。隧道主体埋深 350~460 m, 右幅里程桩号为 YK253+162~YK259+855, 长 6 693 m; 左幅里程桩号为 ZK253+182~ZK259+890, 长 6 708 m。该隧道地处构造剥蚀、溶蚀中低山地貌区, 地势陡峻、冲

沟发育, 表生动力地质作用强烈。隧道区出露岩体依次为志留系~三叠系地层, 进口段岩层产状  $310^{\circ}\sim 330^{\circ}\angle 30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、出口段产状  $310^{\circ}\sim 330^{\circ}\angle 8^{\circ}\sim 11^{\circ}$ , 呈现为单斜构造, 属于白果背斜的北西翼、同时为金子山复向斜南东翼, 节理裂隙极为发育。

本文以 ZK259+738~ZK259+768 段为研究对象。该段隧道走向为  $289^{\circ}$ , 隧道围岩为中~厚层状灰岩, 岩层产状为  $310^{\circ}\angle 11^{\circ}$ , 另外发育两组优势节理裂隙, 产状为  $130^{\circ}\angle 75^{\circ}$ 、 $12^{\circ}\angle 61^{\circ}$ (图 1, 表 1)。因此, 存在三组结构面(加临空面)切割而成的块体。

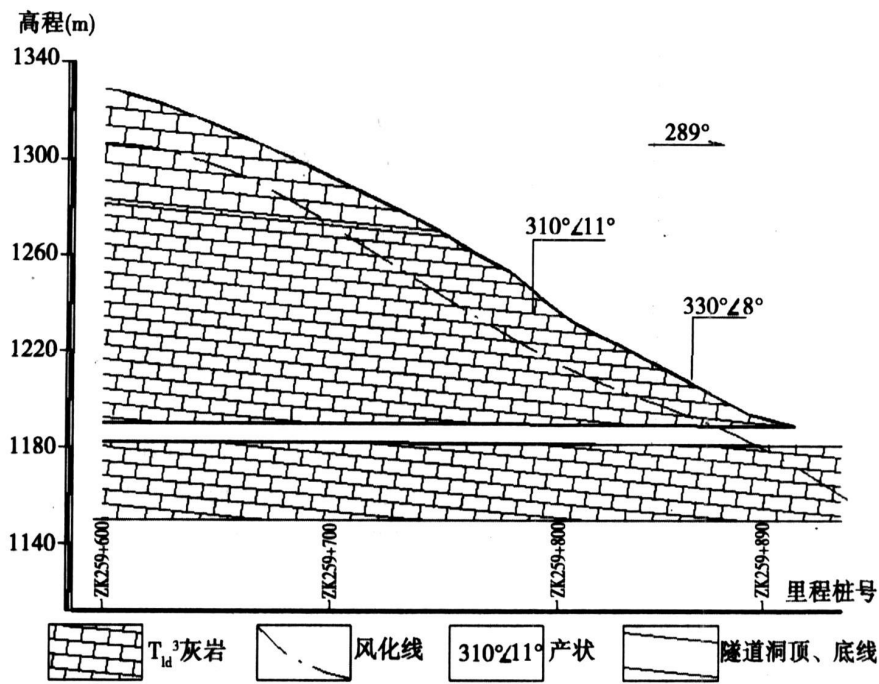


图 1 乌池坝隧道 ZK259+600~ZK259+890 段地质剖面图  
Fig 1 The geological profile of ZK259+600~ZK259+890 section of Wuchiba tunnel

表 1 乌池坝隧道 ZK259+738~ZK259+768 段结构面发育情况

Table 1 Joint set data in ZK259+738~ZK259+768 section of Wuchiba tunnel

结构面	产状(°)	抗剪强度		发育程度
		<i>f</i>	<i>c</i> (MPa)	
①	310∠11	0.58	0.18	较发育
②	130∠75	0.49	0.17	较发育
③	12∠61	0.49	0.17	较发育

三组结构面和临空面的全空间赤平投影图见图 2。图中, 圆①②③分别表示三组结构面的投影, 虚线为边墙的投影, “100”等为节理锥(JP)的编号。

以节理锥 100 为例, 根据可移动块体的判断准则, 其完全落入左边墙(W1)的空间锥(SP)内, 则节理锥 100 为左边墙(W1)的可移动块体, 且其沿双结构面 2 和 3 滑动(S23)。三组结构面组合的可移动块体类型如表 2。

1.3 关键块体判断

在判断可移动块体后, 还要找出在自重条件下那些首先失稳滑动的块体(即关键块体)。关键块体的判别是通过力学分析从可动块体中找出。力学分析的主要内容是依据作用于可动块体上的力的平衡方程计算在不同运动形式下块体的剩余下滑力值(*F*)。当其剩余下滑力大于零时, 改块体为关键块体; 反之, 为稳定块体。

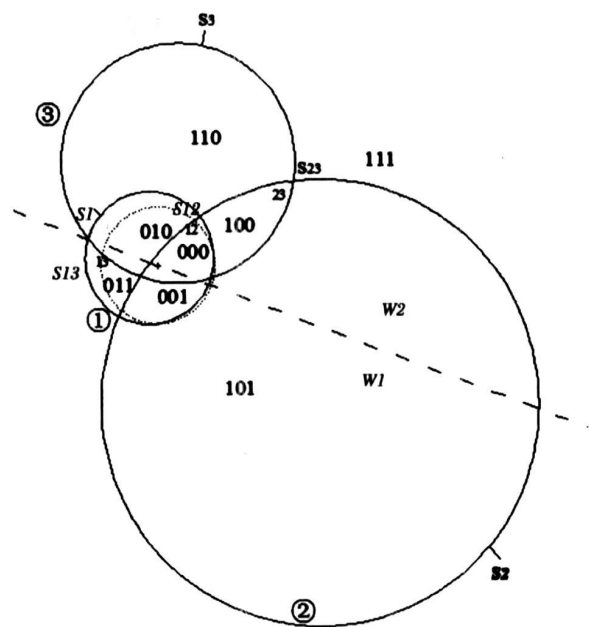


图 2 结构面的全空间赤平投影图

Fig 2 Stereograph project of three joint sets

不同运动形式下的剩余下滑力公式:

### 1. 直接掉块

$F = |\bar{r}|$ , 即  $F$  等于块体自重。

### 2. 沿单面 $i$ 滑动

$F = |\hat{n}_i \times \bar{r}| - |\hat{n}_i \cdot \bar{r}| \tan \varphi_i$

### 3. 沿双面滑动

$$F = \frac{1}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} [|\bar{r} \cdot r| (|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|) |\hat{n}_i \times \hat{n}_j| - |\bar{r} \times \hat{n}_j| \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) |\tan \varphi_i - |(\bar{r} \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \varphi_j]$$

表 2 可移动块体分布状态及其剩余下滑力

Table 2 Distribution of removable block and the remaining sliding force

临空面 编号	块体 类型	失稳形式	剩余下 滑力 ( $F$ )
左边墙 (W1)	100*	双面滑动 (②、③)	0.277 3
右边墙 (W2)	011*	双面滑动 (①、③)	-0.458 8
顶拱 (W3)	111	直接掉落	1
	110*	单面滑动 (③)	0.594 7

注: \* 表示关键块体

在此剩余下滑力的计算中只考虑结构面的摩擦系数, 使其结果偏于安全, 以免发生关键块体的漏判, 并且取  $\varphi = (0.0 - 1)$ , 这样计算的  $F$  为无量纲值。计算结果如表 2 由此可判断关键块体为 111、

110 和 100。

## 2 关键块体稳定性及支护分析

U n w e d g e 程序<sup>[6]</sup>是加拿大多伦多大学 E. Hoek 等根据石根华提出的块体理论开发而成, 适合于分析在石灰岩等坚硬岩体中开挖所形成的块体的稳定性。它假定结构面交切形成的块体为四面体, 即由三组结构面和临空面组成, 只考虑潜在不稳定块体的重力, 而不考虑地应力作用, 并将结构体视为刚体。块体失稳一般有直接垮落、沿单滑面滑动和沿双滑面滑动三种方式。U n w e d g e 可以生成最大可能的楔形块体, 计算其安全系数并提供使其稳定的支护方案。

### 2.1 关键块体稳定性分析

采用 U n w e d g e 建立本段隧道的实体模型, 进行关键块体的搜索。再把本段隧道围岩结构面力学参数输入后, 程序自动搜索生成出给定结构面在隧道不同开挖面上形成的块体三维模型, 并分析出各可移动块体的稳定性。隧道开挖面上的可移动块体的分布图如图 3 所示。

从图 3 中, 可以直观的看出各个可移动块体的分布形式及运动形式, 这与上文通过几何分析得到的可移动块体的形式吻合。U n w e d g e 搜索的是最大关键块体, 即在特定尺寸的隧洞, 考虑结构面足够长, 可形成的最大块体。在不定位块体分析中, 我可以根据实际工程规模尺寸对结构面的长度进行假设, 从而分析出的块体几何特征更贴合实际, 并且为块体稳定性分析和支护方案选择提供依据。根据乌池坝隧道结构面长度调查资料和工程经验, 该工程实际块体的最大边长不超过 12 m, 可以计算出各个块体相关参数, 如块体的体积、重量、安全系数等, 以便对关键块体进行判断和分析。各块体的几何特征和稳定性见表 3 所示。

由表 3 可以看出, U n w e d g e 搜索出的关键块体也为 111、110 和 100 与上文力学分析的结果吻合, 从而证明了该程序的实用性。

### 2.2 关键块体支护分析

利用块体理论分析隧道围岩稳定性, 其分析结果指导隧道围岩加固防治分析, 主要体现在锚固力的求解、锚杆长度的确定和锚杆间距的布置。

锚固力的计算根据关键块体剩余下滑力确定, 锚固力的方向按垂直边墙或顶拱考虑 (表 4); 锚杆

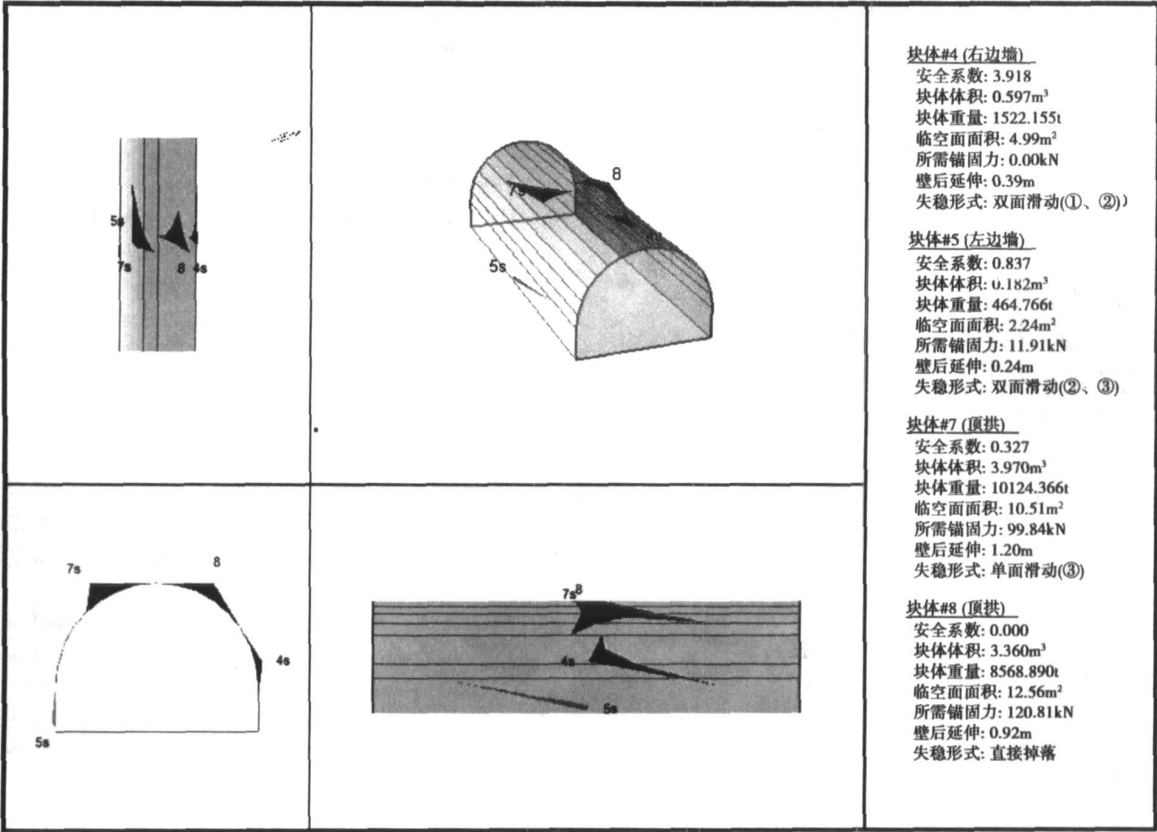


图 3 开挖面上的可移动块体分布图

Fig. 3 Removable blocks in different excavation faces

表 3 可移动块体的几何特征及稳定性

Table 3 Geometry feature and stability of removable blocks

块体编号	块体类型	体积 (m³)	重量 (t)	失稳形式	安全系数
# 8	111	3.36	8569	直接掉落	0
# 7	110	3.97	10124	单面滑动 (③)	0.327
# 5	100	0.18	466	双面滑动 (②、③)	0.837
# 4	011	0.60	1522	双面滑动 (①、③)	3.918

的长度根据关键块体的壁后延伸决定; 锚杆间距应综合考虑典型块体的剩余下滑力、关键块体在临空面上的面积、锚杆的直径和砂浆的强度等因素计算确定。

表 4 块体所需的锚固力

Table 4 Required anchor force for key block

块体类型	体积 (m³)	壁后延伸 (m)	临空面面积 (m²)	所需锚固力 (kN)
111	3.36	0.92	12.56	120.8
110	3.97	1.20	10.51	99.8

图 3和表 3表 4中关键块体的几何特征分析, 块体 100的形态显得尖长, 而且体积很小只有 0.18 m³, 在隧洞开挖后可能自行脱落。块体 111和块体 110的体积也较小, 壁后延伸长度也都在 1 m 左右, 按照隧道施工中的超前锚杆支护方案, 可以保证其稳定性。但在施工中要注意块体 111, 其失稳形式是从顶拱脱落, 稳定性极差。

3 结论

1. 在隧道施工超前预报中可以根据围岩地质信息有效地识别围岩块体, 获得不定位块体分布状

况、查明关键块体,在工程实际块段能确定相应块体稳定性系数及工程安全所需锚固力。

2. 对关键块体的几何分析和力学分析的结果,与 Unwedge 分析结果吻合,说明两种方法均适用于评价隧道围岩稳定性,具有可行的工程意义。但 Unwedge 只能处理三组结构面切割的块体,对于多组结构面切割成的五面体和六面体的情况,还需进一步开发与分析。

3. 根据块体理论分析结果,可以对实际工程施工中存在的块体进行有针对性的处理,同时可以对前方未开挖段进行块体稳定性预测。

## 参考文献 (References)

- [1] Shi Genhua Goodman R E. Block Theory and Its Application to Rock Engineering[M]. New York: PrenticeHall 1985
- [2] Zhang Zixin, Sun Jun. Stereanalytic method for block theory and its application in stability analysis of a cave[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(12): 1756~1760[张子新, 孙钧. 块体理论赤平解析法及其在洞室稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1756~1760]
- [3] Zhang Qihua Wu Aiqing Shi Genhua Application of key block

theory to analysis of rock stability for underground plant in base hydraulic project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2609~2614[张奇华, 邹爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609~2614]

- [4] Yang Qing Yang Gang Wang Zhongchang et al. Application of block theory to surrounding rock stability of underground caverns in huanggou pumped storage station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1618~1624[杨庆, 杨钢, 王忠超, 等. 块体理论在荒沟抽水蓄能电站地下厂房系统洞室群围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1618~1624]
- [5] Wang Minghua Feng Wenkai Liu Hanchao et al. A study on rock mass structure feature and surrounding rock ranking for xiluodu hydroelectric power station[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1): 101~105[王明华, 冯文凯, 刘汉超, 等. 溪洛渡水电站地下厂房岩体结构特征及围岩分类[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 101~105]
- [6] Unwedge Users Guide 3D visualization of potentially unstable wedge in the rock surrounding underground excavations and calculation of factors of safety and support requirements for these wedge[Z]. Rocscience Inc. 1992~1999

# Stability Analysis of Unlocated Block of Surrounding Rock in Wuchiba Tunnel

LI Yulei<sup>1,2</sup>, YAN E'chuan<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1,2</sup>

(1. Graduate faculty of China University of Geosciences, Wuhan, 730074, China;

2. Engineering faculty of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Wuchiba tunnel is a key project of Enshi to Lichuan section in HuRong expressway. In tunnel engineering the stability of rock is controlled by the number of blocks, i.e. the size, orientation and locations of the discontinuities. Key block failures occur where blocks of rock which are separated from the rest of the rock mass by discontinuities slide or fall into an excavation. In the present paper, according to geometric and mechanical analysis, we identify the distribution of unlocated blocks and failure modes of key blocks in ZK259+738~ZK259+768 section of wuchiba tunnel. Besides using Unwedge program for a comparison, and create the three-dimensional structural model of this section of the tunnel and blocks. The quantitative data and stability of all key blocks are analyzed by means of Unwedge program. The research shows that the distribution of unlocated blocks, the quantitative data of key blocks, safety factors of the blocks and required anchor force in practical project section are identified according to geological information of surrounding rock in the advanced prediction.

**Key words** Wuchiba tunnel; surrounding rock; advanced prediction; unlocated block; block stability