

文章编号: 1006-4710(2013)03-0301-06

# 边坡开挖松弛区划分及参数敏感度分析

袁继国, 符贵军

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 边坡稳定与人工开挖形成的扰动区有关,合理地确定松弛区对边坡的稳定性评价及整治有重要意义。结合工程实例,采用有限元法对边坡的分级开挖进行模拟,揭示了开挖对坡体的影响机理,运用萨尔玛(sarma)法对影响边坡稳定的因素进行了敏感性分析。结果表明,坡体按水平位移可以划分为松弛区、变形区和衰减区,结构面粘聚力影响大于其摩擦角。

**关键词:** 边坡开挖; 松弛区; 萨尔玛法; 敏感度

**中图分类号:** TD824 **文献标志码:** A

## Slope Excavation Laxity Section Classification and Parameter Sensitivity Analysis

YUAN Jiguo, FU Guijun

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The slope stability is related with the disturbed zone formed by artificial excavation. Rational determination of the disturbed zone is of great importance for qualified assessment and control of slopes' stability. In combination with practical engineering examples, the finite element method is adopted to simulate the grade excavation, whereby revealing that excavation can have the effect upon the mechanism of damaging. Sarma method is used to carry out the sensitivity analysis of the factors affecting the slope stability. The results indicate that slope can be classified into laxity zone, deformation zone and denudation zone in accordance with the horizontal displacement, and the cohesion of structural surface is more important than friction angle.

**Key words:** slope excavation; laxity section; sarma method; sensitivity

开挖卸荷对边坡稳定性的影响及其作用机理历来受到国内外学者和设计人员的重视。在边坡工程中,岩质边坡的评价及治理是具有代表性的一类问题。一般认为主要的影响因素有坡体的几何特征、岩性、岩层倾角、内部裂隙及地下水作用等。边坡开挖松弛特性的研究对设计人员合理的划分扰动区及确定工程参数有指导意义。

目前,边坡稳定性评价的方法主要有极限平衡法和数值仿真法。萨尔玛(sarma)法考虑了岩体的裂隙强度和产状影响,适用于裂隙发育强烈,滑动面单一的边坡。但有些情况下,由于存在实际破坏面难以预测,裂隙强度参数取值困难等问题,限制了其在工程上的应用,松弛区的确定可以为解决这一问题提供思路。国内学者在这方面做了大量工作,研

究了边坡开挖扰动区的预估评价方法<sup>[1]</sup>,提出了边坡二次应力的“驼峰应力分布规律”<sup>[2]</sup>,并以塑性发展<sup>[3-4]</sup>、岩石的极限拉伸应变等指标建立了扰动区的划分原则,尝试从能量演化、荷载释放、空间效应等方面揭示其内在机理<sup>[5-8]</sup>。总体讲学界对上述问题仍以定性认识为主。

本研究结合工程实际问题,利用 geostudio 软件探究了卸荷松弛区的特性,建立了相应的划分原则,讨论了强度参数的选取。

## 1 工程背景

### 1.1 边坡概况

边坡位于陕西省府谷县城北 18 km,顶部主要分布黄土,局部地段有素填土。坡体中部、下部及坡脚为泥岩砂岩直接出露,边坡岩性为泥岩砂岩互层,岩

收稿日期: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(05JS34)。

作者简介: 袁继国,男,副教授,研究方向为岩体力学应用。E-mail: yuanjiguo@xaut.edu.cn。

层倾角  $13^\circ$  左右,强风化层厚度  $1.7 \sim 6.3$  m,边坡临时开挖面最大坡高约  $58$  m,为顺层岩质边坡,见图 1。

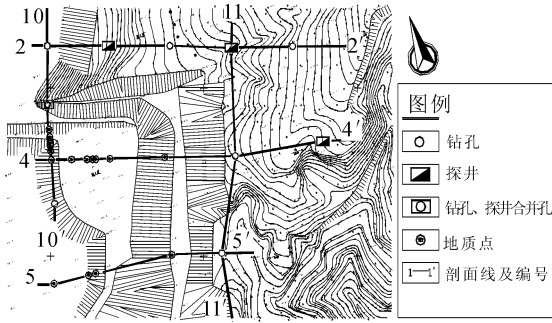


图 1 勘点布置图

Fig. 1 The layout of survey point

整平场地形成的临时边坡已多处发生变形破坏,本研究以滑坡 4 号剖面进行分析研究,其断面见图 2。坡高  $25$  m 左右,上部为  $2$  m 厚黄土,以下为泥岩砂岩互层。滑坡后缘有 6 条裂隙,裂隙宽  $3 \sim 200$  mm,裂隙分布范围至坡脚,水平距离/坡高  $\approx 1.6$ 。边坡开挖后由于应力的释放和坡比不满足稳定性要求,砂岩内裂隙张开,发生倾倒、崩塌,泥岩发生蠕滑,坡脚隆起。

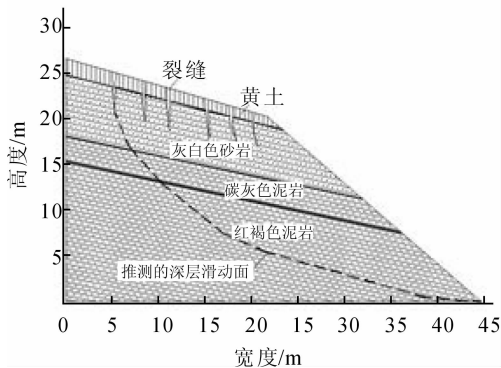


图 2 典型断面

Fig. 2 Typical section chart

## 1.2 滑坡机理的分析

现场勘察表明,滑坡处于发展阶段,有明显的变形破坏。削坡后,应力释放使坡体应力重新调整,原有岩体强度发生弱化效应,变形的控制因素是缓倾角层间错动和内部裂隙的张开展。边坡的层间蠕滑变形导致了剪切错动带的形成,随着时间推移,后缘产生拉力,当超过材料强度时出现裂缝,并随滑动发展向下沿伸,中部相对稳定,呈现稳态。

滑坡 4 的破坏发生在中等风化泥岩和强风化泥岩的层间,坡体表现为趾部隆起。由此推断,底部中风化岩层存在微小裂隙,应力释放后逐渐张开,强度减小。因为垂直方向上压力基本不变,促使其进一步发展导致向上贯通,形成了类土质边坡情况下的

圆弧状滑面,并在坡脚处发生应力集中与形变。由此可见,滑坡 4 的破坏在上部表现为滑移-拉裂式,下部为滑移-压裂式。

## 2 开挖松弛区的数值模拟

### 2.1 计算模型确定

采用 geostudio 中的 sigma 模块对滑坡 4 剖面进行有限元分析。将边坡底层的中等风化泥岩概化为强风化层,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,整个开挖过程分为六步。首先将坡体上部削平,然后以  $1:1.75$  坡率分四级开挖,每级高  $5$  m,于  $10$  m 处设  $4$  m 的马路。对开挖临空面加  $120$  kN 的  $6$  m、 $8$  m 间隔锚杆与不加锚杆情况进行对比分析。根据试验资料和工程勘察,确定模型参数(见表 1)。基本假定为:

- ①边坡原始应力场由自重应力场提供;
- ②遵循二维平面应变假定;
- ③滑坡所处地为干旱区,且地下水位较低,故不考虑水的影响。

工程所处区域地震基本烈度为 VI 度,所以不考虑地震影响。

表 1 基本参数表

Tab. 1 The chat of basic parameters

测试项	黄土	强风化泥岩	强风化砂岩
$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	15.4	24.7	24.9
$C / (\text{kPa})$	13.5	19	25
$\varphi / (^\circ)$	29.3	27.5	29
$E / (\text{mPa})$	16	100	150
$\mu$	0.4	0.35	0.35

### 2.2 开挖卸荷松弛区的位移特性

通过研究开挖过程中边坡位移的分布范围和演变规律,揭示开挖松弛区的特性。观察开挖变形回弹后的情况,结合云图 3 发现,边坡开挖后其变形主要集中在坡面,方向与力的位矢相同,考虑到工程中水平方向上位移便于观测,并且裂隙张开程度也可量化,故采用水平位移为主要分析指标。

图 4 为模拟应力完全重分布后坡体的位移情况。图 3 和图 4 对比,可以发现水平位移由坡面向内部逐渐减小,中部为变形最大区域,基本呈圆弧带状,后者的范围较刚回弹时有所减小,最大变形在坡脚处,并有明显随应力调整而偏转的现象,表明开挖对坡体变形的影响与应力场的变化和时间有很大的关系。根据潘家铮<sup>[9]</sup>最大最小原理,边坡由于外界条件的变化,会自动调整以发挥最大强度,沿最小

强度面发生破坏。数值模拟的结果可以解释为边坡的调整需要一定的时间,而人为因素下应力场的变化十分迅速,使整体来不及响应而局部发生过量变形,产生松动。需要指出,模型中并没有考虑固有裂隙的影响,实际变形量会比模拟量大,强度的弱化是由于固有裂隙的张开与发展,从而逐渐形成滑动面。

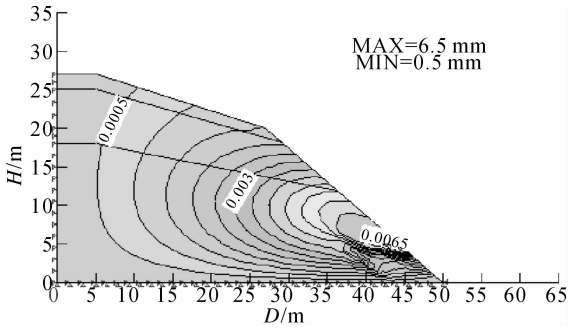


图3 回弹位移图

Fig. 3 Displacement of stress rebound

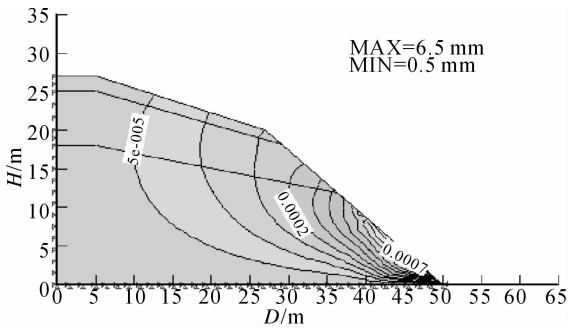


图4 重分布位移图

Fig. 4 Displacement of stress redistribution

由于整平已完成很长时间,以重分布的应力场为分级开挖的初始场,较为符合实际。从云图5分析,放坡第一步开挖主要为竖直方向上的卸荷,削坡至设计标高,坡体内水平位移图5(a)呈等高线型,坡肩下5 m处为最值区,向四周递减,且为负向移动,原因是压重减小时竖向产生了回弹。第二步开挖,图5(b)的最值区向一级坡肩处转移,负向位移增大,在二级坡面内呈现出带状分布,局部位移增加,总体与一级坡面下部连通,形成围绕坡肩的等高线型分布。第三步开挖至二级台阶设计标高,图5(c)中最值区继续向一级坡肩处转移,二级台阶内等值线沿坡面分布,影响从坡面向内逐渐减小,在整个坡体内形成一水平向位移不变区。进行第四步开挖,图5(d)中已经不存在绝对的最值区域,只在局部产生较大形变,位移不变区向坡面明显发展,并会产生一定的正向位移区,呈等高线型分布。一级坡面内等值线发生较大变化,对二级坡面影响较小。伴随最后一次开挖完成,整体云图图5(e)分布基本不变。

根据上述情况,在第二步至最后一步的开挖过程中,及时对坡面进行锚固,分析云图变化情况。选取具有代表性的第三次开挖锚固作为分析对象,增加锚杆后,由图5(f)与图5(c)的对比可以看出,坡面负向位移进一步增大,位移不变区向锚固坡面大范围移动,说明锚杆增加了坡体的协同性,调整了内部变形,有利于坡体稳定,但在坡面处局部位移增大,对远离锚固体的区域基本没有影响。

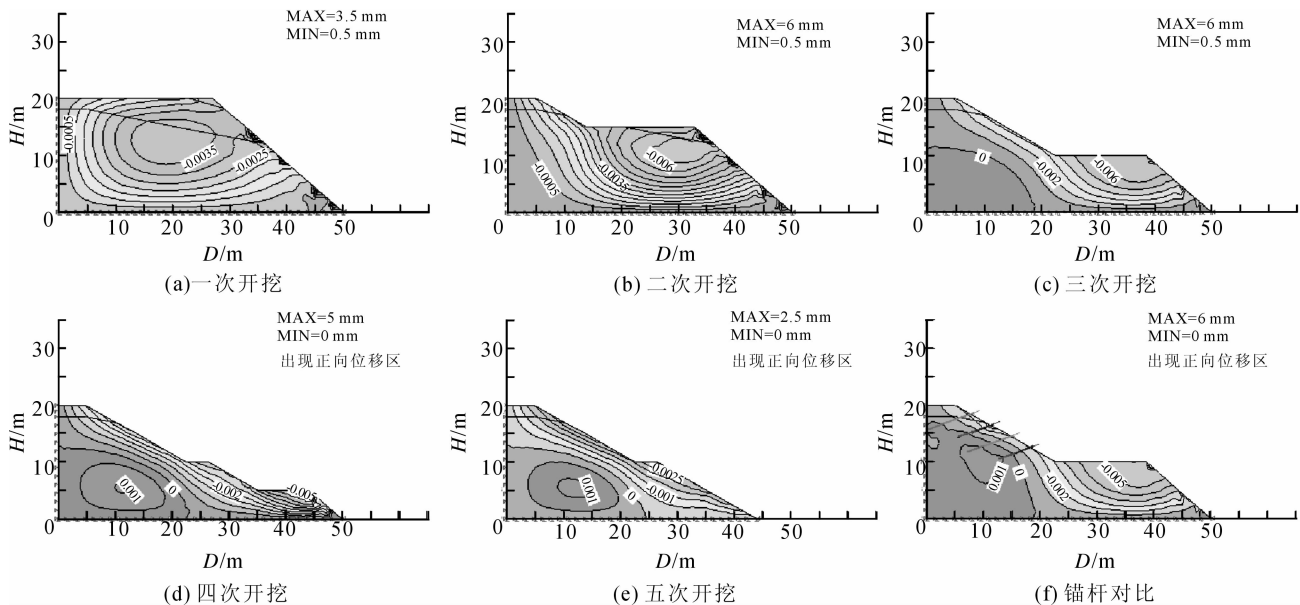


图5 分级开挖模拟图

Fig. 5 The chart of grading excavation simulation

### 2.3 开挖松弛区的确定方法

边坡卸荷回弹主要发生在力的位矢方向上,一般存在一个主导方向,通过泊松比影响其正交方向上的变形,就本边坡而言,突出表现为水平负向位移。结合松弛区原岩应力状态,可以近似认为边界固定位移处为坡体远端,所以数值模拟的结果定性描述了随开挖过程的进行,坡体内变形区域的特征,其等高线型分布为确定分区提供了有效途径。

在最值区与坡面范围内,可以确定为开挖松弛区,其基本特点是随坡面向内,水平向位移呈逐渐增大趋势,岩体强度变化明显,局部产生松动。从最值区开始向内,变化量与松弛区相同的弧带状区域为开挖变形区,为潜在裂隙的形成创造了条件。开挖变形区向内至原岩区为影响衰减区。在一定条件下,坡体的失稳可以解释为:

- ①外部松动岩体强度下降;
- ②变形区水平向大位移形成了潜在裂隙;
- ③坡内固有裂隙的张开和发展。

伴随开挖过程的进行,松弛区与变形区逐渐减小,二者之间的界限变得模糊。原来的变形区成为了衰减区,但由于过程的不可逆性,必然会形成一定的潜在裂隙,对整个坡体的安全构成威胁。通过及时锚固,可以减小变形区和衰减区。增大原岩区,不仅在力学上调动了内部强度,也在形变上控制了潜在裂隙的产生。

通过分析,得到以下结论:

①人为工程削坡对边坡的稳定性有很大影响,这主要是由于坡体内应力的调整造成的,宏观上表现为坡面的回弹变形。以水平位移做为开挖扰动分区的依据是可行的,从坡面向内依次可以分为松弛区、开挖变形区和衰减区。

②坡面主要受衰减区的影响,随分级开挖的进

行,松弛区与开挖变形区的界限变得模糊,原有的变形区成为衰减区,但由于不可逆性,较大的变形会使潜在裂隙生成,进而降低边坡安全系数。

③削坡引起的回弹变形不仅与应力调整有关,还与时间有关。施加锚杆会增加坡体的协同性,减小开挖影响,但在坡面局部会增大变形。这为工程的防治提供了理论依据。合理地确定开挖高度,及时锚固和控制施工速度,可以充分利用原有岩土体的强度,提高安全性。工程实际应用上可以通过对下级开挖体的位移监测,定量得到分带变化值,以此为依据,对坡体进行扰动划分,指导下一级开挖。

### 3 萨尔玛(sarma)法因素敏感度分析

萨尔玛(Sarma)法<sup>[10-13]</sup>假想在每一土条重心作用着一个水平地震惯性力  $K_w$ ,使滑裂面恰好达到极限状态,也就是使滑裂面上的稳定安全系数  $F_s = 1$ ,此时水平地震加速度  $K$  称为临界地震加速度,以  $K_c$  表示。 $K_c$  作为判断土坡稳定程度的一个标准。同时,萨尔玛法假定沿两相临土条的垂直分界面,所有平行于土条底面的斜面均处于极限平衡状态,导出了切向条间力的分布,从而使超静定问题变成静定问题。该方法由于可以考虑岩体中外露的裂隙强度,常用于对岩质边坡进行稳定分析。

#### 3.1 计算模型确定

模型选用滑坡4为典型剖面,坡面6 m内为强风化层,即把底层部分中风化泥岩视为强风化,并以推测的最可能滑面为切出面,分为8段块体,以顺时针方向为正,内部裂隙倾角由下向上依次为2°、4°、6°、8°、10°、12°、14°,计算中不考虑水和地震力的作用。模型参数以试验结果作为依据,见表2。

计算中初始条件认为内部结构面强度参数与滑面强度参数一致,取为  $C = 60 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 30^\circ$ 。

表2 材料物理力学参数

Tab.2 Physico-mechanical parameters of materials used in calculation

岩土名称	天然状态			饱水状态		
	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$C/(\text{kPa})$	$\phi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$C/(\text{kPa})$	$\phi/(\text{°})$
黄土	15.4	13.5	29.3	19.0	4.0	27.8
强风化泥岩	24.7	35	28	25.6	30	22
强风化砂岩	24.9	40	30.5	26	35	25.5
中风化砂岩结构面	24.9	100	19.3	25.8	60	23.3

### 3.2 结果分析

通过对模型进行单变量敏感度分析可以得到安全系数的曲线。图6与图7表明,安全系数随着滑动面粘聚力的减小而减小,基本呈线性关系,滑动面

粘聚力每下降10 kpa,安全系数降低0.24左右。结构面粘聚力与安全系数亦基本为线性关系,结构面粘聚力每下降10 kpa,安全系数降低0.024左右。安全系数随着滑动面摩擦角的变化而减小,二者呈

曲线性关系。当摩擦角由  $45^\circ$  降低到  $40^\circ$  时,安全系数变化了 0.208。推知当摩擦角进一步加大时,变化幅度会更大,即超过粘聚力对坡体稳定性的影响。当在小于  $45^\circ$  内以  $5^\circ$  为单位额度递减时,安全系数变化呈递减趋势,变化数量级为  $10^{-1}$  级。结构面摩擦角的变化对安全系数的影响很小,基本在  $10^{-3}$  级,对于实际工程,意义不大。故在 sarma 法指定滑面的计算中,参数对计算结果影响的次序为:滑动面粘聚力 > 滑动面摩擦角 > 结构面粘聚力 > 结构面摩擦角。需要指出,当岩石坚硬时滑动面摩擦角的影响大于粘聚力影响;当岩石为中等岩石时滑动面摩擦角与粘聚力影响大致相等,具体参数优化取胜要结合实际情况才能得出。

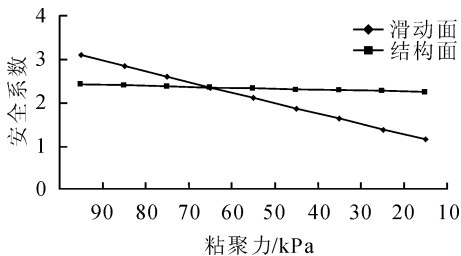


图6 粘聚力影响曲线

Fig. 6 The curve of Cohesion

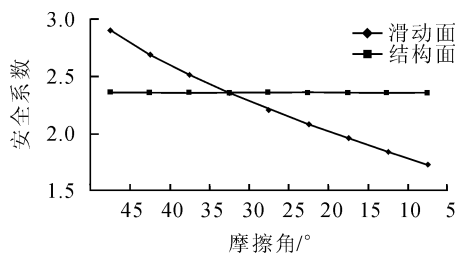


图7 摩擦角影响曲线

Fig. 7 The curve of Friction angle

为进一步研究参数的影响对结构面倾角做定性分析。在初始计算条件下,分别使所有结构面转动  $-6^\circ$ 、 $-4^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ ,比较安全系数的变化。当转角为逆时针时安全系数呈递增情况,且等角度变化情况下增量逐渐增大;当转角为顺时针时,情况相反,变化数量级为  $10^{-3}$  到  $10^{-2}$ 。在垂直条分情况下,分别使所有结构面转动  $-6^\circ$ 、 $-4^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ ,表现出相同的规律,变化数量级为  $10^{-2}$ 。但相同转动情况下,垂直条分法下的安全系数明显比初始条件下的大,而且变化在 0.048 ~ 0.099 之间。从而定性的说明岩质边坡存在陡倾结构面时,其产状组合的影响是关键因素,对坡体的安全有至关重要的作用。

对于岩质边坡,如何正确地选取 sarma 法中涉

及的物理力学参数是设计人员所关心的问题。通过分析,可以得到:

① 指定滑面的岩质边坡,采用 sarma 法进行稳定分析时,参数对计算结果影响的大小基本为:滑动面粘聚力 > 滑动面摩擦角 > 结构面粘聚力 > 结构面摩擦角。当岩石坚硬时滑动面摩擦角的影响大于粘聚力影响,当岩石为中等岩石时,滑动面摩擦角与粘聚力影响大致相等,具体参数优化选取要结合实际情况得出。

② 岩质边坡中存在的陡倾结构面往往是边坡稳定的关键部位,其产状及组合情况的不同会使安全系数发生较大的变化。常规情况下,应做为第二控制因素予以考量,这就再次强调了岩土勘查的重要性。另一方面,结构面不同角度的组合也决定了可能的局部滑裂面的发展,对工程防治有指导意义。

## 4 结论

本研究通过对边坡开挖卸荷松弛区的划分和对萨尔玛(sarma)法因素敏感度的分析,提出了岩质边坡参数优化选取的基本概念,建立了新的扰动分区原则,主要结论为:

1) 定性分析了结构面参数选取对安全系数的影响,即:滑动面粘聚力 > 滑动面摩擦角 > 结构面粘聚力 > 结构面摩擦角,结构面摩擦角的影响可以不计。针对岩性较好的岩石,滑动面摩擦角与粘聚力影响大致相等,具体参数优化选取要结合实际情况得出。

2) 岩质边坡中存在的陡倾结构面往往是坡体稳定的控制因素,其产状及组合情况的不同,会对工程的安全评价造成很大的影响,应作为建模分析考虑的第二因素。

3) 通过数值模拟研究了分级开挖对坡体的水平位移影响,指出了其最大变形区可能产生潜在裂隙,并由于其不可逆性形成滑坡隐患。从机理方面揭示了对于人工扰动的边坡,坡面的宏观位移仅仅是最终坡体状态的一个衡量指标,无法真实反应坡体的安全变化状况。整个过程中,岩土体临空面向上的位移是随开挖动态变化的,这为潜在裂隙的形成提供了有利条件。

4) 通过对水平位移特性的分析,建立了新的扰动分区准则,从坡面向内依次可以分为松弛区、开挖变形区和衰减区,新形成坡面一般处于衰减区。这就为研究者通过对未开挖岩土体的监测,合理划定扰动区提供了依据,指导开挖的进程,预测可能的滑面范围。

## 参考文献:

- [1] 盛谦. 深挖岩质边坡开挖扰动区与工程岩体力学性状研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 10: 1761.  
Sheng Qian. Excavation disturbed zone of deep cutting rock slopes and mechanics behaviour of engineering rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 10: 1761.
- [2] 黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 03: 227-232.  
Huang Runqiu, Lin Feng, Chen Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 03: 227-232.
- [3] 肖世国, 周德培. 开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 318-322.  
Xiao Shiguo, Zhou Depei. Determination and numerical analysis method of relaxation region for cutting slope [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318-322.
- [4] 王浩, 廖小平. 边坡开挖卸荷松弛区的力学性质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 1: 5-10.  
Wang Hao, Liao Xiaoping. Research on the mechanical character of relaxing zone of slopes due to excavation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 1: 5-10.
- [5] 赵勇, 李术才, 赵岩, 等. 超大断面隧道开挖围岩荷载释放过程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 2: 3821-3830.  
Zhao Yong, Li Shucai, Zhao yan, et al. Model test study of surrounding rock load releasing during super-large section tunnel excavaton [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 2: 3821-3830.
- [6] 刘会波, 肖明, 张志国, 等. 考虑空间效应的地下洞室爆破开挖松动区参数场位移反分析[J]. 岩土力学, 2012, 07: 2133-2141.  
Liu Huibo, Xiao Ming, Zhang Zhiguo, et al. Displacement back analysis of parameter field of blasting excavation damaged zone around openings considering spatial effect [J]. Rock and Soil mechanics, 2012, 07: 2133-2141.
- [7] 邹洋, 李夕兵, 周子龙, 等. 开挖扰动下高应力岩体的能量演化与应力重分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 09: 1677-1684.  
Zou Yang, Li Xibing, Zhou Zilong, et al. Energy evolution and stress redistribution of high-stress rock mass under excavation distribution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 09: 1677-1684.
- [8] 李骞, 李宁. 基于参数敏感性反演分析的岩质高边坡稳定性研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(02): 132-137.  
Li Qian, Li Ning. Stability research on the high rock slope based on the back analysis of parameter accuracy [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(02): 132-137.
- [9] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [10] 冯君, 宋胜武. 考虑边坡开挖中地应力释放的改进 Sarma 法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 01: 50-59.  
Feng Jun, Song Shengwu. Improved Sarma method with considering the release of earth stress during slope excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 01: 50-59.
- [11] Sarma S K. Stability analysis of embankments and slopes [J]. Geotechnique, 1973, (23): 423-433.
- [12] Sarma S K. A note on the stability of slopes [J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 107-111.
- [13] Zhu D Y, Lee C F, Huang M S, et al. Modifications to three well-known methods of slope stability analyses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 183-194.

(责任编辑 李虹燕)