

文章编号: 1006-4710(2012)03-0278-06

锦屏水电站左岸拱间槽坡内洞室开挖 对边坡稳定的影响分析

姚显春¹, 李宁^{1,2}, 张承客¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以锦屏水电站左岸拱间槽坡内洞室开挖引起的边坡稳定分析问题为例, 构建基于洞室群开挖对已有边坡的稳定性影响分析方法, 为实际工程设计提供分析基础。通过洞群开挖时引起的坡体滑面处的应力的变化, 把洞群开挖引起的坡体应力变化看成是渐进式变化过程, 得到边坡整体安全系数的评价公式。采用有限元数值模拟方法, 对锦屏一级水电站左岸拱肩槽边坡, 通过分析坡内洞室开挖引起的坡体应力变化调整, 分析研究坡体潜在滑面上的安全形态变化规律。系统模拟了由于洞室开挖引起坡体的应力调整变化, 较真实地分析了边坡潜在滑动面超限应力的逐级释放、转移过程, 进而根据滑面应力调整结束后的滑面真实应力分析了其安全系数的变化规律。

关键词: 岩石力学; 隧洞; 边坡; 稳定分析; 有限元

中图分类号: O319.56 **文献标志码:** A

An Analysis of Effect of Inner Cavern Excavation in Left Bank Trench Slopes between Aches upon Side Slope Stability at Jinping Hydropower Station

YAO Xianchun¹, LI Ning^{1,2}, ZHANG Chengke¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking the analysis of slope stability problem caused by the inner cavern excavation in left bank trench slopes between arches at Jinping hydropower station as an example, an analytical method based on the effect of cavern group excavation upon the existing slope stability is established in this paper, whereby providing the analysis foundation for the practical engineering design. Through analysis of the stress change on the slope sliding surface caused by cavern excavation, the changes in slope body stress caused by cavern excavation can be considered as a gradual changing process, whereby obtaining the evaluation formula for the slope overall safety factor. The FEM numerical simulation method is used to analyze the slope of the left bank arch shoulder of Jinping primary hydropower station, to regulate the slope body stress changes caused by the slope inner cavern excavation and to analyze and study the safety morphological changing laws on the latent sliding surface of slope body. The slope body stress regulation changes caused by the cavern excavation are systematically simulated. The gradual release and transfer process of over limited stress in slope latent sliding surface are truly analyzed. Furthermore, the safety factor changing laws are analyzed in terms of sliding surface true stress after the end of sliding surface stress regulating.

Key words: rock mechanics; tunnel; side slope; stability analysis; FEM

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879068); 国家自然科学基金创新群体资助项目(40821001)。

作者简介: 姚显春(1975-), 男, 甘肃永登人, 讲师, 博士生, 研究方向为岩石力学及岩土工程数值仿真。E-mail: yxc2049@163.com。李宁(1951-), 男, 陕西耀县人, 教授, 博导, 研究方向为岩石力学及工程等。E-mail: ningli@xaut.edu.cn。

岩质边坡稳定分析与评价问题,是水利水电、交通、铁路、矿山等工程开发中经常遇到的问题。西部地质构造复杂的高山峡谷地区,地形起伏大,河谷深切,山势陡峻,峰谷高差达数百米,在各种荷载作用下,导致山体边坡整体下滑力加大,边坡的安全系数降低。特别对于西部水电站坝址区和库岸大型岩体边坡,由于在其区域范围,一般要进行隧道洞群开挖,一方面为了本身工程设计的需要,另一方面,也是为了满足施工通道的需要,此外,有时需要对影响边坡稳定的软弱结构面(如不利于稳定的岩脉)进行加固填塞处理而进行隧道开挖。在隧道洞群施工开挖荷载下,边坡的安全将是工程建设中面临的难点问题。研究坡体内洞群开挖对于边坡自身稳定性具有重要的理论与工程实际意义^[1-8]。

目前,坡体内洞群开挖对于边坡自身稳定性的研究成果较少。徐卫亚^[9-10]等对水布垭马崖高陡边坡岩体地下开挖进行数值模拟,研究了边坡岩体内进行地下洞室开挖后边坡力学状态的改变及洞室岩体的稳定性。董慧明等^[11]利用极限平衡法与及格里菲斯强度理论,讨论并研究了地下洞室对露天矿边坡稳定性的影响,发现地下洞室的直径和其走向与整体边坡走向的关系对露天矿边坡稳定性的影响很大。王建秀^[12]等以云南元(江)磨(黑)高速公路小曼萨河隧道为例,对隧道边坡变形进行三维监测及洞内变形监测,确定了该隧道边坡三维变形的基本模式。万文^[13]对地下空区对边坡的影响进行了较为系统的研究,对地下老采空区边坡,提出了加速混合遗传算法,同时采用FLAC软件分析不同大小、位置的地下老采空区对边坡稳定性的影响,并通过边坡应力和位移及边坡安全系数的变化情况,系统地分析了各种影响因素的影响程度。并采用FLAC3D软件建立了三维模型,用于计算浅埋隧道开挖的不同阶段边坡地表的变形,同时得到隧道开挖过程中边坡的应力场、位移场和安全系数。江学良^[14]对地下洞室与边坡之间的相互影响进行了深入研究,建立了边坡下伏地下岩石洞室深埋与浅埋的计算模型,应用弹性力学理论与相同映射函数的复变函数解法推导了边坡下伏深、浅埋圆形洞室的应力解析解,采取弹塑性有限元与强度折减方法,利用自编的有限元程序对瓮福磷矿穿岩洞矿段地下采空区与露天边坡的相互影响进行了研究,模拟了露天边坡开挖过程对边坡与地下采空区的影响,得到了各部开挖过程中边坡与采空区的应力、应变与塑性区分布以及边坡的安全系数。

本文以锦屏一级水电站左岸拱间槽边坡为例,

通过分析坡内洞室开挖引起的应力变化调整,把坡体内开挖洞室群引起的边坡可能失稳破坏看作是一个渐进破坏过程,引入“峰值强度”与“残余强度”进行有限元分析计算,考虑滑面的单元,破坏前采用峰值强度,破坏后采用残余强度。通过模拟由于洞室开挖引起的应力调整变化,计算出边坡潜在滑动面超限应力的逐级释放、转移过程,得到了边坡应力场、变形场,根据滑面应力调整结束后的滑面真实应力分析计算其安全系数,较合理地解决了隧道边坡的稳定性分析,对类似工程建设具有参考意义。

1 洞室群开挖对边坡稳定影响的理论分析

坡体内隧道开挖时,边坡将受到由于开挖爆破引起的爆破荷载,使得潜在滑面的强度降低而引起坡体安全系数降低,导致边坡稳定性降低,这属于边坡动力学的范畴,本文暂不讨论。坡体内隧道开挖对边坡稳定引起的第二个不利因素是由于坡体开挖引起应力的调整变化,使得坡体内应力发生变化,特别是对于边坡软弱面进行填塞处理的洞室,由于要沿着边坡软弱面进行开挖,在开挖施工期,会进一步降低坡体滑面(软弱面)上的强度,从而影响边坡体的整体稳定。

对于含有潜在滑面的岩质边坡体,本文假设滑面与最小主应力方向的夹角为 β_1 (图1),则该处应力为^[15-16]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta_1 \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在洞室开挖后(图2),应力发生调整,此时假设滑面与最小主应力方向夹角为 β_2 ,此时滑面处应力:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta_2 \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则该处的点安全系数可如下表示:

$$f_s = \frac{\sigma_k \cdot \tan \varphi_k + c_k}{\tau_k} \quad (3)$$

式中: σ_k 为滑面某点上正应力; c_k 为滑面某点处粘聚力; φ_k 为滑面某点内摩擦角, τ_k 为滑面某点剪应力。

在有限元分析中,滑面离散化,则坡体整体安全系数为 F_s :

$$F_s = \frac{\sum (\langle \sigma_k \rangle \cdot \tan \varphi_k + c_k) \cdot S_k}{\sum \tau_k \cdot S_k} \quad (4)$$

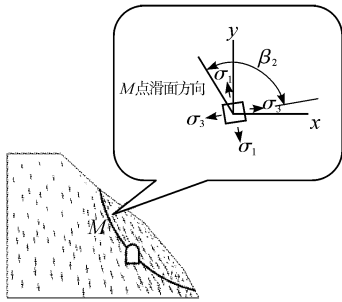


图1 边坡洞室开挖前滑面某点应力示意图

Fig.1 Sketch map of sliding surface stress in slope before tunnel is excavated

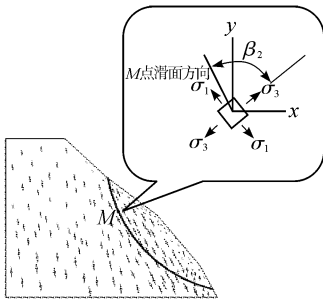


图2 边坡洞室开挖后滑面某点应力示意图

Fig.2 Sketch map of sliding surface stress in slope after tunnel is excavated

对于在坡体内开挖洞群,边坡破坏是一个渐进破坏过程,把坡体内开挖洞室群引起的边坡可能失稳破坏看作是一个渐进破坏过程,引入“峰值强度”与“残余强度”,滑面没有出现拉裂破坏时具“峰值强度”,拉裂具有残余强度。为了体现边坡渐进破坏的这一特点,在有限元分析分析计算中,对于滑面单元,其在破坏前赋值峰值强度,破坏后赋值残余强度,通过模拟由于洞室的开挖坡的逐级开挖、卸荷,较真实地分析边坡潜在滑动面超限应力的逐级释放、转移过程;根据洞室开挖引起的滑面应力调整结束后的滑面真实应力分析其安全系数,作为评价指标,较传统方法更加合理可靠。在平面直线型滑坡中,滑动面上的滑动力和抗滑力是同直线反方向上的,可以进行矢量叠加,因而通过滑动力与抗滑力的平衡方程得到整体安全系数的评价公式:

$$F_s = \frac{\sum (\langle \sigma_i \rangle \cdot \tan \phi_i + c_i) \cdot S_i}{\sum \tau_i \cdot S_i} + \frac{\sum (\langle \sigma_j' \rangle \cdot \tan \phi_j' + c_j') \cdot S_j'}{\sum \tau_j' \cdot S_j'} \quad (5)$$

式中: σ_i 为第*i*个未破坏界面单元正应力; σ_j' 为第*j*个已破坏界面单元正应力; τ_i 为第*i*个未破坏界面单元剪应力; τ_j' 为第*j*个已破坏界面单元剪应力; c_i 为

第*i*个未破坏界面单元峰值粘聚力; c_j' 为第*j*个已破坏界面单元残余粘聚力; ϕ_i 为第*i*个未破坏界面单元峰值内摩擦角; ϕ_j' 为第*j*个已破坏界面单元残余内摩擦角; S_i 为第*i*个未破坏界面单元的面积; S_j' 为第*j*个已破坏界面单元的面积。

2 洞室开挖对边坡稳定的影响

2.1 工程地质条件

拟建的锦屏一级水电站工程规模巨大,开挖边坡最高达630 m。坝址区河谷狭窄,边坡岩层走向与雅砻江流向基本一致,左岸岩层为反向坡,上部为砂板岩,下部为大理岩。岩体卸荷松弛、裂隙发育,断层破碎带交汇。由于坝址区断层、层间挤压错动带、节理裂隙等构造结构面发育,特别是坝区左岸拱肩槽边坡及下游坡,受坡体内存在的深部卸荷裂隙、f5、f42-9断层、煌斑岩脉(X)等不良地质结构面的影响,使得拱肩槽开挖以及所形成的上游边坡、槽坡、下游边坡的稳定性处于不利状态。岩体条件较差,一系列不稳定滑块存在于拱肩槽边坡及下游边坡,场地地质条件复杂,在国内外水电工程中罕见。

为了满足拱座的抗滑稳定与变形稳定,使坝体达到较好的受力性态、满足地下水位与基础的渗流控制等工程要求,在一定深度范围内采取混凝土垫座、固结灌浆处理、防渗帷幕等措施。同时,采用了混凝土置换网格、传力洞对坝基断层破碎带进行了处理。为了对左岸坝基抗立体整体进行加固采用固结灌浆等工程措施。针对上述工程措施,大量的洞室群布置于左岸坝体建基面,如排水平洞、帷幕灌浆平洞、断层及煌斑岩脉置换网格、灌浆廊道等。为保证施工与运行安全,需研究上述结构面对左岸拱肩槽开挖所形成边坡稳定性的影响,以及对各个可能形成组合滑块体的稳定性进行评价,对施工期边坡与洞室群开挖相互影响下的稳定性进行分析,以保证工程施工期的安全。

2.2 物理力学参数的选取

根据中国水电顾问集团成都勘测设计研究院提供的数据库。本研究采用的相关围岩力学参数如表1所示。

拱肩槽上游边坡后缘的煌斑岩脉、剪出口处的f42-9断层对边坡稳定起控制作用;拱肩槽边坡部位对边坡稳定起控制作用的结构面主要有后缘的煌斑岩脉(X)、剪出口处的N20°E,SE∠14°缓倾结构面和枢纽区第四组优势裂隙N30°~50°W,SW∠60°~80°为左右切割面形成块体。根据设计院提供的枢

纽区各类结构面的工程地质特征及建议力学参数，选取结构面的物理力学参数如表 2 所示。

表 1 岩体物理力学参数值

Tab.1 The value of rock mass physics mechanics parameter

围岩类别	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/$ (KN/m ³)	抗剪断	
				摩擦系数 f'	粘聚力 C'/MPa
III1	21.0~30.0	0.25	27.0	1.35	2.0
III1	9.0~13.0	0.30	27.0	1.07	1.5
III2	3.0~7.0	0.35	27.0	1.02	0.9
IV1	2.0~3.0	0.35	26.0	0.7	0.6
IV2	1.0~2.0	0.35	26.0	0.6	0.4
煌斑岩脉	0.3~0.6	0.4	25.0	0.3	0.02
f5 断层)	0.3~0.6	0.4	25.0	0.3	0.02

备注：①岩体变形模量值取垂直结构面方向岩体变形模量的最低值。②山体固结灌浆后进行煌斑岩脉加密灌浆时岩,IV1、IV2、V 类围岩变形模量达到中间值,C'、f'提高 20%~30%。

表 2 边坡关键部位控制性结构面参数值

Tab.2 Parameter value of the slope key position

结构面编号	抗剪断强度参数	
	摩擦系数 f'	粘聚力 $C'/$ MPa
f5 断层	0.3	0.02
f42-9 断层	0.3	0.02
煌斑岩脉(X)	0.3	0.02
潜在滑动面	0.51	0.15

2.3 有限元模型

采用大型通用有限元分析系统 Ansys 中的接触面单元考虑潜在的滑动面,采用弱化单元考虑其余结构面。模拟分析方案按具体可能施工的过程确定:先开挖坡体(按八次开挖完成)后开挖洞室(按八次开挖完成);先开挖洞室(按八次开挖完成)后开挖坡体(按八次开挖完成);采用生死单元并结合逐渐释放应力法模拟坡体开挖与洞室开挖。所用参数见表 1、2。拱肩槽边坡主要结构面与如图 3,模型范围及边界条件边坡有限元网格如图 4 所示。

2.4 洞室开挖对边坡稳定的影响分析

针对边坡、洞群存在相互影响的特殊性,拟定两种方案,以便通过计算结果对比来说明洞群对边坡稳定的影响。方案 1:先开挖坡体后开挖洞室;方案 2:先开挖洞室后开挖坡体

2.4.1 ∇ 1 885.0 m 高程 3#固结灌浆洞对边坡的影响

1) 边坡应力场、变形场

图 5 为剖面 1 边坡拉应力区分布图。

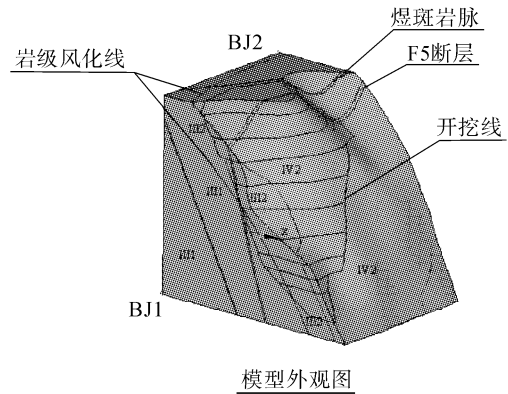


图 3 边坡岩层与主要结构面图
Fig.3 The rock stratum and main structure surface of slope sketch map of sliding surface stress in slope after tunnel is excavated

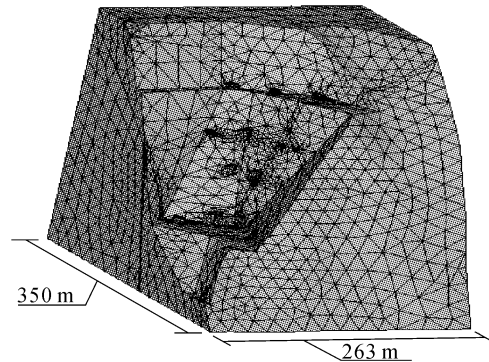


图 4 边坡有限元网格
Fig.4 Side slope finite element net

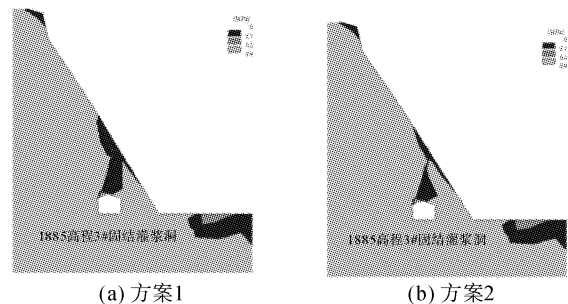


图 5 剖面 1 边坡的拉应力区分布图
Fig.5 The distribution map of tensile stress district about slope section 1

由图 5 可以看出,在方案 1、2 下 ∇ 1 905.0 m ~ ∇ 1 945.0 m 高程坡表面出现了较小的拉应力区,但最大拉应力值均不超过 0.2 MPa。在方案 1 下,边坡表面都现了较大范围的拉应力区且与 ∇ 1 885.0 m 高程 3#固结灌浆洞顶拱拉应力区贯通,在方案 2 下,边坡表面也出现了拉应力区但范围较小。在方案 1、2 下,坡体最大水平变形分别为 10 mm、6 mm。可以看出由于洞室开挖,对边坡稳定性产生不利影响,因此建议施工时对于 3#固结灌浆洞开挖后首先对洞口 10 m 范围洞段进行衬砌支

护,再进行边坡开挖施工。

2) 边坡滑动面的安全系数

在边坡形成后再进行洞室开挖的情况下(方案1),潜在滑动面的最小安全系数为1.08,不满足边坡稳定性要求,需要对边坡体进行加固;根据方案2,潜在滑动面最小的安全系数为1.17,满足边坡稳定性要求。

2.4.2 ∇ 1 829.0 m 高程 1#固结灌浆洞与 ∇ 1 785.0 m 高程 2#固结灌浆洞在不同方案下对边坡的影响

图6为剖面2边坡面的拉应力区分布图。

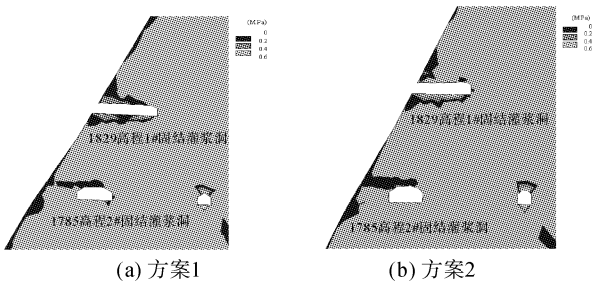


图6 剖面2边坡面的拉应力区分布图

Fig. 6 The distribution map of tensile stress district about slope section 2

1) 边坡应力场、变形场

由图6可以看出,方案1下,坡表面和 ∇ 1 829.0 m 高程 1#固结灌浆洞顶拱处同时出现了拉应力区,且二者在一定范围内贯通,最大拉应力值达到0.4 MPa;方案2下, ∇ 1 829.0 m 高程 1#固结灌浆洞顶拱处没出现拉应力区,且此部位坡表面拉应力区相对较小,量值在0.2 MPa左右;在两方案下,坡表面与 ∇ 1 785.0 m 高程 2#固结灌浆洞顶拱处都形成了贯通拉应力区,最大拉应力值达到0.2 MPa。在方案1、2下,坡体最大水平变形分别为19 mm、12 mm。

2) 边坡滑动面的安全系数

在边坡形成后再进行洞室开挖的情况下(方案1),潜在滑动面的最小安全系数为1.04,不满足边坡稳定性要求,需要对边坡体进行加固,根据方案2,潜在滑动面最小的安全系数为1.15,满足边坡稳定性要求。

同样可以看出,边坡加固后再开挖洞室,或者若先开挖洞室,则在1829.0 m 高程 1#、2#固结灌浆开挖后首先对洞口洞段进行衬砌支护,再进行边坡开挖施工。

2.4.3 1 829.0 m 高程 2#固结灌浆洞在不同工况下对边坡的影响

图7为剖面3边坡面的拉应力区分布图。

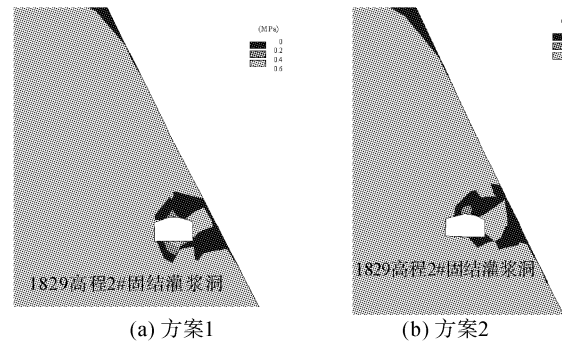


图7 剖面3边坡的拉应力区分布图

Fig. 7 The distribution map of tensile stress district about slope section 3

由图7可以看出,在方案1、方案2下 ∇ 1 829.0 m 高程 2#固结灌浆洞底板处受力情况有些变化,方案1下,2#固结灌浆洞底板拉应力较大,最大值达到0.5 MPa,方案2下2#固结灌浆洞底板最大拉应力不超过0.2 MPa。这主要是因为方案1下边坡已经开挖,上覆压力较小,洞室开挖后底板回弹变形较大引起的张剪拉应力大,而在方案2下洞室开挖后由于上覆压力大,致使底板的回弹量小,引起的拉应力也小。在方案1、方案2下边坡受力情况变化不大,都是在坡表面出现了一定范围的拉应力区且与 ∇ 1 829.0 m 高程 2#固结灌浆洞顶拱及底板下部的拉应力区贯通。可以看出不论先开挖洞室,还是先开挖边坡,对洞室的稳定性都会产生不利影响,因此建议施工时对于2#固结灌浆洞开挖后首先对洞口洞段进行衬砌支护,再进行边坡开挖施工。

3 结论

1) 根据洞室开挖引起的滑面应力调整结束后的滑面真实应力计算边坡安全系数,作为边坡稳定的评价指标,较传统方法更加合理可靠;

2) 对于洞室离坡表面较浅的洞室开挖时,对边坡的局部稳定性产生影响,洞口处拉应力集中,拉应力区分布较深,在坡体表面会形成贯通拉应力区,对边坡稳定极为不利,在该情况下,洞室开挖后应对洞段及时进行衬砌支护;

3) 锦屏左岸拱肩槽边坡、洞室的开挖顺序存在优化的可能。先边坡开挖、后洞室开挖顺序对边坡稳定性的影响表现为:高高程处(∇ 1 885.0 m 高程以上),边坡、洞室的相对开挖顺序对边坡的工程性状影响不大;中高程处(∇ 1 785.0 m ~ ∇ 1 885.0 m 高程),先开挖洞室后开挖坡体的方案下边坡稳定状态相对较好;低高程处(∇ 1 785.0 m 高程以下),

先开挖坡体后开挖洞室的方案下, 边坡某些部位的块体稳定性需重点研究。

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩土力学与地下工程结构分析计算的若干进展[J]. 力学季刊, 2005, 26(3): 329-338.
SUN Jun. Recent development on the computation techniques of geomechanics and underground structures[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(3): 329-338.
- [2] Kumsar H, Aydan O, Ulusay R. Dynamic and static stability assessment of rock slopes against wedge failure[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2000, 33(1): 31-51.
- [3] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Application of strength reduction FEM IN soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [5] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [6] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11.
Chen Zuyu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1-11.
- [7] 郑宏, 刘德富, 罗先启. 基于变形分析的边坡潜在滑面的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 709-716.
Zheng Hong, LIU Defu, Luo Xianqi. Determination of potential slide line of slopes based on deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 709-716.
- [8] 崔政权, 李宁. 边坡工程—理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 徐卫亚, 罗先启, 谢守益, 等. 水布娅马崖高边坡岩体地下开挖三维数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 89-93.
Xu Weiya, Luo Xianqi, Xie Shouyi, et al. Three-dimensional numerical simulation of underground rock excavation in MAYA rock slope for Shuibuya hydropower project[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1): 89-93.
- [10] 徐卫亚, 宋晓晨, 周维垣. 水电站进水口岩石高边坡及坝坡与洞室相互作用的三维数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2712-2717.
Xu Weiya, Song Xiaochen, Zhou Weiyuan. Numerical analyses on deformation and stress of high-slope of intake and interaction of dam-slope and tunnel at huge hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2712-2717.
- [11] 董慧明, 曹平. 含地下洞室的露天矿边坡稳定性研究[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(6): 24-26.
Dong Huiming, Cao Ping. The stability study of pit slope with underground cavern[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(6): 24-26.
- [12] 王建秀, 唐益群, 朱合华, 等. 连拱隧道边坡变形的三维监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2226-2232.
Wang Jianxiu, Tang Yiqun, Zhu Hehua, et al. 3D monitoring and analysis of landslide deformation caused by twin-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2226-2232.
- [13] 万文. 地下空区对边坡稳定性的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
Wan Wen. Study on the stability of slope influenced by the underground vavant area [D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [14] 江学良. 岩石地下洞室与边坡的相互影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Jiang Xueliang. Study on interaction of rock underground cavern and slope[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [15] Knight P. C, Instone T, Pearson J M K, et al. Optimization of rock slopes using reliability concepts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Abstract, 1996, 35(4): 661.
- [16] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [17] 苏立海. 反倾层状岩质边坡破坏机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
Su Lihai. Research on failure mechanism of pour the layered rock slope[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.

(责任编辑 杨小丽)