

边坡开挖卸荷条件下稳定性研究

邓 科

摘要:在原始和卸荷两种不同的力学状态下,分析了边坡的稳定性。岩石边坡开挖为卸荷力学条件,采用卸荷岩体力学的方法分析边坡的位移变形比较符合实际。

关键词:边坡; 变形; 卸荷

Study on the Slope Stability of Excavation and Unloading

Deng Ke

Abstract The slope stability of a rock slope is analyzed in both original intact condition and excavation condition. Since the excavation is unloading process, the deformation results based on unloading rock mechanics analysis method are consistent with in situ measurements.

Key words slope; deformation; unloading

自然边坡经过漫长的地质构造及自然风化作用,其表面地应力风化卸荷,岩体基本上处于平衡状态。在进行人工切削边坡和深切边坡后,岩体的自然平衡状态遭到严重破坏,其受力条件的改变只能依靠自身来承担。岩体至少在一个方向大面积卸荷,造成应力的二次调整,形成大规模的卸荷体,局部可能存在拉应力,卸荷条件下的应力应变极为复杂和不利^[1]。在这种情况下,常规的力学加载方法已经不适合研究卸荷条件下的岩体力学特征。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

鲤鱼塘水库溢洪道开挖边坡岩性总体上呈软硬相间型,出露基岩为侏罗系中统千佛岩组砂岩与炭质页岩,呈互层状分布。砂岩泥质含量较大,坡面总体上呈黄色,平均总厚度 4 m,单层厚度 10~50 cm,夹 5~10 cm 厚的泥质砂页岩;炭质页岩平均总厚度 2~4 m,单层

作者简介:邓 科(1979-),男,三峡大学土木水电学院硕士研究生;邮编:443002。

厚度 1 cm 左右,层间无胶结,岩体破碎,节理裂隙发育,切割呈 1~2 cm 的薄片状,锈染严重呈黄色,风化强烈,结构松散,岩质软弱,锤可刨进。砂岩层间普遍夹 10 cm 厚的泥质砂岩条带,并夹数层 1~2 m 厚的炭质页岩。

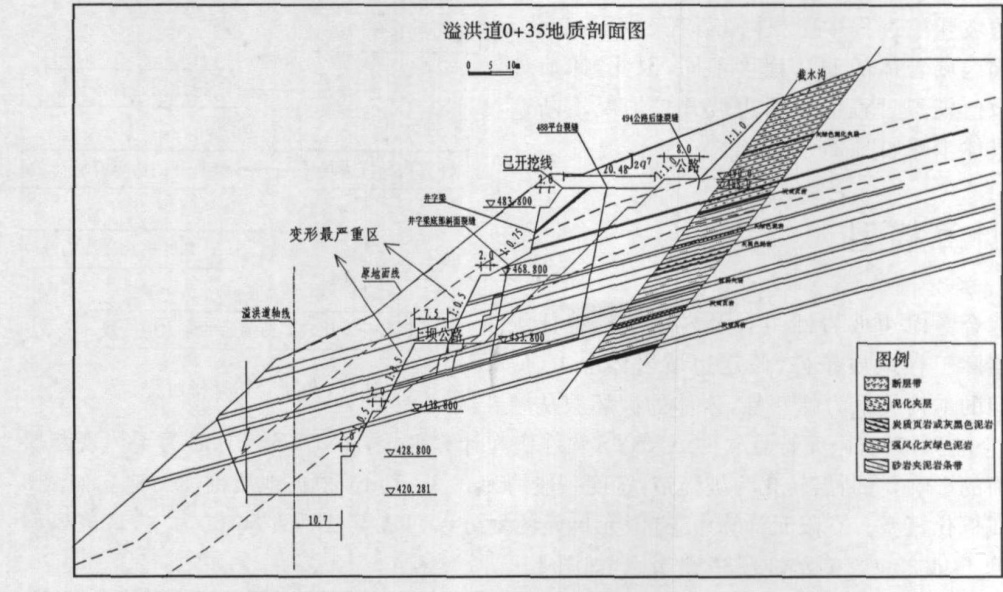


图 1 工程地质剖面图

边坡的断层破碎带宽度 20~50 cm,延伸长度 50 m,由角砾夹岩屑组成。影响带岩体破碎呈碎裂结构,节理裂隙发育,夹泥严重呈黄褐色,挤压带、错动带发育,发育 3 组挤压带,产状分别为 SN/W 35°,N70°W/NE 79°,N30°W/直立,主要由黄褐色、黑色的角砾、岩屑夹泥组成,厚度 10 cm 左右。边坡主要存在 4 个比较大的裂隙,对边坡稳定性有较大影响,分别分布在开挖区和溢洪道上部区域,将整个边坡在软弱夹层以上的部分分成块体,成为控制边坡整体稳定性的大型块体和局部小块体。将这 4 个裂隙分别编号为 1、2、3、4。

总体上看,边坡构造活动强烈,层间错动现象发育,地层产状变化较大,节理裂隙发育,结构面切割形成大量潜在不稳定块体,在降雨、爆破、人工开挖等作用下,易产生块体变形失稳。

1.2 有限元计算岩体力学参数的确定

岩体力学参数的确定是建立有限元数值分析的力学模型的重要内容,也是决定计算结果是否符合工程实际的关键因素,尤其初始力学参数的选择与确定既是岩体常规分析的前提,也是卸荷条件下岩体力学参数确定的前提。

依据地质勘测资料,边坡部分初始岩体力学参数的选取如表 1 所示。

表 1 边坡初始力学参数

地层	弹性模量 / MPa	泊松比	密度 / (kg · m ⁻³)	内聚力 / kPa	内摩擦角 / °	抗拉强度 / kPa
弱风化~新鲜的薄层粉砂质泥岩与 泥质粉砂岩及砂岩互层(材料 1)	6870	0.22	2635	210	35	2050
炭质页岩夹层(材料 3)	800	0.30	2250	85	19	320
夹泥炭质页岩夹层(材料 2)	780	0.30	2200	80	18	300

2 卸荷岩体的基本的分析方法

边坡开挖过程中,岩体卸荷程度不断变化,且不同区域岩体的卸荷程度不同,因此,卸荷分析的数值模拟过程应根据边坡开挖情况不断调整。具体步骤如图 2 所示^[2]。

3 计算模型

综合考虑边坡岩性组合及岩体结构特征等边坡实际工程地质条件,假定边坡岩体应力、应变之间的本构关系为弹塑性,岩体的破坏服从摩尔-库仑准则,以有限元计算软件 ANSYS 软件作为计算平台,ANSYS 计算时为了体现断层对剖面的影响,将断层转化为破碎带,宽度一般约为 0.6~1 m。根据地质剖面图建立如图 3 的地质概化模型。有限元计算中,有限元单元的划分以四节点、四面体单元为主,对该模型共划分了 68 900 个单元,13 289 个节点,如图 4。

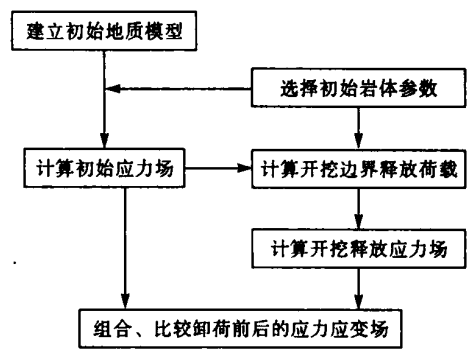


图 2 卸荷岩体分析过程

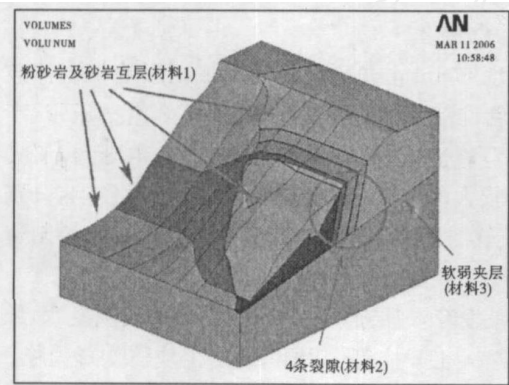


图 3 地质概化模型

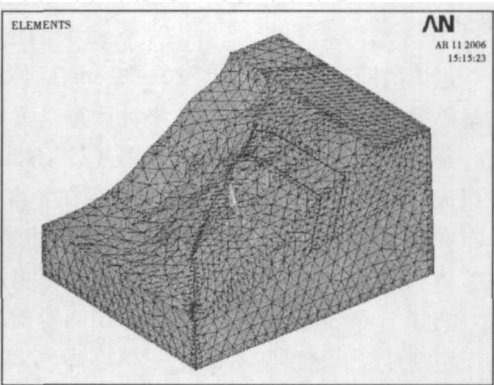


图 4 有限元网格模型

4 计算工况

4.1 原始状态应力场分析

根据边坡工程开挖的施工过程,分为初始工况和开挖工况进行有限元计算。边坡天然状态的应力场特征与开挖后边坡的应力重分布有着密切的关系,同时也与边坡开挖后的变形破坏有着比较重要的影响,一方面天然应力场在很大程度上决定了开挖后应力重分布的趋势和结果;另一方面受天然应力场影响,在边坡内部形成的应力增高带和应力差比较大部位等应力环境较差的区域对边坡开挖后的稳定性构成了潜在的威胁。因此对应力应变场的有限元模拟分析是十分必要的。

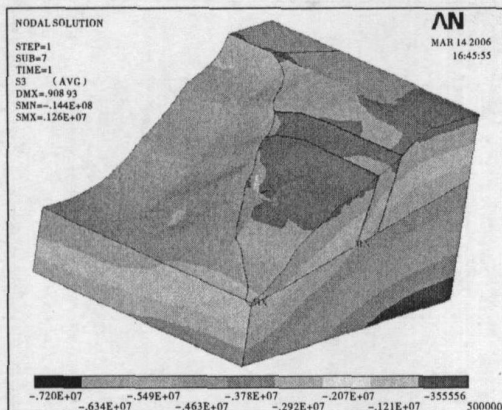


图5 原始状态第一主应力云图

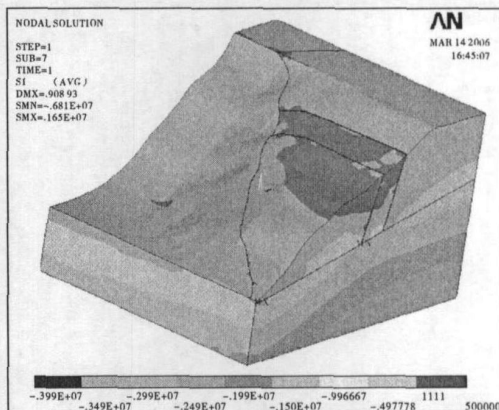


图6 原始状态第三主应力云图

从以上的计算结果分析天然应力场特征,从中可以发现以下规律:

(1) 基岩应力场总体上仍呈重力场态势,在远离坡面的下层,最大主应力量级分布表现为由深部向地表逐渐降低的平稳过渡递变状态,无明显的应力集中现象,在浅表层堆积物和强化层整体在 450 ~ 470 m 高程出现了拉应力。

(2) 临近坡面部位的滑坡体内部,尤其在接近滑面附近的应力矢量方向偏转明显,坡体浅表层中间主应力呈拉应力现象,在坡体中部自然坡度较大部位拉应力较大。

(3) 最小主应力总体上在基岩部分仍然较为稳定,呈重力场态势分布,但在软弱层带及风化界限区域出现少量应力集中现状,前缘坡面部分岩体处于微量的拉张状态,最大值达到 100 kPa 以上,整个剖面上最小主应力都为压应力。

(4) 滑坡体内部发育的几条相对软弱层带及风化界限对应应力场有比较明显的影响。应力场在上述部位出现比较明显的分层错动现象。分层错动的结果使得在软弱层带的界面部位出现比较明显的应力集中,同时相应的在这些部位的附近区域出现比较明显的应力扩散现象。

受上述应力场的影响,最大、最小主应力分布表现为由深向地表逐渐降低的平稳过渡递变状态,无明显的应力集中现象,但在软弱层带及风化界限,应力集中或应力明显增高部位,在前缘坡面岩体的最小主应力部分处于拉张状态,滑体底部的剪应力出现部分梯度变化,边坡岩体处于一种近单向受压的状态,应力差极大,将会使得这些位置的岩体极易产生破坏,岩体结构变得破碎松散,尤其是在软弱层带部位、坡面、坡顶以及坡缘部位,由于拉应力的存在,将可能使得岩体产生拉破坏。在这样一种应力场的作用下,一方面可能使得上述部位的岩体产生局部的破坏,促使岩体结构变得松散破碎,另一方面也对边坡的局部稳定性构成一定程度的威胁。基于上述分析,天然状态滑坡稳定性现状较好,局部存在的不良状况对整体稳定性尚不构成重大威胁。

4.2 开挖条件下边坡应力场特征及变形破坏趋势分析

自然边坡经过漫长的地质构造及自然风化作用,其表面地应力一般风化后卸荷,岩体基本上处于平衡状态,在边坡开挖后,岩体的自然平衡遭到严重的破坏,并有可能进一步破坏岩土体的结构,所有这些因素将促使所有应力重分布,使边坡产生新的变形以适应调整后的边坡应力环境。

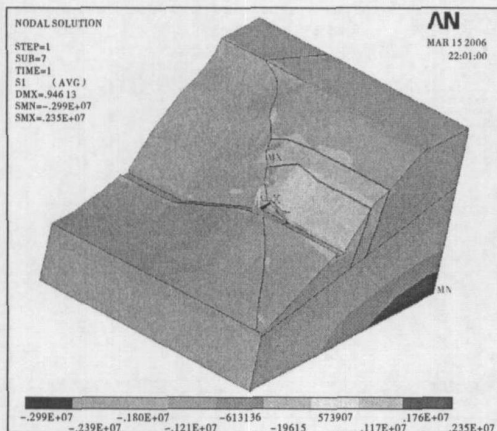


图7 软弱夹层位置3第2、4裂隙
开挖状态第一主应力云图

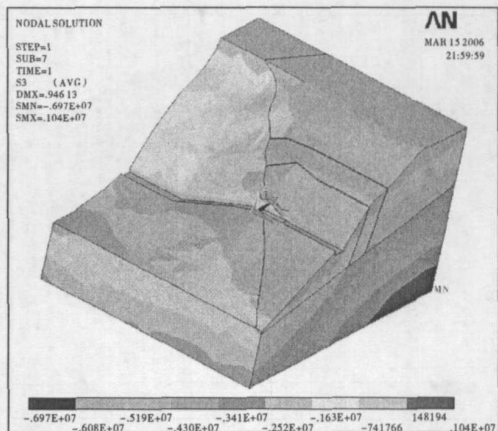


图8 软弱夹层位置3第2、4裂隙
开挖状态第三主应力云图

对边坡开挖的有限元计算,需要考虑开挖的过程以及由此模拟开挖过程所产生的应力应变,达到对边坡施工过程中稳定性的准确评价。

以下是边坡开挖后的应力场特征及其变形特征,边坡开挖过程中,边坡内部原有应力状态将随着开挖的进行而发生变化,引起应力重分布,在局部还会出现应力集中效应。下面对开挖后应力调整结果做具体分析。

从图中可以看出边坡开挖后的应力场特征及其变形发展趋势。

(1) 开挖后的最大主应力分布马道部位出现明显的应力集中现象,应力值相对马道其它部位显著增高,最大值达到 700 kPa,在坡面开挖上方的应力也有应力集中现象,边坡顶部有零星的拉应力现象,最大值达到 2 000 kPa,第一级边坡坡面软弱夹层出露部位上方一定范围为拉应力,最大值达到 180 kPa。

(2) 最小主应力在上坝公路及其上方岩土体也有明显的集中现象,应力值相对其它部位也有显著的增高,可以看出,最小主应力在马道附近以软弱夹层为界限,出现较大的应力值跳跃,应力错动现象明显,容易造成局部的失稳。最小主应力调整较大,切坡后坡面部位最小主应力较天然状态时减小很大,坡面大部分地方趋于 0 MPa,坡面上软弱夹层出露部位少许出现拉应力,该处拉应力最大达 0.9 MPa,最大主应力和中间主应力集中的部位也出现了应力集中现象。

(3) 从总体上的拉应力来看,在坡体表面的拉应力分布均匀,但是在马道及上坝的公路附近应力变化明显,形成应力错动,应力方向明显偏转,形成对坡体稳定性较大的危害。

(4) 从边坡开挖后的变形特征来看,边坡的变形主要集中在上坝公路、马道以及其上方岩土体内,最大合位移可达 70 cm 左右,其中 X 方向位移可达 50 cm 左右,Y 方向位移可达 40

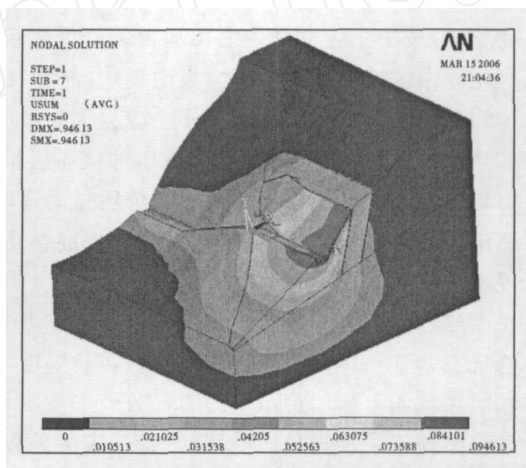


图9 开挖状态回弹总位移云图

cm 左右,这与目前出现的变形破坏区域相符。结合边坡岩性组合特征、结构特征以及应力场特征,可以认为在上述部位产生显著变形的原因是多方面的,一方面由于该部位岩土体的结构比较破碎,受到发育于该部位的软弱层带的影响,另一方面是由于该部分开挖较多,形成应力应变重分布,位移变化明显。其余部位变形主要为开挖后引起的卸荷回弹,边坡坡面上左下角炭质页岩夹层出露部位相对位移较大,夹层以下岩土体未发生位移,夹层以上最大位移达 8~9 cm,越向后缘位移越小。

(5)从开挖结果的安全系数来看,安全系数在 0.9 左右的区域占较大区域,说明开挖后坡体稳定性较差,工程开挖对整体坡体产生十分明显的影响。

综上所述,开挖后边坡应力出现了明显的变化,尤其是在上坝公路及其上方岩体内,同时平台部位,边坡变形也主要集中在上述部位。这将使得上述两个部位的岩体在开挖后会变得极为不稳定,易于产生失稳破坏。

5 开挖前后的对比分析及小结

初始应力场反应了未开挖前边坡中的应力分布情况,由于开挖的作用,初始应力场发生变化,岩体卸荷导致岩体质量劣化,抗拉强度降低,边坡位移明显增大。

(1)坡体天然状态下整体处于相对的稳定状态,坡体内部无较大的应力集中带。但在浅表层堆积物和强风化层整体上表浅层高程出现了拉应力,局部部位已呈三向受拉应力状态,可能形成局部滑塌。

(2)工程的大量开挖使坡体发生岩体卸荷,坡体内部应力应变场重新调整。开挖坡面上最小主应力显著降低,在表层几乎接近 0 MPa,甚至呈拉应力状态,最大主应力在马道部位出现明显的应力集中现象,在坡面开挖上方的应力也有应力集中现象,边坡顶部有零星的拉应力现象。

(3)开挖边坡大变形发生在坡体浅部的开挖部分,最大变形可达 50~90 cm,浅表层如此大的变形很难保证边坡的稳定性,极易发生失稳破坏。

参 考 文 献:

- [1] 李建林.卸荷岩体力学理论和应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1999:146-150.
- [2] 李建林,袁大祥.岩体卸荷分析的基本方法[J].三峡大学学报:自然科学版,2001,23(1):1-6.

[责任编辑 张 莉]