

文章编号 1001-8166(2004)增-0318-06

剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用

丁秀美¹, 刘光士², 黄润秋¹, 严明¹, 林锋¹, 郑达¹

(1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059;

2 中煤国际工程集团重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘 要 堆积体边坡是我国西南地区普遍可见的一类边坡, 而此类边坡的失稳(特别是滑动失稳), 一般沿剪应变最大的部位发生。利用快速拉各朗日程序(FLAC-3D), 对澜沧江中游某堆积体边坡划分足够细化的单元, 通过最大剪应变增量找出坡体内薄弱部位, 即最容易失稳的部位, 结合变形特征对其稳定性进行了评价; 同时与“最危险滑弧”搜索的最危险滑动范围对比表明, 二者具有较好的一致性。

关键词 堆积体边坡 稳定性 剪应变 FLAC 滑面搜索

中图分类号 P642 **文献标识码** A

0 引言

堆积体边坡是我国西南地区普遍可见的一类边坡, 这类边坡一般由滑坡体或滑坡崩塌迁移物构成, 结构松散, 堆积体与基岩之间一般存在一层软弱夹层, 在天然情况下, 堆积体边坡的稳定性较好, 但由于开挖、降雨、水库蓄水等原因, 沿基覆面可能产生显著变形甚至产生滑动破坏, 其变形或破坏的范围一般是有限的, 因此, 确定这类边坡的变形破坏范围是进行稳定性评价的和防治工程设计的關鍵。李国琛等通过研究认为, 就承受塑性大变形的材料而言, 原来平滑分布的变形模式被一种急剧不连续的位移梯度所取代, 其特征是大量的剪切变形集中在相对狭窄的带状区域内, 边界相对而言近乎平行。因而, 对堆积体边坡而言, 可以通过寻找剪应变集中带的途径来寻找可能的失稳范围和部位。本文利用快速拉各朗日程序(FLAC-3D), 对澜沧江中游某堆积体边坡划分足够细化的单元, 通过最大剪应变增量找出坡体内薄弱部位, 即最容易失稳的部位, 结合变形特征对其稳定性进行了评价; 同时与“最危险滑弧”搜索的最危险滑动范围对比表明, 二者具有较好的一致性。

1 剪应变与边坡稳定性

目前, 研究边坡稳定性的方法主要有 3 类: (1) 基于极限平衡理论的极限平衡法、概率分析法、极限分析法、滑移线场法等; (2) 基于边坡变形破坏迹象及变形机制的稳定性判别; (3) 基于边坡应力应变特征及变形破坏机理进行评价分析的数值分析方法。极限平衡法根据具体情况假定破坏面(滑面)形状, 而不是按塑性理论计算得到。没有考虑土体内部的应力应变关系, 无法分析边坡破坏的发生和发展过程, 无法考虑变形对边坡稳定的影响, 没有考虑土体与支挡结构的共同作用及其变形协调。这些建立在极限平衡理论基础上的各种稳定性分析方法没有考虑土体内部的应力应变关系, 无法分析边坡破坏的发生和发展过程, 无法考虑变形对边坡稳定的影响, 不能考虑土体与支挡结构的共同作用及其变形协调。

土体剪切带的形成与土体发逐渐破坏理论是当今国际力学界和岩土工程界共同关注的课题^[1]。室内试验土样的剪切破坏、现场路基和地基的滑动破坏以及山体运动的褶皱断层等均可视作局部化剪切带形成的现象。这种局部变形一旦发生, 变形将

会集中相对集中在局部化变形的区域内,而区域外的变形相当于卸载后的刚体运动。已有研究表明^[1]在剪切破坏面上的强度是逐渐发挥的,即在剪切带上土的强度不是同时发挥到最大值,土的逐渐性强度特性是剪切带强度发挥的反映。非均匀变形的发展也使得整体上表现土的软化性状是与剪切带产生的结构破坏直接相关。因此,岩土体的失稳(特别是滑动失稳),都是沿剪应变最大的部位发生,大量实例分析结果也证明了这一点。利用三维数值计算得出的剪应变增量,结合边坡变形特征分析边坡的稳定性,即考虑了土体内部的应力应变关系、边坡破坏的发生和发展过程和应力历史对边坡的影响性、土体与支挡结构的共同作用及其变形协调,比极限平衡方法更为合理。

2 堆积体边坡的变形破坏模式

对于较大型堆积层斜坡的失稳,由于边坡结构和坡体内部应力场的局部差异,常产生多级滑移或解体现象,有的斜坡还产生双层平行滑移和多层滑移。我们可以将堆积体边坡的变形破坏可归结为3个层次:第一层次是整体稳定性问题,即堆积体沿基覆界限发生整体失稳。第二个层次是区段式破坏模式,即堆积体内存在规模较大的局部潜在危险体,后缘陡倾段堆积体被拉坏或剪坏,沿基岩面向下滑动,剪断下部堆积体或前缘抗剪断岩体,形成推动式滑坡;具体滑出方式有2种,一是沿基岩面滑出,另一种是上部沿基岩面滑动,向下剪断堆积体或岩体一起滑出。第三个层次是局部失稳,即在堆积体内部存在小规模潜在的失稳块体,即在一定条件下可以形成双层滑移或多层滑移,且多层滑移具有自己的形成、失稳及滑移规律,这种形成、滑移规律可以通过多层滑移物理模型和数学模型进行研究和预测,这是堆积层斜坡失稳所具有的一个特殊形成规律。

3 堆积体边坡基本特征

堆积体位于澜沧江中游某电站坝区右岸,堆积体主要沿 F_7 、 F_3 断层形成的冲沟沟心分布,呈微向上游突出狭长条带形(图1),属于深切冲沟型崩塌式堆积体。其高程范围1160~1770 m,高差达600 m以上,纵向长度约840 m,横向宽度为130~160 m,铅直厚度20~30 m,局部达42 m,总方量约 $1.76 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。沟心地段地质条件复杂且其上下游之间山梁部位岸坡陡峻,沟底地形相对平缓,自然坡度40~45°。开挖后,开口线最高点高程为1520 m,前

缘高程1250 m左右,并以凤小公路为界形成上下两级陡坡,凤小公路以下平均坡度为40°,以上平均坡度为43°。开挖总方量约 $4.05 \times 10^5 \text{ m}^3$,约占总体积的23%。从地形和堆积体空间特征上来看,堆积体在1360~1450 m范围内,空间上有一个较为明显的收口转向特征。这种收口转向利于边坡的稳定。

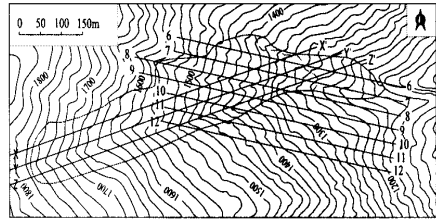


图1 堆积体平面分布特征
(虚线为开挖后堆积体分布范围)

边坡结构(图2)堆积体主要由碎石、块石、孤石夹粉土组成,块石、孤石直径0.3~5 m不等,块石、孤石含量在20%~35%。堆积体中块石、孤石以骨架形式存在,一般充填有碎石土,结构较紧密,与下伏基岩接触面不存在相对软弱夹层。堆积体铅直厚度一般为20~30 m,沿纵向和横向变化较大,在堆积体下部,沿 F_7 断层内形成了堆积体深槽。堆积体底部基岩中下部(大体上在1380 m以下)下伏

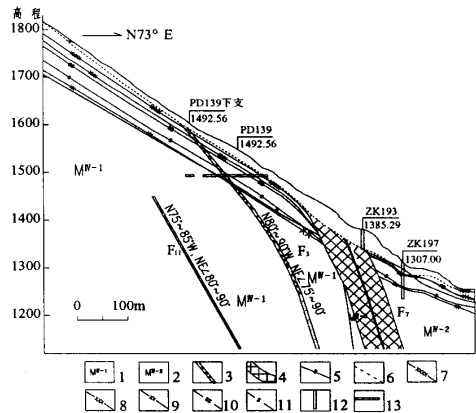


图2 崩塌堆积体中心工程地质纵剖面图
Fig 2 Engineering geological longitudinal section mid of the debris

- 1. M^{-1} 层的黑云花岗片麻岩; 2. M^{-2} 层角闪斜长片麻岩;
- 3. 断层破碎带; 4. 断层影响带; 5. 水位线; 6. 堆积体底界;
- 7. 全风化底界; 8. 强风化底界; 9. 弱风化底界; 10. 强卸荷底界;
- 11. 弱卸荷底界; 12. 钻孔; 13. 平洞

基岩为角闪斜长片麻岩(M^{-2}),呈深灰、青灰色,中细粒鳞片状变晶结构,片麻状构造,主要矿物成分为斜长石、角闪石及少量黑云母,厚度 100~120 m,层内片岩夹层含量约 1%,抗风化能力较黑云花岗片麻岩弱,中上部为 M^{-1} 层的黑云花岗片麻岩。

边坡开挖后,堆积体范围内将布置公路、高低两层缆机平台、电站进水口等重要建筑物,总开挖量约 $4.05 \times 10^5 m^3$,开挖后的堆积体边坡的稳定性将直接影响支护设计和电站的运营。因此,本文重点对开挖后边坡的稳定性进行了研究。

4 堆积体边坡变形稳定性的 FLAC-3D 分析

4.1 FLAC-3D 计算模型的建立

(1) 地质原型的概化:模型范围内除堆积体外,只有少量的第四系堆积物,因此对堆积体以外的其他第四系堆积物在计算时未予考虑。对于基岩,根据其风化程度,结合剖面出露形态,共分为 3 种材料:强风化岩体、弱风化岩体以及微新—新鲜岩体。对于断层,给予了一定的简化,宽度取为 25 m,倾向角取为 82° ,并根据其主裂面及其影响带参数,结合其风化卸荷程度分为 3 段进行综合参数选取。



图 3 三维计算模型

Fig. 3 Three-dimensional calculating model

(2) 模型范围:以堆积体为中心横向宽度取 500 m,前缘高程取至 1 080 m,后缘高程取至 1 850 m。

(3) 模型的边界条件及物理力学参数的选取:为重点分析堆积体重力作用下的变形破坏模式,模型中未施加水平构造应力,模型侧缘边界和底面边界均采取单向约束的形式。对岩土体物理力学参数进行综合取值(表 1)。

表 1 岩土体物理力学参数取值

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock and soil

| 岩土体 | 泊松比 | 变形模量 (MPa) | 剪切模量 (MPa) | 体积模量 (MPa) | 容重 (kN/m^3) | 内摩擦角 ($^\circ$) | 内聚力 (MPa) | 抗拉强度 (MPa) |
|---------------------------------|------|---------------|---------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------|
| 堆积体 | 0.35 | 500 | 185.185 | 555.556 | 20.60 | 36.00 | 0.05 | 0.00 |
| 强风化岩体 | 0.32 | 800 | 303.030 | 740.741 | 24.00 | 39.00 | 0.40 | 0.00 |
| 弱风化岩体 | 0.26 | 10000 | 3968.254 | 6944.444 | 25.50 | 51.00 | 0.70 | 1.00 |
| 微新—新鲜岩体 | 0.24 | 20000 | 8064.516 | 12820.51 | 27.00 | 56.17 | 1.70 | 1.60 |
| 强风化带内 ^{F7} 及破碎带 | 0.35 | 500 | 185.185 | 555.556 | 20.00 | 21.00 | 0.02 | 0.00 |
| 弱风化带内 ^{F7} 及破碎带 | 0.34 | 800 | 298.507 | 833.333 | 20.00 | 30.00 | 0.025 | 0.00 |
| 微新—新鲜岩体 内 ^{F7} 及破碎带 | 0.32 | 1000 | 378.788 | 925.926 | 20.00 | 35.00 | 0.30 | 0.00 |

(4) 计算方案:大椿树沟堆积体在成因类型上属于崩塌堆积物,显然,在堆积体形成以前,大椿树沟一带的岸坡应力场已经过了较为充分的调整。在堆积体形成后,其自身也经历了较长的压密固结过程。为了反映开挖前的上述调整过程,计算时考虑 3 个阶段:首先,堆积体形成之前的初始状态计算;其次,堆积体形成之后的计算(开挖前);最后是开挖条件的变形破坏特征分析(开挖后)。

(5) 模型准则及其离散化:计算采用是比较常

用的弹塑性模型,屈服准则为莫尔—库仑准则,并进行离散化,共划分出 110 501 个单元,100 959 个节点(图 3、图 4)。

4.2 开挖边坡计算结果及其分析

4.2.1 开挖后堆积体边坡变形特征

图 5、图 6 分别为开挖后堆积体边坡总位移等值线图和位移矢量图。由此可以看出:整个堆积体分布范围内,以堆积体中部的变形最为显著。其位移相对高值区分布于在 1 400~1 650 m 高程范围

内。高值中心出现凤小公路以上,与开挖前相比,有顺坡向上偏移的趋势,最大量值约 7.5 cm。在该范围以上、以下,位移量值均很小。平面上,在上述范围内,位移矢量总体呈收敛状。坡体总体位移方向与沟的展布方向近于平行,并微向下游偏转。根据上述位移分布特点可以看出,开挖后堆积体边坡,其下部存在一定的“收口”效应。

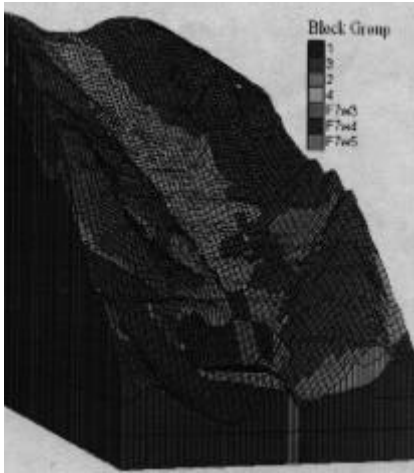


图 4 开挖后计算模型

Fig 4 Excavated calculating model for FLAC - 3D

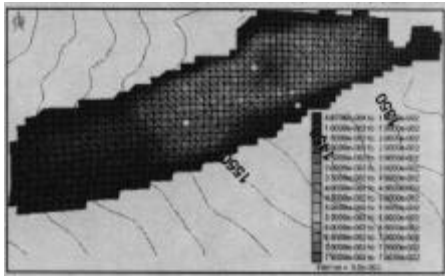


图 5 开挖后堆积体位移等值线图(俯视图)

Fig.5 Displacement contour after excavating

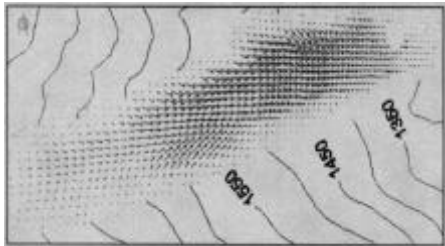


图 6 开挖后堆积体位移矢量图(俯视图)

Fig.6 Displacement vector after excavating

4.2.2 开挖后堆积体边坡稳定性分析

图 7 为系统不平衡力演化曲线。可以看出,虽然开挖会导致堆积体(系统)处于不平衡状态,但这是暂时的,随着迭代时步的进行,系统的不平衡力迅速衰减,最终趋于一种零。表明开挖后堆积体边坡最终将趋于稳定,并保持一种平衡状态。结合前面的最小主应力计算结果,可以认为,开挖后的堆积体边坡在天然状态下,整体是基本稳定的。

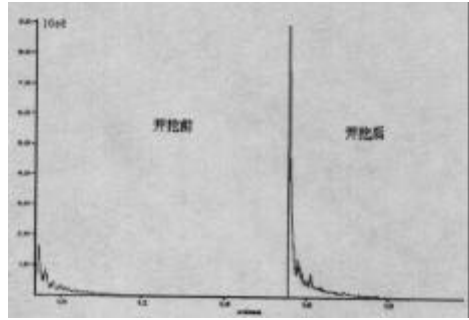


图 7 不平衡力演化过程曲线

Fig.7 Unbalanced force evolution

从 X - X、Y - Y、Z - Z 剖面(图 8 ~图 10)看,在基覆界面处分布有一个较为明显的剪应变增量带。在 3 个剖面上,这一增量带上端的分布高程大体相当,即位于 1 600 ~1 650 m 高程,并有穿出坡面的趋势,而下端分布高程则略有差异,大体上,在堆积体的两侧(X、Z 剖面)分布高程较高,为 1 380 ~1 400 m,在堆积体中(纵)轴线附近(Y 剖面)分布高程较低,为 1 330 m 高程附近。从平面图看,上述剪应变增量带顺基覆界面延伸,大体在堆积体的南、北边缘处穿至坡面,表现为南北两个分支。这两个分支大体在 1 500 ~1 550 m 高程接近于闭合相接,而在 1 600 ~1 650 m 也有闭合相接的趋势。总的说来,上述剪应变增量带在堆积体的北侧(部)连续性较好,而在堆积体的南侧(部)连续性较差。

进一步,将上述剪应变增量带的分布与前面的位移计算结果对比发现,上述剪应变增量带的分布范围恰恰是堆积体边坡中变形较大的区域。这一范围内的坡体的安全储备应是相对较低的,也是最容易(最可能)发生失稳破坏的。

根据上述,可以对椿沟堆积体开挖边坡在未来工况下的失稳模式得出如下几点初步认识:虽然开挖后堆积体本身及其两侧基岩斜坡,都一定程度的开挖退坡,但基覆界面在堆积体下部所表现的深

槽形态仍有部分残留。其收口效应虽较开挖前有所减弱,但依然存在,并导致潜在滑面的剪出口有一定幅度的抬高。综合前面的分析,对槽堆积体边坡,可能会有以下 2 个潜在滑面:一个潜在滑面,其下端位于 1 330 ~1 380 m 高程,上端位于 1 500 ~1 550 m 高程;另一个潜在滑面,其下端位于 1 330 ~1 380 m 高程,上端位于 1 600 ~1 650 m 高程。其滑移方向大体与槽沟展布方向平行,并微向向下游偏转。

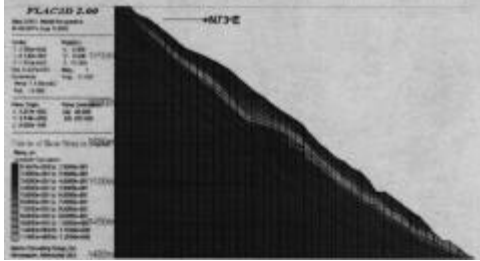


图 8 开挖后 x - x 剖面剪应变增量等值线图
Fig.8 Shear strain increment on the X - X section after excavating

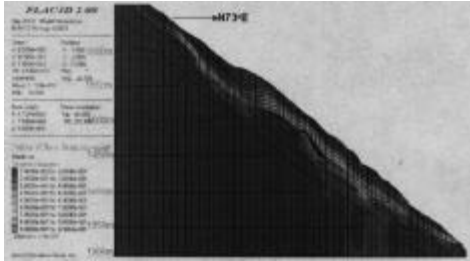


图 9 开挖后 Y - Y 剖面剪应变增量等值线图
Fig.9 Shear strain increment on the Y - Y section after excavating

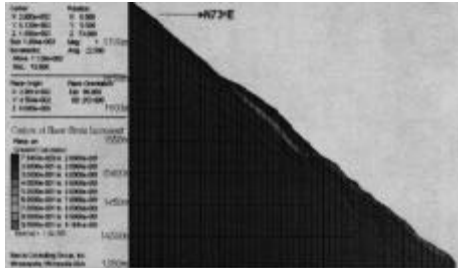


图 10 开挖后 z - z 剖面剪应变增量等值线图
Fig 10 Shear strain increment on the Z - Z section after excavating

5 堆积体边坡最危险滑动范围的搜索
堆积体“最危险滑面”的搜索采用了比较成熟

的“最危险滑弧”搜索技术。其基本原理是基于极限平衡分析方法,采用在一定范围内以一定半径设定虚拟滑动面,计算每条滑动面的稳定性系数,然后从中找出最小值,该最小值所对应的滑面就是“最危险滑面”。

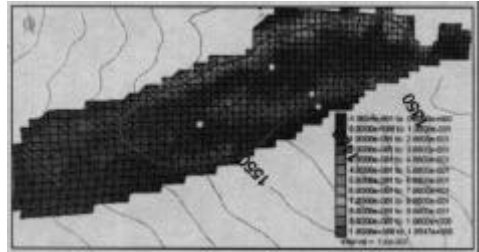


图 11 开挖后边坡剪应变增量等值线图及最危险范围
Fig.11 Shear strain increment and the danger range after excavating

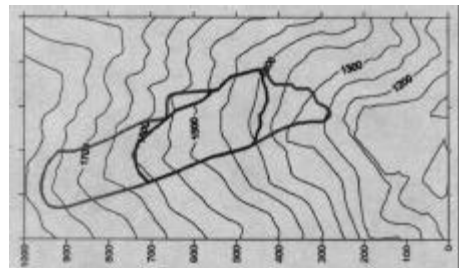


图 12 “最危险滑弧”搜索的最危险范围
Fig.12 Danger range searched by "arc search "

根据各计算剖面计算结果圈定的最危险潜在滑体的位置及范围见图 11,从最危险潜在滑体的分布位置上看,搜索得到的最危险滑面的高程范围均相差不多。而且,这个范围与 FLAC - 3D 计算所得的变形异常范围和圈定的最危险范围基本一致。前缘剪出口位置正好落在坡形中利于收口的部位。说明沟堆积体最有可能的失稳模式是其中下部一定高程范围内(1 353 ~1 608 m)堆积体将首先局部失稳,而不是堆积体本身的整体滑动。

6 结 语

堆积体边坡是我国西南地区普遍可见的一种边坡,而此类边坡的失稳(特别是滑动失稳),一般都是沿剪应变最大的部位发生,大量工程实例分析结果也证明了这一点。利用快速拉各朗日程序(FLAC - 3D),对澜沧江中游某堆积体边坡划分足够细化的单元,通过最大剪应变增量找出坡体内薄弱部位,

即最容易失稳的部位,结合边坡变形特征分析边坡的稳定性,即考虑了土体内部的应力应变关系、边坡破坏的发生和发展过程和应力历史对边坡的影响性、土体与支挡结构的共同作用及其变形协调,比极限平衡方法更为合理。同时与“最危险滑弧”搜索的最危险滑动范围对比也表明,二者具有较好的一致性。

参考文献(References):

[1] 赵锡宏,张启辉,等.土的剪切带试验与数值分析[M].北京:

机械工业出版社,2003.

- [2] 李国琛,耶那.塑性大应变微结构力学[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] 孙伟,龚晓南.弹塑性有限元法在土坡稳定分析中的应用[J].太原理工大学学报,2003,34(2):199-202.
- [4] 刘宏.四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性分析[D].成都:成都理工大学环境与土木工程学院资料室,2003.
- [5] 赵尚毅,时卫民,郑颖人.边坡稳定性分析的有限元法[J].地下空间,2001,21(5):450-454.
- [6] 贺可强.大型堆积层滑坡的多层滑移规律分析[J].金属矿山,1998,7:15-18.

SHEAR STRAIN INCREMENT APPLYING IN STABILITY STUDYING OF DEBRIS SLOPE

DING Xiu-mei¹, LIU Guang-shi², HUANG Run-qiu¹,
YAN Ming¹, LIN Feng¹, ZHENG Da¹

(1. National Laboratory of Geohazards Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China 2. Chongqing Design & Research Institute, International Engineering Group of China Coal, Chongqing 400016, China)

Abstract: Debris slopes are ubiquitous in Southwest China, and engineering practices have indicated that these slopes slide along the maximal shear strain zone. In this paper, taking a debris slope in the midstream of Lan-chang River as an engineering example, the slope stability was studied by analyzing its maximal shear strain increment and displacement characteristics with the software FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-dimension). Comparison with the calculation results of "arc search" shows that they are corresponding well.

Key words: Debris slope; Stability; Shear strain; FLAC; Slide surface search.