



## 硬岩中倾顺层斜坡变形特征和破坏机理

吴 辉

(贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 顺层岩质斜坡是极易失稳、危险最大并且工程地质问题最多的边坡。因此顺层岩质斜坡的稳定性和处理措施对于工程的建设极为重要。深入调查了某斜坡所在区域的地形地貌、地层岩性、地质构造和水文地质条件, 分析斜坡的岩体结构特征, 建立斜坡的地质模型, 并运用数值模拟软件UDEC对斜坡进行模拟, 模拟出斜坡的变形破坏特征。通过分析得到该斜坡的变形破坏机理。研究表明, 由于岩体受到长期的风化作用, 在一定的深度范围内, 风化张拉裂隙十分发育, 并且具有粉质黏土充填, 从而大大降低了抗剪强度, 这是影响中倾角顺层斜坡产生变形破坏的控制性因素。研究硬岩中倾顺层斜坡的变形破坏机理对其他类似工程的稳定性评价及治理措施提供参考。并证明离散单元法是对顺层岩质斜坡进行数值模拟的十分有效方法。

**关键词:** 中倾角顺层斜坡; 变形特征; 破坏机理; UDEC; 数值模拟

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0174-04

### Deformation and failure mechanism of moderate-dip cataclinal hard-rock slope

WU Hui

(Guizhou Transportation Planning, Survey & Design Academy Co., Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The stability and treatment of cataclinal hard-rock slope are very important to construction of highway. This paper deeply analyses the topography, lithologic and tectonic features of stratum, hydro-geologic conditions in one slope. Numerical simulation software UDEC is used to simulate the deformation and failure characteristics of the slope and get the deformation and failure mechanism of it. The result indicates that the joint of weathering and unloading of the slope are developed because of long-time weathering, and the joints are filled with silty clay, thus the shear strength reduces greatly and this leads to the sliding of the moderate-dip cataclinal slopes. The conclusion may be useful for the stability assessment and regulation measures of similar engineering. Furthermore, it proves that the discrete element method is very effective to numerical simulation on bedding rock slopes.

**Key words:** moderate-dip cataclinal slope; deformation characteristics; failure mechanism; UDEC; numerical simulation

研究斜坡的变形破坏机理, 准确评价和确定斜坡岩体的变形破坏模式, 对斜坡稳定性评估和治理设计具有重要的意义<sup>[1]</sup>。本文以某斜坡为研究对象, 重点研究该类斜坡的岩体变形破坏特征与机理, 为该类斜坡的稳定性评估及处治提供依据, 同时也为类似工程的稳定性评估及处治提供参考。

迄今为止, 许多学者对顺层岩质斜坡的变形破坏机理进行了研究, 并有许多成果: 北京地质学院(中国地质大学)的地质工作者对同向岩质斜坡进行研究分析, 把岩质斜坡破坏类型分为2类——硬岩和软岩。其中硬岩斜坡以滑坡破坏为主<sup>[2]</sup>; 金仁祥、杨良策等应用离散元单元法分析了斜坡的变形机理<sup>[3]</sup>; 冯君(2005)等人, 用16组

收稿日期: 2012-04-09

作者简介: 吴辉(1971—), 男, 高级工程师, 从事公路工程勘察设计、监理和管理工作的。

小比例物理模型试验模拟,得到以下结论:1)人工开挖使得斜坡产生临空面,从而产生形变拉应力。进而对上部岩体有向下的牵引作用,使得上部岩体一起向下发生移动和变形,变形量值由临空面下坡体内部依次减小,即形成了变形边界,这样就可以确定斜坡开挖产生的松弛区的范围;2)当岩层倾角固定时,随着斜坡走向和岩层走向夹角的增加,坡体也愈加稳定<sup>[4]</sup>。

深入调查该斜坡所在区域的地形地貌、地层岩性、地质构造和水文地质条件,并分析斜坡的岩体结构特征,结合地形地貌、工程地质特征、结构面特征得出斜坡的地质模型,并运用数值模拟软件UDEC对斜坡进行模拟,模拟出斜坡的变形破坏特征,从而分析出斜坡的变形破坏机理。

## 1 斜坡地质条件

### 1.1 地形地貌

场区地处贵州高原西部高原山地区,受构造溶蚀-冲蚀影响,地形条件较为复杂。场区附近属构造溶蚀-冲蚀低中山地貌,区内最高海拔1 566.6 m,最低地海拔1 479.4 m,相对最大高差87.2 m。斜坡为凸形坡,坡向95°,坡度角31°左右。

### 1.2 地层岩性

根据野外地质调查以及斜坡工程地质勘察资料,斜坡地层岩性自地表向下依次是:第四系残坡积(Q<sup>el+dl</sup>)黏土和永宁镇组(T<sub>1yn</sub>)灰岩。

第四系残坡积(Q<sup>el+dl</sup>)黏土:黄色、褐黄色,可塑状,含少量碎石,厚0~2.8 m。

永宁镇组(T<sub>1yn</sub>)灰岩:强风化灰岩:灰黄色、灰色,中厚层状,节理裂隙很发育,裂隙面为泥质充填,溶蚀发育,岩体极破碎-破碎。岩芯呈块状、碎块状,少量呈柱状。中风化灰岩:色、灰白色,中厚层状,节理裂隙发育,局部见溶蚀晶孔,岩体较完整,岩芯呈柱状,少量呈块状。

### 1.3 水文地质条件

场区地下水类型为风化基岩裂隙水及岩溶水,地下涌量小,地下水主要靠大气降水补给,降雨时一部分沿岩层面、节理裂隙面向下垂直补给;一部分向地势较低的小溪径流排泄。

### 1.4 结构面发育特征

岩体的结构面及其控制下形成的控制岩体

的变形、破坏机制及力学法则<sup>[5]</sup>。要研究斜坡的变形破坏特征就一定要清楚岩体结构面的发育特征。结构面主要有2种类型:原生结构面、构造结构面。

该斜坡的原生结构面为灰岩的沉积层面,属于贯通性的结构面,层间间距为30~80 cm,局部间距150 cm。

岩体层面的发育程度与层面的埋深有很大的关系。在滑坡体前缘存在着风化卸荷张拉裂隙;在滑坡体前缘揭露了4~5 m的岩体层面(图1和2);层间存在着0.1~10 cm的泥质充填物。通过现场地质调查发现:填充厚度随着岩体埋深的增加而变小<sup>[6-9]</sup>。



图1 边坡岩体揭露情况



图2 表层岩体卸荷张拉裂隙

## 2 基于UDEC的岩体变形破坏特征

### 2.1 离散元模型的建立及参数选取

根据野外调查,该斜坡的岩层产状为:95°~125°∠28°~40°,主要发育的裂隙有:272°∠81°、5°∠71°、93°∠60°、60°∠83°。此4组裂隙控制着斜坡岩体的变形和破坏。模型的长为65.7 m,高为53 m,基岩岩层倾角为30°,底部岩层厚度为1.5 m,表层的岩层厚度为0.5 m。取底部基岩单元边长为30,其余取10。采用摩尔库伦模型,左、右侧和底部边界均为固定边界,具体的主剖面的地质模型如图3所示。计算中各介质的主要参数如表1~2所示<sup>[10-14]</sup>。

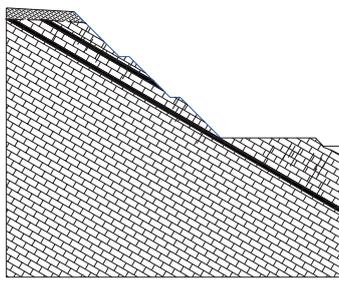


图3 主剖面的地质模型

表1 岩体的物理力学参数

岩体	饱和密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗拉强度/ MPa	抗剪强度参数		体积模量 /GPa	剪切模 量/GPa
			内摩擦角 $\phi$ /( $^{\circ}$ )	粘聚力C/ MPa		
深部 岩体	2 710	1.2	55.3	2.43	17.00	19.0
表层 岩体	2 600	0.5	29.0	1.33	15.94	16.5

表2 结构面的力学参数

结构面	内摩擦角 $\phi$ /( $^{\circ}$ )	粘聚力 C/kPa	法向刚度/ ( $\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	剪切刚度/ ( $\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )
表层层面	10	26	4.5	2.0
深部岩体层面	30	169	5.0	3.5

## 2.2 离散元计算结果及分析

利用上述模型及计算参数进行数值模拟分析,其模型如图4所示,其模拟结果,如图5和6所示。

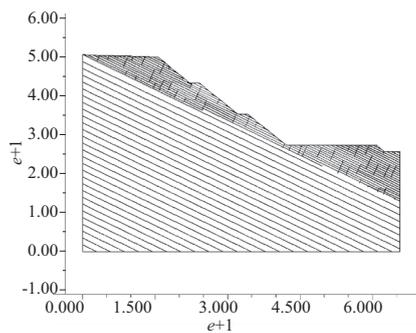


图4 斜坡计算模型

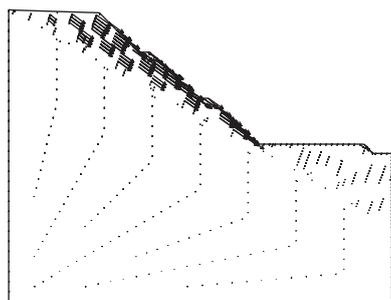


图5 边坡开挖后迭代5 000次时步累计位移矢量

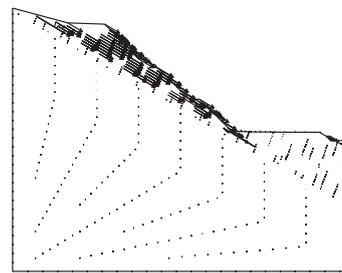


图6 边坡开挖后迭代30 000次时步累计位移矢量

斜坡开挖之后,坡体的应力场将重新分布,由于开挖产生了临空面,使得岩体有了滑移的空间。从图5中可以看到,当运行5 000时步之后,斜坡上的岩体沿着张拉裂隙和岩层层面下临空面发生滑移变形。随着下部岩体向临空面的滑移,上部岩体也跟着向临空面发生滑移,从而使得整个斜坡发生滑移变形破坏(图6)。在运行30 000时步的时候,上部岩体也跟着下部岩体一起向临空面发生滑移。

## 3 顺层岩质斜坡在支护条件下变形趋势

针对上述变形破坏模式,采用框架锚索进行防护,锚索为6排。第一级边坡的2排锚索长度为10 m,第二级边坡的2排锚索长度为14 m,第三级边坡的2排锚索长度为17 m。

采用框架锚索支护时边坡的计算模型如图7所示。模拟计算的结果如图8所示。从图8中可以看出,锚索支护完全预防了斜坡发生整体滑移变形破坏。因此,该防护是十分有效的。然而从图8中还可以清楚的看到斜坡上发生有小块体沿着结构面发生滑移。所以,应该对结构面进行注浆。这样能更好地提高斜坡的结构面强度,增加斜坡的整体稳定性。

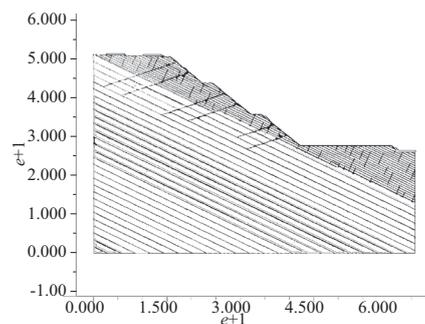


图7 锚索支护条件下的计算模型

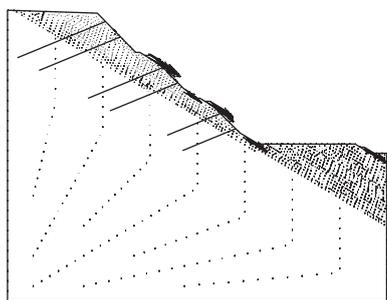


图8 锚索支护下迭代30 000时步累计位移矢量

#### 4 成因和破坏机制

斜坡岩性为灰岩, 岩层产状为 $95^{\circ}\sim 125^{\circ}\angle 28^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。斜坡岩体发生变形与破坏是在斜坡开挖的情况下产生的。

由于斜坡稳定性的主控因素是岩体层面的强度。而同时岩层间存在着0.1~10 cm的泥质充填物, 所以层间的强度取决于泥质填充物的强度。在一定的深度范围内, 这些泥质填充物的主要来源是: 岩体的风化侵蚀、溶蚀、流水把表面的泥质顺着裂隙流入层面而形成和坡体自重作用形成, 这就使得层面完全丧失了成岩过程中的胶结强度。当软弱夹层的厚度大于其盘面的起伏差时, 剪动面可以在软弱夹层本身中产生, 即, 岩体层面大部分已转化为软弱结构面, 具备了成为滑面的物质条件<sup>[15]</sup>。

垂直于坡面的节理为斜坡的滑动提供了侧向边界。使得在降雨时, 雨水能更方便地渗入到岩体内部, 从而会在层面上产生动水压力、静水压力、浮托力, 增加了水对岩体的软化作用, 降低了岩体的强度。为岩体发生变形提供力学条件。

由于斜坡的开挖, 上部岩体失去了支撑, 使得斜坡存在临空面, 为岩层的下滑提供了空间。这也是岩层产生滑动的触发因素, 该斜坡会沿着软弱夹层向临空面发生顺层滑移破坏。

#### 5 结论

1) 斜坡岩体在变形与破坏的过程中本身解体了。即, 顺层滑移存在着岩体解体后的分离式滑移, 并不是全部都是整体式的类刚体滑动。

2) 斜坡的开挖使岩层面产生临空面, 这是岩层发生滑移变形破坏的触发因素。

3) 由于岩体的风化侵蚀、溶蚀、流水把表面

的泥质顺着节理裂隙流入层间而形成和坡体自重作用形成的软弱夹层, 大大降低了岩层强度, 这就使斜坡岩体具备了滑动面, 促使滑移的发生。

4) 垂直于坡面的节理为斜坡的滑动提供了侧向边界, 使得岩体具备了滑动条件。

#### 参考文献:

- [1] 黄润秋, 赵建军, 巨能攀, 等. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 240-246.
- [2] 北京地质学院工程地质教研室. 同向岩体边坡稳定性的研究[G]// 滑坡文集: 第一集, 1976: 290-304.
- [3] 金仁祥. 三峡库区某公路顺层岩质边坡变形特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(2): 39-44.
- [4] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 474-1 478.
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [6] 陈静曦, 章光, 袁从华. 顺层滑移路堑边坡的分析和治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 48-51.
- [7] Cundall P A. A Computer Model for Simulating Progressive Large Seale Movements in Blocky Rock System[C]// Nancy: Proc of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, 1971.
- [8] 刘才华, 徐健, 曹传林, 等. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 529-3 533.
- [9] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [10] 殷跃平. 长江三峡工程库区滑坡防治工程设计与施工技术规程 [M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [11] 李树森, 任光明, 左三胜. 层状结构岩体顺层斜坡失稳机制的力学分析[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(2): 24-29.
- [12] 胡新丽, 唐辉明, 陈建平. 高速公路顺层路堑边坡优化设计方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 24(4): 373-376.
- [13] 杨天鸿, 芮勇勤, 李连崇, 等. 顺层蠕动边坡变形破坏机制及稳定性动态分析[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 155-161.
- [14] 叶金汉. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [15] 袁从华, 章光, 杨明亮, 等. 某公路顺层滑坡的整治及对该区段选线的反思[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 428-430.

( 本文编辑 郭雪珍 )