

陡倾外层状岩石边坡的破坏机制与开挖模拟

Failure mechanism and modeling of excavation effect for steep over-dip stratified rock slope

孙国富^{1,2}, 刘维宁¹, 陶连金², 张倬元³

(1. 北京交通大学 土建学院, 北京 100044; 2. 北京工业大学 建工学院, 北京 100022; 3. 成都理工大学 工程地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要: 陡倾外层状岩石边坡由于滑移-弯曲变形所形成的滑坡是石灰岩山区高速公路挖方边坡失稳的一种复杂的地质模式。通过实例, 深入地分析了这类边坡产生变形破坏的地质力学机制与过程, 用离散单元法对开挖过程和最终稳定性进行了数值模拟和分析, 并提出了具有代表性的工程整治措施。

关键词: 山区高速公路; 挖方边坡; 滑移-弯曲; 离散单元法

中图分类号: U 416. 13

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0697-05

作者简介: 孙国富(1969-), 男, 安徽芜湖人, 北京工业大学建工学院交通土建学科部副教授, 工学硕士, 现为北方交通大学隧道所在职博士研究生。

SUN Guo-fu^{1,2}, LIU Wei-ning¹, TAO Lian-jin², ZHANG Zhuo-yuan³

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China; 3. Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The failure of steep over-dip stratified slope is generally caused by sliding-bending in unstable cutting slopes of highway in limestone mountainous area. Based on the case study, the geomechanical mechanism and process of the deformation and failure for this kind of slope are illustrated, and discrete element method is used in modeling the excavation effect and final stability of the slope. According to the failure mechanism, a typical reinforcement remedial design of the slope is proposed.

Key words: highway in mountainous area; cutting slope; sliding and bending; discrete element method

0 引言*

在山区高速公路的建设中, 40~100 m 高的深挖路基边坡数量较多。对于复杂地质条件地区如我国西南地区石灰岩山区的公路挖方边坡来说, 其变形破坏的地质力学模式较多, 基本涵盖了各类边坡变形破坏的地质力学模式, 如蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、滑移-拉裂、滑移-弯曲、弯曲-拉裂(倾倒)、流塑-拉裂及各种复合模式等^[1~3]。其中发生滑移-弯曲变形破坏的挖方边坡由于各部位的岩体产状比较紊乱、风化解体比较严重, 尤其从没有开挖前地表地质现象或局部的钻孔资料很难对边坡的地质模式做出准确而全面的判断, 以至于在开挖施工或公路运营阶段出现由于薄层岩体强烈弯曲、隆起发展致贯通性滑移面而形成的滑坡。本文以广西石灰岩山区的一个典型的滑移-弯曲型公路边坡为例, 就这类边坡的变形破坏机制进行深入分析和开挖模拟, 并提出整治方法。

1 边坡的地层岩性与地质构造

该挖方边坡为广西河池(水任)-南宁高等级公路 K133+180~320 段路堑左边坡, 边坡设计形式为每 10 m 设置一个宽 1.5 m 的平台, 目前各级坡比分别为 1:

1, 1: 1, 1: 1.5, 1: 1.75, 1: 1.75, 1: 1.75, 边坡高度为 76 m, 边坡全貌如图 1^[4]。



图 1 边坡全貌图

Fig. 1 General view of the slope

该段路堑位于低山地貌区的垭口, 地面高程 305.43~362.19 m。地形形态为马鞍形, 坡度 15°~48°不等。上部为第四系所覆盖, 植被良好。边坡的主要地层和岩性见表 1。

开挖后揭示出边坡上没有断裂构造, 顶部硅质灰岩除有一背斜褶曲, 前部岩体产状稳定, 基本为倾坡外 57°, 坡体表层的硅质岩产状紊乱且多数为反倾坡内, 如图 2 所示^[4]。其工程地质平面图见图 3。

表 1 地层岩性特征一览表

Table 1 The stratum and lithology of the slope

年代 成因	岩土 名称	厚度 /m	颜色	风化 程度	其他特征
Q ^{el}	黏土	1.6~ 3.8	黄色		顶部含植物根茎
	泥岩	8.2~ 12.9	棕红 黄色	全风 化	泥质结构, 薄层状构造, 裂隙十分发育, 岩芯呈坚硬黏土状。
T ₁	硅质 岩	4.8~ 13.9	灰黑、 深黑、 灰黄色	强风 化	隐晶质结构, 薄层状构造, 裂隙十分发育, 岩石破碎, 岩芯呈角砾、碎屑状。
	硅质 灰岩	15~ 40.7	深灰色		隐晶质结构, 薄层状构造, 裂隙发育, 岩石较破碎。岩芯呈碎块、碎屑状, 少量短柱状。

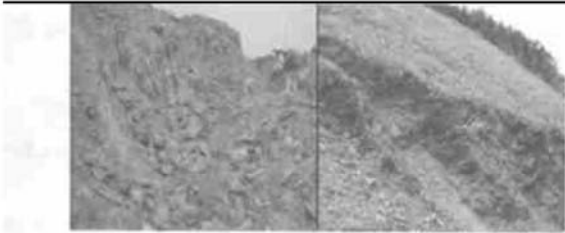


图 2 开挖中揭露的硅质灰岩和硅质岩的产状

Fig. 2 The attitude of siliceous limestone and siliceous rock exposed during slope excavation

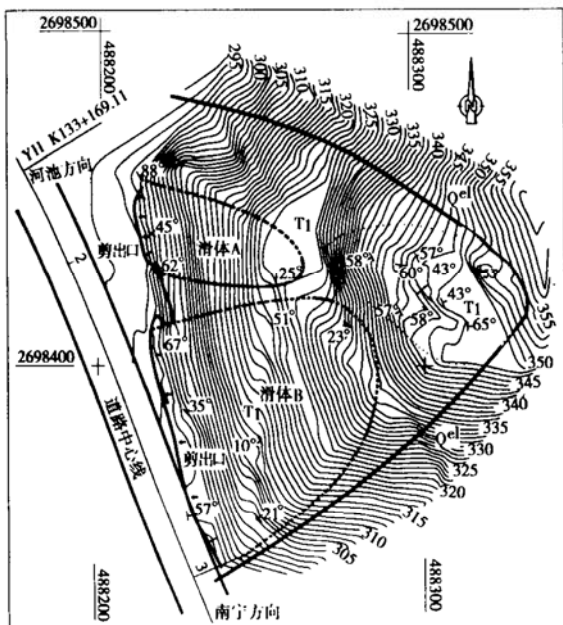


图 3 边坡工程地质平面

Fig. 3 The engineering geologic plan of the slope

2 边坡开挖与变形情况

2001 年 11 月, 承包人对边坡按原设计(1: 0.5~ 1)下挖 20 m 时, 在距路中线左侧 76 m 的坡顶地表出现裂缝; 经第一次变更设计(1: 0.5~ 1.75)开挖后, 并将 1: 1.75 坡比的边坡(第 5~ 7 级边坡)做好了拱肋护坡,

但在 2002 年 4 月在第 5 级坡顶仍然出现 30 cm 宽的裂缝, 并有下错, 有两次滑动坡面可见多处平行坡面的裂缝, 护坡多处开裂, 鼓起, 如图 4 所示^[4]。可以判定该边坡的破坏不是由土体自身失稳引起的, 而是由于一个具有较深滑面的古滑坡复活引起的。第 6 级及以上的拱肋护坡未发现裂缝, 同时可见多处基岩裸露, 可以说明滑坡后缘的存在位置。

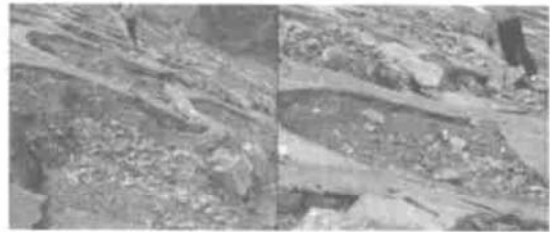


图 4 坡面拱肋护坡由于坡体变形而遭破坏

Fig. 4 The arch rib revetment damaged due to the deformation of slope

3 坡体变形破坏的地质力学模式

3.1 边坡的地质模型

由于该边坡各部位的岩体产状比较紊乱, 从坡面地质现象难以合理确定边坡的地质模型以及两个滑坡体产生的机制。经过多次现场踏勘、地质模式设想和判断, 并根据各种地质现象和实测结果的验证, 初步确定该边坡的滑坡是由于原状硅质岩的严重滑移- 弯曲, 并在弯曲最强烈的部位产生贯通性切出面(即滑面)而形成的。经过进一步钻探, 得出该边坡的典型横断面地质剖面, 可较准确地确定其地质模型, 见图 5。

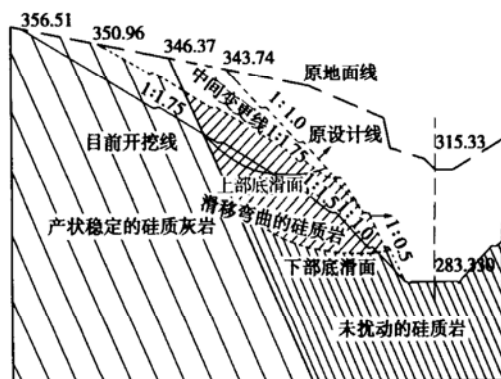


图 5 边坡工程地质剖面及模型

Fig. 5 The engineering geologic section and model of the slope

该边坡的地质模型可以这样描述, 该边坡山体存在一个古滑坡, 由于深部接近路基边缘处一段硅质岩风化程度较低, 岩石条件较好, 形成一个大型“抗滑桩”, 将该滑坡一分为二, 形成两个剪出口, 如图 3 所示。该滑坡是由于薄层、软弱的硅质岩和页岩沿陡倾的硅质灰岩层面产生严重的重力滑移- 弯曲形成的, 具有多级底滑面, 如图 5 所示。

该边坡第一次按原设计开挖时,坡顶地表出现了拉裂缝,这是由于上部次一级古滑坡在边坡开挖后提供滑动空间复活造成的;变更设计后,虽然上部边坡放缓,但是仍存在较大的滑体,可以沿上一级底滑面继续滑动,使得砌筑好的拱肋护坡产生拉裂破坏;目前的变更设计虽然将边坡大大放缓,但主要是将顶部基岩(稳定的硅质灰岩)部分开挖,其次是消减了上一级滑体的体积,对于减缓该滑体的变形是有益的,但是对于整个边坡的稳定性作用不大,也就是说,随着进一步向下开挖至路基设计标高时,下部潜在滑体仍然存在,它的稳定程度决定了该边坡的整体稳定性。

3.2 古滑坡形成与复活的地质力学过程

从边坡的地质模型可知,该边坡的破坏是由于路堑开挖后古滑坡复活所致,而这个古滑坡是由于延性较好的薄层陡倾外硅质岩沿坚硬的同产状硅质岩发生严重地滑移-弯曲所形成的。

滑移-弯曲型变形破坏主要发育在中-陡倾外层状体边坡中,尤以薄层状岩体及延性较强的碳酸盐类层状岩体中为多见。这类斜坡的滑移控制面倾角已明显大于该面的峰值摩擦角,上覆岩体具备沿滑移面下滑条件。但由于滑移面未临空,使下滑受阻,造成坡脚附近顺层板梁承受纵向压应力,在一定的条件下可使之发生弯曲变形^[1]。

根据该斜坡的地质过程和开挖情况分析,该边坡变形破坏的演变过程可分为5个阶段,如图6所示:

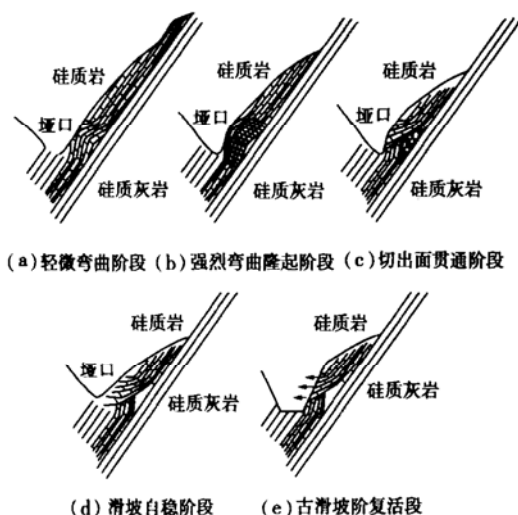


图6 古滑坡形成与复活的地质力学过程图示

Fig. 6 Illustration of failure process for the forming and reliving of the slope

(a) 轻微弯曲阶段: 弯曲部位仅出现顺层拉裂面、局部压碎,坡面轻微隆起,岩体松动。

(b) 强烈弯曲隆起阶段: 弯曲显著增强,并出现剖面X型错动,其中一组逐渐发展为滑移切出面。由于弯曲部位岩体强烈扩容,地面显著隆起,岩体松动加

剧,往往出现局部的崩落或滑落,这种坡脚附近的“卸载”也更加促进了深部的变形与破坏。

(c) 切出面贯通阶段: 滑移面贯通并发展为滑坡,具崩滑特性,有的表现为滑塌式滑坡。

(d) 滑坡自稳阶段: 由于滑移-弯曲变形所形成的滑坡在下滑过程中,受垭口的底部的自然地形的约束而停止滑动,进入自然稳定阶段,即该垭口的左侧斜坡存在一个古滑坡。

(e) 古滑坡的复活阶段: 由于公路路线穿过垭口,需进行路堑开挖,重新为古滑坡提供了下滑空间,在一定条件下,古滑坡进入复活阶段,导致在路堑开挖中出现左侧边坡重新变形破坏。

4 边坡开挖的数值模拟

在对该边坡破坏过程和机制定性分析的基础上,为了进一步解释开挖中坡体破坏现象、评价按目前坡比开挖后边坡的稳定性,并为边坡整治设计提供计算依据,需要通过数值模拟计算来进行边坡力学过程的定量分析。根据边坡岩体条件,我们采用了国际通用离散元程序 UDEC 对此进行了开挖模拟^[5]。

4.1 计算模型设计

在确定计算模型时考虑以下条件:

(a) 根据原始山体坡面形成初始应力场。

(b) 两个圆弧形切层滑面在开挖前就已形成,位置据现场勘测和钻孔资料确定。

(c) 开挖之前的原始山体是稳定的。

(d) 第一次陡开挖上部出现裂缝一滑动。

(e) 第二次开挖继续滑动——拱肋护坡破坏。

(f) 硅质岩和泥岩由于节理和层理均很发育,视为均质体,内含2个滑面。

(g) 底部主滑面决定了边坡的整体稳定性,顶部次生滑面则对中上部边坡的稳定性(如拱肋护坡)有直接的影响。

考虑上述条件和开挖顺序,建立了离散元模型如图7所示。考虑到底部硅质灰岩不会滑动,而忽略其间的层理面。滑体采用摩尔-库仑模型,滑面和节理面则采用库仑滑动模型。块体采用可充分变形模型,差分网格如图8所示。共划分单元9272个,节点5074个。

在形成初始应力场后,岩体中滑面没有滑动,没有屈服区。据此,模拟形成的边坡开挖前的自重应力场如图9所示。

根据试验结果和反分析,确定上下两个滑面的强度参数。顶部滑面: $c = 500 \text{ Pa}$, $\varphi = 15^\circ$, 底滑面: $c = 800 \text{ Pa}$, $\varphi = 20^\circ$ 。

迭代时步是根据块体的刚度、结构面的刚度以及

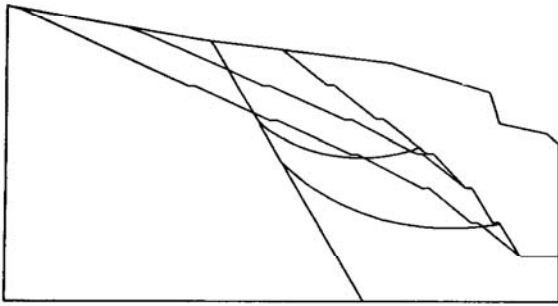


图 7 边坡的离散元模型

Fig. 7 The discrete element model of the slope

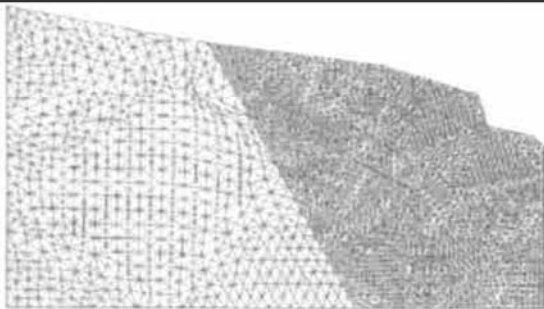


图 8 差分网格的划分

Fig. 8 The partition of the difference grid

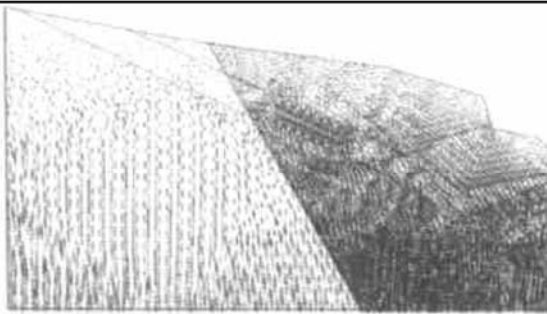


图 9 初始自重应力场

Fig. 9 The initial gravitational field of the slope

阻尼决定的,在计算中采用的是 UDEC 默认的保证计算稳定的时步。关注的是边坡的变形演化和破坏模式,计算时步迭代到变形体破坏(滑移)为止。

4.2 开挖模拟结果分析

(1) 按原设计开挖(1:0.5~1:1.0)

当边坡按原设计开挖后,由于原有的滑面被揭露出来,滑体开始滑动,边坡的变形如图 10 所示,图中所示为各节点的位移矢量,最大位移为 2.93 m,位于滑面前端。滑体的位移矢量基本是沿基岩面或与其近似平行,然后即沿滑面方向,证实边坡的变形破坏机制与野外所见的迹象是吻合的。在边坡顶部出现拉裂缝,下滑了 32 cm,位置和量值与实际也是接近的。

在坡面上设置了一些水平位移的监测点,用来考察坡面的变形,如图 11 所示为典型测点的水平位移变化,可见在显著滑动以后,变形依然在发展。

(2) 按第一次变更设计开挖(1:0.5~1:1.75)

在按原设计开挖后,边坡上部出现拉裂缝后,设计

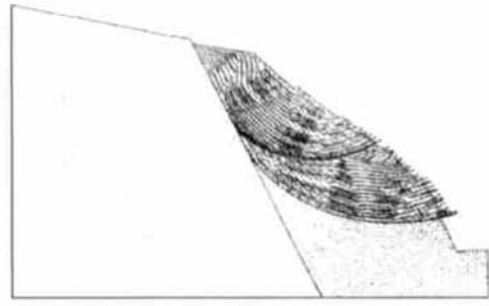


图 10 按原设计开挖后的坡体位移

Fig. 10 The displacement of the slope excavated according to the original design

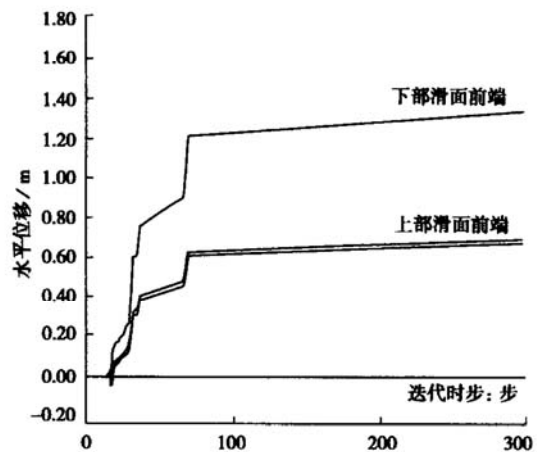


图 11 按原设计开挖后的水平位移的变化

Fig. 11 The time history curve of horizontal displacement after excavation

单位对开挖坡比作了调整,并在边坡的中上部设置了拱肋护坡,结果遭到了较为严重的破坏,见图 4。

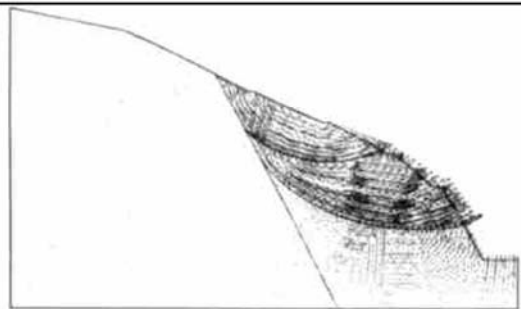


图 12 按第一次变更设计开挖后的坡体位移

Fig. 12 The displacement of the slope excavated according to the first alteration of design

模拟计算表明,开挖后边坡的位移如图 12 所示,和第一步开挖相比有所减小,但最大位移仍有 1.75 m,坡顶也出现了拉裂缝,深度 22 cm。如此大的边坡变形,自然会引起拱肋护坡的破坏。虽然边坡的变形发展有所减缓,但是变形曲线仍呈增长态势,边坡还不稳定。分析表明,虽然第二次开挖已经卸掉一部分滑体荷载,但由于古滑面的存在,滑体仍有一定的方量,足以促使其滑动。

(3) 按第二次变更设计开挖(1:1~1:1.75)

