

文章编号: 1006 - 2106(2012) 05 - 0006 - 05

泥灰岩边坡倾倒变形机理及处治措施^{*}

林 葵^{**}

(中国土木工程集团有限公司, 北京 100038)

摘要: 研究目的: 在阿尔及利亚东西高速公路建设期间, 多处泥灰岩边坡发生倾倒变形, 甚至转化成滑坡, 对项目进程造成了重大不利影响, 必须研究倾倒变形边坡的机理, 分析其稳定性进而实施治理, 或在倾倒变形之前实施预加固工程, 保证边坡的稳定。

研究结论: (1) 边坡变形破坏方式受控于边坡本身的内部结构、物理力学性质与外界因素的作用。(2) 查明边坡体变形破坏机理和各个不同演化阶段的变形破坏及稳定性程度, 针对所处的发展阶段, 提出合理的边坡治理措施。(3) 治理工程中考虑土方减载、材料置换、锚固、支挡和排水工程等多方案的组合, 选择综合性的治理方案。

关键词: 泥灰岩; 软质岩; 边坡; 倾倒变形; 机理; 处治

中图分类号: U416. 13 **文献标识码:** A

Mechanism for Toppling Deformation and Treatment Measures of Marlite Slope

LIN Kui

(China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Research purposes: During the realization of Algeria East - West Highway Project, toppling deformation of marlite slope was observed in several places and some slopes were even transformed into landslide, which was unfavorable for project advancement. In this case, it is necessary to research on the mechanism of toppled and deformed slopes and to study their stability, in order to proceed to treatment or pre - consolidation before toppling deformation.

Research conclusions: (1) Deformation failure mode of the slope is dependent on the inner structure of slope, the physic - mechanical properties and outsider factors; (2) Studies on mechanism of the slope deformation failure and on slope deformation failure and stability at every different evolution stage are necessary for proposing proper slope treatment measures in accordance with its development stage; (3) Comprehensive treatment proposition, which combines several propositions such as earthwork reliving, materials replacement, anchorage, retaining and drainage etc., could be taken into consideration during the treatment.

Key words: marlite; soft rock; slope; toppling deformation; mechanism; treatment

倾倒变形破坏是山区高边坡变形的一种, 它虽不像崩塌、滑坡那样普遍, 但在自然界也是广泛分布的。工程建设中的倾倒变形危害十分严重, 故美国人瓦恩斯(D. Varnes) 1978 年在边坡变形分类中将倾倒单独

列为一类。在自然界河流和沟谷两岸, 由于河沟下切, 山坡侧向卸荷, 陡倾的中薄层软质岩层向临空面发生弯曲变形, 俗称“点头哈腰”, 较为常见, 但并未破坏; 当这种变形达到一定程度即会发生倾倒破坏, 转化为

^{*} 收稿日期: 2012 - 03 - 02

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研究开发课题项目(09 - 09C); 中国铁建股份有限公司科技开发课题项目(11 - 09C)

^{**} 作者简介: 林葵, 1967 年出生, 男, 高级工程师, 注册一级建造师。

崩塌或滑坡^[1],成为一种灾害。

1 工程概况

2008年~2009年,在建设阿尔及利亚东西高速公路期间,由于复杂多变的地质条件及特大降雨,M3标段6处反倾页片状泥灰岩边坡发生倾倒变形病害,一处由倾倒变形转化成滑坡,影响公路长度约1.9 km;根据工程地质类比,还有9处尚未开挖的反倾页片状泥灰岩边坡可能发生倾倒变形病害^[2-3]。发生在M3标段的倾倒变形边坡,其挖方坡率较缓,一般为1:1.5~1:2.0,岩性较软,倾角在35°~50°。本文主要以由倾倒变形转化为大型滑坡的PK 137+035~PK 137+420段边坡为例,对泥灰岩边坡倾倒变形机理及处治措施进行分析总结。

2 倾倒变形边坡的勘察

2.1 边坡的特征

该段边坡处于低山区,为脊状斜坡地形,坡面平顺,两侧冲沟发育,自然斜坡介于15°~30°,区域场地稳定,未发现影响场地稳定的不良动力地质作用。路线在此处以深挖方通过,中心最大挖深18.3 m,右侧挖方边坡最大高度40.24 m,属高边坡,岩层反倾,边坡面同层理面呈大角度相交。原设计对该段路堑边坡采用缓坡率、宽平台、坡面回填植灌,边坡分七级,分级高度8 m,坡率1:1.5,平台宽度为3.0 m,第三级设6.0 m的宽平台,边坡平台设8%向内横坡以加强排水。

该段边坡于2008年7月开始施工,10月中旬基本成型,11月16日发现局部坡面开裂变形,22日裂缝迅速发展并延伸至坡口,24日已达坡口以外120 m处;随着降雨的影响,裂缝继续向上游发展,12月13日发现在现有裂缝外侧5 m处新出现一条长6 m的裂缝。同时,反坡台坎高差进一步加大,最大高差已接近1.4 m;坡口外侧最大变形水平方向为3.23 m,垂直方向为1.41 m。2008年12月12日发现坡脚外侧3 m路基处出现隆起,最大高度约为15 cm,13日最大高度已达50 cm,同时出现剪出口、伴有泉眼,表明此倾倒变形边坡已演变成为滑坡。

2.2 滑坡综合勘察

鉴于该段边坡已发展为滑坡,原设计已不能满足边坡稳定的要求,必须变更设计,进行补充勘察,采用了包括工程地质调绘、钻探、挖探、高密度电法勘探、简易孔内测斜、水文地质观测、地表位移监测、实验室试验等多种手段相结合的综合勘察方法^[4-5]。

PK 137滑坡是一个由于工程开挖导致坡体倾倒

变形逐渐演化并形成的一个大型滑坡体,正处于极限平衡状态。滑坡沿线路长250 m、垂直路线长235.1 m,滑体平均厚度约为10 m,总方量为60万m³,为大型岩质滑坡。滑体主要由岩块或碎石组成,成分为强风化或弱风化页片状泥灰岩;滑面(带)为含角砾的黏性土,软塑、流塑状,厚度不大于20 mm,没有明显的擦痕。

根据斜坡不同部位的变形特征,可分为以下四个区域:(1)滑坡前缘,主要指开挖坡脚至滑坡前缘剪出口,地面鼓胀不断增高,同时出现泉水,推挤变形显著;(2)推挤滑移变形区,主要指一级坡面及部分二级坡面,坡体有明显鼓胀,坡面有小范围浅层滑移,发育小型倾倒裂缝,裂缝高度通常不足100 mm,局部呈“V”字形组合,推挤变形特征显著;(3)推挤滑移挤压区,主要指二级坡面以上至坡口线之间的坡体区域,为滑体的主体,也是滑坡体变形最为剧烈的段落,可见裂缝上下盘最大高差1.8 m,钻探揭露有明显的软弱结构面及富水、集水段落;(4)倾倒变形区,主要指坡口线以上区域,沿山脊线纵向坡比小于1:7,坡体变形以一系列平行发育的反坡台坎为特征,台坎高度一般在0.1~0.4 m之间,倾角为60°~70°。

该边坡开挖后发生倾倒变形并发展成为滑坡,是多种因素作用的结果。首先,该边坡靠近布那什背斜轴部,地应力集中,且受到F3断裂带的影响,岩体破碎,层间错动带发育;其次,边坡开挖后,地应力释放,卸荷松弛,引起了软弱岩层卸荷开裂;第三,为了减少支挡加固工程,边坡按照坡率1:1.5进行放坡,坡率较缓,增大了受水面积,加之开挖后适逢雨季,降雨量较大,边坡未及时防护,截水沟和边坡排水不及时,使得大量雨水渗入坡体,既软化岩体,又增加一定的静水压力,导致岩体发生倾倒变形;最后,地下水的作用又使得倾倒变形沿节理或剪切面转化为滑坡。

2.3 倾倒变形破坏过程及机理分析

泥灰岩人工边坡倾倒变形破坏模式一般呈现开挖、弯曲变形、层面分离或弯曲、倾倒、折断、剧烈倾倒的变形阶段,部分边坡由于构造作用或发育有顺层结构面,则随着时间推移可能由倾倒变形转化为滑移变形,形成倾倒—滑移体。总体上倾倒变形破坏过程及机理如图1所示过程:(a)原始完整岩体;(b)自然历史时期少许弯曲变形;(c)坡体前沿开挖,应力调整,产生二次应力场,坡脚应力增大;(d)在自重作用下岩层向临空面产生较大弯矩,坡体前部顶端沿层面分离;(e)坡体内部顺坡向裂隙大面积形成;(f)由于持续降雨入渗导致内部裂隙贯通形成滑坡。

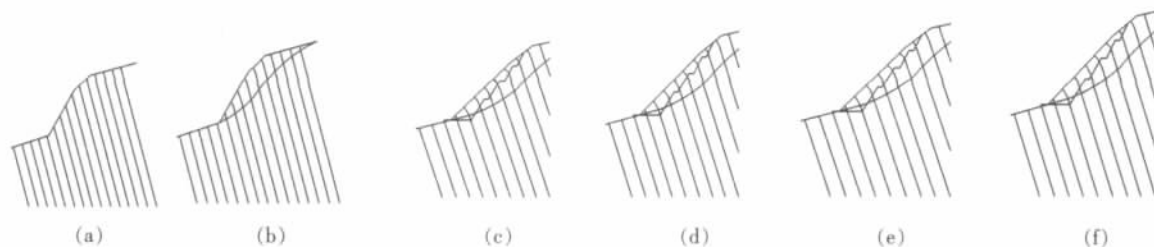


图1 倾倒变形破坏过程及机理图

边坡开挖后,造成坡脚应力集中,坡脚岩体发生压缩变形,同时,边坡上部岩体在自重弯矩作用下向坡外产生弯曲变形;在物理风化作用和地表水、地下水的综合作用下,岩体发生软化、崩解,边坡坡脚受水浸泡进一步压缩变形,边坡上部岩体在自重应力下进一步弯曲变形,岩层沿层面出现分离,坡体上出现裂缝或反坡台坎;在风化和水的作用下,岩体软化为类土体,倾倒变形进一步加剧,变形体在最大弯折带处折断,形成断续拉裂面;部分倾倒变形边坡由于构造作用强烈,岩体内发育多组不连续顺倾结构面,当顺倾结构面和断续拉裂面完全贯通时,倾倒变形转化为滑坡。

3 滑坡的处治措施

倾倒变形边坡治理主要有四类:一是坡率法,改变坡体形态,调整应力分布,即刷方减载;二是材料置换,将坡体内物理力学性质较差的材料用物理力学性质较优良的材料置换,以改善坡体物质结构,增强坡体物质强度,以提高坡体稳定性,此类方法以欧洲(法国)应用较为广泛的重力罩面为代表;三是锚固措施,通过锚固工程将不稳定的坡体锚固到稳定的岩土体上,以提高其稳定性,同时锚固工程对改善坡体机构也提供着一定的积极贡献,以预应力锚索加固为代表;四是支挡措施,通过强有力的支挡来提高坡体的稳定性,以重力式挡土墙和抗滑桩为代表。

为减弱地表水和地下水对边坡稳定性的影响,排水工程作为主要的辅助治理措施,作用不可忽视,但其工程造价却比支挡工程的造价低很多,故为在边坡加固中应优先考虑的工程措施。此外,除加强排水外,还修筑坡面防护工程,如植草护坡、骨架护坡、浆砌片护坡等,以保证边坡的稳定,提高抵抗水害的能力。

3.1 滑坡治理的方案

从滑坡变形过程分析可以得出,该滑坡是由倾倒变形开始,雨水下渗软化结构面而形成滑坡,所以尽管整个坡体比较稳定,岩层呈有利的反倾,还是发生了不可预测的倾倒变形并形成滑坡。由于不存在绕避的条件,所以只能考虑支挡方案,基于本段滑坡的工程地质

条件及其形成条件,处治方案首先需要清除松动带,再解决新鲜岩层的倾倒变形和防水问题,根据这一思路,初步拟定锚杆框架方案、微型桩、钢筋混凝土桩和重力罩面等以下四种处置方案。

3.1.1 锚杆框架方案

鉴于要清除滑坡体和倾倒变形体,坡脚设置 22 m 宽的破碎台,然后分级刷坡,边坡共分 8 级,分级高度为 8 m,一至七级坡率采用 $2H:1V$,并设置锚杆支护,第八级边坡坡率放缓至 $(2.5 \sim 3)H:1V$ 。采用植灌防护,一般平台宽度为 3.0 m,每三级设置一个宽平台,平台宽度为 6 m,边坡平台设 8% 向外横坡加强排水。如图 2 所示。

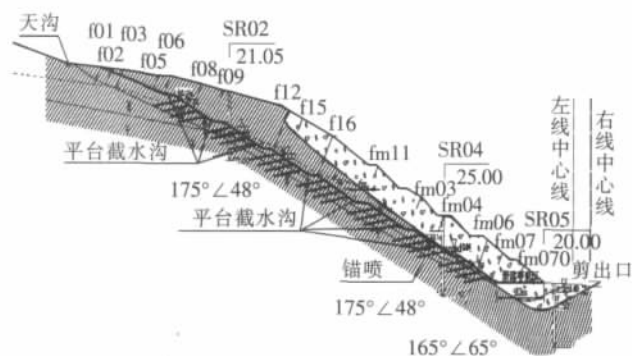


图2 锚杆框架方案图

通过稳定性分析,一般状况下的安全系数 $F = 1.21 > 1$,地震工况下的安全系数 $F = 1.02 > 1$,满足治理要求。主要治理工程数量如下:土方 294 551.8 m^3 ,锚杆 40 179 m,平台截水沟 2 266.6 m,坡顶截水沟 670 m。

3.1.2 微型桩方案

鉴于要清除滑坡体和倾倒变形体,坡脚设置 15 m 宽碎落台,1-3 级坡高 6 m,坡率 $1H:1V$,一至三级边坡平台处设置微型桩支挡,坡面设置混凝土框架防护。三级以上坡高每 8 m 分级,边坡坡率 $2H:1V$ 。采用锚杆框架防护,最高级边坡放缓至 $(2.5 \sim 3)H:1V$,采用植灌木防护。边坡平台内侧设置等边三角形混凝土平台排水沟。如图 3 所示。

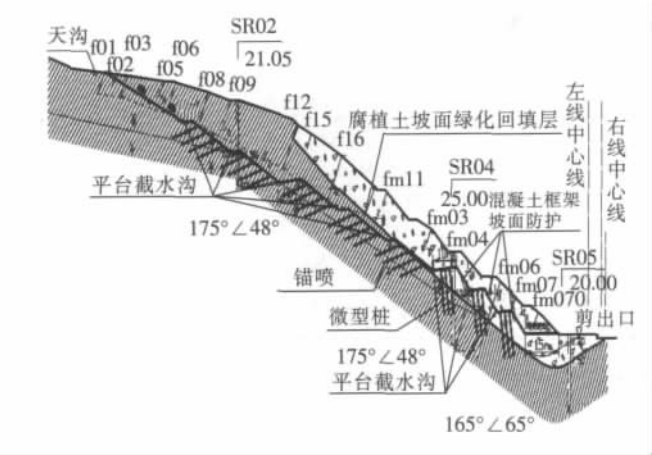


图 3 微型桩方案图

通过稳定性分析,一般状况下的安全系数 $F = 1.41 > 1$,地震工况下的安全系数 $F = 1.17 > 1$,满足治理要求。主要治理工程数量如下:土方 219 953.8 m³,锚杆 24 771 m,微型桩 45 360 m,平台截水沟 2 310 m,坡顶截水沟 650 m。

3.1.3 钢筋混凝土桩方案

坡脚设置 18 m 宽碎落台,边坡共分七级,分级高度为 8 m,第一级坡率 1H:1V,平台设置抗滑桩支挡,抗滑桩桩径为 1.2 m,桩间距为 2.4 m。二至六级坡率为 2H:1V,并设置锚杆支护。第七级边坡放缓至(2.5~3)H:1V,采用植灌防护。一般平台宽度为 3 m,在第一、四级设置一个宽平台,平台宽度为 6 m,边坡平台设 8% 向外横坡加强排水。如图 4 所示。

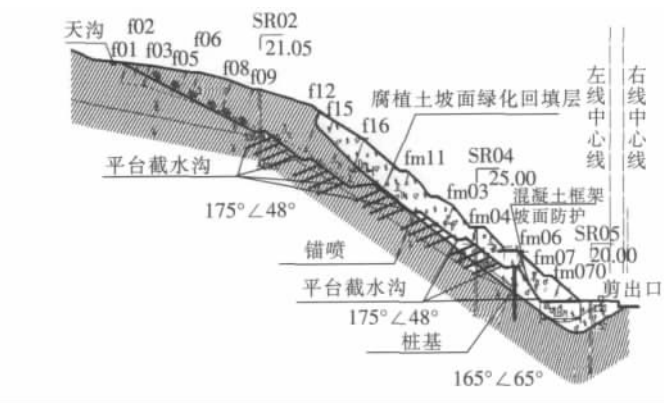


图 4 钢筋混凝土桩方案图

通过稳定性分析,一般状况下的安全系数 $F = 1.43 > 1$,地震工况下的安全系数 $F = 1.2 > 1$,满足治理要求。主要治理工程数量如下:土方 201 786 m³,锚杆 20 644 m,平台截水沟 1 740 m,坡顶截水沟 660 m,直径 1.2 m 钢筋混凝土桩长 1 086 m。

3.1.4 重力罩面方案

清除滑坡体和倾倒变形体,同时对临时边坡进行临时锚杆支护,锚杆长度依据临时边坡稳定状况采用 2~4 m,并在后侧山坡的临时锚杆之间开挖台坎,在坡脚设置防滑铲,并铺设土工布。然后自下而上按照 1H:2V、1H:2V、1H:2V、1H:2.5V 的边坡坡率回填重力罩面材料,重力罩面材料采用 GNT(未处理碎石),大块片石,TVO(未处理砂砾)等。重力罩面上部清方采用 1H:2.5V 的边坡坡率,对于地形较平缓路段采用清方的处理方案,边坡坡率为 1H:3V,并采用植灌防护。平台宽度为 3.0 m,设 8% 向外横坡加强排水。如图 5 所示。

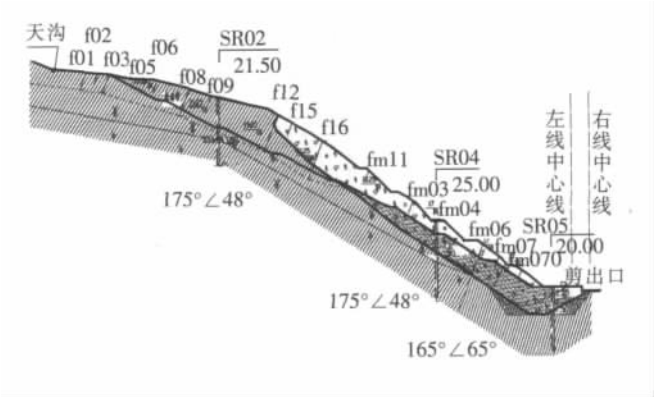


图 5 重力罩面方案图

重力罩面材料参数采用重度 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ 、粘聚力 $c = 5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 38^\circ$,通过稳定性分析,一般状况下的安全系数 $F = 1.96 > 1.5$,地震工况下的安全系数 $F = 1.33 > 1.2$,满足治理要求。主要治理工程数量如下:土方 329 340 m³,临时锚杆 3 200 m,重力罩面 56 680 m,平台截水沟 1 496 m,坡顶截水沟 720 m。

3.2 滑坡治理方案比选

各种滑坡治理方案比选如表 1 所示。

表 1 滑坡处治方案优缺点一览表

治理方案	优点	缺点
锚杆框架	结构受力合理,施工简单,造价低,框架内植灌,治理后坡面比较美观	土石方数量大,钢筋混凝土框架梁体施工需要刻槽现浇,工艺相对复杂,人工相对较多
微型桩	由于微型桩群能够支挡部分滑体的推力,土石方数量相对较小	微型桩群施工复杂,施工进度相对较慢,工程造价相对较高

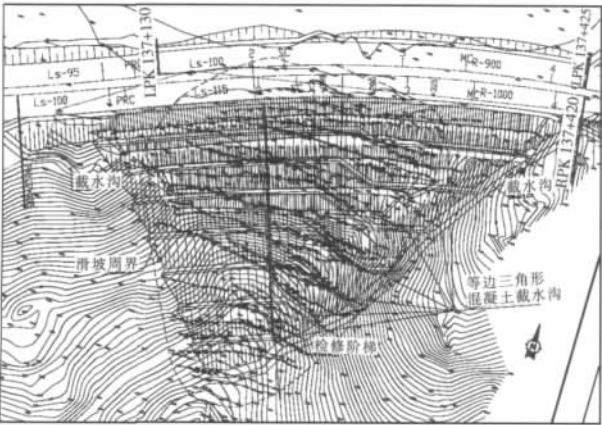
续表 1 滑坡处治方案优缺点一览表

治理方案	优点	缺点
钢筋混凝土桩	由于抗滑桩能够支挡部分滑体的推力,土石方数量相对较小,抗滑桩施工设备简单,工艺、技术成熟,施工进度快	施工需要施工平台较大,造价最高,施工抗滑桩时对岩体存在扰动,若桩间距离不合适,无法形成土拱效应,从而影响支挡效果,另外,从抗倾倒变形的角度来说,抗滑桩外侧坡体仍有可能发生变形
重力罩面	施工工艺简单;施工完毕后不改变坡面原始形态,外形较美观;若实施了坡面绿化,与周围环境相协调,是一种较环保的治理方案	存在土石方工程量较大的问题,需要大量粗颗粒罩面材料,需加强临时支护,施工工序繁杂等

以上四种方案(表 1) 皆能较好地解决和预防倾倒变形边坡问题,但结合现场施工设备和工艺,考虑工期的限制,采用重力罩面防护、清方、临时锚杆加固与截排水相结合的治理方案。

3.3 滑坡治理施工

清除松动变形体,临时开挖坡面采用临时锚杆支护,锚杆长度依据临时边坡稳定状况采用 2~4 m,并在后侧山坡的临时锚杆之间开挖台坎,在坡脚设置防滑铲、铺设土工布。自下而上按照 1H:2V、1H:2V、1H:2V、1H:2.5V 回填 GNT(未处理碎石)、大块片石、TVO(未处理砂砾)等重力罩面材料。四级边坡以上按 1H:(2.5~3.0)V 刷方,设置支撑渗沟和坡面植灌进行防护,支撑渗沟间距 6~8 m,宽度 0.8 m,支撑渗沟的水通过第四级平台排水沟下设置的盲沟排出。每级边坡平台宽度 3 m,平台设置排水沟,同时设 8% 向外横坡加强排水,边坡坡口线以外 5~10 m 设置截水沟一道,坡脚设置路基边沟和纵向盲沟,形成综合排水系统。由于雨季边坡出现大量地下渗水,为防止地下水对边坡产生影响,所以在滑坡上方 20 m 以外增设一条盲沟进行地下水的拦截。为便于运营期间养护,在坡面设置检修阶梯 2~3 道。治理工程平面图如图 6 所示,断面图如图 5 所示。



- Soil and Applications [J]. Applied Mathematics and Mechanics 2001(1):93-103.
- [3] 殷宗泽, 凌华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. 岩土工程学报 2007(5):1-5.
- Yin Zongze, Ling Hua. Simplified Computation of 1D Consolidation for Partially Saturated Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007(5):1-5.
- [4] 杨代泉. 非饱和土二维广义固结非线性数值模型[J]. 岩土工程学报 1992(S1):122-126.
- Yang Daiquan. Nonlinear Numerical Model of Two-dimensional Generalized Consolidation of Unsaturated Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992(S1):122-126.
- [5] 陈正汉. 非饱和土研究的新进展[C]//中加非饱和土学术研讨会论文集, 1994.
- Chen Zhenghan. Recent Advances in Unsaturated Soils [C]//Chinese and Canada Memoir on Unsaturated Soils, 1994.
- [6] 陈孙文, 王炳辉. 饱和土与非饱和土固结理论及有效应力原理浅谈[J]. 中国水运 2007(10):104-105.
- Chen Sunwen, Wang Binghui. Consolidation Theory and Principle of Effective Stress of Saturated Soil and Unsaturated Soil [J]. China Water Transport, 2007(10):104-105.
- [7] 徐永福, 傅德明. 非饱和土结构强度的研究[J]. 工程力学, 1999(4):73-77.
- Xu Yongfu, Fu Deming. Study on the Structural Strength of Unsaturated Soils [J]. Engineering Mechanics, 1999(4):73-77.
- [8] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学 2007(9):1931-1936.
- Lin Hongzhou, Li Guangxin, Yu Yuzhen, etc. Influence of Matric Suction on Shear Strength Behavior of Unsaturated Soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(9):1931-1936.
- [9] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50007—2002, Code for Design of Building [S].
- [10] 王光勇. 武广客运专线路基沉降监测系统与沉降预测[J]. 铁道工程学报 2009(5):5-7.
- Wang Guangyong. Subsidence Monitoring System and Subsidence Prediction for the Subgrade of Wuhan - Guangzhou Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society 2009(5):5-7.

(上接第10页)

坡体变形破坏机理和各个不同演化阶段的变形破坏及稳定性程度,针对边坡的变形破坏机理和所处的发展阶段,提出合理的治理措施。

(4) 在大型复杂的倾倒变形边坡治理工程中,需要考虑刷方减载、材料置换、锚固、支挡和排水工程等多方案的组合,选择综合性的治理方案,如本案例中的重力罩面+坡率法+截排水等,这样才能取得良好的治理效果。

参考文献:

- [1] 丁小军, 刘卫民, 王佐, 等. 软质岩边坡倾倒变形机理及处治工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Ding Xiaojun, Liu Weimin, Wang Zuo, etc. Mechanism for Toppling Deformation and Treatment Engineering Examples of Soft Rock Slope [M]. Beijing: China Communications Press 2011.
- [2] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 阿尔及利亚东西高速公路 M3 标段 PK137+035-PK137+420 段倾倒变形边坡工程地质勘察报告[R]. 西安: 中交第一公路勘察设计院有限公司, 2009.
- CCCC First Highway Consultants Co. Ltd. Engineering Geological Investigation Report on Toppling Deformation Slope of Lot M3 PK137+035-PK137+420 Algeria East-West Highway Project [R]. Xi'an: CCCC First Highway Consultants Co. Ltd 2009.
- [3] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 阿尔及利亚东西高速公路 M3 标段 PK137+035-PK137+420 段倾倒变形边坡处治工程报告[R]. 西安: 中交第一公路勘察设计院有限公司, 2009.
- CCCC First Highway Consultants Co. Ltd. Treatment Design Report on Toppling Deformation Slope of Lot M3 PK137+035-PK137+420 Algeria East-West Highway Project [R]. Xi'an: CCCC First Highway Consultants Co. Ltd 2009.
- [4] 韩信. 阿尔及利亚东西高速公路工程地质勘察研究[J]. 铁道工程学报 2012(1):11-16.
- Han Xin. Research on Engineering Geologic Investigation of Algeria East-West Highway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(1):11-16.
- [5] 韩信. 中欧(法)岩土工程标准规范体系差异研究[J]. 铁道工程学报 2011(11):117-121.
- Han Xin. Research on Differences between Chinese and European(French) Standard Systems for Geotechnical Engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(11):117-121.