

川藏公路典型溜砂坡形成机理与整治

阙云¹, 王成华², 张小刚²

(1. 重庆交通学院河海建筑工程系, 重庆 400074; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:溜砂坡是指高陡斜坡在风化作用下形成的砂粒和碎屑, 在重力作用下发生溜动, 并在坡脚堆积形成锥状斜坡。作为一种较常见的山地灾害, 溜砂坡常对公路、铁路等线路工程构成极大的危害。本文以川藏公路中坝段 K3930+ 300~ K3930+ 493 溜砂坡为例, 通过野外现场试验和室内试验, 研究溜砂坡的形成机理、演化规律, 并提出了可供实施的整治方案, 对整个中坝段溜砂坡整治工程具有重要的指导意义。

关键词:溜砂坡; 形成机理; 整治

中图分类号: P64, P694

文献标识码: A

川藏公路中坝段位于西藏波密县境内, 其间沿线山地灾害繁多, 尤其以溜砂坡、水毁为甚。^[1, 2]以溜砂坡为例, 在仅 26 km 的路段内有 18 处, 危害公路长度达 14.9 km。且灾害发生十分频繁, 每年都有较多的砂、石碎屑(块)通过低矮挡砂墙进入公路, 阻车、毁车以及砸伤行人现象时有发生, 严重影响正常的交通运营, 长期困扰西藏公路“三纵两横六通道”的发展, 对全区社会稳定、经济发展、巩固边防都有极大影响。为了比较客观地分析该段公路溜砂坡形成机理, 为防治提供依据, 本文以中坝段 K3930+ 300~ K3930+ 493 溜砂坡为示范区, 进行分析、防治研究。该溜砂坡的研究成果在整个中坝段溜砂坡整治中具有典型意义。

1 示范区的自然地质环境概况^[3]

1.1 地形特征

示范区处于川、青、藏“歹”字型构造的头部, 属藏东南高山深谷区。雅鲁藏布江的支流帕隆藏布江由南东东向北西西流经本区, 河谷海拔 3 281 m, 两岸岸坡十分陡峻, 平均坡度 $> 45^\circ$ 。斜坡中、上部为岩层裸露急陡坡、陡崖, 坡度 $50^\circ \sim 70^\circ$; 中、下部为溜

砂堆积坡, 坡度 $34^\circ \sim 39^\circ$; 河床边有少量冲洪积砂砾石缓坡滩地。

1.2 地层岩性

示范区地层岩性单一, 岸坡中、上部基岩以燕山期晚期中—酸性黑云母花岗岩为主, 两侧分布少量泥盆系变质砂板岩;^[4]中、下部基岩多为溜砂、坡崩积或冲洪积块碎石覆盖, 厚度在 10~ 15 m。

1.3 气候及植被特性

示范区属藏东南湿润区内的河谷半干燥气候, 年降雨量大多在 500~ 700 mm 以下, 河谷地区冬无严寒, 夏无酷热, 适宜植被生长。区内植被总体较好, 以高山松、灌丛、草为主。植被覆盖率 $> 70\%$, 除高山岩石裸露区、溜砂坡强烈活动区无植被覆盖外, 其余均有植被覆盖。

2 示范区溜砂坡形成机理

2.1 溜砂坡形成条件分析

2.1.1 地形条件

示范区为南东东—北西西走向的深切河谷地形, 相对高差 800~ 1 500 m, 平均坡度为 45° 左右, 斜坡中、上部为急陡坡、陡崖, 坡度 $50^\circ \sim 70^\circ$, 下部为

收稿日期(Received date): 2003- 03- 10; 改回日期(Accepted): 2003- 06- 18。

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新项目“进藏公路铁路典型路段工程减灾理论与对策研究”资助, 项目编号 KZCX2- 306。

[This item supported by mitigation theory and control in typical section of highways and railways to Tibet, (NO. KZCX2- 306), The Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences.]

作者简介(Biography): 阙云(1980-), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要从事滑坡、水工结构研究。[Que Yun(1980-), male, bom in Jiangxi province, graduate, major in research of Landslides and Hydraulic structures. E-mail: queyun_2001@163.net]

38°~ 40°左右,具备了溜砂坡形成的地形条件。

2. 1. 2 物质条件

示范区斜坡中、上部陡崖主要为燕山期晚期黑云母花岗岩,易风化。西侧下部和东侧有少量泥盆系晚期中统变质砂板岩分布。虽无明显断裂直接作用,但受南北深大断裂的夹击,岩体的节理裂隙仍较发育。以上的岩性特征,无疑为溜砂坡的形成奠定了物质基础。

2. 1. 3 溜砂的诱发因素

- 溜砂的诱发因素主要有以下 4 类:
1. 特大洪水冲刷砂坡脚,引起已趋稳定的溜砂坡重新活动。示范区溜砂坡的重新活动便是 1988 年米堆沟冰湖溃决产生的特大洪水冲刷而引起的。
 2. 切坡不当,由于修建公路过程中在坡脚开挖路堑,破坏了砂坡的平衡而引起砂坡溜砂。
 3. 人为和牲畜破坏砂坡表层植被,导致植被减少而引起砂坡上的砂粒溜动。
 4. 气候和环境往往是引起溜砂的一项无可奈何的因素,如暴雨、地震、风雪、汽车行驶产生的振动等都可增加砂粒的下溜力。

2 2 砂坡特性

2. 2. 1 砂坡地形特性

溜砂坡下部公路内侧已有 3~ 5 m 高的挡砂墙,其上砂坡直抵斜坡中、上部花岗岩陡崖脚。相对高差 200 m 左右,砂坡的天然堆积坡度 34°~ 39°,坡

上有东、西两个溜砂槽,砂槽上部的细颗粒和碎屑现已基本溜失完毕,坡面上残留大块石,基岩风化面有的已出露。砂坡上部至陡岩脚的坡度略大于砂坡坡度,为 45°左右。

2. 2. 2 砂坡组成结构与物理力学特性

1. 砂坡的矿物组成与粒度成分
砂坡矿物由黑云母花岗岩强风化的石英、云母、长石、辉石、角闪石等砂粒、碎屑和砾石组成。根据试坑采样试验,砂坡上部粒度较细,以中、粗砂为主,夹少量细砂粉粒;中部以粗砂、细砾为主,夹少量细碎石;下部以粗砂、细砾为主,有较多砾、碎石,少量块石。砂样的级配试验参数见表 1。
2. 砂坡内部结构
根据砂坡中、下部探槽揭露,顺坡面有似层理结构特性。表明砂坡的活动有多期性,顺坡面的 4 条似层理说明在最后一期的砂坡堆积有四次,每堆积一次都留下带形痕迹。砂坡内颗粒间基本无胶结物,十分松散。

3. 砂坡的物理力学特性
在砂坡上、中、下部采集了 3 个砂样在室内进行物理、力学试验,试验数据见表 2。
从表 2 可以看出:此溜砂坡的抗剪强度较高,天然状态的 φ 值约为 38°,且在天然状态、烘干状态差异不大,并与砂粒的粗细无显著关系,与砂坡的天然休止角接近,但在饱和状态下 φ 值与砂粒的粗细

表 1 溜砂坡砂样级配试验(重量百分比)^[3]
Table 1 Grain composition of sand-sliding slopes

野 外 编 号	室 内 编 号	实验室命名	> 2 (mm)	2~ 0.5 (mm)	0.5~ 0.25 (mm)	0.25~ 0.074 (mm)	0.074~ 0.05 (mm)	0.05~ 0.01 (mm)	< 0.01 (mm)
1# 砂样	1	中砂	11.6	22.7	51.5	13.3	0.3	0.2	0.4
2# 砂样	2	粗砂	19.6	51.4	22.3	6.2	0.2	0.1	0.2
3# 砂样	3	角砾	95.0	4.8	0.1	0.1			

表 2 溜砂坡砂土抗剪性质试验
Table 2 Anti-shearing properties of sandy soil of sand-sliding slopes

野 外 编 号	室 内 编 号	实验室 命名	天然状态快剪			烘干状态快剪			饱和后快剪		
			含水量	φ	C	含水量	φ	C	含水量	φ	C
			w (%)	(°)	kPa	w (%)	(°)	kPa	w (%)	(°)	kPa
1# 砂样	1	中砂	1.3	37.8	1.7	0	39.0	3.0	23.7	27.8	1.0
2# 砂样	2	粗砂	1.4	38.4	3.0	0	38.5	5.0	22.5	32.6	1.0
3# 砂样	3	角砾	1.2	41.9	2.0	0	42.0	0	6.9	41.3	0.5

有显著关系,由此可看出含水量对 φ 值有较大影响;而 C 值总体较小,差异不大。

2.2.3 砂粒运动特性

1. 砂粒的起动条件

砂粒运动严格意义上属于三维问题,影响因素与运动机理非常复杂。出于数学、力学上简化的考虑,本文对于溜砂问题,作以下两点简化假设:假定溜砂运动为二维平面运动;砂粒为均质的球体,在平面坐标下简化为圆(图 1)。

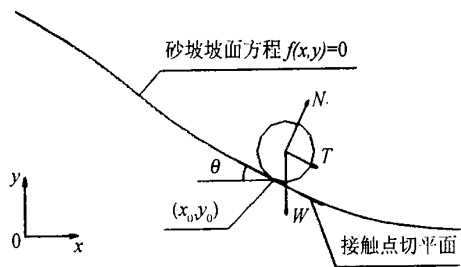


图 1 砂粒起动模型

Fig. 1 The threshold model of sand

设重量为 W 的松散砂粒位于砂坡表面,砂坡坡面形状已知,在平面坐标下坡面方程为 $f(x) = 0$,沿坡向下的切向分量 T 及与坡面垂直的法向分量 N 分别为

$$T = W \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$N = W \cdot \cos \theta \quad (2)$$

式中 θ 为砂粒与坡面接触点切平面与水平方向的夹角,大小为 $\tan^{-1} \left[\left| \frac{f'_x}{f'_y} \right|_{x_0, y_0} \right]$, f 为坡面方程。

设砂粒与砂坡面的接触面积为 S ,则在接触面上产生的剪应力及法向应力分别为

$$\tau = \frac{W}{S} \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{W}{S} \cdot \cos \theta \quad (4)$$

设砂粒内摩擦角为 φ ($C = 0$),根据 Mohr-coulumb 准则,抗剪强度 τ_f 为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi = \frac{W}{S} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi \quad (5)$$

当 $\tau \geq \tau_f$ 时,砂粒处于失稳状态

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\frac{W}{S} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\frac{W}{S} \cdot \sin \theta} = \cot \theta \tan \varphi \leq 1 \quad (6)$$

$$\text{即} \quad \theta \geq \varphi \quad (7)$$

由此说明砂粒的起动受控于其内摩擦角 φ 。对

于砂粒来说,其内摩擦角与砂坡的天然休止角一致,故砂粒的起动受控于砂坡的天然休止角,这与现场和室内模型试验得出的结论相符。

2. 砂粒的运动规律

单个砂粒在砂坡上的运动是由作用在其上的合力和合力矩决定,可以用颗粒内一点的线速度与角速度来描述。运动方程可由以下两组向量方程表示

$$F_i = m \ddot{s} \quad (8)$$

$$M_i = \dot{H}_i \quad (9)$$

式中 F_i 为作用于颗粒上的合力; m 为颗粒质量; \ddot{s} 为颗粒沿坡向加速度; M_i 为合力矩; \dot{H}_i 为角动量。

当局部坐标系与颗粒惯性主轴重合时,则可由 (9) 式得出欧拉运动方程

$$M_1 = I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3$$

$$M_2 = I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_3 \omega_1 \quad (10)$$

$$M_3 = I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2$$

式中 M_1, M_2, M_3 为合力矩对主轴的分量; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为颗粒角加速度; I_1, I_2, I_3 为颗粒主惯性矩。

2.2.4 砂坡的演变规律

从大环境分析溜砂坡的演化受到地壳运动的控制。当地壳运动处于强烈期,地表的风化很强烈时,所产生的砂粒相应地会很多,所以这个时期,溜砂坡的形成和发展也很强烈;当地壳运动处于微弱期,溜砂坡也就停止发展,慢慢趋于稳定,砂坡上逐渐长出植被。但当下一次地壳强烈活动期来临,溜砂坡又会重新活动起来,砂坡上的树、草会被溜砂毁坏、埋没。本溜砂坡正处于上次地壳强烈活动期的后期,已慢慢趋于稳定。此外,砂坡的演变还受控于砂坡的天然休止角,即砂坡的坡度小于此种砂的天然休止角,则此砂坡向稳定方向发展;相反,此砂坡的砂粒产生溜动。本溜砂坡的坡度大于砂坡的天然休止角,导致砂坡的砂粒还处于溜动状态。

3 整治工程

根据以上分析,针对本溜砂坡的特性,提出以下整治方案:

1. 公路内侧挡砂墙增高加固工程

根据溜砂坡的天然休止角计算,将现有挡砂墙加高至 6 m,使砂坡坡度减缓到 32° 以下。另外用喷锚支护方案加固墙体,采用 2 排 R32S 自钻式锚杆,长度为 5 m,水平、垂直间距均为 3 m,呈梅花型布

置。外加 $\phi 8@200 \times 200$ mm 钢筋网,喷射 10 cm 厚 C_{20} 混凝土。

2. 砂坡面块(碎)石滚动、跳跃灾害防治工程
在挡砂墙内侧设置 2 m 高的钢栅,挂柔性防护网,防护长度 150 m 左右。

3. 砂坡固砂治理工程

根据溜砂坡的特性与现场观察试验,采用格梁、锚杆及花管微型桩加土工网植草固砂护坡。格梁呈“井”字型排列,梁为 C_{25} 钢筋混凝土结构,截面尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,纵、横梁间距为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,交叉处用 R32S 自钻式锚杆加固,锚杆长 6 m。

4 结论与建议

1. 本溜砂坡形成于历史上某个地壳运动的活跃期,其物质来源是后壁的易风化的燕山期晚期黑云母花岗岩。洪水冲刷砂坡脚,加上川藏公路的修建、扩建过程中,开挖砂坡脚而引起砂坡重新复活,产生溜砂,危害公路的正常运行。

2. 本溜砂坡属牵引式溜动的砂坡,具有从下而上,由表及里的运动特性,属于原地产砂,后方补给砂量很少。

3. 砂粒的起动受控于砂坡的天然休止角。当砂坡的坡度大于其天然休止角,就会产生溜砂,反之,砂坡就趋于稳定。

4. 溜砂坡的最终治理离不开生物工程措施,但它需在砂坡基本停止溜砂后才能实施。所以建议本溜砂坡的整治分两期进行:第一期实施土木工程;第二期实施固砂的生物工程。

参考文献(References):

- [1] Zhu Pingyi, He Ziwen, Wang Yangchun *et al.*. A Study of Typical Mountain Hazards Along Sichuan-Tibet Highway [M]. Chengdu: Science and Technology University Publishing house. 1999. 28~ 32.
[朱平一, 何子文, 汪阳春, 等. 川藏公路典型山地灾害研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社. 1999. 28~ 32]
- [2] Luo Defu, Mao Jizhou, Zhu Pingyi *et al.*. Mountain Disasters and Measures along South Sichuan-Tibet Highway in Tibet [M]. Beijing: Science Press. 1995. 101~ 110. [罗德富, 毛济周, 朱平一等. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害与防治对策 [M]. 北京: 科学出版社. 1995. 101~ 110]
- [3] Wang Chenhua, Liang Guangmo, Zhang Xiaogang *et al.*. Report of Formative Mechanism and Control on Sand-sliding Slope in Zhongba Section Along Sichuan-Tibet Highway [R]. 2002. 2~ 9.
[王成华, 梁光模, 张小刚, 等. 川藏公路中坝段溜砂坡发生机理与防治关键技术示范研究报告 [R], 2002. 2~ 9]
- [4] Wang Chenhua, Chen Yongbo, Zhu Pingyi *et al.*. Control and Evolution of Sand-sliding Slope In Zhongba Section of the Sichuan-Tibet Highway [A]. Researches on Mountain Disasters and Environmental Protection across Taiwan Strait [C]. Vol. 3, 2002. 282~ 289. [王成华, 陈永波, 朱平一, 等. 溜砂坡的形成演化规律与防治对策 [A], 海峡两岸山地灾害与环境保育研究 [C], 第三卷, 2002. 282~ 289]

Formative Mechanism and Control of Typical Sand-sliding Slope along Sichuan-Tibet Highway

QUE Yun¹, WANG Chong-hua² and ZHANG Xiao-gang²

(1. Department of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074 China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China)

Abstract: Sand-sliding slope is the penciled slope formed by weathered sands and debris which slides under gravity and deposits at the bottom of the steep slope. As one of mountain hazards, Sand-sliding slopes usually endanger severely roadway and railway etc. Research of formative mechanism and evaluative law of Sand-sliding slope are carried out on Sand-sliding slope in the K3930+ 300~ K3930+ 493 section of the Sichuan-Tibet Highway, and provide feasible control method. These are greatly instructive to control all the Sand-sliding slopes in Zhongba section of the Sichuan-Tibet Highway.

Key words: Sand-sliding slope; formative mechanism; control