

# 冻土斜坡的热融滑塌变形破坏机制分析与评估

付小兵, 傅荣华, 夏克勤  
(成都理工大学, 成都 610059)

摘要: 通过对冻土的分布特征、物理力学特性与典型热融滑塌路段的研究, 分析了冻土产生热融滑塌破坏的机制, 进而对冻土斜坡进行稳定性计算和预测, 最后提出一些处理措施。

关键词: 冻土; 热融滑塌; 破坏机制; 稳定性

中图分类号: P642. 21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0243-02

## The Destroying Mechanism under Thaw Slumping Distortion and Evaluation of Stability of the Frozen Soil Slope

FU Xiao-bing, FU Rong-hua, XIA Ke-qin  
(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Based on the research of distributing characteristic, mechanical characteristic and typical thaw slumping road under frozen soil, the destroying mechanism under the thaw slumping distortion is analyzed, at the same time, the calculation of stability and forecast of the frozen soil slope are given, finally, the disposal measure is brought forward.

**Key words:** frozen soil; thaw slumping; destroying mechanism; stability

随着西部大开发的进行, 西部各省都加快了基础设施建设。西藏地处青藏高原, 海拔高, 气候寒冷, 冻土广泛分布, 在工程建设中不可避免会遭受到冻土的危害。本文以那曲至嘉黎公路改建工程中遇到的冻土灾害, 分析了冻土斜坡的热融滑塌变形破坏机制, 并对其产生的灾害进行评估。

### 1 热融滑塌地质灾害现状

#### 1.1 冻土分布特征

那曲-嘉黎公路地处藏北高原, 横跨念青唐古拉山, 地势高亢, 平均海拔 4 700 m 以上, 气候寒冷。按区域资料及青藏铁路、公路的建设经验和研究成果: 在纬度 N31°29', 冻土分布海拔下界值约为 4 670 m; 季节冻结(融化)最大深度约 2.8~3.5 m。因此沿线冻土主要分布在海拔 4 670 m 以上的路段。

那嘉公路的雨洛拉山与阿己拉山之间约 20 km 范围, 海拔在 5 000 m 左右, 有常年冻土带, 具冰川剥蚀—堆积地貌, 并以漂砾、卵石为主的冰碛物为沉积特征; 其山顶浑圆, 山坡坡度 10°~15°; 山地缓坡间为宽广的平原和谷间洼地; 基岩区寒冻风化剥蚀作用强烈, 岩屑坡、岩屑堆和石海等相连成片; 多边形冻土等冰缘地貌现象普遍。其它路段为季节性冻土, 厚度一般为 0.20~1.00 m。最大冻结深度为 2.0~2.81 m。

#### 1.2 冻土的物理力学特性

虽然公路沿线发育多处冻土地段, 但不一定必然产生冻害。要产生冻害的路段应具备三个条件即: ①地温低于 0 (或海拔高于 4 670 m), ②有比较细颗粒的路基土, 使地下水通过毛细作用上升至地表附近, ③地下水埋藏较浅。而公路沿线岩土大多由砾石土、角砾土、碎石土等粗颗粒土组成。地下水埋藏较深, 土体渗水性能好, 土体只存在少量的毛细

管, 毛细作用微弱, 地下水沿毛细管上升高度不大, 不会出现冻胀融沉现象, 不会引起路面鼓胀变形或翻浆、下沉。仅在局部湿地地区出现现轻微冻胀融沉现象, 对公路的危害较小。根据工程可行性报告可知这类土的渗透系数为 10~20 m/d; 土层的融沉系数  $\delta_0$  3%, 冻胀  $\eta$  3.5%, 属不融沉—弱融沉、不冻胀—弱冻胀土; 土体强度高。

#### 1.3 典型热融滑塌路段

据调查, 工程区产生冻害的路段总共有三段, 分布在 K65+500~K66+500、K177+000~K177+300、K179+000~K179+500 三段。现分别将每段特征描述如下:

K65+500~K66+500 段冻土地处雨洛拉山和阿己拉山之间的槽谷凹地, 位于罗曲河流冲积平台上, 平均高程 4 995 m 左右。路基土由含砾亚黏土组成, 砾石砾径为 1 cm 左右, 大的有 5 cm, 砾石含量占 10%~15%, 含少量的细砂。土潮湿, 呈塑性状态, 为季节性冻土。据区域资料和工程可行性报告可知季节冻深为 2~3 m。土层可见厚度大于 5 m, 地下水埋深大于 2 m。冲积平台地形平缓, 表层为草甸土。现场调查时路堑边坡未发现热融滑塌现象, 现状评估该段冻土稳定, 危险性小。

K177+000~K177+300 冻土地处冰蚀峡谷地带, 发育于山前的一个洪积扇上, 海拔标高为 4 570~4 580 m。该洪积扇设置在冰蚀平台上, 其基岩为石炭系的变质石英砂岩, 灰黄色, 板理较发育, 岩层产状为 330°~35°。扇体前缘正对着雄曲河, 为一个大的临空面, 公路在扇前缘通过。扇面植被较发育, 堆积厚度约为 2~3 m, 局部渗水。洪积扇前缘坡度较缓, 约为 10°~15°; 后缘坡度约为 25°~30°。洪积扇宽约 150 m, 长约 300 m, 面积约 2 250 m<sup>2</sup>。洪积物为季节性冻土, 由碎石质砂土组成, 局部含细粒物质较多, 碎石粒径约为 1~2 cm, 含量约占 8%~10%, 胶结较差, 潮湿, 呈塑性状态。洪积

<sup>1</sup> 收稿日期: 2005-04-06

作者简介: 付小兵(1981-), 男, 成都理工大学地质工程专业硕士研究生, 主要研究方向为地质灾害评价与预测。

扇前缘靠近公路段偶尔有水流流出。有热融滑塌现象,扇面出现多处阶坎状滑塌痕迹,路肩塌落约 1 m。现状评估该段冻土不稳定,具有中等危险性。

K179+000~K179+500 冻土地处冰蚀峡谷地带,发育于山前的一个洪积扇上,海拔标高为 4 554~4 548 m。该洪积扇发育在一个冰蚀平台上,其下部基岩为石炭系的变质石英砂岩,灰黄色,板理较发育,岩层产状为 310°40′。公路在扇前缘通过,其前缘坡度较缓,约为 10°;后缘坡度约为 30°。扇面植被茂盛,扇体堆积层厚度约为 5 m,扇体一侧有水流流出,流量约为 1 L/s。洪积扇长约 500 m,宽约 150 m,面积约为 3 750 m<sup>2</sup>。洪积物为季节性冻土,由含砾亚黏土组成,砾石粒径为 1 cm 左右,砾石含量约占 10%,胶结较差,稍湿,呈塑性状态,在热融作用下沿临空面滑塌,扇前缘出现多处阶坎滑塌。在路肩新近发生的一次滑塌,塌陷约 1.5 m,距离河岸约 8 m。现状评估该冻土不稳定,具有中等危险性。

## 2 热融滑塌的变形破坏机制及稳定性计算

### 2.1 热融滑塌变形破坏机制分析

发生热融滑塌的冻土发育在洪积扇上,洪积扇在扇后缘接受地下水的补给,在扇前缘排泄。扇体土体为季节性冻土,颗粒较细,含水量较大。在冻结期,排泄处形成季节性冻土“拦水坝”,阻止地下水向外排泄。而斜坡深部并未冻结,地下水还继续源源不断地向斜坡下部运移,由于排泄减弱,斜坡区内地下水便逐渐富集,含水范围不断扩展,地下水位也相应抬高。地下水扩展范围内的土体强度将会大为降低,这种作用可影响到斜坡深部,形成大面积的软化带,对降低斜坡稳定性具有非常显著的作用。

季节性冻融作用也使斜坡区的静、动水压力发生较强烈的涨落变化。冻结期内斜坡内地下水位升高,不但大范围软化土体,而且产生了较大的静水压力,浮托坡体,使坡体内有效压力降低,也起到了降低斜坡整体稳定性的效果。冻结期间由于地下水的渗流减弱,动水压力相对减小;在春季融化时,初期因坡体内积存水量较多,其排泄流量也大,水体的渗流范围和水头差也较大,所以,该时期可产生较大的动水压力和机械潜蚀作用,而静水压力则相反,逐渐降低。可见,季节性冻融作用也可引起坡体内静、动水压力季节性的增大和减弱,以影响斜坡体的应力状态和稳定性。

在春季融化时,由于斜坡土体为细颗粒土,黏粒含量较大,其渗透性能弱,融化水不易排出,往往出现超空隙水压力,融化面上的土体将受到水的充分浸泡,其抗剪强度将大幅降低。加之扇前缘地势平坦,存在临空面,土体的抗滑阻力较小。在以上因素的共同作用下,后缘土体在自身重力的作用下,沿融化面向下滑动,前缘土体沿临空面发生滑塌,形成热融滑塌。

### 2.2 稳定性计算

冻土的抗剪性能与冻土的颗粒组成有很大的关系,在其它条件一定的情况下,冻土中粗颗粒物质含量越大,冻土的内摩擦角( $\varphi$ )越大,而内聚力( $c$ )越小,反之亦然。另外冻土的温度、含水量、密度也会影响冻土的抗剪强度。从上对冻土热融滑塌破坏机制的分析可知,冻土中细颗粒物质含量将影响到冻土的渗流能力,进而会影响到冻土在冻结期间的含冰量和融化期间的动静水压力,对冻土的抗剪强度影响较大。因此可根据冻土的室内土工试验资料并结合前人对冻土的抗剪性能的研究和工程经验给出冻土的抗剪参数,见表 1。由于冻土的冻结深度可定为一常数,则它的融化面是确定的。根据斜坡的地形可推测冻土的融化面为折线性,见图 1。

表 1 冻土的抗剪参数取值表

公路里程 位置	$\varphi$ / °			$c$ / kPa		
	后缘	前缘	中部	前缘	中部	后缘
K177+000~K177+300	4.1	15.6	28.7	18.2	6.3	0
K179+000~K179+500	3.8	14.4	26.8	16.5	5.8	0

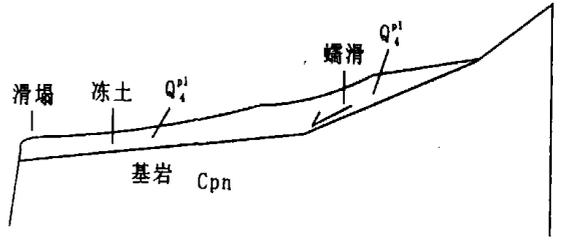


图 1 热融滑塌示意图

对于此类斜坡,可根据下式计算其稳定性:

$$K_s = \frac{\sum R_i \Psi_i \Psi_{i+1} \dots \Psi_{n-1} + R_n}{\sum T_i \Psi_i \Psi_{i+1} \dots \Psi_{n-1} + T_n} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1)$$

$$\Psi_i = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \operatorname{tg} \varphi_i$$

$$R_i = N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i$$

$$N_i = (G_i + G_{bi}) \cos \theta_i + P_{wi} \sin(\alpha - \theta_i)$$

$$T_i = (G_i + G_{bi}) \cos \theta_i + P_{wi} \sin(\alpha - \theta_i)$$

$$P_{wi} = \gamma_w V_i \sin \frac{1}{2}(\alpha + \theta_i)$$

式中:  $K_s$ ——滑坡稳定性系数;  $c_i$ ——第  $i$  计算条块滑动面上的黏聚力标准值(kPa);  $\varphi$ ——第  $i$  计算条块滑动面上岩土体的内摩擦角标准值( $\varphi$ );  $l_i$ ——第  $i$  计算条块滑动面长度(m);  $\theta_i, \alpha$ ——第  $i$  计算条块底面倾角和地下水水面倾角( $\varphi$ );  $G_i$ ——第  $i$  计算条块单位宽度岩土体自重(kN/m);  $G_{bi}$ ——第  $i$  计算条块滑体地表建筑物的单位宽度自重(kN/m);  $P_{wi}$ ——第  $i$  计算条块单位宽度的动水压力(kN/m);  $N_i$ ——第  $i$  计算条块滑体在滑动面法线上的反力(kN/m);  $T_i$ ——第  $i$  计算条块滑体在滑动面切线上的反力(kN/m);  $R_i$ ——第  $i$  计算条块滑动面上的抗滑力(kN/m);  $\gamma_w$ ——水的重度(kN/m<sup>3</sup>);  $V_i$ ——第  $i$  条块单位宽度滑体的水下体积(m<sup>3</sup>/m)。

经计算得出两段发生热融滑塌的冻土斜坡的稳定性系数分别为 1.15, 1.20。属于潜在不稳定冻土,具有中等危害性。

## 3 热融滑塌灾害的预测评估

由于拟建公路的改线,位于 K65+500~K66+500 路段的冻土要进行削方,最大挖方高度达 4.95 m。而改线段位于常年冻土带,若地表以下存在厚层地下冰,路堑开挖使得地下冰层暴露在外,随环境正温而融化,冰层上限附近则会出现一层水的润滑(和饱和)带。该地带实际上就是一个滑动带,土体完整性已经受到破坏,分为上下两层,上层土体在重力作用下发生滑塌,就形成了热融滑塌。由于该段冻土位于罗曲河谷冲积平台上,其地形极为平缓,地面坡度不到 10°;产生整体滑动的可能性小,一般情况下,路堑边坡发生多发生热融滑塌,滑塌体塌落到路基,堵塞交通。具有中等危险程度。因此,设计中开挖的路堑应设置保温层并要求在冻结期施工,若路线纵坡允许,尽量减小路堑边坡高度。采取上述措施后,工程诱发路堑热融滑塌的可能性将大大降低。

对于位于 K177+000~K177+300, K179+000~K179+500 的两段冻土,由于其地形地貌相似,都发育在冰蚀平台的洪积扇上,冻土的类型也一样。故可放在一起进行预测

(下转第 268 页)

- [14] 颀耀文, 陈怀录, 徐克斌. 数字遥感影像判读法在土壤侵蚀调查中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(2): 157-162.
- [15] R S Dwivedi, T Ravi Sankar, L Venkataratnam, et al. The inventory and monitoring of eroded lands using remote sensing data[J]. Int. J. Remote Sensing, 1997, 18(1): 107-119.
- [16] 张增祥, 赵晓丽, 陈晓峰, 等. 基于遥感和地理信息系统(GIS)的山区土壤侵蚀强度数值分析[J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 77-83.
- [17] CORINE. Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community[R]. EUR 13233, Luxembourg, 1992.
- [18] 杨晓梅. 哥伦比亚东部平原上侵蚀风险绘图法的研究[J]. 水土保持科技情报, 2003, (3): 8-11.
- [19] 石承苍, 蒋宇, 晏懋昭, 等. 川西南山区土地资源、土壤侵蚀遥感调查及土壤侵蚀定量评价[J]. 西南农业学报, 1995, 8(4): 53-59.
- [20] 冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 1-6.
- [21] 刘毅. 长江泥沙输移及三峡工程泥沙问题[J]. 中国三峡建设, 1997, (7): 17-18.
- [22] J M van der Knijff, R J A Jones, L Montanarella. Soil Erosion Risk Assessment in Europe[R]. Report EUR 19044 EN, European Soil Bureau, European Commission, 2000.
- [23] 唐政洪, 蔡强国, 许峰. 流域侵蚀产沙的尺度变异规律研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 56-61.
- [24] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173.
- [25] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 289-296.
- [26] 周正朝, 上官周平, 土壤侵蚀模型研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 52-55.
- [27] 李光录, 张胜利. 土壤侵蚀模型研究现状及回顾[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(2): 76-83.
- [28] 郭学军, 郭立民. 应用不同时期的航片分析土壤侵蚀量的动态变化[J]. 中国水土保持, 1994, (2): 40-42.
- [29] 钟劭南. 长江上游重点水土流失区遥感动态监测及泥沙输移分析[J]. 国土资源遥感, 2001, (1): 1-8.
- [30] 杨德生, 肖卫国, 陈冬奕, 等. 深圳市水土流失动态变化遥感监测分析[J]. 人民珠江, 2002, (6): 55-57.
- [31] Alice Servenay, Christian Prat. Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. Geoderma, 2003, (117): 367-375.
- [32] 马义娟, 苏志珠. 晋西沿黄地区水土流失动态变化及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 122-128.
- [33] 倪晋仁, 李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 611-621.
- [34] J W Poesec, et al. 杞杰译. 全球环境变化对水力侵蚀的影响[J]. 水土保持科技情报, 1997, (4): 15-18.
- [35] Nearing M A. Potential changes in rainfall erosivity in the U. S. with climate change during the 21st century[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, (3): 229-232.
- [36] 陈建平, 丁火平, 王功文, 等. 基于 GIS 和元胞自动机的荒漠化演化预测模型[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 254-260.
- [37] 李德成, 徐彬彬, 石晓日. 利用马氏过程模拟和预测土壤侵蚀的动态演变[J]. 环境遥感, 1995, 10(2): 89-96.
- [38] Gobin, A, Govers, G. PESERA: Pan-European Soil Erosion Assessment[R]. EC Contract No. QLK5-CT-1999-01323, First Interim Report, 2001.
- [39] 王飞, 李锐, 杨勤科. 土壤侵蚀研究的尺度转换[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 9-12.

(上接第 244 页)

评估。拟建公路在这两段都要进行削方,但挖方高度不大,为 1~2 m。由于冻土已发生热融滑塌,根据模型计算其稳定性系数分别为 1.15, 1.20, 属于潜在不稳定冻土,具有中等危险性。当再次发生冻结和融化情况,冻土会有可那产生新的变形破坏,这种热融滑塌是土体的整体移动造成的,对公路路基的危害较大;也很有可能土体沿融化面瞬间滑动,而不是蠕滑,摧毁公路,那危害性则更大。

#### 4 热融滑塌的防治措施

对于热融滑塌,由于其变形受冻土的颗粒组成、温度及

水分的极大影响,尤其冻土是其特殊性产生的根本根源,因此在治理中的关键考虑因素是对冻土的措施。根据青藏高原多年冻土区的研究和施工经验,传统土的挡墙、骨架护坡等与冻胀、融沉变形不协调的措施是不适合的,而应本着保护冻土的原则,采用主动减少土体吸热、消散土体热能的工程措施,如草袋堆砌、碎石覆盖、移植草皮护坡,也可以有选择性的采用绝热材料覆盖,但各种措施中要尤其注意设置良好的反滤排水措施。在 K177+000~K177+300、K179+000~K179+500 段,采取公路内侧蠕滑段修建挡墙的防护措施,注意设置良好的反滤排水措施。

参考文献:

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 吴玮江. 季节性冻结滞水促滑效应[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 359-364.
- [3] 牛富俊,张鲁新,俞祁浩,等. 青藏高原多年冻土区斜坡类型及典型斜坡稳定性研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 608-613.
- [4] 靳德武,牛富俊,等. 不同渗流条件下无限斜坡稳定性分析方法探讨[J]. 地质灾害与环境, 2003, 14(4): 63-67.
- [5] 李栋伟,汪仁和. 冻土抗剪强度特性及试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2004, 24(增刊): 52-55.
- [6] 牛富俊,程国栋,赖远明,等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 402-406.