

# 多年冻土热融滑塌的地温变化及滑坡过程分析

马立峰,牛富俊,杨宁芳

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室,兰州 730000)

**摘要:** 随着青藏高原工程强度的提高,冻土区斜坡稳定性成为工程建设必须面对和解决的问题,其中最为严重也是较难防治的斜坡失稳是热融滑塌。针对典型热融滑塌进行的温度监测资料表明,在滑塌的影响下,其下多年冻土地温年变化幅度趋小而年平均地温升高,导致产生这一现象的原因在于每年进入多年冻土的冷能有所降低。滑塌溯源侵蚀范围监测资料表明,滑塌范围的扩展随地温的周期变化波动进行,并主要集中在7~9月,最大扩展范围出现在沿坡体倾向方向。热融滑塌的产生与多年冻土条件和外因力的诱发关系密切,工程治理要考虑引起滑塌消亡的基本条件。

**关键词:** 多年冻土;热融滑塌;地温;溯源侵蚀;工程治理

**中图分类号:** P642.14;P642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2006)03-0053-04

## 1 概述

冻土与人类的生存与发展有着极为密切的关系,近四十年来,我国在寒区开展了大量的工程和经济开发活动,尤其是线性工程建设规模加大。如,仅青海省境内的109、214、227国道穿越多年冻土区达千余公里<sup>[1]</sup>,而作为西部大开发战略实施的四大重点工程之一的青藏铁路全长1142km,其中穿越多年冻土区达632km<sup>[2]</sup>。这些寒区线性工程穿过冻土斜坡地段时,斜坡的稳定性问题显得尤为重要。已有研究表明,青藏公路沿线工程建设活动中,冻融泥流频繁发生,冻土区边坡开挖及斜坡稳定性是工程活动必须解决的问题之一<sup>[2]</sup>。热融滑塌是多年冻土地区最为严重也是较难防治的斜坡失稳问题,为探讨其形成过程和影响因素,提出防治对策,本文选取了青藏公路K3035里程处发育的典型热融滑塌开展了有针对性的监测和分析。K3035热融滑塌体是20世纪90年代初形成、目前正处于发展阶段的不稳定性冻土斜坡,在此类斜坡失稳中具有典型性和代表性。

K3035热融滑塌位于青藏高原风火山北侧北麓河地区。该区气候寒冷,年平均气温 $-6.24^{\circ}\text{C}$ ,气温年较

差 $26.2^{\circ}\text{C}$ 。每年10月至翌年5月份长达8个月为负温月份,多具有寒冻荒漠和高山草甸景观,山坡平缓,植被覆盖良好。多年冻土和地下冰发育,地下冰厚度从十几厘米至几米,最大厚度可达4m,是厚层地下冰分布的代表性区域,最大季节融化深度在0.9~2.2m之间<sup>[3]</sup>。对气候变化的响应敏感,热稳定性较差,在热融作用下坡地上热融滑塌广泛分布。

K3035热融滑塌体海拔4580m,斜坡为阳坡。据钻孔和探槽勘察揭露,该处地层主要为上第三系湖相沉积及第四系全新统冲洪积层。滑塌体近南北向最大宽度72m,近东西向纵长约103m。滑塌体厚度1.5~2.0m,体积约 $10\,000\text{m}^3$ 。滑塌范围呈弧形(图1),坡度低缓,整体坡度约 $7^{\circ}$ 。

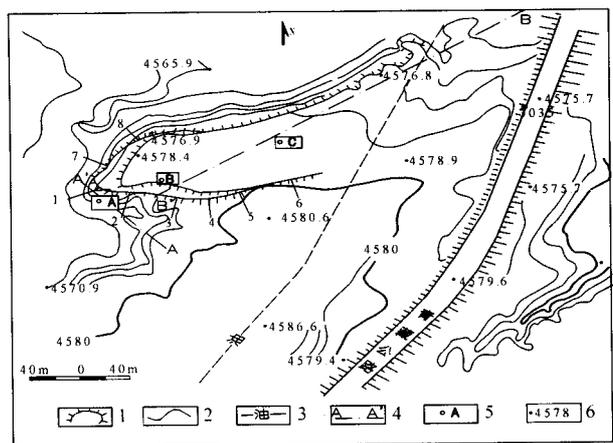


图1 K3035斜坡地形及滑坡分布范围

Fig.1 Relief map and range of slope K3035

1—滑塌体;2—等高线;3—管线;4—物探测线;5—变形测点;6—高程点

按照冻土含冰量、冻土构造特征,该处冻土类型自上而下划分为:0.0~1.8m为少冰冻土,1.8~2.0m为

收稿日期:2005-10-17;修订日期:2005-12-26

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-351);国家自然科学基金项目(40471023);特殊人才培养项目(J0130084);中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04)

作者简介:马立峰(1982-),男,在职硕士研究生,主要从事寒区岩土工程研究。

E-mail: malifeng82@hotmail.com

富冰冻土, 2.0 ~ 4.0m 为饱冰冻土, 4.0m 以下为多冰冻土。冻土上限为厚层地下冰的发育深度, 即 2.0m ±。该处年平均地温根据实测约为 -1.75℃, 属低温冻土。

### 2 监测点布设

在 K3035 滑塌体上布置 2 个测温孔 ZK0、ZK1, 其中 ZK0 位于滑坎以后未滑塌部位, 在 4.5m 的深度范围内共布设 9 个温度探头。ZK1 位于已滑塌的土体中下部, 在 14.5m 的深度范围内共布设 30 个温度探头。为监测滑塌范围的变化, 沿未滑区不同方向安设 8 组木桩(图 1), 各点按一定角度, 距滑坎的初始距离为 10m(表 1)。监测工作从 2002 年 8 月 16 日开始, 至今一直在进行, 本文分析的资料期限为 2002 年 8 月 ~ 2005 年 9 月。

表 1 滑塌范围观测线及其方位角

Table 1 Observing lines & directions of sliding collapse velocity

观测线	1'-1	2'-2	3'-3	4'-4	5'-5	6'-6	7'-7	8'-8
方位角(°)	45	0	10	0	310	315	110	128

### 3 热融滑塌地温变化分析

图 2 为 K3035 处未受滑塌影响的自然斜坡地温分布图。由图 2 可得出, 在自然条件下, 年最大融化深度为 2.2m ±, 并在监测期间保持了稳定, 即多年冻土上限深度为 2.2m ±。而在滑塌体的前缘部位, 从地温分布图上可得出(图 3), 最大融化深度基本上保持在 1.5m 深度处。说明随着热融滑塌的产生、滑动土体排水、重新固结和稳定, 年最大融化深度比自然状态时减小了, 即多年冻土上限发生了重新分布。

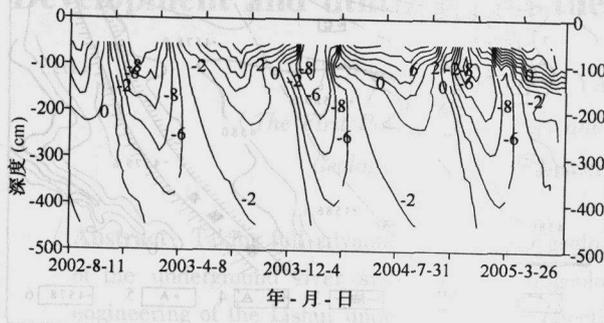


图 2 K3035 斜坡 ZK0 孔地温随深度和时间分布图

Fig.2 Relationship of ground temperature with depth and time of ZK0 in slope K3035

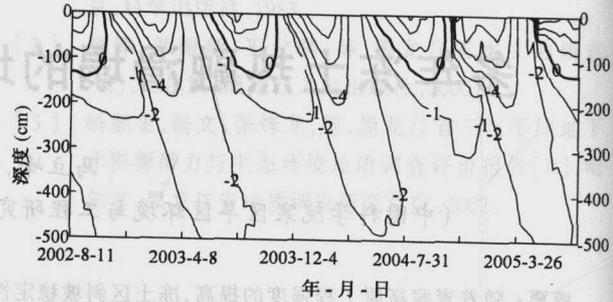


图 3 K3035 斜坡 ZK1 孔地温随深度和时间分布图

Fig.3 Relationship of ground temperature with depth and time of ZK1 in slope K3035

为了更好地对比分析 ZK0 与 ZK1 的地温差异, 绘制两孔 1.5m 和 2.0m 深度处地温随时间变化的曲线(图 4)。图 4 表明, 无论是 1.5m 还是 2.0m 深度处的地温, ZK0 测温孔的温度在夏季高于 ZK1 孔, 而冬季又显著低于 ZK1。此外, ZK0 测温孔 1.5m、2.0m 处的平均地温分别为 -3.1℃ 和 -3.4℃, 而 ZK1 测温孔相应温度为 -1.7℃ 和 -1.8℃。这种变化类似于在地面铺设了保温材料后的变化, 尽管这一变化的幅度相对比较缓和。另一方面, 滑塌产生后其下多年冻土的整体温度有所升高(图 5), 未滑动区 0.5 ~ 4.5m 深度范围内整体温度低于 -2℃, 而滑动区相应深度范围内土体温度高于 -2℃, 说明滑动过程及之后土体的重新稳定是伴随着温度的重新分布而完成的, 这一过程消耗了多年冻土内储蓄的冷能。导致地温产生上述变化的原因主要在于土体滑塌后结构发生了变化, 土体变得更为松散而引起导热系数的降低, 使得滑塌体下多年冻土相对于原土体条件下, 由于导热性能差而出现地温变化幅度小且年平均地温变高的特点。

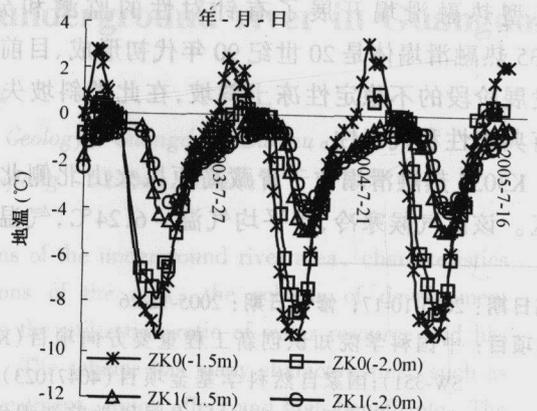


图 4 测温孔 1.5m、2.0m 深度处地温时间变化曲线

Fig.4 Ground temperature curves changing with time at depth of 1.5m and 2.0m of ZK1 and ZK2 in slope K3035

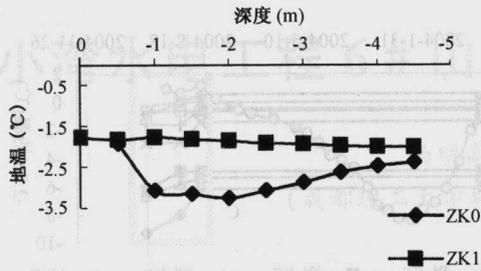


图5 ZK1、ZK2 钻孔年平均地温-深度曲线(2002~2003年)  
Fig.5 Average ground temperature curves changing with depth of ZK0 and ZK1 (2002 ~ 2003)

#### 4 热收支计算分析

如前所述,热融滑塌的产生改变了原地表的热交换条件和土体的热传导特性,并最终影响到下伏多年冻土的地温状况。为深入研究引起温度变化的本质,需要计算进入冻土的热量。K3035热融滑塌体在滑塌前后虽然有温度的变化,但在滑塌体趋于稳定后上限以下的多年冻土没有融化。因此,可以利用上限下的含土冰层来近似估算进入多年冻土的热量<sup>[4]</sup>。因其在冻融过程中水分迁移、相变潜热相对有限,且导热系数为一相对恒定值,为进一步消除上限附近水分迁移、相变的影响,可以选取2.5~3.0m深度作为热流量的计算区域。根据热传导原理,垂直一维方向上进入2.5~3.0m深度范围的热流量可以近似描述为:

$$q_z = -\lambda_{ice} \frac{\partial t}{\partial z} \approx -\lambda_{ice} \frac{t_{3.0} - t_{2.5}}{\Delta z} \quad (1)$$

表2 K3035 斜坡不同部位进入 2.5 ~ 3.0 m 深度多年冻土的热量 (kJ·m<sup>-2</sup>)

Table 2 Heat exchange with a depth of 2.5 ~ 3.0 m in different positions in slope K3035

冻融时间	2002 ~ 2003			2003 ~ 2004			2004 ~ 2005		
	吸热	放热	热收支	吸热	放热	热收支	吸热	放热	热收支
ZK0	31 872	-42 382	-10 510	26 236	-50 937	-24 701	39 891	-46 374	-6 484
ZK1	19 579	-17 645	1 934	18 944	-22 423	-3 479	20 727	-23 213	-2 486

表2表明,自然未受扰动的斜坡区(ZK0),整体上每年的热收支表现为放热,且放热量较高,有利于维持多年冻土的热稳定性。但在滑动区(ZK1),2002~2003年间进入计算范围的热量为正值,即表现为吸热,表明此阶段多年冻土处于整体升温过程,其后两个周期表现为放热,但放热量较小。比较两个区域的热收支情况,结合考虑到多年冻土下部还受到地热流的影响,如果上层全年的热收支表现为吸热,那么多年冻土肯定处于以升温为特征的退化过程;如果全年的热收支虽然表现为放热,但放热量不足以抵消下部热流的影响,

式中: $q_z$ ——热流量( $W \cdot m^{-2}$ );

$\lambda_{ice}$ ——冰的导热系数( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),

$\lambda_{ice} = 2.22$ ;

$t$ ——温度(式中的数字下标表示深度);

$\Delta z$ ——距地表面 2.5 ~ 3.0m 的含土冰层厚度,

$\Delta z = 0.5m$ 。

利用(1)式将监测周期内(2002年8月~2005年8月)的温度数据进行计算,得到热流量,计算结果由图6表示(图中正值表示吸热,负值表示放热)。

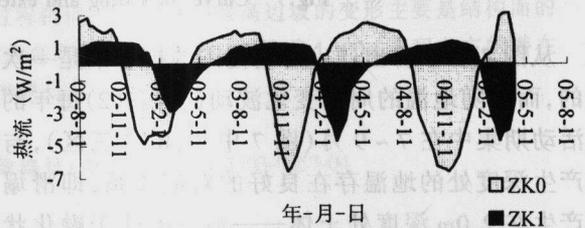


图6 K3035Z 斜坡不同部位进入 2.5 ~ 3.0m 热流量  
Fig.6 Heat flux entering permafrost with 2.0 ~ 3.0m in depth in slope K3035

图6表明,天然状态下,斜坡未受滑塌影响区吸热开始于每年4月中,结束于11月初,吸热期长(7~8个月)但期间热流量缓和,放热期短但热流量比较剧烈。在滑塌区情况则显著不同:其一,吸热—放热过程出现的时间有一定的滞后,整体上推迟了2个月;其二,热交换整体上比较缓和,进入计算深度范围内的总热量较小。为定量对比二者间的差异,将图6中阴影面积(曲线对时间的积分)进行统计,得到进入2.5~3.0m范围内多年冻土中的热量,计算结果列于表2中。

则多年冻土仍会处于退化过程。因此,整体而言,热融滑塌区的多年冻土相对于原始状态,其热稳定性明显降低,突出的表现特征是地温整体有所升高。

#### 5 滑塌过程监测与滑塌机理分析

早期调查认为热融滑塌从发生、发展直至衰亡(新的平衡),一般需要2~3年或3~5年的时间,但发育在青藏公路K3035处斜坡上的热融滑塌至少已经活动了10年以上的时间。目前,该滑塌体的范围仍在逐年扩展。滑塌范围监测结果如图7所示。

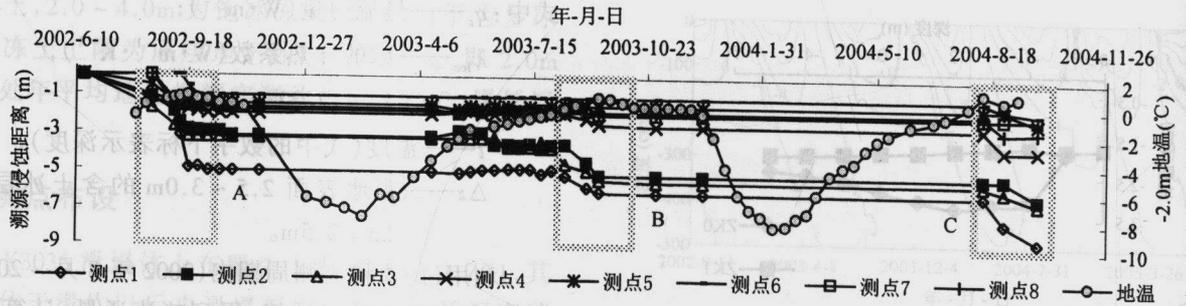


图7 K3035 斜坡热融滑塌扩展范围-时间变化曲线

Fig.7 Curves of sliding and extending area changing with time in slope K3035

从图7可以看出:(1)滑塌范围的扩展不是一次完成的,而是随地温的周期变化波动进行。(2)每年的滑动活动期集中在7~9月(图7中A、B、C三区),与滑塌产生深度处的地温存在良好的对应关系,即滑塌主要产生在2.0m深度处土体——地下冰处于融化状态期间,其余时间滑塌基本处于停滞状态。(3)不同方向滑塌速度不一致,沿坡体倾向方向滑塌速率大于其余方向的滑塌速率(1号测点),2002~2004年间总的滑塌范围扩展了近10m。

热融滑塌在青藏高原普遍存在<sup>[5]</sup>,其产生的原因和过程与冻土条件、滑塌诱发因素密切相关。冻土是一种对温度极为敏感的土体,随着温度的升高,其强度显著降低,土体融化后的强度相对与冻结时的强度以几何数量级的尺度降低。因此,对于热融滑塌型滑坡成因可以理解为:当斜坡体开挖或受如河流侵蚀后融化土体将在临空面产生坍塌,土体坍塌后厚层地下冰处于半暴露状态或其覆盖层减薄,使得地下冰融化,融化水使塌落土体处于饱和、过饱和状态,而地下冰面又提供了良好的滑动面,饱和、过饱和的土体在聚集在冰面与土层间水的润滑作用下形成滑坡。滑坡进一步引起斜坡土体的开裂、坍塌和滑动,随着气温的波动,这种坍塌—滑动、再坍塌—再滑动周而复始地持续下去,但滑坡前缘的土体随着排水、固结及地下冰融化面的加深将逐渐趋于稳定。

根据热融滑塌产生原因和影响因素,其自然消亡需要存在以下几种条件之一:滑塌范围已经到达斜坡坡顶,活动层的坍塌失去了滑动面;斜坡多年冻土厚层地下冰尖灭或土体含冰量显著降低,活动层即使坍塌后没有地下冰融化产生的大量水分;早期坍塌的土体覆盖了暴露的地下冰面,或滑塌体土层经排水、固结后阻碍了后期滑塌体的滑动。

从上述分析可以看出,热融滑塌的成因和过程是比较复杂的,但同时给予工程治理一定的启示。首先,

多年冻土区、尤其是存在厚层地下冰的斜坡区域,工程活动要尽量避免开挖。一旦产生热融滑塌,其治理要考虑覆盖裸露的地下冰面、保持多年冻土冻结的方法,在滑动体前沿设置挡土措施;工程措施要考虑保护多年冻土,并设置良好的截水、排水结构。

### 6 结论

(1)热融滑塌的产生,使得其下多年冻土出现地温变化幅度趋小且年平均地温变高的特点,导致产生这一现象的原因在于每年进入多年冻土的冷能有所降低。

(2)滑塌范围的扩展随地温的周期变化波动进行,并主要集中在7~9月,最大扩展范围出现在沿坡体倾向方向。

(3)热融滑塌的产生、发展及其消亡与多年冻土条件和外因力的诱发关系密切,工程治理要考虑保护多年冻土,并设置良好的截水、排水结构。

### 参考文献:

[1] 吴紫汪,程国栋,朱林楠,等.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1988.

[2] 张长庆,朱林楠,张建明,等.中国南水北调西线工程地区的冻土与工程问题[J].冰川冻土,1993,15(1):90-95.

[3] 靳德武.青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究[D].西安:长安大学博士学位论文,2004.

[4] Fujun Niu, Guodong Cheng, Wankui Ni, et al. Engineering-related slope failure in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(3): 215-225.

[5] 牛富俊,张鲁新.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.

(下转第71页)

(上接第 56 页)

## Analysis on ground temperature changes and landslide process of thaw slumping in permafrost regions

MA Li-feng, NIU Fu-jun, YANG Ning-fang

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** With development of engineering constructions, such as the Qinghai-Tibet Highway and the Qinghai-Tibet Railway, the slope instability problems in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau must be carefully considered. Among the slope instability types, thaw slumping is the most hazardous to engineering projects. The ground temperature data of long-term monitoring in the typical thaw slumping indicates that average ground temperature increases and annual fluctuation of ground temperature are reducing under the thaw slumping. The reason is that the heat flux entering permafrost reduces. Retrogressive erosion data of long-term monitoring in the typical thaw slumping indicates that expanding of the thaw slumping fluctuates along with the ground temperature's annual fluctuation, and expanding mostly takes place in 7 ~ 9 months. The maximal expanding appears at the direction of the slope tendency. Forming and developing of the thaw slumping are relative to the permafrost conditions and other outer conditions. The basal conditions of slope disappearing must be considered in engineering treatment.

**Key words:** permafrost; thaw slumping; ground temperature; retrogressive erosion; engineering treatment

编辑:张明霞