

青藏铁路安多试验段斜坡路基地温及变形的特征分析¹

沈宇鹏¹, 许兆义¹, 王连俊¹, 张鲁新^{1, 2}

1 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 (100044)

2 青藏铁路建设总指挥部, 格尔木 (816000)

E-mail: njtu003@163.com

摘要: 通过分析青藏铁路安多试验段斜坡路基三个冻融周期的地温和变形监测资料, 发现其人为上限有一定程度抬升 (除阳坡坡脚外), 并表现为阴阳坡不对称; 对比监测期内原天然上限位置和原地面位置的地温值, 相应位置的地温逐年降低, 路基逐年趋于热稳定; 而从变形特征来看, 无论是路基的水平位移还是竖向沉降, 其量值逐年增大, 但发展水平逐年降低, 路基的变形也在逐渐趋于稳定。由此看来, 按照现今设计方案, 安多斜坡路基是合理可靠的。

关键词: 地温, 人为上限, 变形水平, 位移

青藏铁路已穿越了 550km 的多年冻土, 经过近 7 年的研究, 取得了丰硕成果。近年来, 随着输油管道、青藏公路与青藏铁路的修建, 人们越来越重视多年冻土地区的自然斜坡和人工边坡稳定性问题。

Weeks(1969a)^[1], R.J.Chandler(1970a)^[2]用特殊方法分析 Vestspitsbergen 冻土斜坡稳定性, 这种分析方法称为“冰堵法”, 其实质就是认为, 融土的下卧层阻止了孔隙水的向外排出, 从而形成了超孔隙水压力; Skempton 和 Hutchinson(1957a)^[3]认为在富冰粘土斜坡中, 引起失稳的主要原因是形成了超孔隙水压力; Luis E.Vallejo(1980a)^[4]在分析冻土斜坡时提出建设性的想法, 认为斜坡失稳可以由两个方面组成; 由 E.C.McRoberts 和 N.R. Morgenstern(1974a)^[5]提出, 由 D.E.Pufahl 和 N.R.Morgenstern(1979a)^[6]改进, 引用固结比 R 分析斜坡稳定性; Foriero 等(1998a)^[7]和 Charles Harris 等(2000a)^[8]把蠕变本构关系引入到冻土边坡稳定性分析中。国内关于冻土边坡的研究较少, 吴玮江 (1997a)^[9]分析黄茨滑坡时, 提出季节性冻结滞水促滑效应, 认为季节性冻融作用可导致斜坡体内地下水的富集和扩展, 斜坡内的土体大范围的软化样式强度降低, 静水压力和动水压力的增大等冻结滞水的效应, 从而影响到斜坡的深部, 降低其整体稳定性, 加速了变形破坏过程, 从而促发滑坡形成。牛富俊 (2002, 2004a)^[10,11]对青藏高原失稳进行分类, 既包括崩塌型、蠕变型、泥石流阶地型、表土植被层蠕滑型及热融滑塌等, 并青藏高原风火山北侧北麓河地区具体边坡进行分析, 并提出相应的计算安全系数的计算公式, 文中对当地进行温度和水分

的监测分析, 但并未对水分和温度场进行耦合分析, 提出的计算公式也只限于极限平衡法。靳德武(2005a)^[12]提出了低角度的下冻土斜坡特殊的破坏机理, 即质点迁移效应和滞水润滑效应; 靳德武(2004a)^[13]应用有效应力原理推导了不同渗流条件下无限坡稳定性分析计算公式, 绘制出不同坡度、不同含水

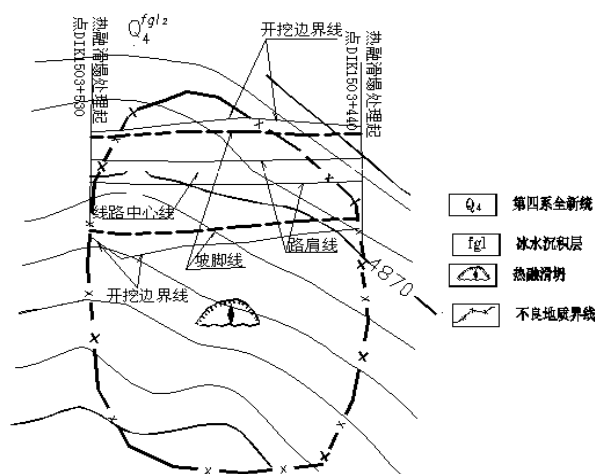


图 1 热融滑塌位置示意图

率场进行耦合分析, 提出的计算公式也只限于极限平衡法。靳德武(2005a)^[12]提出了低角度的下冻土斜坡特殊的破坏机理, 即质点迁移效应和滞水润滑效应; 靳德武(2004a)^[13]应用有效应力原理推导了不同渗流条件下无限坡稳定性分析计算公式, 绘制出不同坡度、不同含水

¹本课题得到铁道部科技研究开发计划项目(2001-D-03)的资助。

条件下的无限斜坡稳定性分析图表。前人的研究仅仅局限于冻土天然斜坡的稳定性分析，对工程结构物和地基土结合的稳定性问题研究较少，尚未有在多年冻土区内填筑斜坡路基实例。

青藏铁路安多段斜坡路基试验段起始里程为DK1503+480~DK1503+580，总计长度100m，共设置三个断面，其中两个断面设置在热融滑塌区内，而另一个设置在热融滑塌区外，作为比较断面，图1为试验段热融滑塌区的平面位置图。试验段路基宽度是8.3m，路基中心高度6.9m~7.7m。在试验段在高含水量、强降雨、地震高发的高温极不稳定冻土区斜坡地段填筑路基，斜坡路基的不稳定与否关系到设计的正确性和铁路的运营安全，因此需要对此地段路基进行稳定性监测，监测的项目包括路基地温和变形。

1. 试验段的工程地质条件

青藏铁路安多试验段位于尕勒布曲河谷区，地处唐古拉山南坡70km，青藏高原腹地的多年冻土区内，线路行进于红岭越岭地段。试验段工点范围内地势开阔，地形呈斜坡，坡度10°~20°，海拔为4850~4900m之间，路堤右侧地势较左侧起伏大。研究区段属青藏高原湿润气候区，一年内冻结时间长达7~8个月，年平均气温为-2.9℃。

地层条件为：1. 粉质粘土(Q⁴)，棕黄色—棕红色，厚1~4m，主要分布于地表，粘性较强，手搓具粉感，土质不均，含少量卵砾石；2. 含土冰层，浑浊状，厚度小于3m，以透镜体分布于上限以下风化泥岩中，融陷；3. 泥岩(JMs)棕红色，主要分布于地表以下，局部出露于地表，泥质结构，块状构造，泥钙质胶结，夹有砂岩。

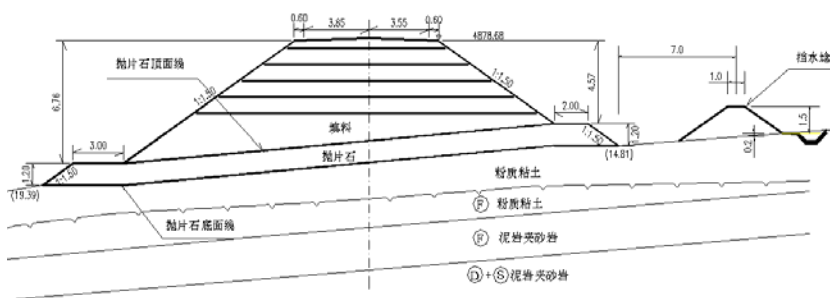


图2 DK1503+480断面路基结构图(滑塌区)

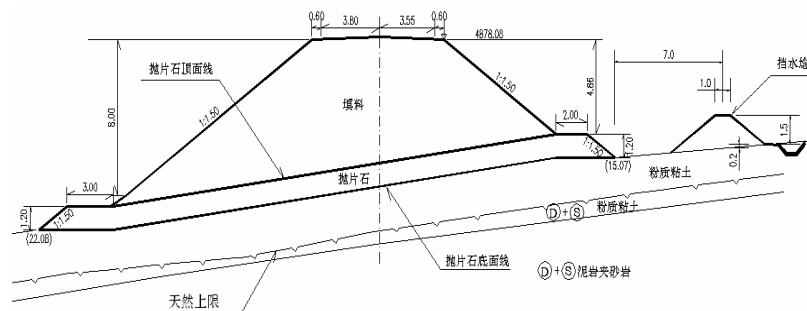


图3 DK1503+580断面路基结构图(滑塌外)

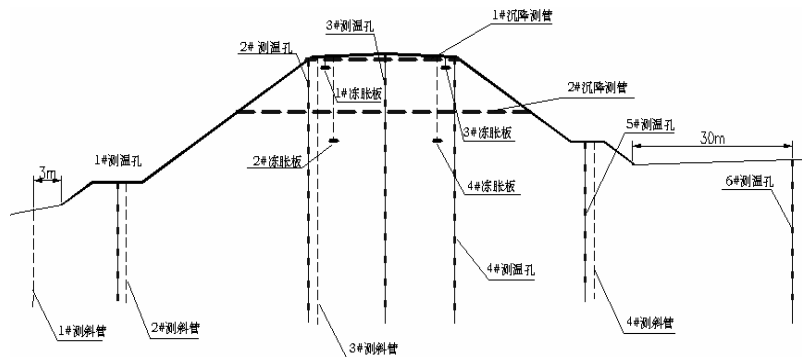


图4 斜坡路基测试项目布置图

2. 试验段的路基结构形式及监测项目布置

考虑到冻土斜坡路基的特殊性，试验断面采取的主要工程措施有：1) 在斜坡路基上游侧，设置挡水埝用来隔离地表水；2) 挖除热融滑塌的地表土，在路基下部，铺设抛片石来主动冷却路基，并利用抛片石排泄路基内的自由水。3) 在热融滑塌段内的路基设置土工格栅，抑制路基的纵向裂缝的发生和发展，热融滑塌区内的两个断面设置是相同的。

试验段测试项目，在一个断面内布置 6 个测温孔，分别为天然孔、阴阳坡脚孔、阴阳路肩孔及中心孔。(2) 每一断面两侧路肩布置沉降监测线，冻胀板每测线 2 个，分别位于路肩以下 25cm 和原始地基表面处；(3) 每断面在下游路肩、两侧坡脚和下游侧布置监测水平位移的竖向测斜管 4 根。

3. 冻土斜坡路基地温测试结果分析

路基的填筑，改变天然土体的传热效果，使土体内水分的状态发生变化，从而使土体强度发生剧烈变化。青藏铁路的设计原则为保护冻土，因而，路基填筑是否保护了冻土，这是衡量其设计是否正确合理的重要指标。而冻土路基内人为上限的变化，也是斜坡路基稳定性的关键所在。

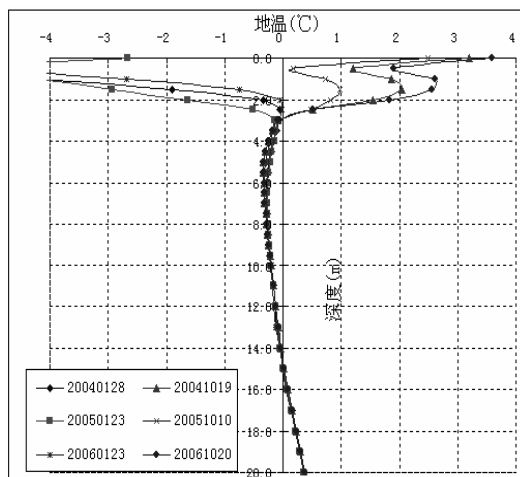


图 5 DK1503+480 断面天然测温孔的地温曲线

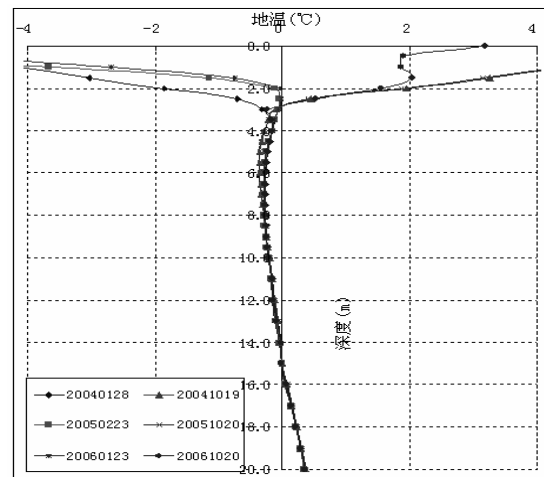


图 6 DK1503+580 断面天然测温孔的地温曲线

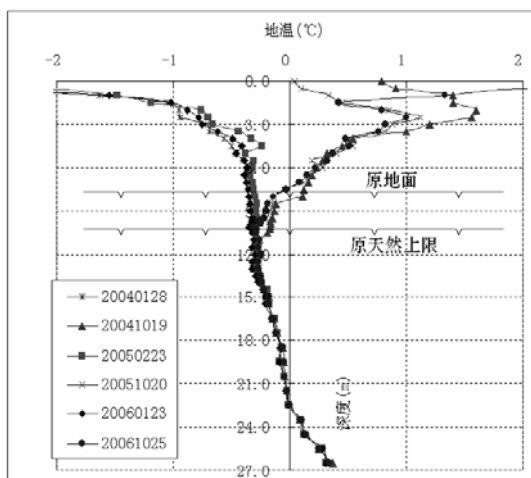


图 7 断面 DK1503+480 路基中心孔地温线图

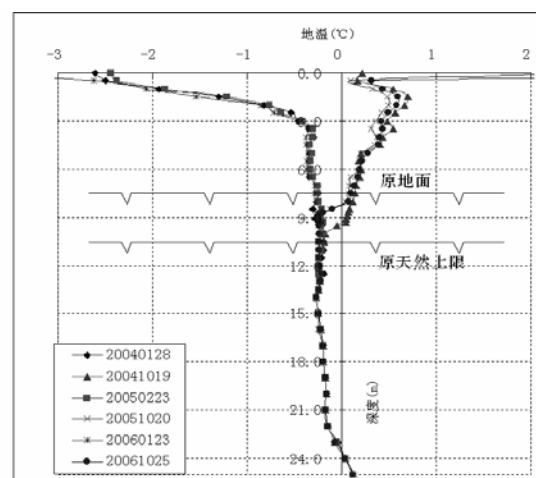


图 8 断面 DK1503+580 路基中心孔地温线图

本文分析监测得到的路基地温场出发,判断路基中人为上限的变化。图 5 和图 6 分别为 DK1503+480 (滑塌区内) 和 DK1503+580 (滑塌区外) 天然测温孔地温线。从两图对比可以看出,两个断面的天然测温孔几乎没有年度变化,地温形式几乎雷同,冻土上限在 2.9m 附近,年平均地温 $T_{cp}=-0.32^{\circ}\text{C}$;在地面下 16m 左右为多年冻土下限,冻土厚度约为 13m。

从两个对比断面的中心测温孔来看,人为上限以下,冻土的地温基本在 -0.3°C ,而路基面下-23m 左右,为多年冻土下限,其多年冻土厚度在 16m 左右。

DK1503+580 中心孔的人为上限在 2004 年抬升 1.5m,而在 2005 年其抬升值为 2.4m,接近抛片石底面。人为上限以下,冻土的地温基本在 -0.3°C ,而路基面下-24m 左右,为多年冻土下限,其多年冻土厚度在 15m 左右。

表 1 中心测温孔暖季地温比较($^{\circ}\text{C}$)

年份	DK1503+480(滑塌区内)		DK1503+500(滑塌区内)		DK1503+580(滑塌区外)	
	基底处	原上限处	基底处	原上限处	基底处	原上限处
2004	0.16	-0.17	0.19	-0.05	0.14	-0.18
2005	0.12	-0.29	0.13	-0.21	0.07	-0.23
2006	0.08	-0.31	0.11	-0.20	0.10	-0.25

表 1 为斜坡路基中心孔在基底处与原天然上限处的地温变化比较表,从表 1 中可以看出,从 2004 年到 2006 年的地温,在路基基底和原天然上限处,地温逐年降低,原天然上限处的地温在 2004 年度均为负值,说明原天然上限位置已经处于冻结状态。热融滑塌区内与区外,路基中心孔的地温变化是相同的。

图 9~图 11 为三年测试期的人为上限变化图,从路基人为上限变化图来看,人为上限在逐年上升,各断面的人为上限都抬升至片石底面,只有阳坡坡脚孔的人为上限是降低的,说明路基采用的工程措施能保护冻土路基的稳定性。

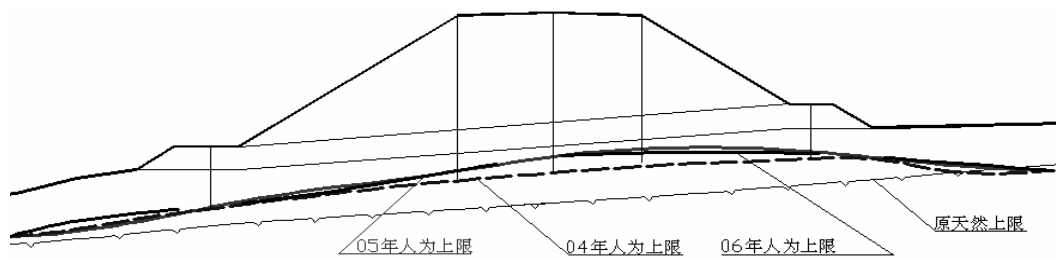


图 9 断面 DK1503+480 人为上限变化图

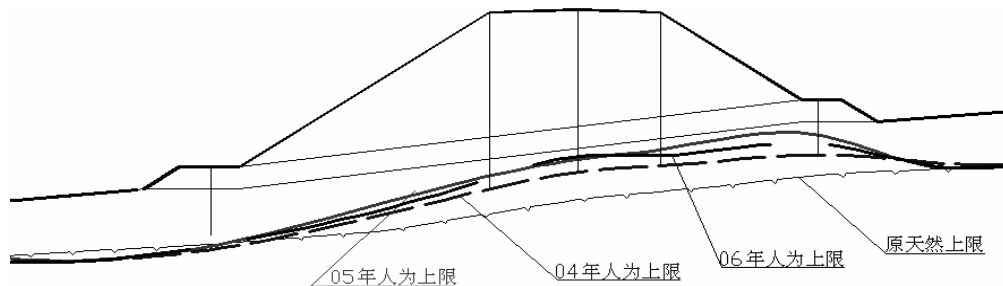


图 10 断面 DK1503+500 人为上限变化图

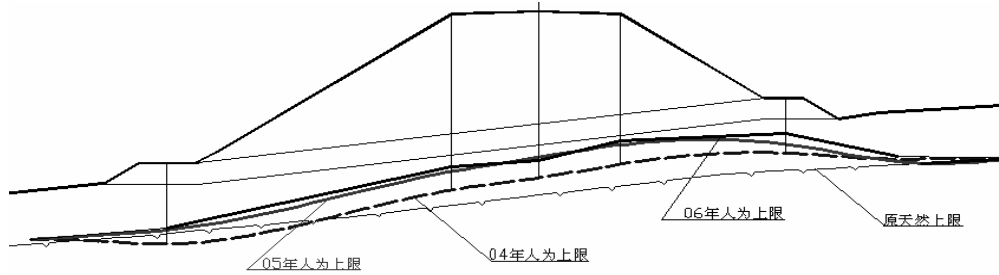


图 11 断面 DK1503+580 人为上限变化图

4. 冻土斜坡路基变形测试结果分析

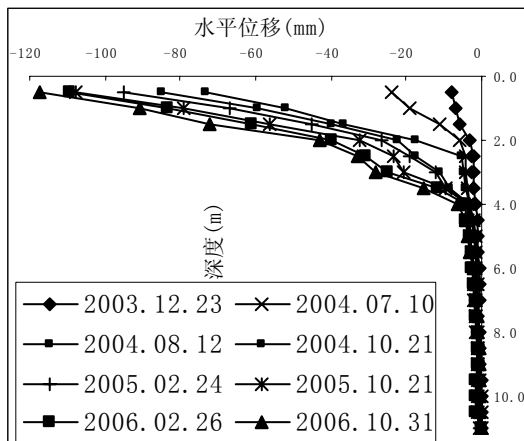


图 12 断面 DK1503+480 阳坡坡脚侧水平位移

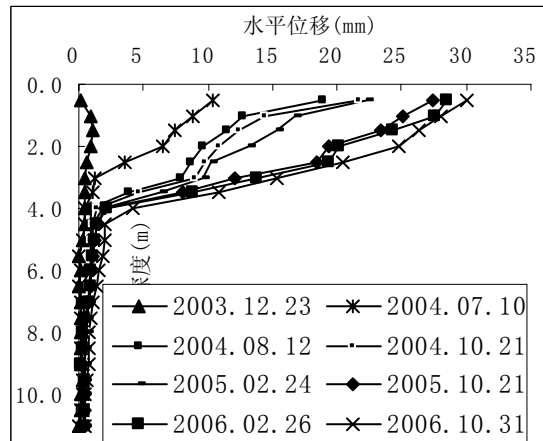


图 13 DK1503+480 阴坡侧坡脚水平位移

从图 12 可以看出,DK1503+480 断面阳坡坡脚的水平位移量较大,最大达到了 117.6mm,在 4.0m 以上土体发生较大位移,说明路基填筑和底层托换时,影响了地基土的热稳定性,使阳坡坡脚处受到较大的热扰动;2003 年 11 月份至 2004 年 12 月份,其水平位移累积达 89.2mm,而从 2004 年 12 月份以后逐渐趋于缓和,至 2005 年年度位移量为 16.9mm,而 2006 年年度位移量仅为 7.1mm,说明路基水平位移趋于缓和,路基所采取的措施基本可行。

从图 13 可以看出,DK1503+480 断面的阴坡坡脚的水平位移指向路基外侧(地形上游侧),水平位移主要发生在 4.0m(人为上限处)以上土体,最大侧向位移量为 30.1mm,其累积水平位移随时间增加而增大,但增大趋势逐渐趋于缓和,说明阴坡坡脚侧向位移也逐渐趋于稳定。

从图 14 与图 15 可以看出,对于热融滑坍区外(DK1503+580 断面)阳坡坡脚处的侧向位移均指向路基外侧,但其变形量较小,只是热融滑坍区内的 29.7%和 93.7%(见表 2)。滑坍区内、区外的阴坡坡脚处侧向位移相当,且方向与各自阳坡侧变形相反,说明坡脚的侧向位移不是路基体的整体滑动,而是在路基体本身的重力与列车荷载的作用下的侧向挤出,从而进一步说明,当前的设计方案可以阻止热融滑坍的发展。热融滑坍区外(DK1503+580 断面),阳坡坡脚的水平位移最大发生在孔口位置,其最大侧向位移为 34.9mm,而侧向位移是逐渐趋附于缓和的。

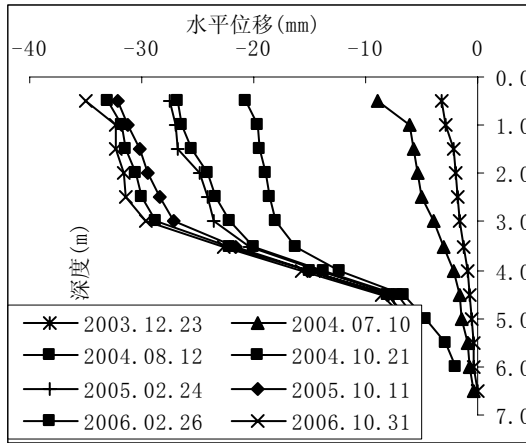


图 14 DK1503+580 阳坡侧坡脚水平位移

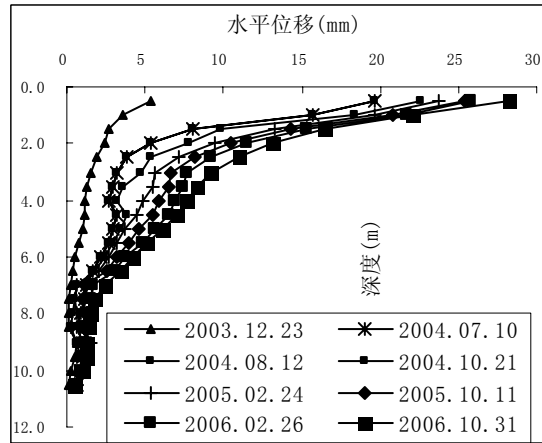


图 15 DK1503+580 阴坡侧坡脚水平位移

表 2 热融滑塌区内与区外侧向位移比较

	不同区域的水平位移(mm)		所占比例(%)
	滑塌区内 (DK1503+480)	滑塌区外 (DK1503+580)	
阳坡坡脚	-117.6	-34.9	29.7
阴坡坡脚	30.1	28.2	93.7

路基垂向变形以沉降为主，暖季的沉降量较大，寒季沉降量较小，且在寒季没发现明显的冻胀现象。从 DK1503+500 断面的沉降曲线（图 16）可以看出，在 2004 年 8 月，由于辅轨通过本试验段，出现了较大程度的沉降，阳坡侧沉降量达到了 50mm 左右；由于斜坡路基的几何不对称和阴阳坡不对称，造成路基两侧沉降不对称。

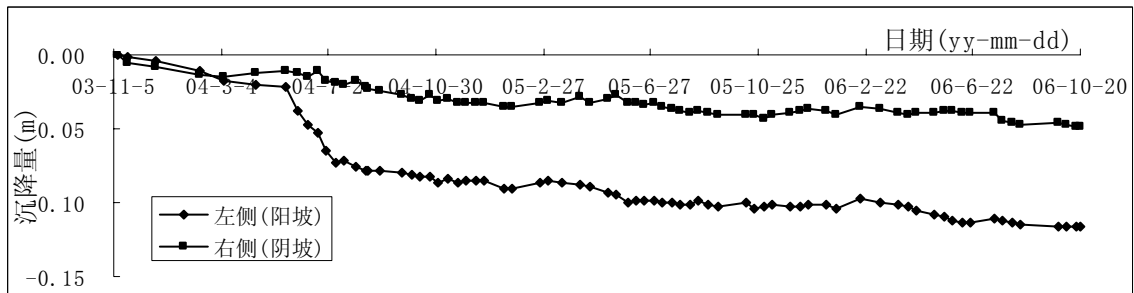


图 16 DK1503+500 断面阴阳坡差异沉降对比图

说明路基的沉降主要出现在第一暖季，属于施工影响和热扰动阶段。而到热扰动削弱渐消失阶段，路基沉降量就逐渐趋于稳定。只要保持路基内的冻土条件，就能满足铁路运营的安全。

从对比断面（图 17）来看，沉降特征类似于热融滑塌区内的现象，在通车时刻也未出现较大的沉降变形，而在第一个暖季后，就出现了阴阳坡沉降差异，而在监测期后两年，沉降差异没有继续增大。说明到目前为止，对比断面的热扰动尚未完全消失，但在逐渐减弱，路基沉降也逐渐趋于稳定。

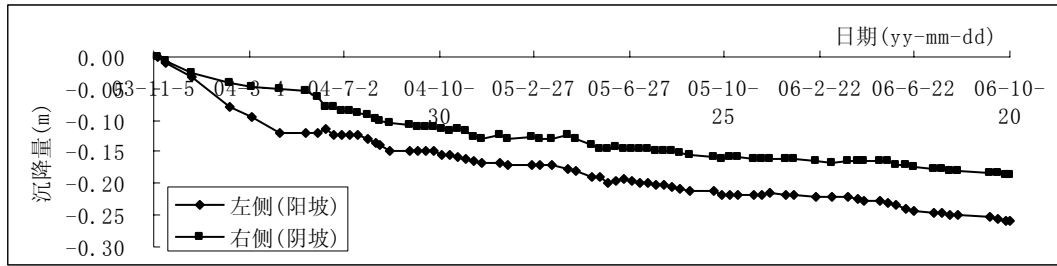


图 17 DK1503+580 断面阴阳坡差异沉降对比图

5. 结论

通过对青藏铁路斜坡路基现场的地温、变形的监测后认为，按现今的设计方案，从保护冻土和确保斜坡路基稳定性角度考虑是合理可靠的。通过了三个冻融周期的资料分析，路基填筑后，其人为上限有了明显的抬升，且逐渐进行路基本体，说明了片石路基在高温极不稳定冻土区也能发挥其降温效果；从变形角度来看，滑塌区内区外的现象基本相同，说明目前的设计方案也能满足斜坡路基的稳定性要求；由于路基的坡向不对称和几何不对称，造成了路基沉降的不对称，建议采用一定的补强措施，消除其不利影响。

参考文献

- [1] Weeks A G. The stability of natural slopes in south- east England as affected by periglacial activity[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1969, 2: 49-63
- [2] Chandler,R.J. Solifluction on low-angled slopes in Northamptonshire[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1970.3, pp. 65-69
- [3] Skempton,A.W., and Delory, F.A. Stability of natural slopes in London clay. Proceedings[J], 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, England, 1957.vol. 2, pp.278-381
- [4] Luis E.Vallejo, A new approach to the stability analysis of thawing slopes[J], Canadian Geotechnical Journal, 1980.17, pp.607-612
- [5] McRoberts E.C. and Morgenstren N.R., Stability of slopes in frozen soil[J], Mackenzie valley, N.W.T. Canadian Geotechnical Journal, 1974.11, pp.554-573
- [6] Pufahl D.E. and Morgenstren N.R., Stabilization of planar landslides in permafrost[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979.16, pp.734-747
- [7] Foriero A., Ladanyi B., Dallimore S.R., Egginton P.A., and Nixon F.M., Modelling of deep seated hill slopes creep in permafrost[J], Canadian Geotechnical Journal, 1998.35, pp.560-578
- [8] Charles Harris and Antoni Lewkowicz G, An analysis of the stability of thawing slopes[J], Ellesmere Island, Nunavut, Canada. Canadian Geotechnical Journal, 2000. 37, pp.449-462
- [9] 吴玮江, 季节性冻结滞水促滑效应-滑坡发育的一种新因素[J], 冰川冻土, 1997, Vol.19, No.4:359-365
- [10] 牛富俊, 张鲁新, 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, Vol.24, No.5:608-613
- [11] 牛富俊, 程国栋等, 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, Vol.26, No.3:402-406
- [12] 靳德武, 孙剑锋, 付少兰, 青藏高原多年冻土区两类低角度滑坡灾害形成机理探讨[J], 岩土力学, 2005, 26 (5): 774-778
- [13] 靳德武, 青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究[学位论文], 西安: 长安大学, 2004

Analyzing on Character of Ground Temperature and Deformation of Embankment upon Slope in Qinghai-Tibet Railway

Shen Yupeng¹, Xu Zhaoyi¹, Wang Lianjun¹, Zhang Lixin^{1,2}

1 School of Civil & Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing (100044)

2 Administration Headquarters of Qinghai - Tibet Railway Construction, Germu (816000)

Abstract

By analyzing the information of embankment upon slope in Qinghai-Tibet Railway in three freeze-thaw periods, its artificial upper limit rises in a certain extent what shape appear asymmetric between north and south slope except southern foot. Comparing the ground temperature to different time at the location of nature upper limit and the ground surface, the temperature falls year after year on the corresponding place. Not only horizontal displacement but vertical settlement behaves accumulative and gradual reducible year and year, so the embankment is incline to stabilize from the deformation analyzing. In a word, the present program of is reasonable and credible on embankment upon the slope in Anduo Section in Qinghai-Tibet Railway.

Keywords: ground temperature; artificial upper limit; deformation; horizontal displacement

作者简介: 沈宇鹏, 1977年6月出生于浙江省嵊州市, 现为北京交通大学土建学院交环所教师, 研究方向为寒区路基工程。