

多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析

丑亚玲¹, 盛煜², 韦振明³

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省有色金属地质勘查局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于青康公路阴阳坡效应显著路段——K369 路段路基的地温、变形监测资料, 研究路堤内阴阳坡温度场差异及其对冻土路堤变形以及路堤稳定性的影响, 分析路基地温、变形特征及其相互关系。研究表明: (1) 冻土路基在横断面上的差异沉降变形和其下地温场分布的不对称状况密切相关, 地温场状况及其变化控制和决定着冻土路基变形场的状况; (2) 坡向不同而引起的太阳辐射差异是造成阴阳坡热交换不对称的根本原因, 也是造成路基横向差异沉降的根本原因; (3) 路基变形的发展较地温的发展有一个相对滞后的响应, 这决定了路基最大沉降并不是发生在最大融化深度的时间。对有差异沉降的路基来说, 阴阳坡两侧路基发生最大沉降的时间也不一致, 阳坡一侧达到最大沉降的时间要滞后于阴坡。这种差异变形会随着时间加剧, 最终导致路基纵向裂缝的发育进而严重影响路基的稳定性。

关键词: 土力学; 冻土路基; 温度场; 阴阳坡; 不对称性; 太阳辐射; 差异变形

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)09 - 1896 - 08

TEMPERATURE AND DEFORMATION DIFFERENCES BETWEEN SOUTHERN AND NORTHERN SLOPES OF HIGHWAY EMBANKMENT ON PERMAFROST

CHOU Yaling¹, SHENG Yu², WEI Zhenming³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Gansu Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Based on the observation data of the embankment in test section K369, the characteristics of the ground temperature and the deformation of the embankment are analyzed; and the relationship between the ground temperature and the deformation is presented. The observation data indicate: (1) the embankment transverse deformation difference has close relationships with the ground temperature transverse difference of the embankment, and it is controlled by the ground temperature state and its variation; (2) the difference of solar radiant amount on slopes results in transverse thermal difference in the embankment, and also leads to the transverse uneven settlement difference; and (3) the development of embankment deformation lags behind the development of embankment temperature, so the time of the largest settlement deformation is not equal to that of the maximum thaw depth. For the embankment with uneven deformation, the times of the largest settlement deformation on two sides of embankment are different; and the time of the largest settlement deformation on the south side is later than that on the north side of the embankment. The deformation difference will be aggravated with time; and finally the embankment stability is affected by longitudinal cracks of embankment caused by

收稿日期: 2009 - 01 - 04; **修回日期:** 2009 - 04 - 16

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(90102006); 兰州理工大学博士基金项目(BS04200905)

作者简介: 丑亚玲(1976 -), 女, 1998年毕业于昆明理工大学矿物加工工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: chouyaling@lzb.ac.cn

asymmetric settlement of permafrost.

Key words: soil mechanics; permafrost embankment; temperature field; southern and northern slopes; asymmetry; solar radiation; uneven deformation

1 引言

多年冻土是地-气系统热量交换的产物, 与其他土类相比较, 最大特点就是水、热、力等性质不稳定^[1]。在多年冻土区修筑道路工程后, 由于气候变化和工程作用的热扰动作用, 改变了大气与地表的热交换条件, 打破了原有的热平衡状态, 发生了地-气系统间能量的重新响应过程^[2~6]。当修筑的路基具有阴阳坡时, 坡向受热的差异必然产生, 使路基当中的地温分布状态在阴阳坡两侧表现出较大的差异, 这一现象无论在高温区还是低温区都同样存在^[7]。这种阴阳坡的热差异将会带来路基两侧不平衡的冻融状态, 最终会导致路基不可避免地发生变形, 甚至破坏^[8, 9]。张建明等^[10]认为, 冻土路基沉降变形主要由路基下多年冻土的融沉变形、融化压缩变形及高温冻土的压缩变形组成, 并提出了相应的计算模型。温智等^[11]通过建立路基热弹塑性融沉压缩本构模型, 进行温度场和变形场的单向耦合分析, 认为冻土融化产生的变形是冻土路基变形的主要因素。孙增奎等^[12]通过对青藏铁路高温细粒多年冻土区试验路段路堤温度场和变形的检测, 指出阴阳坡土体融化时间和融化厚度都得不一致是造成路堤不均匀变形的主要原因。王铁行^[13]采用考虑拉破坏的热弹性力学方法, 分析得到多年冻土区路基变形分布和演变规律, 并对冻土路基纵向裂缝的机制进行了研究。马巍等^[14]通过对青藏高原不同结构路基温度场和路基变形的检测, 认为目前青藏高原不同结构路基的变形整体上以高温冻土的压缩变形为主。

由于多年冻土特殊的热-力学性质, 随着路面形式、路基走向等工程措施的不同, 其结构稳定性将发生相应的变化, 并且温度对多年冻土地区路基稳定性起着控制和决定性作用。尤其对于处于高温冻土区, 同时具有沥青路面和阴阳坡走向明显的路基而言, 其热不稳定性更加显著, 从而更易引起路基变形破坏。但这方面定量的研究颇少, 主要原因是缺乏实际观测资料。青康公路 K369 段属高温多年冻土, 地质雷达勘探表明, 此段为厚层地下冰多年冻土段, 并且路基存在显著的阴阳坡差异。因此,

为了研究高温高含冰量的不稳定多年冻土区阴阳坡温度差异及变形差异, 布设了详细的地温、变形监测断面。

2 试验段概况

214 国道(青康公路)姜路岭至清水河段属寒温带大陆性气候, 全年无夏, 终年寒冷漫长, 昼夜温差大。根据花石峡野外观测站所设的气象站气象资料(花石峡位于 214 国道 K416+300 处)可知: 年平均气温 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年极端最高气温达 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年极端最低气温达 $-32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此段降水充沛, 年降水量达 $500\sim 600\text{ mm}$, 全年降水期集中于 7~8 月, 终年飘雪, 固体降水量占降水量的比重较大, 达 70% 左右。该路段地处冲、洪积平原, 地表植被稀疏, 覆盖率不足 10%, 路基南侧取土方后形成水坑, 数量较多, 远处山地植被覆盖率不足 10%, 路基北侧地表潮湿, 有积水坑, 较南侧少。试验地段地面高程 4 180 m, 路基填土高度 2.4~2.7 m(中心), 路基填料为碎石土, 路基边坡坡度为 1:1.5, 路基横剖面的几何形状大致呈正梯形。多年冻土天然上限 2.7 m, 多年冻土年平均地温为 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 属高温不稳定多年冻土区。

3 监测情况介绍

2003 年在 K369 路段铺设了抛碎石护坡试验段和普通路基段。抛碎石护坡试验段设计情况见表 1。公路纵向走向为 $WS24^{\circ}$ (按公路前进方向), 路基修筑后左边坡为阳面, 右边坡为阴面。护坡抛碎石厚度为 80 cm, 抛石粒径为 6~8 cm, 为抛碎石护坡。

表 1 抛碎石护坡试验段设计情况

Table 1 Design of crushed rock revetment embankment

里程编号	观测断面	试验段描述
K369+000~K369+150	K369+100	普通路基段(沥青路面)
K369+850~K369+250	K369+210	抛碎石护坡试验段(沥青路面)
K369+250~K369+900	K369+860	抛碎石护坡试验段(水泥路面)

图 1 给出了路基横截面形式及测温孔的布置。

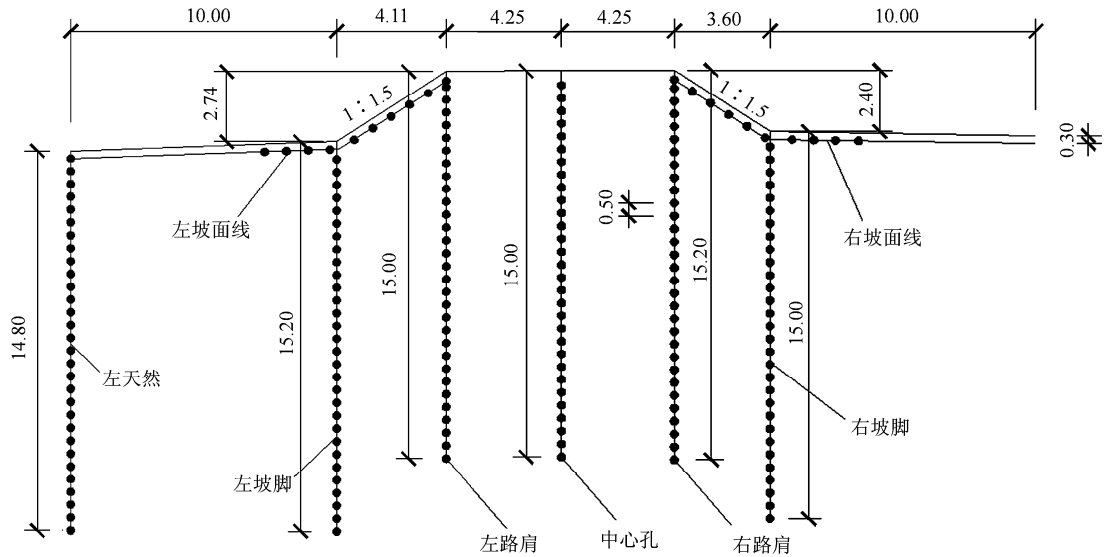


图1 路基横截面形式及测温孔的布置示意图(单位: m)

Fig.1 Sketch of observation transverse section and temperature holes(unit: m)

测试断面的测温探头采用热敏电阻,用高精度数字式万用电表现场量测其电阻值,然后根据室内标定的回归方程换算出各测点的温度。采用人工观测,观测频率为2次/月。本文采用该试验段测试断面从2003年7月~2006年7月三个冻融循环比较完整的地温观测资料来探讨多年冻土区公路路基横向热状况的不对称性。

在K369+100断面附近每隔20m布设变形监测断面(共4个),图2给出了变形监测断面平面示意图,各断面从左路肩(阳面)到右路肩(阴面)检测点序号依次为1~12。变形采用电子水准仪测量,测量精度为1.0mm。

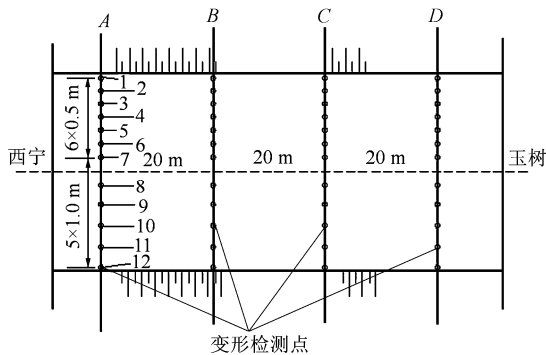


图2 变形监测断面平面示意图

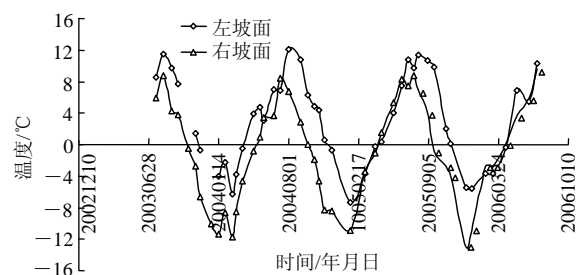
Fig.2 Plan sketch of deformation monitoring

4 监测结果

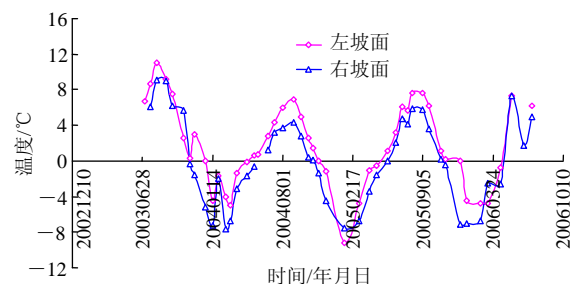
4.1 温度分析

4.1.1 边坡浅部地温比较

对冻土路堤而言,影响横向热差异问题的最主要表现因素是阴阳坡地表温度的差异。将左右坡面上同一浅地层深度(0.3m)不同监测点测得的温度分别进行平均,所得值代表左右坡面上的浅地层温度。图3分别为K369+100, K369+210和K369+860路基左、右坡面浅地层(0.3m)温度随时间的变化过程曲线。图4分别为各断面左、右坡面浅地层(0.3m)温度随时间的变化过程曲线。从图3可以看出,阳坡的温度总是高于阴坡,即使铺了碎石护坡也没有完全消除阴阳坡现象。



(a) K369+100段



(b) K369+210段

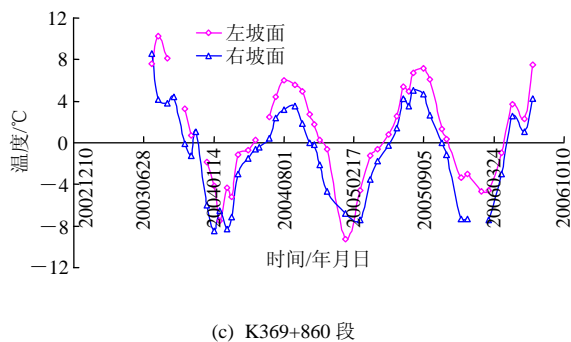
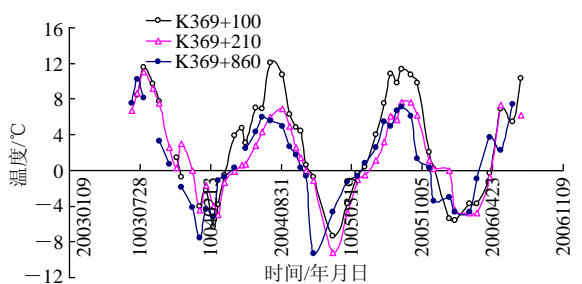
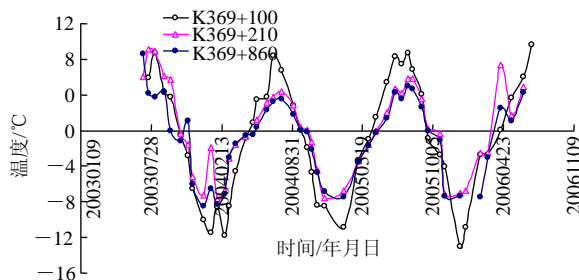


图 3 不同断面路基左、右坡面浅地层(0.3 m)温度随时间的变化过程曲线

Fig.3 Shallow ground temperatures at the depth of 0.3 m under slope surface changing with time of different sections



(a) 左坡面



(b) 右坡面

图 4 不同坡面路基浅地层(0.3 m)温度随时间的变化过程曲线

Fig.4 Shallow ground temperatures at the depth of 0.3 m changing with time under different surfaces

表 2 给出了路基周边浅表层温度特征值统计情况。表 3 给出了各断面边坡下 0.3 m 深度处 3a 平均地温比较, 数据采用 2003 年 7 月~2006 年 6 月 3 a 数据的平均值。抛碎石护坡在阳坡下 0.3 m 处地温要比同等深度处对比断面处地温低 2 °C 左右, 抛碎石护坡路基阴阳坡在 0.3 m 处年平均温差比同等深度处对比断面处地温差低 2 °C 左右。这说明采取抛碎石护坡措施以后, 可以降低路基周边温度, 增强路基的热稳定性, 有利于保护或延缓多年冻土退化, 间接地减小多年冻土区公路路基病害发生, 减轻公路路基病害, 在一定程度上减缓了路基横向热差异问题。

4.1.2 地温场曲线对比

图 5 分别给出了青康公路 K369+100, K369+210, K369+860 段 2005 年 11 月 10 日地温场(此时路基下基本达到最大融深)。可以看出, 由于路基两侧边坡不同的热边界条件, 路基中的温度场分布的非对称性是非常显著的, 路基中的温度整体上呈现左高右低的不对称现象, 多年冻土上限也表现为左侧深, 右侧浅。抛碎石护坡起到了降低路基边坡温度, 可以达到保护路基下伏多年冻土的作用, 但并没有完全消除阴阳坡现象。

4.2 变形分析

图 6 分别给出了青康公路 K369+100 段变形发展过程(图中的横坐标均指离左路肩的距离, 在离左路肩 3 m 的部位(点 6 附近)沉降变形突变上升是因为在该位置有裂缝出现行车绕行, 受两侧行车荷载的挤压而上翘, 与路基本身的沉降变形无关)。4 个变形监测断面各监测点的变形发展规律比较一致, 在 2003, 2004 年 12 月份左右各断面各点沉降变形在年度内达到最大, 但阳坡一侧达到最大变形的时

表 2 路基周边浅表层温度特征值统计表

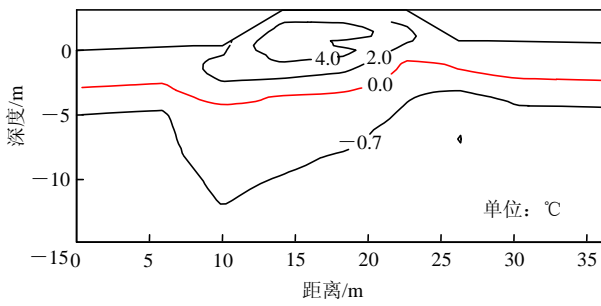
Table 2 Statistical results of all kinds of annual temperature indices

°C

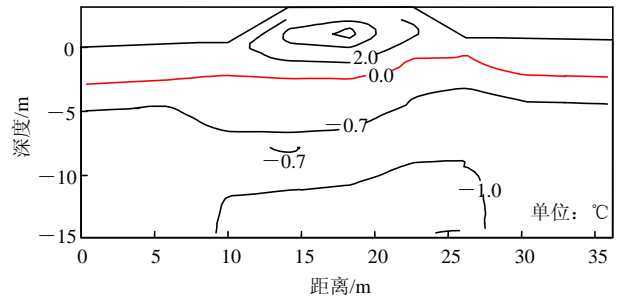
断面	位置	2003 年 7 月~2004 年 6 月				2004 年 7 月~2005 年 6 月				2005 年 7 月~2006 年 6 月			
		平均温度	最高温度	最低温度	变幅	平均温度	最高温度	最低温度	变幅	平均温度	最高温度	最低温度	变幅
K369+100	左坡面	3.01	11.54	-6.31	17.85	3.72	12.06	-7.35	19.40	3.42	11.37	-5.62	16.99
	右坡面	-1.63	8.72	-11.73	20.45	-0.29	8.45	-10.89	19.34	-0.02	9.62	-12.99	22.61
K369+210	左坡面	1.99	11.07	-4.99	16.06	0.49	6.93	-9.19	16.13	2.10	7.64	-4.81	12.45
	右坡面	0.39	9.09	-7.63	16.72	-1.02	4.33	-7.57	11.90	0.21	7.34	-7.15	14.49
K369+860	左坡面	1.29	10.24	-7.52	17.76	0.42	6.00	-9.30	15.30	1.31	7.47	-4.65	12.11
	右坡面	-0.98	8.60	-8.47	17.07	-1.42	3.56	-7.44	11.00	-1.02	5.04	-7.45	12.49

表 3 各断面边坡下 0.3 m 深度处 3 a 平均地温比较
Table 3 Statistical results of annual temperature of 3 years of different section slopes at depth of 0.3 m $^{\circ}\text{C}$

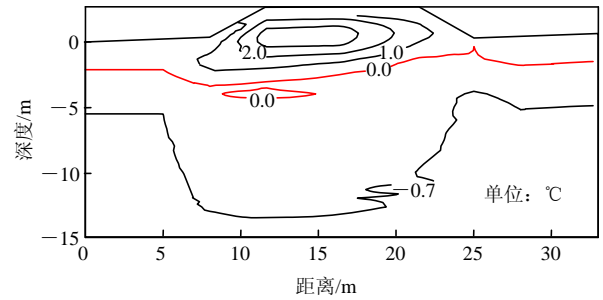
观测断面	左坡面平均地温	右坡面平均地温	左右坡面平均地温差
K369+100	3.39	-0.65	4.03
K369+210	1.53	-0.14	1.67
K369+860	1.01	-1.14	2.14



(a) K369+100 段



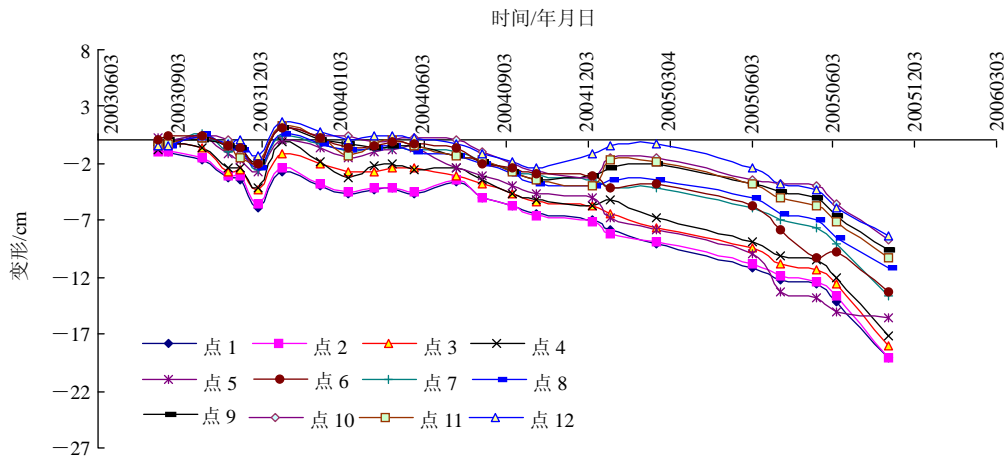
(b) K369+210 段



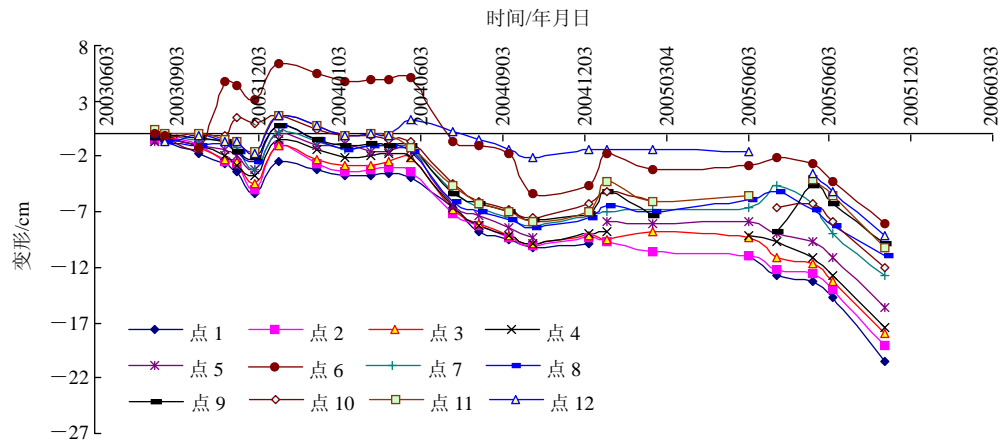
(c) K369+860 段

图 5 不同试验断面地温场

Fig.5 Temperature field of different experimental sections



(a) 断面 A



(b) 断面 B

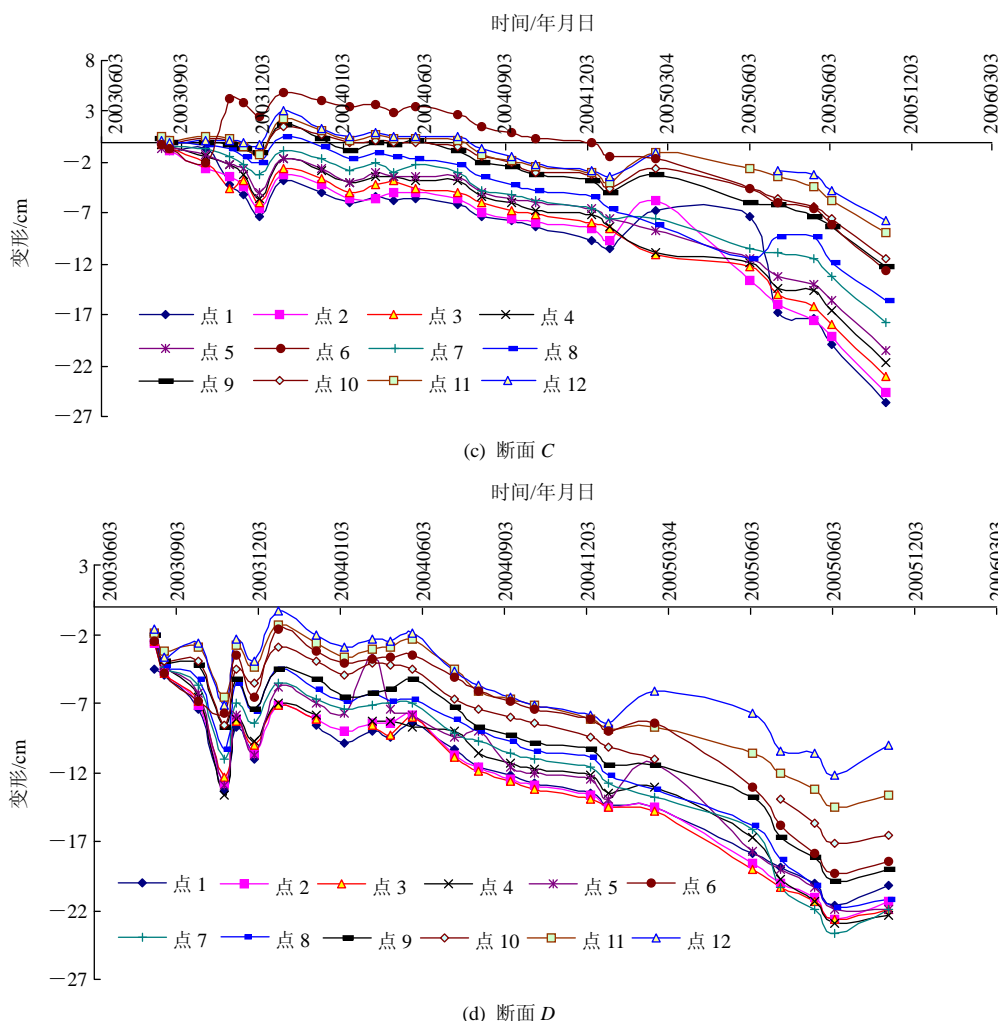


图 6 K369+100 段横断面变形发展过程
 Fig.6 Embankment deformation process of section K369+100

间略滞后于阴坡。比较此段多年冻土达到最大融化深度的时间为 11 月中旬, 而变形的发生有一个滞后的响应, 可以认为每年 12 月前后的沉降反映的是多年冻土的融化引起的沉降变形。随后, 随着多年冻土路基的回冻发生了比较大的冻胀变形, 此段路基各个断面的冻胀都比较大, 考虑到此段路基两侧积水较多, 下部路基填土为细颗粒土为主, 发生较大的冻胀变形也是合理的。在 1 月份达到最大冻胀高度后, 变形基本保持稳定, 一致稳定到约 7, 8 月份, 然后开始新一次的沉降变形。从图上明显可以看出, 该段同期路面横向变形差异巨大, 特别是距离左路肩 3 m 范围内沉降变形非常大, 此范围内沉降和另一部分路基沉降存在明显差异, 因而导致了该段纵向裂缝的发育和发展(K369+100 断面附近约 1 km 路面纵向裂缝破坏十分严重)。通过对路基变形的总体规律和变形特点的研究, 发现路堤阴阳坡温度场、

变形场仍不稳定, 不对称仍在发展。变形的发展和路基温度场及时间密切相关, 断面 C 阴阳坡的变形差异由 2003 年的 7 cm 发展为 2005 年的 20 cm。结合温度场和变形图, 位于阳坡一侧的路基沉降量总是大于阴坡一侧的沉降量。

5 分析与讨论

太阳辐射是导致地表温度和气温变化的最直接因子^[15], 所以路基左右边坡表面的热状况差异与坡面吸收的太阳辐射能之间存在着密切关系。图 7 给出了各监测断面阳、阻坡面实测温度与太阳直接辐射随时间的变化。可以看出, 阴、阳坡面分别获得的太阳辐射日总量随时间的变化趋势与其浅地层 (0.3 m) 温度随时间的变化趋势基本一致, 浅地层温度随时间的变化略滞后于太阳辐射日总量随时间的

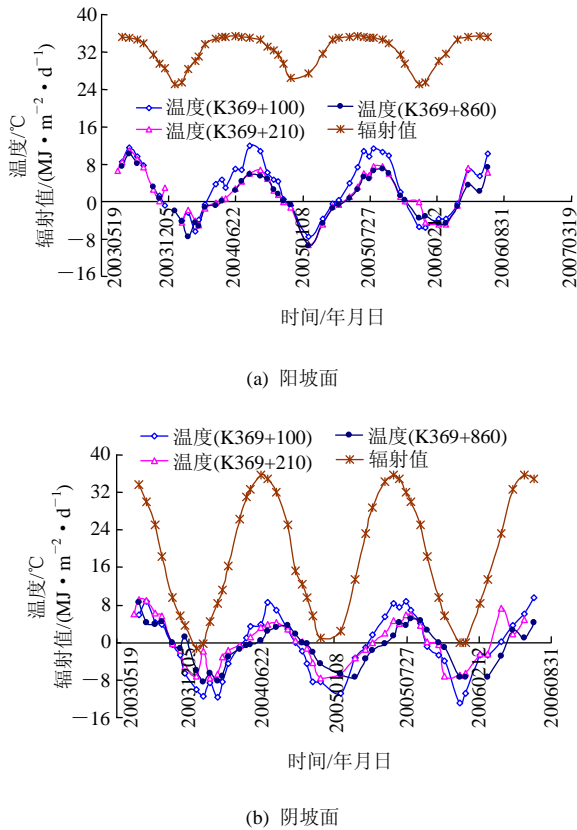


图7 各断面实测温度与太阳直接辐射随时间的变化
Fig.7 Relation of temperature and solar radiation changing with time

变化，说明太阳辐射强度和时间的不同是导致阴阳坡土体温度场横向不对称的根本原因，从而更进一步引起路基不均匀变形。

不论是在路基阳坡还是阴坡，在沥青混凝土还是在水泥混凝土路面下，暖季碎石护坡下温度明显低于普通路基下的温度，说明暖季碎石层起到了隔热作用。在冷季，阳坡上碎石护坡下温度与普通路基下的温度没有明显区别，而在阴坡上碎石护坡下温度明显高于普通路基下的温度，说明冷季碎石层起到了不利于路基散热的一面。该现象与青藏高原独特的气候有关，冷季多大风天气，风直接吹到路基坡面上，在阴坡比铺有碎石层的护坡路基更利于散热，而在阳坡由于坡向的原因吸收更多的太阳辐射，碎石护坡起到保温作用而降低阳坡温度，所以冷季阴阳坡表现出不完全相同的变化规律。在暖季太阳辐射较强，通过碎石层的隔热作用，导致碎石层底部的温度明显低于普通路基边坡的温度。

多年冻土地地区路基的稳定性，最终取决于路基下伏冻土的地温变化和含冰量状况。路基产生较大变形的地段往往是高温高含冰量的不稳定、极不稳

定多年冻土地段。通过路基下伏冻土的地温变化趋势和含冰量情况，基本可以判断路基的稳定性和发生破坏的严重程度。路基下伏多年冻土的温度状况和路基路面的变形紧密相关。温度高的阳坡侧沉降量总是较阴坡侧沉降量大。

6 结 论

根据对青藏高原 214 国道多年冻土区 K369 路段实测地温、变形资料的分析，可以得出：

(1) 冻土路基在横断面上的差异沉降变形和其下地温场分布的不对称状况密切相关，地温场状况及其变化控制和决定着冻土路基变形场的状况。

(2) 坡向不同而引起的太阳辐射差异是造成阴阳坡热交换不对称的根本原因，也是造成路基横向差异沉降的根本原因。

(3) 变形的发展较地温的发展有一个相对滞后的响应，这决定了路基最大沉降并不是发生在最大融化深度的时间。对有差异沉降的路基来说，阴阳坡两侧路基发生最大沉降的时间也不一致，阳坡一侧达到最大沉降的时间要滞后于阴坡。这种差异变形会随着时间加剧，最终导致路基纵向裂缝的发育。

参考文献(References):

[1] 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻土热融下沉研究的现状和进展[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增1): 147 - 150.(YANG Chengsong, HE Ping, CHENG Guodong, et al. Current state and progress of the study on thawing settlement of frozen ground[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(Supp.1): 147 - 150.(in Chinese))

[2] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 解决青藏铁路建设中冻土工程问题的思路与思考[J]. 科技导报, 2005, (1): 23 - 28.(MA Wei, CHENG Guodong, WU Qingbai. Thoughts on solving frozen soil engineering problems in the construction of Qinghai—Tibet Railway[J]. Science and Review Technology, 2005, (1): 23 - 28.(in Chinese))

[3] 孙增奎, 王连俊, 白明洲, 等. 青藏铁路多年冻土路堤温度场的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459.(SUN Zengkui, WANG Lianjun, BAI Mingzhou, et al. Finite element analysis of temperature field of Qinghai—Tibet Railway embankment on permafrost[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459.(in Chinese))

[4] 盛煜, 马巍, 温智, 等. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 197 -

- 3 201.(SHENG Yu, MA Wei, WEN Zhi, et al. Analysis of difference in thermal state between south faced slope and north faced slope of railway embankment in permafrost region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 197 - 3 201.(in Chinese))
- [5] 俞祁浩, 潘喜才, 程国栋, 等. 青藏高原多年冻土区冷却路基技术现场实效监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 045 - 3 051.(YU Qihao, PAN Xicai, CHENG Guodong, et al. Study on main influential factors on ventilated embankment and corresponding measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 045 - 3 051.(in Chinese))
- [6] 祁长青, 吴青柏, 施斌. 青藏铁路高路堤下多年冻土热状态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4 518 - 4 524.(QI Changqing, WU Qingbai, SHI Bin. Analysis of thermal state of permafrost under high embankment along Qinghai—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 518 - 4 524.(in Chinese))
- [7] 刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 10 - 15.(LIU Yongzhi, WU Qingbai, ZHANG Jianming, et al. Deformation of highway roadbed in permafrost regions of the Qinghai—Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 10 - 15.(in Chinese))
- [8] 王铁行, 窦明键. 多年冻土地区路堤热差异分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(1): 45 - 47.(WANG Tiehang, DOU Mingjian. Analysis of transverse thermal difference of embankment in permafrost region[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(1): 45 - 47.(in Chinese))
- [9] 王小军, 韩文峰, 蒋富强, 等. 青藏铁路片石通风试验路基沉降与普通路基裂缝解剖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 904 - 1 911.(WANG Xiaojun, HAN Wenfeng, JIANG Fuqiang, et al. Discussion and analysis of settlement of rubble ventilation embankment and crack of ordinary embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 904 - 1 911.(in Chinese))
- [10] 张建明, 刘端, 齐吉琳. 青藏铁路冻土路基沉降变形预测[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 12 - 17.(ZHANG Jianming, LIU Duan, QI Jilin. Estimation on the settlement and deformation of embankment along Qinghai—Tibet Railway in permafrost regions[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 12 - 17.(in Chinese))
- [11] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 多年冻土区铁路保温路基变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1 670 - 1 677.(WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Study on deformation characters of railway insulation embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 670 - 1 677.(in Chinese))
- [12] 孙增奎, 王连俊, 白明洲, 等. 青藏铁路高温细粒多年冻土路堤变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 190 - 4 194.(SUN Zengkui, WANG Lianjun, BAI Mingzhou, et al. An experimental study on deformation of railway embankment in high-temperature and fine-grained permafrost regions along the Qinghai—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 190 - 4 194.(in Chinese))
- [13] 王铁行. 多年冻土地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 1 - 5.(WANG Tiehang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 1 - 5.(in Chinese))
- [14] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 571 - 579.(MA Wei, LIU Duan, WU Qingbai. Analysis and monitor on deformation of embankment along the Qinghai—Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 571 - 579.(in Chinese))
- [15] 胡泽勇, 钱泽雨, 程国栋, 等. 太阳辐射对青藏铁路路基表面热状况的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 121 - 128.(HU Zeyong, QIAN Zeyu, CHENG Guodong, et al. Influence of solar radiation on embankment surface thermal regime of the Qinghai—Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 121 - 128.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 陈宗基讲座: 岩石爆炸动力学的若干进展;
- (2) 基于数值应力场的极限平衡法及工程应用;
- (3) 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析;
- (4) 基于非稳定渗流随机有限元的隧洞涌水量预测;
- (5) 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究;
- (6) 水与岩石相互作用力学参数确定探讨;
- (7) 多层地基深基坑的渗流稳定问题探讨;
- (8) 支盘桩-土-高层建筑结构振动台试验的研究;
- (9) 学术论坛: 土的统一硬化模型。