

青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性 及主要冻融灾害

牛富俊, 马 巍, 吴青柏

(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, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在介绍青藏高原多年冻土退化背景及其工程影响的基础上, 通过主要冻土路基现场监测和沿线调查, 对青藏铁路冻土路基 2002 年以来的地温发展过程、热学稳定性及次生冻融灾害进行了分析。结果表明: 青藏铁路自 2006 年通车后冻土路基整体稳定, 列车运行速度达 100 km/h, 达到设计要求, 但不同结构路基的热学稳定性不同, 采取“主动冷却”方法的路基稳定性显著优于传统普通填土路基。管道通风路基、遮阳棚路基及 U 型块石路基冷却下伏多年冻土的效果显著, 块石基底路基左右侧对称性较差, 而处于强烈退化冻土区 and 高温冻土区的普通路基热稳定性差, 需结合路基所在区域局地气候因素予以调整或补强。以热融性、冻胀性及冻融性灾害为主的次生冻融灾害对路基稳定性存在潜在危害, 主要表现为路基沉降、掩埋、侧向热侵蚀等, 其中目前最为严重的病害是以路桥过渡段沉降为代表的热融性灾害。

关键词: 青藏铁路; 冻土; 路基结构; 主动冷却; 热稳定性; 冻融灾害

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)02-0196-11

Thermal Stability of Roadbeds of the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions and the Main Freezing-thawing Hazards

NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai

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

Abstract The background of permafrost degradation in the Qinghai-Tibet Plateau and its engineering impact in the region were introduced. Then based on the results of geo-hazard investigations and ground temperature monitoring of the roadbeds along the Qinghai-Tibet Railway in the permafrost regions the development of ground temperature, thermal stability and secondary freezing-thawing hazards since 2002 were analyzed. The results showed that the roadbeds in the permafrost regions are stable in the whole since it was open to traffic in 2006. The train speed reaches 100 km/h, which achieves the design requirements. In-situ monitored results indicated that thermal stability of the roadbed constructed with a principle of “active cooling” method is much better than that of traditional roadbed. Among the cooling roadbeds, the duct-ventilated roadbed, sunshine-shield roadbed and U-type crushed-rock roadbed efficiently cooled the below permafrost. The roadbed with crushed-rock basement is unsymmetrical in thermal regime, and the thermal stability of the traditional roadbed is very weak, especially in the regions where permafrost is under intense degradation. Such sections should be reinforced considering the local climate factors. Along the railway, some main geo-hazards include thawing settlement, frost-heave and freezing-thawing induced hazards, and all of them might potentially influence the roadbed stability with settlement, burying and laterally thermal erosion. Currently the most serious one is the roadbed settlement in embankment-bridge transition section.

Key words: the Qinghai-Tibet Railway; permafrost; roadbed structure; active cooling; thermal stability; freezing-thawing hazard

收稿日期: 2011-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030741); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(40625004); 国家自然科学基金创新群体项目(40821001); 国家重点基础研究发展计划前期研究专项项目(2010CB434813); 冻土工程国家重点实验室自主项目(SKLFSE-ZY-01)

作者简介: 牛富俊(1970-), 男, 甘肃会宁人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, 从事寒区岩土工程与地质灾害及环境方面的研究。E-mail: niufujun@lzb.ac.cn

0 引言

青藏铁路自 2001 年开工建设至今已 10 年, 自 2006 年通车至今也已 5 年。作为西部大开发的标志性工程之一, 青藏铁路因多年冻土、高原缺氧和生态保护三大问题而备受国内外关注^[1-2]。建设之初, 设计者和建造者普遍认为, 多年冻土是青藏铁路建设中的重中之重, 而其成功的关键在于路基, 路基成败的关键在于冻土问题的成功解决与否^[1]。因此, 冻土路基是青藏铁路建设中的关键因素^[3]。

青藏高原因高海拔而得以成为地球的第三极, 高原气候严寒, 导致该区域 70% 的面积为多年冻土所覆盖^[4]。其多年冻土以地温高、含冰量高及环境敏感为突出特点。青藏铁路格尔木至拉萨段全长 1 142 km, 其中穿越多年冻土区长度为 632 km, 大片连续多年冻土区长度约 550 km, 岛状不连续多年冻土区长度 82 km (图 1)。所穿越的高温多年冻土区长度约为 275 km, 其中与高含冰量冻土重叠的路段约为 124 km。影响多年冻土区路基稳定性的最大问题是融沉及由于冻土融化引发的其他病害, 如青藏铁路发育于秀水河一带的热融滑塌病害, 在历经数十年后仍然没有稳定^[5]。高温冻土对于温度扰动的变化十分敏感, 而高含冰量冻土所产生的融沉量将会极大地超出工程允许变形量。因此, 无论是工程活动还是高原气候转暖造成的冻土升温, 都将

给路基工程稳定性带来极大负面影响, 是青藏铁路建设和运营维护中必须面对的突出问题。

青藏铁路建设之前, 世界上在多年冻土区建设的铁路及所出现的路基病害表明, 多年冻土区铁路建设仍然是一个世界性的难题^[1]。在气候变暖、多年冻土整体呈现退化趋势的背景下, 路基稳定性的问题尤其显得突出。针对这种状况, 青藏铁路冻土路基采取了“主动冷却”路基的设计思想, 并结合勘察与监测资料、工程实践及试验工程效果评价, 应用“动态设计”方法对部分区段进行了变更或强化, 以求最大程度地保持冻土路基的稳定性^[6-8]。

目前, 青藏铁路已正常运营 5 年, 多年冻土区路基整体稳定, 列车时速达 100 km/h, 达到了设计时速的要求。但是, 铁路是一种线形工程, 穿越的范围广, 沿线气候、工程地质和冻土条件复杂, 冻土路基不可避免地受到冻融过程的影响。笔者基于长期观测和沿线次生冻融灾害调查资料, 对不同冻土路基热状况的发展及主要冻融灾害进行分析, 以期评价青藏铁路目前冻土路基的稳定性及病害防治提供参考。

1 沿线多年冻土地质条件及变化趋势

受气候、地貌、岩性、海拔、地表条件、水文及地热流等条件的影响, 青藏铁路沿线的多年冻土可根据地形地貌与工程地质条件划分为 15 个单元 (表 1)。

表 1 表明, 在山区多年冻土以低温、含冰量相对较低为主, 而在盆地及河流阶地, 以地温较高、含冰量高为主要特征, 但在河流以及地热流较高区域, 存在贯穿融区。多年冻土中的冰, 在粗颗粒土地区主要以整体状存在 (图 2a); 在细颗粒土层中以层状、微层状及斑状产出 (图 2b), 在部分区段, 地下冰以厚层状分布 (图 2c), 部分冰层厚达 3 m 以上; 在基岩地区, 多以裂隙状分布 (图 2d)。由于土体冻结过程中水分迁移的影响, 在靠近多年冻土上限附近冰含量显著较高, 而高原冻土上限以上的活动层厚度在自然条件下通常接近于 2 m。因此, 在这种情况下, 路基施工过程中地表扰动极易导致冻土地温的变化, 进而引起地下冰融化而带来的沉降变形破坏。

此外, 气象监测资料表明, 青藏高原的气温近几十年来呈现明显上升的趋势^[9]。据青藏高原 101 个气象台站 1961—2000 年气温资料统计^[10], 40 年来青藏高原气温平均升高大约 0.70 ℃, 升温速率约为 0.017 ℃/a, 远远大于中国气温的平均升温速率 0.005 ℃/a。在这种气候变化背景下, 青藏高原多年冻土也发生了相应变化, 如沿青藏公路布设的天然测

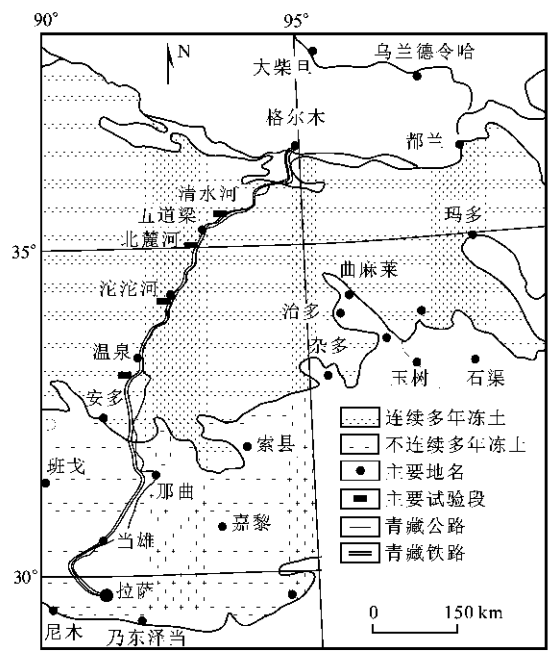


图 1 青藏铁路沿线冻土分布及主要试验段位置

Fig. 1 Permafrost Distribution and the Positions of the Main Testing Sections Along the Qinghai Tibet Railway

表 1 青藏铁路沿线多年冻土分区及特征

Tab. 1 District Classification of the Permafrost Along the Qinghai-Tibet Railway

单元	铁路里程 桩号	$t_{\text{MAGT}}/^\circ\text{C}$	高含冰量段 比例/%	多年冻土分区比例/%				
				融区	I 区	II 区	III 区	IV 区
西大滩断陷盆地	DK975+766	-0.5						
昆仑山中高山区	DK973+700	-4.0~-2.0	62.4	1.72	14.14	6.33	13.30	64.52
楚玛尔河高原	DK1005+500	-2.0~-0.5	76.3	4.63	27.44	23.10	44.84	0.00
可可西里山区	DK1072+500	-4.0~-1.0	75.1	0.21	3.52	15.22	49.32	31.73
北麓河盆地	DK1124+500	-1.8~-0.5	15.7	0.43	26.31	34.55	38.71	0.00
风火山山区	DK1145+500	-4.0~-2.0	42.8	2.52	12.93	18.12	23.50	42.93
尺曲谷地	DK1165+500	-3.0~-0.5		2.86	28.95	43.48	16.36	8.35
乌里盆地	DK1193+200	-1.0~0	59.1	0.00	92.04	7.96	0.00	0.00
乌里山区	Dk1202+500	-1.0~-0.5	>50	88.9	11.1		0	0
沱沱河盆地	DK1217+700	>-1.0		50.31	36.73	12.96	0.00	0.00
开心岭山区	DK1245+000	-1.5~-0.5	50	48.07	51.93		0.00	0.00
通天河盆地	DK1262+800	-1.5~-0.5	>50	11.39	23.23	46.56	18.82	0.00
布曲河谷地	DK1282+800	>-1.0	>50	48.03	46.70	5.28	0.00	0.00
温泉断陷盆地	DK1360+800	-0.5		27.65	72.35	0.00	0.00	0.00
唐古拉山区及山间盆地	DK1394+800-DK1513+753	-2.0~-0.5		9.53	35.12	11.16	44.19	0.00

注: 高含冰量段比例为高含冰量冻土段长度占所在冻土段总长的比例; t_{MAGT} 为年平均地温; I 区为极不稳定型多年冻土, $t_{\text{MAGT}} \geq -0.5^\circ\text{C}$; II 区为不稳定型多年冻土, $-1.0^\circ\text{C} \leq t_{\text{MAGT}} < -0.5^\circ\text{C}$; III 区为基本稳定型多年冻土, $-2.0^\circ\text{C} \leq t_{\text{MAGT}} < -1.0^\circ\text{C}$; IV 区为稳定型多年冻土, $t_{\text{MAGT}} < -2.0^\circ\text{C}$ 。

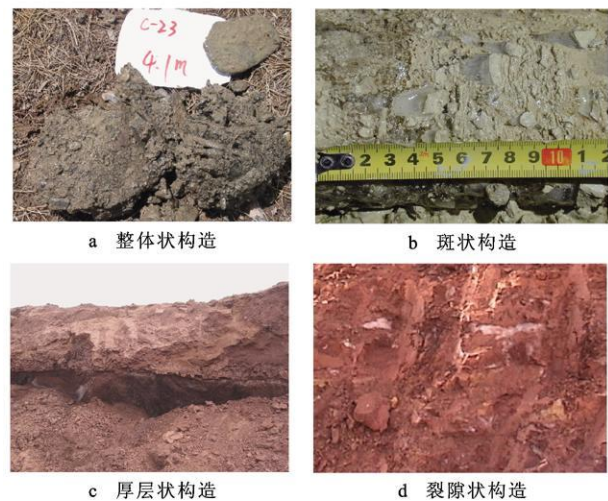


图 2 不同类型的冻土构造

Fig. 2 Types of Permafrost Structure

温孔 8 年的数据表明, 1996—2001 年多年冻土顶板温度自然变化最大为 0.08°C/a , 最小为 0.01°C/a ; 多年冻土上限自然变化幅度最大为 6.6 cm/a , 最小为 2.6 cm/a ; 一定深度上多年冻土也处在一个整体升温过程中, 升温速率最大为 0.053°C/a , 最小为 0.021°C/a ^[11-12]。

在青藏高原气温每 100 年升高 $2.2^\circ\text{C} \sim 2.6^\circ\text{C}$ 的情况下, 未来 30~50 年青藏高原现今存在的岛状

冻土将有 80%~90% 退化, 冻土面积减小 10%~15%; 多年冻土下界将抬升 150~350 m, 现今过渡型冻土年平均地温高于 -0.8°C 的地区将产生深埋藏冻土或冻土消失; 不稳定型及稳定型冻土年平均地温将升高 $0.5^\circ\text{C} \sim 0.7^\circ\text{C}$, 其厚度有所减薄, 但面积不发生变化, 考虑到未来青藏高原地区降水可能增加, 可以在一定程度上减弱冻土的退化^[9, 13]。

从多年冻土分区变化情况来看, 如果采用气温升高 1°C 和 2.6°C 两种情形进行数值模拟预测, 结果表明: 50 年后气温升高 1°C , 青藏铁路沿线约有 1.7% 极不稳定型多年冻土(I 区)退化为季节冻土, 极不稳定型多年冻土约增加 8%, 不稳定型多年冻土(II 区)约增加 5%, 基本稳定型(III 区)和稳定型多年冻土(IV 区)地温状态有所升高; 若 50 年后气温升高 2.6°C , 青藏铁路沿线约有 27% 多年冻土退化为季节冻土, 即极不稳定型和不稳定型多年冻土全部退化为季节冻土, 约有 6% 基本稳定型多年冻土退化为季节冻土, 有 27% 基本稳定型和稳定型多年冻土转为极不稳定型和不稳定型多年冻土, 多年冻土地温状态发生较大变化(图 3)^[13-14]。上述预测存在很多不确定性, 但青藏高原在未来 30~50 年内的退化趋势将是明显的。在这一大的背景下, 青藏铁路冻土路基地温状况

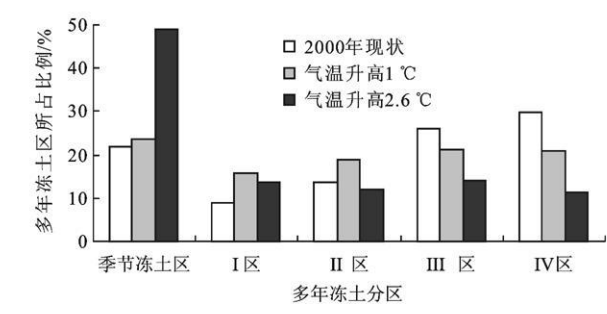


图 3 气温升高前后多年冻土空间分布相对面积变化

Fig. 3 Changes of Permafrost Distribution Before and After the Temperature Rising

及其热稳定性是工程稳定的关键所在。

2 主要冻土路基地温及热状况

青藏铁路冻土路基主要采用“冷却路基”的设计理念,而对于勘察资料显示为低含冰量的冻土区,仍然采用普通填土路基,因此,整体上主要冻土路基结构形式包括普通填土路基(图 4a)、块石基底路基(图 4b)、块石护坡路基(图 4c)、U 型块石路基(图 4d)、重力式热管路基(图 4e)以及部分试验段特殊路基,包括管道通风路基(图 4f)、遮阳棚路基(图 4g)和遮阳板路基(图 4h)。

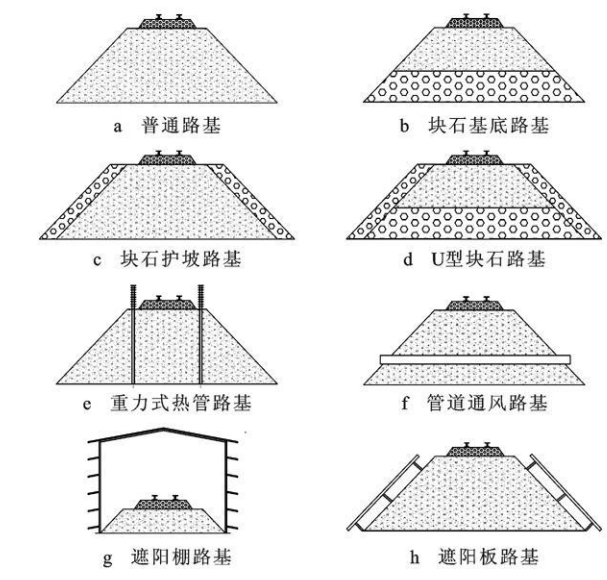


图 4 青藏铁路主要冻土路基结构形式

Fig. 4 Main Roadbed Structures Applied in the Qinghai-Tibet Railway in the Permafrost Regions

2.1 普通填土路基

普通填土路基曾是多年冻土区采用最为广泛的路基形式,考虑到多年冻土受气候条件影响,为防止多年冻土融化,对普通填土路基进行了针对路基高

度、路面材料等一系列的研究,先后提出了最小路基高度、临界路基高度及合理路基高度等概念,以增加地-气间热阻的方法保护多年冻土^[15-18]。近年来,由于路基工程中考虑了气候变暖尤其是工程改变了原始地表换热条件后,会导致进入多年冻土热量的增加,因此通过现场监测、数值模拟分析,显示单纯地增加热阻或增加路基高度的方法并不能从根本上解决多年冻土融化的问题。但对于使用年限较短的路基工程而言,在不增加成本的前提下延缓多年冻土融化也能够满足工程稳定性的要求^[19],如北美和俄罗斯西伯利亚地区的很多公路基本都采用了普通填土路基。

在划分沿线多年冻土分区的基础上,对低温、低含冰量冻土地区基本都采用了普通填土路基,但由于铁路线路长及冻土条件复杂性,后期对一些区段的普通填土路基进行了措施补强。

图 5 为青藏铁路楚玛尔河地区(清水河南侧)的一普通填土路基路肩下地温变化状况,该监测路基位于低温、少冰-多冰多年冻土区,年平均地温则为 -1.3°C 。图 5a 为路基左肩(阳坡侧,下同)地温发展状况,显示自路基施工完成后,阳坡侧路肩下多年冻土人为上限自 2003 年的 1.9 m(原地表高度起算)发展至 2006 年的 2.5 m,表明在施工完成后的 3 年内,阳坡侧路肩下地温朝着不利于路基稳定的趋势发展。

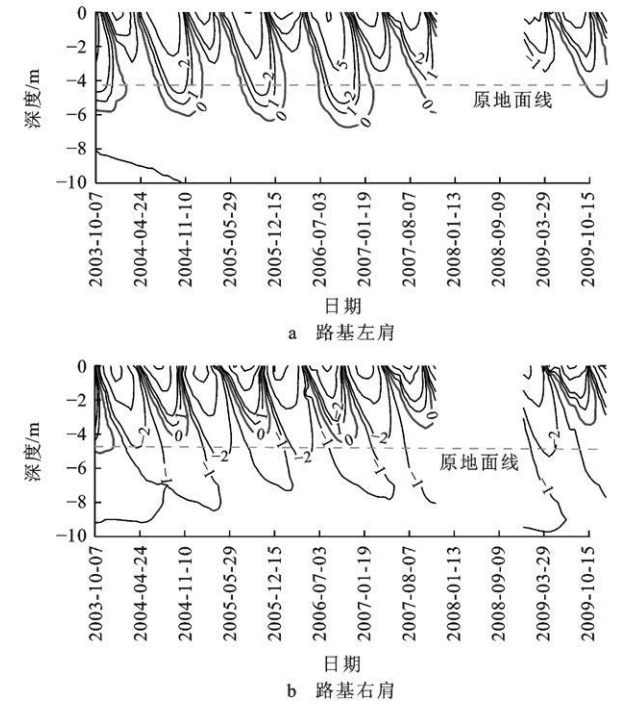


图 5 普通填土路基两侧路基孔地温随深度和时间变化等值线

Fig. 5 Soil Temperature Contour of Boreholes in Traditional Roadbed

2006 年后,人为上限位置开始抬升,至 2009 年处于原地面下 0.5 m 深度处,并维持相对稳定;在地温方面,路基左肩下人为上限至地下 6 m 深度范围内的地温处于 $-1^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间。图 5b 显示,路基右肩下(阴坡侧,下同)2003 年多年冻土人为上限处于原地面下 1 m 深度处,之后抬升至原地面以上,基本处于路基填土深度范围内,同时,人为上限下土体在冻结期的地温低于 -1°C 。因此,无论在多年冻土人为上限位置还是路基地温方面,路基右肩下地温状况优于路基左肩,但整体上路基热状况处于稳定状态。

2.2 块石基底路基

20 世纪 60 至 70 年代,前苏联全苏铁路运输研究院斯科沃丁冻土研究站根据实测资料提出,用大块碎石修筑的路堤较之用其他类型土修筑的路堤,可显著降低基底土的温度^[6,20],自然界天然块石层下地温较低的现象也说明了块石层的冷却作用^[21],因此利用块石层的 Balch 效应以降低路基下伏多年冻土的地温是可行的^[22]。

图 6 为楚玛尔河地区一块石基底路基路肩下地温变化状况图,其中深度为 0 m 处是路基面处。图 6a 显示路基左肩最大融化深度在逐年增加,至 2007 年,融化深度已经接近于原上限位置(天然上限深度),之后至 2009 年略有减小;路基右肩地温呈

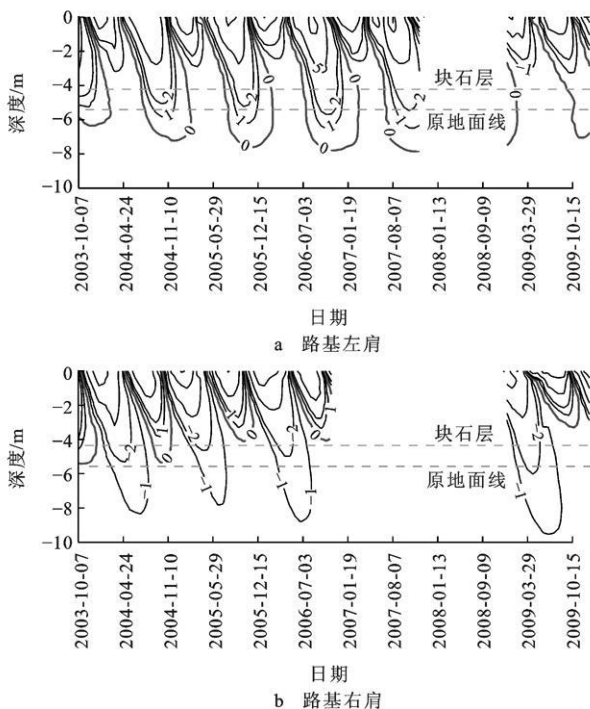


图 6 块石基底路基两侧路基孔地温随深度和时间变化等值线

Fig. 6 Soil Temperature Contour of Boreholes in

Crushed-rock Basement Roadbed

逐年下降趋势(图 6b),最大融化深度也在缓慢减小,由 2003—2004 年的原地面深度处减小至 2009 年的地面上 1 m。

由于在冻土路基中采用块石层的目的在于利用其大孔隙的特性发挥 Balch 效应以达到冷却下伏土层的作用,为实现这一目的,在夏季块石层底板温度低于顶板,而冬季顶板温度低于底板,才有利于土体热量的耗散。实测结果显示路基左、右肩中所测块石层底与层顶的温差在不同时间的分布情况(图 7),所采用的数值为层底温度减去层顶温度。在路基右肩,每年 2 月至 7 月,层底温度高于层顶,且温差较大,达 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$;而 8 月至次年 1 月,层底温度低于层顶,温差为 $0^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。因此,理论上 2 月至 7 月为相对强烈对流换热期,8 月至次年 1 月为相对稳定的传导换热期。路基左肩下 2004 和 2005 年的 2 月至 7 月层底温度略高于层顶,2006 年后的 2 月至 7 月表现为层底和层顶温度基本相同,即二者温差接近于 0°C ,尤其至 2009 年,块石层顶与底板之间温差仅 0.3°C ;在每年 8 月至次年 1 月,层底温度显著低于层顶,温差达 2°C 。路基左、右肩下块石层温度状况的差异说明,路基右肩下块石层存在冷季可能的对流换热,而路基左肩下块石层在施工后 2 至 3 年内可能存在冷季的对流换热,之后由于块石层冷季上下温差的消失,基本无因上下温差导致自然对流的可能。因此,由于边坡朝向及太阳辐射的影响,路基左肩下块石层换热效果显著弱于路基右肩。

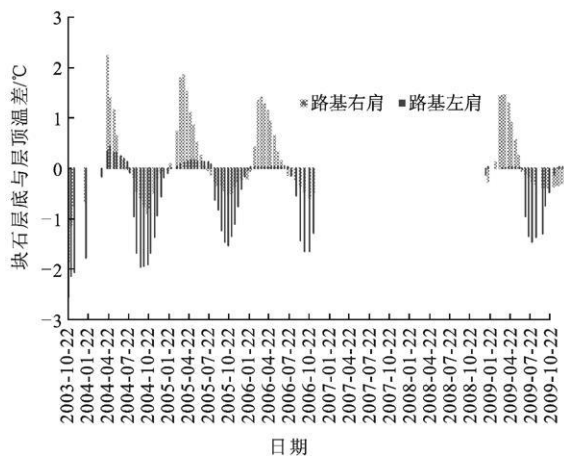


图 7 块石基底路块石层底与层顶温差随时间变化

Fig. 7 Temperature Difference Between the Top and Bottom of the Crushed Rock Layer in Crushed-rock Basement Roadbed

2.3 块石护坡路基

块石护坡路基的冷却原理类似于块石基底路

基。图 8 为楚玛尔河地区块石护坡路基左、右肩地温随深度、时间的变化情况。图 8a 显示路基左肩 2003 年季节最大融化深度位于原地面下 1.5 m, 2004 年抬升至接近原天然地面, 之后季节最大融化深度局限于路基填土范围内, 即略高于原天然地面, 同时最大融化深度线没有下降, 表明在路基左肩处原冻土温度没有升高, 这一现象与其他块石路基或一般填土路基有很大不同; 路基右肩(图 8b)地温在监测期内维持稳定, 地温分布情况与路基左肩类似, 即最大融化深度局限在路堤填土范围内, 但整体温度低于路基左肩。显然, 相对于普通路基和块石基底路基, 块石护坡路基起到了促进地温场左右对称性增强的作用。

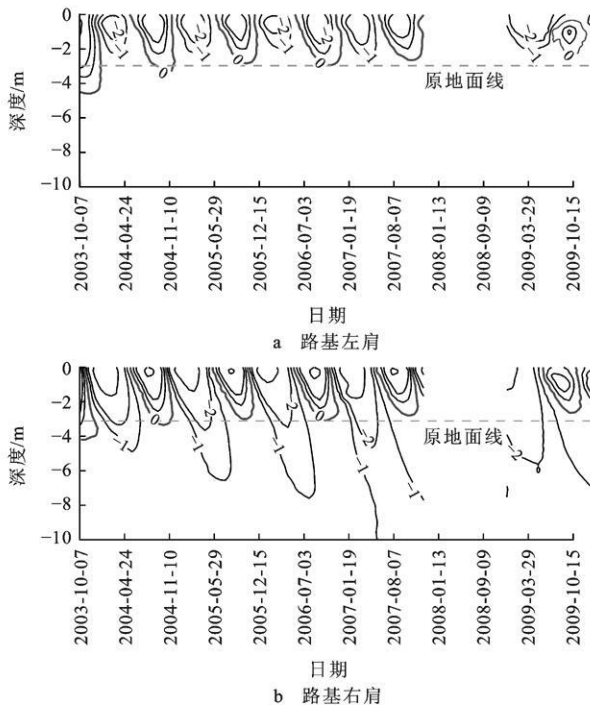


图 8 块石护坡路基两侧路基孔地温随深度和时间变化等值线

Fig. 8 Soil Temperature Contour of Boreholes in Crushed-rock Revetment Roadbed

2.4 U 型块石路基

U 型块石路基是块石基底路基和块石护坡路基的组合, 以期从路基表面和内部综合调控路基温度。图 9 为楚玛尔河地区 U 型块石路基左、右肩地温随深度、时间的变化情况。图 9a 显示路基左肩 2004—2009 年监测期间最大融化深度在逐年减小, 期间减小近 1 m, 即多年冻土人为上限位置抬升了近 1 m, 且上限下深部地温也在逐年缓慢降低, 表现为一 1°C 范围的扩展; 路基右肩(图 9b)地温在监测期内也在逐年降低, 且降低趋势比左肩更为显著, 路基年融化深度局限于原地面之上, 且逐年减小, 监测

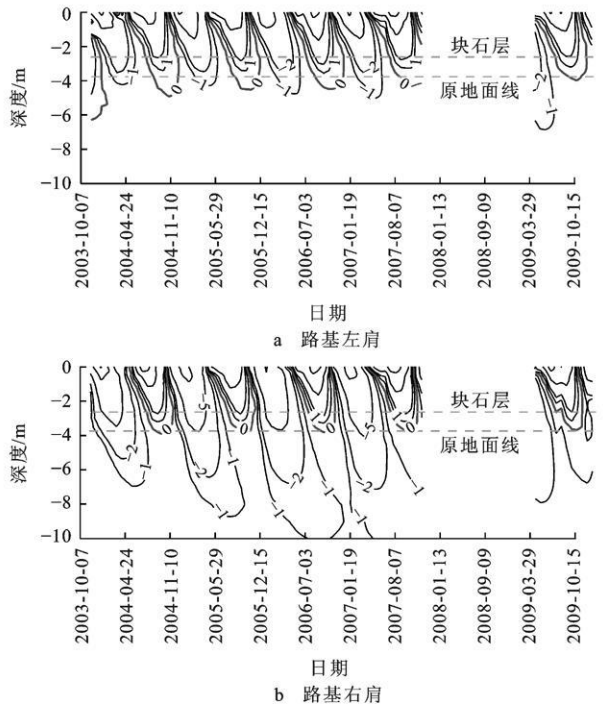


图 9 U 型块石路基两侧路基孔地温随深度和时间变化等值线

Fig. 9 Soil Temperature Contour of Boreholes in U-type Crushed-rock Roadbed

期间减小幅度为 0.6 m。对比图 6 和图 9, U 型块石路基降温效果显著优于单纯的块石基底路基, 同时其左右对称性更好, 有利于维护路基的热稳定性。由于块石基底路基和 U 型块石路基同属于块石路基, 对于下伏冻土的降温都是起源于块石层的热效应。图 10 显示该路基下的块石层顶与层底温差状况。在路基右肩, 每年 12 月至次年 4 月层底温度高于层顶, 最大温差为 3.4°C , 但至 2009 年减为 0.6°C ; 每年 5 月至 11 月, 层底温度低于层顶, 最大温差为 2.9°C , 至 2009 年减小为 1.9°C 。因此, 理论上每年 12 月至次年 4 月为相对强烈对流换热期, 5 月至 11 月为相对稳定的传导换热期; 在路基左肩下块石层温差分布情况与路基右肩基本相同, 层底高于层顶的最大温差为 2.6°C , 至 2009 年减小为 0.8°C ; 层底低于层顶的最大温差也为 2.6°C , 至 2009 年减小为 2.2°C 。相比较而言, U 型块石路基中块石层顶与层底之间的温差要比单纯块石路基基底对应温差大, 并因此影响到下伏多年冻土的地温低于块石基底路基。

2.5 管道通风路基

管道通风路基在青藏铁路建设初期在清水河试验段和北麓河试验段都进行了现场实体工程试验研究。其设置主要在于利用高原冷季低温、大风的气

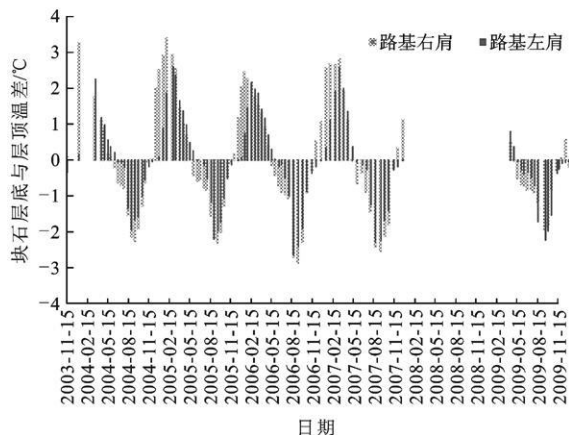


图 10 U 型块石路基石层底与层顶温差随时间变化

Fig. 10 Temperature Difference Between the Top and Bottom of the Crushed Rock Layer in U-type Crushed-rock Roadbed

候特征(图 11), 通过管道内的强烈对流换热降低土体温度。

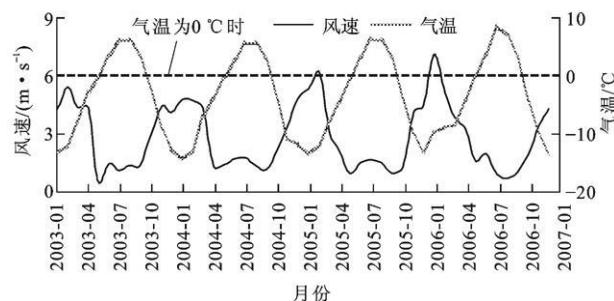


图 11 北麓河地区气温与风速关系

Fig. 11 Relationship Between the Air Temperature and Wind Speed in Beilue Region

北麓河试验段全长 400 m, 包括 30、40 cm 两种管径、混凝土和 PVC 两种材质以及布设于路堤中部和下部(地面上 0.5 m)两个位置的情况, 因此共有 8 种不同的组合形式。基于室内模型试验和现场监测研究成果^[23-25], 建议今后采用直径 40 cm 的混凝土管并布设在路基下部的方案。为重点讨论该种路基结构形式的效果, 将主要讨论所建议参数条件下的管道通风路基热状况。

图 12a 显示路基左肩在施工后的第二年, 多年冻土人为上限经过第一个冻结期后已经抬升至原地面处, 即整个原活动层深度范围都发生了冻结, 且此冻结状态一直保持稳定; 图 12b 显示路基右肩下土体冻结状态与左肩类似, 路基施工后的第二年, 多年冻土人为上限也抬升至原地面附近, 此后进一步缓慢抬升。同时, 路基右肩下土体温度低于左肩, 表现为图 12b 中 -1°C 和 -2°C 等值线深度比图 12a 中

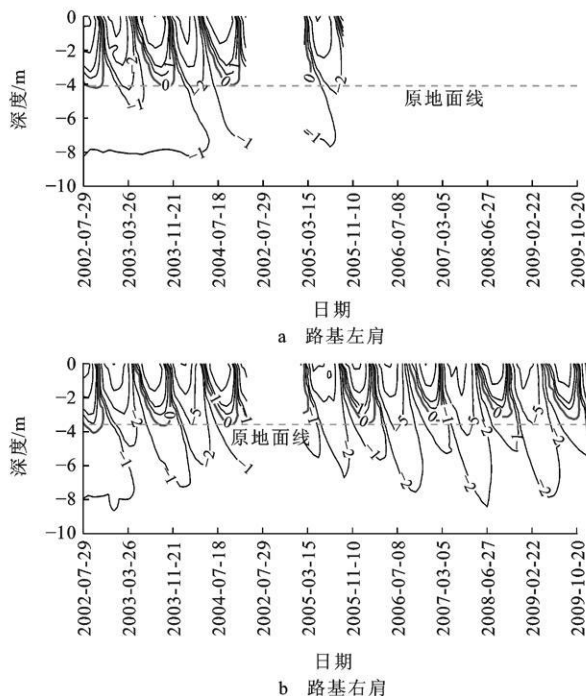


图 12 管道路基两侧路基孔地温随深度和时间变化等值线

Fig. 12 Soil Temperature Contour of Boreholes in Duct-ventilated Roadbed

低且范围广。整体上, 管道通风路基下土体地温低、多年冻土上限抬升幅度大且在几何形态上左右对称性强, 因此其热稳定性良好, 是一种适合于高原冻土区的“冷却路基”结构形式。此外, 数值模拟分析表明, 在年平均气温不低于 -3.5°C 的地区, 即使未来 100 年气温升高 2.6°C , 管道通风路基下伏多年冻土仍然能够维持稳定^[26]。

2.6 遮阳棚路基

遮阳棚的作用在于遮挡太阳辐射、降低地表温度进而降低路基地温。室内曾对遮阳的另一种形式——遮阳板进行模拟研究, 结果表明遮阳板能降低遮阳板内地表温度 $8^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$, 最大达 24°C , 能抬升冻土上限 $0.8 \sim 1.8 \text{ m}$, 对道路工程中的路基稳定性起到至关重要的作用^[27-28], 并且能够明显改善路基因阴阳坡差异而带来的温度场不对称问题^[29-30]。遮阳棚工程设置在青藏铁路唐古拉无人区, 遮阳棚位于路堑进口填挖过渡段, 路基走向 180° 。

图 13 为 2007—2008 年间遮阳棚内外不同高度的气温平均对比曲线。2007 年遮阳棚外天然条件下气温值显著高于棚内, 靠近棚体气温值整体略高于棚内, 但在紧邻棚体的遮阳棚内外气温差异较小, 主要原因在于棚外的测点紧靠遮阳棚边缘, 受棚体阻隔太阳直接辐射的影响程度基本接近于棚内; 棚

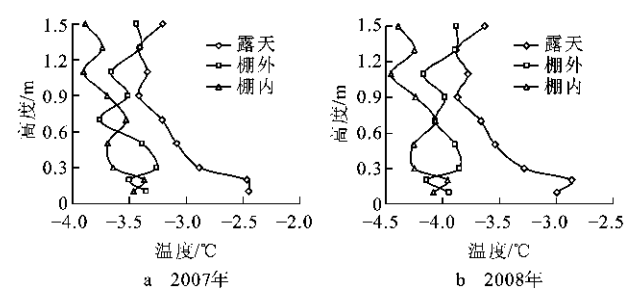


图 13 遮阳棚内外平均气温随高度分布

Fig. 13 Average Air Temperature at Different Height Inside and Outside the Sunshine-shield

内气温整体平均值为 -3.66°C , 棚外侧为 -3.48°C , 而天然条件下为 -3.05°C 。此外, 天然条件下气温平均值随高度上升呈现升高趋势, 而棚体内、外(外侧边缘处)气温在高度上的差异较小。图 13b 为 2008 年不同高度平均气温分布曲线, 显示与图 13a 类似的差异和变化趋势。在太阳光无遮挡的情况下, 靠近地表的气温显著升高, 天然条件下监测期内近地表 0.1~0.3 m 的气温高于 1.0 m 以上气温近 1°C , 但在棚体内部仅相差约 0.3°C 。因此, 整体上遮阳棚内部气温显著低于外界环境温度。

在上述气温影响下, 遮阳棚内外土地地温产生显著差异。图 14a 为遮阳棚外天然孔地温分布图, 表明遮阳棚中心断面处天然状态下的地温基本维持

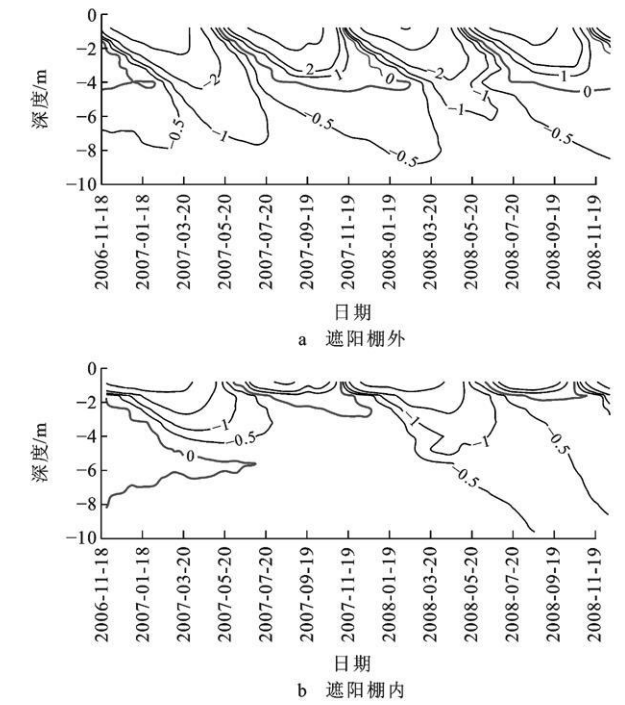


图 14 遮阳棚内外土地地温随深度和时间变化等值线

Fig. 14 Soil Temperature Contour of Boreholes Inside and Outside the Sunshine-shield

稳定, 季节最大融化深度保持在 5 m 处, 但在融化时期 -0.5°C 范围有所扩展, 而冻结时期 -1.0°C 范围有所减小, 即浅层地温存在升高的趋势。图 14b 显示遮阳棚内监测孔地温分布情况与该断面处天然状况显著不同的是: ①可能受钻孔施工的影响, 该孔 2006 年最大融化深度达 8.5 m, 但至 2007 年迅速减小至 3 m, 2008 年为 2 m, 表明上限抬升的幅度和速率都很显著; ②融化期 -0.5°C 的范围也在迅速减小, 而冻结期 $-1.0^{\circ}\text{C} \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 的范围则显著增加, 表明土体降温效果显著。因此, 试验段监测结果表明, 遮阳棚起到了冷却路基、降低土体温度的作用。

2.7 不同结构路基热稳定性对比分析

根据冻土工程国家重点实验室在青藏铁路沿线所布置的 55 个多年冻土温度监测断面监测结果, 整体上采用“冷却路基”、降低冻土温度设计方法的路基热稳定性显著优于普通填土路基。各种具体路基的热状况及工程效果列于表 2。

3 影响路基稳定性的主要次生冻融灾害

3.1 主要次生冻融灾害的类型及其危害

次生冻融灾害是相对于原生自然灾害而言的, 是指工程建成后, 由于外在因素的影响而诱发的与冻土发育状况、冻融过程有关的地质灾害。青藏铁路自从开始建设, 各参建单位曾主要针对工程病害, 定期或不定期地对路基可能出现的病害地段和病害类型进行过数次调查研究。基于 2007—2009 年青藏铁路运营以来调查资料, 并结合以前调查的原始资料, 将青藏铁路多年冻土区路基次生冻融灾害进行分类。

对于次生灾害的划分, 主要根据灾害发生的原因进行分类, 其中热融性灾害是由于多年冻土融化或退化过程中, 土体压缩、固结或变形、位移所引起的灾害, 这种灾害可以表现为岩土体的变形和失稳, 也可以表现因地表形态改变而形成的其他地质体, 但当其对工程产生间接或直接的影响后, 便表现为灾害, 其危害表现在对于路基的滑塌掩埋、路基沉陷或侧向热侵蚀^[31-33]; 冻胀性灾害主要是由于土体冻结过程中水分迁移或原位冻结所产生的体积膨胀类灾害, 一方面直接表现为构筑物的冻胀危害, 另一方面表现为因施工造成地下水通道的改变而出现的冰锥、冰幔等, 可能会造成路基抬升、侧向挤压和冰体掩埋等; 冻融性灾害是指由于受冻融循环的影响, 岩土体材料形态或强度等物理特性发生变化所引起的灾害, 其危害表现

表 2 青藏铁路不同结构冻土路基热状况及其稳定性

Tab. 2 Thermal Status and Stability of the Different Roadbeds Along the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions					
路基形式	多年冻土上限	地温变化	温度场对称性	路基热稳定性	冻土区域
	存在融化夹层	升高	差	极不稳定	强烈退化区
普通路基	阴坡侧下降, 阴坡侧略有抬升或稳定	阳坡侧、阴坡侧略有降低或稳定	差	不稳定	高温冻土区
	抬升且稳定	阳坡侧、阴坡侧降低	差	稳定	低温冻土区
块石基底路基	阴坡侧基本稳定, 阳坡侧抬升	缓慢降低	较差	基本稳定	全部
块石护坡路基	抬升	缓慢降低	好	稳定	全部
U 型块石路基	显著抬升	显著降低	好	稳定	全部
管道通风路基	显著抬升	显著降低	较好	稳定	全部
遮阳棚路基	显著抬升	显著降低	好	稳定	全部

为路基热调节功能降低(如护坡块石风化后孔隙度降低、热交换效率降低)、路基裂缝以及结构功能降低甚至失效。根据灾害成因、破坏形式及发生部位,将青藏铁路沿线次生冻融灾害分为三大类 10 种表现形式(表 3)。整体上,上述次生灾害的产生主要在于工程施工对地表的热扰动以及部分区段改变了地下水渗流通道,或所采用的块石材料抗风化能力差所致,因此,工程防治中需考虑采用工程补强、减少地表热扰动、恢复环境、更换材料等方式进行治理。

表 3 主要冻融灾害分类

Tab. 3 Classification of the Main Freezing-thawing Hazards

成因类型	表现形式	对路基的主要危害
热融性灾害	热融滑塌	掩埋、冻土退化、土体侵蚀
	热融湖塘	侧向热侵蚀、冻土退化
	热融沟	坍塌、侧向热侵蚀
	热融沉降	冻土退化、路基沉降
冻胀性灾害	冻胀丘	路基抬升
	冰椎、冰幔	掩埋、路基抬升
	坡面鼓胀	冻裂、坍塌
冻融性灾害	寒冻风化	热调节功能降低
	路基开裂	路基裂缝
	结构体冻裂	结构功能降低、失效

3.2 典型次生冻融灾害

热融性灾害依然是影响青藏铁路冻土路基稳定性的主要问题,如由于阴阳坡差异效应导致部分路基下地温场不对称、局部冻土升温都可能最终引起路基的融沉病害。此外,高原上气温年际变化较大,昼夜温差大,紫外线强烈,冻胀或循环冻融对建筑材料的破坏也比较严重。青藏铁路是一个庞大的工程,线路长、冻土及水文地质条件复杂,由施工、局部环境变化引起的路基或辅助设施病害也是难以根本避免的。

目前,青藏铁路路基工程最为明显并具有代表

性的灾害为路桥过渡段沉降变形。青藏铁路多年冻土区全长 550 km,共有大小桥梁 437 座,2009 年 4 月至 7 月,对其中的 164 座(从西大滩至尺曲)进行了路桥过渡段沉降病害调查,调查内容包括桥梁两端各两个墩台与护锥连接处沉降量、桥梁走向、路基坡向、路基类型、地基土类型、下伏多年冻土类型、地温分区等。青藏铁路多年冻土区路桥过渡段沉降主要表现在:①护锥体表面的沉陷:此类病害在桥编号为 634 的桥(桥—634,下同)北端左侧(阳坡侧)表现的十分突出,锥体靠近桥墩处表面沉降量达 45 cm,由于沉陷量较大,后期维修过程中填筑的道碴充填了沉陷的范围。沉降量较大的部位往往发生 在高填方路基,如桥—634 北端左侧路基填高为 10 m;②过渡段护锥开裂:由于差异沉降导致的路基填土拉裂,在护锥表面形成不规则拉裂缝,如桥—618 北端左侧,过渡段沉降量 10 cm,导致在锥体顶部形成塌陷,并沿锥体表面平行于锥体与桥台的边界线出现了贯穿性拉裂缝。此类病害产生的原因在于较大的沉降量,并和土体反复的冻胀与融化沉降有关;③过渡段护锥坡面的隆起,如桥—634 南端左侧护锥体,由于沉陷严重,锥体发生了严重变形,并在坡脚上 3 m 处出现了隆起。此类病害也是伴随着土体出现较大沉陷及侧向变形引发的,如此处锥体表面沉降达 30 cm。

基于调查资料,结合调查所得定量数值及将非定量化数据进行赋值,将要素与过渡段路基沉降量进行相关性分析,分析结果列于表 4。

从表 4 可以看出,坡向、路基高度、多年冻土类型(含冰量)在 0.01 显著水平下正显著相关。其中坡向相关系数最大为 0.234,体现了阴阳坡效应的影响;路基高度和含冰量 Pearson 相关系数分别为 0.213、0.151,说明路基越高沉降量越大,含冰量越高沉降量越大;地温和地基土类型与沉降成负相关,

表 4 沉降量与各因素相关系数

Tab. 4 Correlation Coefficient Between the Settlement and Main Factors

相关性	沉降	南北端	坡向	路基结构	路基高度	地温	多年冻土类型	岩性条件
Pearson 相关系数	1. 00	0. 069	0. 234 **	0. 060	0. 213 **	— 0. 21 **	0. 151 **	— 0. 09 *
显著水平		0. 079	0. 00	0. 125	0. 00	0. 01	0. 000	0. 021
统计量	656	656	656	656	655	656	640	656

注: 南北端: 南侧赋值为 1, 北端赋值为 2; 坡向: 阳坡赋值为 3, 阴坡赋值为 4; 路基结构: 素土路基赋值为 1, 碎石路基赋值为 2, 块石路基赋值为 3; 地温: 高温多年冻土赋值为 1, 低温多年冻土赋值为 2; 多年冻土类型: 少冰赋值为 1, 多冰赋值为 2, 含土冰层赋值为 3; 岩性条件: 粉黏土赋值为 1, 砾石土赋值为 2, 中粗沙赋值为 3, 岩石赋值为 4; **为 0. 01 显著水平下; *为 0. 05 显著水平下。

即地温在 0. 01 显著水平下显著相关, 相关系数则为—0. 21, 说明地温越低, 沉降量越小。地基土类型在 0. 05 显著水平下显著相关, 其相关系数为—0. 09, 说明地基土强度越高, 沉降量越小, 反之亦然; 另外, 沉降与桥南北端、路基结构也呈正相关关系, 桥北沉降略大于桥南, 这也与路基走向、太阳辐射相关; 路基结构与沉降量间的相关关系最不显著, 初步体现了沉降的发生仍然以填筑路基的土体压密变形为主, 它们之间的关系需要进一步调查分析。

4 结语

(1)青藏铁路通车 5 年来, 多年冻土区路基整体稳定, 列车运行速度 100 km/h, 达到了设计要求。

(2)青藏铁路多年冻土区, 采取了冷却措施的路基热稳定性显著优于普通路基。综合对比表明, 管道通风路基、遮阳棚路基及 U 型块石路基冷却下伏多年冻土的效果显著, 块石基底路基左右侧对称性较差, 需结合路基所在区域局地气候因素予以调整或补强。

(3)以热融性、冻胀性及冻融性灾害为主的次生冻融灾害对路基稳定性存在潜在危害, 主要表现为路基沉陷、掩埋、侧向热侵蚀等, 对此需及早予以重视, 并采取减小地表热扰动、恢复环境、保护冻土的原则进行防治。

(4)青藏铁路目前路基最为明显的病害是路桥过渡段沉降, 2009 年调查的最大沉降量为 50 cm, 自西大滩以南 164 座桥过渡段平均沉降 7 cm。

参考文献:

[1] 程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213-217.

[2] 程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(1): 21-25.

[3] 王志坚. 青藏铁路建设中的冻土工程问题[J]. 中国铁路, 2002(12): 31-37.

[4] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪

研究, 2003, 23(2): 134-141.

[5] 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.

[6] 程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 1-4.

[7] Ma W, Cheng G D, Wu Q B, et al. Application on Idea of Dynamic Design in Qinghai-Tibet Railway Construction[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41(3): 165-173.

[8] Ma W, Cheng G D, Wu Q B. Construction on Permafrost Foundations: Lessons Learned from the Qinghai-Tibet Railroad[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59(1): 3-11.

[9] 秦大河. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[10] 李述训, 吴通华. 青藏高原地气温度之间的关系[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 627-632.

[11] 刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 高原多年冻土地区公路路基温度场现场实验研究[J]. 公路, 2000(2): 5-8.

[12] 吴青柏, 刘永智, 童长江, 等. 高原多年冻土地区公路工程地质研究[J]. 公路, 2000(2): 1-4.

[13] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.

[14] Wu Q B, Li S X, Liu Y Z. The Impact of Climate Warming on Permafrost and Qinghai-Tibet Railway[J]. Engineering Sciences, 2006, 4(2): 92-97.

[15] 朱林楠. 多年冻土路堤的临界高度[C] //中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国地理学会冰川冻土学术会议论文选集: 冻土学. 北京: 科学出版社, 1982: 170-172.

[16] 王绍令, 米海珍. 青藏公路铺筑沥青路面后路基下多年冻土的变化[J]. 冰川冻土, 1993, 15(4): 566-573.

[17] 张建明, 章金钊, 刘永智. 青藏铁路冻土路基合理路堤高度研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 28-34.

[18] 程国栋, 张建明, 盛煜, 等. 保护冻土的保温原理[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2003, 32(4): 1-6.

[19] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 保温法保护多年冻土的长期效果分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 760-765.

[20] Mikhailov G P. Temperature Regime of Embankment Consisting of Coarse Rock on Permafrost[J]. Transportation Construction, 1971, 12: 32-33.

[21] Cheng G D. Influences of Local Factors on Permafrost Occurrence and Their Implications for Qinghai-Xizang Railway Design[J]. Science in China: Series D, 2004, 47(8): 704-709.

- [22] Harris S A, Pedersen D E. Thermal Regimes Beneath Coarse Blocky Materials[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1998, 9(2): 107-120.
- [23] 牛富俊, 程国栋, 赖远明. 青藏铁路通风路堤室内模型试验研究[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(3): 1-6.
- [24] 牛富俊, 马 巍, 赖远明. 青藏铁路北麓河试验段通风管路基工程效果初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增): 2652-2658.
- [25] Niu F J, Cheng G D, Xia H M, et al. Field Experiment Study on Effects of Duct-ventilated Railway Embankment on Protecting the Underlying Permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45(3): 178-192.
- [26] Lai Y M, Wang Q S, Niu F J, et al. Three-dimensional Nonlinear Analysis for Temperature Characteristic of Ventilated Embankment in Permafrost Regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 165-184.
- [27] 冯文杰, 李东庆, 马 巍, 等. 不同边界条件对多年冻土上限影响的模型试验研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 353-359.
- [28] 俞祁浩, 潘喜才, 程国栋, 等. 多年冻土区路基边坡遮阳板降温过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 299-305.
- [29] 冯文杰, 马 巍, 张鲁新, 等. 遮阳棚在寒区道路工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 567-570.
- [30] Feng W J, Ma W, Li D Q, et al. Application Investigation of Awning to Roadway Engineering on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45(1): 51-58.
- [31] Niu F J, Cheng G D, Xie Q. Study on Instability of Slopes in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet High Plateau[C] //Karmensky R M. Proceedings of the 5th International Symposium on Permafrost Engineering. Yakutsk: Permafrost Institute Press SB RAS, 2002: 192-197.
- [32] Niu F J, Xu J, Lin Z J, et al. Engineering Activity Induced Environmental Hazards in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet Plateau[C] //Committee of 9th International Conference on Permafrost. Proceedings of 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks, 2008: 1287-1292.
- [33] 林战举, 牛富俊, 许 健. 多年冻土区青藏铁路沿线次生冻融灾害及成因初步分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(增): 666-673.

(上接第 145 页)

- [3] 姚泾利, 王 克, 宋江海, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组石油运聚规律研究[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 32-37.
- [4] 冀伟坦, 侯明才, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油气成藏条件及主控因素研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 686-692.
- [5] 高剑波, 庞雄奇, 王志欣, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组碎屑岩储层低渗特征及含油性主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(1): 5-12.
- [6] 郑荣才, 王海红, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 段沉积相特征和砂体展布[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3): 21-26.
- [7] 王昌勇, 郑荣才, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组第六段高分辨率层序—岩相古地理[J]. 地质学杂志, 2009, 33(3): 326-332.
- [8] 王昌勇, 郑荣才, 王海红, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 油层组物源区分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 933-938.
- [9] 董万平, 罗静兰, 周功才, 等. 镇泾油田长 8 与长 6 油层组产能影响因素分析[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 166-172.
- [10] 王彩萍. 鄂尔多斯盆地直罗油田长 6 油层组成岩作用及孔隙演化研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 161-165.
- [11] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
- [12] 梁晓伟, 韩永林, 王海红, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组裂缝特征及其地质意义[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 49-53.
- [13] 张文正, 杨 华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
- [14] 史建南, 郑荣才, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组岩性油藏成藏机理研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 129-133.
- [15] 周进高, 姚根顺, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 9 油层组勘探潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 289-293.
- [16] 郭艳琴, 李文厚, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地安塞—富县地区延长组—延安组原油地球化学特征及油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 218-224.
- [17] 侯林慧, 彭平安, 于赤灵, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬—西峰地区原油地球化学特征及油源分析[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 497-506.
- [18] 王传远, 段 毅, 车桂美, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组原油地球化学特征及油源分析[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3): 380-386.
- [19] 郝 芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地质前缘, 2000, 7(3): 11-21.
- [20] 刘联群, 刘建平, 李 勇, 等. 鄂尔多斯盆地彭阳地区侏罗系延安组油气成藏主控因素分析[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3): 263-267.
- [21] 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长 8 油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1057-1064.
- [22] 张文正, 杨 华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地长 9₁ 湖相优质烃源岩成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 557-562.
- [23] 段 毅, 于文修, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地长 9 油层组石油运聚规律研究[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 855-860.