

青藏铁路片石气冷护坡措施实体工程试验研究

魏 静^{1,2}, 许兆义¹, 包黎明², 葛建军²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 铁道第一勘察设计院, 陕西 西安 710043)

摘要: 为解决在高温、高含冰量冻土地段修筑铁路工程后的路基稳定性技术难题, 在路基工程的设计中采用主动保护多年冻土的措施——片石气冷护坡, 通过调控路基下地温场以阻止或减少由于多年冻土地基融化下沉而引起的路基变形。在青藏铁路清水河高温冻土细粒土段进行片石气冷护坡路堤和普通路堤实体工程对比试验, 基于 3 个测试断面、2 个冻融循环的地温和变形监测资料, 对比分析片石气冷护坡措施路堤与普通路堤体内和基底的地温、积温、温度场中最大融化深度的变化情况以及路堤的变形特征。分析结果表明, 采用片石气冷护坡措施的路堤, 与普通路堤相比, 降温效果明显, 负积温量值大, 最大融化深度抬升幅度也较大, 沉降量小。因此, 片石气冷护坡能够有效发挥降低地温、保护多年冻土的作用, 是一种施作方便、适用条件较广泛的主动保护多年冻土措施。

关键词: 边坡工程; 青藏铁路; 片石; 地温; 积温; 沉降

中图分类号: P 642.14

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)05 - 1062 - 07

EXPERIMENTAL STUDY ON AIR-COOLING EMBANKMENT WITH RUBBLE SLOPE PROTECTION ALONG QINGHAI—TIBET RAILWAY

WEI Jing^{1,2}, XU Zhaoyi¹, BAO Liming², GE Jianjun²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. The First Railways Survey and Design Institute, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: The construction of Qinghai—Tibet Railway in permafrost regions is mainly confronted with three frozen soil problems, i.e. the thaw settlement, frost heaving and unfavorable features related to frozen ground. Among which the thaw settlement is a main reason for embankment deformation and destruction. Therefore, it is the chief problem to resolve in the engineering design for railway embankment due to the unique natural conditions on the Qinghai—Tibet Plateau. Furthermore, under the condition of global warming, in addition of keeping the landform, terrain and hydrological conditions of permafrost regions, the design should be initiated from railway embankment structure itself to create a proper condition beneficial for permafrost existence or development. To solve embankment stability problem in high temperature and high ice content area after the railway construction, a kind of positive measure to protect permafrost, i. e. air-cooling embankment with rubble slope protection, was designed to control ground temperature field in case of embankment deformation caused by permafrost thawing. Hence, experimental project, air cooling embankment with rubble slope protection and common embankment were designed and conducted in Qingshuihe, a field test section of high-temperature fine grain frozen soil region along Qinghai—Tibet Railway. Based on monitoring data of ground temperatures and settlement for three sections after two freezing-thawing cycles, the ground temperature, accumulated temperature, maximum thawing depth variation and deformation feature of these two kinds of embankments were analyzed comparatively. It was shown that the air-cooling embankment with rubble slope protection showed a better effect

收稿日期: 2005 - 04 - 12; **修回日期:** 2005 - 08 - 01

基金项目: 铁道部科技开发研究计划项目(2001G001 - B - 05); 铁道第一勘察设计院科技开发项目(院科 05 - 01)

作者简介: 魏 静(1973 -), 女, 博士, 1995 年毕业于西安地质学院水文地质与工程地质专业, 2004 年于天津大学岩土工程专业获博士学位, 现为北京交通大学博士后流动站和铁道第一勘察设计院博士后科研工作站出站博士后, 主要从事岩土与铁道工程方面的研究工作。E-mail: weijingping@eyou.com

on decreasing ground temperature, lowering minor accumulated temperature, elevating the maximum thawing depth evidently and reducing settlement than those of common embankment. Therefore, the air-cooling embankment with rubble slope protection, as a kind of conveniently and widely used construction measure, was a positive frozen soil protection measure for its effectively decreasing ground temperature and protecting permafrost.

Key words: slope engineering; Qinghai—Tibet Railway; rubble; ground temperature; accumulated temperature; settlement

1 引言

青藏铁路是世界上第一条在高原多年冻土地区修建的铁路,青藏铁路格拉段通过多年冻土区长度约 550 km,占全段约 50%。在高原冻土区修筑铁路路基后,改变了地热与大气的热交换条件,高温、高含冰量冻土极易在工程的影响下失去原有的热平衡状态,路基温度场和地基的稳定性会发生变化,其结果通常是下伏多年冻土温度升高、多年冻土融化而引起路基变形,由此导致冻土路基的严重病害^[1~4]。长期的工程实践表明,青藏铁路成败的关键在路基工程,而路基工程的关键是冻土问题。为了应对高温冻土和全球变暖的严峻挑战,在路基工程的设计中采用了多种主动保护冻土的措施,以确保工程稳定^[5~7]。

片石气冷护坡是一种控制热量传输过程的工程措施,前苏联、美国等国家曾对块碎石路堤或块碎石护坡进行过调查和试验研究。研究表明,该类措施可以降低路基和基底多年冻土地温,能够提高路基稳定性^[8,9]。D. J. Goering^[10,11]基于多孔介质流体动力学理论,对块石路堤的冬季对流换热机制进行了研究,研究表明,一定条件下块石路堤在冬季存在较强的自然对流效应,可起到冷却地基的作用。1960年中铁西北科学研究院在风火山进行了碎石路基工程试验,1973~1974年中国科学院冰川冻土研究所在青海热水地区进行了块石通路堤试验,1999年,中铁西北科学研究院在风火山铁路试验路基进行了路堑碎石边坡试验。以上试验结果表明,块碎石层在保护多年冻土、维持路堑边坡稳定性方面的效果较好^[8,9]。

为掌握青藏铁路工程的修筑对多年冻土的影响,同时为解决高温、高含冰量路基稳定性技术难题提供科学依据,在青藏铁路清水河高温冻土细粒土段进行了片石气冷护坡和普通路堤实体工程对比试验,对工程稳定性进行明确与量化的评价,这

对于尽快取得高原多年冻土区铁路设计和施工经验具有重要意义。本文基于3个观测断面的地温、变形观测资料对修筑铁路路基后下伏多年冻土的热状况和变形情况进行了分析。

2 片石气冷护坡试验工程概况

清水河段属昆仑山河谷地带向楚玛尔河高准平原区的过渡区域,地处清水河的片石气冷护坡试验段多年冻土年平均地温较高,抵抗外界热扰动的能力差。多年冻土厚度 30~60 m,其上限以下主要为高含冰量冻土,包括含土冰层、富冰、饱冰冻土,再向下为体积含冰量较小的多冰、少冰冻土。片石气冷护坡试验段各监测断面情况为:DK1026+155断面,填土高度 4.2 m,路基坡面铺设片石,片石厚度 1.2 m,左右对称;DK1026+190断面,填土高度 3.7 m,片石护坡厚度 0.8 m,左右对称;DK1026+230断面为普通路堤测试断面(以下简称对比断面),填土高度 6.2 m。断面测试项目包括地温和变形测试。

在每个监测断面距坡脚 20.00 m 处设天然测温孔确定各断面天然地温场分布状况。在路堤左右侧坡脚、左右侧路肩中心以及路基中心处分别布置测温孔。测温孔内分段布设温度传感器,顶端 0.05, 0.15, 0.30 m 处各设一个测点;顶端以下 0.30 m 至上限以上 0.50 m 段,每 0.50 m 设一个测点;上限上、下 0.50 m 段内,每 0.20 m 设一个测点,上限以下 0.50 m 至孔底每 0.50 m 布置一个测点。测试元件采用热电偶和热敏电阻。

进行变形测试的冻胀板埋设在 DK1026+155 和 DK1026+230 断面左、右路肩的路基表面下 0.20 m (1[#]和 5[#])处、路基中部(2[#]和 6[#])、路基基底(3[#]和 7[#])处和冻融交界面(4[#]和 8[#])处,对称于线路中心线布置。

监测内容包括:(1)片石气冷护坡与普通路堤地温的变化;(2)片石气冷护坡与普通路堤的沉降特性。

3 片石气冷护坡路堤温度特性

3.1 地温分析

(1) 天然地温场状况

根据各断面钻孔测温结果, DK1026+155 断面多年冻土年平均地温高达 $-0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, 天然场地冻土上限为 2.8 m, 属高温极不稳定区; DK1026+190 与 DK1026+230 断面多年冻土年平均地温分别为 $-1.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 天然场地多年冻土上限为 1.5 m, 属低温基本稳定区。根据天然测温孔的地温资料, 分析片石气冷护坡和普通路堤断面天然孔的冻融过程表明, 各断面 2002~2004 年度冻土天然上限基本保持不变。

(2) 路基中心孔冻融过程

路基中心下冻土上限的变化将直接影响路基的稳定性, 选取天然冻土条件差异较小的片石护坡 DK1026+190 断面和普通路堤 DK1026+230 断面的路基中心孔地温测试资料比较分析冻融过程的变化(见图 1, 2)。

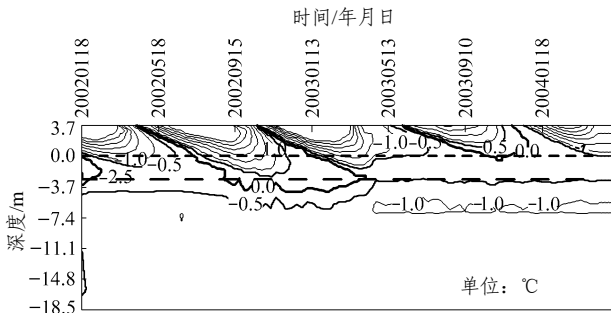


图 1 DK1026+190 断面路基中心孔冻融过程线
Fig.1 Freeze-thaw process curves of center hole in section DK1026+190

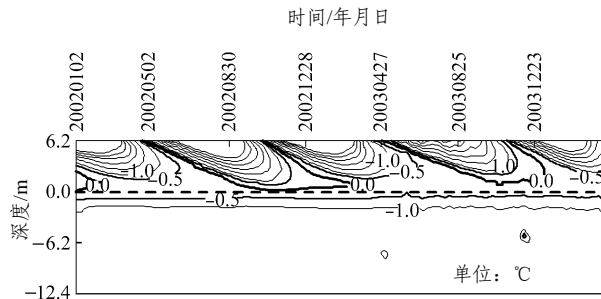


图 2 DK1026+230 断面路基中心孔冻融过程线
Fig.2 Freeze-thaw process curves of center hole in section DK1026+230

对比图 1, 2 可知, 2002~2003 年度, DK1026+

190 断面最大融化深度为 7.7 m, DK1026+230 断面最大融化深度为 6.0 m, 该年度片石气冷护坡断面最大融化深度大于普通路堤断面 1.7 m。2003~2004 年度, DK1026+190 断面最大融化深度为 4.2 m, 较 2002~2003 年度抬升 3.5 m, 而 DK1026+230 断面最大融化深度为 5.6 m, 较 2002~2003 年度仅抬升 0.4 m, 两断面相比, DK1026+190 断面最大融化深度抬升幅度很大。此外, 2003~2004 年度, DK1026+190 断面最大融化深度小于 DK1026+230 断面 1.4 m, 相对于 2002~2003 年度最大融化深度差值增加了 3.1 m, 这体现出片石气冷护坡措施具有能抬升冻土上限的作用, 而且随时间增加, 片石气冷护坡措施路基抬升冻土上限作用明显。

(3) 路基中心孔地温随时间的变化

路基中心下某一特定点的温度与路基结构紧密相关, 是地气热交换的内在反映。对比 3 个测试断面在路基本体 2.0 和 4.0 m 处地温随时间的变化, 可分析片石气冷护坡措施和普通路基的地温情况。

图 3 为路基中心孔 2.0 m 处地温随时间变化曲线。地温近似呈正弦波动曲线, 在每年 8~9 月份最高, 2~3 月份最低。暖季(2002 年 5 月~2002 年 10 月, 2003 年 5 月~2004 年 10 月), 两片石气冷护坡断面地温均低于对比断面, 2003 年 8 月 15 日, DK1026+155 和 DK1026+190 断面比 DK1026+230 断面相应地温分别低 1.89 $^{\circ}\text{C}$ 和 3.42 $^{\circ}\text{C}$; 寒季(2002 年 11 月~2003 年 4 月, 2003 年 11 月~2004 年 4 月), 两片石断面地温较对比断面高, 以上地温变化体现出片石气冷护坡的工作原理——“热开关效应”, 即片石体内因较大空隙和较强的自由对流使得冬夏冷热空气由于空气密度差异而不断发生冷量交换和热量屏蔽, 结果有利于保护多年冻土。由于 2003 年 4 月之前尚属施工影响期, 片石护坡的降温效果尚未完全显现, 随着地温场逐渐趋于稳定, 2003 年 5 月~2004 年 4 月, 片石断面较对比断面的地温差值增大(DK1026+190 断面增加更明显)。因此, 片石气冷护坡在路基中心 2.0 m 深处降温作用明显。

图 4 为路基中心孔 4.0 m 处地温随时间变化曲线。各断面在该处的地温, 每年 9~10 月份最高, 3~4 月份最低, 较路基中心孔 2.0 m 处滞后一个多月。2002 年 8~11 月, 2003 年 8 月~2004 年 2 月, 两片石护坡断面的地温较对比断面低。此外, 片石护坡断面较对比断面地温差值随时间逐渐增加, 片石护坡的降温作用已影响到路基基底附近处, 效果

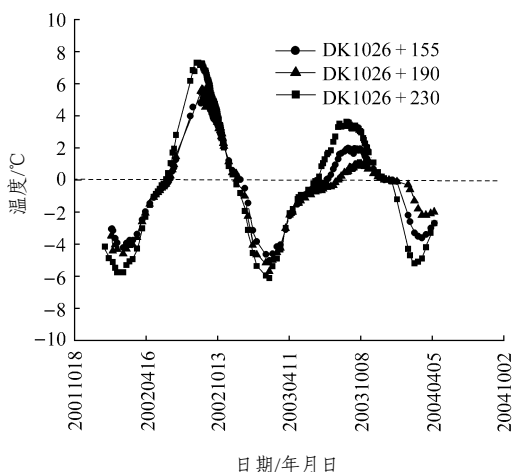


图 3 路基中心孔 2.0 m 处地温随时间变化曲线

Fig.3 Ground temperature variation with time at 2.0 m below center hole surface

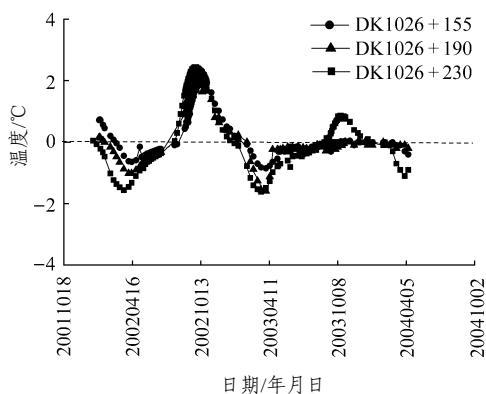


图 4 路基中心孔 4.0 m 处地温随时间变化曲线

Fig.4 Ground temperature variation with time at 4.0 m below center hole surface

较为明显。

3.2 积温分析

根据各测试断面左、右路肩孔、中心孔在路基表面、中部、基底附近深度的地温，可计算出各孔 2002 年 2 月~2003 年 2 月、2003 年 2 月~2004 年 2 月的积温。由表 1 可知，片石气冷护坡措施路堤 DK1026+155 和 DK1026+190 断面左路肩孔(路基阳坡)2003 年积温较 2002 年明显降低，负积温量值明显大于对比断面，DK1026+230 断面 2003 年积温较 2002 年有所降低，降低幅度远小于片石气冷护坡断面。由表 2 可知，从路基中心孔表面至路基基底，积温由正积温变为负积温，随着深度增加，片石护坡断面负积温量值大于普通路堤段。由表 3 可知，各断面右路肩孔(路基阴坡)的负积温量值呈降低趋势，片石气冷护坡断面路基积温的年度下降幅度略大于对比断面。

与普通填土路堤相比，片石气冷护坡措施降低路堤本体的积温效果明显，但由于阴、阳坡的影响导致路基本体左、右侧积温存在差异，就左、右侧对比而言，片石护坡路基在左侧(阳坡)的降温效果更好一些。

3.3 最大融化深度分析

图 5, 6 为 DK1026+190 断面地温场剖面图。图 5 中的路基阳坡(剖面图左侧部分)和阴坡(剖面图右侧部分)下的 0.00 °C 等温线均抬升，阴坡的抬升幅度较大。图 5(b)中 2003 年片石气冷护坡路基中心

表 1 各断面左路肩孔 2002~2003 年积温对比

Table 1 Accumulated temperature of left shoulder hole in each section from 2002 to 2003 °C · d

位置	DK1026+155			DK1026+190			DK1026+230		
	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值
路基表面	2 032.90	982.86	-1 050.04	1 026.73	85.86	-940.87	2 963.67	3 446.77	483.10
路基中部	-12.91	-507.42	-494.51	42.78	-282.10	-324.88	471.41	377.36	-94.05
路基基底	209.60	-198.35	-407.95	49.06	-128.10	-177.16	54.50	34.64	-19.86

表 2 各断面中心孔 2002~2003 年积温对比

Table 2 Accumulated temperature of center hole in each section from 2002 to 2003 °C · d

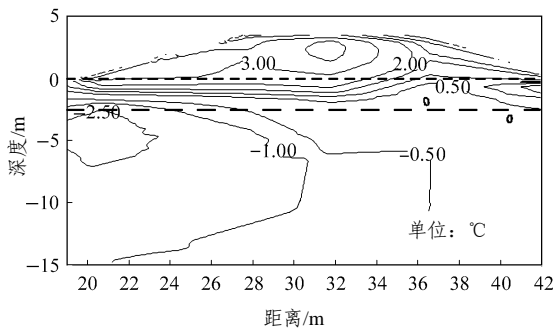
位置	DK1026+155			DK1026+190			DK1026+230		
	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值
路基表面	-362.68	-244.46	118.22	-329.90	-270.32	59.58	-145.04	-197.60	-52.56
路基中部	18.48	-232.67	-251.15	-23.34	-323.28	-299.94	52.85	-145.42	-198.27
路基基底	118.66	-78.82	-197.48	92.79	-113.48	-206.27	-26.16	-59.95	-33.79

表 3 各断面右路肩孔 2002~2003 年积温对比

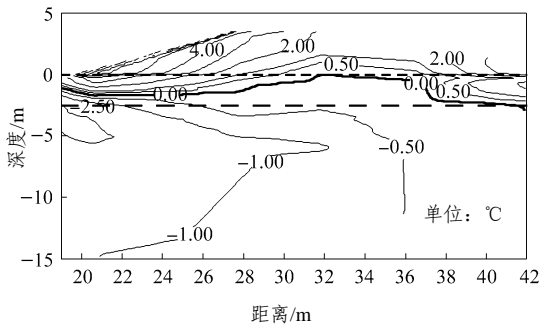
Table 3 Accumulated temperature of right shoulder hole in each section from 2002 to 2003

°C · d

位置	DK1026+155			DK1026+190			DK1026+230		
	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值	2002年	2003年	差值
路基表面	876.36	-120.51	-996.87	334.95	-648.31	-983.26	-301.89	-1265.53	-963.64
路基中部	-642.03	-811.71	-169.68	-566.61	-735.99	-169.38	-364.02	-510.89	-146.87
路基基底	-148.08	-212.34	-64.26	-241.25	-360.75	-119.50	-119.01	-169.11	-50.10



(a) 2002 年 10 月 10 日



(b) 2003 年 10 月 10 日

图 5 DK1026+190 断面地温场剖面图

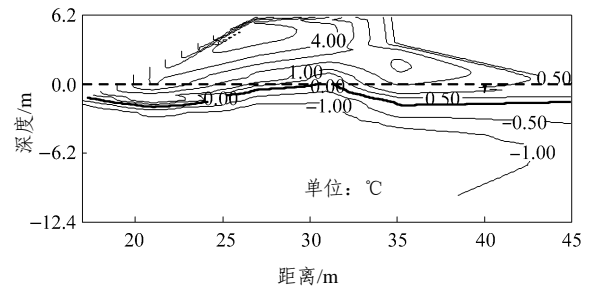
Fig.5 Ground temperature field profile of section DK1026+190

孔下 0.00 °C 等温线基本达原天然地表处, 比 2002 年同期(见图 5(a))抬升了近 4 m。此外, 中心孔下 -0.50 °C 等温线抬升幅度也较大。

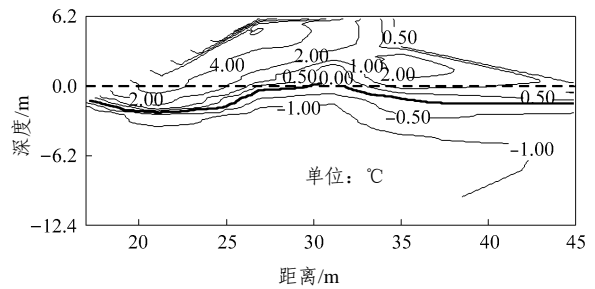
图 6 为 DK1026+230 断面片石护坡地温剖面图, 最大融化深度均在路基本体基底以下, 与 2002 年相比, 2003 年路基下 0.00 °C 等温线略有抬升。

4 片石气冷护坡路堤变形特性

分析测试断面变形资料, 图 7~10 为 DK1026+155 和 DK1026+230 断面变形时间曲线, 对比图 7~10 可知, DK1026+155 断面左、右路肩变形均小于 DK1026+230 断面; 同一断面左路肩变形均大于



(a) 2002 年 10 月 10 日



(b) 2003 年 10 月 10 日

图 6 DK1026+230 断面片石护坡地温剖面图

Fig.6 Ground temperature field profile of section DK1026+230

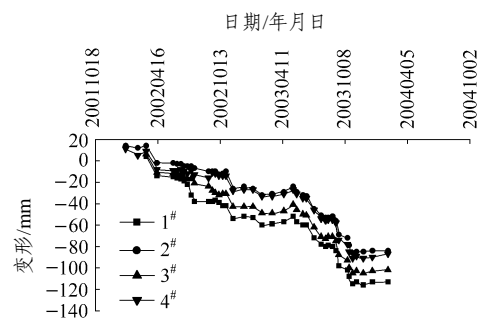


图 7 DK1026+155 断面左路肩变形时间曲线

Fig.7 Deformation-time curve of left shoulder in section DK1026+155

相应右路肩; DK1026+155 断面左、右两侧变形小于 DK1026+230 断面左、右两侧变形差值。

表 4 为 2002 年 4 月 14 日~2004 年 2 月 9 日期间 DK1026+155 和 DK1026+230 断面累计变形统

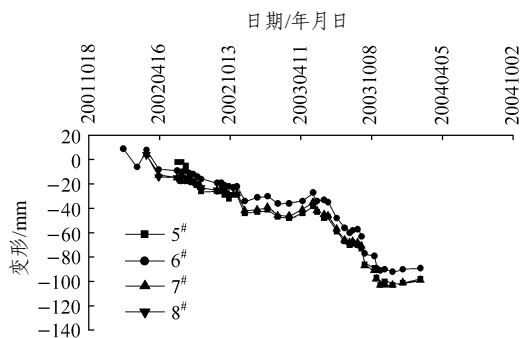


图 8 DK1026+155 断面右路肩变形时间曲线

Fig.8 Deformation-time curves of right shoulder in section DK1026+155

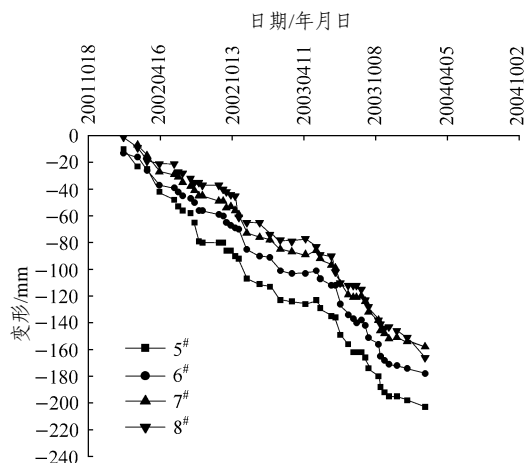


图 10 DK1026+230 断面右路肩变形时间曲线

Fig.10 Deformation-time curves of right shoulder in DK1026+230

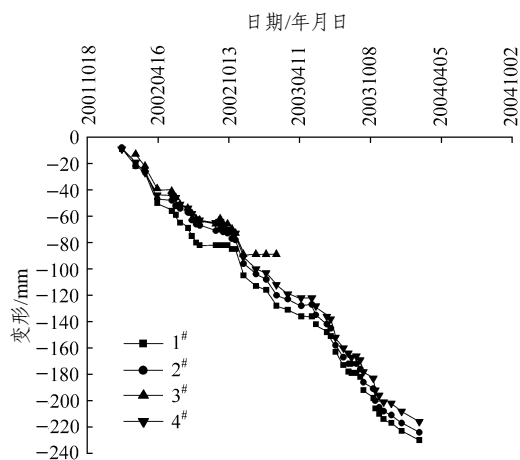


图 9 DK1026+230 断面左路肩变形时间曲线

Fig.9 Deformation-time curves of left shoulder in section DK1026+230

计表。从表 4 中可以看出，路基表面的累计变形量大于基底的累计变形量，而基底的累计变形量大于冻融交界面的累计变形量，变形总体趋势明显。

各测试断面累计变形量和变形速率见表 5。2002 和 2003 年 DK1026+155 断面路基左、右侧下沉速率均小于 DK1026+230 断面，这说明随时间的增加片石气冷护坡措施能够减小路基的变形。此外，DK1026+155 断面左、右路肩 2003 年的变形速率均小于 2002 年，说明路基变形逐年趋于稳定，而且该断面左、右侧路基平均变形速率与对比断面相比相

表 4 各测试断面累计变形统计表

Table 4 Accumulative deformation statistics of each test section

断面	变形/mm							
	左侧表面(1#)	路基中部(2#)	左侧基底(3#)	左冻融界面(4#)	右侧表面(5#)	路基中部(6#)	右侧基底(7#)	右冻融界面(8#)
DK1026+155	-99	-82	-91	-79	-98	-81	-86	破坏
DK1026+230	-180	-177	破坏	-172	-161	-141	-133	-132

注：负值表示沉降。

表 5 各测试断面累计变形和变形速率表

Table 5 Accumulated deformation and deformation rate of each test section in different years

年度	DK1026+155 左侧表面		DK1026+155 右侧表面		DK1026+230 左侧表面		DK1026+230 右侧表面	
	变形/mm	变形速率/(mm · d ⁻¹)	变形/mm	变形速率/(mm · d ⁻¹)	变形/mm	变形速率/(mm · d ⁻¹)	变形/mm	变形速率/(mm · d ⁻¹)
2002 年	-46	-0.152	-47	-0.155	-78	-0.257	-81	-0.269
2003 年	-53	-0.146	-51	-0.140	-102	-0.281	-80	-0.220
合计	-99	-0.149	-98	-0.147	-180	-0.270	-161	-0.242

差较小,这说明片石护坡路基能够减小不均匀沉降。

5 结 语

综合以上分析,可以得到如下结论:

(1) 通过对地温随时间变化和最大融化深度变化的分析,其结果表明片石气冷护坡措施路堤在路基本体及基底的降温效果明显,抬升冻土上限作用明显,而普通路堤地温场随时间变化不明显。

(2) 根据各测试断面左、右路肩及路基中心孔不同深度、不同年度的积温变化分析,结果表明片石气冷护坡断面积温的下降幅度大于对比断面。此外,片石气冷护坡在路基左路肩(阳坡)降温效果更好。

(3) 对 DK1026+155 和 DK1026+230 断面的变形监测资料分析和现场调研表明,片石气冷护坡断面较普通路堤断面的沉降量小,且随时间增加,片石气冷护坡措施能减小路基变形和不均匀沉降,路基变形逐年趋于稳定。

因此,片石气冷护坡措施能够发挥降低地温、保护多年冻土的作用,并有利于坡面防护和路基工程的稳定,是一种施作方便、适用条件较广泛的主动保护多年冻土措施。

参考文献(References):

- [1] 温 智, 盛 煜, 吴青柏. 青藏铁路路基浅地表热状态动态监测初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2 664 - 2 668. (Wen Zhi, Sheng Yu, Wu Qingbai. Dynamic monitoring of thermal state for shallow ground in Qinghai—Tibet Railway embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 664 - 2 668.(in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 俞祈浩, 程国栋, 牛富俊. 自动温控通风路基应用效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 221 - 4 228.(Yu Qihao, Cheng Guodong, Niu Fujun. Effect analysis of auto-temperature-controlled ventilation roaded[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 221 - 4 228.(in Chinese))
- [4] 盛 煜, 马 巍, 温 智. 青藏铁路高填方路基对下伏多年冻土热状况的影响[J]. 铁道工程学报, 2003, (4): 22 - 25.(Sheng Yu, Ma Wei, Wen Zhi. Effect of high embankment on the thermal regime of underlying permafrost in Qinghai—Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003, (4): 22 - 25.(in Chinese))
- [5] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 青藏铁路建设中动态设计思路及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 537 - 540.(Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Study and application of idea of dynamic design in Qinghai—Tibet Railway construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 537 - 540.(in Chinese))
- [6] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579 - 588.(Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579 - 588.(in Chinese))
- [7] 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.(Cheng Guodong. Construction of Qinghai—Tibet Railway with cooled roadbed[J]. China Railway Science, 2003, 24(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [8] 中铁西北科学研究院有限公司. 清水河高温冻土细粒土段片石气冷护坡试验研究[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院, 2004.(Northwest Research Institute Co., Ltd., of C. R. E. C.. Study on embankment with rubble slope protection in Qingshuihe Area with fine grain and high temperature frozen soil[R]. Lanzhou: Northwest Research Institute Co., Ltd., of C. R. E. C., 2004.(in Chinese))
- [9] 铁道第一勘察设计院. 青藏铁路多年冻土区路桥涵关键技术的研究阶段成果报告——路基新结构片(碎)石气冷护坡试验研究[R]. 兰州: 铁道第一勘察设计院, 2004.(The First Railway Survey and Design Institute. Experimental study on embankment with rubble or crushed rock slope protection[R]. Lanzhou: The First Railways Survey and Design Institute, 2004.(in Chinese))
- [10] Goering D J. Passively cooled railway embankments for use in permafrost areas[J]. J. Cold Regions Engineering, 2003, 17(3): 119 - 133.
- [11] Goering D J. Air convection embankment environmental feature design[R]. Fairbanks: The Alaska Department of Transportation and Public Facilities Statewide Research, 1997.