

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

王小军^{1,2}, 韩文峰¹, 蒋富强², 牛怀俊², 谌文武¹, 武小鹏², 刘保升²

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中铁西北科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 青藏铁路清水河多年冻土试验段, 平均海拔 4 470 m, 冻土年平均地温为 $-1.40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻土上限为 1.5~3.5 m, 2001 年 9~11 月施工。2002 年 10 月前后, 路基相继出现多条纵向裂缝。为研究试验段路基裂缝成因及片石路基沉降量较大等问题, 2003 年 5 月对 DK1026+630 和 DK1025+583 断面进行解剖分析, 如实记录开挖路基基本情况, 进行现场和室内试验, 分析路基沉降和裂缝形成规律, 计算路基沉降量。结果表明, 路基沉降由在外荷载作用下路基本体的压密沉降和基底以下地层的压密和融化沉降两部分组成, 由于两个路基断面填料压实度均匀良好, 其沉降量主要来自于地层的压密变形和融沉, 路基沉降量的计算值与实测值基本一致。DK1026+630 断面裂缝贯穿路基本体, 为融沉裂缝, 是由于路基阳侧原天然地面下泥灰岩风化物融化压缩引起路基体横向不均匀沉降造成的。由于片石有调解人为上限形态和抑制路基不均匀变形的作用, 故片石路基没有产生融沉裂缝, 但在竣工初期却表现出较大的沉降量。

关键词: 土力学; 青藏铁路; 片石通风路基; 沉降; 普通路基; 裂缝; 解剖分析

中图分类号: TU 43; P 642.14

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)09 - 1904 - 08

DISSECTION AND ANALYSIS OF SETTLEMENT OF RUBBLE VENTILATION EMBANKMENT AND CRACK OF ORDINARY EMBANKMENT IN PERMAFROST REGIONS

WANG Xiaojun^{1,2}, HAN Wenfeng¹, JIANG Fuqiang², NIU Huaijun²,
CHEN Wenwu¹, WU Xiaopeng², LIU Baosheng²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Northwest Research Institute of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The permafrost experimental segment is located in the region of Qingshui River along Qinghai—Tibet Railway, with an average elevation of 4 470 m, mean annual ground temperatures between $-1.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ and permafrost table in the range of 1.5 to 3.5 m. It was begun to construct in September, 2001, finished in November, 2001. The many longitudinal cracks of roadbed emerged in succession in October, 2002 or so. for the sake of the research on the reason of cracking of roadbed and the larger settlement of rubble stone ventilation embankment, the cross-sections of DK1026+630 and DK1025+583 were chosen to dissect in May, 2003. The basic conditions of roadbed after excavation were really recorded, at the same time the field and laboratory tests were conducted. The settlement of roadbed and the regular pattern of cracking were also analyzed. Lastly the

收稿日期: 2005 - 06 - 28; **修回日期:** 2005 - 11 - 28

基金项目: 铁道部重点课题资助项目(2003G021 - D)

作者简介: 王小军(1965 -), 男, 1986年毕业于兰州铁道学院土木工程系铁道工程专业, 现为博士研究生、教授级高级工程师、硕士生导师, 主要从事高原冻土、膨胀土岩、黄土等特殊岩土和各类岩土与建材的室内外试验、原位测试与检测方面的教学与研究工作。E-mail: gzlwzwxj@vip.sina.com

settlement of roadbed was theoretically calculated. The above results indicate that the settlement of roadbed is composed of both the compressive settlement of roadbed body and the thaw and compressive settlements for frozen subgrade under the external loads. Because the compaction degree is an even and good in two cross-section of roadbed, the settlement of roadbed primarily consists of thawing and compressing deformation in the base strata. The calculating values of settlement of roadbed are basically in accordance with real measuring ones of that. The crack in cross-section DK1026+630 pierces through the roadbed body and belongs to thaw-settlement fissure, which is caused by differential cross settlement of roadbed that is formed on the basis of thawing and compressing settlement in weathered marl under base surface in the sun side of roadbed. Since the rubble can adjust the shape of artificial permafrost table and control the differential cross settlement of roadbed, the rubble ventilation embankment shows a larger settlement in the initial period of completion it without thaw-settlement fissure.

Key words: soil mechanics; Qinghai—Tibet Railway; rubble ventilation embankment; settlement; ordinary embankment; crack; dissection and analysis

1 引言

青藏铁路穿越 546 km 多年冻土区, 多年冻土区筑路技术是最为关键的技术难题。2001 年青藏铁路开工以后, 在清水河等多年冻土区先期进行了路基试验工程的建设, 为其后全面开展多年冻土区路基工程的设计和施工提供了有益的经验。青藏铁路清水河多年冻土试验段平均海拔 4 470 m, 地形较为平缓, 局部略有起伏, 发育小型固定沙丘、积水洼地, 植被覆盖率为 15%~20%。年平均气温 $-6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 187.2 mm, 年平均蒸发量 1 664.5 mm; 地表水为冲沟季节洪水, 地下水以暖季分布的冻结层上水为主。地层为第四系全新统冲、洪积黏砂土、砂黏土、砂砾石土、风积砂及下伏第三系泥岩、泥质页岩、泥灰岩等。冻土年平均地温为 $-1.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, 介于低温基本稳定多年冻土区和高温极不稳定多年冻土区之间。冻土上限为 1.5~3.5 m, 含土冰层、富冰、饱冰冻土均有分布, 局部地段有厚层地下冰。

试验段起止里程 DK1024+400~DK1027+400, 主要有热棒路基、保温材料路基、通风管路基、片石通风路基、片石保温护坡、普通路基等 10 余项试验工程。施工起止时间为 2001 年 9~11 月。2002 年 9 月经调查发现, 试验段路基出现纵向裂缝 27 条, 长度 10~43 m, 宽度 3~35 mm。同年 10 月, 裂缝增至 49 条, 其中纵向裂缝 40 条, 长度 5.5~107.0 m, 宽度 2~70 mm; 斜向裂缝 8 条, 长度 9.0~20.5 m, 宽度 5~40 mm; 横向裂缝 1 条, 长度 4 m, 宽度 30~50 mm。2003 年 1 月较 2002 年 10 月路

基又增加横向裂缝 50 条, 长度 1.3~30.0 m, 宽度 3~40 mm; 增加纵向裂缝 36 条, 长度 2.1~130.0 m, 宽度 5~50 mm; 增加斜向裂缝 7 条。纵向裂缝多分布在阳侧坡面、护道、路肩及路基表面。横向裂缝大部分分布在测试断面、路桥和路涵及不同工程措施过渡段处。普通路基裂缝相对较多。为了研究试验段路基裂缝的形成原因、发展规律及片石路基沉降量较大等问题, 2003 年 5 月对 DK1026+630 和 DK1025+583 断面进行了解剖分析。曾有学者^[1~3]对多年冻土区公路和铁路路基变形及由此衍生的路基裂缝进行过调查和初步分析, 但至今未见到有关多年冻土区青藏铁路和公路路基变形现场解剖分析的论著。

2 路段情况

2.1 DK1026+630 断面

本段为普通路基, 长约 400 m, 填料为粗颗粒土, 中心填高 4.2 m, 路面宽 9 m, 两侧分设 2.9 和 1.9 m 宽土护道, 边坡坡率 1:1.5^[4]。原始地形平坦开阔, 沿线路方向左低右高, 左侧为阳侧。天然地面以下 3 m 深度范围内可分 2 层: 上层为中砂, 厚 300~450 mm; 下层为全风化泥灰岩, 隐晶质结构, 块状构造, 岩体中裂隙冰发育。多年冻土天然上限 1.2~2.5 m, 平均 1.9 m; 年平均地温 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于低温基本稳定区(Tcp - III)。2002 年 10 月前后, 路基相继出现多条纵向裂缝。其中 DK1026+590~DK1026+684 路基面上的纵向裂缝长度 94 m, 宽度 20~30 mm, 在左路肩到路基中心的路面范围内纵向展布(见图 1), 典型断面为 DK1026+630。



图1 DK1026+590~DK1026+684 路基表面纵向裂缝

Fig.1 Longitudinal crack of roadbed surface between DK1026+590 to DK1026+684

2.2 DK1025+583 断面

DK1025+550~DK1025+600 段为片石通风路基, 中心填高 6.3 m, 路面宽度 8.5 m, 片石层厚度 1.5 m。边坡坡率 1 : 1.5, 左侧为阳侧。施工时直接碾压天然草皮地面, 上铺 300 mm 厚砾砂垫层路拱, 堆填块径 200~400 mm、厚度 1.5 m 的片石层, 其上铺筑 300 mm 厚的圆砾石垫层, 再上面铺防

渗土工布, 路基本体用粗颗粒土填筑, 分层填筑厚度 300~350 mm, 采用 YZ18T 振动压路机进行碾压, 碾压 4~6 遍。基底由中砂层、砾砂层和泥灰岩等少冰~饱冰冻土与含土冰层组成, 天然上限 2.45 m, 年平均地温 -0.91 °C~-0.7 °C, 属于高温不稳定区(Tcp - II)。截止 2003 年 5 月, 路基左侧表面沉降量 195 mm, 右侧表面沉降量 155 mm, 平均 175 mm。与试验段其他工程相比, 沉降量较大。故选取 DK1025+583 断面进行地质解剖。

3 断面解剖

3.1 DK1026+630 断面解剖情况

开挖起止里程: DK1026+630~DK1026+638。路基结构、冻融交界面、裂缝及天然上限、人为上限和地层等详细情况标绘在图 2 中, DK1026+630 断面开挖情况见表 1, 室内和现场试验结果分别见表 2, 3。

对比表 2, 3 可以看出, 路基填料的最佳含水率为 3.6%~4.8%, 最大干密度为 2.17~2.27 g/cm³,

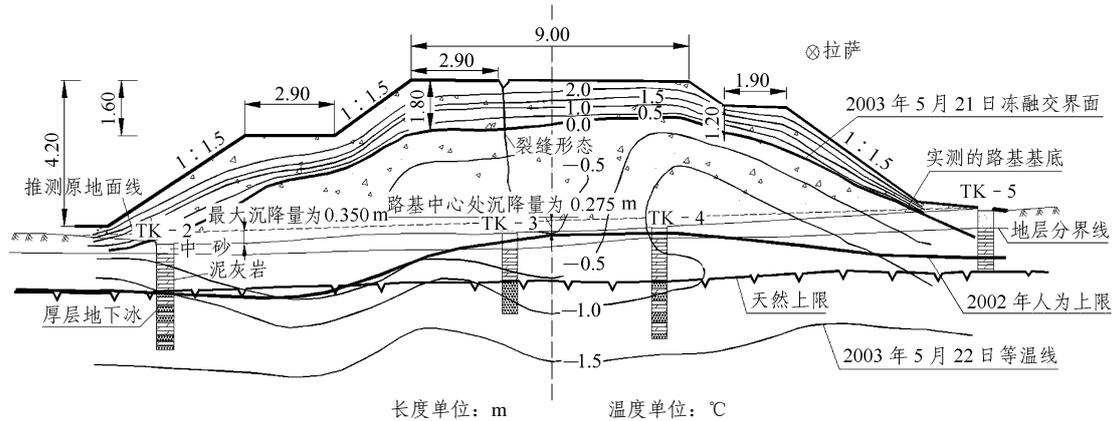


图2 DK1026+630 普通路基断面综合分析图

Fig.2 Comprehensive analysis of cross-section DK1026+630 of ordinary embankment

表1 DK1026+630 断面开挖情况表

Table 1 Excavation conditions of embankment cross-section DK1026+630

开挖方式	基底探坑编号	水平位置	开挖深度/m	情况记录
全断面机械开挖			0.5(路基面下)	较路基面潮湿
			1.2~1.8(路基面下)	阳侧 1.8 m、阴侧 1.2 m, 挖至冻融交界面
			3.8(路基面下)	裂缝倾角 79°
			挖至天然地面附近	每铲挖深约 100 mm, 开挖困难
局部探坑机械开挖	TK - 1	左坡脚外 10 m 天然地面	1.2(天然地面下)	见厚层地下冰
	TK - 2	路基左坡脚内 1.5 m	3.0(基底面下)	1.4 m 处见到含土冰层, 厚 1.7 m, 其中有 5 层冰、4 层风化泥灰岩, 冰、土层薄厚不均, 厚度 60~470 mm
	TK - 3	左路肩向右 2.9 m 裂缝处	2.3(基底面下)	1.30~1.38 m 处见到厚层地下冰, 厚度 1.0 m
	TK - 4	右路肩向左 1.2 m	3.1(基底面下)	1.55 m 处见到厚层地下冰
	TK - 5	路基右坡脚与挡水坎之间	1.8(天然地面下)	0.64 m 处见 6~10 mm 厚的冰层, 1.8 m 处见厚层地下冰
	TK - 6	右坡脚外 15 m 天然地面	2.5(天然地面下)	0.3~2.5 m 深度范围内裂隙冰发育, 厚 5~6 mm, 2.5 m 处见厚层地下冰

表 2 DK1026+630 断面室内试验结果
Table 2 Laboratory test results for embankment cross-section DK1026+630

填料名称	取样深度/m	各粒径百分含量/%								标准击实值	
		>40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	最大干密度 (g·cm ⁻³)	最佳含水率 /%
角砾土	0.60(路基面以下)	8.4	26.5	13.2	11.5	8.9	14.7	9.2	7.6	2.27	4.2
	1.08(路基面以下)	11.7	16.0	14.3	15.7	11.2	19.5	7.6	4.0	2.27	3.8
	1.80(路基面以下)	19.1	12.8	9.8	13.1	10.5	19.9	9.3	5.5	2.17	3.6
	2.70(路基面以下)	14.8	12.8	13.2	15.2	11.2	19.2	9.3	4.3	2.21	4.8
中砂	0.50(原地面下)					8.5	40.5	17.0	34.0	1.79	17.5

表 3 DK1026+630 断面现场试验结果
Table 3 Field test results on embankment cross-section DK1026+630

填料/地基石名称	取样深度/m	含水率/%		干密度(g·cm ⁻³)		压实度	相对密度	测点说明
		实测值	平均值	实测值	平均值			
角砾土	0.0(路基面以下)	2.8~3.0	2.9	2.05~2.15	2.10	0.93	0.60~0.80	2 处
角砾土	0.5(路基面以下)	3.0~4.8	3.9	2.09~2.22	2.16	0.95	0.76~0.92	5 处
角砾土	1.0(路基面以下)	3.8~4.0	3.9	2.11~2.22	2.17	0.96	0.74~0.92	3 处
角砾土	1.5(路基面以下)	3.8~5.1	4.5	1.93~2.17	2.05	0.94	0.80~1.00	4 处
角砾土	2.5(路基面以下)	4.0~4.4	4.2	2.05~2.27	2.16	0.98	0.74~1.00	5 处
角砾土	3.5(路基面以下)	3.0~4.8	3.9	1.95~2.03	1.99	0.90	0.70	6 处
角砾土	4.0(路基面以下)	2.2~5.0	3.6					5 处
中砂	4.5(路基面以下)	11.8~20.0	15.9	1.70	1.70			7 处
风化泥灰岩	5.0(路基面以下)	14.6~33.8	24.2	1.46	1.46			7 处
含土冰层	5.5(路基面以下)	36.4	36.4	1.32	1.32			3 处

实测填料的平均含水率为 2.9%~4.5%，压实度和相对密度分别在 0.90 和 0.70 以上(路基表层除外)。因此，实测含水率在最佳含水率范围，且压实度和相对密度满足《铁路路基设计规范》(TB10001 - 1999)^[5]中基床表层和以下部分最低值分别为 0.91, 0.75 和 0.89, 0.70 的要求，路基压实状况良好。

开挖后发现基底原始地面线发生沉降变形，形成了图 2 所示的凹陷形状。假定以路基左右侧坡脚外天然地面点连线作为路基未填筑前基底原始地面线，开挖后实测原始基底沉降量见表 4。

通过断面解剖发现，路基表面裂缝距左路肩 2.9 m，裂缝由路基表面至基底范围内均清晰可见(见图 3)。路基表面下 1.1 m 深度范围内，裂缝接近直立，裂缝宽度 20 mm；路面下 1.1~2.6 m 深度范围内，裂缝宽度 10 mm 左右，往下裂缝宽度由 5 mm

表 4 开挖后实测原始基底沉降量
Table 4 Real settlement of original embankment foundation after excavation

对应的天然地面位置	原始基底沉降量/mm
阳侧保温护道肩	350
阳侧路肩	275
路基裂缝处	275
路基中心	275
阴侧路肩	225
阴侧保温护道肩	225

逐渐向 2 mm 过渡。随深度增加，裂缝逐渐向右偏移，至原地面处尖灭，裂缝向右偏移 350 mm，裂缝倾角 79°~81°，沿路基断面向阳侧外倾。冻融界面以下深度的裂缝内主要被颗粒状冰晶所充填。



图3 DK1026+630 断面纵向裂缝贯通路基本体
Fig.3 Longitudinal crack penetrating embankment body in DK1026+630 section

从表 4 和图 2 中可以得出：经过近 18 个月，路基基础出现了不同程度的压密和融化下沉，基底最大沉降量为 350 mm，距路基表面裂缝位置水平距离为 8.2 m；左路肩~右路肩范围内的基底沉降量为 275~225 mm，与最大沉降量相差 75~125 mm。

3.2 DK1025+583 断面解剖情况

该断面路基结构、冻融交界面、裂缝及天然上限、人为上限和地层等详细情况见图 4，开挖情况见表 5，室内和现场试验结果见表 6，7。

从表 6，7 中可以看出，路基填料的最佳含水率为 2.8%~4.0%，最大干密度为 2.17~2.19 g/cm³，

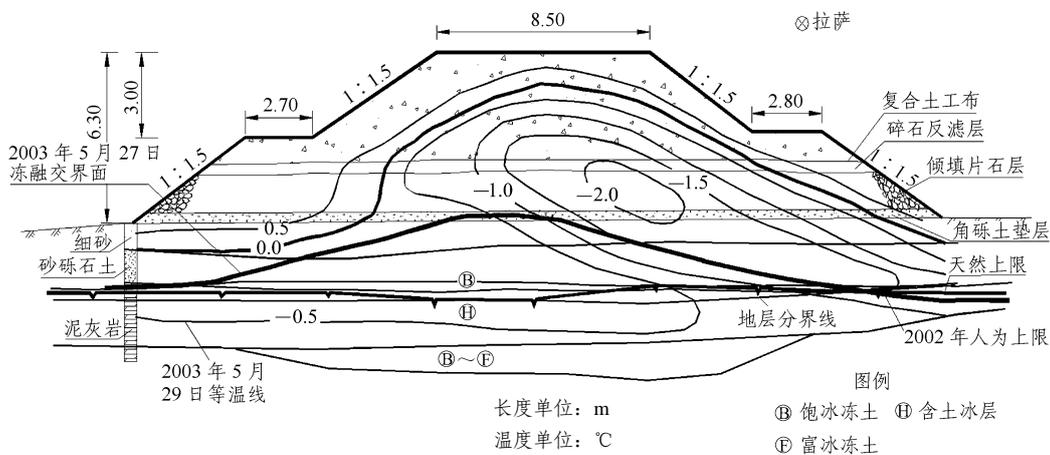


图4 DK1025+583 倾填片石路基断面综合分析图
Fig.4 Comprehensive analysis of cross-section DK1025+583 of rubble ventilation embankment

表 5 DK1025+583 断面开挖情况表

Table 5 Excavation conditions of embankment cross-section DK1025+583

开挖方式	基底探坑编号	水平位置	开挖深度/m	情况记录
全断面机械开挖			1.0(路基面下)	开挖容易
			1.2~2.3(路基面下)	阳侧 2.3 m、路基中心 1.2 m、阴侧 1.5 m 挖至冻融交界面
			3.8(路基面下)	量测防渗土工布处高程及块石粒径
局部探坑	TK-1	左坡脚外 10 m 天然地面	2.5(天然地面下)	左探坑融化深度为 0.65 m，上限为 1.85 m
机械开挖	TK-2	右侧挡水埝外 5 m 天然地面	3.0(天然地面下)	右探坑融化深度为 1.00 m，上限为 2.50 m

表 6 DK1025+583 断面室内试验数据

Table 6 Laboratory test data on embankment cross-section DK1025+583

填料名称	取样位置/m	各粒径百分含量/%							标准击实值		
		>40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	最佳含水率 / %
0.3(路基面以下)	20.1	13.8	15.0	15.1	9.2	15.7	7.5	3.6	2.17	2.8	
角砾土	2.8(路基面以下)	4.0	23.7	17.6	12.8	8.8	16.7	11.6	4.8	2.19	3.3
4.5(路基面以下)	15.9	16.1	12.4	12.5	11.0	24.4	5.6	2.1	2.19	4.0	

表 7 DK1025+583 断面现场试验数据及压实度与相对密度

Table 7 Field test data, compaction degree and relative density in embankment cross-section DK1025+583

填料/地基土名称	取样深度/m	含水率/%		干密度/(g · cm ⁻³)		压实度	相对密度	测点说明
		实测值	平均值	实测值	平均值			
角砾土	0.0(路基面以下)	2.3~3.5	2.9	2.12~2.20	2.16	1.00	0.88~0.97	3 处
角砾土	1.0(路基面以下)	2.6~4.2	3.4	2.00	2.00		0.58	2 处
角砾土	2.0(路基面以下)	3.1~5.2	4.2					3 处
角砾土	2.5(路基面以下)	3.9~5.0	4.5	2.13	2.13		0.90	3 处
角砾土	3.0(路基面以下)	2.8~3.4	3.1	2.12~2.19	2.16	0.99	1.00	3 处
角砾土	3.5(路基面以下)	2.8~3.4	3.1	2.16~2.22	2.19	1.00	0.88~1.00	5 处
中砂	6.5(路基面以下)	12.8	12.8	1.70	1.70			
砾砂	8.0(路基面以下)	18.7	18.7	1.80	1.80			

而实测填料的平均含水率为 2.9%~4.5%，压实度和相对密度基本分别在 0.90 和 0.70 以上(路基下 1.0 m 处除外)。因此，实测含水率在最佳含水率范围，且压实度和相对密度满足《铁路路基设计规范》(TB10001 - 1999)^[5]的要求。

4 路基裂缝成因分析与沉降计算

4.1 裂缝分类

依据路基裂缝形成原因可分为两类，即融沉裂缝和寒冻裂缝，其融沉裂缝与寒冻裂缝特征见表 8。

表 8 融沉裂缝与寒冻裂缝特征

Table 8 Properties of thaw-settlement crack and frost crack

裂缝类别	含义	发生时间	表现特征
融沉裂缝	在最大融化季节，多年冻土区路基横向不均匀沉降产生的裂缝，属融沉裂缝	暖季(8~10月)	裂缝宽度 10~40 mm，长度 10~50 m，深度较深，裂缝垂向呈“V”型，无明显错台，属张口裂缝。以纵向裂缝为主，多分布于阳坡坡面、护道、路肩及路基表面
寒冻裂缝 ^[6-7]	冬季强烈冷却时，冻土体表面常常因强烈收缩开裂形成的有序或无序的裂缝，属寒冻裂缝	寒季(12月~次年2月)	裂缝宽度 5~20 mm，长度 10~30 m，深度可穿透活动层或贯入多年冻土 5~6 m，垂向呈“V”型，暖季可闭合。横向裂缝最多，纵向裂缝次之，也有少量斜向裂缝。横向裂缝在不同措施过渡段及测试断面上出现较多；纵向裂缝多分布于阳坡路肩、坡面及护道上；斜向裂缝出现在热棒路基上

从表 8 中可以看出：

(1) 两种裂缝特征的不同点是：融沉裂缝发生在暖季，以纵向裂缝为主；寒冻裂缝发生在寒季，横向、纵向、斜向裂缝都有，暖季可闭合。大多数融沉裂缝的宽度大于寒冻裂缝。

(2) 两种裂缝特征的相同点是：融沉裂缝和寒冻裂缝均大多分布于阳坡路肩、坡面及护道上，垂向均呈“V”型。

依据表 8 所列的裂缝特征，可以确定 DK1026+630 断面的裂缝属于融沉裂缝。

4.2 路基沉降和裂缝成因分析

路基融沉裂缝是路基横向不均匀沉降产生的，首先应分析路基沉降由那几部分组成。路基沉降由在外荷载作用下路基本体的压密沉降和基底以下地层的压密和融化沉降两部分组成^[8]，在施工阶段，列车静荷载和动荷载都未作用的情况下，外荷载仅为填土荷载。由于路基本体的压实度良好而且比较均匀，所以其沉降量很小而且不会产生不均匀沉降；路基沉降量主要来自于地层的压密变形和融沉。该段路基的填筑时间正处于暖季末，不仅季节活动层本身的地温较高，而且路基填土相当于给天然地面加盖了一层保温层，阻止了地中热量的散发，高温路基填土增加了热量向地基传导，因此，在内部蓄热消散达到新的地温场平衡前一个时期内，在路基自重应力作用下，造成地基多年冻土天然上限范围以内土体压密变形及其以下少部分冻土融化压缩。其次，由于路基阴阳侧受到太阳辐射加热的程度不同，使得路基地温场明显的不对称，由此造成这种沉降变形在横向往往是不均匀的。路基填筑完成后阳面较阴面融深大，路基下多年冻土人为上限不对称，在自重作用下，阳侧路基会倾斜下错，在张拉应力作用下路基体被张拉开一定宽度的纵向裂缝^[9]。以上分析在 DK1026+630 断面的解剖结果中得到了证明。但对于 DK1025+583 断面而言，由于片石有

调解人为上限形态和抑制路基不均匀变形的作用，所以，片石路基在上述原因的作用下，不会产生融沉裂缝，但在竣工初期表现出较大的沉降量。依据前述，DK1026+630 断面地基的季节活动层压密和多年冻土融化下沉引起的路基基底沉降量为 225~350 mm，平均沉降量为 288 mm；路基基底在路基中心、路肩及保温护道位置处沉降量均不一致，在阳侧保温护道顶面边缘对应的基底位置处沉降量最大，为 350 mm，阴侧路肩对应的天然地面位置处沉降量最小为 225 mm。从图 2 可以看出，在路基阳侧半幅内，2003 年 5 月地温曲线同位置处地温阳侧明显高于阴侧，且原天然基底地面线呈现为低洼圆弧线，人为上限左低右高，左右不对称。路基高 4.2 m，基底裂缝位置与最大沉降位置水平距离约 8.2 m、沉降差为 75 mm(见表 4)。假定裂缝阳侧路基整体发生了刚体倾斜下错线形变形，由此计算的路基表面裂缝宽度为 38.4 mm，比实测值 20.0 mm 大，实际上，阳侧路基基底范围内地基的沉降不是均匀线性变化的，而是前述的低洼圆弧线，因此计算结果比实测值大是假设条件过于简化的原因造成的。上限以上风化泥灰岩层属于高含冰量冻土，呈层状构造，冻结强度较低，未冻水含量大，并且路基阳侧半幅体内水分含量要较其他地方高。因此，该融沉裂缝是由于路基阳侧原天然地面下泥灰岩风化物融化压缩而引起路基体横向不均匀沉降造成的。

4.3 路基沉降计算

基于 4.2 节的分析假定，对 DK1026+630 和 DK1025+583 断面按分层总和法进行了路基融化压缩沉降计算，分层总和法计算的路基沉降量 S 为

$$S = \sum_{i=1}^n m_{vi} p_i h_i \quad (1)$$

式中： m_{vi} 为冻土融化后体积压缩系数(MPa^{-1})， p_i 为土体自重应力(MPa)， h_i 为土体分层计算厚度(m)。

朱元林等^[10]提出，对于总含水率 $w \geq 300\%$ ，厚度超过 100 mm 的冰透镜体、层状地下冰等各种含土冰夹层，可用下式近似地计算其融化压缩沉降量：

$$S = k\delta \quad (2)$$

式中： k 为经验系数，当 $w = 300\% \sim 500\%$ 时，取 $k = 0.8 \sim 0.9$ ，当 $w > 500\%$ 时，取 $k = 1.0$ ，此次计算取 $k = 0.9$ ； δ 为冰夹层平均厚度(m)，对 DK1026+630 和 DK1025+583 断面， δ 分别取 0.15 和 0.10 m。

两断面路基沉降计算参数及结果见表 9，10。

表 9 DK1026+630 断面路基沉降计算参数及结果

Table 9 Calculating parameters of settlement and results on cross-section DK1026+630 of embankment

路基沉降范围	分层	厚度 /m	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	m_{vi} / MPa^{-1}	沉降值 /mm
路基本体	上层	1.00	2.14	3.57	0.00	0.0
	下层	3.20	2.07	4.05	0.05	9.0
活动层	中砂层	0.50	1.70	15.90	0.24	11.5
	泥灰岩层	1.40	1.46	24.20	0.75	119.1
活动层下 150 mm 冰体	冰体层	0.15	$S = k\delta = 0.9 \times 0.15 = 0.135 \text{ m}$			135.0

注：(1) m_{vi} 可查《冻土工程地质勘察规范》(GB50324 - 2001)^[11]中表 K.0.3 - 20 获取；(2) 干密度和含水率采用实测平均值，下表同。

表 10 DK1025+583 断面路基沉降计算参数及结果

Table 10 Calculating parameters of settlement and results on cross-section DK1025+583 of embankment

路基沉降范围	分层	厚度 /m	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	m_{vi} / MPa^{-1}	沉降值 /mm
路基本体	填土层	4.50	2.00	3.4	0.10	20.9
	片石层	1.50	2.20	0.0	0.00	0.0
	路拱层	0.30	2.00	3.4	0.10	3.9
活动层	中砂层	1.00	1.70	12.8	0.24	34.0
	砾砂层	1.45	1.80	18.7	0.24	58.0
活动层下 100 mm 冰体	冰体层	0.10				90.0

DK1026+630, DK1025+583 断面路基基底沉降量实测平均值分别为 288 和 175 mm，与其相应的计算值 274.6 和 206.8 mm 基本一致，说明计算的假定和参数值的选取是基本正确的。因此，多年冻土区路基沉降可以采取这种计算方法进行初步的理论计算。

5 结 论

(1) DK1026+630 断面裂缝在路基表面宽度 20 mm，距左路肩 2.9 m，贯穿整个路基本体，至原地面处尖灭，沿路基断面向阳侧外倾，裂缝倾角为 $79^\circ \sim 81^\circ$ ，该裂缝属于融沉裂缝。

(2) 经过近 18 个月，DK1026+630 断面路基基础出现了不同程度的压密和融化下沉，基底最大沉降量为 350 mm，距路基表面裂缝位置水平距离为 8.2 m；左路肩至右路肩范围内基底沉降量为 275~225 mm，与最大沉降值相差 75~125 mm。

(3) DK1026+630 和 DK1025+583 断面路基实测填料含水率均在最佳含水率范围，且压实度和相对

密度满足路基设计要求, 路基压实状况均匀良好。因此, 路基的沉降量主要来自于地层的压密变形和融沉。

(4) 路基阴阳侧受到太阳辐射加热的程度不同, 路基填筑完成后阳面较阴面融深大, 使得路基地温场明显的不对称, 造成路基下多年冻土人为上限不对称, 在自重作用下, 阳侧路基比阴侧路基变形大。因此, 该路基融沉裂缝是由于路基阳侧原天然地面下泥灰岩风化物融化压缩而引起路基体横向不均匀沉降造成的。由于片石有调解人为上限形态和抑制路基不均匀变形的作用, 所以片石路基没有产生融沉裂缝, 但在竣工初期却表现出较大的沉降量。

(5) DK1026+630 和 DK1025+583 断面路基基底沉降量实测平均值分别为 288 和 175 mm, 与相应的计算值 274.6 和 206.8 mm 基本一致。

参考文献(References):

- [1] 张鲁新, 原思成, 杨永平. 青藏铁路多年冻土区路基变形裂缝发生机制及其防治[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 604 - 610.(Zhang Luxin, Yuan Sicheng, Yang Yongping. Mechanism and prevention of deformation cracks of embankments in the permafrost region along Qinghai—Tibet Railway[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 604 - 610.(in Chinese))
- [2] 窦明健, 胡长顺, 何子文, 等. 青藏公路多年冻土段路基病害分布规律[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 780 - 784.(Dou Mingjian, Hu Changshun, He Ziwen, et al. Distributing regularities of subgrade diseases in permafrost section of the Qinghai—Tibet Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 780 - 784.(in Chinese))
- [3] 刘智智, 吴青柏, 张建国, 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))
- [4] 王小军, 蒋富强. 青藏铁路清水河多年冻土试验段路基典型裂缝的解剖与分析[A]. 见: 中国科协第 5 届青年学术年会第 8 分会场论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004. 429.(Wang Xiaojun, Jiang Fuqiang. Dissection and analysis of the typical cracks of embankment in Qingshui River permafrost experimental segment along Qinghai—Tibet Railway[A]. In: Proc. of the 8th Branch Conference of the 5th Youth Scholarship Annual Convention of China Association for Science and Technology[C]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004. 429.(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路路基设计规范(TB10001 - 1999)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Design on Subgrade of Railway(TB10001 - 1999)[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [6] 邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪, 等. 冻土学辞典[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994.(Qiu Guoqing, Liu Jingren, Liu Hongxu, et al. Geocryological Glossary[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [7] 苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所. 普通冻土学[M]. 郭东信, 刘铁良, 张维信, 等译. 北京: 中国科学技术出版社, 1988. 261 - 263.(Siberia Branch Academy, the Soviets Academy of Sciences. General Geocryology[M]. Translated by Guo Dongxin, Liu Tieliang, Zhang Weixin, et al. Beijing: China Science and Technology Press, 1988. 261 - 263.(in Chinese))
- [8] 程国栋, 童伯良, 罗学波. 路基填土对冻土上限的影响[A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 青藏冻土研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983. 195 - 203.(Cheng Guodong, Tong Boliang, Luo Xuebo. The influence of embankment materials on the permafrost table[A]. In: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences ed. Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai—Tibet Plateau[C]. Beijing: Science Press, 1983. 195 - 203.(in Chinese))
- [9] 蒋富强, 杨永鹏, 杨印海, 等. 高原多年冻土区路基沉降及开裂的理论分析与计算探讨[J]. 铁道工程学报, 2003, (8): 5 - 8.(Jiang Fuqiang, Yang Yongpeng, Yang Yin Hai, et al. The theoretical analysis and calculating discussion on the settlement and crack on embankment in plateau permafrost region[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003, (8): 5 - 8.(in Chinese))
- [10] 朱元林, 张家懿, 吴紫汪. 冻土地基的融化压缩沉降计算[A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 青藏冻土研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983. 134 - 138.(Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi, Wu Zi Wang. The calculation of the thaw and compressive settlements for frozen Subgrade[A]. In: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences ed. Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai—Tibet Plateau[C]. Beijing: Science Press, 1983. 134 - 138.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. 冻土工程地质勘察规范(GB50324 - 2001)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Engineering Geological Investigation of Frozen Ground(GB50324 - 2001)[S]. Beijing: China Planning Press, 2001.(in Chinese))