

高纬度多年冻土区路基工后沉降变形

王 锐,程培峰,韩春鹏

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:为研究东北大兴安岭多年冻土地地区路基工后沉降变形特点,选取中俄(中国—俄罗斯)原油管道漠大(漠河—大庆)线林区伴行路典型断面,沉降监测设备采用分层沉降仪,通过沉降管上磁力环位置的变动来跟踪观测路基沉降变化,以 DS18B20 温度传感器为温度采集单元,布设温度监测系统监测多年冻土由于筑路引起的地温变化,并结合室内试验对多年冻土地温和冻土上限变化及路基沉降变形进行试验研究。研究表明:工程竣工通车后的 2 年里,由于路基填土覆盖致使地温升高、冻土产生退化、冻土上限下移;季节活动层压缩和冻土融化压缩是引起多年冻土区路基沉降的主要变形源,冻土融化压缩产生的变形所占比例最大,占总沉降量的 50%;每年 8~11 月份时段融化层压缩导致路基沉降变形明显,进入 12 月份随着季节融化层冻结和冻土上限上移稳定,路基沉降开始趋缓;路基融沉发育具有一定的坡向性,在一个冻融循环期内,阴坡面路基下多年冻土融化时间比阳坡面的少 30 d 左右,阳坡面路基沉降量大于阴坡面路基沉降量;在相同条件下,高含冰量冻土融化压缩变形大于低含冰量冻土融化压缩变形,填高大于 3 m 的路堤随着填土高度的增加,冻土融化压缩变形增大。研究结果可为大兴安岭多年冻土地地区修建公路和路基沉降变形病害分析提供理论参考。

关键词:道路工程;高纬度;多年冻土;路基工后;沉降变形

中图分类号:U416.168

文献标志码:A

Roadbed settlement deformation after construction in permafrost regions of high altitude

WANG Rui, CHENG Pei-feng, HAN Chun-peng

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To master characteristics of the roadbed settlement deformation after construction in the permafrost regions of Greater Khingan Mountains, this paper selected the typical roadbed section of China to Russia crude oil pipeline great line, used layered settlement instrument as settlement monitoring equipment to observe the change of roadbed settlement through the change of the position of magnetic ring on settlement tube. Taking DS18B20 temperature sensor as temperature acquisition unit, this paper set temperature monitoring system to monitor temperature changes of permafrost, and combined with laboratory test to study permafrost geothermal change and its change rule, and the subgrade settlement deformation. The results

收稿日期:2016-10-15

基金项目:黑龙江省水利科技项目(SGZL/KY-01);大庆油田有限责任公司重点科研项目(2013022411)

作者简介:王 锐(1988-),男,黑龙江宾县人,助理工程师,工学硕士,E-mail:wangrui20075039@126.com。

通讯作者:程培峰(1963-),男,辽宁朝阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:chengpeifeng@126.com。

show that during the two years after the completion of the project, the ground temperature rising, permafrost degradation and the permafrost moving down that brought by the roadbed soil caused the natural seasonal melted layer compression and permafrost melted compression, which are the main causes of roadbed settlement deformation. Settlement caused by permafrost melted compression is the largest, about 50%. From August to November, melting permafrost layer compressed makes roadbed settlement deformation obvious. In December, as seasonal freezing and the permafrost move up stably, embankment settlement begins to slow. Roadbed thawing settlement development has a certain slope tropism. In a freezing and thawing cycle period, permafrost melting time under roadbed of shade slope is about 30 d less than permafrost melting time under roadbed of sunny slope, and embankment settlement of the sunny slope is greater than embankment settlement of the shade slope. In the same conditions, the high ice content permafrost is greater than that of lower. Permafrost melted compression deformation of embankments whose filling height is above 3 meters increases with the increase of the filling height. The research results can provide theoretical reference for road construction and analysis of roadbed settlement deformation in permafrost regions of Greater Khingan Mountains. 3 tabs, 7 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; high altitude; permafrost; constructed roadbed; settlement

0 引言

中国多年冻土总面积约占国土面积的 21.5%, 主要分布在青藏高原和东北大、小兴安岭地区^[1]。自 20 世纪 50 年代, 中国在青藏公路的科研和实践过程中, 开展了大量有关冻土区路基变形观测和试验研究工作。张建明等对青藏铁路冻土路基沉降变形进行预测分析^[2]; 温智等对青藏高原多年冻土地区公路路基地温、变形进行观测, 并分析路基地温、变形特征及其相互关系^[3]; 余帆等针对青藏公路路基段, 布设了路基分层变形沉降板, 通过野外观测资料分析引起路基沉降的主要变形源^[4]。目前中国有关青藏高原的冻土研究资料较多, 但大兴安岭地区多年冻土为高纬度低海拔多年冻土, 其分布具有明显纬度地带性特点, 与青藏高原有明显不同, 其可参考的资料也相对较少^[5]。同时由于影响多年冻土地区路基融沉变形的因素很多, 数值模拟无法准确模拟实际工程, 因此工程实际中的观测数据起到了不可替代的作用。

为此, 本文选取中俄(中国—俄罗斯)原油管道漠大(漠河—大庆)线林区伴行路典型多年冻土断面, 监测多年冻土区路基工后沉降变形, 并结合温度场变化情况, 分析中国高纬度多年冻土地区路基工后变形特征, 旨在有利于中国东北地区多年冻土区路基沉降变形问题的进一步研究, 为大兴安岭多年冻土地区道路工程建设和维护提供参考资料。

1 沿线多年冻土分布特征及试验地

1.1 沿线多年冻土分布特征

中俄原油管道漠大线林区伴行路位于中国最北端高纬度严寒地区, 沿线 70% 路段经过多年冻土地区, 地质情况复杂, 路线途经区域属于季节冻土和多年冻土过渡地段, 冻土环境非常脆弱^[6]。多年冻土主要分布在地势低洼、融雪期及洪水积水严重期和沼泽湿地等地区, 地表植被主要以矮科植物为主, 树木发育不健壮。多年冻土类型主要以富冰冻土为主, 局部为少冰冻土、饱冰冻土和含土冰层。多年冻土的上限为 0.3~1.8 m, 下限为 25~38 m, 局部下限为 90 m^[7]。

沿线地基土主要为泥炭土、粉质黏土、粉质黏土含圆砾、粉质砂土和低液限粉土。泥炭土主要由草皮腐烂而形成, 具有高压缩性, 其形成的多年冻土的压缩系数较大; 而粉质黏土冻胀敏感性较强^[8]。因此, 在该冻土工程地质条件下修建公路, 公路路基容易产生沉降或冻胀变形, 进而引起道路路面断裂、错台、起伏和边坡失稳等病害发生, 危及行车安全^[9]。

1.2 试验地选取

中俄原油管道漠大线林区伴行路路面宽度为 9 m, 路基宽度为 12 m, 冻土路段采用清表后直接填筑 80 cm 砂砾的地基处理方式, 路堤由碎石土(天然土石混合料)填筑而成。2013 年路基施工完成后, 在公路沿线布设了 8 个变形和地温监测断面, 对该

地区公路路基沉降变形与土体温度场变化规律进行研究分析。通过 2 个控制条件选取监测断面:①冻土类型,冻土含冰量的不同是影响融沉量大小的主要因素,本次监测主要选择含冰量较大的富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层 3 种冻土^[10];②路基填高,路基填高影响路基下多年冻土温度稳定性和力学稳定性,其直接反映多年冻土路基融沉量的大小。监测断面的冻土类型和路基填高状况见表 1。由表 1 可知,含土冰层冻土的含水率最大,达到 67.2%,饱冰冻土的次之,为 43.9%,6 个富冰冻土的含水率都在 25% 以上,说明多年冻土的含水率普遍较高。

表 1 监测断面冻土类型和路基填高

Tab. 1 Permafrost types and embankment filled heights of monitoring cross sections

断面桩号	冻土类型	含水率/%	路基填高/m
K213+600	富冰冻土	31.7	3.1
K216+300	富冰冻土	29.9	4.1
K216+600	富冰冻土	27.6	4.1
K217+200	富冰冻土	25.6	3.1
K286+130	富冰冻土	32.7	3.3
K288+610	饱冰冻土	43.9	4.8
K288+880	含土冰层	67.2	4.8
K290+200	富冰冻土	28.4	4.8

2 监测设备布置

2.1 沉降设备布置

路基沉降监测可为多年冻土区路基工后沉降变形规律分析提供依据,沉降监测设备采用分层沉降仪,利用沉降管上磁力环位置的变动来测定沉降变形,磁力环布设位置由现场实际冻土的分布情况来确定。朱志武等研究表明外界气温变化只影响冻土的中、浅层地温,路基内地温变化比较剧烈的区域是路基上部距离天然地表 3~10 m 深度范围内,该区域深度以下温度变化都不明显^[11]。在地表下 1~3 m 深度范围内存在一个温度变化更为频繁、剧烈的区域,这就是通常所说的剧烈相变区域,在该区域内水-冰之间由于冻融而产生频繁相变转化^[12]。因此,沉降环的布置主要设置在:路基内距天然地面 1 m 处 1 个,天然地面处 1 个,冻土上限处 1 个和冻土内距冻土上限 0.5 m 处 1 个,沉降观测系统底端设置在冻土上限以下 3 m;路基表面设置水准观测点,用水准仪监测其沉降变化;沉降观测点平面位置是距道路中线左、右各 5 m 的土路肩处,沉降观测系统布置如图 1 所示。观测方法为连续观测,观测间隔根据路基沉降与冻胀量大小而定^[13]。

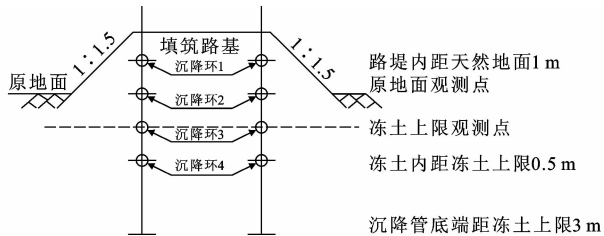


图 1 沉降观测系统布置

Fig. 1 Layout of settlement observation system

2.2 温度设备布置

温度采集单元使用 DS18B20 高精度数字温度传感器,DS18B20 支持多点组网功能,多个 DS18B20 可并联到 1 根 3 芯屏蔽线上,温度采集范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14]。为了保证温度数据采集的准确性,在实验室中对所有温度传感器进行标定,标定完成后将所用温度传感器连接在 1 根 3 芯屏蔽线上,形成 1 个端口连接到核心控制器。将观测数据通过 GPS 无线传输模块发送到基站。温度传感器从路基表面向下每隔 0.5 m 布置 1 个,并在冻土上限处上、下各 0.5 m 内设置测温点加密区,加密区测温点间距为 0.2 m,温度观测系统最底端设置在冻土上限以下 3 m;温度测孔平面位置在距道路中线左、右各 5 m 的路肩处,且距沉降观测点 1 m,同时在天然地面设置一处温度观测系统,如图 2 所示。

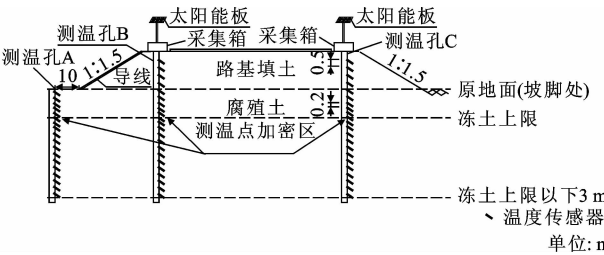


图 2 温度观测系统布置

Fig. 2 Layout of temperature observation system

3 监测结果分析

3.1 分层沉降的差异性

中俄原油管道漠大线林区伴行路全线于 2013 年 10 月初竣工通车,监测时间为 2013 年 8 月~2015 年 8 月,获得 2 年的路基分层变形以及完整的路基总变形监测资料。监测资料表明,各监测断面路基工后沉降变化规律相似。现以 K213+600 断面为例进行分析,该断面为富冰冻土,多年冻土天然上限为 0.3 m,路基左侧为阳坡面,右侧为阴坡面。通过温度观测系统获得的冻土上限处 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线变

化规律来表示冻土上限的变化情况。图 3、图 4 分别为 K213+600 路基左、右侧累计沉降量与冻土上限的关系曲线。

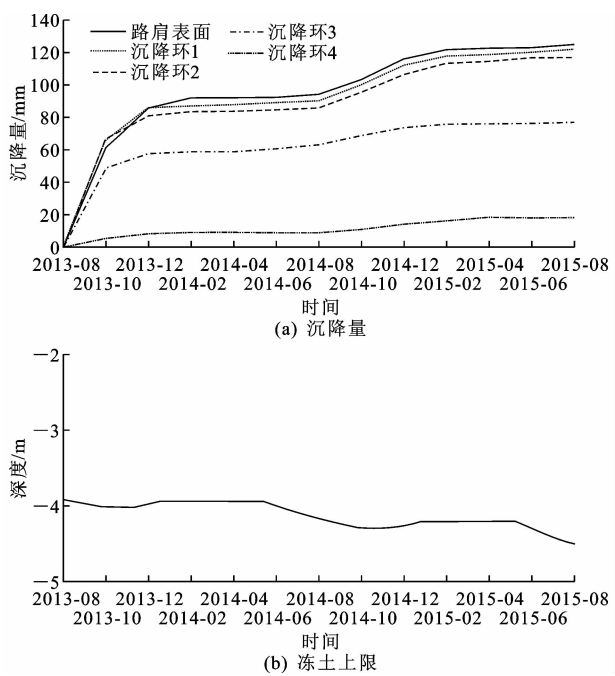


图 3 K213+600 路基左侧累积沉降量与冻土上限的关系
Fig. 3 Relationship between total settlement and permafrost of the left side of embankment at K213+600

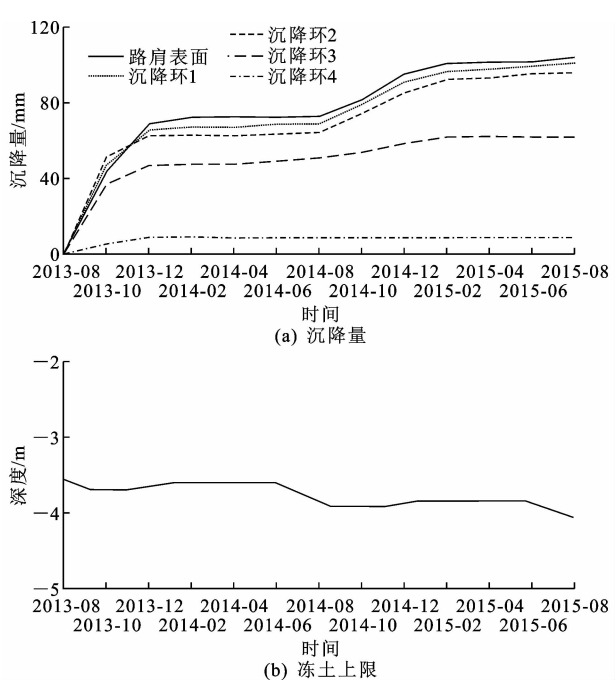


图 4 K213+600 路基右侧累积沉降量与冻土上限的关系
Fig. 4 Relationship between total settlement and permafrost of the right side of embankment at K213+600

由图 3、图 4 可知,路基左、右侧的沉降变化曲线趋势基本一致,8~11 月份 4 个月时间里沉降变

形明显,进入冬季后,路基沉降变形缓慢,直至次年初夏开始新一轮的沉降变形;沉降初期路肩表面和沉降环 1 的沉降量小于沉降环 2 的沉降量。这主要是由于土石路基密实度较高,有支撑作用,季节融化层和冻土融化压缩沉降未能及时地反映到路基上部^[4]。经过 3~4 个月,路基下部沉降变形逐渐反映到路基表面,这与文献^[4]的研究结果相近。沉降环 4 位于冻土上限以下 0.5 m 处,根据 2 年的温度监测数据可知:2014 年 8 月路基左、右侧冻土上限分别下移了 0.40、0.37 m;截止 2015 年 8 月,路基左、右侧冻土上限分别下移了 0.58、0.50 m。说明竣工后 2 年,路基下多年冻土仍处于严重退化阶段,路基左侧沉降环 4 已处于冻土融化层中,其沉降量由冻土融化压缩和冻土压缩两部分组成;路基右侧沉降环 4 处于融化层和冻土交界处,其沉降量仅为冻土压缩量。截止 2015 年 8 月,K213+600 路基各层沉降量及占总沉降量的比例见表 2。

表 2 2015 年 8 月 K213+600 路基各层沉降量及占总沉降量比例
Tab. 2 Subgrade settlement of each layer and the proportion to total settlement at K213+600 in August 2015

名称	路基左侧		路基右侧		平均值	
	沉降量/mm	比例/%	沉降量/mm	比例/%	沉降量/mm	比例/%
路基自身固结	8	6	9	8	8.5	7
季节融化层压缩	40	32	31	30	35.5	32
冻土融化压缩	68	54	56	54	62.0	54
冻土压缩	9	7	9	8	9.0	7
合计	125	100	105	100	115.0	100

从表 2 可以看出,路肩表面由于路基自身固结引起的沉降平均为 8.5 mm,说明路基填土比较密实,路基自身沉降量小;2 年监测期内,多年冻土压缩变形量平均仅为 9 mm,路基自身固结和冻土压缩产生的沉降量占总沉降量的 14%,而冻土融化压缩和季节融化层压缩产生的沉降量占总沉降量的 86%,仅冻土融化压缩产生的沉降量就占总沉降量的 54%,说明该断面路基沉降的主要变形源是冻土融化压缩变形。

选择 8 个冻土路基断面,其季节融化层和冻土融化层的压缩沉降量占总沉降量的比例见下页表 3。由表 3 可知,季节融化层压缩和多年冻土融化压缩所引起的沉降量占总沉降量的 84%,而冻土融化压缩引起的沉降所占比例最大,平均为 50%。由于所选断面里程桩号跨度较大,判断地基采用直接填筑 80 cm 砂砾处理方式的土石路基工后 2 年中,沉降变形主要由季节融化层压缩和冻土融化压缩组成,

表 3 各断面路基季节融化层压缩和多年冻土融化
压缩量占总沉降量比例

Tab. 3 Proportion to total settlement of seasonal melt compression and permafrost melt compression of each section					
断面 桩号	冻土 类型	含水 率/%	季节活动层 压缩比例/%	冻土融化 压缩比例/%	合计/ %
K213+600	富冰冻土	31.7	32	54	86
K216+600	富冰冻土	27.6	36	48	84
K216+300	富冰冻土	29.9	33	51	84
K217+200	富冰冻土	25.6	37	46	83
K286+130	富冰冻土	32.7	29	55	84
K288+610	饱冰冻土	43.9	34	54	88
K288+880	含土冰层	67.2	33	51	84
K290+200	富冰冻土	28.4	37	49	86
平均值		35.9	34	50	84

而冻土融化压缩是引起路基沉降的主要变形源。

利用 2 个冻融循环期内的温度监测数据对 K213+600 左、右路肩温度年较差与深度关系进行拟合, y 为地温年较差, x 为路基表面以下深度, 拟合分别得到 K213+600 左路肩 2013 年 8 月~2014 年 8 月和 2014 年 8 月~2015 年 8 月的地温年较差 (y_1 、 y_2) 与深度曲线和回归方程(图 5)^[15]。令 $y_1=0$ 、 $y_2=0$, 利用回归方程可分别求出 2013 年 8 月~2014 年 8 月和 2014 年 8 月~2015 年 8 月左路肩年地温变化深度 H_{cp} 为 4.5 m 和 4.63 m, 相应深度处的年平均地温 T_{cp} 分别为 $-0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同理, 右路肩 2013 年 8 月~2014 年 8 月和 2014 年 8 月~2015 年 8 月年地温变化深度 H_{cp} 分别为 4.06 m 和 4.29 m, 相应深度处的年平均地温 T_{cp} 分别为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于路基填筑在天然地面上形成了凸起几何结构, 增加了多年冻土覆盖层厚度, 改变了原地基表面的几何特征, 增大了原地表与外界热量交换的面积, 进而影响上层多年冻土的年平均地温^[16]。在 2014 年 8 月~2015 年 8 月第 2 个冻融循环期内, 随着时间推移, 路堤下人为增加的热量逐渐消散, 多年冻土形成新的平衡状态, 年平均地温略有降低。但依据冻土热稳定性分类原则, 年平均地温大于 $-0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为热极不稳定冻土类型, 说明路基下年地温变化深度冻土属于热极不稳定冻土类型。

3.2 路基沉降与冻土上限关系

分层沉降的差异性分析结果表明, 多年冻土上限下移引起的冻土沉降压缩占全年总沉降量比例最大, 路基沉降变形与冻土上限的下移有着密切联系^[17-18]。由图 3 中冻土上限变化规律可以看出, 9

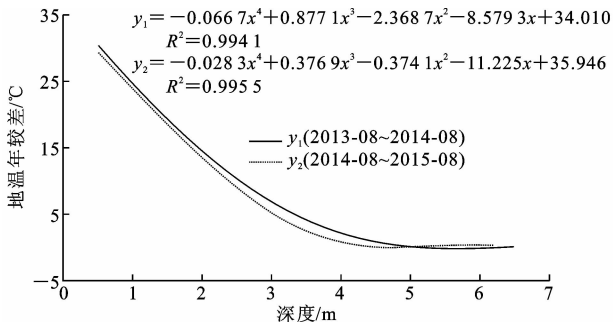


图 5 2013-08~2015-08 K213+600 左、右路肩地温年较差与深度拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves between annual range of ground temperature and depth from 2013-08 to 2015-08

月末多年冻土达到最大融化深度, 在大气温度与地基温度场的共同作用下, 融化深度基本保持不变, 到 12 月初路基整体沉降变形趋于稳定。进入冬季后, 路基自上而下开始冻结, 与此同时冻土上限开始上移, 到次年 1 月份达到稳定并持续到 5 月上旬。随着天气转暖, 季节融化层开始融化, 冻土上限开始下移, 路基开始新一轮的沉降变形。

从图 3、图 4 可以看出, 进入 5 月份, 冻土上限开始下移, 但下移初期路基沉降变形小, 8 月份开始沉降压缩变形明显, 主要原因是季节融化层已经全部融化, 随着热量在地下积聚, 上层冻土不断融化, 冻土上限进一步下移, 其下部的多年冻土不透水, 冻土融化后的自由水无法竖直下渗, 只能停留在土层中; 黏性土地基处于含水率较大状态, 在路堤填土与行车荷载作用下, 冻土融化层产生压缩变形, 路基沉降变形开始明显。12 月份随着季节融化层冻结和冻土上限上移稳定, 路基沉降开始趋缓。

3.3 沉降的坡向性

由于路线走向原因, 不可避免地会形成多年冻土沿线路基边坡一侧为阳坡面, 另一侧为阴坡面。对比图 3、图 4 中冻土上限变化曲线可知, 9 月中旬右侧阴坡面路基下多年冻土早于左侧阳坡面 15 d 左右停止融化, 此时阳坡面路基下多年冻土仍处于融化阶段, 其融化深度大于阴坡面^[19]。随着外界大气温度降低, 阴坡面路基下多年冻土上限 11 月初开始上移, 早于阳坡面 15 d 左右。至次年初夏, 虽然日照时间变长, 但阴坡面吸收热量小于阳坡面, 5 月末阴坡面路基下多年冻土上限才开始下移, 晚于阳坡面 20 d 左右, 在 1 个冻融循环期内, 阴坡面路基下多年冻土融化时间比阳坡面的少 30 d 左右。

下页图 6 为阴、阳坡面路基累积沉降对比。从图 6 可以看出, 阳坡面路基沉降量明显大于阴坡面

路基沉降量,说明阳坡面冻土融化压缩量大于阴坡面,进而影响到上部路肩表面沉降大小,使得阳坡面路肩表面沉降量大于阴坡面,原因是由于阳坡面日照时间长,吸热大于阴坡面,加速了多年冻土的融化,而阴坡面吸热较少,较阳坡面路基沉降小;随着时间的推移,路基阴、阳坡的沉降差异凸显出来^[20-21]。路基左右不均匀沉降导致路面产生纵向开裂,阳坡面路基融沉变形大,产生松软滑塌等道路病害。

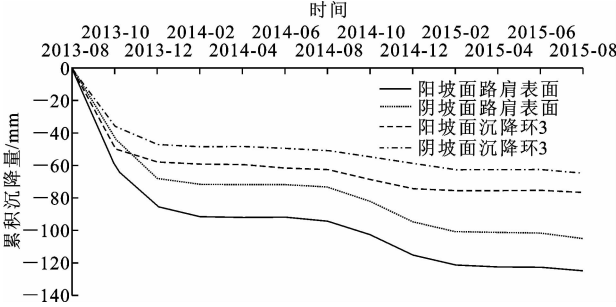


图6 K213+600 路基阴、阳坡面累积沉降对比
Fig. 6 Contrast of subgrade settlement between left and right side at K213+600

3.4 路基沉降与路基填高和冻土类型的关系

富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层的含冰量都比较大,冻土中冰融化变成水后具有流动性,在上覆路堤填土作用下,融化的水会沿着土中孔隙被挤压排出,土体积变小,土层被压密产生压缩变形^[22]。同样地,冻土在压缩荷载作用下,融化层厚度不同,其产生的压缩变形量也不同,冻土融化后的压缩变形性能可用单位厚度融沉量来表示,单位厚度融沉量为冻土融化压缩变形量与冻土融化厚度的比值。此外,冻土融化压缩变形的大小除与冻土自身因素有关外,还取决于路基填高(荷载),图7为不同冻土类型的单位厚度融沉量与路基填高关系。

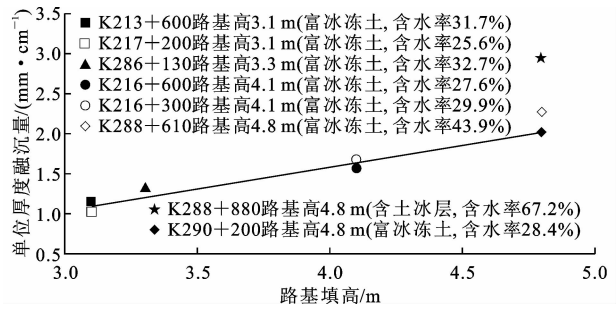


图7 不同类型冻土的单位厚度融沉量与路基填高关系
Fig. 7 Relationship between thawing settlement amount in unit thickness and embankment filling height of different permafrost types

从图7可以看出,单位厚度融沉量随路堤填高的增加而增大,原因是路堤填土越高,多年冻土融化

层上所覆荷载就越大,融化层土层中自由水被挤压排出的越多,融化土层就越密实,单位厚度融沉量就越大。在相同路堤填土高度条件下,路堤下冻土含冰量越高,单位厚度融沉量越大。分析其原因是冻土含冰量越大,其土体的孔隙就越大,冻土融化后所含的自由水就多,在相同上覆路堤填土荷载的作用下,冻土单位厚度融化层所排出的水就多,单位厚度融沉量就越大,所以路堤填土高、含冰量大的冻土单位厚度融沉量大。

4 结 语

(1)冻土融化压缩和季节融化层压缩是引起多年冻土区路基沉降的主要变形源,其中由冻土温度升高,冻土上限下移引起的冻土融化压缩变形所占比例最大,占总沉降量的50%。

(2)路基沉降变形与冻土上限的变化有着密切联系。随着冻土上限下移冻土退化,8~11月份期间融化层压缩导致路基产生明显沉降变形,进入12月份随着季节融化层冻结和冻土上限上移稳定,路基沉降开始趋缓。

(3)路基融沉发育具有一定的坡向性。在1个冻融循环期内,阴坡面路基下多年冻土融化时间比阳坡面的少30d左右,阳坡面路基沉降量大于阴坡面路基沉降量。

(4)在相同条件下,高含冰量冻土融化压缩变形大于低含冰量冻土融化压缩变形,填高大于3m的路堤随着填土高度的增加冻土融化压缩变形增大。

(5)研究多年冻土区路基沉降变形的现场监测成本高,周期长,后续研究需进一步以现场温度、沉降监测数据为基础,结合冻土室内试验数据,开展高纬度冻土路基模型的研究。

参考文献:

References:

[1] 李永. 高原多年冻土施工及不良地质工程的处理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(9): 35-37.
LI Yong. Plateau everfrost construction and unfavorable geological process[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(9): 35-37.
[2] 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 Jian-ming, LIU Duan, QI Ji-lin. Estimation on the settlement and deformation of embankment along Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 12-17.

- [3] 温智,盛煜,马巍,等.退化性多年冻土地区公路路基地温和变形规律[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1477-1483.
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Ground temperature and deformation laws of highway embankment in degenerative permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7):1477-1483.
- [4] 余帆,齐吉琳,姚晓亮.多年冻土区路基分层变形现场观测研究[J].冰川冻土,2011,33(4):813-818.
YU Fan, QI Ji-lin, YAO Xiao-liang. Monitoring settlement at different depths within an embankment in permafrost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4):813-818.
- [5] 杨永鹏,程东幸,伏慧霞.东北大兴安岭多年冻土区工程地质特征及评价[J].工程地质学报,2008,16(5):657-622.
YANG Yong-peng, CHENG Dong-xing, FU Hui-xia. Engineering geological characteristics and evaluations of permafrost in Daxing'an Mountains[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5):657-622.
- [6] 崔志刚,林向军.采用声波透射法检测路基填筑厚度[J].油气田地地面工程,2014,33(10):107.
CUI Zhi-gang, LIN Xiang-jun. Detection of roadbed filling thickness based on sound wave transmission method[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(10):107.
- [7] 甄庆廷.古洛铁路多年冻土特征与工程对策[J].铁道勘察,2013(5):27-29.
ZHEN Qing-ting. Characteristics and engineering countermeasures of permafrost along the Gu-Luo Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2013(5):27-29.
- [8] 程培峰,尹传军.季冻区粉质黏土冻胀特性分析[J].公路交通科技,2014,31(1):44-49.
CHENG Pei-feng, YIN Chuan-jun. Analysis of frost heaving characteristics of silty clay in seasonal frozen region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1):44-49.
- [9] 肖楼,董德惠,李金平,等.高纬度多年冻土区漠北公路路基变形特征分析[J].路基工程,2012(4):196-201.
XIAO Lou, DONG De-hui, LI Jin-ping, et al. Analysis on deformation characteristics of the subgrade of Mobei highway in high-latitude permafrost regions[J]. Subgrade Engineering, 2012(4):196-201.
- [10] 吉延峻,金会军,王国尚,等.中俄原油管道(漠河—大庆段)地基土融沉稳定性评价研究[J].工程地质学报,2010,18(2):241-251.
JI YAN-jun, JIN Hui-jun, WANG Guo-shang, et al. Thaw-stability assessment of the permafrost foundation soil along the proposed China-Russia crude oil pipeline from Mohe to Daqing[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2):241-251.
- [11] 朱志武,宋顺成.冻土地区路基温度场数值分析[J].路基工程,2008(2):18-19.
ZHU Zhi-wu, SONG Shun-cheng. Numerical analysis of temperature field of roadbed in frozen soil region[J]. Subgrade Engineering, 2008(2):18-19.
- [12] 刘慧.青藏铁路冻土路基变形规律研究[D].成都:西南交通大学,2011.
LIU Hui. The research of the deformation rules of Qinghai-Tibet Railway frozen soil embankment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [13] 张志伟.路基施工沉降观测数据处理及变形分析[D].南京:东南大学,2000.
ZHANG Zhi-wei. Settlement observation data processing and deformation analysis of subgrade construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2000.
- [14] 程培峰,王蒙,韩春鹏,等.季冻区路基温度湿度远程采集系统的研究[J].中外公路,2014,34(1):49-52.
CHENG Pei-feng, WANG Meng, HAN Chun-peng, et al. Study on remote collection system of temperature and humidity of subgrade in seasonal frozen area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(1):49-52.
- [15] 孟海伦.岛状多年冻土碎石桩复合地基沉降及温度场分布分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2012.
MENG Hai-lun. The analysis of gravel settlement and temperature field of highway composite foundation in patchy permafrost regions[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [16] 符敏.寒区抛石路基阴阳坡效应的研究[D].西安:西安工业大学,2008.
FU Min. The effect between the southern and northern slopes of the ripped-rock embankment in cold areas[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2008.
- [17] 梁波,刘德仁,张贵生.基于温度场的冻土路基变形数值分析及对比[J].地下空间与工程学报,2010,6(2):276-282.
LIANG Bo, LIU De-ren, ZHANG Gui-sheng. Numerical analysis and contrast about permafrost subgrade deformation based on temperature field[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2):276-282.