

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1114

季冻土路基永久变形现场监测与分析

孟上九^{1,2}, 李 想², 孙义强¹, 程有坤¹

(1. 哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 利用光纤光栅开展了为期两年的季冻土路基永久变形现场监测, 考虑了不同场地、不同时段、不同轴载组合对永久变形的影响。监测结果显示: (1) 受气温影响, 路基温度在正冻期和正融期随时间呈振荡线性变化, 在一个冻融循环内, 市区监测场地埋深 30 cm 和 75 cm 位置, 地温变化范围分别为 $-9.0\sim 14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.9\sim 15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且随深度增加地温对气温的响应逐渐减弱, 滞后性增强; (2) 两个监测场地, 当路基处于完全冻结状态时, 车辆作用下的永久变形均较小, 但在正融期, 同样车重作用下路基永久变形增大, 最大变形是冻结期的 4.5 倍, 是融化期的 4.2 倍; (3) 路基经历了两次冻融循环后, 变形仍未稳定, 在重载车辆作用下其永久变形仍不可忽视; (4) 以轴重 40 kN 车辆引起的路基最大永久变形为基准, 轴重 80 kN 及 250 kN 车辆引起的实测永久变形分别增大 17 倍及 215 倍, 永久变形与轴重非线性关系明显; (5) 冻融和重载叠加作用会产生最不利组合, 放大路基永久变形, 对此需特别关注。

关 键 词: 季冻土路基; 永久变形; 冻融循环; 重载车辆

中图分类号: P 642.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1377-09

In-situ monitoring and analysis of permanent subgrade deformation in seasonally frozen regions

MENG Shang-jiu^{1,2}, LI Xiang², SUN Yi-qiang¹, CHENG You-kun¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Using the fiber Bragg grating sensors, a two-year in-situ monitoring for the subgrade permanent deformation in seasonally frozen regions was conducted. The combined effects of different sites, periods of a year, and different axial loads were considered. The results indicate that: 1) Affected by the air temperature, the subgrade's temperature varies linearly but astatically with time in the freezing and melting periods. During a cycle of freezing and thawing, the range of ground temperature in the urban district at depths of 30 cm and 75 cm are $-9.0\sim 14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-1.9\sim 15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The response of ground temperature to air temperature decreases and the hysteresis increases with the depth. 2) When the subgrade is fully frozen, the vehicle load-induced permanent deformation at both sites are small. However, when it is thawing, the deformation rises even under the same load. The maximum deformation is 4.5 and 4.2 times that of the frozen and normal period, respectively. 3) After two cycles of freezing and thawing, the subgrade has not reached a steady state. The permanent deformation under heavy vehicles can not be ignored. 4) Taking the maximum permanent subgrade deformation induced by a vehicle of 40 kN axial load as reference, the measured values caused by the 80 kN and 250 kN increase 17 and 215 times, respectively. There is a nonlinear relationship between the permanent deformation and axial load. 5) The combination of freezing and thawing cycles with heavy vehicle loading will produce the worst result, which can magnify the permanent subgrade deformation.

Keywords: subgrade in seasonally frozen regions; permanent deformation; freeze-thaw cycles; heavy vehicles

1 引 言

冻胀、融沉一直是季冻区交通基础设施病害的重要表现^[1]。四季交替, 气温变化使季冻区路基处

于反复冻融之中, 与此同时其物理力学性质也发生显著变化。王大雁^[2]、张世民^[3]等分别以青藏黏土和青藏粉质黏土为试验对象, 研究了冻融循环对其物理力学性质产生的影响, 其研究表明: 青藏黏土

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(No. E2016045); 国家自然科学基金资助项目(No. 51378164)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (E2016045) and the National Natural Science Foundation of China (51378164).

第一作者简介: 孟上九, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: iemmsj@163.com

经历冻融循环后性质发生改变,土体由不稳定状态向新的动态平衡稳定状态发展;冻结过程中,土体内部温度场和含水率进行了重新分布。车辆荷载作用下,经历冻融作用的路基内部常产生过大永久变形,最终丧失稳定性,使道路出现严重病害。

近年来,大吨位、多轮轴货运车辆急剧增加,使公路运输呈现重载化特点。宇德忠等^[4]对黑龙江省内几条重要高等级公路轴载分布情况进行了研究,通过交通量调查、轴载测试及有限元分析表明,当年换算累计标准轴载当量轴次比上年(2012年)增加1.1倍时,路表位移增幅可达1.8倍。而美国国有公路管理局协会(AASHO)的研究表明,车辆轴载增加1倍时,对道路产生的作用相当于正常载重时的16倍^[5]。由此可见,重、超载车辆对道路的破坏问题不容忽视。

关于冻土区路基稳定性问题,国内外学者已开展了大量的现场监测和试验研究工作。刘永智等^[6]对青藏公路变形进行了长期监测,分析表明,青藏公路变形以路基填土下天然土层的不均匀沉降变形为主,并受地温波动及工程地质条件的影响;探地雷达勘查结果显示,多年冻土上限下移,下限区域内具有明显的层间错动^[7]。温智等^[8]分析了青藏高原多年冻土地区公路路基地温及变形监测资料,其研究表明,路基下伏冻土的温度及含冰量状况直接决定路基稳定性。马巍等^[9-10]基于青藏铁路几种典型的保护冻土式路基温度、变形监测数据,分析了高温、高含冰量永久冻土区路基变形特征及机制。Zheng等^[11]通过现场试验监测了青藏铁路沿线高温高含冰量冻土区路基温度及变形情况,其数据显示,路基总体变形主要来源于其下原始高温高含冰量冻土层的蠕变变形,并建立了考虑蠕变的数值模型用来预测路基沉降。Yang等^[12]研制了一套路基变形自动监测系统用于永久冻土区青藏铁路路基变形监测,并通过低温及高温试验验证了其适用性。

以上研究中,对于路基沉降的监测多采用沉降管、冻胀板、水准仪等传统仪器设备。一方面设备的制作安装比较复杂,另一方面测试也易受天气条件、仪器及试验人员因素的影响。近年来,光纤光栅(FBG)传感器开始应用于岩土工程领域。Häggmark^[13]测试了基于FBG的应变、温度传感器性质,并通过将其植入到金属中提高了其传感精度;Ferraro等^[14]回顾了FBG用于温度及应变测量所取得的成就,并对其在土动力学监测方面的应用前景进行了展望;汪云龙等^[15]研发了一套基于FBG的测试系统,用于室内小型振动台试验中模型土体内

部变形的测量,并通过加速度计的记录对比验证了其适用性和可靠性。笔者先期将FBG用于季节冻土路基这一隐蔽工程的应变检测,结果可精确到1 μ m,能够精确感知车辆通过后路基产生的微小变形;通过为期1a的监测数据,验证了所采用方法的可行性及监测结果的可靠性^[16]。

当前关于永久冻土区交通基础设施变形及稳定性的研究较多,成果也较为丰富。然而值得注意的是,冻融循环使季冻土的性质明显区别于永久冻土,加之重、超载车辆荷载作用,季冻区道路长期安全稳定运营面临极大考验。本文基于地温、车辆荷载作用下的路基土压力、变形等现场实测数据,对季冻土路基永久变形特征进行分析,以期对季冻区道路设计、施工、维护以及病害治理等提供帮助。

2 监测方案

2.1 监测场地选取

综合考虑测试的便利性、道路通行车辆分布特征等因素,选取哈尔滨理工大学校园道路(以下简称A场地)和哈尔滨市松花江北岸防洪通道工程K6+640及K6+680断面(以下简称B场地)为监测场地。A场地可直接为车辆称重,监测条件容易保证,更适合多次测试;B场地为实际道路,车流量大、重载车辆多,测试结果更具代表性。

2.2 传感器布置

变形监测采用自行研制的基于FBG的植入梁位移探测系统,其封装及测试方法见文献[16]。A场地某一监测断面植入梁布置如图1所示,B场地植入梁布置详见文献[16]。

地温监测采用K型热电偶,外接TT-K-24-SLE测温线(耐温范围为 $-60\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$),配合数显仪表读取数据。仪表量程为 $-50\sim 1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,分别率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试精度为 0.3% 读数 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热电偶具体布置方式详见图1。

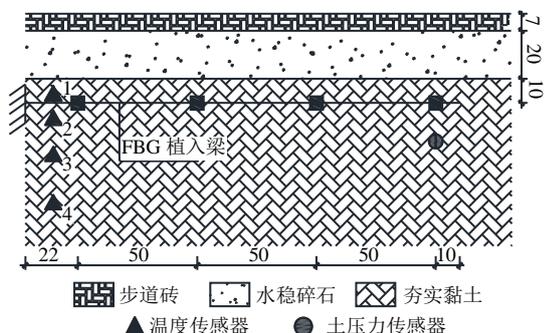
选用丹东市电子仪器厂生产的BX-7型动、静态电阻应变式土压力传感器对路基土压力进行监测。所选传感器量程分别为0.2 MPa和0.4 MPa,灵敏系数 $K=2.0$ 。数据采集设备采用江苏省东华测试有限公司生产的DH-5923型动态信号采集仪。土压力传感器布置如图1所示。

3 冻融循环下路基永久变形规律

3.1 监测断面地温变化规律

哈尔滨是中国纬度最高、气温最低的大城市,属中温带大陆性季风气候。冬季长达5个月,最冷

月 1 月平均气温低至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，极端气温曾达到 $-37.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；夏季仅有 2 个月，最热月份 7 月平均气温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右；而春季和秋季属于过渡季节，气温变化迅速，时间较短^[17]。



注：土压力传感器与 FBG 植入梁位于同一深度，即距离路面 37 cm。

图 1 传感器布置剖面图 (单位: cm)

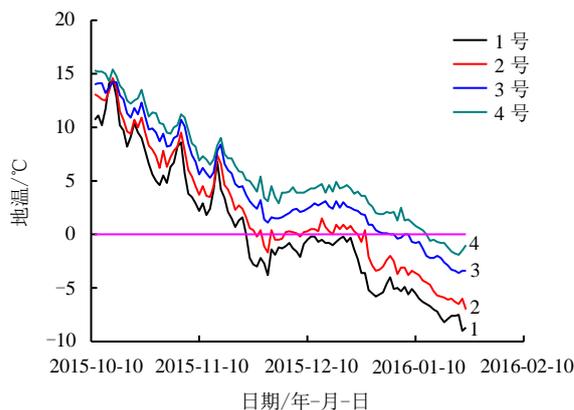
Fig.1 Profile of the sensor arrangement (unit: cm)

气温四季交替变化的同时，也孕育了季冻区道路病害，即冬季道路由于不均匀冻胀而产生的裂缝、冬春之交路基处于正融状态时的沉陷。为进一步掌握冻融循环下路基永久变形规律，在 A 场地某测试断面钻孔并布置了 4 个温度传感器，用于监测路基温度变化；传感器布置如图 1 所示，其中距路面最近 (30 cm) 的传感器为 1 号，依次为 2、3、4 号，其距路面分别为 40、55、75 cm。

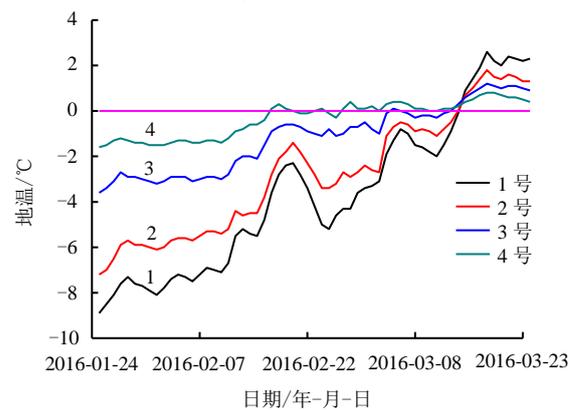
图 2 所示为一个监测周期内 (地温由正温变为负温，进而再次变为正温，即完成一次冻融循环) 路基一定深度范围内地温变化情况。

由图可以看出，降温阶段 (从 2015 年 11 月 15 日至 2016 年 1 月 22 日)，距路面最近的监测点 (1 号传感器) 地温变化先于其下部各监测点，具体表现为其温度首先降低至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，且于 2016 年 1 月 22 日降至最低 ($-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)，其下部各点温度变化随距路面深度增加存在滞后现象。而在升温阶段，路面下地温变化表现出相反趋势，即距路面最远的 4 号监测点地温率先升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，而距路面最近的 1 号监测点则最迟达到正温状态。由于测试场地位于市区内，因此，地温变化时空规律与郊区会有一定差异。各监测点处于负温状态时间如表 1 所示。

由表可以发现，随距路面深度增加，路基处于负温状态时间明显减少。综合图 2 和表 1 可以说明，路基内地温对气温的响应随深度增加而衰减。为更清楚地了解地温随气温变化规律，将受气温变化影响最大的 1 号监测点地温数据与同期日平均气温数据进行对比，结果如图 3 所示。



(a) 冻结过程



(b) 融化过程

图 2 路基地温变化

Fig.2 Temperature changes of the subgrade

表 1 各监测点处于负温状态时间

Table 1 Days of each monitoring points under negative temperature

监测点	1	2	3	4
时间 /d	115	110	70	50

注：以上时间均为近似取值。

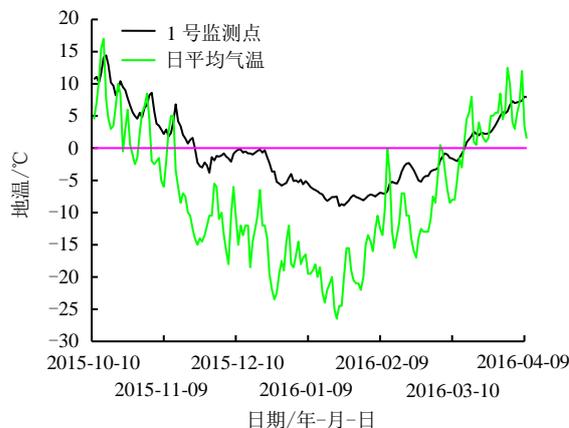


图 3 地温-气温曲线

Fig.3 Curves of ground and air temperature

由图 3 可知，地温与气温变化趋势大体相同，且 10 月下旬和 11 月上中旬气温剧烈波动时，1 号监测点温度也有大幅波动。还可以发现，11 月末至

12月下旬,虽然日平均气温均已达到0℃以下,且总体上仍呈持续降低趋势,但各监测点温度基本保持稳定(由图2可发现相同规律)。分析其原因,11月末降雪覆盖了路面,路面积雪削弱了路基与大气的热量交换,对地下土体具有保温作用;12月20日清除路面积雪后,各监测点温度迅速下降。

3.2 冻融循环下路基永久变形分析

作为特殊土类,季冻土由于季节变化经历了反复的冻融作用,决定了其物理力学性质在一年中的不同时段存在较大差异。因而,季冻土路基变形也呈现出不同特征。

车辆驶过道路时,路面及结构层由于刚度较大,其变形较小且以弹性变形为主;路基由于内部存在孔隙,车辆荷载压密作用下会产生部分残余变形。车辆通过瞬时路基产生的总体变形称为瞬时变形(δ),车辆驶离后变形恢复部分为回弹变形(δ_e),不可恢复部分为残余变形,即为可能导致道路病害的永久变形(δ_p)。图4所示为某次车辆从道路行驶过后,实测的路基内某一点变形构成情况。

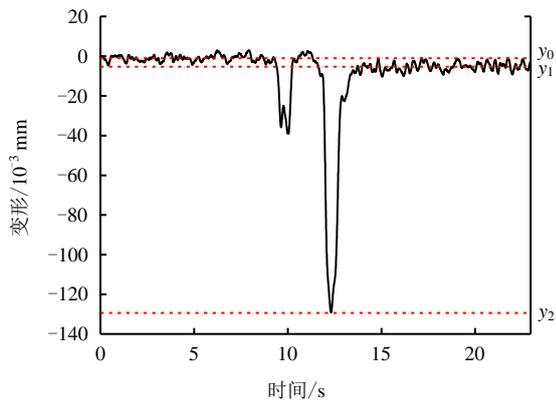


图4 路基内某点变形构成

Fig.4 Deformation structure of a point inside the subgrade

如图4所示, y_0 为加载前探测杆初始位置, y_1 为车辆通过后位置, y_2 为车辆通过探测杆正上方瞬时位置。则 $\delta = y_2 - y_0$, $\delta_e = y_2 - y_1$, $\delta_p = \delta - \delta_e = y_1 - y_0$ 。

为了准确测量车辆通过时路基内土压力情况,加载试验时采取车辆单轮从土压力传感器正上方(即位移探测杆外边缘)碾压的方式,加载示意图如图5所示。

图6为A场地在一个冻融循环内(地温情况见表2)不同时段加载时,路基的永久变形情况。从图可以看出,在一年中的不同时段,同样载重车辆通过道路时,对路基产生的影响差异较大。总体来说,2016年3月21日加载试验中,路基产生的变形最大。由于1号断面和2号断面探测杆埋置深度

不同,故其观测结果也不同。

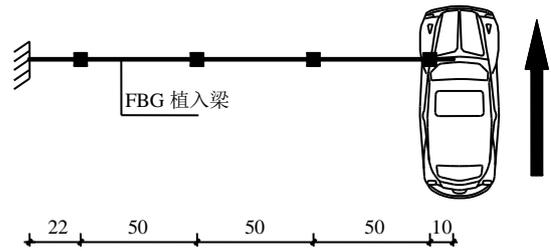
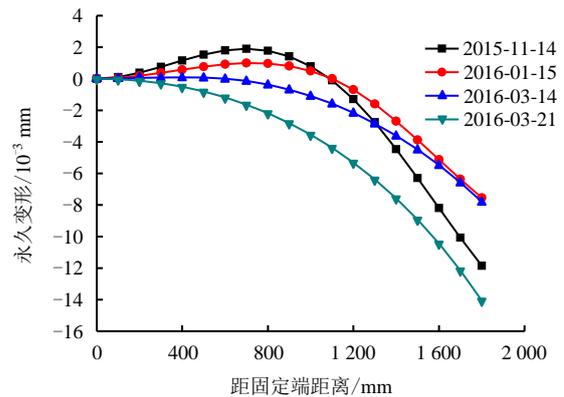
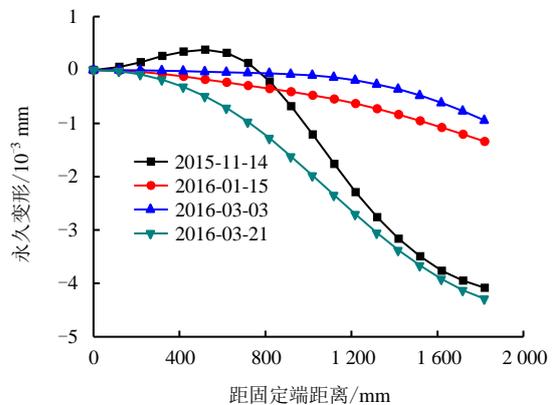


图5 A场地加载示意图(单位:cm)

Fig.5 Schematic diagram of the loading test in site A (unit: cm)



(a) 1号断面



(b) 2号断面

注:图中数值均为小汽车(1.4t)加载一次后路基产生的永久变形值。

图6 A场地永久变形

Fig.6 Permanent deformation in site A

表2 加载试验时地温情况

Table 2 Ground temperature during the loading tests

位置	不同日期温度 /℃				
	2015-11-14	2016-01-15	2016-03-03	2016-03-14	2016-03-21
1号(30)	4.2	-7.2	-3.1	-0.3	2.4
2号(40)	4.5	-5.7	-2.7	-0.8	1.6
3号(55)	5.8	-2.0	-1.0	0.3	1.1
4号(75)	7.0	-0.7	0.0	0.2	0.6

注:上表中第1列为地温监测传感器编号,括号内数值为距离路面深度,单位为cm。

2015年11月14日加载试验中,路基变形稍小于次年3月21日加载时路基变形。如图2及表2

所示，两次加载试验时，整个断面内路基均处于正温状态，且前者路基内各深度处地温均高于后者，但后者在加载试验时产生的永久变形值却更大。11月中旬路基还未冻结，因此，土体性质与常温状态相比未发生明显变化；而次年三月初开始，冻结的路基开始融化。在冻融作用下，尽管路基内温度已升至 0℃ 以上，但由于排水不畅，路基与未冻前相比，强度降低，同样车辆荷载作用下变形有所增加。

对处于完全冻结状态的土体（2016 年 1 月 15 及 3 月 3 日），由于内部孔隙冰的存在使其强度及刚度均增大，故加载试验时其变形量要小于正冻期（冬季路基温度处于负温范围内并继续降低、其内部冰晶形成并不断增多、液态水向固态冰逐渐转化的过程）和融化期（土体处于正温状态且孔隙水均为未冻水的阶段）土体。虽然 3 月初路基开始融化，但由于受昼夜温差影响，上部土体仍处于冻结状态；因此，从图 6 可以发现，在 3 月 14 日进行加载试验时，路基变形与土体处于完全冻结状态的 1 月 15 日及 3 月 3 日进行加载试验时基本一致。另外，从图中可以发现，此时期进行加载试验时，靠近路基边缘处土体有轻微隆起现象。如前所述，探测杆一端固定，一端自由向下，且加载时车辆单轮碾压该自由端，中间土体由于刚性大，使得加载时探测杆中间产生向上的挠曲；而融化期路基整体刚性下降，探测杆随动性增强，因此，没有出现中间隆起的现象。

图 7 所示为经历两次冻融作用的 B 场地（K6+640 断面）在不同时段加载试验中路基永久变形情况。加载时，将车辆根据载重大小简单分为轻载（≤10 t）、中载（10~20 t）以及重载（≥20 t）三类。该道路竣工于 2014 年 7 月。竣工初期，路基由于上覆结构层作用，将发生自然沉降。故从图 7 可以发现，8 月份在轻载车辆（1.4 t 小汽车）作用下，路基产生了相对较大的永久变形。

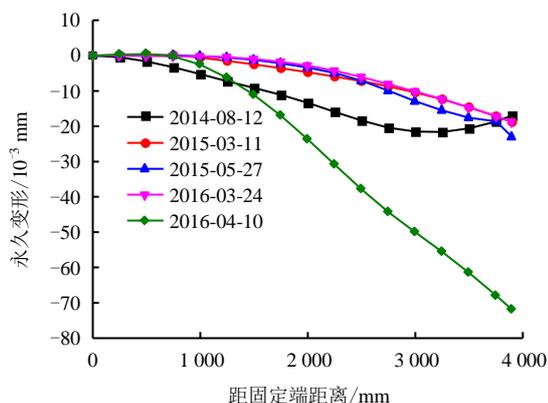


图 7 B 场地永久变形

Fig.7 Permanent deformation in site B

B 场地位于郊区，气温要低于 A 场地，且 B 场地路面及结构层厚度更大，因此，路基地温状况与 A 场地存在较大差别。中载车作用下，选取该路基断面变形最大位置，即探测杆自由端的变形值为基准，对比不同时段路基永久变形情况，结果如表 3 所示。

表 3 不同时段 B 场地永久变形

Table 3 Permanent deformation in site B at different times

日期/年-月-日	2015-03-31	2015-05-27	2016-03-24	2016-04-10
变形/ 10^{-3} mm	18.87	23.03	18.81	71.96

3 月份路基仍处于冻结状态，故在加载试验中，路基产生的永久变形值较小；同为 20 t 货车作用，4 月 10 日路基产生的永久变形约为半个月前的 4 倍；5 月末路基产生的永久变形值仅稍大于 3 月 31 日值。为了更直观地表示不同时期路基在同样车辆作用下永久变形关系，以冻结期路基永久变形值为 1，各时期路基永久变形对比如图 8 所示。

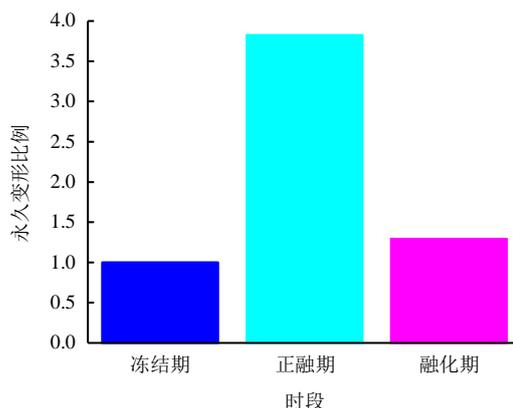


图 8 各时期路基永久变形关系

Fig.8 Permanent deformation at each period

B 场地测试结果表明：3 月份路基处于冻结状态，土体强度较高，车辆荷载对路基影响较小；4 月中下旬路基处于最危险的正融状态（季冻区春季气温逐渐回升时，路基虽处于负温状态但其温度逐渐升高且其内部冰晶逐渐融化、孔隙水逐渐增多的阶段），因此，加载试验中路基产生的永久变形相对最大；而到了 5 月下旬，冻结的路基已完全融化，且与 4 月份相比，孔隙冰融化产生的水分已充分消散，故路基变形介于 3 月份和 5 月份之间。

路基虽经过两年的自然沉降及车辆压密作用，与竣工初期相比土体更加密实，但经历了两次冻融循环后，正融期仍产生了较大的永久变形。

4 车辆荷载下路基永久变形特性分析

道路上，重、超载车辆与正常载重车辆呈彼此

夹杂式分布，协同致灾。图 9 所示为实测的不同载重车辆通过时路基顶面土动压应力谱。

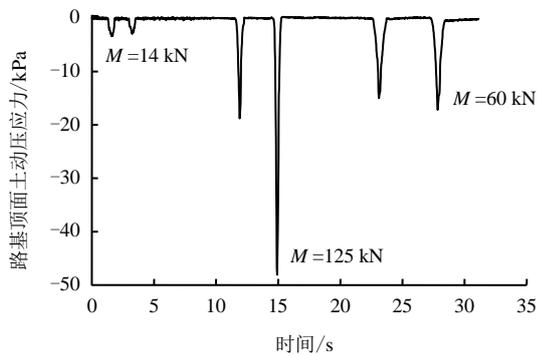


图 9 车辆荷载下路基顶面土动压应力

Fig.9 Dynamic compressive stress of the soil on the top of the subgrade under vehicle loads

可以发现，虽然正常轴载车辆通过时也会对道路产生作用，但与重、超载车辆相比，其作用微乎其微。正如前文所述，车辆轴载增加时，路基永久变形甚至呈指数形式增长。冬季路基处于冻结状态，其变形以回弹变形为主；而正融期由于排水不畅等原因路基处于最危险状态，塑性变形往往占据更大比例。此时如果受到重、超载车辆作用，最不利情

形的叠加导致灾害放大，产生 1+1 远大于 2 的情形，导致道路病害，影响驾乘舒适度和道路运行安全，有必要对此开展专门研究。

4.1 不同车辆轴载情况

为了研究不同车辆荷载对路基永久变形影响，采用不同轴载车辆进行现场加载试验，加载方案如表 4 所示。

表 4 加载方案
Table 4 Loading scheme

方案	整车质量/kg	前轴重/kN	后轴重/kN
I	1 420	8.0	5.7
II	5 780	24.5	31.2
III	9 580	38.4	53.9
IV	12 800	34.5	88.8
V	20 000		
VI	63 000		

注：方案 I 采用车辆如图 10(a)所示；方案 II、III、IV 均采用图 10(b)所示车辆，但方案 III、IV 中车辆分别为半载和满载状态；方案 V、VI 均采用图 10(c)所示车辆，但 V 为空载，VI 为满载状态。

为了进一步掌握路基内部土压力情况，在与 FBG 植入梁变形探测杆同一深度处布置土压力传感器。传感器埋设前，对其进行了实验室标定。采用土箱模拟路基内部环境，并通过施加砝码重量换算得到标定系数。



(a) A 场地方案 I 加载

(b) A 场地方案 III 加载

(c) B 场地方案 V 加载

图 10 加载车辆

Fig.10 Vehicles used in the tests

图 11 所示为某一传感器利用实验室标定系数通过实测值计算得到的土压力，与车轮荷载引起的路基土竖向土压力 σ_z [18]推算值进行对比的结果，表明标定系数准确可靠。

$$\sigma_z = K \frac{P}{z^2} \quad (1)$$

式中： K 为系数，一般取为 0.5； P 为车辆一侧轮轴荷载 (kN)； z 为荷载中心下应力作用点的深度 (m)。

4.2 不同轴载下路基永久变形特征

道路上行驶的各种车辆中，轻型货车和中、小型客车由于轴重较轻，对道路的损伤作用极其轻微，

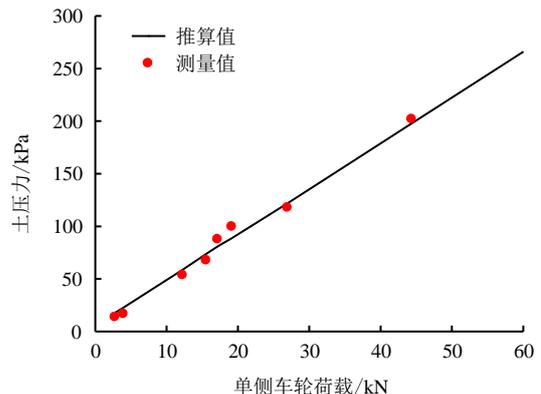
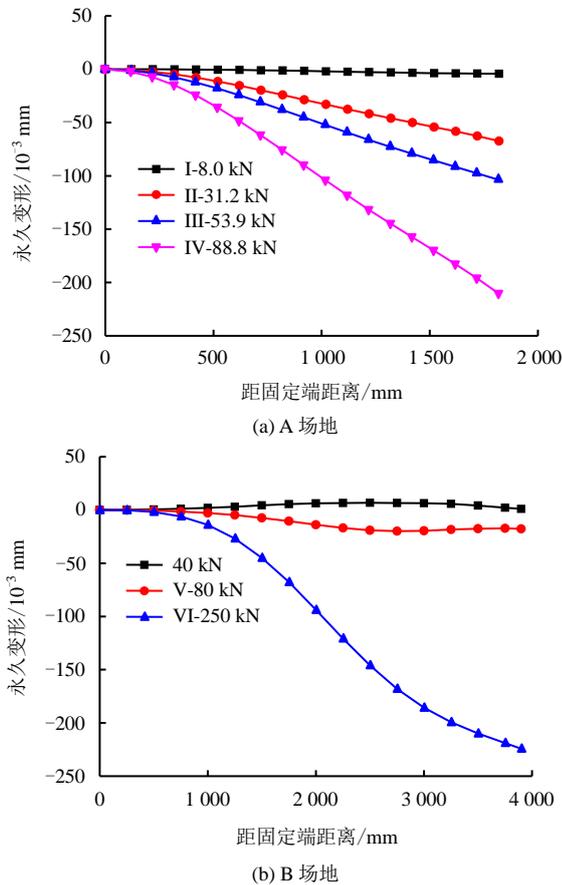


图 11 土压力传感器标定效果

Fig.11 Calibration results of the soil pressure sensors

因而有时可以忽略不计；而重型货车与大客车往往起决定性作用。为掌握不同载重车辆作用下路基永久变形规律，在 2016 年正融期采用上述表 4 所列加载方案在 A、B 场地开展现场试验，结果如图 12 所示。



注：A 场地试验时车辆行驶速度均为 5 km/h，B 场地均为 20 km/h。

图 12 路基永久变形与车辆轴载关系
Fig.12 Subgrade permanent deformation vs. vehicles loading

从图中可以发现，当车辆轴重增加时，两个场地路基永久变形均大幅增加。由于 A 场地采取单轮碾压植入梁自由端的加载方式，故路基永久变形沿横向表现为类似线性的分布特征。而 B 场地车辆沿行车道正常直行，轮迹带未从探测杆外缘正上方通过，故路基永久变形沿横向分布有所不同。

为了明确路基永久变形量与车辆轴重关系，分别计算车辆载重比及车辆行驶过路面后路基产生的永久变形比值，结果列于表 5、6 及图 13。

表 5 A 场地车辆轴载比与路基永久变形比
Table 5 Ratios of axle loads and permanent deformation in site A

方案	轴载比	永久变形比	方案	轴载比	永久变形比
I	1.0	1.0	III	6.7	11.1
II	3.9	15.7	IV	24.2	49.1

表 6 B 场地车辆轴载比与路基永久变形比
Table 6 Ratios of axle loads and permanent deformation in site B

方案	轴载比	永久变形比
40 kN	1.0	1
V	2.0	17
VI	6.3	215

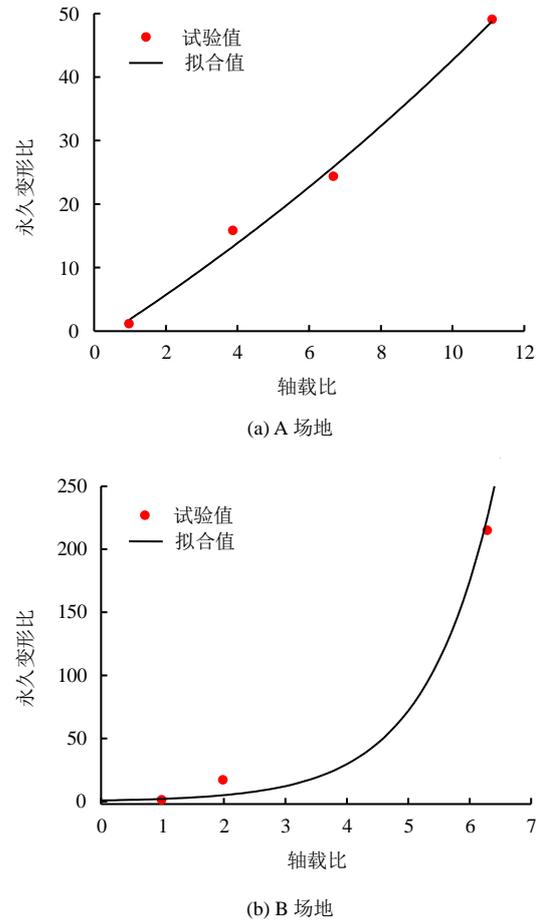


图 13 路基永久变形比与车辆轴载比关系
Fig.13 Ratios of subgrade permanent deformation and vehicles axle loads

A 场地各加载方案轴载情况详见表 4，各数值均为实测值。各方案中，轴载均选取较大值、路基永久变形选取最为明显的加载点进行计算，并以方案 I 轴载及路基永久变形值为基准。B 场地无实测轴载值，通常每根后轴轴载约为前轴的 2 倍，因此，可以根据称得的整车重量估算轴载值。另外，图 12(b)中 40 kN 加载方案为 6 t 重单后轴轻型卡车加载，并以此为 B 场地的基准值。

以上结果表明，车辆轴载成比例增加时，路基永久变形并非呈线性增长；随轴载比的增大，路基永久变形呈指数形式增长。例如对于 B 场地，当轴载增大 2 倍时，路基永久变形值增大 17 倍；而当轴载增至 6.3 倍时，与之对应的路基永久变形值增加

量可达 200 倍以上。

对比表 5 及表 6 中数据可以发现,在 B 测试场地,当轴载增加 2 倍时,路基永久变形量增加比例就已超过 A 场地轴载增加 3.9 倍时相应的路基永久变形增量。从图 12 中可以看出,虽然 VI 方案的轴载值约为 IV 方案的 3 倍(250:88),但其引起的路基永久变形最大值却大致相当;且 40 kN 及 V 方案加载时,引起的路基永久变形均小于 A 场地在轴载更小时进行加载试验引起的路基永久变形值。以上两点均可以说明 B 场地路基强度更高,施工质量更好(B 场地路基更加密实,且结构层厚度更大)。另外 B 场地测试时,以 40 kN 轴载为基准值,而 A 场地基准值则为 8 kN,远小于 B 场地基准值;如果以 A 场地基准值 8 kN(对应自重 1.4 t 小汽车前轴轴重)作为 B 场地基准值,则轴载变化时,相应的 B 场地路基永久变形量增加比例将更大。由于路基已经过两年的固结沉降,故测试时与方案 I 相对应的车辆通过道路时, B 场地路基已检测不到明显变形。

小型客、货车通过道路时,道路变形以路面轻微的回弹变形为主,而几乎不对路基产生影响;而重、超载车辆通过时,路基往往会产生不可恢复的永久变形,虽然变形量极小,总会有增量累计,如超过一定限度最终将导致路基病害。因此,在道路设计和运营过程中,应该对重、超载车辆给予特别的关注。

5 结 论

基于对季冻土路基地温、土动压应力及永久变形监测数据的分析,本文得到以下结论:

(1) 气温对路基地温的影响,随深度增加逐渐减弱,而且随深度增加地温对气温的响应有滞后性,在 30 cm 和 75 cm 深度,监测期内 A 场地地温变化幅度分别为 $-9.0\sim 14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.9\sim 15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 处于冻结期的路基,车辆作用下引起的变形量较小;在相同车辆荷载作用下,正融期路基产生的永久变形明显增大,最大变形是冻结期的 4.5 倍,是融化期的 4.2 倍;经历两次冻融作用后路基仍未达到稳定状态。

(3) 以轴重 40 kN 车辆引起的路基最大永久变形为基准,轴重 80 kN 及 250 kN 车辆引起的实测永久变形分别增大 17 倍及 215 倍,轴重与永久变形非线性关系明显。

(4) 冻融循环与重、超载车辆协同作用,这种最不利组合会放大路基永久变形,实测结果显示,

这种正融+重载组合导致的永久变形是融化+轻载组合的 50 倍以上。所以,在季冻区道路防灾及运营管理中对此应特别关注。

参 考 文 献

- [1] 吴紫汪,刘永智.冻土地基与工程建筑[M].北京:海洋出版社,2005.
WU Zi-wang, LIU Yong-zhi. Frozen ground and engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [2] 王大雁,马巍,常小晓,等.冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):4313-4319.
WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 4313-4319.
- [3] 张世民,李双洋.青藏粉质黏土冻融循环试验研究[J].冰川冻土,2012,34(3):625-631.
ZHANG Shi-min, LI Shuang-yang. Experimental study of the Tibetan silty clay under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 625-631.
- [4] 宇德忠,杨洪生,程培峰.黑龙江省高等级公路轴载分布规律的研究[J].公路,2015,(3):120-124.
YU De-zhong, YANG Hong-sheng, CHENG Pei-feng. Research on the laws of typical axial load distribution of high class highway in Heilongjiang province[J]. Highway, 2015, (3): 120-124.
- [5] NAS-NRC. Devision of engineering and industrial research[R]//The AASHO Road Test Report. Washington, D.C.: [s. n.], 1962: 1-3.
- [6] 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 Yong-zhi, WU Qing-bai, ZHANG Jian-ming, et al. Deformation of highway roadbed in permafrost regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 10-15.
- [7] 俞祁浩,刘永智,童长江.青藏公路路基变形分析[J].冰川冻土,2002,24(5):623-627.
YU Qi-hao, LIU Yong-zhi, TONG Chang-jiang. Analysis of the subgrade deformation of the Qinghai-Tibetan Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2002, 24(5): 623—627.
- [8] 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 embankments in degenerative permafrost regions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1477—1483.
- [9] 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 Qing-bai. Monitoring and analysis of embankment deformation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 571—579.
- [10] MA WEI, MU YAN-HU, WU QING-BAI, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2011, 67: 178—186.
- [11] ZHENG BO, ZHANG JIAN-MING, QIN YING-HONG. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2010, 60: 161—168.
- [12] YANG YONG-PENG, QU YAO-HUI, CAI HAN-CHENG, et al. A system for automated monitoring of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost regions[J]. **Sciences in Cold and Arid Regions**, 2015, 7(5): 560—567.
- [13] HÄGGMARK ILIAN. Fiber Bragg gratings in temperature and strain sensors[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2014.
- [14] FERRARO PIETRO, NATALE GIUSEPPE DE. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2002, 37: 115—130.
- [15] 汪云龙, 袁晓铭, 殷建华. 基于光纤光栅传感技术的测量模型土体侧向变形一维分布的方法[J]. 岩体工程学报, 2013, 35(10): 1908—1913.
- WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, YIN Jian-hua. A measurement method for 1D distribution of lateral deformation of soils in shaking table tests using FBG technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1908—1913.
- [16] 孟上九, 张书荣, 程有坤, 等. 光纤布拉格光栅在季节冻土路基应变检测中的应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 601—608.
- MENG Shang-jiu, ZHANG Shu-rong, CHENG You-kun, et al. Application of fiber bragg grating sensors to strain detection of seasonally frozen subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 601—608.
- [17] 百度百科. 哈尔滨: 黑龙江省省会 [EB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=MVDRCsVHV14zAqVwCboujFITVEDGCjhEou6J_yqiUytzA2HK9-W2KFob3GLEl0YnX6BrBQrgIfKODiXsnq16GCmcP7JfU0-jZ0UGHrIRVe.
- Baidu Encyclopedia. Harbin: Capital of Heilongjiang Province[EB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=MVDRCsVHV14zAqVwCboujFITVEDGCjhEou6J_yqiUytzA2HK9-W2KFob3GLEl0YnX6BrBQrgIfKODiXsnq16GCmcP7JfU0-jZ0UGHrIRVe.
- [18] 邓学钧. 路基路面工程(第三版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- DENG Xue-jun. Road subgrade and pavement engineering (3rd edition)[M]. Beijing: China Communication Press, 2008.