

DOI:10.11918/202206046

# 北方寒冷地区温度场作用下公路路表形变规律分析

纪伦<sup>1</sup>,张红菊<sup>2</sup>,郭宏斌<sup>3</sup>,邹勇<sup>1,4</sup>,赵振国<sup>5</sup>,谭忆秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省龙建路桥第一工程有限公司, 哈尔滨 150028;  
3. 吉林省路桥工程(集团)有限公司, 长春 130062; 4. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082;  
5. 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了更加具体、深入地理解寒区道路, 研究其病害发生、发展规律, 提高对道路结构在时间和空间上的认知, 开展了北方寒冷地区路表形变规律的研究。通过选取典型公路路段, 建立10个监测段落, 对路基的冻胀、融沉变形持续进行现场高程监测。分析温度场作用下路表形变特征和响应机制, 分析公路在自然条件下的时域形变特点、动态形变特征及差异性。分析周期监测数据, 构建竖向相对形变、竖向相对形变速率、横断面间形变速率最大倍数等参数, 比较不同段落、不同横断面和监测点间的形变及其差异。研究北方寒冷地区路表形变与温度场协调规律, 结果表明: 北方寒冷地区基于温度场的路表形变具有典型的周期特性。对比分析填、挖方路段纵横方向形变的差异特征, 形变极值分布规律, 以及结合热胀、冻胀、融沉阶段的相对形变规律及形变速率差异特点, 结果发现: 挖方路段形变速率是填方路段的10余倍; 8月份至10月份的热胀速率大于10月份至11月份的热胀速率; 融沉主要发生在3月份至5月份; 而冻胀速率较为稳定, 对于填方路段, 11月份至次年1月份的冻胀大于1月份至2月份的冻胀, 而挖方路段则相反。给出了寒冷地区路表形变的温度场时域响应规律、特点, 为开展寒区路基、路面结构和材料研究, 以及道路病害等研究提供了依据。

**关键词:** 北方寒冷地区; 路表形变; 路基; 冻胀; 融沉; 形变规律

中图分类号: U461 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)09-0113-11

## Road deformation characteristics under the action of temperature field in cold regions of North China

Ji Lun<sup>1</sup>, Zhang Hongju<sup>2</sup>, Guo Hongbin<sup>3</sup>, Zou Yong<sup>1,4</sup>, Zhao Zhenguo<sup>5</sup>, Tan Yiqiu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Heilongjiang Provincial Longjian Road & Bridge the 1st Engineering Co., Ltd., Harbin 150028, China;  
3. Jilin Road and Bridge Engineering (Group) Co., Ltd., Changchun 130062, China;  
4. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China;  
5. Heilongjiang Provincial Highway Survey and Design Institute, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to facilitate road engineering personnel to have a more specific and in-depth understanding of roads in cold regions, and to help researchers study the occurrence and development laws of road diseases, and to improve their understanding of the temporal and spatial conditions of road structures, the researchers have conducted research on the deformation laws of road surfaces in cold northern regions. The researchers selected typical highway sections and established 10 monitoring sections to continuously monitor the on-site elevation of roadbed frost heave and thaw settlement deformation. The authors analyze the deformation characteristics and response mechanisms of road surfaces under the influence of temperature fields, and analyze the time-domain deformation characteristics, dynamic deformation characteristics, and differences of highways under natural conditions. By analyzing periodic monitoring data, the researchers constructed parameters such as vertical relative deformation, vertical relative deformation rate, and maximum multiple of deformation rate between cross-sections. They used these parameters to compare the deformation and differences between different sections, cross-sections, and monitoring points. The researchers have provided the coordination law between road surface deformation and temperature field in cold northern regions. The research results confirm that the road surface deformation based on temperature field in cold northern regions has typical periodic characteristics. At the same time, through comparative research, the researchers have discovered the differences in deformation characteristics in the

收稿日期: 2022-06-12; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2024-08-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240820.1854.002>

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20315); 国家重点研发计划(2016YFE0202400)

作者简介: 纪伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 邹勇, 1211747618@qq.cn

longitudinal and transverse directions of the filling and excavation sections, the distribution pattern of deformation extremes, as well as the relative deformation patterns and deformation rate differences during the thermal expansion, frost heave, and thaw settlement stages. The researchers have found that the deformation rate of excavated sections is more than 10 times that of filled sections, and the thermal expansion rate from August to October is greater than that from October to November. The researchers analyzed the melting rate at different times and found that melting mainly occurred from March to May. The authors analyzed that the rate of frost heave is relatively stable, and also found that for fill sections, the frost heave from November to January is greater than that from January to February, while the opposite is true for excavation sections. The authors summarized the time-domain response laws and characteristics of temperature field for road surface deformation in cold regions, providing a basis for research on roadbed, pavement structure and materials, as well as road diseases in cold regions.

**Keywords:** northern cold region; road surface deformation; roadbed; frost heave; thawing settlement; deformation law

在季节性冻土区,由于大气温度周期性的变化这一显著特征,致使土体中液态水、固态冰与气态水发生周期性相互转变,这种转变过程并非孤立存在,而是与外界环境持续且紧密地进行着物质和能量交换,这一复杂的过程被定义为冻融作用<sup>[1-3]</sup>。研究表明,寒冷地区土体冻融的工程特性复杂,冻融作用对土基的影响显著<sup>[4-5]</sup>,会引发一系列严重的道路病害问题,如导致冻胀翻浆、纵向裂缝等病害,这成为季冻区公路病害的主要诱因<sup>[6-8]</sup>。文献[9]以路基填料为研究对象,通过现场监测分析路基冻胀变形与地温的变化规律,采用室内模型试验进行了细粒土的力学特性和冻胀特性的研究。寒区公路处于水分场与温度场的交互影响之下,路表不可避免地会产生形变。一直以来研究人员都在致力于该种变形的研究。文献[10]开展了粉质黏土的冻融特性研究,利用榆松高速扶余连接线路基冻胀融沉观测数据,分别构建了变形分析模型,预测了路基冻胀融沉变形量,这种形变并非简单孤立的现象,而是与道路结构有着紧密的关联。文献[11]在冻融循环条件下室内路基模型试验的基础上,针对不同冻结温度、初始含水率、压实度以及不同冻融循环条件对季节性冻土区路基冻胀特性的影响进行了研究。

可见,路基形变特征与道路路面结构以及路基状况息息相关,同时,这种形变又会反过来作用于路面结构。值得注意的是,这一过程并非静态不变的,而是呈现出明显的动态变化特征。文献[12]在对多年冻土区公路路基的变形及稳定性研究中考虑了气候变暖(短期内极端气候突变变暖)因素,研究结果揭示了在气候变暖条件下多年冻土区公路路基的变形及稳定性变化规律。文献[13]研究了高速公路修建初期特殊路基结构的变形特征及机理,提出了针对多年冻土区特殊路基结构工程服役性能的评价体系。文献[14]针对多年冻土区宽幅路基融沉变形造成的路面结构开裂问题,模拟融沉变形的变

化规律,从路基路面一体化角度分析了路基融沉对路面结构的损伤行为和损伤演化过程,并从路面材料和结构的角对多年冻土地区高速公路路面结构进行了优化。

在针对道路结构与材料的深入研究,以及对结构进行计算分析时,准确确定具体条件下的材料参数以及变形特征显得至关重要。通过对全过程的结构性能的细致分析,进而实现对全周期状况的科学评价,这对于精确分析路面结构力学响应以及合理设计路面结构十分重要。因此,对形变特征进行深入分析,尤其是针对其引发的形变状况以及在时间和空间上的分布状态展开全面的监测与细致的分析,对于深入研究道路工程材料与结构具有极为积极的意义。为此,本文选取了黑龙江省内具有代表性的沥青路面路段展开形变监测工作,对这些路段在温度场作用下的形变规律进行深入剖析,深入了解冻融作用下道路形变的本质和规律,为今后相关道路工程的设计、施工以及维修养护提供坚实的理论依据和实践指导。

## 1 监测路段与监测点位布设

### 1.1 监测点位布设

开展路表形变研究,最有效的方式就是现场监测<sup>[15-16]</sup>。通过实地考察,选取了 10 个典型路段,所选择的路段均为半刚性基层沥青路面。具体监测地点道路情况见表 1。

为了在横向及纵向上较为完整地记录路面竖向相对形变变化,每个监测段落纵向按 30 m 间隔设置 3 个横断面,每个横断面设置 6 个监测点(在超车道和行车道的车道边缘以及车道间,设置 5 个监测点;在行车道边缘向应急车道延伸半个行车道的距离,设置 1 个监测点)。从路肩一侧向中央分隔带,监测点位编号依次为 1#、2#、3#、4#、5#、6#,如图 1 所示。

表1 监测地点及道路情况  
Tab.1 Monitoring sites and road conditions

编号	监测地点	道路情况
1#	HT 高速 K59 + 731	该监测地点位于宾县至常安段,为常安方向,道路已进行过大修,属于填方路段
2#	HT 高速 K64 + 600	该监测地点位于宾县至常安段,为常安方向,道路已进行过大修,属于填方路段
3#	DH 高速 K68 + 180	该监测地点位于天恒山隧道附近,为江北方向,道路两侧有湿地,属于填方路段。
4#	DH 高速 K88 + 196	该监测地点位于一座斜腿钢构桥附近,为瓦盆窑方向,属于挖方路段。
5#	HH 高速 K424 + 200	该监测地点位于康金服务区附近,为鹤岗方向,内侧超车道为原路,行车道为热再生路面,属于填方路段。
6#	HH 高速 K409 + 900	该监测地点同为鹤岗方向,属于填方路段。
7#	SBEL 高速 K20 + 480	该监测地点为北安方向,两侧有湿地,上下行路幅中间均出现纵裂,属于填方路段。
8#	SBEL 高速 K43 + 000	该监测地点同为北安方向,属于填方路段。
9#	HW 路 K652 + 130	该监测地点是一级公路,为哈尔滨方向,属于填方路段。
10#	DG 高速 K70 + 936	该监测地点为大庆方向,两侧均有湿地,属于填方路段。

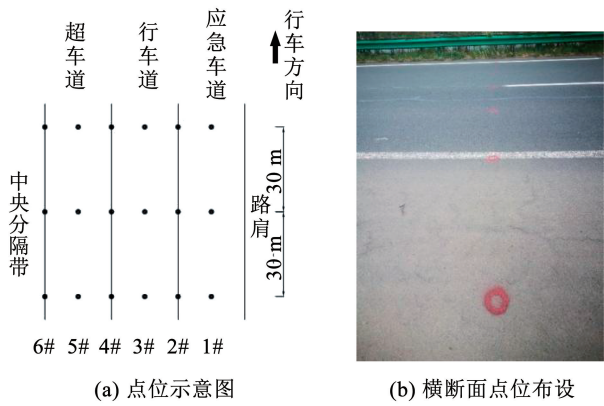


图1 道路竖向相对形变监测点布设

Fig.1 Layout of vertical relative deformation monitoring points for the roads

1.2 监测设备及方式

监测设备采用的是型号 250M 的徕卡 Sprinter 电子水准仪。在用水准仪测量基准点时,必须选择牢固且冻胀位移可忽略不计的结构物。另外,为便于测量,参照水准点的位置也不能离路段过远,与

位移测点之间高差不应过大。如果水准点的位置距离监测路段稍远,可以通过转站的方式实现高程测量,同时尽可能避免多次转站而产生较大累积误差。

2 路表形变规律及极值特征

2.1 路表形变的时域特征

以 2020 年 8 月份监测的高程数据作为初始值,将不同时期测定的高程数据与之相减,其差值即为道路竖向相对形变大小,计算公式为

$$X_i = H_i - H_0 \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 X_i \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为横断面第  $i$  个点位在某月份产生的竖向相对形变值, $i = 1, 2, \dots, 6$ ; $\bar{X}$ 为横断面上平均竖向相对形变值; $H_i$ 为横断面上第  $i$  个点位在某月份的高程; $H_0$ 为横断面上第  $i$  个点位在 2020 年 8 月份的高程。表 2 给出了横断面平均竖向相对形变分析结果。

表2 横断面平均竖向相对形变分析结果

Tab.2 Analysis results of average vertical relative deformation in cross section

断面编号	平均竖向相对形变/cm							
	2020/10/9	2020/11/7	2021/1/18	2021/2/23	2021/3/20	2021/5/22	2021/6/21	2021/8/16
G	0.34	0.54	4.41	5.58	4.48	0.52	-0.02	0.24
H	0.98	1.16	4.59	5.33	4.28	0.77	-0.07	0.35
I	0.55	0.76	5.60	5.96	5.54	1.04	0.07	0.67
J	5.56	7.45	14.23	20.03	20.17	0.12	-0.17	-5.31
K	4.32	5.76	9.88	12.61	12.42	-0.10	-0.25	-5.64
L	4.78	6.47	10.80	16.12	15.83	0.27	0.32	0.25
Y	0.04	0.08	2.69	2.67	2.61	-3.23	-4.74	-3.25
Z	0.14	1.45	3.27	3.20	3.38	-3.14	-3.11	-0.29
AA	0.32	2.15	4.30	4.01	3.82	-3.59	-3.38	-2.84

由图 2 可见,总体上,相较于 8 月份,1 月份至 3 月份的形变最大,5 月份至 8 月份最小;各段落均表现出 8 月份至 10 月份形变增大,11 月份至次年 2 月份增大的趋势显著,2 月份至 3 月份基本稳定,

此后 4 月份至 5 月份形变降低,之后基本稳定;5 月份至 8 月份,相较于 2020 年 8 月份,基本持平,个别(挖方)路段的断面形变持续降低;两段填方路段的形变趋势基本一致。

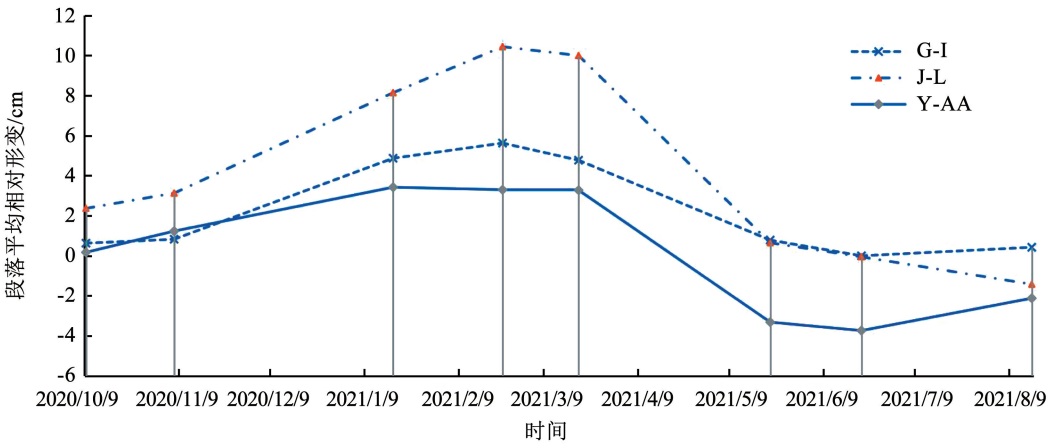


图 2 各段落平均竖向相对形变随时间变化

Fig. 2 The average vertical relative deformation of each paragraph over time

表 2 所列数据主要来自于 3 个段落,其公路所在位置,均为哈尔滨市或临近周边。从官方气象网站获取哈尔滨近 30 年的气温数据,绘制月平均气温曲线,如图 3 所示。

对比分析图 2 和图 3,可见,3 月份至 10 月份平均气温为 0℃ 以上,11 月份至次年 3 月份为 0℃ 以下。竖向相对形变数值,8 月份至次年 1、2、3 月份数值增大,可以粗略地认为,8 月份至 10 月份的形变为热胀引发,11 月份至次年 2、3 月份为冻胀引发;此后,竖向相对形变逐渐减小,至 5 月份基本恢复到上一年 8 月份的水平,也有路段的断面竖向相对形变低于上一年 8 月份的数值。此后 4 月份至 8 月份基本稳定。需要说明的是,从数据规律可见,大约 4 月份至 5 月份,形变恢复到“0 点”。

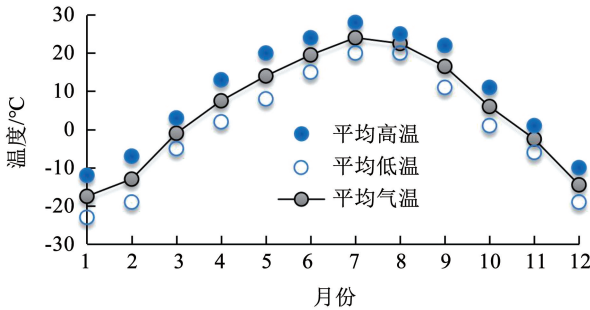


图 3 哈尔滨市月气温状况

Fig. 3 Monthly temperature status in Harbin

可见,自 8 月份开始,路表经历热胀、冻胀、稳定、融沉、稳定和热胀周期过程。路表竖向相对形变周期规律如图 4 所示。

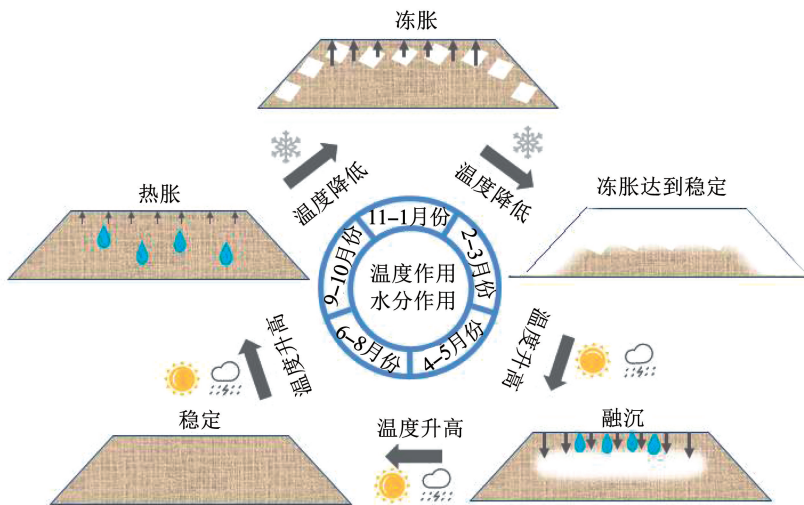


图 4 温度场作用下路表竖向相对形变规律

Fig. 4 Vertical relative deformation law of road surface under the action of temperature field

## 2.2 形变最大值分布规律

### 2.2.1 断面平均竖向相对形变极值

横断面上平均竖向相对形变一般为 2.5 ~ 5 cm。挖方段出现了更大的竖向相对形变, J、K、L 这 3 个横断面的竖向相对形变量都超过了 10 cm, 最大竖向相对形变量在 20 cm 左右, 具体情况见表 3。

表 3 断面平均竖向相对形变极值

Tab.3 Extreme values of average vertical relative deformation of cross-sections

断面编号	断面平均竖向相对形变/cm		
	最大值	最小值	极差
G	5.58	-0.02	5.60
H	5.33	-0.07	5.40
I	5.96	0	5.96
J	20.17	-5.31	25.48
K	12.61	-5.64	18.25
L	16.12	0	16.12
Y	2.69	-4.74	7.43
Z	3.38	-3.14	6.52
AA	4.30	-3.59	7.89

可见, J、K 和 L 断面平均最大变形相对最大, 其为挖方段, J 位置临近填挖过渡段, 其数值较大, 是否与其处在挖方段有关, 还需考证。一年内各断面平均竖向相对形变极差比较如图 5 所示。

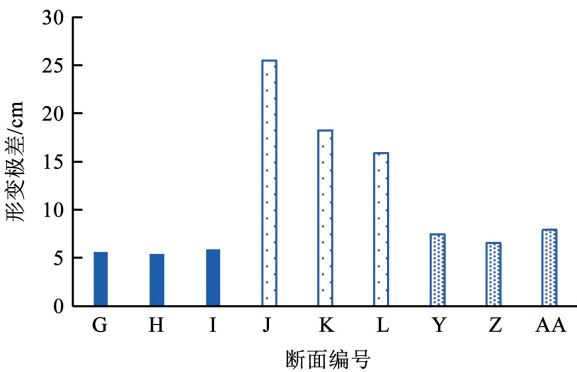


图 5 一年内各断面平均竖向相对形变极差

Fig. 5 Average vertical relative deformation range of each section within one year

可见, 挖方段形变极差较大, 且断面间形变极差连续, 从填挖过渡向最大挖深, 延下坡坡度逐渐递减。填方段形变极差数值有差异, 但差异不大, 同一段落各断面数据变异性小。挖方段断面平均最大变形差是另外两个段落的 2.7 倍和 3.5 倍。

### 2.2.2 断面点位相对形变的最大值

统计各横断面上出现的相对形变分布状况, 横断面上最大相对形变主要是分布在 (0, 5] 和 (15, 20]

内, 均为 6 个断面; 其次在 (5, 10]、(10, 15] 内的较少, 分别为 4 个和两个横断面; 形变大于 20 cm 的为 1 个断面。

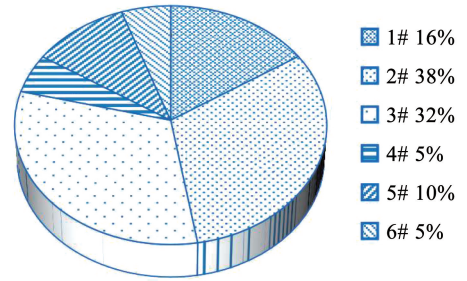


图 6 横断面各点位出现位移最大值的频率

Fig. 6 Frequency of maximum displacement at each point in the cross-section

在图 6 中可看出横断面上最大冻胀出现在 2# 和 3# 的频率较大, 分别占了 38% 和 32% 的比例, 其次出现在 1# 的频率也较大, 占 16%, 这表明靠近路肩位置的路表冻胀更大, 而位于内侧的超车道上的 4#、5#、6# 点位其出现最大相对形变的总占比为 20%。说明 1#、2#、3# 点位形变差异大, 形变作用频繁。

## 2.3 相对变形最小值分布规律

路基在经历冻胀后会发融沉, 统计 2021 年 8 月份各点的竖向相对形变的最小值, 将路基横断面位移最小值分布绘制于图 7, 将横断面上相对形变最小值出现的频率信息绘制于图 8, 分析路基一年时间内形变的变化。

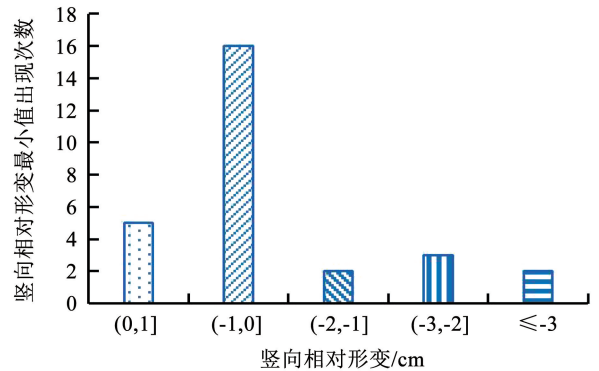


图 7 横断面上位移最小值分布

Fig. 7 Distribution of minimum displacement on cross section

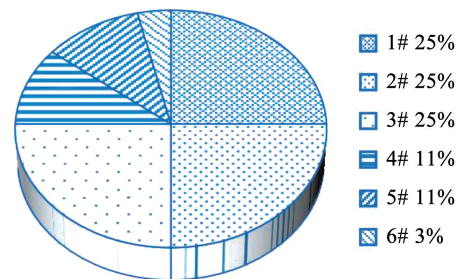


图 8 横断面各点位出现位移最小值的频率

Fig. 8 Frequency of minimum displacement at each point in the cross-section

由图 7 可知,一年后少部分道路的平均高程略有提高,但都在 0~1 cm 之间;大部分路面出现了沉降,沉降值在 0~1 cm 之间;少部分路面的沉降值超过了 2 cm。由图 8 可知,横断面上最小相对形变主要出现在 1#、2#、3# 点位,出现位移最小值的频率都为 25%,表明靠近路肩一侧的路面沉降大,而靠近中央分隔带一侧的 4#、5#、6# 点位出现横断面位移最小值的总频率只有 24%。

### 3 断面竖向平均形变速率分析

#### 3.1 路表横断面竖向相对形变速率的定义

上文分析了路表形变的周期规律,可见,随着季节更替,环境温度的变化,路表竖向形变规律明显,

而其变化的速度亦有差异。以 10 d 为一个单位时间,求出不同时间段竖向相对形变速率,计算公式为

$$\epsilon_{vij} = 10(H_{di} - H_{dj}) / (t_i - t_j) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{vij}$ 为不同时间段( $t_i, t_j$ )竖向相对形变速率, $t_i, t_j$ 为对应时间点; $H_{di}$ 为横断面  $t_i$  时间点某月份的高程; $H_{dj}$ 为横断面上  $t_j$  时间点某月份的高程。

结合 2.1 节的分析,计算热胀速率、冻胀速率,以及热、冻胀速率和融沉速率。

#### 3.2 路表横断面竖向相对形变速率规律分析

结合上文,可认为 11 月份开始出现冻胀,3 月份开始发生融沉。计算竖向相对形变速率,如表 4 所示。

表 4 竖向相对形变速率分析结果

Tab. 4 Analysis results of vertical relative deformation rate

mm · (10 d)<sup>-1</sup>

断面 编号	热胀速率		冻胀速率				热、冻胀速率	融沉速率				
	8—10 月份	10—11 月份	8—11 月份	11—1 月份	1—2 月份	平均		2—3 月份	3—5 月份	5—6 月份	6—8 月份	平均
G	0.54	0.65	0.59	5.38	3.25	4.67	2.79	2.97	6.29	1.80	-0.43	4.31
H	1.56	0.58	1.26	4.76	2.06	3.86	2.67	2.84	5.57	2.80	-0.70	4.15
I	0.87	0.68	0.83	6.72	1.00	4.81	2.98	1.14	7.14	3.23	-1.00	4.58
J	8.83	6.10	8.10	9.42	16.11	8.77	8.51	-0.38	31.83	0.97	8.57	16.65
K	6.86	4.65	6.26	5.72	7.58	6.34	6.31	0.51	19.87	0.50	8.98	9.61
L	7.59	5.45	7.03	6.01	14.78	8.94	8.06	0.78	24.70	-0.17	0.12	6.38
Y	0.06	0.13	0.09	3.63	-0.06	3.63	1.64	0.16	9.27	5.03	-2.48	4.48
Z	0.22	2.42	0.97	3.31	-0.19	1.72	1.43	-0.49	10.35	-0.10	-4.70	10.35
AA	0.51	2.94	1.34	4.26	-0.81	4.26	2.62	0.51	11.76	-0.70	-0.90	5.89
平均	3.00	2.62	2.94	5.47	4.86	5.22	4.11	0.89	14.09	1.48	0.83	7.50

可见,挖方段形变大,形变速率也是其他段落的 10 余倍。8 月份至 10 月份的热胀速率大于 10 月份至 11 月份的热胀速率;比较融沉速率及其平均值可知,融沉主要发生在 3 月份至 5 月份。冻胀速率较为稳定,对于填方段,11 月份至次年 1 月份冻胀比次年 1 月份至 2 月份冻胀大,而挖方路段则相反。按照形变速率绘制成图,如图 9 所示。

可见,两段填方路段胀、沉速率规律基本相当并保持一致。挖方段与填方段相比较,形变速率存在较大差异,不同时期的胀沉规律有一定区别,如 6 月份至 7 月份还在发生融沉。

表 5 列出了同一路段横断面间形变速率最大倍数,即同一断面监测点形变速率最大值是最小值的倍数。

可见,横断面间形变速率最大倍数,一般在 1~3 之间,而个别段落可达到并超过 20 倍。与填方段相比,挖方段形变数值大,形变速率大;除了 6 月份至 8 月份,挖方段的融沉速率最大倍数差异不大,横断面间形变速率最大倍数较低,即变形更加同步和均匀;而 6 月份至 8 月份融沉速率最大倍数接近到 75,差异显著,一定程度上,说明挖方段在此期间横断面融沉形变速率显著不均匀。分析热、冻胀速率,如图 10 所示。

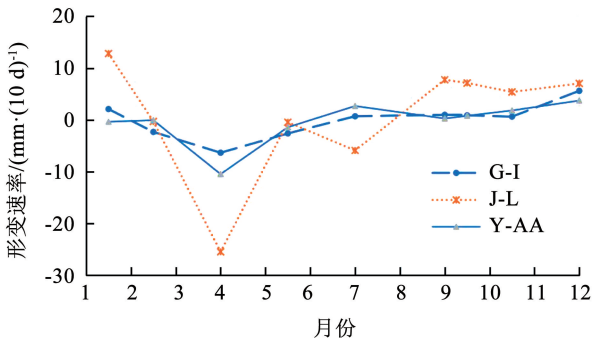


图 9 一年内路表形变速率状况

Fig. 9 Road gauge deformation rate within one year

表5 横断面间形变速率最大倍数

Tab. 5 Maximum multiple of deformation rate between cross sections

断面编号	热胀速率			冻胀速率			热、冻胀速率	融沉速率				
	8—10月份	10—11月份	8—11月份	11—1月份	1—2月份	平均		2—3月份	3—5月份	5—6月份	6—8月份	平均
G-I	2.9	1.2	2.1	1.4	3.3	1.1	1.2	2.6	1.3	1.8	2.3	1.1
J-L	1.3	1.3	1.3	1.6	2.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.9	74.8	1.7
Y-AA	8.5	22.6	14.9	1.3		1.8	2.5	3.2	1.3		0.2	2.3
平均	4.2	8.4	6.1	1.4	2.7	1.4	1.7	2.4	1.4	1.9	25.8	1.7

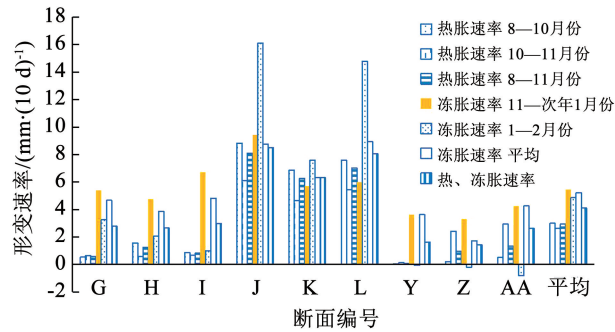


图10 热、冻胀速率状况

Fig. 10 Thermal and frost heaving rate status

可见,热胀和冻胀速率差异显著,不同段落的二者差异最大达到100余倍。以8—11月份热胀速率和热、冻胀速率为例,最大、最小差异可分别到达93倍和6倍。而同一段落亦存在显著差异,以G、H和I3个断面为例,8—10月份热胀速率,H断面最大,10—11月份热胀速率与其他断面基本一致,表现出显著的变异性,图11为融沉速率状况。

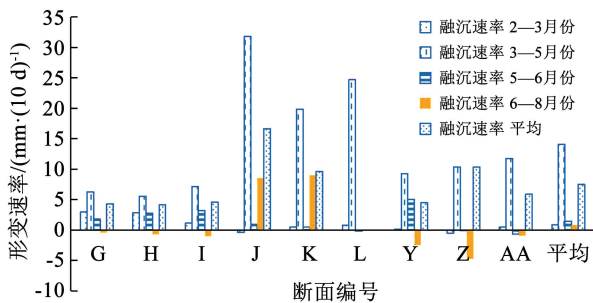


图11 融沉速率状况

Fig. 11 Melting and sinking rate status

可见,融沉速率差异显著。3—5月份融沉速率最大,2—3月份,5—6月份次之。而2—3月份,同一段落的融沉速率差异最大,融沉速率差异为1.1~3.2倍。而同一段落亦存在显著差异,以J、K、L3个断面为例,3—5月份融沉速率,J断面最大,超过30 mm/10 d,而K断面不足20 mm/10 d,相差1.5倍。

### 4 路表横断面形变分布特征

#### 4.1 路表横断面形变过程描述

1) DH 高速 K68 + 150—K68 + 210(江北方向)。以2020年8月份各点测得的高程为初始值,用不同月份测得的高程数据与之相减,得到各点不同时间的竖向相对形变变化,如图12~14所示。

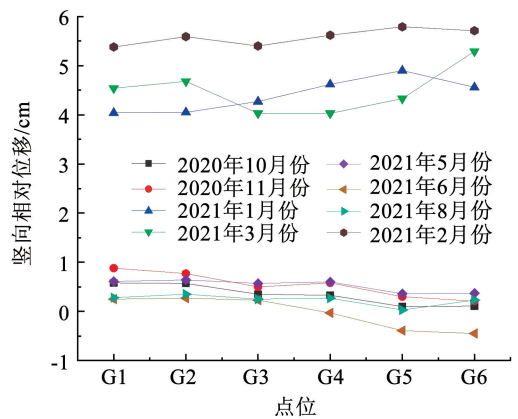


图12 G横断面(DH高速K68+210)各点产生的竖向相对形变

Fig. 12 Relative vertical deformation at various points on the G cross-section (DH expressway K68 + 210)

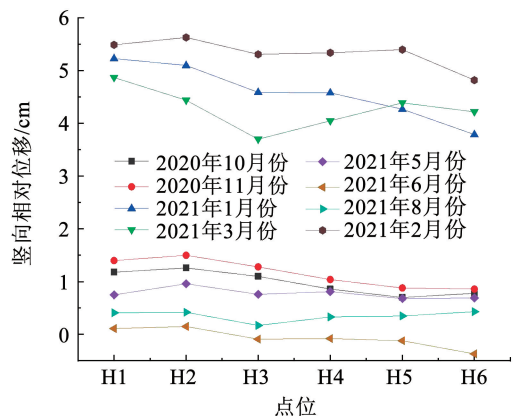


图13 H横断面(DH高速K68+180)各点产生的竖向相对形变

Fig. 13 Relative vertical deformation at various points in the H cross-section (DH expressway K68 + 180)

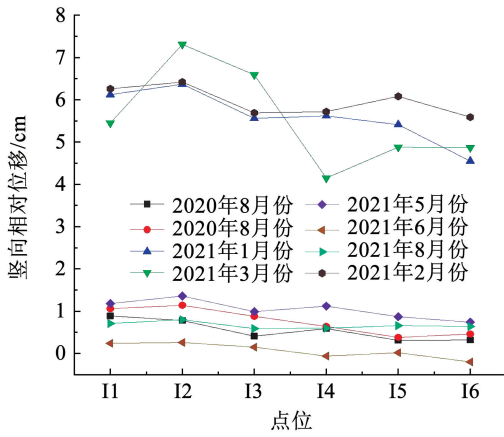


图 14 I 横断面 (DH 高速 K68 + 150) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 14 Relative vertical deformation at various points on the cross-section I (DH expressway K68 + 150)

2021 年 1 月份, K68 + 150、K68 + 180、K68 + 210 都发生了显著的冻胀现象, 各个监测点相对于 2020 年 8 月份的竖向变形量都超过了 4 cm, K68 + 150 断面(I 断面)的竖向变形量比其他两个断面明显更大, 3 个横断面平均竖向相对形变分别为 4.4、4.6、5.6 cm。对于 G 断面, 中央分隔带一侧路面的竖向变形比路肩一侧路面更大, 最大竖向变形发生在超车道中央。而 H 断面和 G 断面则是情况相反, 路肩一侧路面的竖向变形更大, 最大竖向变形分别发生在 1#和 2#。此时各断面处相邻两点之间的竖向差异变形都比较小。进入 3 月份, 路面的冻胀仍然继续, 但横断面上各点的竖向相对形变发生了明显的变化。G 断面的 1#、2#及 6#的竖向相对形变增大, 而 3#、4#、5#竖向相对形变减小, 2#、3#之间及 5#、6#之间产生了较大的竖向差异变形。对于 H 断面, 路面整体发生了一些沉降, 只有中央分隔带一侧路面的竖向相对形变是增大的。对于 I 断面, 除 1#、4#、6#出现沉降外, 其他点的竖向相对形变都出现增大, 这种不均匀的竖向相对形变变化造成了 1#、2#及 3#、4#之间出现较大竖向差异变形。随着气温的上升, 路基进入融化期, 到 6 月份时各监测点基本回到上一年 8 月份的高程位置, 此时相对于上一年 8 月份, 3 个断面的沉降最大的位置都处于中央分隔带一侧。

2) DH 高速 K88 + 166—K88 + 226 (瓦盆窑方向)。与 K68 的 3 个断面相比, K88 + 166—K88 + 226 处发生的冻胀明显更大, 2020 年 8 月份至次年 3 月份 3 个横断面平均竖向相对形变达到了 16.3cm, 其中 J 断面的一些点位的最大竖向相对形变超过了 20 cm。该路段竖向相对形变变化如图 15 ~ 17 所示。

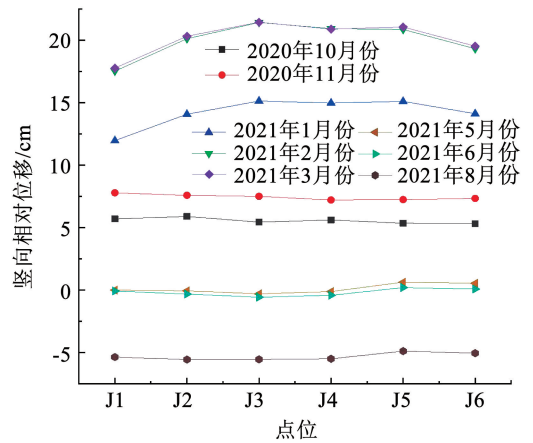


图 15 J 横断面 (DH 高速 K88 + 166) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 15 Relative vertical deformation at each point on the J cross-section (DH expressway K88 + 166)

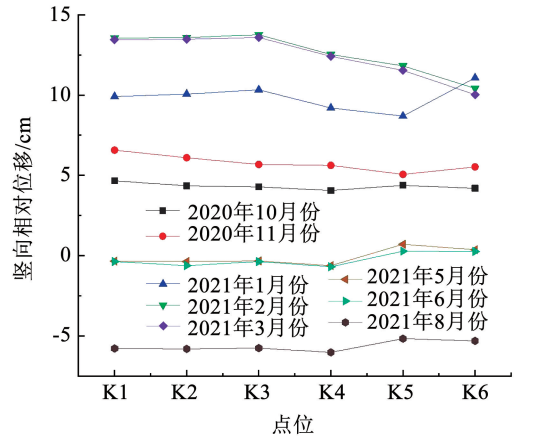


图 16 K 横断面 (DH 高速 K88 + 196) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 16 Relative vertical deformation at each point in the K cross-section (DH expressway K88 + 196)

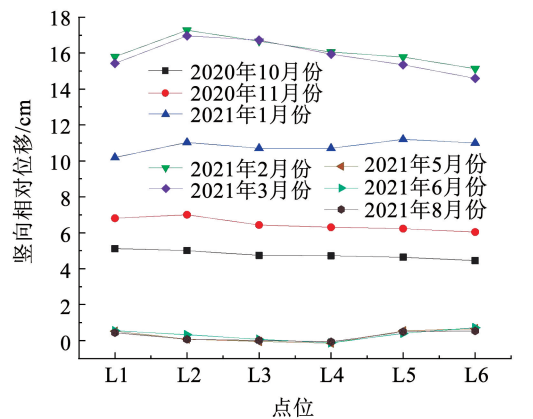


图 17 L 横断面 (DH 高速 K88 + 226) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 17 Relative vertical deformation at various points in the L cross section (DH expressway K88 + 226)

在冻胀过程中, J 断面一直保持着路中的竖向相对形变大于路两侧的拱形形态, 而 K 断面和 L 断面则是路肩一侧的竖向相对形变更大。通过 3 个断

面看出,冻胀主要在2月份之前快速增长,从2月份到3月份,路面是竖向相对形变基本没有变化,冻胀处在一个稳定的时期,经过融沉期后,到5月份时路面基本回到了竖向相对形变为0的位置。

3) HW 路 K652 + 100—K652 + 160(哈尔滨方向)。HW 路整体的冻胀并不大,各点的竖向相对形变基本在 2 ~ 5 cm 之间,3 个断面保持一致的拱形形态,从1月份到3月份,3 个断面发生着不同的变化。Y 断面的各点冻胀情况没有改变,Z 断面则是路肩一侧的路面竖向相对形变逐渐增大,中央分隔带一侧的路面竖向相对形变减小,这表明水分迁移的横向方向是从内侧往外侧转移。AA 断面是中央分隔带一侧的路面冻胀处于稳定状态,而另一侧则是出现明显的融沉现象。到5、6月份时,融沉基本完成,相较于2020年8月份的初始高程,路面整体沉降了3~4 cm,这种现象与 DH 高速两段路有明显不同。该路段竖向相对形变变化如图 18 ~ 20 所示。

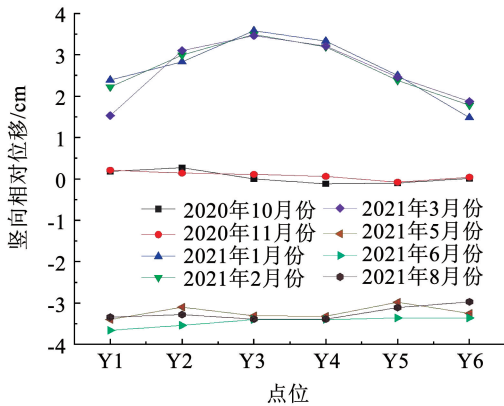


图 18 Y 横断面 (HW 路 K652 + 160) 各点产生的竖向相对形变  
Fig. 18 Relative vertical deformation at each point in the Y cross-section (HW Road K652 + 160)

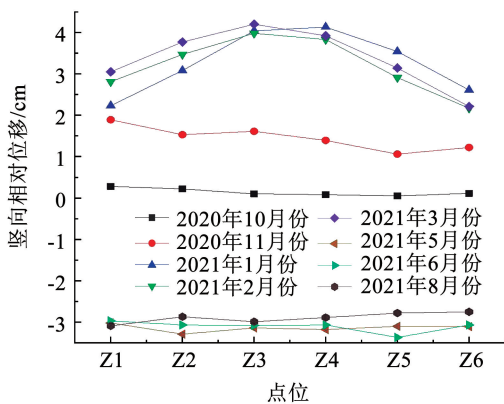


图 19 Z 横断面 (HW 路 K652 + 130) 各点产生的竖向相对形变  
Fig. 19 Relative vertical deformation generated at each point in the Z cross-section (HW Road K652 + 130)

4) DG 高速 K70 + 876 ~ K70 + 966(大庆方向)。DG 高速在2月份的相对形变基本在 2.0 cm 左右。对于 K70 + 966 横断面,呈现出路中比两侧冻胀大

的拱形,最大冻胀位置出现在中间行车道的中间位置,为 1.93 cm;K70 + 906 横断面出现了同样的规律,但冻胀更大,最大相对形变为 2.62 cm;对于 K70 + 936 横断面,则是外侧相对形变大于内侧超车道,整个横断面冻胀在 1.86 ~ 2.48 cm 之间。该路段竖向相对形变变化如图 21 ~ 24 所示。

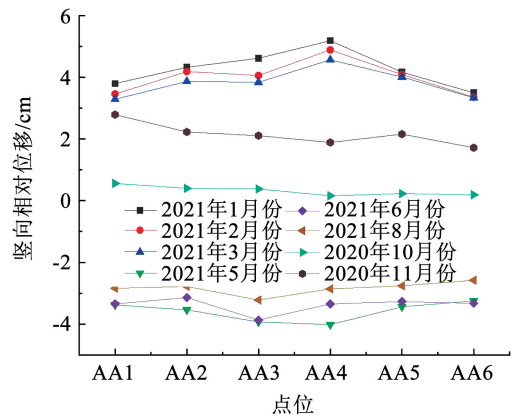


图 20 AA 横断面 (HW 路 K652 + 100) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 20 Relative vertical deformation at each point of AA cross-section (HW Road K652 + 100)

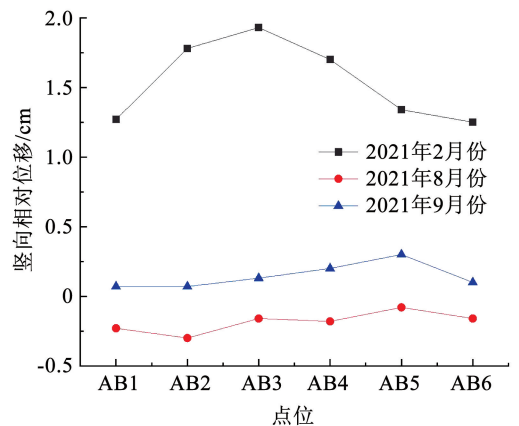


图 21 AB 横断面 (DG 高速 K70 + 966) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 21 Relative vertical deformation generated at each point on the AB cross-section (DG Expressway K70 + 966)

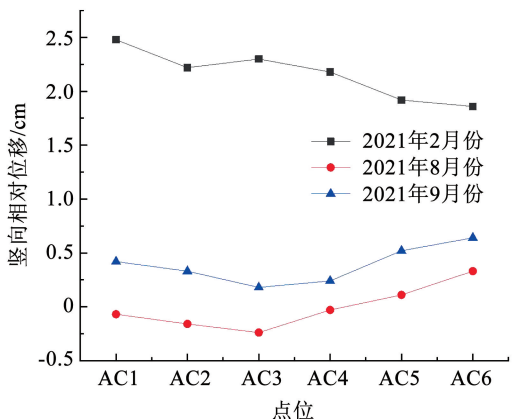


图 22 AC 横断面 (DG 高速 K70 + 936) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 22 Relative vertical deformation at various points in the AC cross-section (DG Expressway K70 + 936)

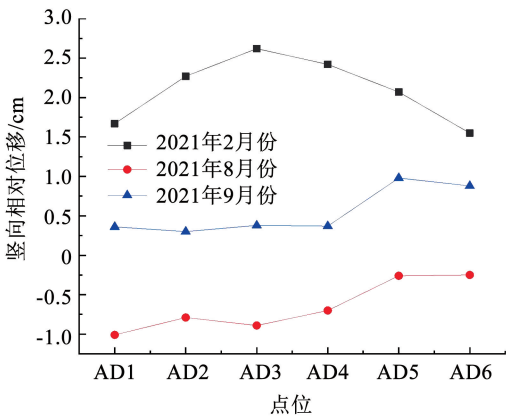


图 23 AD 横断面 (DG 高速 K70 + 906) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 23 Relative vertical deformation at various points in the AD cross-section (DG highway K70 + 906)

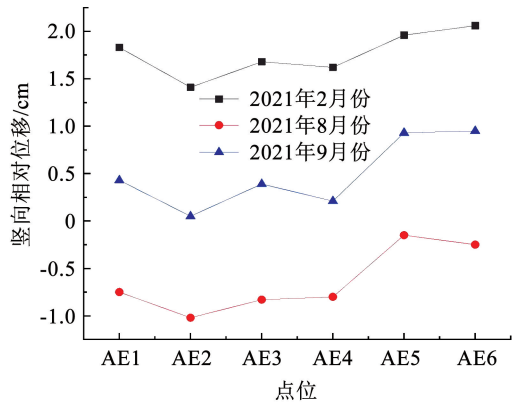


图 24 AE 横断面 (DG 高速 K70 + 876) 各点产生的竖向相对形变

Fig. 24 Relative vertical deformation generated at each point of the AE cross-section (DG highway K70 + 876)

### 4.2 路表横断面形变规律分析

根据各路段的路表变形监测的数据结果分别用二次抛物线或直线进行拟合,可以得到路面横断面

竖向相对形变的拟合公式,详见表 6。其中,  $y$  为竖向相对形变, cm;  $d$  为横断面上监测点距离路肩边缘的距离, m。

表 6 路面横断面竖向相对形变拟合

Tab. 6 Fitting of vertical relative deformation of road cross section

断面编号	线性拟合		抛物线拟合	
	公式	$R^2$	公式	$R^2$
G	$y = 0.036 5d + 5.334 9$	0.645 0	$y = 0.000 1d^2 + 0.035 1d + 5.338 5$	0.645 0
H	$y = -0.059d + 5.733 2$	0.598 2	$y = -0.01d^2 + 0.077d + 5.382 5$	0.735 6
I	$y = -0.116 4d + 7.051 7$	0.450 0	$y = -0.016 9d^2 + 0.112 5d + 6.461 9$	0.525 5
J	$y = 0.155 8d + 19.199$	0.173 8	$y = -0.116d^2 + 1.595 3d + 15.995$	0.937 6
K	$y = -0.326 7d + 14.647$	0.816 2	$y = -0.051 5d^2 + 0.314 1d + 13.216$	0.977 9
L	$y = -0.124 6d + 16.886$	0.358 4	$y = -0.044 9d^2 + 0.428 3d + 15.668$	0.726 0
Y	$y = -0.071 1d + 3.145 6$	0.147 8	$y = -0.060 6d^2 + 0.527 5d + 2.289 5$	0.953 8
Z	$y = -0.045d + 3.774$	0.064 5	$y = -0.062 3d^2 + 0.575 5d + 2.871 2$	0.996 9
AA	$y = -0.012 5d + 4.366 2$	0.005 4	$y = -0.057 7d^2 + 0.584 7d + 3.416 3$	0.875 4
AB	$y = -0.024 3d + 1.684 3$	0.088 9	$y = -0.024 3d^2 + 0.254d + 1.151 6$	0.792 7
AC	$y = -0.061d + 2.511$	0.885 8	$y = -0.001 8d^2 - 0.040 7d + 2.471 9$	0.891 7
AD	$y = -0.020 4d + 2.217 5$	0.030 7	$y = -0.040 2d^2 + 0.441 5d + 1.330 1$	0.976 3
AE	$y = 0.040 4d + 1.527 2$	0.376 4	$y = 0.013 9d^2 - 0.119 1d + 1.834 5$	0.728 5

J、K、Y、Z、AA、AC、AD 断面使用抛物线拟合较好,  $R^2$  的值都超过了 0.85。也就是说,多数横断面上点的形变符合抛物线规律。

## 5 结 论

通过对黑龙江省内多条公路的竖向相对形变进行长期监测和数据分析,构建了多个用于描述路面形变及其特征的参数,分析了形变规律及不均匀特点,得出如下主要结论:

1) 路基从 11 月份进入冻胀,在 2—3 月份达到冻胀最大值,并稳定;3 月份进入融沉期,路面竖向相对形变产生回落;5—8 月份,基本稳定;此后,8—10 月份出现热胀,之后 11 月份又进入冻胀期,具有典型的周期特征。

2) 横断面平均竖向相对形变一般在 2.5 ~ 5 cm 之间,个别段落横断面的竖向相对形变量都超过了 10 cm;对于挖方段,最大竖向相对形变量达到 20 cm,平均最大变形差是填方段落的 3 倍左右。路

段间、断面间、点位之间的变形差异显著,形变量和形变速率、冻胀和融沉速率均存在显著差异。一般3—5月份融沉速率最大。对于挖方路段,融沉的不均匀性在6—8月份更加明显,融沉速率差异可达到74.8倍。

3)路肩侧产生冻胀、融沉现象相较于中央分隔带一侧更活跃,路面竖向相对形变最大值和最小值以及竖向差异形变最大值出现在路肩一侧的频率更高。相对于中央分隔带一侧,靠近路肩一侧行车道监测点位形变差异大,形变差异作用更频繁。

4)不同形变阶段的路表竖向形变差异及程度可用横断面间形变速率最大倍数描述和判断。而对于横断面竖向形变,其形变规律符合抛物线形状,可采用抛物线数值拟合和描述。

## 参考文献

- [1]秦大河,姚檀栋,丁永建,等. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京:中国气象出版社,2014:70  
QIN Dahe, YAO Tandong, DING Yongjian, et al. Cryosphere scientific dictionary[M]. Beijing: China Meteorological Publishing House, 2014: 70
- [2]冉有华,李新. 中国多年冻土制图:进展、挑战与机遇[J]. 地球科学进展,2019,34(10):1015  
RAN Youhua, LI Xin. Progress, challenges and opportunities of permafrost mapping in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(10): 1015
- [3]齐吉琳,马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学,2010,31(1):133  
QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(1): 133
- [4]冯德成,林波,张锋,等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(2):111  
FENG Decheng, LIN Bo, ZHANG Feng, et al. A review of freeze-thaw effects on soil geotechnical properties[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2017, 47(2): 111
- [5]RIVIÈRE A, JOST A, GONÇALVÈS J, et al. Pore water pressure evolution below a freezing front under saturated conditions: large-scale laboratory experiment and numerical investigation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 76
- [6]周洁,李泽垚,唐益群,等. 软黏土三维水-热-力耦合冻融模型及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(2):117  
ZHOU Jie, LI Zeyao, TANG Yiqun, et al. Three dimensional water thermal mechanical coupled freeze-thaw model and application of soft clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(2): 117
- [7]赵韬,张明义,路建国,等. 多年冻土区地表变形与影响因素相关性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):145  
ZHAO Tao, ZHANG Mingyi, LU Jianguo, et al. Correlation between ground surface deformation and influential factors in permafrost regions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 145
- [8]龙小勇,岑国平,蔡良才,等. 道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验及现场验证[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(3):172  
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Langcai, et al. Hydro-thermal coupling model test and field validation of uneven frost heave of pavement structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 172
- [9]刘晓强. 重载铁路细粒土填料冻胀变形及力学性质研究[D]. 北京:北京交通大学,2020  
LIU Xiaoqiang. Study on frost heave behavior and mechanical properties of fine grained filler in heavy haul railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020
- [10]覃星源. 基于神经网络融合模型的季冻区路基变形预测及路面附加效应分析[D]. 长春:吉林大学,2023  
QIN Xingyuan. Prediction of subgrade deformation based on neural network fusion model and pavement additional effect analysis in seasonal frozen area[D]. Changchun: Jilin University, 2023
- [11]李青龙. 川西高原季节性冻土路基冻胀特性及变形预测研究[D]. 成都:西南科技大学,2023  
LI Qinglong. Research on frost heave characteristics and deformation prediction of subgrade with seasonal frozen soil in western Sichuan Plateau[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2023
- [12]梁海军. 气候变暖条件下多年冻土区公路路基变形稳定研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018  
LIANG Haijun. Study on the deformation and stability of highway embankment in permafrost region under the condition of climate warming[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018
- [13]邵博文. 多年冻土区高速公路特殊路基结构变形机理及服务性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2018  
TAI Bowen. Research on deformation mechanism and service performance of special roadbed structures for highways in permafrost regions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018
- [14]汤涛. 基于融沉变形的青藏高原多年冻土区高速公路路面结构优化研究[D]. 南京:东南大学,2018  
TANG Tao. Research on optimization of highway pavement structure in permafrost regions of the qinghai tibet plateau based on thawing deformation[D]. Nanjing: Southeast University, 2018
- [15]程有坤. 季冻区粉质黏土路基变形监测技术及稳定性评价[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2021  
CHENG Youkun. Deformation monitoring technology and stability evaluation of silty clay subgrade in seasonally frozen areas[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021
- [16]吴会军. 基于精密光电三角高程的高铁路基冻胀监测[D]. 成都:西南交通大学,2016  
WU Huijun. Monitoring of high railway foundation frost heaving based on precise optoelectronic triangular elevation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016