

文章编号: 1674—8247(2024)04—00100—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 018

某高速铁路沿线天然场地季节冻胀特性监测与分析

江 凯 王茂靖 冯 涛 段光武

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:某高速铁路沿线季节性冻土大面积分布,本文依据地形地貌、土性成分及水文地质条件等特征,选定14处天然场地。通过冻融周期的监测,得到沿线地基土的冻结融化速率、最大季节冻深及地表变形量等重要数据。通过分析积雪场地及裸露场地的冻结融化过程与地表变形情况,结合气温、降水量、地表雪盖等因素,分析了高速铁路沿线季节性冻土的冻融特性。研究结果表明:(1)沿线有雪条件下天然场地最大冻结深度19~90 cm,平均值为45 cm;(2)沿线季节冻土冻结速率0.27~1.20 cm/d,融化速率普遍大于冻结速率,为0.28~1.92 cm/d;(3)积雪对保持土体温度、抑制土体冻结具有良好效果,能有效缩短冻结、融化时间,使最大冻结深度减小18%~24%;(4)冻胀量呈由西向东增大趋势,其变化规律和气候条件吻合。研究成果可为类似季节性冻土地区高速铁路设计及冻害防治提供借鉴。

关键词:高速铁路;季节冻土;冻胀特性;长期监测

中图分类号: TU44; U238 **文献标志码:** A

Monitoring and Analysis of Seasonal Frost Heave Characteristics of Natural Sites along a High-speed Railway

JIANG Kai WANG Maojing FENG Tao DUAN Guangwu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Seasonal frozen soil is widely distributed along a High-speed railway. This paper selects 14 natural sites based on their topographical features, soil composition, and hydrogeological conditions. Through continuous monitoring over complete freeze-thaw cycles, crucial data such as the freezing and thawing rates of the subgrade soil, maximum seasonal frost depth, and surface deformation along the route were obtained. By analyzing the freeze-thaw process and surface deformation in snow-covered and exposed sites, combined with factors like temperature, precipitation, and snow thickness, the freeze-thaw characteristics of seasonal frozen soil along the high-speed railway are summarized. The research findings indicate: (1) The maximum freezing depth of natural sites under the snow condition is 19~90 cm, with an average of 45 cm. (2) The freezing rate varies from 0.27 cm/d to 1.20 cm/d, while the thawing rate, generally higher than the freezing rate, ranges from 0.28 cm/d to 1.92 cm/d. (3) Snow cover effectively maintains soil temperature and inhibits soil freezing, significantly shortening the duration of the freezing and thawing processes, resulting in a reduction of the maximum freezing depth by 18% to 24%. (4) The frost heave exhibits an increasing trend from west to east, and its variation pattern aligns with climatic conditions. These research outcomes provide valuable insights for the design of high-

收稿日期: 2024-05-20

作者简介: 江凯(1981-),男,高级工程师。

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重大课题(2016G002-A); 中国中铁股份有限公司重大专项项目(2016-重大专项-01); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2015071)

引文格式: 江凯,王茂靖,冯涛,等. 某高速铁路沿线天然场地季节冻胀特性监测与分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 100-105.

JIANG Kai, WANG Maojing, FENG Tao, et al. Monitoring and Analysis of Seasonal Frost Heave Characteristics of Natural Sites along a High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 100-105.

speed railways and the prevention of frost damage in similar seasonal frozen soil regions.

Key words: high-speed railway; seasonal frozen soil; frost heave characteristics; long-term monitoring

土体冻胀,是指土中水分迁移、冻结和土颗粒相对位移上产生的土体体积不同程度的增大现象。土体冻胀对高速铁路建设的不利影响主要体现在路基变形和安全性降低。随着寒冷地区人类活动的增多,对工程建设中的冻土问题的研究逐渐兴起,其中冻胀机理及其影响因素的研究较为广泛,相关研究理论迅速获得认可并得到发展。

国内外学者从水分迁移出发,研究发现水分迁移能力是引起土体冻胀量变化的关键所在。由于水分迁移过程复杂,影响因素较多,直到现在仍没有一个完善的、可以定量分析的水分迁移理论。许多有关冻土的文献都论述到这个问题。综上所述,早期的土体冻胀理论和工程应用研究为铁路路基冻胀形成机理的研究和防治奠定了良好的理论基础,路基填料冻胀机理及其影响因素的研究为寒区高速铁路工程建设提供了科学依据^[1]。

某高速铁路干线设计速度 400 km/h,线路全长 771 km。铁路沿线位于平原中部,海拔高程 50~260 m,线路经过丘陵、低地等地貌单元。沿线广泛分布季节性冻土,主要工程地质为季节性冻土问题^[2-3]。因此,研究该地区天然场地季节性冻土冻胀特性,对工程的设计、施工及冻害防治具有借鉴和指导意义。

1 沿线气候条件

与季节性冻土工程特性相关的主要为气候及工程地质条件,其中工程地质条件包括地形地貌、地层岩性、水文地质条件。

沿线气候属温带大陆性湿润气候,区域内年平均气温为 3.0~5.0℃。1 月的月平均温度为 -6.0~-16.0℃。年度最低温度出现在 12—2 月,最低温度为 -42~-50℃。7 月的平均温度为 18.0~19.5℃,最高气温出现在 7—8 月(34~38℃)。无霜期持续时间为 130~150 昼夜。

区域年平均降水量为 500~650 mm。最大降水量出现在夏季(6—8 月)(90~100 mm/月),最小降水量出现在冬季(12—3 月)(40~50 mm/月)。年降水量 2/3 为雨水,1/3 为雪水。

稳定的积雪覆盖层一般在 11 月下旬和 12 月中下旬形成,冬季末(2—3 月)雪盖厚度达 30~60 cm,最大可达 1.5 m。一般在 4 月中旬积雪完全融化,个别年份可到 4 月末。

在不同地形及土性区域,季节性土体冻层的深度为 0.5~2.0 m^[4]。黏土质和砂质黏土土体季节性冻层的额定深度为 1.40~1.60 m,而砂质土体季节性冻层的额定深度为 1.65~1.95 m。

铁路沿线途经 5 个主要城市^[5],从西往东依次编号为 A~E。为了解沿线的气温变化情况,统计了这 5 个城市全年日最低温和日最高温的分布情况,如表 1 所示。

表 1 沿线城市全年负温持续时间统计表	
城市编号	负温持续时间/d
A	163
B	164
C	176
D	183
E	162

由表 1 可知,沿线负温天气时间极长,约占全年的 1/2,从城市 A 的 163 d 增加到城市 D 的 183 d,从西往东负温天数呈增加趋势,东部的寒冷气候更漫长(城市 E 除外)。

2 沿线工程地质条件

2.1 沿线主要地貌单元及地层岩性

该高速铁路沿线地势起伏较小,全线均在平原范围内经过,主要地貌组成为:丘陵、低地、河流流域丘陵^[6]。

沿线地表广泛被第四纪沉积物覆盖,主要为河流的冰川作用和冰碛形成的冰水(冰水和湖泊冰川)沉积物。较少有冲积、冲积-坡积、冰川冲积、湖泊和沼泽地质成因综合体。冰川时期,沉积岩和变质岩层中常形成冰砂黏土、鹅卵石、砾石沉积物。间冰期主要是湖泊-沼泽、冲积和冰水沉积——砂土、亚砂土,偶见砂质黏土和泥炭。第四纪地层厚 30~50 m。下伏基岩主要为石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪层和白垩纪地层。

2.2 水文地质条件

高速铁路沿线水系均属某河流域,主要水干线是其支流,春汛期水位高,夏季平水期水位低,间或出现降雨洪水,冬季枯水期水位稳定,持续时间长。河流主要补给水源是融雪水,通常在 11 月末冻结,4 月初解冻。冰封持续时间 130~150 d。

铁路沿线地下水主要为第四系孔隙水、基岩裂隙

水。第四系孔隙水赋存于各个时期沉积的覆土层中。基岩裂隙水一般较小,但下伏地层中含石膏等可溶膏岩类,从而形成大小众多的储水孔,水量较丰富,该层水多为咸水和硝卤水,且多具有硫酸盐侵蚀性。

3 天然场地冻胀特性现场监测

为研究该高速铁路沿线天然场地的地基土冻胀特性,结合不同地貌单元、场地微地貌等特点,选择了14个场地进行现场监测,主要监测地温、水分、变形及雪盖厚度等要素,并设置2处无雪条件测试。监测频率为1次/10 d。

4 冻土工程特性分析

监测工作从2016年10月开始,至2017年4月,通过整个寒季的监测数据分析场地地基土冻胀特性变化。

4.1 地下水位变化

监测前两个月,16个地下水位监测点中,除7个埋深超5 m的点外,其余9点中仅1点水位波动显著,其余均小幅上升。12月初至2月中旬水位稳定,随后至4月逐渐上升。冻结期地下水位的上升为土体冻胀提供充分的补水条件,成为引起土体更强冻胀的主导因素。

4.2 沿线季节冻深分布特征

(1)全年最大冻深(有雪条件)

根据本次观测资料,绘制沿线最大冻深分布曲线,如图1所示。由图1可知,沿线地层在寒季均有冻结,但最大冻结深度总体偏小,均小于1 m,大部分在50 cm以下,仅有8号、9号、10号三个场地(里程范围K 373 + 000 ~ K 470 + 000)的最大冻深超过50 cm。

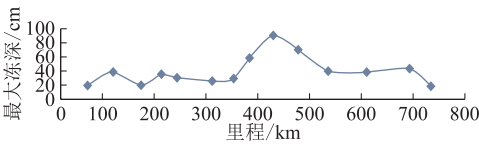


图1 沿线季节冻土最大冻深分布曲线图

(2)标准冻深(无雪条件)

根据相关规范,计算取得了14个场地的标准冻深(如表2所示),将其与现场实际测得的最大冻深比较,如图2所示。

由图2可知,14个场地的标准冻深普遍超过现场实测最大冻深,且差值远大于20 cm(考虑标准冻深是无雪条件影响)。标准冻深均超过50 cm,最大值为1.39 m。由此可以推断,2016—2017年大部分场地的最大冻深较往年偏低,沿线整体气候趋于变暖。

表2 各监测场地标准冻深表

对应里程	标准冻结深度/m	对应里程	标准冻结深度/m
K 53 + 400	0.82	K 373 + 000	1.09
K 103 + 350	1.05	K 420 + 150	0.78
K 158 + 500	0.92	K 470 + 000	0.75
K 199 + 050	0.61	K 529 + 300	0.65
K 229 + 800	1.39	K 605 + 500	0.93
K 300 + 000	0.74	K 690 + 500	0.73
K 342 + 500	1.21	K 732 + 600	0.81

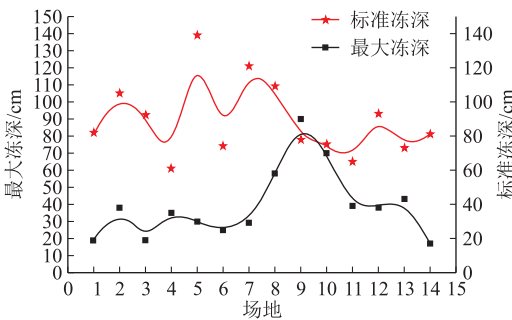


图2 沿线标准冻深实测冻深对比曲线图

为此,选取了地区A和地区B(如图3、图4所示)自1981年以来的气温资料进行分析,其年积温曲线整体处于增大趋势,这和前面标准冻深变化趋势的分析结果是一致的。

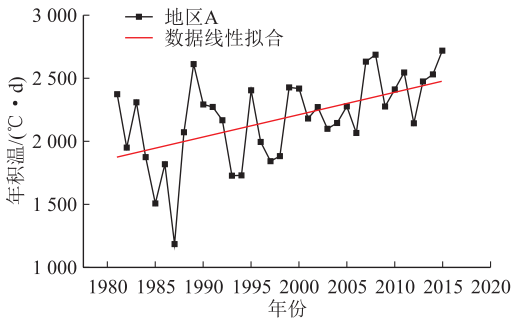


图3 地区A年积温曲线图

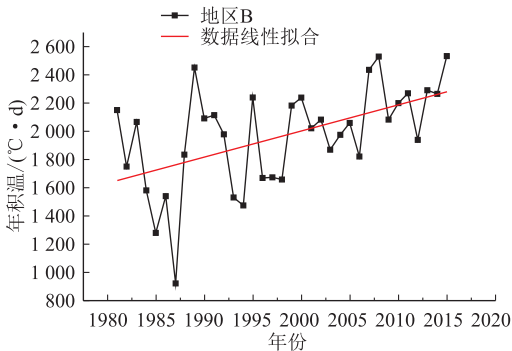


图4 地区B年积温曲线图

4.3 监测场地土体冻结融化情况

根据土体冻结深度和土壤温度的监测情况,对沿线各场地的冻结融化过程进行分析,天然场地土层开始冻结时间为11月下旬至12月初,所有场地均出现土体冻结,冻结深度不一,2月中旬达到最大冻深,冻结持续时间2~3个月。沿线冻结天数及冻结速率分布情况如图5所示。

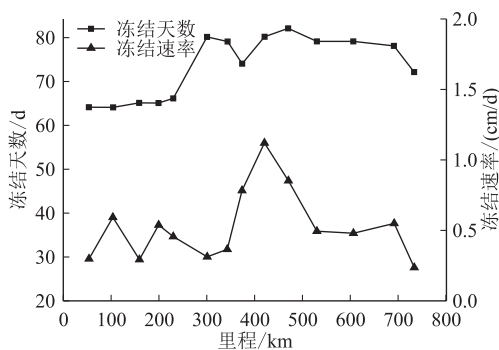


图5 沿线冻结时间及冻结速率分布曲线图

由图5可知,冻结天数在0~300 km范围内较为一致,约为65 d;K 300处冻结天数呈跳跃性增加到80 d,之后略有波动;K 300~K 770段为72~82 d。其中K 300~K 500段冻结速率较大,达到0.27~1.20 cm/d。

对各场地的融化过程进行分析,其开始融化时间为2月上旬,完全融化时间为3—4月,融化持续时间为1~2个月。融化天数及融化速率分布如图6所示。

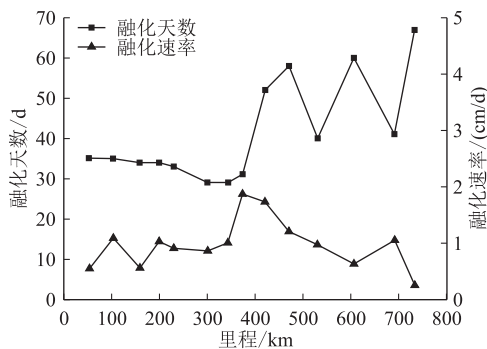


图6 沿线融化时间及融化速率分布曲线图

由图6可知,融化天数在0~400 km范围内较为一致,约为30~35 d,K 420处冻结天数呈跳跃性增加到52 d,之后在40~67 d范围内波动。

融化速率曲线则与冻结速率较为一致,K 300~K 500段融化速率较大,但其变化幅度较冻结速率小。而从整体来看,融化速率范围为0.28~1.92 cm/d,普遍高于冻结速率。

4.4 积雪对冻结深度的影响

为研究积雪对季节性冻土的影响,在14个场地中选取了两处进行了有雪和无雪条件的对比观测。

(1) 9号场地(K 420+150)

为确定积雪覆盖对地温的影响,选取地表以下0 m、0.2 m、1.0 m及1.5 m深度的地温变化情况进行对比分析。

9号场地有雪/无雪条件下不同深度温度曲线如图7所示,图中9-1为有雪场地,9-2为无雪场地。两种条件下的0℃曲线形态一致,但9-1场地的冻结起始时间晚于9-2场地,而融化结束时间略早于9-2场地,说明在积雪影响下整个冻结过程时间得到有效缩减,且9-1场地的最大冻结深度(90 cm)小于9-2场地(110 cm),积雪覆盖有效减小了最大冻结深度20 cm。

由图7可知,在地表0 m位置,两场地地温变化差异最大,且主要体现在负温(0℃)阶段,最大差值可达3℃,0~1.0 m范围表现出深度越大,地温差异越小的趋势。深度超过最大季节冻深以后(1.5 m),其变化差异基本可以忽略,说明积雪对土体的保温作用主要体现在土体冻结过程中。

(2) 13号场地(K 690+500)

为确定积雪覆盖对地温的影响,选取地表以下0 m、0.2 m、0.6 m及1.0 m深度的地温变化情况进行对比分析。

13号场地有雪/无雪条件下不同深度温度曲线如图8所示,13-1为有雪场地,13-2为无雪场地。两种条件下的0℃曲线形态一致,但13-1场地的冻结起始时间比13-2场地晚10 d,而融化结束时间比13-2场地早约15 d,说明积雪影响下整个冻结过程时间得到明显缩减。且最大冻结深度小于13-2场地。13-1场地最大冻结深度为43 cm,13-2场地最大冻结深度为57 cm,积雪的覆盖有效减小了最大冻结深度14 cm。

由图8可知,积雪季节在地表0 m位置,两场地的地温变化差异最大,且主要体现在负温(0℃)阶段,最大差值约达到3℃,0~0.6 m范围表现出深度越大,地温变化差异越小的趋势。当深度超过最大季节冻深(1.0 m)后,地温变化差异基本可以忽略,表明积雪在抑制土体冻结过程中具有积极作用。

综合两场地监测资料,可以看出积雪对保持土体温度、抑制土体冻结都具有良好的效果,能有效缩短冻结融化时间,使最大冻结深度减小18%~24%。

4.5 监测场地冻胀情况

该铁路线路近东西走向,其基本气候条件不受纬度的影响,从沿线气象指标分析中可以看出:其降水

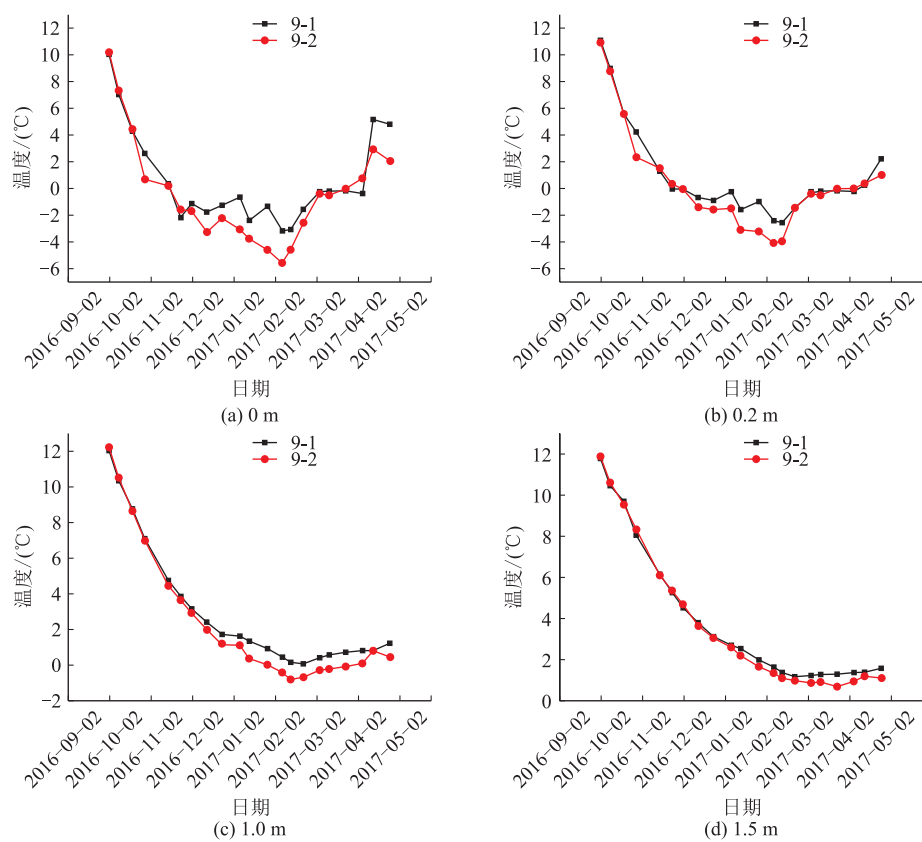


图 7 9 号场地有雪/无雪条件下不同深度温度曲线图

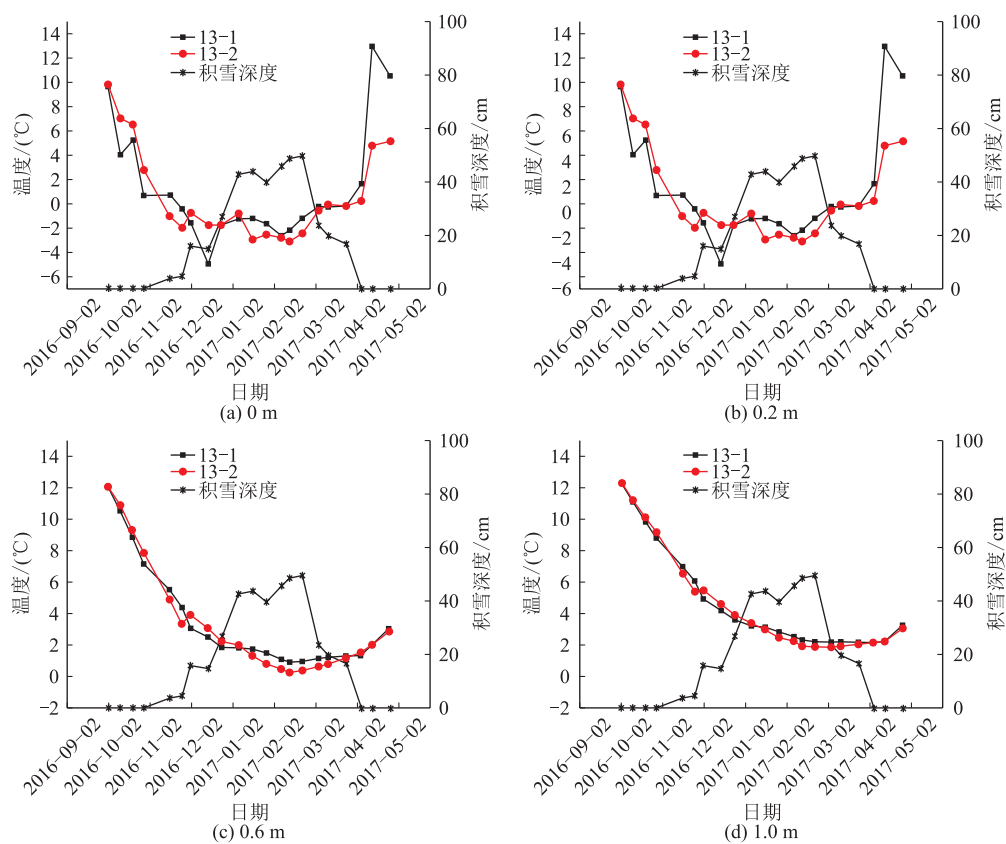


图 8 13 号场地有雪/无雪条件下不同深度温度曲线图

量及积雪厚度相差不大,年平均气温从东到西略有降低,即冻结指数由西向东略有增加。从土性条件来看,沿线地表表层大多以砂质黏土或亚砂土覆盖,土性差异不大,因此沿线场地的冻胀量主要受寒季年平均气温即冻结指数的影响。

从14个监测场地总冻胀量来看,前9个场地中除3号场地冻胀量为12 mm外,其余场地冻胀量均小于5 mm,后5个场地冻胀量较大,在8~16 mm之间,场地监测冻胀量呈由西向东增大趋势(如图9所示),其变化规律和气候条件较为吻合。

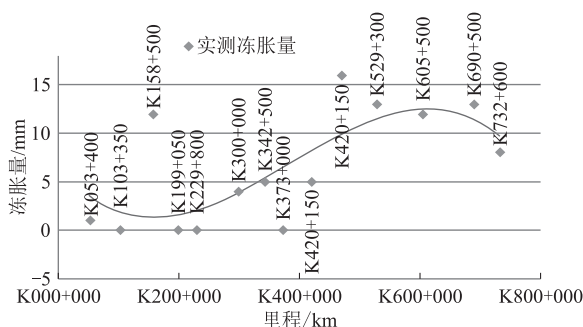


图9 某高铁沿线14个监测场地实测冻胀量变化图

5 结论

(1) 季节性冻土在某高速铁路沿线广泛分布,根据2016—2017年寒季实测资料,有雪条件下沿线最大冻结深度为19~90 cm,平均值为45 cm,其中8~10号场地最大冻结深度大于50 cm,其余场地小于50 cm,有雪条件下监测场地季节冻深普遍小于计算标准冻深值。

(2) 季节冻土开始冻结时间为11月下旬至12月初,2月中旬达到最大冻深,3月上旬至4月中旬完全融化。冻结速率0.27~1.20 cm/d,融化速率0.28~1.92 cm/d,融化速率普遍大于冻结速率。

(3) 积雪对保持土体温度、抑制土体冻结均具有良好效果,能有效缩短冻结、融化过程所需时间,使最大冻结深度减小18%~24%。

(4) 从总冻胀量来看,各天然场地冻胀量较小,前9个监测场地中除3号场地冻胀量为12 mm外,其余场地冻胀量均小于5 mm,后5个监测场地冻胀量较大,在8~16 mm之间,场地监测冻胀量呈由西向东增大趋势,其变化规律和气候条件较为吻合。

参考文献:

- [1] 张先军. 哈大高速铁路路基冻胀规律及影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(7): 8-12.
ZHANG Xianjun. Analysis of Frost Heave Laws in Subgrade on Haerbin-Dalian High-speed Railway and Its Influence Factors [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(7): 8-12.
- [2] 王茂靖,江凯. 莫斯科喀山高速铁路沿线主要工程地质问题及防治研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 37-43, 74.
WANG Maojing, JIANG Kai. Main Engineering Geological Problems along and Countermeasures for Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 37-43, 74.
- [3] 江凯,冯涛,王茂靖,等. 某高速铁路沿线季节冻土冻胀特性分析[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(5): 1-4.
JIANG Kai, FENG Tao, WANG Maojing, et al. Analysis on Frost Heave Characteristics of Seasonal Frost Soil along Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(5): 1-4.
- [4] 张东卿,薛元,罗强,等. 俄罗斯某高铁抗冻胀基床结构研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(4): 29-33.
ZHANG Dongqing, XUE Yuan, LUO Qiang, et al. Research on the Anti-Frost Subgrade Bed Structure of Moscow-Kazan High-speed Railway in Russia [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 29-33.
- [5] 刘大园,庞玲,姚力. 莫斯科至喀山高铁轨道设计综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(11): 126-127, 184.
LIU Dayuan, PANG Ling, YAO Li. The Track Design Summary of High-speed Railway from Moscow to Kazan [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(11): 126-127, 184.
- [6] 郭建勋,陈列,刘伟,等. 莫斯科至喀山高速铁路桥涵统一跨构通用图设计[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 50-56.
GUO Jianxun, CHEN Lie, LIU Wei, et al. Standard Drawing Design on Bridge and Culvert of Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 50-56.

(上接第44页)

- JIANG Alan, LI Ye. Driving Force Analysis of High-speed Railway Steel-box Tie-bar Arch-bridge Based on Ansys [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(3): 45-50.
- [11] TB 10091-2017. 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
TB 10091-2017. Code for Design on Steel Structure of Railway

Bridge [S].

- [12] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
ZHAO Shaobian. Anti-fatigue Design Manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.