

季节性冻土地区保温护道路基温度场数值模拟

岳祖润¹, 程佳²

(1. 石家庄铁道大学 研究生学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:研究路基及周围土体温度的分布规律是分析季节性冻土地区路基稳定性的重要基础,结合哈齐客专 DK221+150 断面 3 a 的现场监测数据,分析了天然地表及路基不同位置的地温分布规律;建立温度场的仿真模型,研究温度沿深度方向的变化规律;利用实测数据验证模型,分析保温护道高度对路基温度场的影响。现场监测和模拟计算结果表明:护道对路基的边坡下部和坡脚处影响较大,能够有效减小冻深,但对路基中心的温度场影响不大。

关键词:季节性冻土;数值模拟;温度分布规律;最大冻深

中图分类号:U213.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0025-05

0 引言

季节性冻土地地区的路基承受着周期性冻融循环作用,在这种作用下,造成路基下沉、翻浆冒泥等病害,给铁路的安全运行带来隐患。分析路基温度场随时间变化的过程,是治理季节性冻土区工程病害的关键,而现场监测和数值模拟是研究季节性冻土地地区地温变化规律的重要方法。

在冻土地地区修筑铁路路基打破了原地层的热量格局,填土蓄热及原有地层岩性、水分等工程性质的改变使得路基及周边地区地温场可能需要一段时间才能逐渐稳定^[1]。因此哈齐客专路基的地温分布规律需要在长期监测数据的基础上深入分析,提取符合实际的边界条件。

根据哈齐客专 3 a 的地温实测数据,分析了路基坡脚、天然位置及路基断面不同位置的地温分布规律。利用地温振幅公式确定基本边界条件,采用建立初始温度场的数学模型进行模拟计算,对比实测数据来验证模型的有效性,进而分析不同高度的保温护道对路基温度场的影响。

1 实测数据

1.1 现场监测

监测断面为哈齐客专 DK221+150 断面,土质主要为粉砂。路基宽度为 13.4 m,高度为 3.97 m。路基基床 0~0.55 m 为级配碎石,0.55~3.97 m 为非冻胀性 A、B 组填料,路基下设置混凝土板,保温护道高度为 3.42 m,宽度为 2 m。地基采用 CFG 桩进行加固,其桩长为 18 m,直径为 0.6 m,采用梅花形布置,间距为 1.0 m。

因左侧有既有线,天然测温孔仅在线路右侧布置,便于分析天然地基与路基填土的温度与冻深变化的差异性,其余测点关于路基中心线对称布置。据勘查资料可知,该地区最大冻深在 2.0 m~2.7 m 之间,因此设计的测温孔深度均为 3.6 m。热敏电阻在地表以下 0.6 m 范围内和预计最大冻深处的间距为 0.2 m,其它位置间距为 0.6 m^[2]。路基断面组成及测温孔布置如图 1 所示。

该监测断面 2012 年 4 月 1 日之前有预压土,温度监测系统测量频率为 1 次/d,采集自 2010 年 12 月 31 日至 2013 年 12 月 31 日的数据。

收稿日期:2015-04-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.03.05

作者简介:岳祖润(1962-),男,教授,主要从事铁道工程的研究。E-mail:yzr1898@qq.com

基金项目:铁道部重点课题(2014G003-F);国家自然科学基金(51178281);铁道部重大试验课题(Z2013-038-B);铁道部重大课题(2014G005)

岳祖润,程佳.季节性冻土地区保温护道路基温度场数值模拟[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3):25-29.

1.2 地温监测结果分析

2012 年 6 月 1 日~2013 年 6 月 1 日不同深度处地温曲线如图 2 所示。

(1) 冻融循环期地温变化情况。

土体的冻结温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过线性插值法可知:2012—2013 冻融循环期间,坡脚处最大冻深为 1.85 m,天然位置处为 2.48 m,土体各深度处的温度年变化近似呈现正弦状态。从图 2 和图 3 中可以看出,冻结深度区段内,地温随时间变化较剧烈,经历了冻融变化过程。冻深范围以外区域土体未经历冻融交替过程。

(2) 地温振幅公式及地温特征值计算。

地温振幅随深度按指数规律递减^[3]

$$A_z = A_s \exp\left[-z \sqrt{\frac{\pi}{a_u p}}\right] \quad (1)$$

式中, A_s 为地表处温度年变化幅值; z 为距离地表的深度,取绝对值; a_u 为忽略地球内部热流时土体的平均热扩散系数; p 为振动周期,可取为 365 d。

根据左坡脚、左路肩、路基中心处、右路肩、右坡脚、天然地表 6 处的实测数据,绘制各处地温振幅随深度变化规律,如图 4 所示。

由图 4 可知,距离地表面较近处,热量衰减较快,随着深度的增加衰减幅度变弱。坡脚处由于路基蓄热的影响,不同深度处地温平均值均大于天然位置相同深度处地温^[4]。

由实测数据及拟合函数可推得:地温年变化深度约为 10 m,年平均地温可取为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 温度场模拟及分析

合理的路基地温场数值模型是研究冻土区工程重要手段^[5]。通过现场监测数据及振幅公式,采用建立初始温度场的数值模型进行模拟计算,与现场监测数据对比验证模型的有效性,进而改变护道高度,探讨其保温效果。

2.1 几何模型

哈齐客专 DK221+150 断面是具有代表性的季节冻土区。计算中路堤高度取 3.97 m,路面顶面宽度为 13.4 m,边坡坡度取为 1:1.7,护道宽度为 2.0 m,高度为 3.42 m,护道边坡与路堤边坡坡度相同。路基可认为是无限延伸的,因此研究温度变化规律时,取其横断面以二维问题处理;计算范围为路堤坡脚各向外延伸 20 m;计算深度为天然地面下 10 m^[6]。

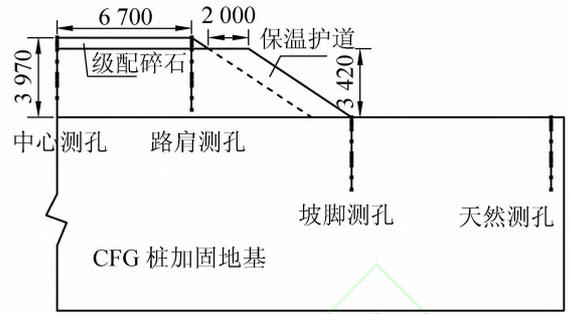


图 1 路基断面组成及测温孔布设(单位:mm)

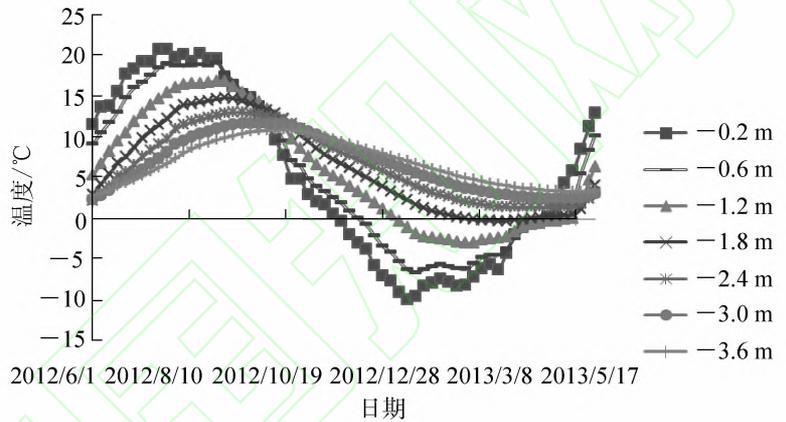


图 2 右侧坡脚

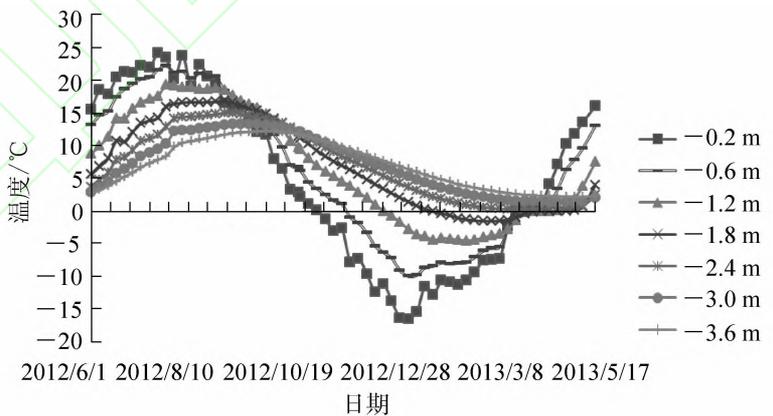


图 3 天然地表

2.2 边界条件及初始条件

采用大型有限元分析软件 ABAQUS 进行温度场数值模拟,模拟计算采用 structure 四边形单元对模型进行网格划分,单元长度全部采用 0.2 m。计算中时间单位为 d,实践证明既可节省计算资源,也可以较好地反映地表温度的变化。根据实际测试的频率,每天为一个荷载时间段,全年划分为 365 个时间段进行计算,计算精度 0.01 °C。材料特性中时间单位也统一取为 d。上边界采用现场监测数据,左右边界的温度分布因为与天然场地一维温度分布是完全相同的,可认为距路基足够远,不受路基热状态的影响,保持天然状态,即为绝热边界。下边界根据计算及实测值得,地面 10 m 以下温度基本保持稳定,为了合理模拟地表以下 10 m 深处微弱的热流效应且确保精度,下边界取随时间微弱变化的温度实测值 7 °C。根据现场监测资料及有关参考文献,得到模型中所需各层土热物理参数,其中各土层的密度与温度无关,如表 1 所示。

表 1 路基各土层的温度参数

温度/°C	A、B 组土			级配碎石			粉砂			钢筋混凝土			保温板		
	ρ_d	λ	C												
-20.0	2 185	120.95	0.78	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	0.94	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
-10.0	2 185	120.95	0.78	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	0.95	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
-5.0	2 185	120.95	0.79	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	0.96	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
-1.0	2 185	120.95	0.81	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	0.99	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
-0.5	2 185	120.95	0.83	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	1.01	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
-0.3	2 185	120.95	0.85	1 780	166.75	2.11	1 630	168.48	1.03	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
0.0	2 185	99.36	0.95	1 780	147.74	2.79	1 630	125.28	1.27	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25
30.0	2 185	99.36	0.95	1 780	147.74	2.79	1 630	125.28	1.27	2 400	112.92	0.96	30	2.592	1.25

注: ρ_d 为土体干密度,kg/m³; λ 为导热系数,kJ/(m·°C·d);C 为比热,kJ/(kg·°C)。

天然地基温度场的初始位置可以任意选择,根据现场实际情况及监测温度数据,选取 2012 年 6 月 1 号温度场作为初始温度场。

2.3 数值计算结果及分析

2.3.1 天然地面和路基温度场验证

采用 DK221+150 断面的实测温度与模型模拟值进行对比,以便检验模型参数的合理性和所建模型的可靠性。该段数据的起始位置取 2012 年 6 月 1 日。

为了使验证具有代表性,选取了 1 a 周期中的特征时刻进行对比。其中第 322 天(2013 年 4 月 22 日)在平均气温左右,第 52 天(2012 年 7 月 22 日)接近暖季最高温度天气,第 228 天(2013 年 1 月 18 日)接近寒季最低气温天气,第 300 天(2013 年 4 月 1 日)接近路基最大冻深天气。模型验证如图 5 和图 6 所示。

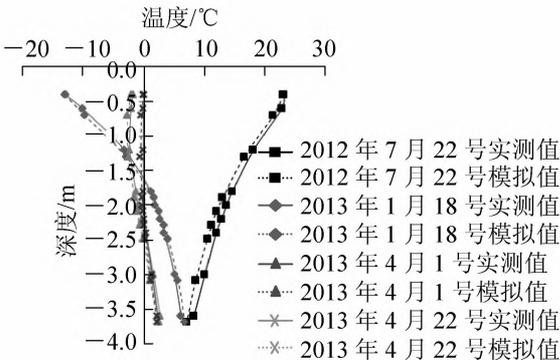


图 5 天然地表温度仿真验证

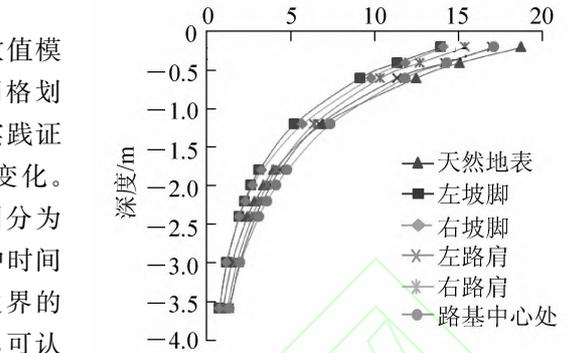


图 4 地温振幅

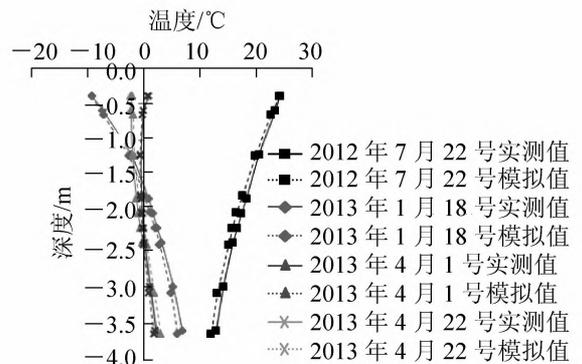


图 6 路基中心孔温度仿真验证

由图 5、图 6 可以看出,本项目所建模型与所选参数,能够很好地模拟天然地面以下冻土的温度瞬态分布。

2.3.2 保温护道地温分布规律

路堤温度场的计算模型采用 4 种工况:不设置保温护道(普通路基)、设置 3 种不同高度的保温护道。护道高度分别为 3.97 m(与路基同高),3.42 m(实际工况)和 1.985 m。观察不同工况下,对路基温度场的影响。如图 7 所示。

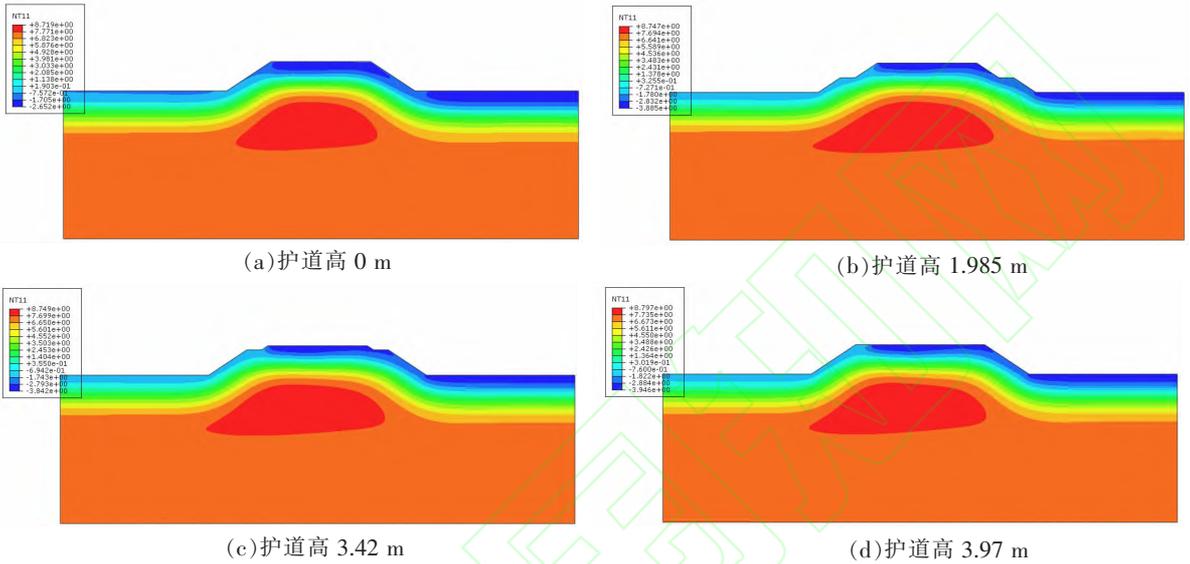


图 7 不同护道的温度场

不同护坡高度对路堤中心处温度场的影响见图 8。

由图 8 可知,对于路堤填筑后的同一日期,尽管保温护道的高度各不相同,路基中心处不同高度的温度分布几乎是相等的,基本不受保温护道高度的影响,即不设保温护道和设置 3.97 m 高的保温护道,对路基中心处影响不大。

由图 9~12 可以看出,保温护道对坡脚和路肩的温度影响较大。其中当护道高度与路基齐平时,保温护道对左右路肩的保温效果更明显,而同时路肩的稳定对于路基的冻胀起至关重要的作用。因此,在路基两侧设置保温护道是有益的。

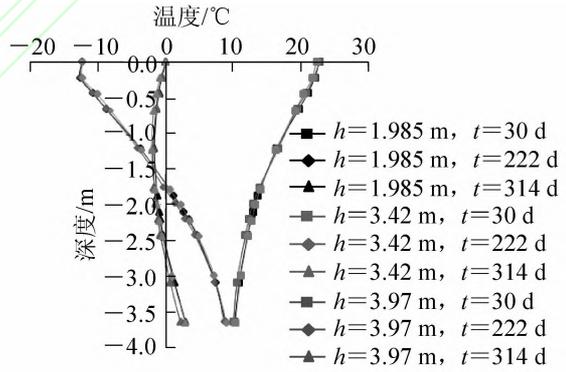


图 8 不同护道高度下路基中心处地温沿深度分布图

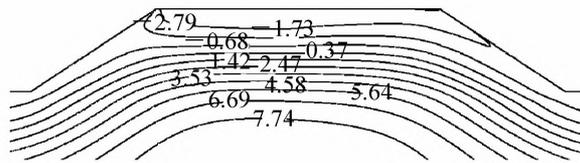


图 9 护道 0 m 第 300 天等温线

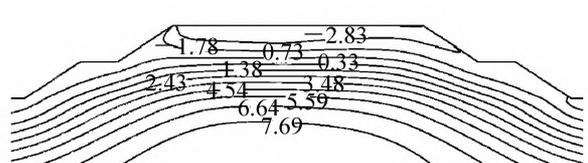


图 10 护道 1.985 m 第 300 天等温线

在图 13 中,从下到上依次为护道高度为 0 m、1.985 m、3.42 m 和 3.97 m 时的路基的最大冻深线,由此可看出,最大冻深在左右坡脚处均有明显的提升,但当护道高度为 3.97 m 时,最大冻深拾升值最大。即当护道与路基齐平时,对路基的保温效果最好。

此外,由图 13 不难看出,路基左右两侧的最大冻深不同,左侧要小于右侧,这也说明了阴阳坡的存在。

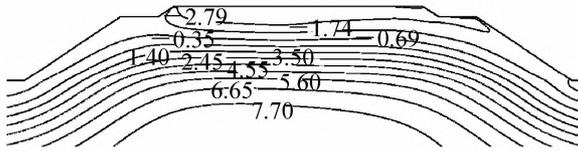


图 11 护道 3.42 m 第 300 天等温线

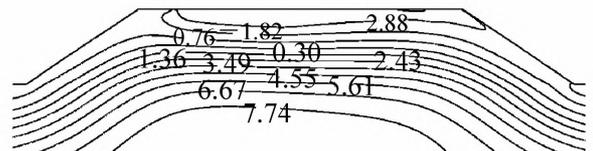


图 12 护道 3.97 m 第 300 天等温线

3 结论

(1) 路基不同处的地温近似呈现正弦状态,冻结区内土体经历冻融循环过程,温度变化剧烈,冻结区外土体不经历冻融过程,温度变化较平缓。

(2) 通过对不同护道高度的路基温度场进行数值分析,发现护道仅对路基的边坡下部和坡脚附近的温度场有影响,冻结层有所减薄,尤其当护道高度与路基同高时,左右坡脚的冻结层有明显减薄,即护道越高对左右坡脚的保温效果越好。

(3) 尽管保温护道的高度各不相同,但是路基中心处不同高度的温度分布几乎是相同的,即路基中心处基本不受保温护道高度的影响。



图 13 不同高度护道最大冻深对比曲线

参 考 文 献

- [1] 张玉芝,杜彦良,孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路基地温分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6): 1286-1296.
- [2] 马天鸽. 深季节冻土区铁路路基冻胀融沉试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
- [3] ANDERSLAND O B, LADANYI B. 冻土工程[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 汪双杰,陈建兵,黄晓明. 冻土路基护道地温特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):146-151.
- [6] 许健,牛富俊,牛永红,等. 季节冻土区保温路基设计参数[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(3):83-89.

A Numerical Simulation of Temperature Field of Insulating Berm Roadbed in Seasonally Frozen Regions

Yue Zurun¹, Cheng Jia²

(1. School of graduate, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of civil engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To analyze the road stability in seasonally frozen regions, it is important to research on the distribution law of temperature concerning the roadbed and its surrounding soil. Based on the monitoring data of DK221 + 150 section of Harbin-QiQihar passenger railway line in the past three years, this thesis first analyzes temperature distribution law of natural surface and roadbed in different positions. Secondly, a numerical model of unsteady temperature filed was established to study the distribution law of roadbed temperature as the depth vary. Further, the author studied on the influence of insulating berm on the roadbed temperature filed if the heights of insulating berm changes. As a conclusion, the berm of the slope protection and slope toe of subgrade has great influence, it can effectively reduce the depth of freezing, but has little effect on the temperature of the center of the subgrade.

Key words: seasonally frozen region; numerical simulation; distribution law of temperature; maximum frost line