

季冻区低填路基的水 ——热耦合分析

Hydro-thermal coupling analysis of low-fill subgrade

第海东¹ 许发荣¹ 吴谦² 黄万俊²

Haidong Di¹ Farong Xu¹ Qian Wu² Wanjun Huang²

1. 中交路桥建设有限公司 中国·北京 100027; 2. 长安大学 中国·陕西 西安 710064

1. Zhongjiao Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing, 100027, China;

2. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710064, China

摘要: 本文利用非饱和正冻土水热耦合模型,对冻结期国道 111 线一级公路在冻结期路基内部的水热场变化进行了数值分析,并借助水动力模型对其进行了冻胀量计算。与此同时本文还模拟了土工格栅和保温板布设在路基中的情况,研究了不同处置措施对于路基冻胀的影响。

Abstract: This paper uses an unsaturated frozen soil water-heat coupling model to numerically analyze the changes in the water and heat field inside the roadbed of National Highway 111 during the freezing period, and calculate the frost heave with the help of a hydrodynamic model. Calculation. At the same time, the paper also simulated the arrangement of geogrid and thermal insulation board in the roadbed, and studied the influence of different treatment measures on the frost heave of the roadbed.

关键词: 季节性冻土;低填路基;水热变化;冻胀;处治措施

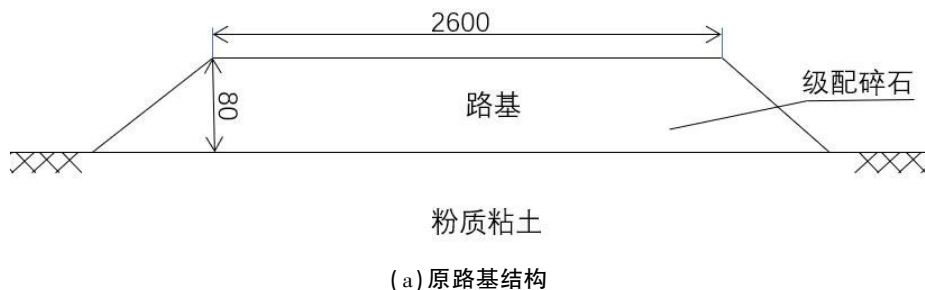
Keywords: Seasonal frozen soil; low-fill subgrade; hydrothermal coupling method; frost heave of the subgrade; treatment measures

DOI: 10.36012/etr.v2i10.2809

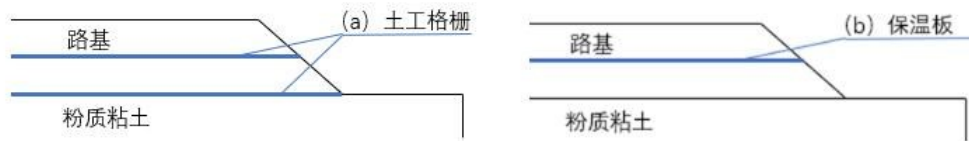
1 工程概况

国道 111 线尼尔基至腾克段一级公路位于东北地区,紧邻大兴安岭,属于高纬度地区。该区域热量不足,昼夜温差大,降水期多集中在 7-8 月。全年气温冬冷夏暖,温度较差大,大部分地区年平均气温在 0℃ 以下。另外,根据相关资料该路段冻结深度一般为 2.3-2.6m,且沿线地层多以粉质黏土为主。由于项目沿线以填方路基为主,且低填段分布范围

较广,而低填路基对于下覆土体的水热影响比较显著,因此本文主要考虑低填路基的水热变化,其典型横断面形式如图 1(a)所示。另外,为了为后期设计、施工提供依据,本文数值模型中引入铺设土工格栅和保温板两种措施对路基进行处治,并对采取措施与不采取施工况下路基内水-热-力三场的变化情况进行了数值模拟,两种措施对应路基结构分别如图 1(b)。



【作者简介】 第海东(1982~),男,甘肃庆阳人,汉族,硕士,高级工程师,从事建筑与土木工程研究。



(b) 采取措施后路基结构

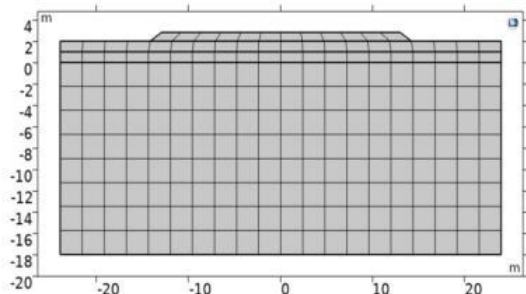
图 1 采取措施前后路基结构

2 数值模拟

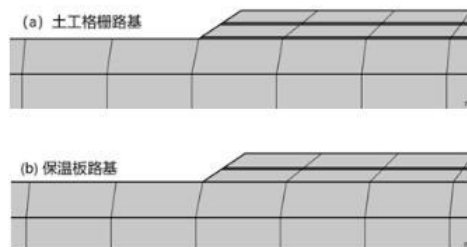
2.1 计算模型

以国道 111 线尼尔基至腾克段一级路为背景,选地区典型低填路段路基形式为模型(图 2(a)),应用 COMSOL Multiphysics 软件进行冻土路基水-热-力耦合计算。路基模型中路面宽度取 26m,路基高度取 0.8m,路基边坡坡率取 1:1.5。为保证计算结果的可靠性,模型应取在热扰动的影响范围之内,取路基两侧计算宽度为 11m,计算深度取天然地表

下 20m。因该段路路线为南北走向,故计算时不考虑阴阳坡效应。另外,在路基温度场模拟中,地表热边界基于“附面层原理”确定,即假设一定深度(附面层厚度)的土体温度函数等于大气日平均温度函数加上一个温度增量^[5],因此在构建模型时不考虑路面结构层。路基由碎石填筑,地基土主要由粉质粘土组成。铺设土工格栅和保温板后路基模型如图 2(b)。



(a) 原路基模型



(b) 采取措施后路基模型

图 2 采取措施前后路基模型

2.1.1 温度场边界条件

①温度上边界

研究该地区月平均气温与时间具备良好的正弦曲线关系,计算过程中路基顶面、路基边坡、路侧地表的温度边界由式(1)得到:

$$T(t) = T_0 - 23.5 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (1)$$

式中: T_0 为年平均气温,为月份,取 1,2,3……12。对于路基边坡和天然地面 T_0 取为 0.5°C ;路基顶面则取 2.5°C ;

②两侧边界条件

路基两侧为绝热边界。

③下边界条件

下边界受外界气候影响可忽略不计,其主要受深部地热影响,所以在模型下边界施加一个大小为 7°C 的温度边界。

2.1.2 水分场边界条件

①路基冻胀主要发生在冷季,而在冷季降雨量小,可忽略地表水的影响,因此路基顶部视为零通量。

②两侧没有水分补给,视为零通量。

③下边界为第一类边界条件,取底部含水率为 0.3。

2.1.3 变形场边界条件

两侧为辊轴支撑,底部视为固定约束,上边界视为自由边界。

2.1.4 初始条件

温度场初始值:首先在没有路基的情况下,求解 5 年后土体温度场,其中上部热边界条件按照式(1)选取,以此稳定后的温度场作为地基温度初始值。然后考虑路基修筑,初始路基土体温度为 5 年后地基表面年平均温度。

水分场:初始体积含水量见表 3.1。

应力场:应力场中初始位移、速度为零。

2.2 物理力学参数的选取

根据有关参考资料^[6-7],模型中土体热的物理参数见表 1。冻土的物理力学性质随着土体温度的不同而发生相应的变化,其弹性模量 E 、泊松比 ν 是温度的函数。不同温度冻土路基各土层所对应的力学参数^[8]见表 2。土体的水分扩散系数是土类、土壤湿度和土水势等因素的函数,其变化规律与土体渗透系数的变化规律相似,均随土体含水量的增大而增大^[9],冻土路基各土层水分扩散系数见表 3,在数值模拟中通过插值函数实现。结合当地地层资料,以及相关文献^[10]确定了土水特征曲线和渗流曲线中的相关参数,取值见表 4。

表 1 土体热物理参数

岩性	干密度 (kg/m ³)	体积含水量 (%)	导热系数(W/(m * K))		比热容(J/(kg * K))		变区
			λf	λu	Cf	Cu	
路基填土	1800	22	1.21	1.53	1445	1154	-0.6-0
粉质粘土	1600	25	1.06	1.42	1563	1262	-0.6-0

表 2 路基各土层力学参数

岩性	参数指标	温度						
		-20	-10	-5	-1	-0.5	0	20
路基填土	弹性模量 E/MPa	380.8	272	216.3	114	96	61	61
	泊松比 ν	0.21	0.28	0.315	0.343	0.347	0.35	0.35
粉质粘土	弹性模量 E/MPa	15	82.5	60.3	34	28.5	18	18
	泊松比 ν	0.24	0.32	0.36	0.392	0.396	0.4	0.4

表 3 土体水分扩散系数

路基土		粉质粘土	
含水量 θ(cm ³ /cm ³)	扩散系数 D(cm ² /s)	含水量 θ(cm ³ /cm ³)	扩散系数 D(cm ² /s)
0.11	3.44E-6	0.28	1.26E-4
0.13	9.35E-6	0.30	1.85E-4
0.15	2.20E-5	0.32	2.65E-4
0.17	4.66E-5	0.34	3.73E-4
0.19	9.07E-5	0.36	5.12E-4
0.21	1.65E-4	0.38	6.93E-4
0.23	2.85E-4	0.40	9.23E-4

表 4 非饱和土渗流模型

参数	a ₀	m	ν	θ _s	θ _r
粉质粘土	2.65	0.26	0.5	0.42	0.05
路基土	0.66	0.14	0.5	0.4	0

2.3 数值计算结果及分析

2.3.1 路基温度场分析

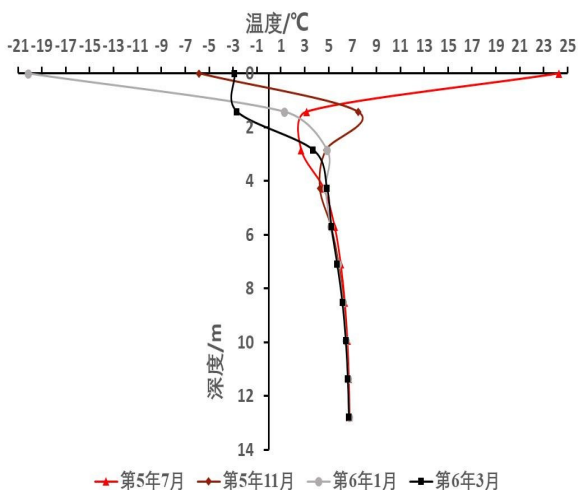


图 3 路基中线温度分布

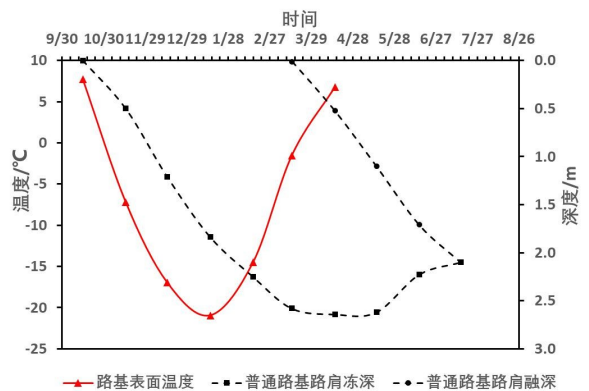


图 4 路表温度及路肩冻胀变化曲线

图 3 为路基不同时段温度随深度变化分布情况。路基温度场随着气温的变化而变化,其中路基顶部最高温出现在 7 月份(24.2℃),最低温出现在 1 月份(-20.3℃)。由附面层效应可知,由于沥青路面的吸热效应,路基顶面温度高于天然地表,因此在温度变化过程中,路基地部会形成一个高温区,而这个高温区会影响路基温度场的分布,从而影响到

路基变形场。图 3 表明,越靠近路基顶面,路基温度越容易受到大气的影 响。在 5m 以内,路基温度变化比较剧烈,且越靠近路基顶部,变化越显著。而 5m 以下,路基温度受气温的影响就比较弱,且随着深度的不断增大,温度随时间变化不断减弱,直至温度一致。

图 4 可以发现,进入冷季,路基和地基浅层土体开始冻结,随着外界气温的降低,冻结线由路基表面向下推移,3 月底达到季节最大冻结深度,约 2.6m(根据文献^[11],当地季节最大冻结深度在 2.3~2.8m 之间)。可以发现冻结深度的发

展与气温变化并不一致。当温度最低时,冻结深度并未达到最大值,且在气温回升过程中,冻结深度还在持续增加。这是因为温度的传递存在滞后性,表面温度传递到路基下部需要一个时间,因此当路基表面温度达到最低值时,冻结深度还未达到最大。

2.3.2 路基水分场分析

水分场的模拟主要目的是分析固态冰的分布规律和路基的冻胀变形。不同月份路肩处水分和含冰量随深度分布参见图 5。

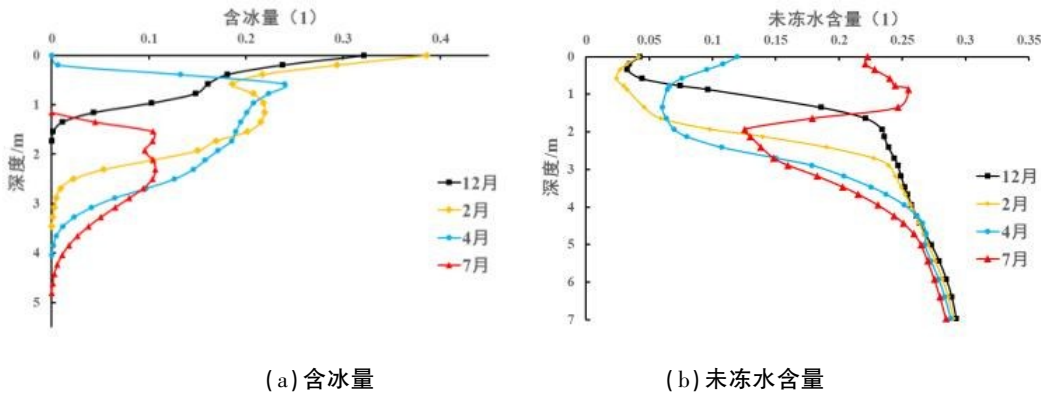


图 5 不同月份路肩处水分场随深度变化

根据模拟结果可知,冻结深度范围内有固态冰分布,冻结深度以下没有固态冰。随着气温的不断下降,冻结锋线也在不断下移,但到了四月,随着气温开始回暖,路基顶部开始解冻融化。从图 5(a)、(b) 可以看出,随着气温回暖,路基顶部固态冰全部融化,而且融化深度随着气温的上升而不断下降,路基上部的含冰量也从最冷季节的 37% 锐减到 0。

图 5(b) 是路基中未冻水含量随着气温的变化情况。路基未冻水含量变化主要发生在路基范围 5m 内,路基下部 5 米以外的未冻水含量基本未发生变化。而且可以发现,在冻结期,路基上部的未冻水含量含水率低于 5%。但随着气温上升,液态水开始积聚,未冻水含量达到 23%。这是因为,在冻结期末冻水转化成固态冰,从而导致未冻水含量降低。另外,从图中 5(a)、(b) 可以看到,在冻结期冻结锋面以下,未冻水含量也显著降低。这是因为水分在低温驱动下向冻结锋面移动,从而导致固态冰含量显著增大,而未冻水含量明显减小。

未冻水含量的变化跟含冰量变化紧密相关,而含冰量又与气温和未冻水含量相关。气温变为负温时,路基上部的未冻水开始冻结成冰,路基上部的含冰量开始增大,未冻水含量变小。从两幅图的对比来看,含冰量的增长与未冻水含量的减少一一对应。

综合来看,路基顶部以下 5 米范围内,水分场变化比较明显。而在 5 米范围以下,含水率随时间的变化较小。再结

合之前对温度场的分析,可以说明路基顶部以下 5 米内,路基的水热稳定性较差;而路基下部 5 米以外的水分场和温度场是比较稳定的。

2.3.3 路基变形场分析

目前,常见的冻胀模型有水动力模型、分凝势模型和刚性冰模型等^[12]。其中,水动力模型形式简单且计算方便,能够结合土体冻结过程中的水热场分布来计算土体冻胀变形。本文采用“水动力模型”来计算路基的冻胀量,即认为当粗颗粒土中的含冰量达到起始冻胀含冰量之后,粗颗粒土才会发生冻胀。结合 Taylor 的研究结论和现有文献的实验结果^[13-15],级配碎石的起始冻胀含冰量取 2.7%,粉质粘土的起始冻胀含冰量取 0.3%。模拟结果如图 6、图 7。

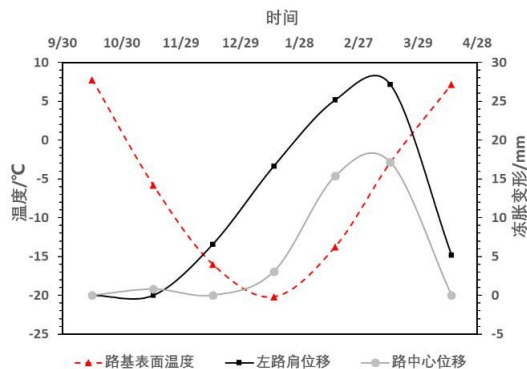


图 6 冻胀变形时程曲线与路基表面温度时程曲线

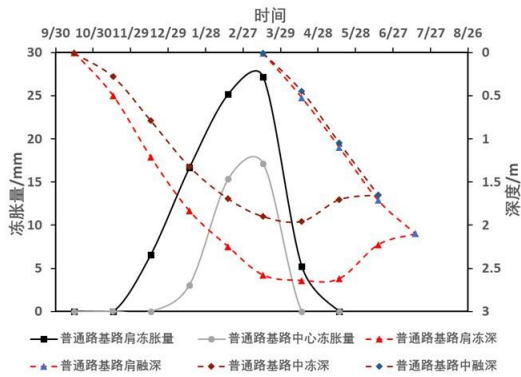


图7 冻胀变形时程曲线与冻胀发展时程曲线

由图6可以看出路基冻胀变形最大值出现在2月份末,而路基温度最低值出现在1月份中旬,这是因为路基中热传递存在滞后性。且路基表面最大冻胀变形出现在路肩处,冻胀量为27.15mm;而路中冻胀变形的最大值为17.17mm,比路肩冻胀量小约36%。根据图6,在气温处于负温阶段时,路基冻胀量一直在不断增长,直到气温上升到正温时冻胀量才开始下降。冻胀量的发展经历了先稳步增长后急剧下降的过程。图6是冻胀变形和冻结深度随时间变化的曲线,从图中7可知,路基最大冻结深度约为2.64m,出现在路肩处。而路中最大冻结深度为1.98m。路中和路肩冻结起始时间基本一致,但路肩全部融化所需的时间要比路中多一个月。路肩融化要到7月份,而路中全部融化只需到6月,这与冻结深度紧密关联。此外,冻胀量与冻结深度变化规律也基本一致,当冻结深度达到最大值时,对应的冻胀量也达到最大值。

综合温度场、水分场以及变形场,可以发现冻胀量与冻结深度相关,而冻结深度与温度有关。从前面温度场分析来看,路基中部温度由于附面层原因,其下部在进入冷季的时候会形成一个高温区,而路肩处则由于路基两侧温度低于路中温度,会造成冷量的积聚,因此路肩处冻结深度要显著大于路基中部,从而导致路肩冻胀量大于路中冻胀量。

2.3.4 采取工程措施后水热力计算结果

为了减小路基变形对于道路运行的影响,拟采取工程措施来减小路基冻胀量。防治冻土区路基冻胀的措施可从路基排水、改良土质、防冻层设计等多个环节采用冻胀防治技术。在季节冻土区,路基的冻胀量随着冻结深度的增加而增大。除了采取隔水防渗措施外,可从增加路基表面进入热量和减少路基内部热量扩散的角度出发来减小路基的冻结深度,从而控制路基的冻胀变形。

基于以上思路,本文模拟了两种控制路基冻结深度和冻胀变形的措施:(1)在路基中部和路基底部各铺设一层土工格栅(弹性模量E为 1.8×10^6 (MPa),泊松比为0.25);(2)在路基中部埋设5cm厚的保温板(导热系数为 $0.18W/(m \cdot ^\circ C)$):模拟所得的路基冻胀变形及冻结深度随时间变化见图8。路基采取措施和不采取措施后的冻胀变形控制效果见表5。

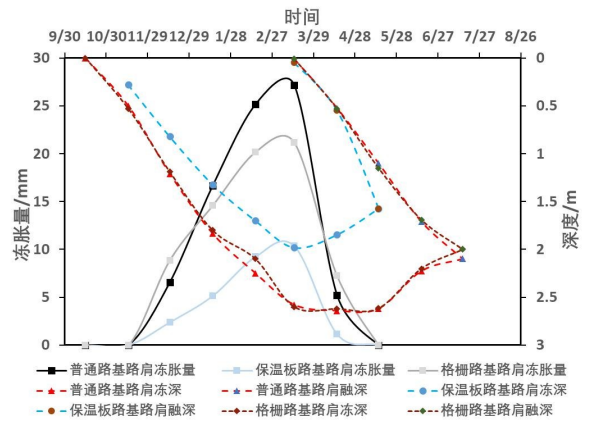


图8 冻胀量与冻结深度随时间变化曲线

表5 采取措施前后冻结深度及冻胀变形对比

路基形式	冻结深度(m)	最大冻胀量(mm)
普通路基	2.64	27.15
土工格栅路基	2.60	21.18
保温板路基	2	13.9

模拟结果表明,在路基中铺设土工格栅可以减小路基冻胀量,铺设土工格栅后最大冻胀量减小约5mm。但铺设土工格栅并未对路基冻深产生影响,路基最大冻深仍为2.6m。而在路中铺设一层5cm厚保温板,不仅路基冻胀量显著减小,而且路基最大冻结深度也相应变浅。与普通路基相比,铺设保温板后路基最大冻结深度为2m,比未采取措施减小了约23%,冻胀量为13.9,比未采取措施前减小52%。可以看到采取措施能够减小路基冻胀,而且铺设保温板比铺设土工格栅效果更加显著。

3 结论

本章借助Comsol数值计算软件,对国道111线尼尔基至腾克段一级路低填典型路基断面冻结期的温度场、水分场和冻胀变形进行了研究,得到以下结论:

①由于地温对大气温度的响应稍有滞后,路基在11月份进入冻结期,在1月份时路基表面温度降到最低,为-20.17℃。此后地温回升,但路基内部冻结范围还在进一步扩大,到3月份时,冻结范围达到最大,此时冻结深度为2.6m。

②进入冻结期后,路基各部位开始出现不同程度的冻胀变形;路面最大冻胀变形出现在2月末,较最低地温有1个月的滞后;整个冻结期路基表面最大冻胀变形都出现在路基边坡顶部,最大为26.15mm,而路中最大冻胀量为17.17mm。

③路基中铺设土工格栅和保温板都能减小路基冻胀,但铺设土工格栅对于路基最大冻结深度不会产生影响,而铺设保温板后除了冻胀量显著减小外,最大冻结深度也显著减小。

参考文献

[1] 田士军哈大高速铁路基用掺水泥级配碎石冻胀特性试验研究. 铁道建筑,2014(8):79-82.
 [2] 刘焕强,张敏,冯瑞玲. 客专铁路AB组填料冻胀性浅析. 铁道工程学报,2010(11):23-26.