

保温板在内蒙多年冻土区道路工程中的应用

张宝龙^{1,2}, 范文¹

(1. 长安大学地测学院, 陕西 西安 710064;

2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 根据博—牙高速沿线气象工程地质资料、观测资料、设计资料, 借助有限元软件构建了路基温度场数值计算模型, 着重对不同路基填筑高度条件下 XPS 板对温度场的影响进行了研究。研究发现: 路基填筑高度的增加和 XPS 保温板的应用对冻土都起到了积极的保护作用, 相同路堤填筑高度下, 道路运营到第 20 年时, XPS 保温板路基多年冻土温度比碎石路基降低了约 0.19 °C; XPS 保温板的存在使得冻土上限上移更加明显, 相同路基高度下, 冻土上限平均抬升量约为 1.23 m, 在规范规定年限内, XPS 保温板路基的冻土上限均位于换填碎石中; 但 XPS 保温板的存在加剧了阴阳坡效应的发展, 综合考虑, 在本段落若采用碎石路堤建议路堤高度应保持在 3 m 以上; 若采用 XPS 保温板路基, 建议路堤高度不超过 2 m。

关键词: 道路工程; 多年冻土; XPS 保温板; 数值模拟; 温度场

中图分类号: U418.5

文献标识码: A

APPLICATION OF INSULATION BOARD IN ROAD ENGINEERING IN PERMAFROST REGIONS OF INNER MONGOLIA

ZHANG Baolong^{1,2}, FAN Wen¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the meteorological engineering geological data, observation data and design data along the Bo-Ya expressway, a numerical calculation model of the roadbed temperature field was constructed by means of finite element software, and the influence of XPS insulation board on temperature field under different subgrade filling height was studied emphatically. The results show that, the increase of the subgrade height and the application of XPS insulation board both play a positive role in protecting permafrost. With the same embankment filling height, the temperature of permafrost of the subgrade with XPS insulation board reduces by about 0.19 °C than that of the subgrade with crushed rocks when the road runs to its twentieth years. XPS insulation board makes the upper limit of permafrost obviously raised, and the average uplift of the upper limit of permafrost is about 1.23 m under the same subgrade height. The upper limit of permafrost of subgrade with XPS insulation board is located in the replaced crushed rocks during the specified years of the designing code. However; the application of XPS insulation board aggravates the development of sunny-shady slope effect, the subgrade height with crushed rock should be kept above 3 m, and the subgrade height with XPS insulation board should be kept no more than 2 m.

Key words: road engineering; permafrost; XPS insulation board; numerical simulation; temperature field

0 引言

冻土是一种温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下,并含有冰的特殊岩土体,其性质与温度密切相关,在地球内、外热源的作用下形成、发展、退化或消亡。通常将冻结持续时间在2年及以上的冻土称为多年冻土。中国多年冻土分布面积约为 215 km^2 ,位列世界第三^[1]。多年冻土地区道路的修建不仅改变了地基中的应力分布状态,同时也改变了地基土原有的水热状态,季节融化层压缩变形、高温冻土层压缩变形以及多年冻土的融沉变形随之而来^[2]。从而使得多年冻土路基的融沉、不均匀沉降等病害频繁出现,增加了道路运营期的维修养护费用,且严重威胁着道路的运行安全。

针对上述情况,学者们进行了大量研究,各种冻土路基处置技术不断涌现。基于对路基进行隔热处理的思考,低导热性保温材料进入了学者们的视野^[3],当铺设聚苯乙烯泡沫塑料(Expanded Polystyrene, EPS)、挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(Extruded polystyrene, XPS)等一类保温层后,由于保温板的导热系数远小于路基土的导热系数^[4],保温层上、下将会形成较大温差,保温层下部土体温度的年振幅将持续降低,进而最高、最低温度包络线之间的范围将逐步缩减,在这种情况下,温度包络线与深度轴将相交于较高的位置,即多年冻土上限抬高^[5-7]。保温板冻土路基中的应用可追溯到上世纪50年代,挪威曾尝试在冻土路基中使用保温材料^[8];1969年,美国阿拉斯加多年冻土区的Kotzebue机场也借助保温板对机场跑道路基进行了隔热处理,处置效果明显,没有产生明显的冻胀或融沉^[9];70年代起,日本、前苏联、加拿大等国家也相继将EPS板作为路基保温材料,并通过长期观测发现保温板的存在能够保持冻土路基的热稳定性^[10];1976年保温板路基技术在中国青藏高原风火山多年冻土区的铁路路基试验工程中首次应用^[11],之后在青藏公路,214国道等线路多次应用,且取得了较好的效果,温智等人基于青藏公路昆仑山保温板路基的现场监测数据分析得出保温材料使进入路基活动层的热量每年减少约 $3/4$ ^[12],观测结果均表明保温板的存在很好的保护了冻土上限^[13]。

从已有文献来看,保温板路基隔热效果显著。

但其同样也存在局限,例如,保温板并不能很好的调节路基两侧边坡的温度,随着路基高度的增加,保温板的存在有可能会加剧阴阳坡效应的发展;另外在不同情况下其长期服役性能如何,也是需要去揭示的。因此,保温板路基的应用存在一个适用条件的问题,当然这都需要结合具体情况来分析。

鉴于此,文章依托博(克图)一牙(克石)高速公路工程项目,在现场调研的基础上,借助数值模拟手段,就保温板对路基温度场、冻土上限的调节作用进行分析,从而提出保温板路基的适用条件,旨在为内蒙多年冻土区公路建设提供参考。

1 工程概况

博(克图)一牙(克石)高速公路起点位于博克图镇腰梁子山隧道口,终点位于牙克石市301国道。它联系着中国东北各省区,是呼伦贝尔市修建的第一条高速公路,也将是中国东北地区及东北亚各国通往蒙古、俄罗斯和远东地区重要的国际通道。项目的修建将对地区经济发展起到积极的促进作用。

项目所属地区位于温带大陆性半湿润气候区,冬季寒冷漫长。受地形及植被影响,由南向北温度逐渐递减,年均气温 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月最冷,月平均气温 $-20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。构造上位于新华夏系大兴安岭隆起地带与松辽盆地西部隆起带。区内自老到新出露下古生界(Pz_1)、上古生界(Pz_2)和新生界(Kz)地层,岩浆岩广泛分布。项目所涉及冻土为多冰冻土,岛状,温度在 $-0.5\sim-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,多为不衔接性多年冻土,为古代冰川沉积残留物。研究路段位于该项目8标K198+000~K198+100段,地层柱状图如图1所示。

2 计算模型及参数

数值计算采用ANSYS软件的热分析模块进行,目前ANSYS软件已成为土木工程领域热分析问题的主流软件之一。现对文中模型的尺寸、参数及边界条件做详细介绍。

2.1 计算模型

根据设计资料,所研究路段路基宽 26 m ,坡脚向两侧各延伸 20 m ,边坡坡率 $1:1.5$,路线走向

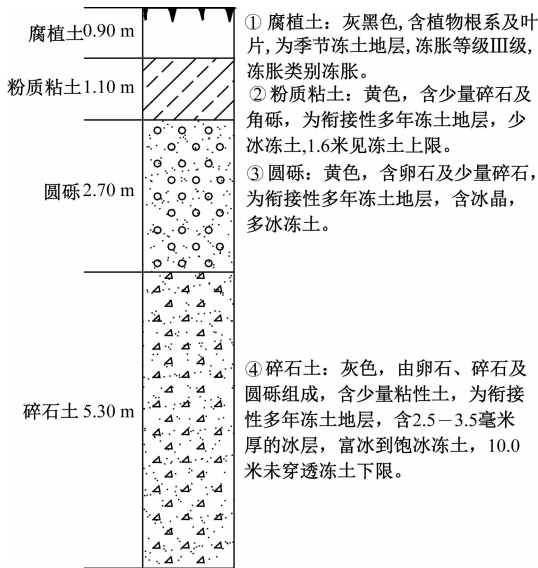


图1 K198+000点处地层柱状图

Fig. 1 Stratum histogram at K198 + 000 point

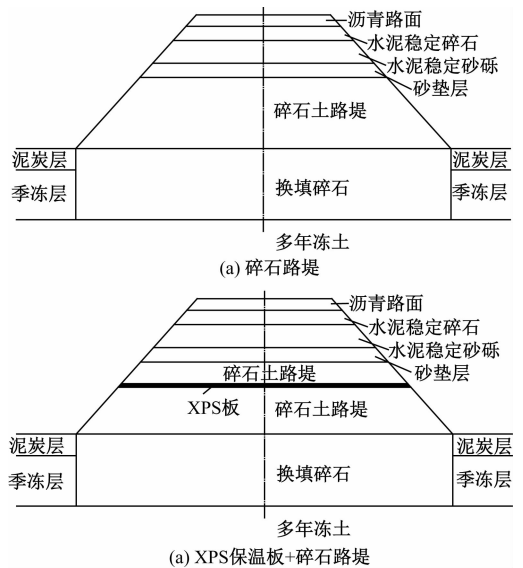


图2 路基路面结构

Fig. 2 Subgrade and pavement structure

为北偏西45°。该路段涉及两种路基结构: ①挖除0~3 m范围内土体, 换填碎石, 见图2a; ②挖除0~3 m范围内土体, 换填碎石, 并在路基顶面以下30 cm处铺设XPS保温板, 保温板厚度5 cm, 见图2b。

2.2 计算参数

参考冻土地区建筑地基基础设计规范^[14]和已有研究成果^[15], 计算模型中各材料层参数及各土层在不同温度、不同含水量条件下的焓值如表1、表2所示。

表1 材料热参数

Table 1 Thermal parameters of subgrade and pavement materials

结构层	密度 ρ / (kg/m^3)	融土比热 C_u / ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	冻土比热 C_f / ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	融土导热系数 λ_u / ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)	冻土导热系数 λ_f / ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)
沥青路面	2358	1680	1680	1.05	1.05
水稳碎石	2277	920	920	1.5	1.5
水稳砂砾	2233	920	920	2.04	2.04
砂垫层	1500	1010	1010	0.58	0.58
路堤碎石	1900	1730	1580	1.06	1.6
换填碎石	1900	1730	1580	1.06	1.6
XPS保温板	45	5346	5346	0.029	0.029
泥炭土	800	3814	2425	0.8	1.55
季冻土	1600	2208	1900	0.77	1.12
冻土	1900	1800	1600	0.93	1.16

表2 路基土焓值

Table 2 Enthalpy of subgrade soil

温度 / ($^\circ\text{C}$)		-10	-5	-2	-1	-0.5	0	15
泥炭土	$w_u/\%$	3	4.5	7.3	10.7	16.2	50	50
	$H/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	19.40	23.41	30.91	31.82	46.53	136.98	182.75
季冻土	$w_u/\%$	2.7	4.18	7.46	11.6	13.8	22	22
	$H/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	30.40	38.32	55.88	78.03	89.81	133.69	204.35
多年冻土	$w_u/\%$	0.29	0.45	0.78	1.19	1.82	10	10
	$H/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	30.4	39.28	45.99	49.93	54.31	101.53	132.46

2.3 边界条件

路基模型的上边界条件最为复杂, 受气温、太阳辐射、对流换热、蒸发耗热、积雪覆盖厚度

等因素影响。根据实际情况, 模型中边界条件做了如下简化: 气温、对流换热边界简化为周期性变化的温度边界; 太阳辐射、蒸发耗热边界简化

为热流密度边界; 积雪覆盖厚度依据区域实际情况而定。

(1) 温度边界

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

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

式中: T_0 为年平均气温, 根据实测数据, 取 $0.349\text{ }^\circ\text{C}$; S 为月平均气温振幅, 取 $43 \sim 45\text{ }^\circ\text{C}$; $g(t)$ 为气温上升速率, 取 $0.025\text{ }^\circ\text{C/a}$; t 为月份, 取 $1、2、3 \dots\dots 12$ 。

(2) 太阳辐射

根据气象学原理, 模型中以边界太阳净辐射量作为边界热流密度的输入参数^[16], 计算公式如式 (2) 所示:

$$B = Q \cdot \varepsilon(1 - A) - F \quad (2)$$

式中: B 为太阳净辐射量, $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$; Q 为太阳总辐射量, $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$; ε 为坡面系数; A 为反射率, %; F 为长波有效辐射量, $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ 。

当地每月太阳日辐射总量 Q 和长波有效辐射量 F 根据气象资料获得, 见表 3。

表 3 太阳日辐射总量和长波有效辐射量

Table 3 Total daily solar radiation and long wave effective radiation

月份	1	2	3	4	5	6
太阳日总辐射量 $Q/(\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d})$	4.17	7.17	13.67	16.67	19.5	20.83
有效辐射 $F/(\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d})$	2.67	3.33	4.17	3.00	3.00	3.00
月份	7	8	9	10	11	12
太阳日总辐射量 $Q/(\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d})$	19.5	17.0	10.93	6.67	3.67	2.83
有效辐射 $F/(\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d})$	2.83	3.00	2.67	2.67	2.33	1.53

对于太阳反射率, 沥青路面 $A = 0.13\%$; 路基边坡, 6—8 月 (夏季) $A = 0.23$, 11—1 月 (冬季) $A = 0.33$, 2~5 月 (春季)、9—10 月 (秋季) $A = 0.29$; 天然地表反射率 $A = 0.29$ 。

坡面系数是受到相同太阳辐射量水平面积与边坡面积之比, 与路线走向、边坡坡率以及太阳方位角、高度角有关。文中坡面系数计算结果如表 4 所示。

(3) 蒸发耗热

蒸发耗热按照式 (3) 计算:

表 4 坡面系数取值

Table 4 Slope coefficient

月份	北偏西	
	阳坡	阴坡
1	1.61	0.3
2	1.43	0.39
3	1.24	0.5
4	1.07	0.68
5	0.93	0.78
6	0.9	0.81
7	0.93	0.78
8	1.07	0.68
9	1.24	0.5
10	1.43	0.39
11	1.61	0.3
12	1.72	0.28

$$P = U \times G \quad (3)$$

式中, P 为蒸发耗热, J/d ; U 为土表面的蒸发量, mm/d ; G 为水的汽化潜热, J/mm 。

当土体含水量大于 12% 时, 土体表面蒸发量约为同等条件下纯水蒸发量的 $80\% \sim 90\%$, 此时可近似用水的蒸发量代替土体蒸发量。根据气象站观测资料, 博克石地区 1—12 月蒸发量如表 5 所示, 基于此, 便可计算各月的蒸发耗热及相应的热流密度, 计算过程中水的汽化潜热值 $G = 2260\text{ KJ/m}^3$ 。

表 5 博克石地区月蒸发量

Table 5 Monthly evaporation in Bokeshi

月份	1	2	3	4	5	6
蒸发量/mm	10.1	22.6	60.0	145.8	246.2	184.7
月份	7	8	9	10	11	12
蒸发量/mm	166.6	130.6	117.4	73.7	24.5	9.3

(4) 积雪厚度上边界条件

积雪在冬季具有隔热保温作用, 阻止地面散热, 从而致使地温升高。研究区在每年 11 月至次年 2 月地表存在积雪, 厚度约 10 cm 左右。模型中取积雪厚度为 10 cm , 积雪密度为 125 kg/m^3 , 导热系数为 $0.09\text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, 比热容为 $2100\text{ KJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。

(5) 两侧边界条件

路基两侧为绝热边界, 左右边界分别位于坡脚以外 10 m 。

(6) 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 0.06 W/m^2 的热流密度^[17]。

3 XPS 保温板应用效果

3.1 路基温度场模拟结果

由于全线路基高度一般为 0 ~ 4 m，所以模型中取路基高度分别为 1 m、2 m、3 m、4 m。此处挖除 3 m 深度范围内冻土换填碎石后，对铺设和不铺设 XPS 保温板两种工况下，碎石路基内部温度场、冻土上限进行瞬态对比分析。

一般情况下，冻土层温度变化会滞后于外界气温变化，所以冻土层的最大融化深度往往出现在每年 9 月份。两种工况下道路运营第 20 年 9 月份路基温度场分布情况如图 3 所示。总体来看，路基填筑高度的增加和 XPS 保温板的应用对冻土都起到了积极的保护作用，冻土上限在整体上移。但由于路线走向的原因，随着路基填筑高度的增加，地温分布在阴、阳坡出现了较大差异，从而会增加路面纵向裂缝，不均匀沉降等病害的出现概率。

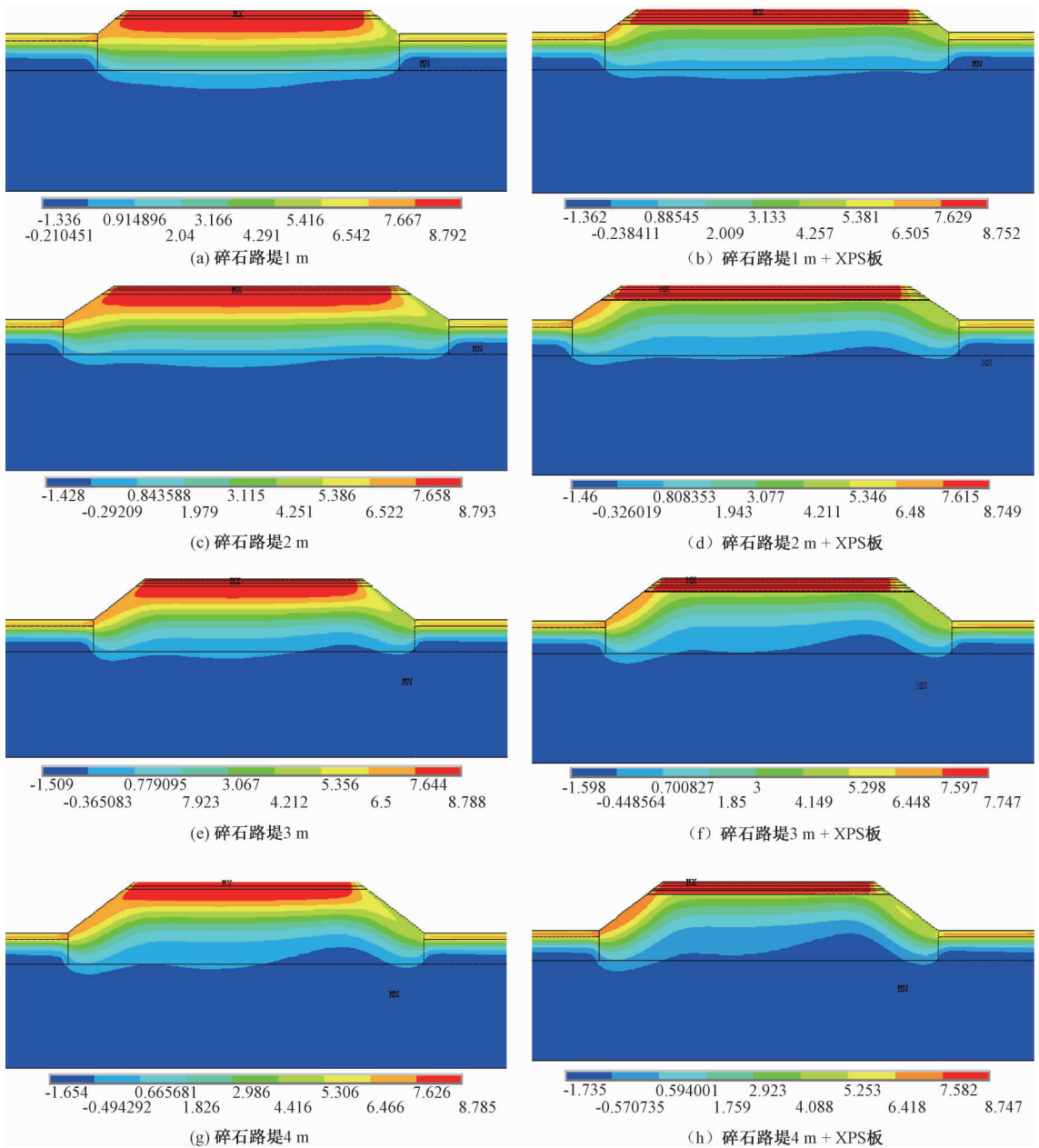


图 3 不同路基高度情况下温度场分布

Fig. 3 Distribution of temperature fields with different subgrade heights

3.2 路中温度场分析

高填路基可增加路基的热阻, 随着路堤高度的增加, 多年冻土的温度随之降低。1 m 和 3 m 路堤填筑高度时道路中心竖直剖面不同年份9月份的温度分布如图4所示, 可以看出在道路运营10年后, 温度分布基本稳定。结合表6综合来看, 在第一年, 路基高度每增加1 m, 多年冻土层温度仅降低0.02~0.04℃; 第五年以后, 路基高度每增加1 m, 冻土层温度降低0.06~0.08℃左右。说明高填路堤对保护冻土是有利的, 但是冻土温度降低并不明显。

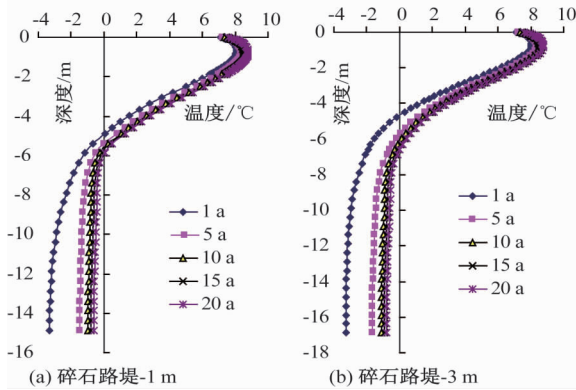


图4 不同高度碎石路堤路中温度剖面

Fig.4 Temperature profile for crushed rock subgrade with different heights

表6 不同高度碎石路堤多年冻土温度

Table 6 Permafrost temperature for crushed rock subgrade with different heights

多年冻土温度/℃	1a	5a	10a	15a	20a
碎石路堤-1 m	-3.05	-1.38	-0.91	-0.71	-0.55
碎石路堤-2 m	-3.07	-1.46	-0.96	-0.78	-0.63
碎石路堤-3 m	-3.11	-1.54	-1.02	-0.84	-0.70
碎石路堤-4 m	-3.13	-1.61	-1.09	-0.89	-0.76

而当加铺 XPS 保温板后, 对热量的阻隔效果就很明显了, 道路中心竖直剖面不同年份9月份的温度分布(以3 m路基高度为例)见图5。虽然铺设 XPS 板后, 路基高度每增加1 m, 冻土温度降低幅度与不铺设时相当(见表7), 但是在保温板上下界面存在4℃左右的温差, 这就导致很大一部分热量被阻隔。当道路运营到第20年时, 相同路堤填筑高度下, 铺设 XPS 板比未铺 XPS 板的冻土温度降低了约0.19℃。

3.3 多年冻土上限分析

同样取路中剖面, 对两种路堤结构各种路基高度的多年冻土上限进行分析。冻土上限随路基

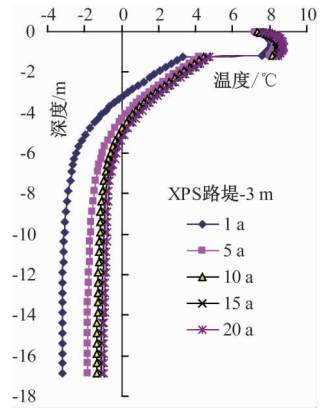


图5 3 m高XPS碎石路堤路中温度剖面

Fig.5 Temperature profile for 3 m-high crushed rock subgrade with XPS insulation board

填筑高度和时间的变化趋势如图6所示。

表7 不同高度 XPS 保温板路基多年冻土温度

Table 7 Permafrost temperature for subgrade with XPS insulation board with different heights

多年冻土温度/℃	1a	5a	10a	15a	20a
XPS 路堤-1 m	-3.10	-1.61	-1.07	-0.88	-0.73
XPS 路堤-2 m	-3.13	-1.69	-1.16	-0.94	-0.81
XPS 路堤-3 m	-3.14	-1.76	-1.25	-1.00	-0.87
XPS 路堤-4 m	-3.13	-1.82	-1.33	-1.06	-0.93

可以发现, 随着路基高度增加, 阻隔热量的同时, 多年冻土上限上移。碎石路堤高度每增加1 m, 冻土上限上移0.74~1.09 m, 平均上移0.85 m; XPS 路基高度增加1 m, 冻土上限上移0.93~1.03 m, 平均上移0.98 m。说明提高路基高度可明显抬升多年冻土上限, 相对而言, XPS 路堤对冻土上限的抬升效果比碎石路堤更为显著。路基高度相同时, XPS 路堤冻土上限较碎石路堤抬升了约1.08~1.50 m, 随着时间推移, 二者差值逐渐减小, 平均约为1.23 m。

根据路基设计方案, 1 m 填筑高度的碎石路基, 冻土上限始终位于多年冻土层中; 与此同时2 m填筑高度的碎石路基在运营至第5年后冻土上限也下降至多年冻土层中。所以为了保证路基的强度和稳定性, 建议研究路段的碎石路基高度应大于3 m, 以保证冻土上限位于碎石层中, 而1~2 m高的碎石路基不建议使用。

对于 XPS 保温板路堤, 仅路堤高度为1 m 时, 第20年冻土上限位于多年冻土中, 不过国内沥青混凝土路面设计年限一般为15年, 在15年内冻土上限基本位于换填碎石层中, 而当路基高度在2~

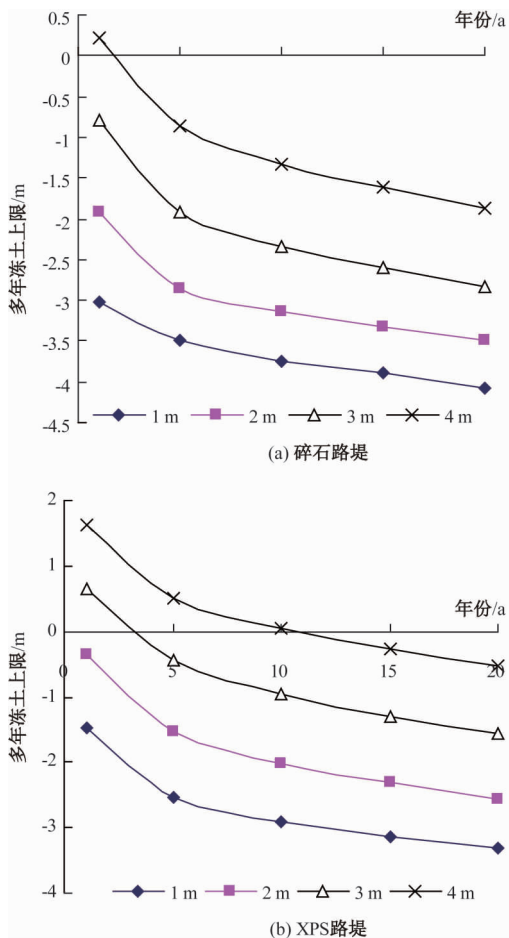


图6 不同路基高度下多年冻土上限变化过程

Fig. 6 The variation process of permafrost upper limit under different subgrade heights

4 m 时, 冻土上限均位于换填碎石层。即路基高度 1~4 m 的 XPS 路堤在设计使用期限内, 多年冻土上限均位于碎石层中。

4 路基形式建议

根据以上研究成果, 针对该路段, 对路基形式建议如下:

(1) 在该路段若采用上文图 2a 的碎石路堤形式, 建议路基高度应大于 3 m, 以保证冻土上限位于碎石层中, 而 1~2 m 高的碎石路基不建议使用。同时也要注意路基的临界高度, 较高的路堤虽然有助于冻土上限上升, 确保路基稳定。但过高的填筑高度反而有害无益: 首先, 高填路堤蓄热量大, 路基内会存在融土核; 其次, 同时高填路堤自重重大, 会使融沉变形增加; 最后, 过高的填筑高度会使得阴阳坡效应愈发明显。

(2) XPS 板的存在虽然能够降低路面上边界处气温对路基的影响, 但其无法调节两侧边坡处太阳辐射和气温对路基的影响。所以问题也随之而来: ①随着路基填筑高度的增加, XPS 保温板路基两侧出现较大温差, 阴阳坡效应愈发明显。②路基高度到 2 m 时, 阴阳坡效应就已有体现; 而当路基高度达到 3 m、4 m 时, 阴阳坡效应已经呈现的十分明显。综合考虑阴阳坡效应以及冻土上限的上移趋势, 该路段若采用上文图 2b 的 XPS 保温板路基形式, 路基高度应控制在 1~2 m 范围, 以保证路基的强度和稳定性。

5 结论

(1) 根据博一牙高速公路沿线太阳辐射、气温、蒸发、积雪、路线走向、边坡坡度等实际情况确定了边界条件, 并结合实际路基结构建立了路基温度场计算模型, 在方法上是合理的。分析了不同路基高度和 XPS 板存在情况下路基温度场的分布特征和瞬态变化特征, 研究结果可信。

(2) 提高路基填筑高度有利于保护冻土层, 但是冻土温度降低并不明显。加铺 XPS 保温板后, 对热量的阻隔效果比较明显, 相同路堤填筑高度下, 铺设 XPS 板比未铺 XPS 板的冻土温度有明显降低。

(3) 使用 XPS 保温板后冻土上限较单纯的碎石路基有明显上移, 但其缺点也随填筑高度的增加逐渐显现。在研究路段若采用碎石路堤, 建议路堤高度应保持在 3 m 以上; 若采用 XPS 保温板路基, 建议路堤高度不超过 2 m。

(4) 研究中按照原设计对保温板的位置、厚度以及路基换填深度进行了限定。进一步研究中尝试寻求保温板埋设位置、厚度与换填深度的最佳组合, 提出适用于研究区更合理的路基结构。

参考文献/References

- [1] 宇德忠, 程培峰, 季成, 等. 岛状多年冻土地区桥梁桩基回冻后承载力的静载与动测对比试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (S1): 2845~2853.
YU Dezhong, CHENG Peifeng, JI Chen, et al. Static and dynamic contrast test for bearing capacity of refrozen bridge pile foundation in patchy permafrost regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1): 2845~2853. (in Chinese with English abstract)

- [2] 孙志忠, 马巍, 党海明, 等. 青藏铁路多年冻土区路基变形特征及其来源 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (9): 2667 ~ 2671.
SUN Zhizhong, MA Wei, DANG Haiming, et al. Characteristics and causes of embankment deformation for Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (9): 2267 ~ 2671. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄仁达, 李丽, 吴会军, 等. 夏热冬冷地区不同墙体结构的保温层厚度分析 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (6): 1829 ~ 1835.
HUANG Renda, LI Li, WU Huijun, et al. Analysis on thermal insulation thickness of different wall structures in hot summer and cold winter zone [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (6): 1829 ~ 1835. (in Chinese with English abstract)
- [4] 盛煜, 张鲁新, 杨成松, 等. 保温处理措施在多年冻土区道路工程中的应用 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (5): 618 ~ 622.
SHENG Yu, ZHANG Luxin, YANG Chengsong, et al. Application of thermal-insulation treatment to roadway engineering in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (5): 618 ~ 622. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. Evaluation of EPS application to embankment of Qinghai-Tibetan railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41 (3): 235 ~ 247.
- [6] Tai B W, Liu J K, Fang J H, et al. Calculation model of permafrost table of XPS insulated board subgrade in warm permafrost regions [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37 (4): 1 ~ 11.
- [7] 董元宏, 朱东鹏, 张会建, 等. 应用于冻土路基的XPS保温板力学性能 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (12): 64 ~ 68.
DONG Yuanhong, ZHU Dongpeng, ZHANG Huijian, et al. Mechanical properties of XPS thermal insulation board applied in permafrost embankment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (12): 64 ~ 68. (in Chinese with English abstract)
- [8] Johansen N I, Lynch D F, Sengupta M. Notes on Norwegian arctic road construction techniques [J]. Northern Engineer, 1988, 20 (1): 26 ~ 29.
- [9] Li D Q, Wu Z W, Fang J H, et al. Heat stability analysis of embankment on the degrading permafrost district in the East of the Tibetan Plateau, China [J]. Cold Regions Science and Technology, 1998, 28 (3): 183 ~ 188.
- [10] 盛煜, 温智, 马巍. 青藏铁路北麓河试验段路基保温材料处理措施初步分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (S2): 2659 ~ 2663.
SHENG Yu, WEN Zhi, MA Wei. Preliminary analysis on insulation treatment of embankment at Beiluhe test section of Qinghai-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (S2): 2659 ~ 2663. (in Chinese with English abstract)
- [11] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 保温法保护多年冻土的长期效果分析 [J]. 冰川冻土, 2006, 28 (5): 760 ~ 765.
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Long-term effect of insulation on permafrost on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (5): 760 ~ 765. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邵博文, 刘建坤, 房建宏, 等. 高温冻土区高速公路特殊结构路基地温分布特征及降温效果分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (S1): 3696 ~ 3704.
TAI Bowen, LIU Jiankun, FANG Jianhong, et al. Analysis on distribution characteristics of ground temperature and cooling effect of special-structured subgrade of the expressway in warm permafrost region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (S1): 3696 ~ 3704.
- [13] Liu J K, Tian Y H. Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost [J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35 (1): 1 ~ 13.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ118 ~ 2011 冻土地地区建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
People's Republic of China Ministry of Housing and Urban Rural Development. JGJ118 ~ 2011 Code for design of soil and foundation of buildings in frozen soil region [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Permafrost physics [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 季国良, 时兴和, 高务祥. 藏北高原地面加热场的变化及其对气候的影响 [J]. 高原气象, 2001, 20 (3): 239 ~ 244.
JI Guoliang, SHI Xinghe, GAO Wuxiang. The variation of surface heating field over northern Qinghai-Tibet Plateau and its effect on climate [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20 (3): 239 ~ 244. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李双洋, 张明义, 张淑娟, 等. 列车荷载下青藏铁路冻土路基动力响应分析 [J]. 冰川冻土, 2008, 30 (5): 860 ~ 867.
LI Shuangyang, ZHANG Mingyi, ZHANG Shujuan, et al. Analysis of the dynamic response of Qinghai-Tibetan railway embankment in permafrost regions under train load [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30 (5): 860 ~ 867. (in Chinese with English abstract)