

文章编号:1674-2974(2016)11-0095-08

## 青藏高速公路路基降温措施有效性模拟分析\*

汤涛, 马涛<sup>†</sup>, 黄晓明, 王颢奇, 程永振

(东南大学交通学院, 江苏南京 210096)

**摘要:**为了评价已有的冻土路基工程技术对青藏高原多年冻土区高等级公路宽幅路基的适用性,运用ABAQUS有限元软件及其二次开发平台,建立了多年冻土地区宽幅路基温度场有限元分析模型,并运用该模型对普通路基、碎石路基、EPS隔热层路基以及隔热层-碎石复合路基温度场进行对比分析,对4种宽幅路基融深变化规律进行研究。结果表明,不同降温措施条件下路基温度随时间均呈周期变化,但每年平均温度总体上升,且相同的时间和路基宽度条件下,隔热层-碎石复合路基温度最低、热稳定性最好;普通路基第十年最大融深随路基宽度的增加呈直线上升趋势,碎石路基融深随宽度的增加呈三阶段增长趋势, EPS隔热层路基融深随宽度的增加呈两阶段增长趋势,复合路基融深随着宽度的增加逐渐增加但变化不大;单一的EPS隔热层措施、碎石路基对于多年冻土区宽幅路基降温效果较差,隔热层-碎石复合路基降温效果最优。

**关键词:**多年冻土;宽幅路基;温度场;隔热层;碎石路基;复合路基

**中图分类号:**U416.168

**文献标识码:**A

## Simulation Analysis on Cooling Effectiveness of Engineer Measures for Subgrade of Qinghai-Tibet Expressway

TANG Tao, MA Tao<sup>†</sup>, HUANG Xiao-ming, WANG Si-qi, CHENG Yong-zhen

(School of Transportation, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effectiveness of existing engineer measures for wide permafrost subgrade in Qinghai-Tibet plateau, a finite element (FE) model of temperature field of permafrost subgrade was first constructed by FE software ABAQUS and the secondary development platform. The temperature fields of normal subgrade, rock embankment, EPS insulation layer subgrade, and composite subgrade were then analyzed and compared with the help of the FE model. Furthermore, the change rules of melting depth for four kinds of subgrades were studied. The results demonstrate that the temperatures of the subgrades with different cooling engineer measures all change periodically over time, but the mean annual temperature rises. Under the same condition, the temperature of composite subgrade is the lowest, and its thermal stability is the best. When the width increases, the melting depth of normal subgrade rises linearly, and the melting depth of rock embankment shows a three-stage rising trend, while for EPS insulation layer subgrade it is a two-stage rising trend. Meanwhile, the melting depth of composite subgrade rises

\* 收稿日期:2015-10-11

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B04);教育部霍英东基金资助项目(141076);东南大学优秀青年教师资助计划项目(2242015R30027)

作者简介:汤涛(1990-),男,山东济宁人,东南大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: matao@seu.edu.cn

with the increase of the width, but the variation is very small. The mere EPS insulation layer or rock embankment is ineffective, while the insulation-gravel composite subgrade has excellent performances on the cooling effectiveness of wide subgrade in permafrost region.

**Key words:** permafrost; wide subgrade; temperature field; insulation layer; rock embankment; composite subgrade

西藏自治区是中国目前唯一没有高速公路通达内地的省(区),被称为高速公路的“拉萨孤岛”,这种状况严重制约着西藏地区社会经济的发展.建设青藏高速公路对西藏民族发展、全面建设小康社会意义重大<sup>[1]</sup>.然而该地区现有的公路大多为二级及以下低等级公路,路基为窄幅路基(路基宽度 $\leq 10$  m),而高速公路通常使用宽幅路基(路基宽度 $\geq 24.5$  m),对冻土的热稳定性提出了更高的要求.

冻土是一种温度敏感性极强且不稳定的土类,其物理力学性质随外界环境的热扰动而产生剧烈变化<sup>[2-5]</sup>.提高路基的热稳定性对于解决多年冻土地区道路病害至关重要,并受到国内外学者的广泛关注.张明义等人对多年冻土区斜坡碎石路基的热稳定性进行了有限元分析<sup>[6]</sup>.马巍等人对多年冻土区碎石路基长期的降温过程和效果进行了研究<sup>[7]</sup>.侯彦东等人分析了加强措施条件下隔热层路基的温度场<sup>[8]</sup>.谭贤君等人对冻土地区通风管的降温效果进行了研究<sup>[9]</sup>.Yarmak E等人对平回路蒸发器热虹吸管对冻土地基的降温作用进行研究<sup>[10]</sup>.孙文运用有限元理论分析了热棒对多年冻土路基稳定性的影响<sup>[11]</sup>.牛富俊等人对遮阳棚保护冻土路基的效果进行了实测研究<sup>[12]</sup>.陈团结等人通过采用硅藻土改性沥青混合料,从改善路面结构热参数的角度来降低多年冻土路基的温度<sup>[13]</sup>.汪双杰等人对透壁式通风管一块石复合路基降温效果进行了试验研究及数值模拟<sup>[14]</sup>.

综观国内外多年冻土路基工程稳定技术,主要从被动保护冻土和主动冷却路基两方面出发,采取的措施主要包括增加路基高度、设置片块石层、铺设保温隔热材料、布设热棒和通风管以及一些复合措施等,对解决多年冻土区道路工程稳定性问题起到了十分重要的作用.

然而,已有的工程措施虽然在低等级公路窄幅路基中的应用效果较好,但是对于高等级公路宽幅路基的处治效果还有待研究,且国内外关于多年冻土区复合式路基的研究还比较少.为此,本文通过建立基于第二类、第三类温度边界条件的多年冻土地

区宽幅路基温度场有限元模型,对普通路基、碎石路基、EPS(聚苯乙烯泡沫塑料)隔热层路基以及隔热层-碎石复合路基温度场进行对比分析,同时,对4种宽幅路基融深变化规律进行研究,为青藏高速公路的建设以及冻土有效保护措施的选取提供理论借鉴.

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 基本方程与等效热参数

本文采用 Harlan 等提出的二维热一流耦合偏微分方程<sup>[15]</sup>,如式(1)~(4)所示.

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \beta_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \beta_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (1)$$

$$C(T) = c\rho + \rho_w \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (2)$$

$$\beta_x(T) = k_x + L\rho_w D_x \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (3)$$

$$\beta_y(T) = k_y + L\rho_w D_y \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (4)$$

式中: $k_x, k_y$ 分别为导热系数的分量,  $W/(m \cdot K)$ ;  $T$ 为温度,  $^{\circ}C$ ;  $c$ 为土体的质量比热,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\rho$ 为土体的密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_w$ 为水的密度,  $kg/m^3$ ;  $L$ 为冻融潜热,  $J/kg$ ;  $D_x, D_y$ 分别为导水系数的分量,  $(m^2/s)$ ;  $w_u$ 为未冻水体积含量,  $\%$ ;  $C(T)$ 为等效容积比热,  $J/(kg \cdot m^3)$ ;  $\beta_x(T)$ 和  $\beta_y(T)$ 分别为等效热传导系数的分量,  $W/(m \cdot K)$ .

等效热参数的表达式如式(5)~(6)所示<sup>[1]</sup>,通过编写 UMATHT 子程序来计算等效热参数.

$$C(T) = \begin{cases} (c_u + w_b c_w) \rho_d & T \geq -\theta_f \\ \rho_d c_{sf} + \rho_d c_i w_0 + \rho_d (c_w - c_i) \cdot w_b \theta_f^b (-T)^{-b} + \\ L \cdot w_b \theta_f^b \cdot b \cdot (-T)^{-b-1} & T < -\theta_f \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta_x(T) = \beta_y(T) = \begin{cases} \lambda_u & T \geq -\theta_f \\ \lambda_f + LD \cdot w_b \theta_f^b \cdot b \cdot (-T)^{-b-1} & T < -\theta_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: $c_{su}, c_{sf}$ 分别为土骨架在融化和冻结状态下的比热, $J/(kg \cdot K)$ ;  $w_0$ 为土体初始水量, $\%$ ;  $c_i, c_w$ 分别为冰与水的比热, $J/(kg \cdot K)$ ;  $\rho_d$ 为土的干密度, $kg/m^3$ ;  $\theta_f$ 为冻土的冻结温度的绝对值, $^\circ C$ ;  $b$ 为与土质因素有关的经验系数;  $\lambda_u, \lambda_f$ 分别为融土和冻土的导热系数, $W/(m \cdot K)$ ;  $D$ 为水分扩散系数, $(m^2/s)$ ;  $L$ 为冻融潜热, $J/kg$ .

1.2 几何模型

单元类型选用 8 结点四边形热传导单元 (DC2D8), 利用 ABAQUS 软件自动生成网格, 控制网格大小的全局种子 Approximate Global Size 设置为 0.5 m. 为了减小尺寸效应对计算结果的影响, 结合宽幅路基实际情况, 模型范围取坡脚向外各 20 m, 天然土体深度取 20 m, 边坡坡度为 1:1.5, 如图 1 所示. 取隔热层厚度为 0.1 m, 碎石层的厚度为 1.5 m, 路基填土总高度为 3 m, 宽度在 10~50 m 之间变化, 路面结构不变仍为 0.65 m. 隔热层位于路面表面 1 m 深度处, 碎石层底距天然地面 0.5 m, 如图 2 所示.

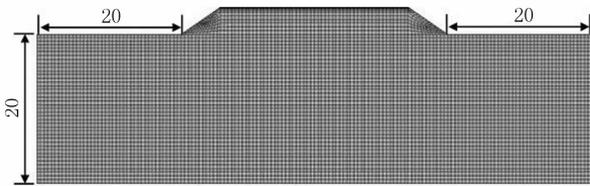


图 1 有限元分析模型(单位:m)

Fig. 1 Finite element analyzing model (unit: m)

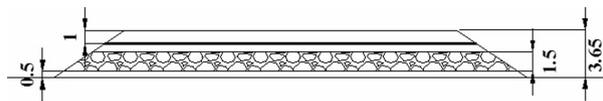


图 2 隔热层和碎石层的层位图(单位:m)

Fig. 2 Layout of EPS layer and crushed-rock layer (unit: m)

1.3 计算参数

根据青藏公路典型横断面土的分布情况, 天然土体划分为 3 个土层, 由上到下依次为 2.3 m 含卵石中细砂、1.6 m 含砾亚粘土、16.1 m 强风化泥岩, 路堤填土为砂砾与碎石土, 土体计算参数如表 1 所示(各参数物理含义见式(5)~(6)说明). 沥青混凝土路面结构参数如表 2 所示. EPS 隔热层和碎石层的计算参数如表 3 所示.

1.4 边界条件及初始条件

月平均太阳辐射日总量按现场实测值确定, 如

图 3 所示. 太阳辐射吸收率沥青路面取 0.87, 边坡和天然地面取 0.70. 各月地面有效辐射值如表 4 所示. 在 ABAQUS 中通过编写 DFLUX 子程序完成太阳辐射和地面有效辐射边界条件的定义.

表 1 土的计算参数表  
Tab. 1 Soil calculation parameters table

参数	砂砾与碎石土	含卵石中细砂	含砾亚粘土	强风化泥岩
$\rho_d/(kg \cdot m^{-3})$	1 800	1 700	1 300	1 500
$w_0/\%$	25	30	30	30
$c_{su}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	790	840	840	840
$c_{sf}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	710	730	750	750
$c_w/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	4 182	4 182	4 182	4 182
$c_i/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	2 090	2 090	2 090	2 090
$\lambda_u/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	1.919	1.95	0.87	1.47
$\lambda_f/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	1.980	2.69	1.22	1.82
$D/(10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$	9.35	46.6	373	3.44
$-\theta_f/^\circ C$	-0.20	-0.10	-0.19	-0.05
$L/(kJ \cdot kg^{-1})$	334.56	334.56	334.56	334.56
$b$	0.610	0.732 5	0.574 0	0.473 5

表 2 路面结构计算参数表  
Tab. 2 Pavement structure calculation parameters

结构层	材料	厚度/m	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热容/ $(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	热传导系数/ $(J \cdot (m \cdot h \cdot K)^{-1})$
上面层	AC-13C	0.04	2 300	1 670	4 140
下面层	AC-20C	0.05	2 320	1 670	4 320
基层	ATP-25	0.12	2 350	1 260	2 916
底基层	水稳碎石	0.24	2 200	960	5 616
垫层	级配砂砾	0.20	2 000	1 100	6 048

表 3 隔热层和碎石层的计算参数表  
Tab. 3 Calculation parameters of EPS and crushed-rock layer

材料	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热容/ $(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	热传导系数/ $(J \cdot (m \cdot h \cdot K)^{-1})$
EPS 隔热层	40	1 400	108
碎石层	1 490	839	1 426

根据相关资料<sup>[14]</sup>, 未来 50 年大气温度上升值取 2.6  $^\circ C$ , 月平均气温用正弦函数拟合如式(7)所示. 对流换热系数与风速有关, 各月平均风速如表 5 所示. 通过编写 FILM 子程序完成对流换热边界条件的定义.

$$T = -5.2 + 11.3 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \frac{5\pi}{9}\right) + \frac{2.6t}{600} \quad (7)$$

式中:  $T$  为月平均气温,  $^\circ C$ ;  $t$  为时间, 月.

本文采用青藏公路 K3+016 处 2000 年 8 月实测土温作为初始条件(天然地表高程设为 0).

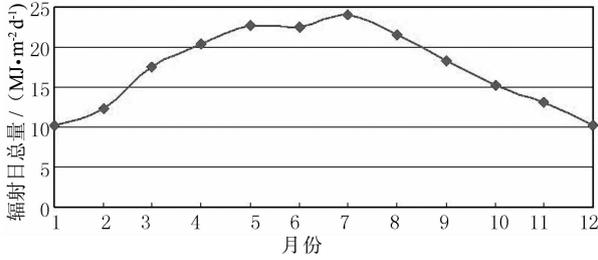


图3 月平均太阳辐射日总量图

Fig. 3 Monthly-averaged daily total solar radiation

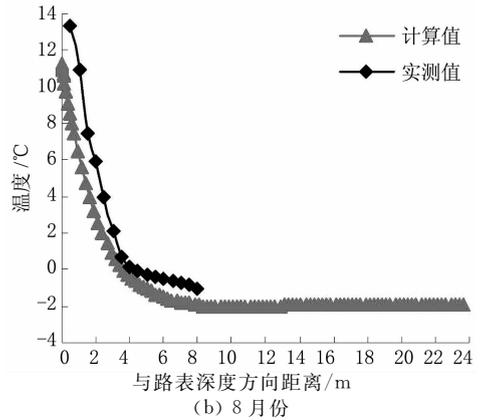
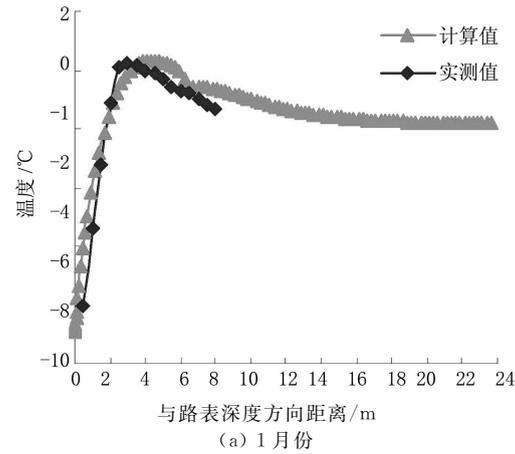


图4 温度场实测值和计算值对比图

Fig. 4 Comparison of temperature between field measuring date and calculated result

表4 各月地面有效辐射值表  
Tab. 4 Ground effective radiation value of each month

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
有效辐射/(MJ·m²·d <sup>-1</sup> )	6.82	6.80	8.63	8.68	8.38	7.44	7.51	7.26	7.54	9.46	8.96	8.21

表5 各月平均风速表  
Tab. 5 Average wind speed of each month

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	6.82	6.80	8.63	8.68	8.38	7.44	7.51	7.26	7.54	9.46	8.96	8.21

## 2 不同工程措施条件下温度场对比分析

### 2.1 等温线分布对比分析

以50 m宽幅路基为例给出等温线分布云图,对比不同工程措施条件下路基温度场的分布情况.图5为不同工程措施条件下路基第10年1月份的等温线分布图.如图中图标所示,等温线分布云图中由红色变化至蓝色代表温度逐渐降低.

1月份由于气温和太阳辐射量均处于年最低状态,4种路基各边界温度均到达年最低值.普通路基

### 1.5 有限元模型的验证

由于青藏高速公路尚未建设,无法获取青藏高速公路温度场现场实测数据对有限元模型进行验证.故本文利用该模型对青藏公路K3+016断面处温度场进行模拟计算,并与现场测试数据进行比较,从而对本文提出的温度场有限元模型进行验证,如图4所示.结果表明,有限元计算结果和现场实测结果数值比较接近,并且体现了相同的变化规律,故本文采用的有限元模型是合理有效的,可用于下一步计算分析.

由于夏季吸收热量多,虽然外界温度很低,但路基内部仍存有大尺寸椭圆形融土核,如图5(a)中红色区域A所示;碎石路基相比于普通路基,融土核尺寸大为减小,温度大幅度降低;EPS隔热层路基中红色区域A消失,故不存在融土核,温度均小于0℃,整个路基处于冻结状态;隔热层-碎石复合路基与EPS隔热层路基相比,橘黄色区域B面积减小,温度进一步降低.可见碎石路、EPS隔热层路基以及复合路基均可以在一定程度上延缓冻土的退化过程,其中隔热层-碎石复合路基工程效果最优.

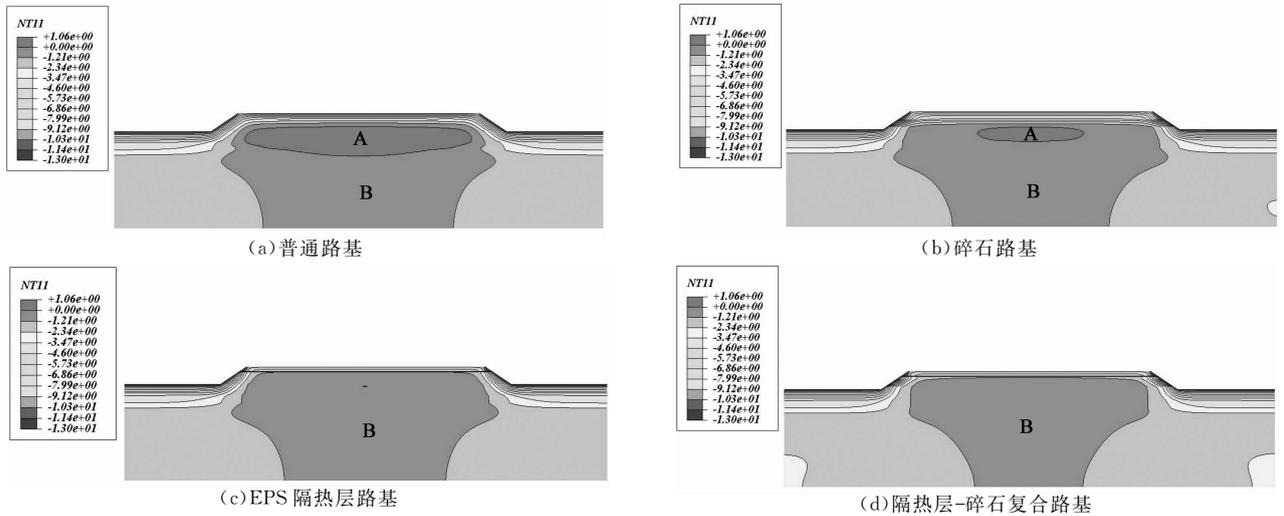


图 5 1 月份不同路基温度场等值线云图

Fig. 5 January temperature field contours of different subgrades

### 2.2 路基温度变化规律对比分析

以路基中心线 5 m 深度处作为温度考查点,不同工程措施条件下 50 m 宽路基 5~20 年温度变化如图 6 所示.可以看出,4 种路基温度随时间均呈周期变化趋势,且每年平均温度总体上升.相同的时间条件下,隔热层-碎石复合路基温度最低,普通路基温度最高. EPS 隔热层路基在第 15 年(180 月)之前

和碎石路基温度差别不大,之后温度均小于碎石路基.普通路基在第 10 年后考查点温度开始出现大于 0 °C 的情况,说明融深已超过 5 m,而碎石路、EPS 隔热层路基以及复合路基在 20 年内考查点温度均小于 0 °C,即融深均小于 5 m.故相比于其它 3 种宽幅路基,隔热层-碎石复合路基温度升高最慢、热稳定性最好,对天然冻土的扰动最小.

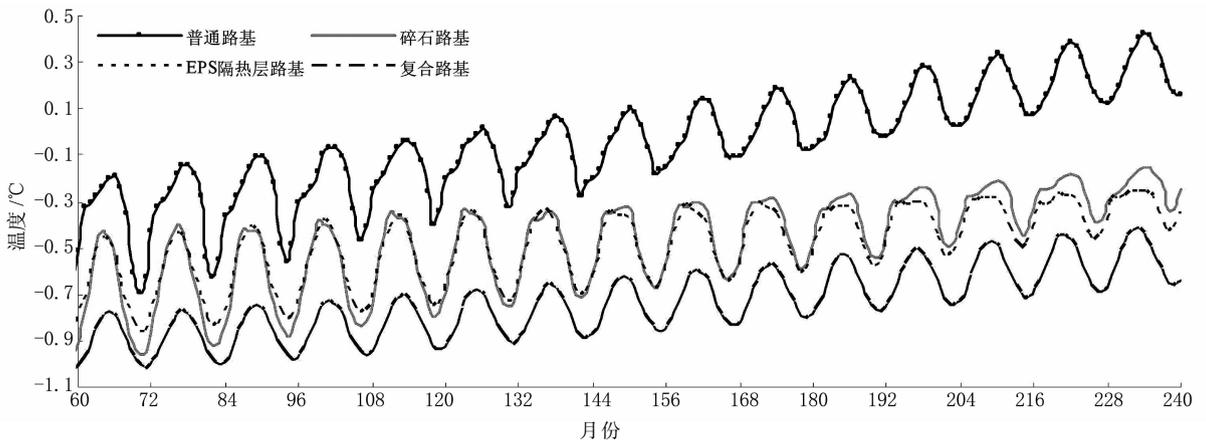


图 6 不同工程措施条件下 5~20 年温度变化曲线图

Fig. 6 Temperature variations from 5~20 years of different subgrades

## 3 不同工程措施条件下融深变化分析

### 3.1 路基宽度对 4 种路基融深的影响

不同宽度普通路基(高度取 3 m)第 10 年 8 月份路基中心处地温沿深度变化如图 7(a)所示.可知,不同宽度普通路基地温随着深度的增加均呈双

曲线下降趋势,且 0 °C 所在的深度随路基宽度的增加而变大.对不同宽度普通路基路基中心线处第 10 年最大融深进行计算,结果如图 8(a)所示.可知,普通路基融深随宽度的增加而增加,大体呈直线变化趋势.路基宽度每增加 1 m,路基中心线处最大融深平均增加 9 cm.

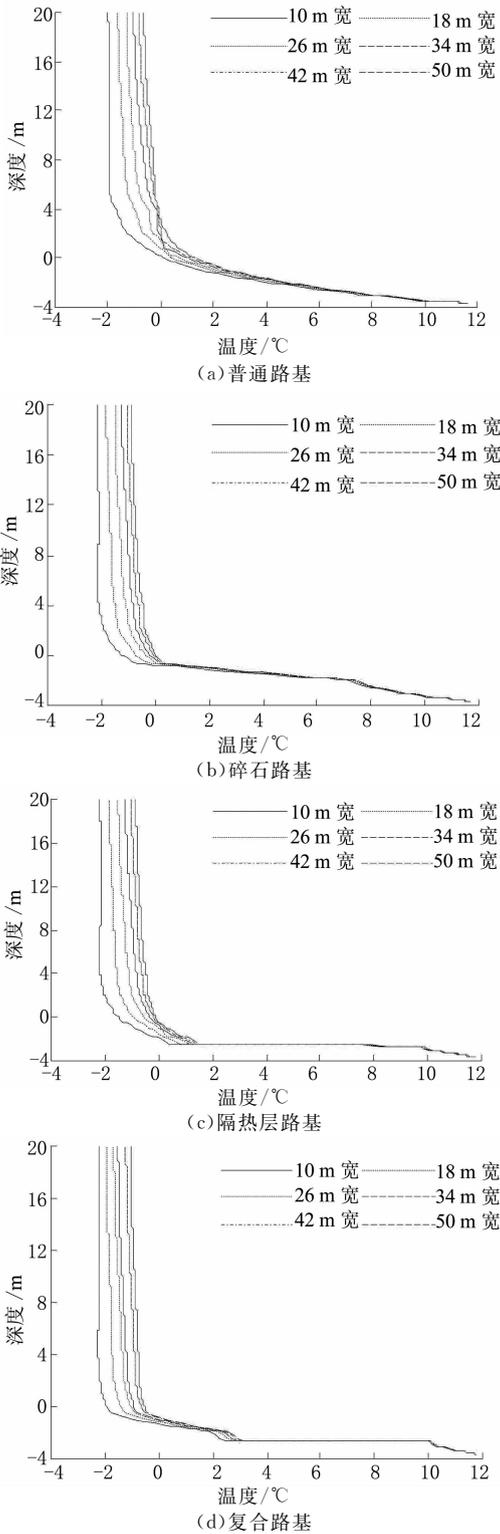


图7 地温沿深度变化曲线图

Fig. 7 Ground temperature vs depth

碎石路基地温沿深度变化如图7(b)所示. 与普通路基不同,受碎石层的影响,碎石路基地温线在碎石层段斜率变大,温度随深度的增加降低速度加快. 碎石路基0℃所在的深度同样随路基宽度的增加而变大,但是与普通路基相比变化较小. 对不同宽度碎

石路基中心线处第10年最大融深进行计算,结果如图8(b)所示. 可知,当路基宽度在10~34m范围内,碎石路基中心线处融深呈直线变化趋势;在34~42m范围内,融深快速增加;当宽度大于42m后,融深变化趋于稳定.

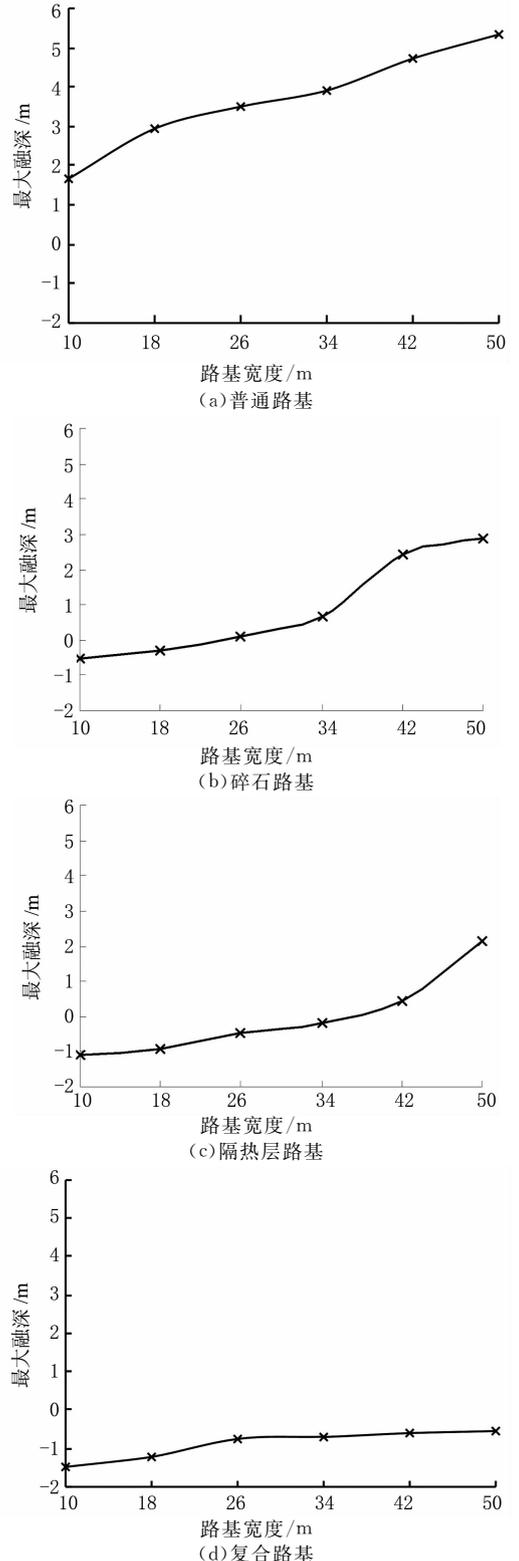


图8 不同路基融深随宽度的变化规律图

Fig. 8 Melting depths vs width of different subgrades

EPS 隔热层路基地温沿深度变化如图 7(c) 所示. 受 EPS 隔热层影响, 地温在隔热层段急剧下降, 在深度方向发生“突变”. 隔热层路基  $0^{\circ}\text{C}$  所在的深度同样随路基宽度的增加而变大, 增加量同样比普通路基小. 对不同宽度 EPS 隔热层路基中心线处第 10 年最大融深进行计算, 结果如图 8(c) 所示. 可知, 当路基宽度小于  $34\text{ m}$  时, 融深呈直线变化趋势; 当宽度大于  $34\text{ m}$  后, 融深随路基宽度的增加呈抛物线上升趋势.

隔热层-碎石复合路基地温沿深度变化如图 7(d) 所示. 受 EPS 隔热层和碎石层的综合影响, 地温线既有“突变”段, 又有“斜率增加”段. 复合路基  $0^{\circ}\text{C}$  所在的深度同样随路基宽度的增加而变大. 对不同宽度复合路基中心线处第 10 年最大融深进行计算, 结果如图 8(d) 所示. 可知, 随着路基宽度的增加, 复合路基融深逐渐增加但变化不大, 在  $-1.5\text{ m} \sim -0.54\text{ m}$  之间变化.

### 3.2 工程措施降温效果对比

不同工程措施路基第 20 年中心线处最大融深随宽度的变化如图 9 所示. 可知, 在选取的宽度范围内, 融深由小到大依次为隔热层-碎石复合路基 < EPS 隔热层路基 < 碎石路基 < 无工程措施路基.

随着路基宽度的增加, EPS 隔热层路基最大融深与无工程措施最大融深之差大体呈减小趋势. 这是由于 EPS 隔热层虽然在暖季可以起到隔热的作用, 但同时也在冷季也阻断了路基热量向外传递, 路基热量处于长期积累趋势. 路基宽度越大, 则热量积累的越多, EPS 隔热层的降温效果越差. 所以在多年冻土区宽度较大的路基中不宜使用单一的 EPS 隔热层措施来保护冻土.

与 EPS 隔热层类似, 碎石路基最大融深与无工程措施最大融深之差同样随着路基宽度的增加而逐渐减小. 路基宽度的增加抑制了碎石层中自然对流的形成, 从而减弱了碎石路基对流散热的作用, 对土体的降温作用也将减弱. 故单独采用碎石层来保护宽幅路基下的多年冻土效果也不理想.

随着路基宽度的增加, 隔热层-碎石复合路基最大融深与无工程措施最大融深之差逐渐增加. 复合路基不仅可以阻断一定的外界热量传入路基, 而且碎石层中空气的对流可以使路基的热量在冬季散出. 故隔热层-碎石复合路基对于宽幅路基的降温效果最好.

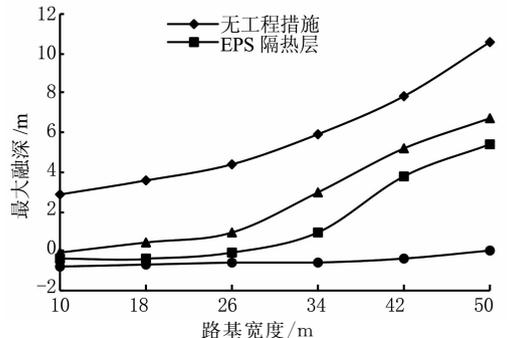


图 9 不同工程措施第 20 年路基中心线处最大融深图

Fig. 9 Changes of melting depths at centerline width for different subgrades at the 20th year

## 4 结 论

1) 不同工程措施条件下, 宽幅路基温度随时间均呈周期变化趋势, 但每年平均温度总体上升. 相同的时间和路基宽度条件下, 隔热层-碎石复合路基温度最低, 普通路基温度最高. 与普通路基、碎石路基以及 EPS 隔热层路基相比, 隔热层-碎石复合路基温度升高最慢、热稳定性最好, 对天然冻土的扰动最小.

2) 普通路基第 10 年最大融深随宽度的增加呈直线上升趋势; 碎石路基融深随宽度的增加呈三阶段增长趋势; EPS 隔热层路基当路基宽度小于  $34\text{ m}$  时, 融深呈直线变化趋势, 当宽度大于  $34\text{ m}$  后, 融深随路基宽度的增加呈抛物线上升趋势; 随着路基宽度的增加, 复合路基融深逐渐增加但变化不大.

3) 在选取的宽度范围内, 融深由小到大依次为隔热层-碎石复合路基 < EPS 隔热层路基 < 碎石路基 < 无工程措施路基. 单一的 EPS 隔热层措施、碎石路基对于多年冻土区宽度较大的路基降温效果较差, 隔热层-碎石复合路基降温效果最优.

## 参考文献

- [1] 汤涛, 马涛, 黄晓明, 等. 青藏高速公路宽幅路基温度场模拟分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45(4): 799-804.  
TANG Tao, MA Tao, HUANG Xiao-ming, *et al.* Simulation analysis of temperature field of wide subgrade of Qinghai-Tibet highway [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45(4): 799-804. (In Chinese)
- [2] LI Dong-qing, CHEN Jin, MENG Qing-zhou, *et al.* Numeric simulation of permafrost degradation in the Eastern Tibetan

- plateau [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19 (1): 93—99.
- [3] SHENG Y, LIU Y Z, ZHANG J M, *et al.* Analysis of the thawing of permafrost underlying Qinghai-Tibetan highway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (1): 43—48.
- [4] YE Z Q, MAO X S, YE M. Moisture-thermal coupling model for the temperature calculation of the permafrost subgrade[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204: 1580—1585.
- [5] WU Q B, SHI B, LIU Y Z. Study on reciprocity of highway and permafrost along the Qinghai Tibet Highway[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32 (6): 514—520.
- [6] PEI W S, ZHANG M Y, LAI Y M, *et al.* Thermal stability analysis of crushed-rock embankments on a slope in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106: 175—182.
- [7] MU Y H, MA W, WU Q B, *et al.* Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 107—114.
- [8] HOU Y D, WU Q B, LIU Y Z, *et al.* The thermal effect of strengthening measures in an insulated embankment in a permafrost region [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 116: 49—55.
- [9] TAN X J, CHEN W Z, YANG D S, *et al.* Study on the influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 67(1): 320—334.
- [10] YARMAK E, LONG E. The performance of a flat-loop evaporator thermosyphon at deadhorse, alaska[J]. *Bridges*, 2014, 35(10): 348—357.
- [11] 孙文, 吴亚平, 郭春香, 等. 热棒对多年冻土路基稳定性的影响[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(5): 15—20.  
SUN Wen, WU Ya-ping, GUO Chun-xiang, *et al.* Influences of two-phase closed thermosyphon on permafrost roadbed stability[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22 (5): 15—20. (In Chinese)
- [12] 牛富俊, 徐志英, 葛建军, 等. 青藏铁路遮阳棚路基试验工程效果实测研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 325—333.  
NIU Fu-jun, XU Zhi-ying, GE Jian-jun, *et al.* Engineering effects of the sunshine-shield roadbed of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 325—333. (In Chinese)
- [13] CHEN T J, WANG S J. Study on heat insulation of diatomite asphalt concrete in permafrost regions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 6(4): 42—48.
- [14] 刘戈, 汪双杰, 孙红, 等. 透壁式通风管——块石复合路基降温效果模型试验及数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (2): 284—291.  
LIU Ge, WANG Shuang-jie, SUN Hong, *et al.* Model test and numerical simulation of cooling effect of ventilated duct-crushed rock composite embankment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(2): 284—291. (In Chinese)
- [15] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. *Journal of Water Resource Res*, 1973, 9: 1314—1323.