

韩长玉,赵浩汀. 路基填筑短期内热棒高导热性影响. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 570-580. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220265.

Han Changyu, Zhao Haoting. Influence of High Thermal Conductivity of Thermal Pipe in a Short Period of Subgrade Filling. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 570-580. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220265.

路基填筑短期内热棒高导热性影响

韩长玉, 赵浩汀

河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475000

摘要:为研究多年冻土区路基填筑短期内热棒高导热性对路基下部冻土温度场的影响,基于水热耦合作用,采用数值模拟方法对路基填筑短期内温度场变化进行了分析。结果表明:受热棒高导热性影响,路基填筑短期内冻结锋面沿热棒下凹;6月填筑,易使坡脚和蒸发段处发生水热侵蚀,7月填筑,冻结锋面最低点深度超过热棒埋置深度,对热棒稳定性最不利,8月和9月填筑,热棒高导热性影响时间较短;热棒高导热性对温度场的负面影响随填料温度和热棒材料导热系数的增加而增大。为减少填筑短期内热棒高导热性影响,应避免在6到7月份施工,施工时尽量降低路基填料温度,在不影响降温效果的前提下可适当减小热棒材料的导热系数。

关键词:多年冻土;热棒;高导热性;温度场;数值模拟

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220265

中图分类号:TU445

文献标志码:A

Influence of High Thermal Conductivity of Thermal Pipe in a Short Period of Subgrade Filling

Han Changyu, Zhao Haoting

School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475000, Henan, China

Abstract: To study the influence of high thermal conductivity of thermal pipe on the temperature field of frozen soil under the subgrade in permafrost regions in the short term after subgrade filling, the temperature field change in the short term after subgrade filling was studied by numerical simulation method based on the coupling effect of water and heat. The results show that, due to the high thermal conductivity of the thermal pipe, the frozen front of the subgrade is concave along the thermal pipe in the short term after filling. Filling in June is easy to cause hydrothermal erosion at the slope toe and evaporation section; Filling in July, the lowest point of the freezing front is deeper than the embedded depth of the thermal pipe, which is the most unfavorable for the stability of the thermal pipe; Filling in August and September, the influence time of high thermal conductivity of hot rod is short. The effect of

收稿日期:2022-09-20

作者简介:韩长玉(1979-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程方面的研究,E-mail:897563866@qq.com

基金项目:河南省科技厅项目(182102310737, 192102310466);河南省教育厅项目(16A560002)

Supported by the Project of Henan Provincial Science and Technology Department (182102310737, 192102310466) and the Project of Henan Provincial Department of Education (16A560002)

high thermal conductivity of thermal pipe on temperature field increases with the increase of filler temperature and thermal conductivity. In order to reduce the impact of high thermal conductivity of the thermal pipe in the short term after filling, construction from June to July should be avoided. During construction, the temperature of subgrade filler should be reduced as much as possible, and the thermal conductivity of the material can be appropriately reduced without affecting the cooling effect.

Key words: permafrost; thermal pipe; high thermal conductivity; temperature field; numerical simulation

0 引言

青藏高原地区约70%的面积被多年冻土覆盖,多年冻土区内活动层土体发生冻融循环,在冻融循环作用下不同土体的力学性能和结构特性会发生明显变化^[1-4]。建立在多年冻土之上的青藏公路普遍存在的阴阳坡效应使路基下部冻土存在较大的温度差异,而且在全球变暖的共同影响下导致冻土退化,引起路面不均匀沉降等一系列热融灾害等问题^[5-6]。

为减少路基填筑及阴阳坡效应对冻土原有温度场的干扰,国内外学者对路基填筑材料、路基尺寸、不同初始条件和使用热棒降温等方法进行了大量的研究^[7-14]。其中热棒具有高效导热性,能对下部冻土进行有效降温,防止冻土退化,应用十分广泛。郭春香等^[12]和盛煜等^[15]基于传热方程,建立了三维热棒路基有限元模型,对热棒的降温效果进行了分析。张晓^[16]考虑冻土中水分的影响,基于水热耦合模型分析了热棒不同布置方法对阴阳坡路基降温效果的影响。郭春香等^[17]分析了热棒高导热性的负面影响,结果表明在长期运营时间中,热棒高导热材料将会减弱原有降温效果。从以上分析可知,热棒停止工作时其高导热性将产生负面效应。从长期研究来看,由于热棒具有良好的工作效能,所以在长期工作中其高导热性并未对降温效果造成太大影响,但在路基填筑至热棒工作前这一短时期内的负面影响尚未可知。

本文着重研究热棒路基施工后短时期内下部冻土的水热场变化。先考虑未冻水迁移携带热量对温度变化的影响,再结合热棒传热方程,使用有限元软件建立并计算多年冻土区热棒路基水热耦合模型,最后针对不同填筑时间、材料参数等影响因素,对路基填筑短期内热棒高导热性对路基下部冻土温度场的负面影响进行分析,以期为寒区热棒路基施工及材料选取提供相关依据。

1 控制方程

1.1 水分场控制方程

冻土中的未冻水迁移遵循达西定律,根据Richard方程^[18-20],考虑冰对未冻水迁移的阻滞作用^[21]。未冻水迁移微分方程为

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \nabla [D(\theta_u) \nabla \theta_u + K_u] \quad (1)$$

式中: θ_u 为冻土中未冻水的体积分; ρ_i 和 ρ_w 分别为冰的密度和水的密度(kg/m^3); θ_i 为冰的体积分; t 为计算时间(s); $D(\theta_u)$ 为水分扩散系数; ∇ 为微分算子,对于二维问题为 $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$; K_u 为非饱和土体渗透系数(m/s)。

1.2 温度场控制方程

考虑二维水热耦合问题,根据傅里叶定律,将相变潜热作为热源处理,考虑未冻水迁移携带的热量。冻土热传导微分方程为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + C_w [D(\theta_u) \nabla \theta_u + K_u] \nabla T \quad (2)$$

式中: ρ 为土体密度(kg/m^3); C 为土体热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T 为土体温度($^{\circ}\text{C}$); λ 为土体导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); L 为相变潜热,以下研究取值均为 $334\,500\text{ J}/\text{kg}$; C_w 为水的体积热容,取 $4.182 \times 10^6\text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

冻土的导热系数和体积热容与固体颗粒、水分和空气有关。考虑计算收敛性,可通过平滑函数 $\alpha(T)$ 根据土的冻融状态给出相关传热参数:

$$\lambda = \alpha(T)\lambda_f + (1 - \alpha(T))\lambda_u; \quad (3)$$

$$C = \alpha(T)C_f + (1 - \alpha(T))C_u \quad (4)$$

式中: λ_f, C_f 分别为冻土冻结状态下的导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) and 热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); λ_u, C_u 分别为

冻土融化状态下的导热系数($W/(m \cdot K)$)和热容($J/(kg \cdot K)$)。当 $T < T_f$ 时, $\alpha(T) = 1$,此时 $\lambda = \lambda_f$, $C = C_f$;当 $T \geq T_f$ 时, $\alpha(T) = 0$,此时 $\lambda = \lambda_u$, $C = C_u$ 。其中 T_f 为土体冻结温度($^{\circ}C$)。

1.3 联系方程及参数

为使方程有解,文献[22]将孔隙冰体积分数和未冻水体积分数联系在一起,建立 θ_i 和 θ_u 之间的关系式,二者比值即固液比 B_i :

$$B_i = \frac{\theta_i}{\theta_u} = \begin{cases} \frac{\rho_w}{\rho_i} (T/T_f)^b - 1, & T < T_f; \\ 0, & T \geq T_f. \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta_i = \theta_u B_i. \quad (6)$$

式中, b 为经验参数。

$D(\theta_u)$ 可根据下式计算:

$$D(\theta_u) = \frac{K_u}{c(\theta_u)} I; \quad (7)$$

$$K_u = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2; \quad (8)$$

$$S_e = \frac{\theta_u - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}; \quad (9)$$

$$c(\theta_u) = a_0 m (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m / (1 - m); \quad (10)$$

$$I = 10^{-10\theta_i}. \quad (11)$$

式中: $c(\theta_u)$ 为比水容量(m^{-1}); I 为阻抗因子; K_s 为饱和土体渗透系数(m/s); S_e 为相对饱和度; θ_s 为土体饱和含水率; θ_r 为土体残余含水率; a_0 、 l 和 m 为与土有关的 VG 模型参数,其中 a_0 单位为 m^{-1} , l 和 m 无量纲。

1.4 热棒传热方程

热棒绝热段几乎不与周围土体发生热传递,因此不考虑绝热段的径向传热。在热棒开始工作前,大气温度可通过冷凝段金属管壁轴向传热,各部分传热方程如下。

蒸发段与冷凝段的传热方程为

$$\rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{b,x} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{b,y} \frac{\partial T}{\partial y}) + Q_v; \quad (12)$$

绝热段传热方程为

$$\rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{b,y} \frac{\partial T}{\partial y}). \quad (13)$$

式中: ρ_b 为热棒管壁密度(kg/m^3); C_b 为热棒管壁的热容($J/(kg \cdot K)$); x 和 y 分别表示热棒径向和轴向; $\lambda_{b,x}$ 、 $\lambda_{b,y}$ 为热棒径向和轴向的导热系数

($W/(m \cdot K)$); Q_v 为蒸发段产冷量(W)。

2 方程验证

使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立上述水热耦合方程,模拟文献[23]中封闭系统的正融土试验。试验土柱高为 10 cm,半径为 5 cm,初始含水率为 22.25%,初始温度为 $-1.0^{\circ}C$,顶面和底面为恒定温度,分别为 1.0 和 $-1.0^{\circ}C$,计算时长为 120 h。土体冻结温度为 $-0.24^{\circ}C$,融化状态下的导热系数和体积热容分别为 $1.0 W/(m \cdot K)$ 和 $1300 kJ/(m^3 \cdot K)$,冻结状态下的导热系数和体积热容分别为 $1.2 W/(m \cdot K)$ 和 $1200 kJ/(m^3 \cdot K)$,土体水力学参数中 a_0 、 m 、 l 分别为 $1.6 m^{-1}$ 、 0.26 、 0.5 ,饱和含水率为 0.40 ,残余含水率为 0.02 ,饱和渗透系数为 $3 \times 10^{-7} m/s$,经验参数取 0.47 。模拟结果见图 1、2。由图 1 可知,体积含水率在土柱高度 3 cm 左右处最大,这是由重力、抽吸力和冰对未冻水的阻滞共同作用的结果。由图 2 可知,土柱内温度分布与试验结果基本一致。在此基础上考虑热棒传热方程,计算热棒在不同工况下的地温场变化情况,选取热棒工作时的 12 月和停止工作时的 8 月地温场数据,以及文献[24]中的温度数据绘制于图 3。由图 3 可知,热棒处于不同工况时的地温场计算值与现场实测值均较为吻合;因此可使用此模型研究热棒高导热性在施工完成后短期内对下部冻土温度场的影响。

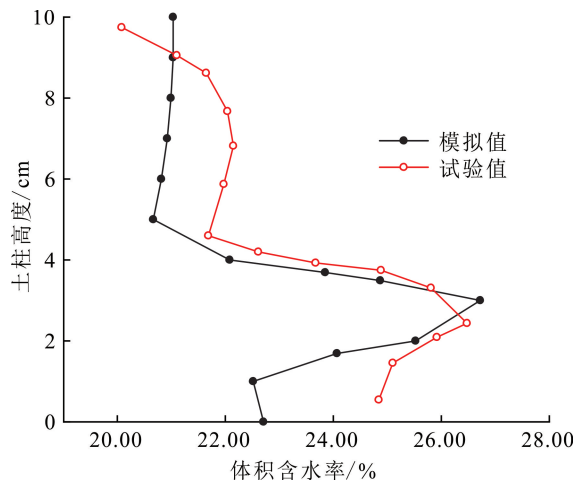


图 1 土柱中的体积含水率分布

Fig.1 Volumetric moisture content distribution of soil column

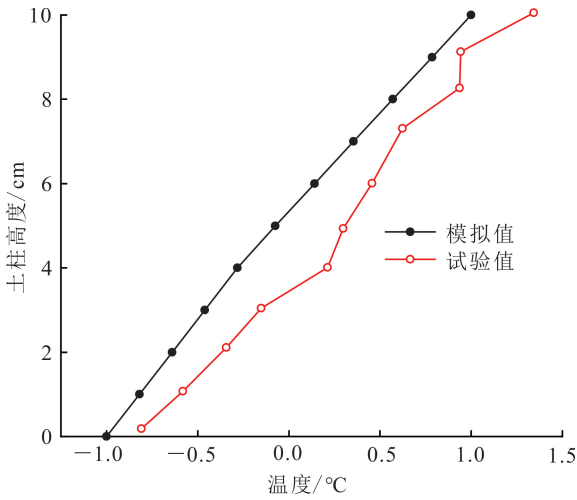


图 2 土柱中的温度分布

Fig.2 Temperature distribution of soil column

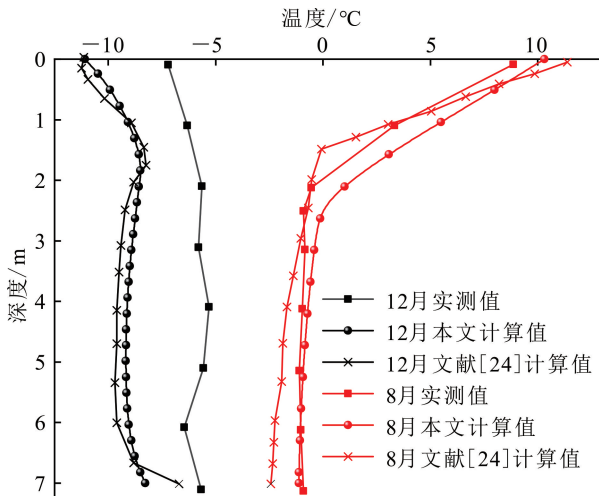
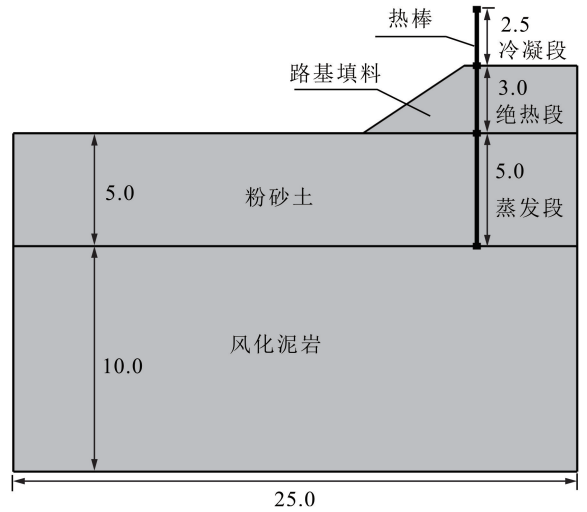


图 3 热棒作用下不同时间地温分布

Fig.3 Ground temperature distribution under the action of thermal pipe at different time

对象。该路段路基以下浅层以粉砂土为主,下部风化泥岩。多年冻土地温为 $-2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$,土层含水量较高。为防止阳坡冻土退化,在左路肩(阳坡侧)埋置热棒^[16]。参考文献[16],使用 COMSOL 有限元软件建立热棒路基模型。模型包括路基、地基和热棒三部分。地基高 15.0 m,宽 50.0 m。其中粉砂土层高 5.0 m,风化泥岩层高 10.0 m;路基本部 19.0 m,高 3.0 m,坡比为 1:1.5;热棒总长 10.5 m,外径为 0.1 m。冷凝段长 2.5 m,绝热段长 3.0 m,蒸发段的长度为 5.0 m。为提高计算效率,取对称模型的一半进行计算,见图 4。传热参数^[16,25]、水分迁移参数^[23]及热棒参数^[12]见表 1—3。



单位为 m。图中为对称模型的一半。

图 4 热棒路基模型

Fig.4 Thermal pipe subgrade model

3 建立模型

3.1 几何模型及参数

选取多年冻土区青藏公路楚玛尔河路段为研究

3.2 边界条件

根据附面层理论^[26],结合多年冻土地区青藏公路楚玛尔河路段气温变化的特征^[27],且由于本文重点研究热棒路基填筑短期内的温度场变化,因此不考虑大气温度上升的情况。温度边界为正弦周期函

表 1 土体传热参数

Table 1 Soil heat transfer parameters

名称	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	热容/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)		导热系数/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)		$T_f/{}^{\circ}\text{C}$
		C_f	C_u	λ_f	λ_u	
路基填料	1 850	936	1 102	1.92	1.68	-0.20
粉砂土	1 600	1 338	1 881	2.27	2.16	-0.25
风化泥岩	2 070	1 200	1 350	1.56	1.23	-0.24

表2 土体水分迁移相关参数

Table 2 Parameters related to soil water migration

名称	$a_0 /$ m^{-1}	m	l	θ_s	θ_r	$K_s /$ ($10^{-6} m/s$)
路基填料	0.66	0.14	0.5	0.25	0.01	2.000
粉砂土	0.66	0.14	0.5	0.42	0.05	1.000
风化泥岩	2.65	0.26	0.5	0.42	0.05	0.002

表3 热棒相关参数

Table 3 Thermal pipe related parameters

名称	$\rho_b /$ (kg/m^3)	$C_b /$ ($J/(kg \cdot K)$)	$\lambda_{b,x} /$ ($W/(m \cdot K)$)	$\lambda_{b,y} /$ ($W/(m \cdot K)$)
绝热段	1 500	1 000	0	36.5
蒸发段	1 500	1 000	36.5	36.5
冷凝段	1 500	1 000	36.5	36.5

数,即

$$T = T_0 + A \sin(2\pi t/8760 + \varphi) \quad (14)$$

式中: T_0 为年平均温度,大气、路基顶面、左边坡和天然地表的温度分别为 -3.5 、 3.0 、 2.5 和 -0.5 $^{\circ}C$; A 为振幅,大气、路基顶面、左边坡和天然地表的振幅分别为 11.0 、 14.5 、 12.5 和 10.0 ; φ 为初始相位,7月时 φ 取 $\pi/3$ 。模型两侧视为绝热条件,底部热流密度为 $0.02 W/m^2$ 。

忽略降雨和蒸发的水分补充和流失,水分场边界设置为零通量,地基的初始相对饱和度粉砂土为 0.30 ,风化泥岩为 0.35 。首先计算路基修筑前,地基稳定时刻的温度场和水分场,认为当前温度与上年此刻温度的变化小于 0.01 $^{\circ}C$ 时,物理场稳定;随后考虑路基修筑,将稳定的地基水分场和温度场导入模型作为计算初始值,路基的初始温度比天然地表温度高 7 $^{\circ}C$ 左右,初始相对饱和度为 0.20 。

3.3 热棒功率计算

绝热段和冷凝段的产冷量为 $0 W$ 。蒸发段的产冷量可用下式^[28]表示:

$$\begin{cases} Q_v = \frac{T_s - T_a}{R_r + R_s}, T_s \geq T_a + 0.8, \\ Q_v = 0, T_s < T_a + 0.8; \end{cases} \quad (15)$$

$$R_l = 1/F\eta; \quad (16)$$

$$R_s = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda_s z}; \quad (17)$$

$$\eta = 2.75 + 1.51v^{0.2} \quad (18)$$

式中: T_s 、 T_a 分别为蒸发段周围土体温度和大气

温度($^{\circ}C$); R_l 、 R_s 分别为冷凝段的热阻和蒸发段周围土体热阻($^{\circ}C/W$); F 为冷凝段的散热面积,为 $3.7 m^2$; η 为冷凝段有效放热系数; v 为大气平均风速,为 $4.5 m/s$ ^[29]; r_1 为蒸发段传热的外半径(m); r_2 为蒸发段传热的平均影响半径,为 $1.5 m$; λ_s 为蒸发段周围冻土的导热系数($W/(m \cdot K)$)。计算可得 R_l 为 $0.046 4$ $^{\circ}C/W$, R_s 为 $0.039 9$ $^{\circ}C/W$ 。

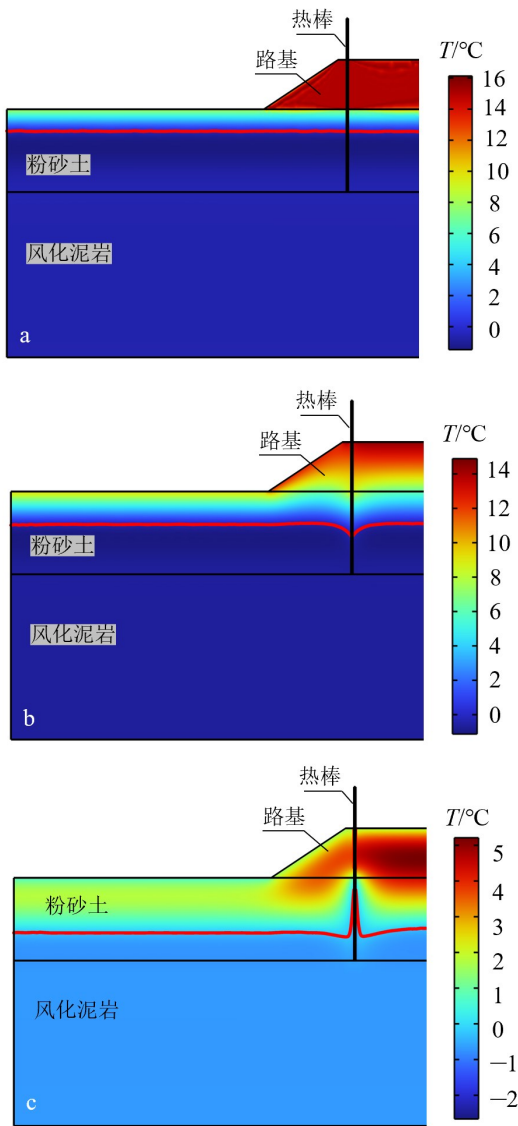
将热棒周围土体温度与大气温度对比,当热棒周围土体温度高于大气温度 0.8 $^{\circ}C$ 时启动工作^[30],在软件中通过控制边界条件来实现。

4 温度场结果分析

4.1 填筑短期内温度场变化规律

图5为热棒路基7月填筑115 d内的温度场变化图。将 -0.25 $^{\circ}C$ 的等温线视为冻结锋面所在位置^[31]。路基填筑后第0天(图5a),此时温度场稳定无变化,冻结锋面基本为一条直线,维持在地表下 $1.32 m$ 左右。路基填筑后第30天(图5b),冻结锋面沿蒸发段管壁呈“V”字形下凹。分析认为,随着填筑时间的发展,路基填料温度开始逐渐消散,热量向大气和下部冻土传递,当路基填料温度传递至蒸发段处,由于其材料具有高导热性,可将热量优先传递至下部低温处;同时,冷凝段管壁也不断吸收大气热量,通过金属管壁将热量传递至下部冻土,使管壁周围冻土吸收热量升温融化。填筑后第106天,大气温度低于蒸发段周围土体温度,热棒达到启动工作的条件。由热棒工作时的冻结锋面分布图(图5c)可知,冻结锋面在热棒降温作用下沿管壁向上凸起,管壁周围土体由蒸发段向两侧逐渐冻结,第115天下凹基本消失。

由上述可知,冻结锋面的变化规律为靠近蒸发段处的最先下凹,此处冻土最先开始融化,且冰融化为液态水,体积发生变化,可能会影响热棒基础的稳定性。此外,路基下部冻土融化后产生的液态水沿冻结锋面向凹陷处迁移,受冰的阻滞作用聚集在管壁周围,不断加剧此处的水热侵蚀。由于热棒左右变化趋势一致,考虑热棒高导热性可能会对坡脚和路肩造成影响,因此应重点关注热棒左侧不同位置的冻结锋面与冻结锋面下凹最低点的高程差,以下简称“冻结锋面高程差”。由于热棒降温效果较好,工作后冻结锋面停止下降且沿管壁迅速升高,因此计算时长取为填筑完成至冻结锋面停止下降这一时间段。



a. 第0天; b. 第30天; c. 第115天。红线为 $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温线。

图5 7月填筑温度场随时间变化云图

Fig.5 Temperature field cloud plot over time at different filling time in July

热棒高导热性对地基温度场的影响主要是由高导热材料将外部热量传递至蒸发段周围土体而导致的。由此可知,大气温度、填料温度和热棒材料导热系数是热棒高导热性影响地基温度场的主要因素,因此,后续对不同填筑时间、填料温度和热棒导热系数进行分析。

4.2 填筑时间的影响

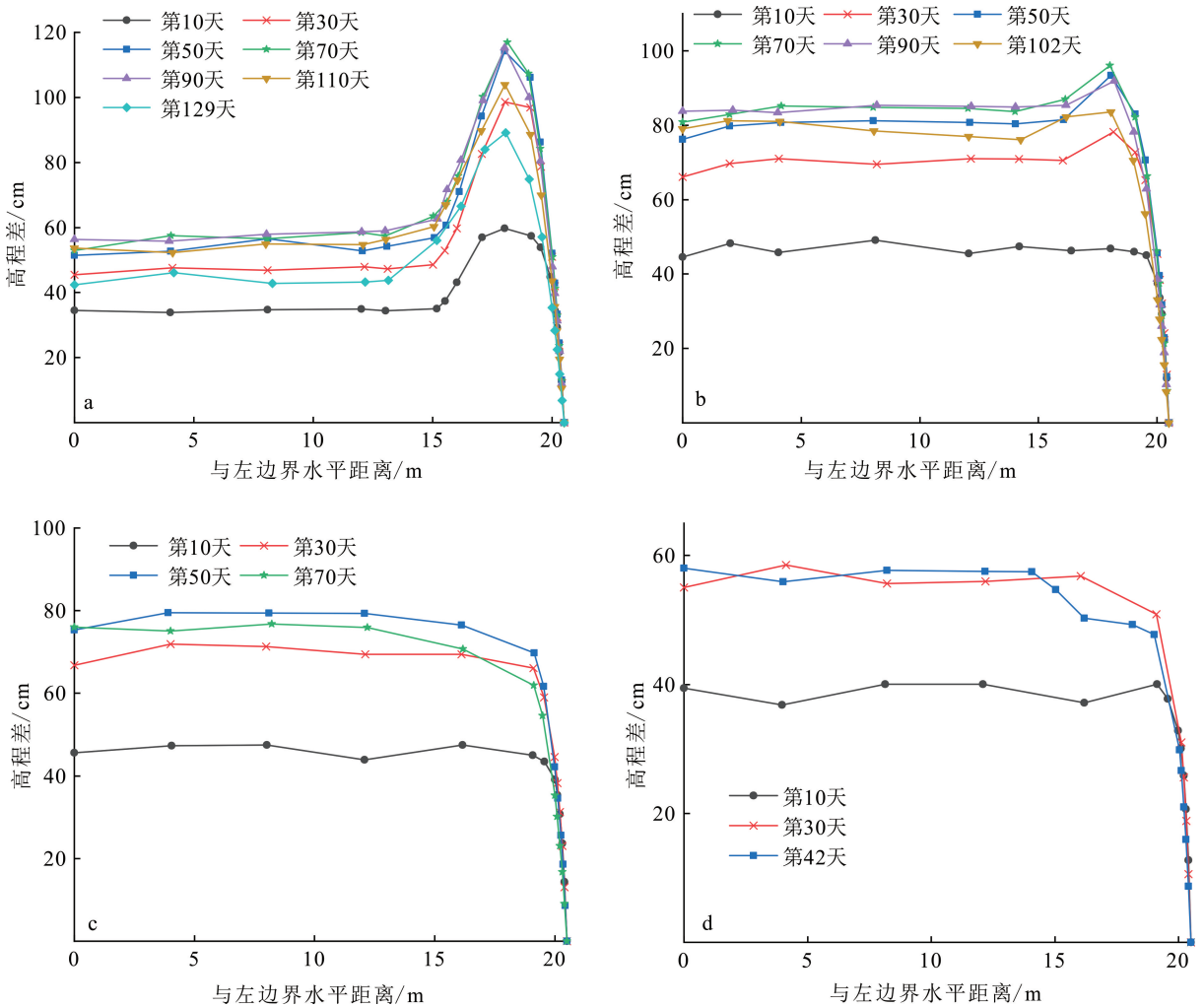
不同填筑时间的温度条件不同,填料温度不同,则对下部冻土热状况影响不同^[32],受热棒高导热性的影响也不同。寒区路基一般在4月至10月施工^[27],但考虑热棒在5月和10月左右已经启动工

作,因此取6—9月的4个填筑时间对冻结锋面高程差进行分析。计算时,各时间的填料温度比计算当日天然地表温度高 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始含水率不变。不同填筑时间的温度边界条件通过改变式(14)中的初始相位即可得到,6月、7月、8月、9月的初始相位分别为 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/2$ 和 $2\pi/3$ 。图6为6月、7月、8月、9月进行路基填筑在短期内冻结锋面高程差随时间变化图。

由图6可知,不同时间进行路基填筑,冻结锋面高程差的发展趋势大致相同。即填筑后,天然地表下的高程差基本保持稳定;冻结锋面最低点始终沿热棒轴向面发生移动,因而此处高程差始终为0。从受影响时长来看,在研究时间内路基填筑时间越早,热棒高导热性造成的负面影响时间越久。

图6a为6月路基填筑后的冻结锋面高程差随时间变化曲线。从水平位置来看,边坡下部的冻结锋面高程差明显高于两侧,且相比其他月份而言,6月的变化幅度也明显较大。冻结锋面高程差在填筑后第70天左右达到最大,约为 118 cm ;70 d之后随着时间的增长而下降。分析认为,6月填筑时冻结锋面位置相对其他月份较高,约为 -0.28 m ,天然地表下的冻结锋面受大气温度影响较大,下降速度较快。路基初始温度向下部冻土和大气扩散且消散速度相比其他月份较快,待路基初始温度消散后,温度分布从路面至地表逐渐降低^[27],路基下部未受热棒高导热性影响土体的冻结锋面下降缓慢,与天然地表下及热棒高导热性影响半径内的冻结锋面形成明显的高度差。因此,边坡下部冻结锋面在填筑后70 d内的变化远小于天然地表下部及热棒处的变化,从而导致边坡下部的冻结锋面高程差持续增大;填筑70 d后,在7月和8月的大气高温作用下,边坡下部冻结锋面下降速度加快,冻结锋面高程差也逐渐降低。可见6月填筑导致边坡下部冻结锋面相对其他月份较高,而冻结锋面以下的冻土会阻碍上部未冻水的迁移,导致未冻水分流至凸起两侧,使其向坡脚和蒸发段迁移,造成更严重的水热侵蚀。

由7月填筑时的冻结锋面高程差随时间变化曲线(图6b)可知:冻结锋面高程差先随着时间的增长而增大,在第70天时达到最大,约为 96 cm ,随后冻结锋面高程差随时间发展逐渐减小;从水平位置变化来看,同一时刻冻结锋面高程差在天然地表下发展较为稳定,随后自坡脚处增大,在蒸发段处降至 0 cm 。分析认为,热棒高导热性的影响半径大约为 1.5 m ,天然地表下地温场不受热棒高导热性的影



a. 6月填筑;b. 7月填筑;c. 8月填筑;d. 9月填筑。

图 6 不同填筑时间的冻结锋面高程差

Fig.6 Height difference of freezing front at different filling time

响,其温度变化主要由大气温度控制,因此下部冻结锋面基本处于同一深度;7月填筑时路基初始温度较高且消散时间较长,路基下部未受热棒导热性影响的土体冻结锋面在路基填料和大气温度的影响下逐渐下降,但下降速度较天然地表慢,因此冻结锋面高程差在此处有不同程度的上凸现象。

由图 6c 可知,8月填筑路基,冻结锋面高程差随时间增长逐渐增大,在填筑后 50 d 左右达到最大,随后开始下降。分析认为,8月路基填筑完成 50 d 后,路基内外温差较大,虽然未达到热棒启动工作条件,但外界低温可沿冷凝段管壁向下传递,减缓了冻结锋面最低点的下降速度;而其他位置的冻结锋面仍在下降,因此冻结锋面高程差在填筑完成 50 d 后也随之降低。

由图 6d 可知,9月填筑路基,材料的高导热性影响时间较短,因为此时即将进入冷季,热棒能较快达到启动工作条件,产冷量足以在短时间内抵消热棒高导热性的影响。因此,9月进行路基填筑,热棒高导热性所产生的负面影响最小。

图 7 为不同填筑时间下冻结锋面最低点的时间变化曲线。由图 7 可知,6月填筑时,冻结锋面下降时间最长,但由于冻结锋面初始位置较高,其下降后的冻结锋面最低点深度也相对较浅。7月进行路基填筑,填筑完成后的初始冻结锋面深度约为 1.3 m;填筑后第 102 天,冻结锋面最低点达到最大下降深度,为 4.0 m,下降速率约为 2.63 cm/d。8月和 9月填筑路基,冻结锋面最低点下降时间较短,深度较低,分别下降了约 1.8 和 1.1 m。可见 7月填筑冻结锋

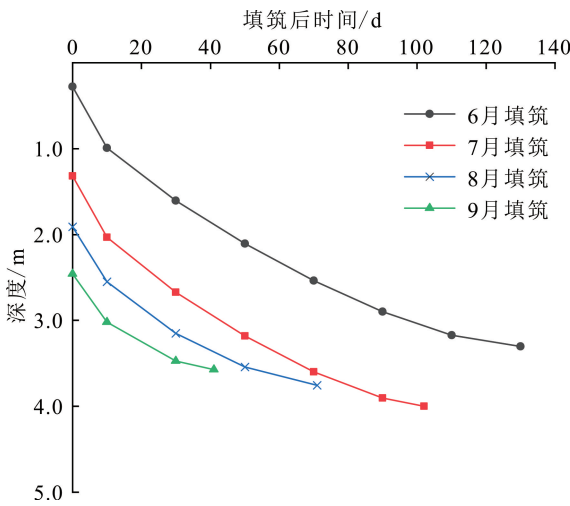


图 7 不同填筑时间的冻结锋面最低点深度

Fig.7 Depth of freezing front nadir for different filling times

面最低点位置为 4 种工况中最深,大约为 4.0 m。

综上所述,虽然 6 月填筑路基时边坡下部冻结锋面高程差上凸较为严重,但结合冻结锋面最低点的变化情况来看,其下降后的深度与其他月份相比较浅。7 月填筑时冻结锋面最低点在所研究的几个月份中下降最深,应属于最不利工况。由于冻结锋面下凹深度较大,地下 4.0 m 内与蒸发段接触的冻土已经全部融化,而冻土融化沉降可能对热棒的稳定性产生负面影响,因此在路基填筑短期内,应对热棒进行位移监测。为探究热棒高导热性对工程最不利的影响,对 7 月填筑路基这一工况进行后续分析。

4.3 填料温度的影响

为分析不同填料温度下热棒高导热性对冻土温度场的影响,选取高于填筑当日天然地表温度 4、7 和 10 °C 的路基填料温度进行计算。填筑时间 7 月 15 日的天然地表温度为 8 °C,则路基填料温度分别为 12、15 和 18 °C。图 8 为第 102 天时的冻结锋面高程差,此时冻结锋面已下凹至最低点。

由图 8 可知,冻结锋面高程差随填料温度增大而增大。当填料温度从 12 °C 增大至 18 °C,天然地表下冻结锋面高程差增大 12.4 cm。分析认为高导热材料优先向下部传递填料温度,填料温度增大,对下部冻土的影响效果也增大,因而冻结锋面最低点的下降深度增大。而天然地表下温度场受填料温度影响较小,不同工况下的冻结锋面位置无变化,从而导致冻结锋面高程差随填料温度升高而增大。因此在进行路基填筑时,降低填料温度可减少热棒高导热性对下部冻土温度场的影响。

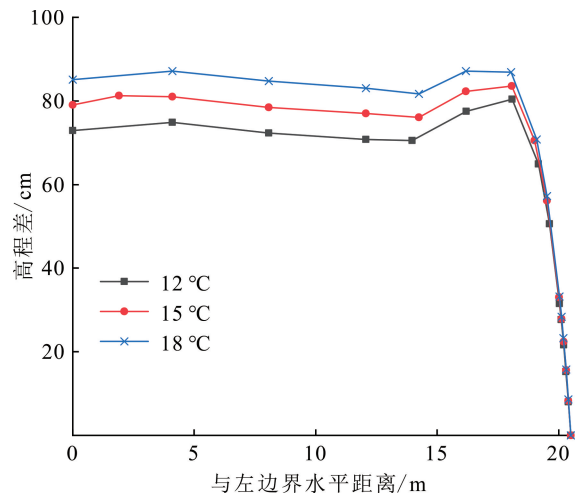


图 8 第 102 天不同填料温度冻结锋面高程差

Fig.8 Height difference of freezing front with different fill temperatures on the 102th day

4.4 热棒导热系数的影响

计算在 7 月填筑时导热系数为 30.5、36.5 和 42.5 W/(m·K) 三种不同工况下冻结锋面高程差的变化情况。图 9 为计算周期内,不同工况下冻结锋面下凹至最低点时的高程差变化曲线。

由图 9 可知,冻结锋面高程差随着热棒导热系数的增大而增大。热棒导热系数增大,能将大气热量更快传递至蒸发段,当导热系数从 30.5 W/(m·K) 增大至 42.5 W/(m·K) 时,天然地表下冻结锋面高程差增大 34.8 cm。相比初始填料温度的影

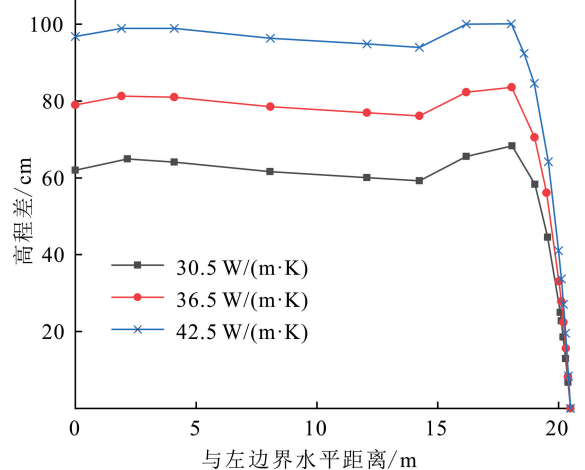


图 9 不同导热系数下冻结锋面高程差

Fig.9 Height difference of freezing front with different thermal conductivity

响,增大热棒导热系数对冻结锋面高程差的影响更大。因此,在选取热棒规格时,应考虑在不影响热棒降温效果的前提下适当降低热棒的导热系数。

5 结论

1)路基填筑短期内地基温度场受热棒高导热性影响,冻结锋面呈“V”字形下凹,且下凹最低点始终沿热棒轴向面上下位移。

2)6月填筑路基,路肩下部冻结锋面向上凸起较大,上部未冻水沿冻结锋面向坡脚和蒸发段处迁移,易引发更严重的水热侵蚀;7月填筑路基,冻结锋面最低点深度为4.0 m,对热棒稳定性最不利;8月和9月填筑,地基温度场受热棒高导热性影响较小。

3)冻结锋面高程差随路基填料温度或热棒导热系数的增大而增大。但在热棒高导热性作用下,导热系数对地温场的影响明显大于路基填料初始温度的影响。在实际施工时应尽量降低路基填料温度或在不影响热棒降温效果的前提下选取导热系数较小的热棒材料。

参考文献(References):

[1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[2] 赵越,李磊,闫晗,等.水化-冻融耦合作用下大理岩单轴蠕变力学特性[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(4):1195-1203.
Zhao Yue, Li Lei, Yan Han, et al. Uniaxial Creep Mechanical Properties of Marble Under Hydration Freeze-Thaw Coupling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1195-1203.

[3] 杨爱武,王斌彬,钟晓凯.冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化[J].水文地质工程地质,2022,49(1):57-65.
Yang Aiwu, Wang Binbin, Zhong Xiaokai. Dynamic and Structural Characteristics of Sludge Solidified Light Soil Under Freezing-Thawing Action [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 57-65.

[4] 柴寿喜,张琳,魏丽,等.冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构[J].水文地质工程地质,2022,49(5):96-105.
Chai Shouxi, Zhang Lin, Wei Li, et al. Compressive

Properties and Microstructure of Saline Soil Added Fiber and Lime Under Freezing-Thawing Cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 96-105.

[5] 毕贵权,杨凯飞,穆彦虎,等.青藏公路冻土路基阴阳坡热效应研究[J].兰州理工大学学报,2019,45(2):135-142.
Bi Guiquan, Yang Kaifei, Mu Yanhu, et al. Investigation of Thermal Effect of Sunny-Shady Slope of Permafrost Embankment of Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(2): 135-142.

[6] 张中琼,吴青柏.青藏高原多年冻土热融灾害发展预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):454-461,484.
Zhang Zhongqiong, Wu Qingbai. Thermal Hazards Prediction on Qinghai-Tibet Plateau Permafrost Region [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 454-461, 484.

[7] 俞祁浩,程国栋,何乃武,等.不同路面和幅宽条件下冻土路基传热过程研究[J].自然科学进展,2006,16(11):1482-1486.
Yu Qihao, Cheng Guodong, He Naiwu, et al. Study on the Heat Conduction Process in Different Pavement and Wide Pavement [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(11): 1482-1486.

[8] 马敏,齐毅,郭颖,等.不同换填材料对多年冻土地区公路路基温度状况影响的数值模拟[J].森林工程,2022,38(4):131-139,146.
Ma Min, Qi Yi, Guo Ying, et al. Numerical Simulation of Influence of Different Replacement Materials on Highway Subgrade Temperature in Permafrost Area [J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 131-139, 146.

[9] 苑晓青,吴泽炬,王清,等.冻融循环对钙剂改良土体分散性效果的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1812-1825.
Yuan Xiaoqing, Wu Zeju, Wang Qing, et al. Effect of Freeze-Thaw Cycle on the Improvement of Dispersed Soil by Calcium Ion Agent [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1812-1825.

[10] 丁宁.季冻区改良土路基抗冻效果试验及数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2021.
Ding Ning. Experiment and Numerical Simulation of Anti-Freezing Effect of Improved Soil Subgrade in Seasonal Frozen Area [D]. Changchun: Jilin University, 2021.

- [11] 张明义,张建明,赖远明.青藏高原多年冻土区铁路路堤临界高度数值计算分析[J].冰川冻土,2004,26(3):312-318.
Zhang Mingyi, Zhang Jianming, Lai Yuanming. Numerical Analysis of the Critical Height of Railway Embankment in Permafrost Regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3):312-318.
- [12] 郭春香,吴亚平,董晟,等.热棒填土路基降温效果的三维非线性有限元分析[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):202-207.
Guo Chunxiang, Wu Yaping, Dong Sheng, et al. Three-Dimensional Nonlinear Numerical Analysis of Cooling Effect of Thermosyphon on Filling Subgrade [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1):202-207.
- [13] 李长雨,马桂霞,郝光,等.季节冻土地区路基冷阻层温度场效应[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(4):1174-1181.
Li Changyu, Ma Guixia, Hao Guang, et al. Effect on Temperature Field of Subgrade Cold Resistive Layer in Seasonal Frost Region [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(4):1174-1181.
- [14] Perreault P, Shur Y. Seasonal Thermal Insulation to Mitigate Climate Change Impacts on Foundations in Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 132:7-18.
- [15] 盛煜,温智,马巍,等.青藏铁路多年冻土区热棒路基温度场三维非线性分析[J].铁道学报,2006,28(1):125-130.
Sheng Yu, Wen Zhi, Ma Wei, et al. Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Thermal Regime of the Two-Phase Closed Thermosyphon Closed Thermosyphon Embankment of Qinghai-Tibetan Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1):125-130.
- [16] 张晓. 青藏公路多年冻土区热棒路基变形监测及理论分析[D].北京:北京交通大学,2018.
Zhang Xiao. Deformation Monitoring and Theoretical Analysis of Heat Pipe Subgrade of Qinghai-Tibet Highway in Permafrost Region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [17] 郭春香,吴亚平.热棒材料高导热性对其降温效果影响的三维非线性有限元分析[J].兰州交通大学学报,2013,32(1):25-29.
Guo Chunxiang, Wu Yaping. Three-Dimensional Nonlinear Numerical Influence Analysis of Material High Thermal Conductivity of Thermal Probes on Filling Subgrade [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(1):25-29.
- [18] Richards L A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums [J]. Physics, 1931, 1:318-333.
- [19] 卢宁, Likos W J. 非饱和土力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2012:269-287.
Lu Ning, Likos W J. Unsaturated Soil Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012:269-287.
- [20] Gardner W R. Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table [J]. Soil Science, 1958, 85(4):228-232.
- [21] Taylor G S, Luthin J N. A Model for Coupled Heat and Moisture Transfer During Soil Freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15:548-555.
- [22] 白青波,李旭,田亚护,等.冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J].岩土工程学报,2015,37(增刊2):131-136.
Bai Qingbo, Li Xu, Tian Yahu, et al. Equations and Numerical Simulation for Coupled Water and Heat Transfer in Frozen Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup.2):131-136.
- [23] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学 [M]. 北京:科学出版社, 2010.
Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen Soil Physics [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [24] Mu Y H, Li G Y, Yu Q H. Numerical Study of Long-Term Cooling Effects of Thermosyphons Around Tower Footings in Permafrost Regions Along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121:237-249.
- [25] 曹元兵,盛煜,吴吉春,等.上边界条件对多年冻土地温场数值模拟结果的影响分析[J].冰川冻土,2014,36(4):802-810.
Cao Yuanbing, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Influence of Upper Boundary Conditions on Simulated Ground Temperature Field in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4):802-810.
- [26] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J].冰川冻土,1988,10(1):8-14.
Zhu Linnan. Study of the Adherent Layer on Different Types of Ground in Permafrost Regions on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1):8-14.

- [27] 杨凯飞,穆彦虎,马巍,等.气候变暖下青藏高原冻土路基地温场演化规律研究[J].地震工程学报,2018,40(4):734-744.
Yang Kaifei, Mu Yanhu, Ma Wei, et al. The Evolution Law of Ground Temperature Field in Permafrost Roadbed of the Qinghai-Tibet Plateau Under Climate Warming [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 734-744.
- [28] 冻土地区建筑地基基础设计规范:JGJ 118—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
The Designing Criterion of the Foundations in Permafrost Regions: JGJ 118—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [29] 周亚龙,郭春香,王旭,等.基于热棒功率变化下多年冻土区输电塔热棒桩基的长期降温效果预测[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1461-1469.
Zhou Yalong, Guo Chunxiang, Wang Xu, et al. Prediction of Long-Term Cooling Effect of Thermal Pipe Foundation of Transmission Tower in Permafrost Regions Considering the Change of Thermal Pipe Power [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1461-1469.
- [30] 孙文,吴亚平,郭春香.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):15-19.
Sun Wen, Wu Yaping, Guo Chunxiang. Influences of Two-Phase Closed Thermosyphon on Permafrost Roadbed Stability [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 15-19.
- [31] 王蕴嘉,郭惠芹,叶阳升,等.多年冻土区路基填筑短期内冻土温度场数值分析[J].中国铁道科学,2021,42(4):9-18.
Wang Yunjia, Guo Huiqin, Ye Yangsheng, et al. Numerical Analysis of Frozen Soil Temperature Field in a Short Period of Subgrade Filling in Permafrost Region [J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 9-18.
- [32] 张军,张泽,郭磊,等.不同施工季节对多年冻土区锥柱式基础地温回冻影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):502-513.
Zhang Jun, Zhang Ze, Guo Lei, et al. Influence of Different Construction Seasons on Ground Temperature Refreezing of Cone-Cylindrical Foundation in Permafrost Regions [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 502-513.