

文章编号:1006-2106(2013)11-0007-06

次生不良冻土对路基稳定性影响的数值分析^{*}

孙 文^{**} 吴亚平 蔺鹏臻 胡莉莉

(兰州交通大学, 兰州 730070)

摘要:研究目的:多年冻土区修筑路基工程会形成次生不良冻土现象,次生不良冻土对铁路、公路路基等建筑物会产生各种危害。研究多年冻土区不良冻土现象的形成机理和发育对防治次生不良冻土的发生和发展,保证工程的稳定和安全有着非常重要的意义。本文通过对次生不良冻土现象中的热融滑坍进行数值分析并提出次生灾害的防治及工程的保护措施。

研究结论:本文对多年冻土区次生不良灾害的形成机理及变化过程进行研究,得出如下结论:(1)路基的阴坡和阳坡之间存在热差异,在吸收热量时路基阳坡融化深度比阴坡融化深度要大,阴阳坡效应对路基融化深度的影响是不容忽视的;(2)考虑热融沟渗流作用的影响时路基横向的不均匀变形会加剧,从而会形成路基纵向裂缝的病害,严重影响路基的稳定性;(3)本文为在多年冻土地区的工程建设提供了一定的理论依据,对防治次生不良冻土灾害具有参考意义。

关键词:青藏铁路;次生不良冻土;数值分析;防治措施

中图分类号:U413.168 **文献标识码:**A

The Numerical Analysis of the Impact of the Secondary Harmful Frozen Soil on the Subgrade Stability

SUN Wen, WU Ya - ping, LIN Peng - zhen, HU Li - li

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Research purposes: In permafrost regions, secondary harmful frozen soil phenomena can be formed by constructing subgrade engineering, and the secondary harmful frozen soil has many harmful impacts on buildings such as railway, highway roadbed. Studying the formation mechanism and development of the adverse phenomenon about frozen soil in permafrost regions has very important significance for controlling the happening and development of the secondary harmful frozen soil, and at the same time for guaranteeing the stability and safety of the engineering. In this article, we put forward the prevention of secondary disasters and engineering protection measures by analysing the thaw - frozen landslide in secondary harmful frozen soil phenomena.

Research conclusions: In this paper, we studied the formation mechanism and changing process of secondary harmful frozen soil in permafrost regions and got the following conclusions: (1) Thermal differences exist between shady slope and sunny slope of roadbed, melting depth in sunny slope is bigger than shady slope when absorbing heat, and the effect of shady and sunny slope on the depth of roadbed melting cannot be ignored; (2) Considering the seepage effect, roadbed transverse inhomogeneous deformation will increase, which will form the disease of roadbed longitudinal cracks and have serious influence on the stability of the roadbed; (3) In this paper, we provide some theoretical foundations about the

^{*} 收稿日期:2013-05-07

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1139);国家自然科学基金项目(51104081);国家自然科学基金项目(51168030);甘肃省自然科学基金项目(1007JZA122)

^{**} 作者简介:孙文,1976年出生,男,副教授。

engineering construction in permafrost regions, which have reference meaning for controlling the secondary harmful frozen soil.

Key words: Qinghai-Tibet railway; secondary harmful frozen soil; numerical analysis; control measures

1 引言

不良冻土现象,是指土体在冻结和融化作用下产生的物理地质现象。在多年冻土区修筑铁路会遇到许多不良冻土现象,反过来,铁路的修建又会形成新的不良冻土现象即次生不良冻土现象,对铁路路基等建筑物会产生各种危害。多年冻土区不仅气候严寒,而且还有多年冻土层作为底板使地表水的下渗和多年冻土层上水的活动受到约束,加之工程结构物的修建破坏了天然的水文地质条件,这是多年冻土区次生不良地质现象发生和存在的基本条件。多年冻土区常见的次生不良地质现象主要有冰锥(冰丘、冰幔)、冻胀丘、厚层地下冰、热融滑坍和热融湖塘等^[1-2]。因此,研究青藏铁路沿线多年冻土区主要不良冻土现象形成的机理和发育对避免和防治次生不良冻土现象的发生和发展,保证铁路工程的稳定和安全有着非常重要的现实意义。潘卫东等^[3]对青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响作了分析与研究,余绍水等^[4]对青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象进行了调查和形成机理作了分析,王铁行^[5]对多年冻土地区路基冻胀变形做了分析,采用考虑拉破坏理论的热弹性力学方法,分析了多年冻土地区路基变形分布和演变规律。

通过以上的分析可见,国内外直接采用数值分析的方法研究青藏铁路次生不良冻土现象的问题尚不完善。鉴于此,本文以现场实测地温数据为依据,考虑受全球气候变暖的影响,青藏高原多年冻土区气温升高的条件下,研究多年冻土区有严重次生灾害的铁路路基在考虑阴阳坡效应下的温度分布,从而研究热融滑坍及阴阳坡效应对冻土路基的温度分布规律的影响,对次生不良冻土现象中的热融滑坍情况进行数值分析,并提出了次生灾害的防治及保护措施。

2 工程概况

青藏铁路 K 980+000 工况在修建后出现了较严重的次生不良灾害。2003 年路基填土施工完成后,2004 年在路基右侧施工了挡水埝和排水沟,但考虑到二者之间积水的不良影响,2006 年又拆除了挡水埝并对地表进行了整平,这一措施尽管排除了积水的可能性,但严重破坏了原地表的条件。在此工程活动的影响下,在原挡水埝一带出现了长度达 180 m 的热融沟,

2007 年 7 月融沉深度约 20 cm,至 9 月深度达 40 cm,热融沟横断面示意图如图 1 所示。由于原地表条件的严重破坏和热融沟的发育,其下冻土的温度也会发生显著变化,尽管目前热融沟下的地温升高并不影响路基的热稳定性,但随着时间的推移,其侧向热侵蚀将不断向路基方向发展,并最终引起路基下地温的升高。

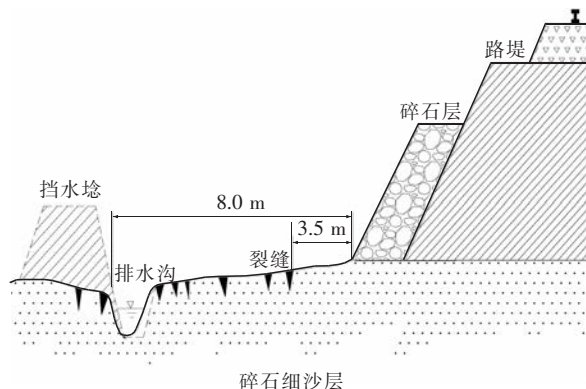


图 1 青藏铁路 K 980+000 西侧热融沟横断面

3 控制微分方程及有限元计算公式

3.1 冻土温度场基本方程

由于土体初始含水量不高,考虑到土骨架和介质的热传导和冰水相变作用,且认为未冻水含量是温度的函数,忽略对流传热项,仅考虑水分迁移和冰水相变问题时,土体冻结过程的温度场方程为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

式中 C ——介质的热容量;

T ——温度;

λ ——介质导热系数;

L ——水的相变潜热;

ρ_i ——冰容量;

θ_i ——土体中冰的体积含量。

用显热熔法考虑相变界面,假设相变发生在 T_m 附近 ΔT 的温度区域内,且 λ 在相变区域内线性变化,对于冻结区和未冻区的热容量及导热系数分别用 C_u , C_f 和 λ_u , λ_f 表示,构造的热容量及导热系数的表达式为:

$$\bar{C} = \begin{cases} C_f & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{L \rho_w \theta_w}{2 \Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T) & \\ C_u & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_f = & T < (T_m - \Delta T) \\ \lambda_u + \frac{\lambda_f - \lambda_u}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & (T_m - \Delta T) \leq T \leq T_m + \Delta T \\ \lambda_u & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

初始条件为:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (4)$$

式中 T_0 ——计算时冻土路基的初始地温,通过实测地温取值。

边界条件为:

$$\text{在固定边界 } \Gamma_1 \text{ 上: } T = T_w \quad (5)$$

$$\text{在对流边界 } \Gamma_2 \text{ 上: } \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T_a - T) \quad (6)$$

$$\text{在热流边界 } \Gamma_3 \text{ 上: } -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_v \quad (7)$$

式中 α ——常数;

T_a ——环境温度,即地表下附面层底温度;

q_v ——计算模型下边界上的单位面积热流率。

3.2 冻土温度场与渗流场耦合作用的基本方程

冻土中渗流场与温度场是相互作用,相互影响的,主要表现在以下两个方面:一方面,冻土渗流场的存在与改变,将使渗透水流参与土—水系统的热量传递与交换,从而影响冻土温度的分布;另一方面,冻土温度场的改变,导致地下水赋存环境(温度)发生相应的变化,改变了土体的热物理性能,进而可引起岩土渗透性能、地下水渗流特性及相态的改变,发生渗流场的改变。以上两个方面的相互作用达到动态稳定状态,即渗流场温度场的耦合^[6-8]。

假设 Ω_f 和 Ω_u 分别表示组成分析区域 Ω 的正冻区和未冻区; $S(t)$ 表示冻融相变的移动界面; $F(t)$ 表示渗流自由面。在某一瞬时刻,各相的导热系数、渗透系数及扩散率为一定值,与空间位置无关,且土体为各向同性,则冻土温度场与渗流场的计算模型为^[9]:

在正冻区 Ω_f 内:

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right) - c_w \rho_w \left(V_x^f \frac{\partial T_f}{\partial x} + V_y^f \frac{\partial T_f}{\partial y} + V_z^f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y^f \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z^f \frac{\partial h_f}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tx} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{Ty} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Tz} \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + q \quad (9)$$

$$V_x^f = -k_x^f \frac{\partial h_f}{\partial x}, V_y^f = -k_y^f \frac{\partial h_f}{\partial y}, V_z^f = -k_z^f \frac{\partial h_f}{\partial z} \quad (10)$$

在未冻区 Ω_u 内:

$$C_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \lambda_u \left(\frac{\partial^2 T_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_u}{\partial z^2} \right) - c_w \rho_w \left(V_x^u \frac{\partial T_u}{\partial x} + V_y^u \frac{\partial T_u}{\partial y} + V_z^u \frac{\partial T_u}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$S_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^u \frac{\partial h_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y^u \frac{\partial h_u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z^u \frac{\partial h_u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tx} \frac{\partial T_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{Ty} \frac{\partial T_u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Tz} \frac{\partial T_u}{\partial z} \right) + q \quad (12)$$

$$V_x^u = -k_x^u \frac{\partial h_u}{\partial x}, V_y^u = -k_y^u \frac{\partial h_u}{\partial y}, V_z^u = -k_z^u \frac{\partial h_u}{\partial z} \quad (13)$$

在 $S(t)$ 上有:

$$T_f[S(t), t] = T_u[S(t), t] = T_m$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial n} = L \gamma_d (W - W_u) \frac{d[S(t)]}{dt} \quad (14)$$

$$\text{在 } F(t) \text{ 上有: } H = y, \frac{\partial H}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

式中 下标 f 和 u——分别表示冻结和融化状态;

ρ ——土体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c ——土体比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$);

t ——时间 (h);

λ ——导热系数;

T ——温度 ($^{\circ}\text{C}$);

L ——水的相变潜热 (J);

w_0 ——初始含水率 (%);

ζ ——冻融界面;

n ——冻融界面上的方向矢量。

由于导热系数、渗透系数、体积热容量等均强烈地依赖于温度,加之温度场冻融界面和渗流自由面均为移动界面,这在数学上是一个强非线性问题,目前无法求其解析解。应用空间域上有限单元法和时间域上有限差分法相结合,可以得到温度场和渗流场的有限元计算公式,在此用 Galerkin 法求其数值解。利用 BATHE 的方法确定渗流自由面,最后用 Crank - Nicolson 格式对温度场、渗流场逐时段迭代求解,得到该问题的数值解。

4 计算模型及参数选取

本文以具有代表性的冻土区某路基结构作为分析模型,计算结构简图如图 2 所示。该典型地段的水文地质资料及其热力学参数如表 1 所示。

表 1 水文地质资料及热力学参数

土层深度/m	岩性说明	含水量/%	容重 /(g/cm ³)	干容重 /(g/cm ³)	热容量/[kJ/(m ³ ·℃)]		导热系数/[W/(m·℃)]	
					融土	冻土	融土	冻土
地面以上	路基填土,砂土	6.0	2.30	2.17	2 183.0	1 693.7	1.91	2.71
0~1.4	细砂	15.0	2.4	2.09	2 785.2	1 994.8	2.18	3.05
1.4~1.9	黏土	20.0	1.95	1.63	2 676.5	2 208.1	1.24	1.38
1.9~2.4	黏土	126.5	1.47	0.65	1 030.0	890.0	1.13	1.58
2.4~5.4	黏土	45.0	1.91	1.32	2 990.1	2 203.9	0.97	1.67
>5.4	砂岩及强弱风化岩	15.0	2.18	1.90	2 284.6	2 284.6	2.70	2.70

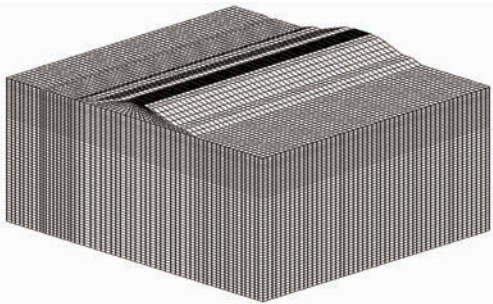


图 2 计算结构简图

4.1 初始条件及边界条件

根据实测资料及考虑全球气温变化的影响,同时根据附面层理论(朱林楠,1988),建立了天然地表、热融沟、路基阳坡、路基阴坡上边界随时间变化的条件分别为:

$$\begin{aligned} T_{\alpha 1} &= -2.47 + 12.06 \times \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t \\ T_{\alpha 2} &= -3.42 + 7.55 \times \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t \\ T_{\alpha 3} &= -0.96 + 8.05 \times \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t \\ T_{\alpha 4} &= -3.41 + 8.05 \times \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6}{50 \times 365 \times 24}t \end{aligned} \tag{16}$$

4.2 渗透系数及渗流速度的确定

关于渗透系数,可将渗流域分成非饱和的负压区,饱和的正压区和过渡区三部分,并把渗透系数随孔隙压力的变化简化成三段折线,过渡区内渗透系数随孔隙压力 $p = \rho_w g(h - z)$ 直线变化。

考虑到冻土的不透水性,计算时取冻土的渗透系

数仅为融土的,从而可得到渗透系数的表达式^[10]

$$K_i(i=x,y,z) = \begin{cases} K'_i & T > T_m \\ \frac{K'_i}{100} & T \leq T_m \end{cases} \tag{17}$$

在地下水流动主要以受压水头压差所控制的强迫对流时,对于含水层的单元,渗流速度事先难以确定,本文参考文献[11]来确定。

4.3 渗流自由面的求解

本文采用文献[12]介绍的基于固定网格上的结点虚流量法,该法的有限元迭代格式为:

$$[K]\{h\} = \{Q\} - \{Q_2\} + \{\Delta Q\} \tag{18}$$

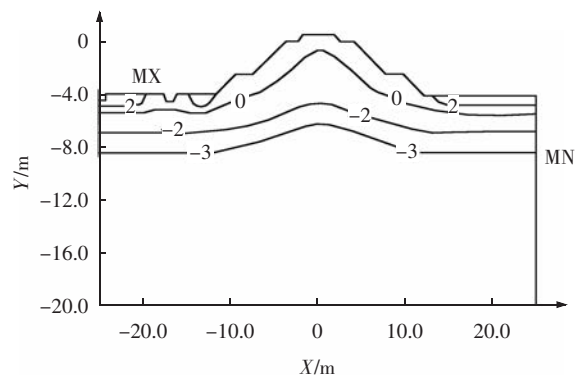
式中 $[K]$ 、 $\{h\}$ 和 $\{Q\}$ ——分别为计算域的总传导矩阵、结点水头列阵和结点等效流量列阵;

$\{Q_2\}$ ——渗流虚域的结点等效流量列阵;

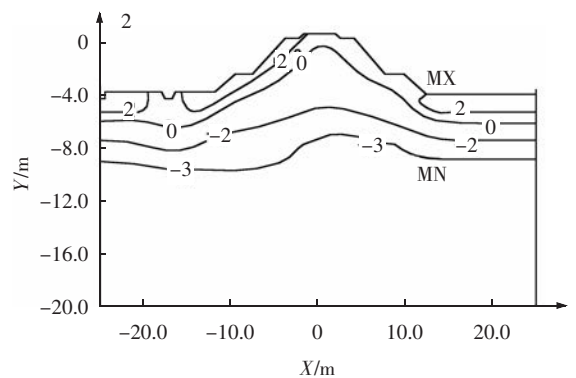
$\{\Delta Q\} = [K_2]\{h\}$ ——渗流虚域中虚单元和过渡单元所贡献的结点虚流量列阵。

5 数值计算结果与分析

从图 3(a)~5(a)中可知,不考虑阴阳坡效应的情况下,路基左右坡面的温度分布较为对称。随着路基运行时间的增加,在渗流作用的影响下路基左坡脚的温度高于右坡脚,左坡脚的融化深度也大于右坡脚,路基及其下伏土体的温度分布不对称。左侧天然土体的温度高于右侧天然土体,融化深度也比右侧的深,两侧天然土体的温度分布很不对称。从图 3(b)~5(b)中可见,在考虑阴阳坡效应的情况下,左坡面下出现了 2℃ 等温线,路基左坡的温度明显高于右坡的温度,路基左右坡面的温度和路基下伏土体的温度分布很不对称,两侧天然土体的温度分布也更加地不对称,热融沟处的融化深度比未考虑阴阳坡效应时的深,可见,阴阳坡效应导致冻土融化深度差异增加。同时,阴阳坡差异导致热融沟处的融化深度增加,随着时间的推移会对路基的稳定性构成威胁。

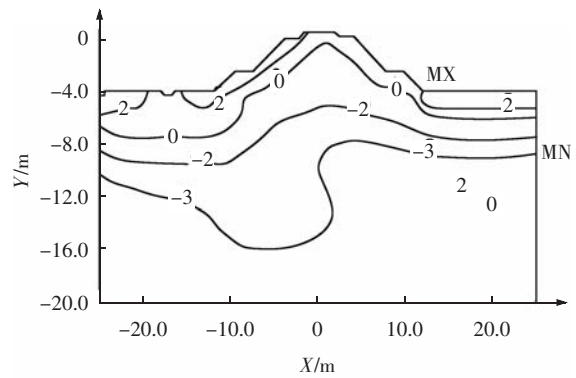


(a) 未考虑阴阳坡效应的地温分布

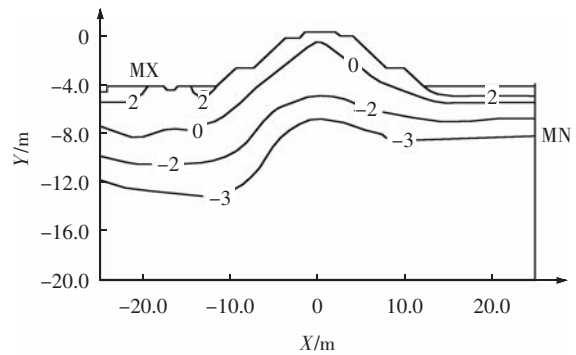


(b) 考虑阴阳坡效应的地温分布

图 3 路基运行第 2 年 10 月 15 日地温分布(单位:℃)

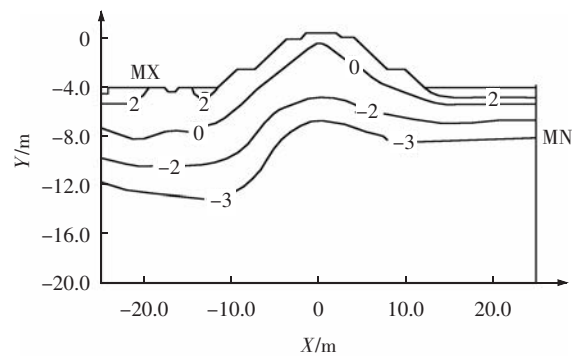


(a) 未考虑阴阳坡效应的地温分布

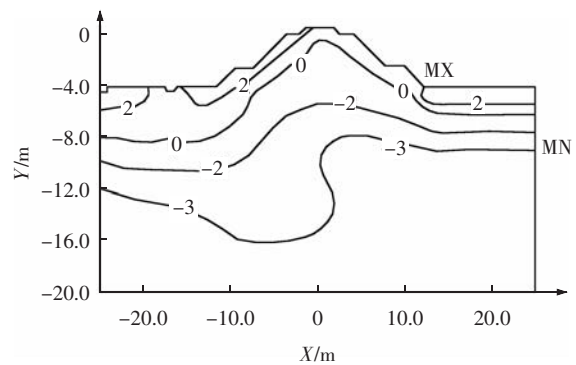


(b) 考虑阴阳坡效应的地温分布

图 4 路基运行第 10 年 10 月 15 日地温分布(单位:℃)



(a) 未考虑阴阳坡效应的地温分布



(b) 考虑阴阳坡效应的地温分布

图 5 路基运行第 30 年 10 月 15 日地温分布(单位:℃)

表 2 热融沟及路基不同部位的最大融化深度

位置	不考虑阴阳坡效应/年			考虑阴阳坡效应/年		
	第 2 年	第 10 年	第 30 年	第 2 年	第 10 年	第 30 年
原地表/m	1.73	1.74	1.76	1.73	1.74	1.76
热融沟/m	2.33	3.3	4.04	2.6	3.50	4.20
左坡脚 /m	1.45	2.8	2.85	1.60	3.30	3.71
右坡脚/m	0.96	1.0	1.16	0.98	1.03	1.17
左路肩/m	2.28	2.31	2.41	2.75	2.80	2.88
右路肩/m	2.29	2.30	2.41	2.26	2.28	2.40

从表 2 中可知,热融沟处的融化深度最大。左右路肩的融化深度基本相同,说明路堤内冻土上限呈对称分布。左坡脚的融化深度比右坡脚的大,最大差值为 1.69 m。由于热融沟处渗流的影响,左右坡脚处冻土上限呈现“左深右浅”的不对称分布,路基的温度场分布不对称。左路肩的融化深度比右路肩的融化深度大,最大差值为 0.52 m,由于阴阳坡差异路堤内冻土上限呈不对称分布。

6 结论

(1) 由于阴阳坡的热差异,受路基边坡吸热和边坡填土较薄的影响,以路基上道床中心为参照点,最大融化深度曲线峰点略向右肩(阴坡)偏移,造成路基左

肩(阳坡)融化深度比右肩(阴坡)融化深度要大,渗流作用会加剧路基横向的不均匀变形,形成路基纵向裂缝的病害,会严重影响路基的稳定性。

(2)在考虑阴阳坡效应的情况下,路基热融沟、左坡脚、左路肩的融化深度逐年增加,右坡脚、右路肩的融化深度变化不大。由计算知,阴阳坡效应对路基融化深度的影响是不容忽视的。考虑阴阳坡效应分析青藏铁路次生不良冻土问题更科学、更接近实际情况。

(3)由于原地表条件的严重破坏和热融沟的发育,其下冻土的温度也会发生显著变化,尽管目前热融沟下的地温升高并不影响路基的热稳定性,但随着时间的推移,其侧向热侵蚀将不断向路基方向发展,并最终引起路基下地温的升高,需要采取主动的方法进行整治,可以采用热管等致冷措施来主动冷却土体,实现对次生不良冻土现象的防治来保护路基。

参考文献:

- [1] 《青藏冻土研究文集》编写组. 青藏冻土研究文集[M]. 北京:科学出版社, 1983.
Compilation Group of the Corpus. Study Corpus of Permafrost in Qinghai - Tibet area [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [2] 王小军,曾辉辉,等. 青藏铁路多年冻土区次生不良冻土现象的调查分析[J]. 铁道工程学报, 2003(增刊): 1-4.
Wang Xiaojun, Zeng Huihui, etc. Investigation and Analysis of Seocndary Unfavourable Phenomenon of Permafrost in Permafrost Area on Qinghai - Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003(S): 1-4.
- [3] 潘卫东,朱元林,吴亚平,等. 青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002(1): 127-131.
Pan Weidong, Zhu Yuanlin, Wu Yaping, etc. The Effect of Harmful Feature Related to Frozen Ground on Building Railway in Permafrost Area on Qinghai - Tibet Plateau[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2002(1): 127-131.
- [4] 余绍水,潘卫东,等. 青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(6): 1082-1085.
Yu Shaoshui, Pan Weidong, etc. Investigation and Mechanism Analysis of the Major Secondary Harmful Frozen - soil Phenomena Along Qinhai - Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(6): 1082-1085.
- [5] 王铁行. 多年冻土地地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005(2): 1-5.
Wang Tiehang. Analysis of Frost Heave on Subgrade in Permafrost Regions[J]. China Journal of Highway And Transport, 2005(2): 1-5.
- [6] 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. 中国科学(D辑), 2003(6): 602-607.
Cheng Guodong. The Impact of Local Factors on Permafrost Distribution and Its Inspiring for Design Qinghai - Tibet Railway[J]. Science in China (Series D), 2003(6): 602-607.
- [7] 程国栋. 用冷却路基的方法修筑青藏铁路[J]. 中国铁道科学, 2003(3): 1-4.
Cheng Guodong. Construction of Qinghai - Tibet Railway with Cooled Roadbed [J]. China Railway Science, 2003(3): 1-4.
- [8] 马巍,程国栋,吴青柏. 多年冻土地地区主动冷却路基方法的研究[J]. 冰川冻土, 2002(5): 579-587.
Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary Study on Technology of Cooling Foundation in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002(5): 580-587.
- [9] 陈庆中,张弥,冯星梅. 应力场、渗流场和流场耦合系统定边值定初值问题的变分原理[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(5): 497-502.
Chen Qingzhong, Zhang Mi, Feng Xingmei. The Variational Principle for Problems of Fluid Flow Through Porousmedia with Fixed Boundary and Initial Conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999(5): 497-502.
- [10] 吴林高,缪俊发,等. 渗流力学[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1996.
Wu Lingao, Miao Junfa, etc. Percolation Mechanics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing, 1996.
- [11] 龚道勇. 三维稳定饱和一非饱和渗流场的有限元分析及应用[D]. 南京:河海大学, 2002.
Gong Daoyong. The Analysis and Application of Seepage Field on Three - dimensionanl Stable Seepage [D]. Nanjing: HoHai University, 2002.
- [12] 罗启北,郝方,等. ANSYS 在渗流动态分析中的应用[J]. 贵州水力发电, 2005(1): 68-71.
Luo Qibei, Hao Fang, etc. The Application of ANSYS on Seepage Field [J]. Guizhou Water Power, 2005(1): 68-71.

次生不良冻土对路基稳定性影响的数值分析

作者: [孙文](#), [吴亚平](#), [蔺鹏臻](#), [胡莉莉](#), [SUN Wen](#), [WU Ya-ping](#), [LIN Peng-zhen](#), [HU Li-li](#)
作者单位: [兰州交通大学, 兰州, 730070](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [Journal of Railway Engineering Society](#)
年, 卷(期): 2013(11)

参考文献(12条)

1. 《青藏冻土研究文集》编写组 青藏冻土研究文集 1983
2. [王小军](#); [曾辉辉](#) 青藏铁路多年冻土区次生不良冻土现象的调查分析[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2003(增刊)
3. [潘卫东](#); [朱元林](#); [吴亚平](#) 青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响[期刊论文]-[兰州大学学报\(自然科学版\)](#) 2002(01)
4. [余绍水](#); [潘卫东](#) 青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(06)
5. [王铁行](#) 多年冻土地区路基冻胀变形分析[期刊论文]-[中国公路学报](#) 2005(02)
6. [程国栋](#) 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[期刊论文]-[中国科学d辑](#) 2003(06)
7. [程国栋](#) 用冷却路基的方法修筑青藏铁路[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2003(03)
8. [马巍](#); [程国栋](#); [吴青柏](#) 多年冻土地区主动冷却路基方法的研究[期刊论文]-[冰川冻土](#) 2002(05)
9. [陈庆中](#); [张弥](#); [冯星梅](#) 应力场、渗流场和流场耦合系统定边值定初值问题的变分原理 1999(05)
10. [吴林高](#); [缪俊发](#) 渗流力学 1996
11. [龚道勇](#) 三维稳定饱和一非饱和渗流场的有限元分析及应用 2002
12. [罗启北](#); [郝方](#) ANSYS 在渗流动态分析中的应用[期刊论文]-[贵州水力发电](#) 2005(01)

引用本文格式: [孙文](#). [吴亚平](#). [蔺鹏臻](#). [胡莉莉](#). [SUN Wen](#). [WU Ya-ping](#). [LIN Peng-zhen](#). [HU Li-li](#) 次生不良冻土对路基稳定性影响的数值分析[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2013(11)