

多年冻土区公路路堤碎石层厚度的计算

孙斌祥¹, 徐学祖¹, 赖远明², 汪双杰³, 章金钊³

(1. 绍兴文理学院土木工程系, 浙江 绍兴 312000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710068)

摘 要:通过变渗透率多孔介质流函数控制方程, 分析了青藏公路碎石路堤冬季自然对流降温效应的发生和演化过程。结果表明: 公路碎石路堤冬季自然对流降温效应从边坡区域最先开始形成, 并随着冬季路面温度下降而逐渐向路堤中间区域发展。通过引入自然对流指数, 分析了自然对流降温效应随路堤碎石层填筑厚度的变化规律, 其可分为恒零区、急增区和缓变区 3 个阶段, 急增区的起点和终点对应于路堤碎石层填筑的最小厚度和最大厚度。最后, 利用自然对流指数具体计算了不同粒径碎石层填筑的临界厚度。

关键词:多年冻土; 气冷路堤; 自然对流; 碎石层厚度; 青藏公路

中图分类号: TU445; U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0451-08

作者简介:孙斌祥(1963-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事寒区工程基础稳定性、结构疲劳损伤检测和非线性数值分析等研究工作。

Fractured-rock laver thickness of highway embankment in permafrost regions

SUN Bin-xiang¹, XU Xue-zu¹, LAI Yuan-ming², WANG Shuang-jie³, ZHANG Jin-zhao³

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. The First Highway Survey & Design Institute, Ministry of Communications, Xi'an 710068, China)

Abstract: Occurrence and development of winter-time natural convection cooling effect in the fractured-rock embankment of Qinghai-Tibet highway were investigated using the governing equations based on air-flow function for natural convection in porous media with variable permeability. It was shown that winter-time natural convection in the fractured-rock embankment began to occur in the side slope portions and developed from two side slope portions to the middle portion of embankment with lowering of surface temperature. A natural convection index for representing the cooling effectiveness of winter-time natural convection in the fractured-rock highway embankments was introduced. There were three regions of the variation of the natural convection index with thickness of layer in the highway, i.e., zero region, rapid increase region and no appreciable increase region. Thicknesses of fractured-rock layer in highway embankment corresponding to the initial point and end point of the rapid increase region were defined as the minimum and maximum thicknesses of fractured-rock layer constructed, which triggered winter-time natural convection, respectively. Evaluating fractured-rock layer thicknesses of highway embankment with various grain sizes was performed.

Key words: permafrost; air cooled embankment; natural convection; fractured-rock layer thickness; Qinghai-Tibet highway

0 引 言

青藏公路南北向穿越青藏高原季节冻土区、岛状多年冻土区和连续多年冻土区, 1985 年全线完成沥青路面铺设, 至营运 6~17 a 后的 1990 年, 多年冻土区内的大部分路段产生明显的不均匀下沉, 已严重影响车辆运行^[1-5]。这是受人类活动和沥青路面的影响^[5], 也是受全球气候转暖的影响^[3-4], 引起路基热状态及稳定性的改变, 使得人为多年冻土上限下降、季节冻结深度减小和在路基中形成融化夹层, 这在多年冻土路

段、连续多年冻土与岛状多年冻土区的分界路段和多年冻土南北界退化路段的冻土冻融过程中表现得尤为突出^[5-8]。为此, 我国研究人员花费了很大精力来寻找问题的解决之道^[1-3, 6-8], 然而, 对于青藏公路整治改建工程中面临的青藏高原高温、高含冰率多年冻土和气

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(40225001); 交通部国家西部交通建设科技项目(200231800004); 绍兴文理学院重点学科建设基金资助项目

收稿日期: 2005-01-15

候变暖等问题,采用传统路基结构将很难保证冻土路堤的安全和稳定,转而需要采取能积极保护冻土、主动冷却地基的地温调控新技术^[3]。研究表明^[9-18],冻土碎石路堤由于具有冬季自然对流降温效应而能够主动冷却路基下的冻土层,可以减少甚至消除冻土路基的融沉,从而确保冻土路基的稳定性,其被称为“气冷路堤”(air cooled embankment, 或 air convection embankment)。

目前,针对青藏公路改扩建工程和青藏高原铁路建设,我国研究人员就碎石层冬季降温效应进行了大量的室内试验和现场试验^[9-15],并通过数值模拟,对碎石路堤在实际工程应用条件下的地温调控能力进行了分析^[16-17],为碎石路堤的工程应用打下了理论基础。根据冻土路堤的设计原则,可以通过观测试验和数值模拟等确定不同路面类型的路堤临界高度^[1-2,6-7],冻土区碎石路堤总高度也可据此确定。但是,确定碎石层厚度既要考虑其有利于冬季自然对流降温效应的发生,又要考虑尽量节省碎石填料以降低工程成本,因此,研究基于冬季自然对流降温效应的路堤碎石层填筑厚度的简便方法对于碎石路堤的工程应用显得尤为关键。本文针对青藏公路,分析了多年冻土区公路碎石路堤冬季自然对流降温效应的演化过程,并给出了路堤碎石层厚度基于冬季自然对流降温效应的确定方法。

1 公路碎石路堤计算模型及其控制方程

1.1 公路碎石路堤计算模型

对于青藏高原典型地段、多年冻土区公路碎石路堤计算区域通常由路面结构层(水泥稳定砂砾和级配砂砾等)、给定粒径的碎石层和不同性质的冻土层等区域组成,路堤坡度为1:1.5,如图1所示。根据不同的碎石层填筑厚度,公路路堤总高度(设为一定)的不足部分可用传统路基填料填筑(图1虚线以下部分)。

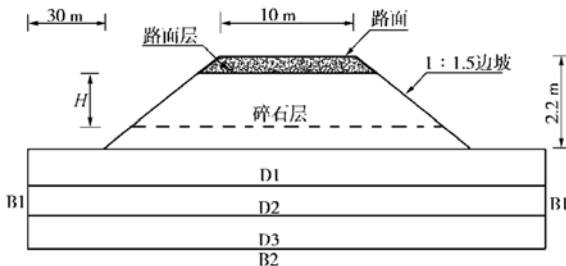


图1 公路碎石路堤计算模型

Fig.1 Computational model of fractured-rock embankment

1.2 公路碎石路堤控制方程

设碎石路堤计算区域为空气所饱和,且路堤变形可忽略不计,各区固相材料与空气间处于局部的热平衡状态,估算发现青藏高原多年冻土区碎石层孔隙空气发生流动的最大 Reynolds 数约为 15,因此,可假设空气流动能够满足 Darcy 定律,另外,路堤产生的热弥散足够小,由温度差引起的空气密度梯度也比较小,满足 Boussinesq 近似^[17-19]。设 K_e 为碎石路堤的有效渗透率, λ_e 、 C_e 为有效导热系数和有效容积热容量, μ 、 C_a 为碎石路堤孔隙空气的动力粘滞系数和容积热容量(假设为常数),则模型能满足的连续性方程、能量方程和动量方程为^[13,16,17]

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$C_e \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = -C_a (u_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + u_z \frac{\partial \theta}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_y = -\frac{K_e}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \\ u_z = -\frac{K_e}{\mu} \left\{ \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_0 [1 - \beta(\theta - \theta_0)] g \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ , t 为温度和时间; u_y , u_z 为空气的速度分量; p 为空气压强; z 轴为竖直向上; g 为重力常数; θ_0 , ρ_0 为参考温度及空气在该参考温度下的密度; β 为空气的热膨胀系数,也可近似为常数。

具有一定含水率的各土层通常处于冻、融的交替和混合状态,存在相变潜热^[18],可根据显热容法得到能同时考虑冻融过程中相变潜热和不同热学性质的土层有效容积热容量和有效导热系数^[2,13,16]。为更好分析路堤碎石层中自然对流的发生情况,引入一个描述孔隙空气发生自然对流运动的流函数 $\Phi(y, z)$, 其定义为

$$\begin{cases} u_y = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \\ u_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

利用式(3),可得变渗透率多孔介质有关孔隙空气运动流函数 $\Phi(y, z)$ 的微分方程

$$-\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{K_e} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{K_e} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = \rho_0 g \beta \frac{\partial}{\partial y} (\theta - \theta_0) \quad (5)$$

式(2)、(5)所描述的耦合非线性偏微分方程组需要用有限元方法求解^[16-19],可得到冻土碎石路基的温度场和孔隙空气发生自然对流运动的流场及速度。

1.3 边界条件和计算模型各区物理参数

实际冻土路堤由于路堤走向往往存在阴阳坡,使左右边坡表面的温度变化有差异^[1-5,7,8,17],以至经过多年周期变化后造成路面纵向开裂,但数值计算表明,这些不均匀边界条件对于碎石路堤在单独一年自然对

流降温效应的演化过程影响较小, 因此, 为简化分析, 可假设左右边坡温度条件相同。但在考虑长期营运的时间效应时这种阴阳坡对工程有较大影响^[7-8,17]。设上边界路堤表面、边坡坡面和天然地面的温度值 θ_b 为

$$\theta_b = \theta_m + \theta_a \sin(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{7\pi}{12} + \alpha_0) \quad , \quad (6)$$

式中, θ_m 为各区介质表面的年平均温度,根据现场气象观测资料及附面层原理^[2],对应天然地表、边坡坡面和沥青路面取为 -1°C , 1.2°C 和 3.0°C , θ_a 为碎石路堤上边界温度波动的振幅,对应于天然地表、边坡坡面和沥青路面取为 12°C , 13°C 和 15°C 。另外,左右边界(边界 B1)为绝热边界,下边界(边界 B2)的地热热流密度为 0.06 W/m^2 。冬季积雪覆盖对边坡的影响也可通过相应的边界温度考虑^[20-22]。

沥青、混凝土路面可近似为不透水边界,两边边坡多数直接暴露在空气之中或者冬季有结雪等覆盖物或者采取工程措施,可分为透气的定压边界和不透气边界两种情况,考虑到粘土、砂砾等材料的空气渗透率要比碎石的空气渗透率小4~5个量级^[11-14],计算区域下部土层的左右边界和下边界可设为不透水边界。不透水边界表示路堤边界内外的空气不直接相互交换,其孔隙空气法向速度分量 u_n 为0,透气定压边界表示路堤边界内外的空气能直接交换,其孔隙空气法向速度分量 u_n 为给定值 u_0 ,但边界表面处空气的实际流速几乎很难获得,所以,具体计算时可用边界表面处的空气压强条件来代替,在海拔高度 h 处,边界孔隙空气随温度变化的压强可表示为 $p_b = p_0 + \rho_0 g \beta (\theta - \theta_0) h$,其中, p_0 为在海拔高度 h 处对应于参考温度 θ_0 时的空气压强。

表1具体给出了青藏公路典型地段路堤各区介质已冻、未冻导热系数和容积热容量等物理参数^[16],路堤碎石层由6~8 cm 粒径的碎石铺设而成。在海拔4000余米、常温条件下,空气的密度取为 0.678 kg/m^3 ,热膨胀系数为 $3.50 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$,定压比热为 $1.004\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ 。

2 寒区公路碎石路堤自然对流降温效应

碎石路堤计算模型各区的有效渗透率 K_e 是分区变化的,其中,碎石层的空气渗透率与其组成的碎石粒径大小密切相关^[11-13],令为 K_0 ,其值要比砂砾石、粘土等大4~5个量级,因此,碎石路堤发生的冬季自然对流降温效应主要是由碎石层引起的,则对路堤碎石层定义一个Rayleigh数 R_a ,

$$R_a = \frac{\rho_0 g \beta C_a K_0 H \Delta \theta}{\mu \lambda_0} \quad , \quad (7)$$

式中, $\Delta \theta$ 为路堤碎石层下边界与上边界之间的温度差, H 为路堤碎石层的填筑厚度(如图1), λ_0 为碎石层的有效导热系数,其他符号意义同前。

大量的室内外试验和数值模拟表明^[9-19],只有当冬季路堤表面温度下降到使碎石层内形成上低下高的温度梯度时,才有可能在路堤碎石层中产生自然对流降温效应,并且其强度主要由上边界的负温值所决定,所以,通过式(7)定义的Rayleigh数可综合描述碎石层的填筑厚度、空气渗透率(粒径)、导热系数及具体工程环境等物理参数对路堤降温效应的影响。

对于满足1.3节所给边界条件的碎石路堤,通过式(2)和(5)对碎石路堤计算模型的温度分布和空气自然对流运动的流场进行了有限元数值模拟^[16-19],分析了公路碎石路堤冬季自然对流降温效应的产生机理及其演化过程,其中,碎石层厚度为1.8 m,左右边坡为不透水边界,且路堤在7月15日完成施工。图2~4为该公路碎石路堤修建第2年10月14日、11月28日、12月4日、12月19日、1月14日、3月15日、3月31日和4月15日的瞬时等温线分布(左边图形)和路堤孔隙空气自然对流运动的流线分布(右边图形),相邻两流线的流函数差值 $\Delta \Phi$ 均为 0.0001 s^{-1} ,显然,除路堤碎石层以外的其他区域空气自然对流运动均可忽略。

表1 各区材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of various materials

材料 类型	各层位置 /m	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	已冻/未冻导热系数 /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	已冻/未冻容积热容量 /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$)	相变热 /($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气渗透率 / m^2
路面结构层	1.8~2.2	1827	2.441/1.808	1612/2025	23.30×10^6	3.00×10^{-11}
6~8 cm 碎石	0.0~1.8	1490	0.396/0.396	1250/1250	0	4.38×10^{-6}
砂砾填料	(碎石不足)	1800	1.980/1.919	1913/2227	20.40×10^6	3.00×10^{-10}
亚粘土(D1)	-0.0~2.0	1480	0.909/0.959	1900/2183	46.18×10^6	3.00×10^{-11}
亚粘土含角砾 (D2)	-2.0~3.3	680	2.059/0.939	2414/3205	51.98×10^6	3.00×10^{-11}
弱风化基岩(D3)	-3.3~-30.0	950	1.969/1.030	2197/2866	82.15×10^6	3.00×10^{-11}
空气	—	0.678	0.024	0.681	—	—

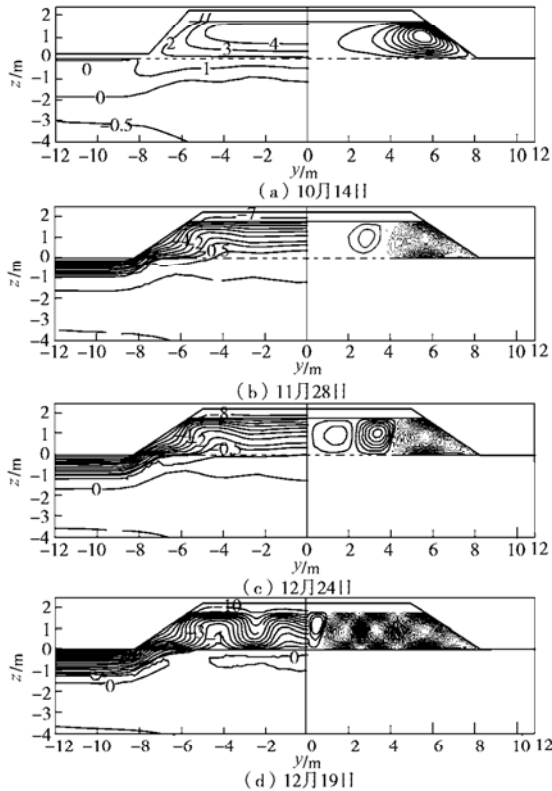


图2 公路路堤在修建第2年10月14日、11月28日、12月4日和19日的温度分布和自然对流

Fig. 2 Temperatures and natural convections for highway embankment on Oct. 14, Nov. 28, Dec. 4 and 19 in the 2nd year

由图2(a)可知,路面温度开始从7月15日的最高值18.0℃下降到10月14日年平均值3.0℃(天然地表为-1.0℃,边坡表面1.2℃),路堤碎石层的靠近边坡区域已形成1个自然对流涡包(为半个路堤,下同),这是由于边坡表面温度低于碎石层内部温度而引起的自然对流,但从左边等温线变形程度看其自然对流降温能力还比较弱,这时可以看作是碎石路堤冬季自然对流降温效应开始的起点。到了11月28日,路面温度下降到-7.45℃,从图2(b)路堤等温线变形程度和流线密度看,除靠近边坡区域碎石层自然对流进一步增强外,路堤中间偏外侧区域也开始形成自然对流涡包,即碎石路堤形成了1强1弱共2个自然对流涡包,这时可近似作为路堤在碎石层中间区域开始形成冬季自然对流降温效应的起始点。由图2(c),到了12月4日路面温度下降到-8.50℃,碎石层除原来已经存在的2个自然对流涡包进一步发展外,在路堤中间又形成了1个弱自然对流涡包,即碎石路堤形成了3个自然对流涡包,由此引起的等温线畸变程度也比较明显,即碎石路堤冬季自然对流的降温能力已比较强。由图2(d)可知,到了12月19日路面温度已经下降到-10.58℃,碎石层原来已经存在的3个自然

对流涡包明显变强,流线密度也明显变密,同时,路堤中间又形成了1个小的自然对流涡包,碎石路堤共形成4个自然对流涡包,碎石路堤的冬季自然对流降温能力已经很强。

如图3(a),到1月14日,路面温度下降到一年的最低点-12℃,碎石路堤的4个自然对流涡包均已充分发展,从左边等温线的严重畸变程度和右边孔隙空气对流运动的流线密度显示碎石路堤的冬季自然对流降温能力达到最大,这时路堤下方的融化盘已经变得非常小了。这以后,路面温度开始回升,碎石路堤的冬季自然对流降温能力也开始减弱,到了3月15日路面温度升高到-4.57℃,路堤虽然仍有4个自然对流涡包,但已明显退化,如图3(b),但路堤还具有一定的自然对流降温能力。到3月31日,路面温度回升到-0.77℃,碎石层即将退化为4个很弱的自然对流涡包,如图3(c),路堤的自然对流降温能力已非常弱,可近似为碎石路堤自然对流降温效应的终止点。由图3(d),到4月15日路面温度回升到3.0℃,路堤的自然对流已消失。

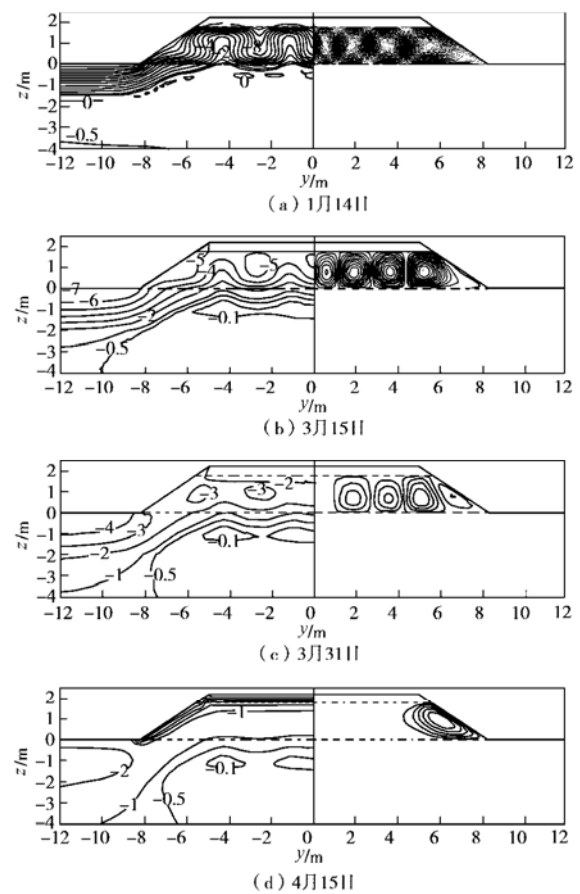


图3 公路路堤在修建第2年1月14日、3月15日、31日和4月15日的温度分布和自然对流

Fig. 3 Temperatures and natural convections for highway embankment on Jan. 14, Mar. 15, 31 and Apr. 15 in the 2nd year

综上所述,路堤碎石层的冬季自然对流降温效应是从两个边坡最先开始形成,逐渐向路堤中间区域发展,随着路面温度的不断下降,整个路堤孔隙空气的自然对流运动由靠近左右边坡区域2个对流涡包不断发展演化成更多对流涡包数,直到路面温度下降到最低时形成的8个对流涡包。由式(7),在公路碎石路堤靠近左右边坡区域开始形成自然对流的临界 Rayleigh 数为 $R_{ac1} \approx 4.5$,随着路面温度下降,在碎石路堤中间区域开始形成自然对流的临界 Rayleigh 数为 $R_{ac2} \approx 37.9$,这与上下边界等温、左右边绝热且四边不透气的矩形多孔介质区域发生自然对流的临界 Rayleigh 数 $4\pi^2$ 相近似^[19]。结论也适用于透气边坡碎石路堤的冬季自然对流效应,只是其降温效应要更强一些。

3 表征碎石层降温效应的自然对流指数

碎石层填筑在路面结构层下面(如图1),根据碎石层的不同填筑厚度,下面路堤设计高度的不足部分用普通路基填料(如砂砾石)等补充。根据前面分析,对于一种给定具体尺寸和形式的公路碎石路堤,其决定自然对流产生的临界 Rayleigh 数已经给定,这时,公路路堤碎石层中自然对流能否产生将完全由温度差 $\Delta\theta$ 所决定,即 H 和 $\Delta\theta$ 必须要达到一定值,使得 R_a 能大于产生自然对流的临界 Rayleigh 数 R_{ac} ,由式(7)可得

$$H\Delta\theta \geq \frac{\mu\lambda_0}{\rho_0 g \beta K_0 C_a} R_{ac} \quad (8)$$

只要冻土路堤碎石层的填筑厚度能满足上式,路堤碎石层中就能产生自然对流降温效应。如果碎石层填筑厚度 H 已经给定,则路堤碎石层发生自然对流的临界温度差 $\Delta\theta_c$ 可表示为

$$\Delta\theta_c = \frac{\mu\lambda_0 R_{ac}}{\rho_0 g \beta K_0 C_a} \frac{1}{H} = \frac{M_p}{H} \quad (9)$$

只有当 $\Delta\theta \geq \Delta\theta_c$ 时,路堤碎石层才会产生自然对流效应。在某一时刻,碎石层下、上边界间的温度差 $\Delta\theta$ 是沿边界线变化的,图4描述了冻土路堤对称轴位置处碎石层下、上边界间温度差的变化示意图。由式(8)、(9),温度差 $\Delta\theta$ 的数值中只有大于临界温度差 $\Delta\theta_c$ 的那部分温度差才对路堤碎石层自然对流效应的强弱产生影响,并决定着自然对流效应延续的时间,如图4的竖线部分。其中, t_1 为一个周期中碎石层发生自然对流的起始时间, t_2 为自然对流消失的终止时间。为定量描述碎石层形成上低下高温度梯度的下、上边界间温度差越大、持续时间越长其产生的自然对流效应就越强的自然对流降温特征,可定义积温

$$A_\theta = \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\theta - \Delta\theta_c) dt = \int_{t_1}^{t_2} \left(\Delta\theta - \frac{M_p}{H} \right) dt \quad (10)$$

作为一个度量碎石路堤冬季自然对流降温能力的积温指数, A_θ 可简称为自然对流指数 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)。

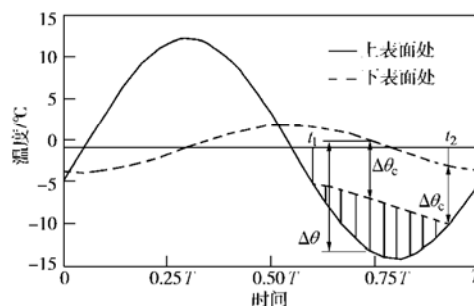


图4 路堤碎石层中产生自然对流的温度差

Fig. 4 Natural convection due to temperature difference

碎石路堤在冬季能产生自然对流的指数 A_θ 应大于0,而且为了使对流效应尽可能大,其值也应尽可能大。图5为通过数值计算得到的一种碎石路堤在给定具体环境条件下的自然对流指数 A_θ 随碎石层厚度 H 的变化规律,在 H 比较小时,积温指数保持为0,碎石层存在一个最小厚度 H_{min} ,在 $H > H_{min}$ 时,自然对流指数将大于0,然后,随着 H 的增加,自然对流指数急速增加,在 H 达到一定值后进入缓慢变化阶段,当 H 一直增加直至 A_θ 达到最大值,即满足

$$0 \leq A_\theta \leq A_{\theta max} \quad (11)$$

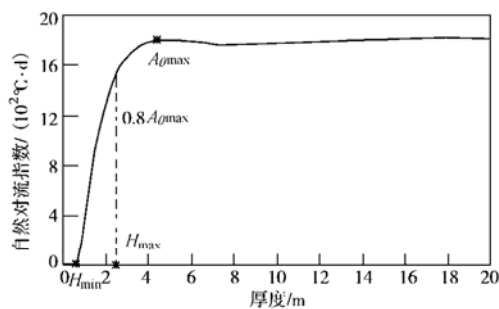


图5 自然对流指数随碎石层厚度的变化

Fig. 5 Variation of convective index with rock thickness

由图5可知,对一给定寒区公路碎石路堤,其自然对流指数 A_θ 随冻土路堤碎石层填筑厚度的变化规律可分为3个不同区域,即恒零区、急增区和缓变区,它们分别对应着碎石路堤冬季自然对流降温效应不发生阶段、产生并急速演化阶段和平缓发展阶段,大量的数值计算显示这一规律对于寒区公路碎石路堤具有普遍性。因此,自然对流指数能够定量表征寒区公路碎石路堤具有的冬季自然对流降温能力。

4 公路路堤碎石层厚度

研究表明^[1-2,6-7],冻土路堤存在一个临界高度,其

大小需要根据多年冻土工程类型、冻土地温、冻土上限和准备采用的路面类型等因素综合考虑。冻土路堤填筑一定厚度碎石层的主要目的是利用其具有的冬季自然对流降温能力,因此,路堤碎石层需要填筑多大厚度可依据其能否发生冬季自然对流效应来确定。

根据 A_θ 随碎石层填筑厚度变化的恒零区、急增区和缓变区 3 个阶段,碎石层存在一个最小厚度 $H_{\min}$,当 $H \geq H_{\min}$ 时,碎石层中才能产生冬季自然对流效应,当 $H < H_{\min}$ 时,碎石层中不会产生冬季自然对流效应,这时,碎石层主要起到了类似于一层绝热材料的作用。同时,碎石层也存在一个最大填筑厚度 $H_{\max}$,当 $H > H_{\max}$ 时,碎石层中超过 $H_{\max}$ 的厚度并不对冬季自然对流降温效应有更有利的影响,因为,由式(2)右侧的对流项可知,碎石路堤的冬季自然对流降温能力直接依赖于碎石层内冬季上下高的温度梯度 $\partial\theta/\partial y$ 和 $\partial\theta/\partial z$,即碎石层中只有那些温度梯度比较大的地方才会有较显著的对流效应,而在温度梯度较小的地方自然对流效应将很小甚至可忽略不计,由于温度波在碎石层中传播存在着衰减,其到达碎石层下部分时温度梯度已变得很小,对自然对流效应的增强已不起大的作用。从节约碎石的经济性考虑,可以把自然对流指数达到最大值 0.8 倍时的碎石层厚度定义为最大厚度 $H_{\max}$,

$$H_{\max} = H|_{A_\theta = 0.8 A_{\theta \max}} \quad (12)$$

因此,对于给定寒区环境条件下的碎石路堤,基于自然对流降温效应的碎石层填筑厚度应满足

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (13)$$

在具体工程应用中,考虑到自然对流降温效应的周期性,实际冻土公路路堤的碎石层填筑厚度并没有必要一定要达到 $H_{\max}$,可取一个大于最小厚度的适当数值,具体根据工程要求通过式(10)描述的自然对流指数及式(2)、(5)的控制方程组来确定。其中,碎石层下、上边界间的温度差 $\Delta\theta$ 取值位置如图 6 所示,对于路堤边坡附近区域发生自然对流情况,可取 S_1 和 S_0 两点之间的温度差,对于路堤中间区域发生自然对流情况,可取中间 M_1 和 M_0 两点之间的温度差。

表 2 碎石物理参数

Table 2 Physical properties of fractured-rock			
粒径 /cm	渗透率 /m ²	导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	容积热容量 /(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)
4~6	2.28×10 ⁻⁶	0.407	1.260×10 ⁶
6~8	4.38×10 ⁻⁶	0.396	1.250×10 ⁶
8~10	5.46×10 ⁻⁶	0.390	1.220×10 ⁶

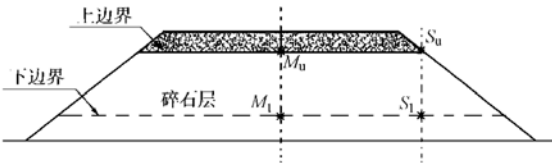


图 6 计算温度差的位置

Fig. 6 Positions of calculating temperature difference

通过具体计算,冻土公路路堤基于冬季自然对流降温效应的碎石层填筑厚度具有如下特点:①较大粒径的碎石层由于较容易产生冬季自然对流降温效应而只需较小的填筑厚度;②对应于路堤边坡附近区域发生冬季自然对流降温效应($R_{ac1} = 4.5$)的碎石层填筑厚度明显小于路堤中间区域发生冬季自然对流降温效应($R_{ac2} = 37.9$)的碎石层厚度;③碎石护坡层对冻土路堤具有一定的冬季自然对流降温能力,是一种相对经济、简便的地温调控技术;④单纯从冬季自然对流效应来讲,路面温度波动幅度越大,产生的自然对流效应也越大,碎石层的填筑厚度则越小。

最后需要指出,冻土路堤临界高度的确定原则是突出路表温度不影响或少影响冻土天然上限,即路堤临界高度要大于其影响深度,与冻土平均地温最为密切^[1-2,6-7],而冻土路堤碎石层填筑厚度的确定原则是突出冬季地表温度波动能产生较显著影响的深度,即碎石层填筑厚度要小于其影响深度以便具有足够大的温度梯度产生自然对流降温效应,与路表温度波动振幅最为密切^[17-18]。因此,基于冬季自然对流降温效应求得的碎石层合理填筑厚度将小于根据不同冻土工程类型所要求的冻土路堤临界高度。在冻土路堤临界高度确定后,可用自然对流指数确定其碎石层的填筑厚度,

表 3 不同工程条件下公路路堤碎石层的最小厚度和最大厚度

Table 3 Minimum and maximum thicknesses of fractured-rock layer for highway embankment under various engineering conditions												
填筑厚度/m	路面温度振幅 20℃				路面温度振幅 16℃				路面温度振幅 13℃			
	$R_{ac}=4.5$		$R_{ac}=37.9$		$R_{ac}=4.5$		$R_{ac}=37.9$		$R_{ac}=4.5$		$R_{ac}=37.9$	
	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$
4~6 cm	0.27	1.74	0.84	2.82	0.30	1.78	0.95	3.15	0.35	1.84	1.06	3.59
6~8 cm	0.19	1.65	0.57	2.20	0.23	1.67	0.65	2.35	0.25	1.70	0.73	2.53
8~10 cm	0.17	1.64	0.50	2.08	0.19	1.65	0.57	2.20	0.22	1.68	0.64	2.34

碎石层下面路堤临界高度的不足部分可用传统路基填料补充, 或者直接利用式 (2) 和 (5) 重新计算冻土路堤温度场, 以修正冻土路堤的临界高度。

5 试验验证

碎石的试样盒内尺寸为 50 cm×50 cm×65 cm、壁厚 5 cm 的绝热箱体, 盒内装入给定粒径的路堤碎石。试样盒内上端预留 10 cm 以上的空间, 用于安装一个可调控温度的顶板覆盖, 顶板与一台可编程温度波动的制冷机单独相连, 整个试样盒的具体情况见图 7。试验采用二级控温温度, 以减小侧向热传导对试样盒内碎石温度变化的影响^[13]。试样盒内碎石层的温度测量利用固定在细木条上的三排热敏电阻传感器来进行, 其中, 中心轴一排 (A_2) 有 12 只, 两边距侧壁 5 cm 处各一排 (A_1, A_3) 有 7 只, 传感器在碎石试样内竖直方向的位置被预先给定, 温度数据由与一台台式计算机相连的 DT500 型数采仪自动采集、存贮。

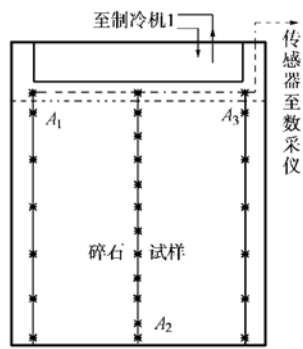


图 7 碎石试样
Fig. 7 Sample of fractured-rock

对粒径为 6~8 cm 的不同厚度碎石层试样进行了验证, 具体试验条件见表 4。根据文献[19], 不透气碎石试样发生 (1, 1) 对流模式的 $R_{ac}=4\pi^2$, 由式 (10), #1 试样碎石层最小厚度为 46 cm, 而不透气碎石试样发生 (2, 1) 对流模式的 $R_{ac}=6.25\pi^2$, #2 试样碎石层最小厚度约为 50 cm。图 8 为 #1 试样碎石距表面 25 cm 处的实测温度变化, 表现为正、负温时左中右 3 点温度变化均趋于重合, 与单纯热传导温度分布规律相一致, 表明试样不发生自然对流。图 9 为 #2 碎石试样距表面 40 cm 处的实测温度变化, 表现为正温时 3 点温度趋于重合, 而负温时 3 点温度有明显分离趋势, 左、右两点温度变化几乎相同且比中间点要下降得更快, 这与 (2, 1) 对流模式的温度分布规律相一致, 表明在温度正半周时碎石试样热传输表现为单纯的热传导形式, 而在温度负半周时碎石试样产生了自然对流效应。因此, 当碎石层实际厚度大于由式 (10) 求得的最小厚度时, 试样已具有一定的冬季自然对流降温能力。

表 4 试样参数
Table 4 Parameters of sample

试样 编号	试样 高度 /cm	表面渗 透条件	表面平 均温度 /°C	表面度 振幅 /°C	预计 H_{min} /cm	预计 H_{max} /cm
1	29	不透气	-0.21	11.04	46	—
2	53	不透气	-1.00	16.43	50	—
3	130	透气	-0.50	15.00	33	185

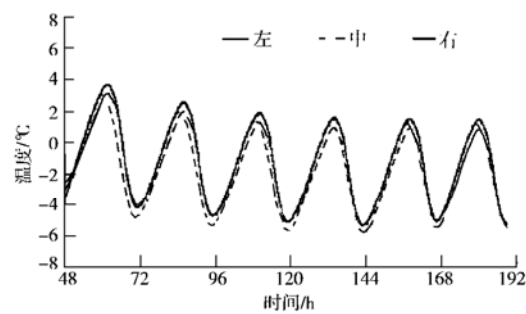


图 8 #1 碎石试样在 25 cm 处温度变化的测试值
Fig. 8 Measured temperatures in Sample 1, at $z=25$ cm

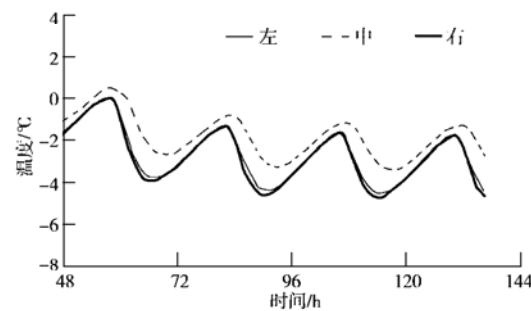


图 9 #2 碎石试样在 40 cm 处温度变化的测试值
Fig. 9 Measured temperatures in Sample 2, at $z=40$ cm

喻文兵等^[9]认为具有透气表面的#3 碎石试样已具有良好的冬季自然对流降温能力。对于透气表面试样, 取 $R_{ac} \approx 27$, 由式 (10), 碎石层最小厚度为 33 cm, 再由式 (10) 和 (12), 碎石层最大厚度约为 185 cm。可见, 按式 (10) 和 (12) 求得的最大厚度填筑的碎石层已具有较强的冬季自然对流降温效应。

另外, Harris^[3,22]在中国昆仑山垭口的现场观测结果表明, 15 cm 厚度的大片碎石堆下可以存在有多年冻土, 而相邻地区的细颗粒土层下并无多年冻土, 且碎石堆中的年平均地温与相邻细颗粒土中的最大差值达 7.1 °C 这种天然碎石层表面通常属于透气边界, 相当于透气上边界的无限大多孔介质层, 取 $R_{ac} \approx 3$, 并设碎石表面温度振幅为 13.5 °C, 由式 (10), 碎石层最小厚度约为 11 cm, 故实际碎石层厚度已经超过其最小厚度达 4 cm, 可见, 碎石层已具有一定的冬季对流降温能力。

因此, 利用自然对流指数 A_θ 确定的冻土路堤碎石层填筑厚度具有较好的精确性和可靠性, 实际工程

应用中可用式(10)进行计算。由于影响碎石路堤冬季对流降温效应的因素很多,在确定碎石层具体填筑厚度时需要仔细考虑冻土路堤边界条件和环境条件。

6 结 语

综上所述,公路碎石路堤的冬季自然对流降温效应从路堤边坡最先开始形成,并随着路表温度的不断下降逐渐向路堤中间区域发展,根据不同碎石层填筑厚度,甚至可在整个路堤碎石层中都形成自然对流效应。计算表明,在公路碎石路堤靠近边坡区域开始形成自然对流的临界 Rayleigh 数为 $R_{ac1} \approx 4.5$,在碎石路堤中间区域开始形成自然对流的临界 Rayleigh 数为 $R_{ac2} \approx 37.9$ 。通过引入定量表征碎石路堤冬季自然对流降温效应的自然对流指数,给出了冬季自然对流降温效应随路堤碎石层填筑厚度的变化规律,其明显表现为恒零区、急增区和缓变区 3 个阶段,即碎石路堤的自然对流指数在碎石层厚度比较小时始终保持为 0,在碎石层厚度超过最小厚度后,会随着碎石层厚度的增加而急速增加,并在碎石层厚度达到最大厚度后进入缓慢变化阶段,表明基于自然对流指数的碎石层填筑厚度存在一个临界值,具体介绍了基于冬季自然对流降温效应的冻土路堤碎石层填筑厚度确定方法。针对青藏公路碎石路堤,利用自然对流指数具体计算了不同粒径碎石的最小厚度和最大厚度。最后,通过 6~8 cm 粒径碎石层试样的实验,验证了基于自然对流指数所确定的碎石层高度的可靠性,其对实际冻土路堤工程的设计和应用具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴紫旺,朱林楠,郭兴民. 青康公路多年冻土区路堤的临界高度[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 36 - 41. (WU Zi-wang, ZHU Lin-nan, GUO Xin-ming. Critical height of the embankment in the permafrost regions along the Qinghai-Kangding Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1):36 - 41.)
- [2] 臧恩穆,吴紫旺. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1999. (ZANG En-mu, WU Zi-wang. The degradation of permafrost and highway engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999.)
- [3] 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, 33(6): 602 - 607. (CHENG Guo-dong. Influence of local factors on permafrost occurrence and their implication for Qinghai-Xizang railway design[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(6):602 - 607.)
- [4] 李述训,程国栋,郭东信. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势数值模拟[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 342 - 347. (LI Shu-xun, CHENG Guo-dong, GUO Dong-xin. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China, under climate warming[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(4): 342 - 347.)
- [5] WU Q, ZHU Y, LIU Y. Evaluation model of permafrost thermal stability and thawing sensibility under engineering activity[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34: 19 - 30.
- [6] 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: 185 - 188.
- [7] 王铁行, 窦明健, 胡长顺. 多年冻土地区路基临界高度研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 94 - 98. (WANG Tie-hang, DOU Ming-jian, HU Chang-shun. Study on critical thickness of subgrade in permafrost area[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 94 - 98.)
- [8] 王铁行, 胡长顺, 李 宁, 等. 青藏高原多年冻土地区实际边界浅层土体温度场数值分析[J]. 中国科学(E 辑), 2003, 33(7): 655 - 662. (WANG Tie-hang, HU Chang-shun, LI Ning, et al. Numerical analysis of ground temperature in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series E), 2003, 33(7):655 - 662.)
- [9] YU W B, LAI Y M, ZHANG X F, et al. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38: 31 - 42.
- [10] 冯文杰, 马 巍, 张鲁新, 等. 碎块石护坡在寒区道路工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 632 - 637. (FENG Wen-jie, MA Wei, ZHANG Lu-xin, et al. Application of riprap slope protection to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 632 - 637.)
- [11] SUN B X, XU X Z, LAI Y M, et al. Experimental researches of thermal diffusivity and conductivity in embankment ballast under periodically fluctuating temperature[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 219 - 227.
- [12] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 温度周期波动时自然对流对块石导热系数测定的影响[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 99 - 103. (SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, et al. Influence of natural convection on determining thermal conductivity of ballast under periodically fluctuating

- temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, **37**(1): 99 - 103.)
- [13] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 碎石粒径对寒区路堤自然对流降温效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 809 - 814. (SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, et al. Impact of ballast grain sizes on natural convection cooling effect of embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 809 - 814.)
- [14] 徐学祖, 孙斌祥, 李东庆, 等. 边界温度周期波动条件下块石中的温度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 91 - 95. (XU Xue-zu, SUN Bin-xiang, LI Dong-qing, et al. Changing laws of temperature in ballasts under periodic fluctuation of boundary temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 91 - 95.)
- [15] 徐学祖, 孙斌祥, 赖远明, 等. 青藏铁路片石路基长期使用效果分析[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(1): 101 - 105. (XU Xue-zu, SUN Bin-xiang, LAI Yuan-ming, et al. Study on the long-term effects of ballast embankment of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(1): 101 - 105.)
- [16] 赖远明, 张鲁新, 张淑娟, 等. 气候变暖条件下青藏铁路抛石路基的降温效果[J]. 科学通报, 2003, **48**(3): 292 - 297. (LAI Yuan-ming, ZHANG Lu-xin, et al. Cooling effect of ripped-rock embankments on Qing-Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(3): 292 - 297.)
- [17] LAI Y M, ZHANG S J, ZHANG L X, et al. Adjusting temperature distribution under the south and north slopes of embankment in permafrost regions by the ripped-rock revetment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **39**: 67 - 79.
- [18] GOERING D J, INSTANES A, KNUDSEN S. Winter-time convection in open-graded embankments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, **24**: 57 - 74.
- [19] NIELD D A, BEJAN A. Convection in porous Media[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [20] LING F, ZHANG T. A numerical model for surface energy balance and thermal regime of the active layer and permafrost containing unfrozen water[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **38**: 1 - 15.
- [21] ISHIKAWA M. Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation[J]. Geomorphology, 2003, **52**: 105 - 120.
- [22] HARRIS S A, PEDERSEN D E. Thermal regimes beneath coarse blocky materials[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1998, **9**: 107 - 120.

第十三届亚洲土力学及岩土工程会议征文通知

2007年12月10—14日

第十三届亚洲土力学及岩土工程会议由印度岩土工程学会 (Indian Geotechnical Society) 主办, 将于 2007 年 12 月 10—14 日在印度加尔各答召开。会议网址请登陆: www.13ARC2007.com。

会议主要议题: ①土的物理力学特性; ②热带和问题土; ③基础和地基土的相互作用; ④交通和地下结构中的岩土工程; ⑤城市地下工程; ⑥岩石工程和隧洞; ⑦大坝工程; ⑧地震工程; ⑨环境岩土工程; ⑩地基处理; ⑪自然灾害防灾减灾; ⑫土工合成材料和天然植物; ⑬破坏和实例分析; ⑭专家系统和神经网络

网络

提交论文: 论文需要向中国土木工程学会土力学及岩土工程分会提交。论文全文最终向大会提交的时间为 2007 年 3 月 31 日。会议论文集分为两册, 第一册为所有接受的论文, 第二册为主题报告的论文。

论文摘要请提交至中国土木工程学会土力学及岩土工程分会: cismge@tsinghua.edu.cn, 注明“第十三届亚洲土力学及岩土工程会议”。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)