

文章编号:1671-8879(2015)05-0035-08

基于多年冻土层冷却功率需求的块石 气冷路基设计方法

袁 堃^{1,2}, 章金钊^{1,2}, 刘 戈¹, 符 进¹, 朱东鹏^{1,2}

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;

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)

摘 要:为了建立 1 套简明实用的块石气冷路基设计方法,以多孔介质自然对流换热理论为基础,建立了块石气冷路基数值计算模型,计算了不同路基高度和不同块石层厚度条件下的冻土热量收支情况,在此基础上分析了冻土上限变化与冻土层冷却功率需求的关系、块石层厚度与块石气冷路基冷却功率的关系,以及路基高度对块石路基冷却功率的影响;对不同工况的计算结果回归拟合出块石路基冷却功率计算公式,结合工程实际提出完整的块石气冷路基设计方法,并给出了参考算例。研究表明:块石层内的空气自然对流主要发生在冷季中的 1~4 月之间;相同路基高度情况下,块石层厚度越大,块石气冷路基冷却功率越大,而在相同块石层厚度情况下,块石层冷却功率随路基高度增加而减少;该研究成果可为多年冻土地区公路块石气冷路基的设计提供参考。

关键词:道路工程;设计方法;数值模拟;块石气冷路基;多年冻土

中图分类号:U419.92

文献标志码:A

Design method of air-cooled embankment based on permafrost cooling power demand

YUAN Kun^{1,2}, ZHANG Jin-zhao^{1,2}, LIU Ge¹, FU Jin¹, ZHU Dong-peng^{1,2}

(1. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To establish a concise and practical design method for air-cooled embankment, a numerical simulation model of air-cooled embankment was established based on the theory of natural convection in porous media, and the heat budget of permafrost was calculated under different embankment heights and different crashed rock thickness conditions. On this basis, the relationship between permafrost table change process and cooling power demand, the relation between crashed rock thickness and cooling power, and the effect of embankment height on air-cooled embankment were analyzed. The fitting formula of cooling power of air-cooled

收稿日期:2015-04-25

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B07,2014BAG05B03);国家重点基础研究发展计划项目(2012CB026106);

中交集团科技研发项目(2011-ZJKJ-16)

作者简介:袁 堃(1984-),男,江苏睢宁人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司工程师,中国科学院工学博士研究生,

E-mail:guluo@foxmail.com。

embankment was obtained by the regression of different calculation condition results, a design method for air-cooled embankment was proposed, and an engineering practical example was presented. The results show that the natural convection occurs in January to April of cold season, and the cooling power of air-cooled embankment increases with the increase of crashed rock thickness, in case of the same embankment height. In case of the same crashed rock layer thickness, the cooling power of air-cooled embankment decreases with the increase of embankment height. The research can provide a reference for design of the air-cooled embankment of highway in permafrost regions. 5 tabs., 10 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; design method; numerical simulation; air-cooled embankment; permafrost

0 引言

青藏高原上的路基工程穿越大片高温高含冰量冻土区域,受工程和环境转暖的影响,路基热融变形严重影响多年冻土地地区路基的稳定性^[1-3]。为了控制多年冻土层热融下沉,在寒区试验研究了一系列保护多年冻土的特殊路基措施^[4-7],其中块石气冷路基在使用效果上获得了广泛的认可,已大量应用于青藏铁路、青藏公路以及正在修建的 G214 共和—玉树公路中^[8]。国内外学者针对块石路基开展了大量室内试验和数值模拟分析,对合理块石粒径^[9-10]、块石层厚度^[11]、块石层上覆填土厚度^[12]、块石层边界封闭状况^[13]、块石层的填筑位置^[14]以及块石层内空气流动^[15-18]等方面进行了研究。

目前对块石气冷路基作用机理的研究已取得较为丰硕的研究成果,但现有方法的设计参数较为抽象^[19],难以推广应用,实际工程中,块石气冷路基设计仍以经验方法为主。目前的经验设计方法和理论方法均存在设计指标不够明确,设计参数的合理依据不足,设计指标与地勘资料的结合不够紧密等,由此导致在块石气冷路基的设计中存在设计依据不明确,设计指标模糊,未能达到设计需求和工程造价的优化匹配,这些不足对块石气冷路基进一步推广应用造成了困难。为了使块石气冷路基的设计科学合理、指标明确、流程简洁,需要开展块石气冷路基的设计方法研究。为此,本文通过数值模拟分析块石路基设计参数对块石层冷却功率的影响规律,并在此基础上提出块石气冷路基的设计方法。

1 块石气冷路基设计参数

1.1 块石气冷路基的主要设计参数

块石气冷路基的作用对象是路基下伏多年冻土层,为了使作用效果达到最大,块石层一般直接填筑

于天然地表上。块石路基的主要组成部分是大粒径的块石层,核心设计参数是块石层的粒径和块石层厚度。块石的粒径直接影响到块石层的孔隙率,室内试验对块石孔隙率的测定结果表明,25 cm 粒径的块石层孔隙率约为 46%^[15],孔隙率的大小对块石层内空气流动影响密切,一般可将块石层看作多孔介质,用多孔介质中空气的流动来描述块石层中的空气流动。根据多孔介质渗流理论,多孔介质层内部发生自然对流的判别参数为瑞利(Rayleigh)数 Ra ,其表达式为

$$Ra = \frac{C\beta gKH\Delta T}{vk} \quad (1)$$

式中: C 、 β 、 v 分别为孔隙内流体的体积热容量、体积热膨胀系数和运动粘度; g 为重力加速度; K 为介质渗透率; H 为介质层厚度; ΔT 为介质底顶板温差(适用于底板温度高于顶板); k 为介质的等效导热系数。

式(1)表明,人为可改变的参数仅有介质渗透率 K 和介质层厚度 H ,而块石层上覆盖填土厚度会影响块石层底顶板温差。由此可以得出块石路基的主要设计参数为块石层厚度、块石层粒径以及路基高度。

1.2 块石路基辅助设计参数

块石层上部是路基填土以及路面结构层,对于块石层较大的孔隙率而言,如果在块石层上部直接填筑路基,势必会导致细颗粒土漏进块石层的孔隙中,进而导致块石层的孔隙率降低,影响到块石层内部的空气流动,减弱块石路基的冷却效果。因此,为了防止细粒土漏入块石孔隙中,需要在块石层上部设置粒径逐渐过渡的碎石层和砂砾层。

1.3 块石气冷路基最佳粒径范围

块石层粒径与块石层中空气自然对流强度息息相关,由于块石中的孔隙具有随机、无定向以及弯曲

的特征,当块石粒径较小时,空气在块石孔隙间的流动阻力较大,影响空气自然对流强度。同时,块石粒径越小,块石与空气接触的面积也越大,导致块石层整体导热系数增大,这会影响到块石层在暖季的隔热性,因此块石气冷路基宜选用粒径较大的块石作为填筑材料。文献[9]通过室内试验,研究了平均粒径分别为 8.3、14.8、22.1、27.1 cm 的块石层降温效果,结果表明,平均粒径为 22.1 cm 的块石层底部温度最低,降温效果最好。文献[10]对粒径范围为 5~8 cm、8~15 cm 和 15~20 cm 的块石层降温效果进行研究,发现空气对流强度与块石粒径有关,以 15~20 cm 粒径范围的块石层中空气流速最大,自然对流效应最强。试验结果表明,粒径范围为 15~30 cm 的块石具有最佳的冷却效果,因此本文设计方法采用粒径范围为 15~30 cm 的块石作为块石气冷路基填筑材料。

2 块石气冷路基冷却功率分析

2.1 有限元模型及参数

根据青藏公路 K3006+300 处块石气冷路基试验路建立有限元模型,如图 1 所示。图中, h_{ks} 为块石层厚度。采用多孔介质内的空气自然对流理论来模拟计算块石路基工作状态,控制微分方程为连续性方程、动量方程和能量方程。

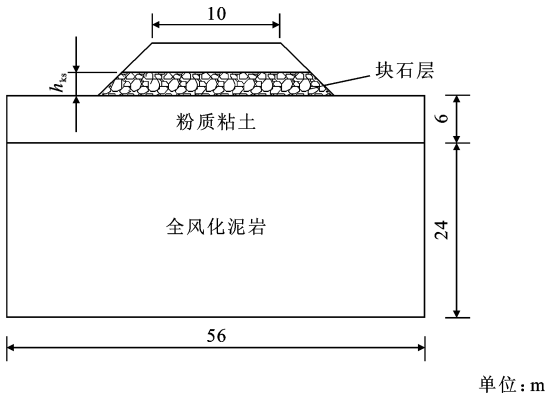


图 1 有限元模型示意

Fig. 1 Finite element model

块石区连续性方程

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

块石区动量方程

$$C_e^* = \begin{cases} C_f \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} \\ C_u \end{cases}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}v_x - \rho B|v_a|v_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\mu}{K}v_y - \rho B|v_a|v_y - \rho_a g \quad (4)$$

块石区能量方程

$$C_e^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) - C_a \rho \left(\frac{\partial (v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y T)}{\partial y} \right) \quad (5)$$

采用 Boussinesq 近似来简化分析,对空气密度仅考虑动量方程中与体积有关的项,其余各项中的密度作为常数,可表示为

$$\rho_a = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (6)$$

式中: v_x 、 v_y 分别为空气在 x 、 y 方向上的渗流速度分量; $|v_a| = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$; B 为非达西流的 Beta 因子(惯性阻力系数),对于达西流 $B=0$; C_e^* 、 λ_e^* 分别为介质等效体积热容($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)和等效导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$); μ 为空气的动力粘度($kg/(m \cdot s)$); ρ_a 为空气密度(kg/m^3); p 为空气压力(Pa); y 方向为重力方向; β 为空气的体积热膨胀系数(K^{-1}); ρ_0 、 T_0 分别为空气密度(kg/m^3)和温度($^\circ C$)的参考值。

试验路所处路段在海拔 4 000 m 处,空气定压比热 $C_p = 1 004 J/(kg \cdot ^\circ C)$,导热系数 $\lambda = 2.0 \times 10^{-2} W/(m \cdot ^\circ C)$,动力粘滞系数 $\mu = 1.75 \times 10^{-5} kg/(m \cdot s)$,密度 $\rho = 0.64 kg/m^3$,空气热膨胀系数 $\beta = 3.67 \times 10^{-3} / K$;块石层平均粒径为 20 cm 时渗透率 K 为 $3.48 \times 10^{-6} m^2$ 。

由于土体在冻结和融化过程中热传导项远大于对流项(约 2~3 个数量级),故对流项可忽略,只考虑热传导及冰水相变作用,土层区的传热控制方程可简化为如下形式

$$C_e^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (7)$$

采用显热容法处理冰水相变潜热,假设含水介质相变发生在温度区间 $T_m + \Delta T$ 。其中 T_m 为边界温度。在建立等效体积热容时,应考虑温度间隔 ΔT 的影响,同时假设介质在已冻、未冻时的体积热容 C_f 、 C_u 及导热系数 λ_f 、 λ_u 与温度无关,因此简化构造出 C_e^* 和 λ_e^* 的表达式为

$$\begin{aligned} T &< T_m - \Delta T \\ T_m - \Delta T &\leq T \leq T_m + \Delta T \\ T &> T_m + \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

$$\lambda_e^* = \begin{cases} \lambda_f & T < T_m - \Delta T \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ \lambda_u & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中： L 为含水介质单位体积相变潜热。

2.2 材料参数、边界条件、几何模型

数值模型材料参数根据现场土质及含水量，参 考文献[20]确定，如表 1 所示。

表 1 热物理参数

Tab. 1 Thermal parameters

岩性	重度/(kg·m ⁻³)	含水量/%	导热系数/(J·(m·h·K) ⁻¹)		比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	
			冻土	融土	冻土	融土
砂砾土	1 960	7	5 400	5 050	969	1 138
粉质粘土	1 700	30	6 600	5 300	1 470	1 530
全风化泥岩	2 100	15	9 100	7 300	995	1 375
块石层	1 700	0	108		580	

高 2.6℃^[22]，确定边界条件见表 2。表中， T_n 、 T_p 、 T_c 分别为天然地表、沥青路面和路基边坡地温边界条件。

表 2 有限元模型温度边界条件

Tab. 2 Temperature boundary conditions of finite element model

位置	温度边界
地表	$T_n = -0.5 + 11.5 \sin(\frac{2\pi}{8\,760}t + \frac{\pi}{2}) + \frac{2.6}{8\,760 \times 50}$
路面	$T_p = 3 + 15 \sin(\frac{2\pi}{8\,760}t + \frac{\pi}{2}) + \frac{2.6}{8\,760 \times 50}$
边坡	$T_c = 1 + 13 \sin(\frac{2\pi}{8\,760}t + \frac{\pi}{2}) + \frac{2.6}{8\,760 \times 50}$

式中： t 为时间(h)，当 $t=0$ 时，对应试验路所在地区的时间为 7 月初；模型下边界取 30 m 深度处地温梯度为 0.025℃/m，则模型下边界热流密度 q 为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -0.06 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (10)$$

模型中其余边界取绝热边界。有限元模型的初始温度场取在天然地表温度上边界条件下，计算 100 年后天然场地的温度场。建立不同路基高度以及不同块石层厚度条件下共 16 种计算工况，见表 3。

表 3 计算工况

Tab. 3 Calculation conditions

路基高度/m	块石层厚度/m					
	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4
2	●	●	●	●	○	○
3	●	●	●	●	●	●
4	●	●	●	●	●	●

注：●表示有此计算工况；○表示无此计算工况。

2.3 模型验证

为了验证有限元模型的合理性，将计算结果与实测地温进行比较，图 2(a)、图 2(b)分别为初始地温计算结果与实测值的关系，计算值与实测值较为接近。

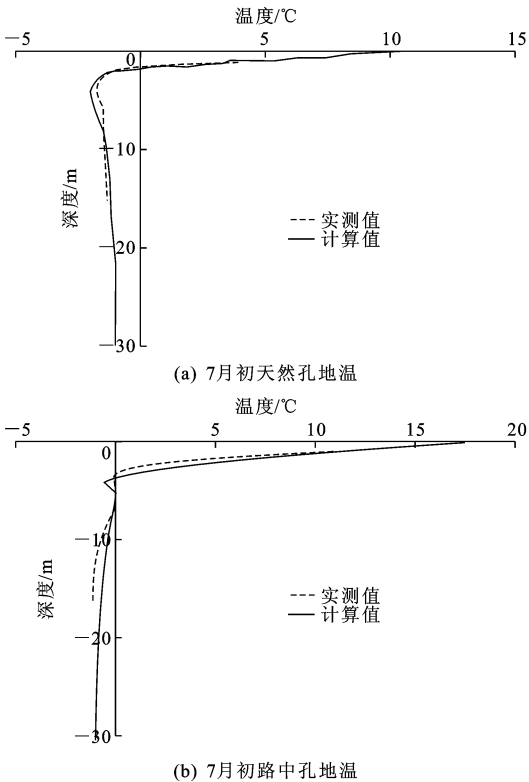


图 2 计算模型合理性验证

Fig. 2 Rationality verification of calculation model

2.4 数值计算结果分析

2.4.1 块石层内的空气流动

下页图 3 为路基高度 3 m，块石层厚度 1.2 m 工况下，块石层内空气速度场分布状况。图 3(a)表

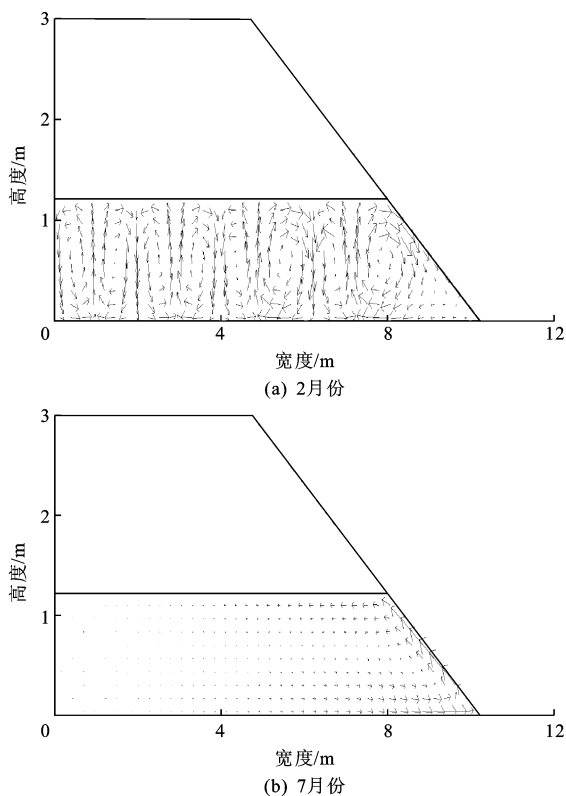


图3 块石层内空气速度场分布

Fig. 3 Air velocity field in crashed rock

明,冬季时块石层内部出现明显的空气对流情况(图中箭头表示空气流动的方向),可以看出在块石层中自然对流作用下,块石层内部出现多个对流涡包,表明在块石层强烈自然对流作用下,外界环境中的冷量不断被引入多年冻土层中。图3(b)表明,在暖季时块石层内部的对流基本消失,说明在暖季时,块石层的自然对流基本停止,此时块石层较低的导热系数发挥隔热作用。

图4为路基中部块石层内空气流速在一年中随时间的变化规律。由图4可以看出,块石层内的空气流速在12月初开始逐渐增大,在2月初流速达到峰值,至4月初逐渐消失,空气最大流速约为5 mm/s,块石路基发生自然对流的有效工作时间约为4个月,从4月初至11月底,竖向空气流速基本为0,说明在此期间块石层内部未发生自然对流。

2.4.2 冻土上限变化情况

冻土上限的变化情况是反映冻土路基融沉的重要指标,图5为20年中不同厚度块石层情况下冻土上限的变化情况。图5表明,随着块石层厚度增加,块石路基对多年冻土层的冷却效果在增强,冻土上限下降量不断减少,0.6 m厚度块石路基,冻土上限在20年中下降了5 m,年平均下降量0.25 m/年;当

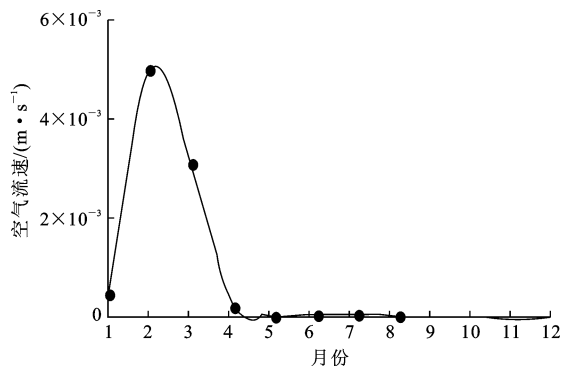


图4 块石层内空气流速随时间变化过程

Fig. 4 Change process of air velocity with the changes of time in crashed rock

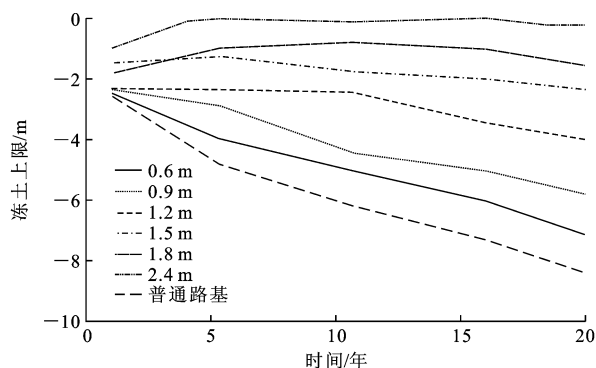


图5 不同厚度块石层下的冻土上限变化情况(3 m高路基)

Fig. 5 Change process of permafrost table (3-meter-high embankment)

块石层厚度增加到1.5 m时,冻土上限下降量减少到1 m,年平均下降量0.05 m/年,仅为0.6 m厚块石路基的20%;当块石层厚度增加至2.4 m时,块石层的冷却效果进一步增强,冻土上限抬升0.6 m,说明块石路基对多年冻土的影响与块石层的厚度密切相关。在一定路基高度范围内,随着块石层厚度的增加,多年冻土上限下降速度减缓,或使多年冻土上限抬升。

2.5 块石气冷路基冷却功率

以普通填土路基热量收支为参照,定义冻土上限附近处块石路基与普通填土路基的热量收支之差为块石路基作用于多年冻土层上的制冷量 Q_L ,则块石路基的冷却功率可表示为

$$Q_L = Q_P - Q_K \quad (11)$$

$$P = \frac{Q_L}{t} \quad (12)$$

式中: Q_L 为块石路基的制冷量; Q_P 为普通路基热量收支; Q_K 为块石路基热量收支; P 为块石路基冷却功率; t 为时间。

在块石气冷路基计算模型的基础上,建立普通

填土路基有限元模型,计算普通路基多年冻土上限附近热量收支情况,代入式(12)后计算块石气冷路基冷却功率。

图 6 为块石层冷却功率与块石层厚度之间的关系。图中 R^2 为判定系数。由图 6 可以看出,随着块石层厚度增加,块石层的冷却功率近似呈线性增长,1.8 m 厚度块石层比 0.6 m 厚度块石层的冷却功率提高了约 286%。对块石层冷却功率与块石层厚度之间进行线性拟合可得

$$P=0.18h_{ks}-0.025 \tag{13}$$

式中: h_{ks} 为块石层厚度。

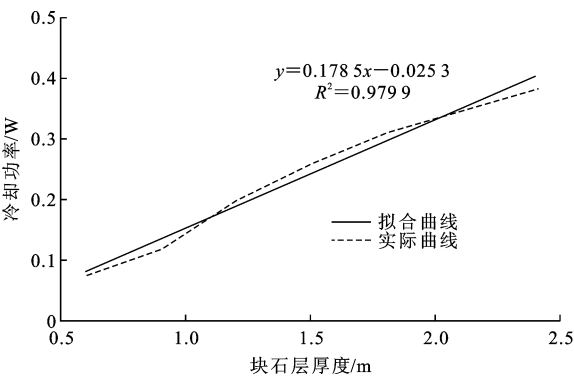


图 6 块石层冷却功率与块石层厚度关系(3 m 高路基)

Fig. 6 Relationship between the cooling power and crashed rock thickness (3-meter-high embankment)

2.6 路基高度对冷却功率的影响

路基高度对块石层冷却效果有较大影响,块石层上覆盖填土厚度增加时,块石层上表面温度梯度减小,进而将削弱块石路基冷却功率,因此块石路基冷却功率计算公式需要考虑不同路基高度情况下的修正。图 7 为不同路基高度情况下块石路基冷却功率变化曲线。

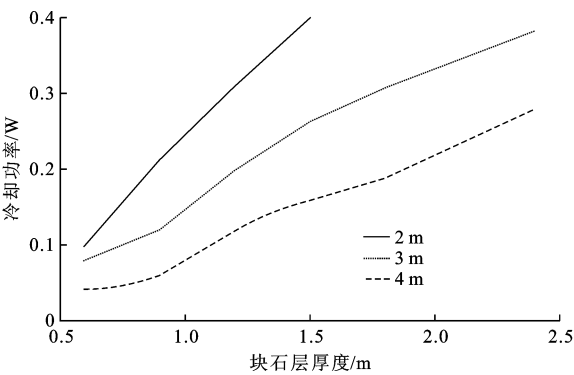


图 7 不同路基高度下块石路基冷却功率曲线

Fig. 7 Relationship between the embankment height and cooling power of air-cooled embankment

图 7 表明,相同块石层厚度情况下,块石气冷路基的冷却功率随着路基高度增加呈 0.1 W/m 的趋

势减小,因此可以得到引入路基高度因素的块石层功率修正计算公式

$$P=0.18h_{ks}-0.025+0.1(H_L-3) \tag{14}$$

$$h_{ks}=5.56(P-0.1H_L)+1.81 \tag{15}$$

式中: H_L 为路基设计高度。

上式为根据块石路基冷却功率和路基高度计算得出的块石层厚度,将多年冻土层需求的冷却功率代入即可求得合适的块石层厚度。

3 多年冻土层冷却功率需求

多年冻土层的融化下沉是导致冻土路基病害的重要原因,多年冻土区路基中采用的措施均为了减缓冻土上限的下降,从而达到减少冻土路基发生融沉病害的目的。因此,控制冻土上限下降量是评价冻土路基工程措施的一个重要指标。目前高原冻土区几条新建高等级公路对路基变形量提出了总体控制要求,以青海省 G214 共和—玉树公路为例,设计要求多年冻土路基 20 年的沉降变形量不大于 30 cm。由于冻土路基的沉降变形多来自多年冻土层的融化下沉,所以路基变形量的控制直接对多年冻土上限下降量提出了要求。图 8 为冷却功率与冻土上限下降量之间的关系。

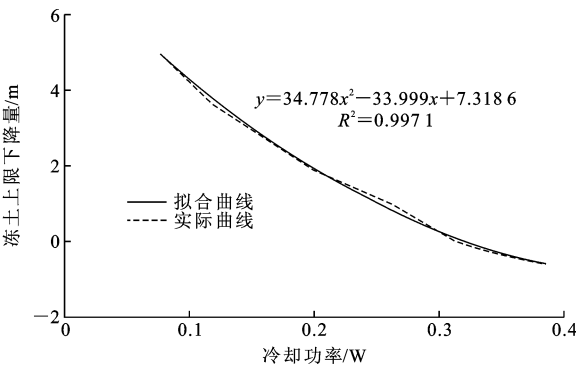


图 8 冷却功率与冻土上限下降量的关系

Fig. 8 Relationship between the cooling power and permafrost table decline amount

由图 8 可以看出,冷却功率与冻土上限下降量呈近似线性关系,随着冷却功率的增加,冻土上限下降量迅速减少,当冷却功率达到 0.31 W 时,冻土上限基本不再发生变化,进一步增加冻土层冷却功率后,冻土上限出现抬升,冻土路基热稳定性进一步提高。

对冷却功率与冻土上限下降量进行曲线拟合,可得到

$$d=35P^2-34P+7.32 \tag{16}$$

式中: d 为冻土上限下降量。

对式(16)求解可得冻土上限下降与块石层冷却需求功率的计算公式为

$$P_x=0.49-0.17\times\sqrt{0.93+d}$$
 (17)

式中: P_x 为对应冻土上限下降控制条件下的块石冷却功率需求量。

4 块石气冷路基设计流程

4.1 设计流程

图 9 为块石气冷路基设计流程。

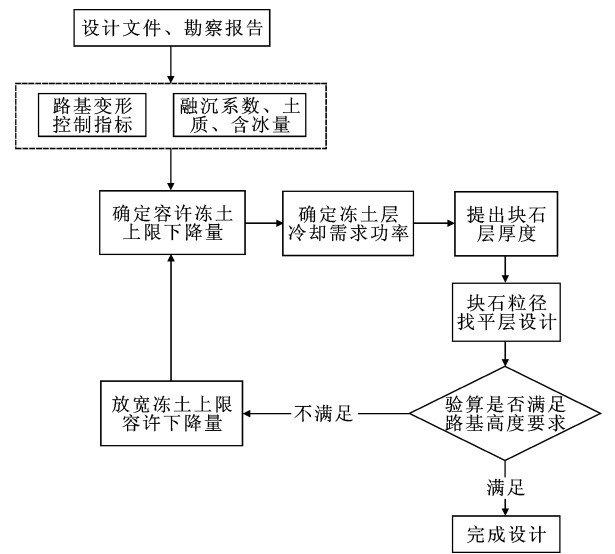


图 9 块石路基设计流程

Fig. 9 Design flow of air-cooled embankment

4.2 工程实例

G214 线是西宁与青海南部地区联系的一条重要通道,2010 年 4 月 14 日玉树发生 7.2 级地震后,更成为玉树地区灾后重建的重要后勤保障通道,国家规划把 G214 线共和—结古段建成具有青海特色的高等级公路。G214 线穿越大片连续和不连续多年冻土区,地温监测资料表明,公路沿线多年冻土地温基本均为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,属于多年冻土中的高温不稳定、高温极不稳定多年冻土区。块石气冷路基设计依据及控制目标见表 4。

表 4 块石气冷路基设计依据及控制目标

Tab. 4 Design basis and control objectives of air-cooled embankment

种类	工程内容	工程参数
设计依据	冻土类型	饱冰冻土
	路基设计高度 H_L/m	3
	冻土层融沉系数 $\omega/\%$	30
	路面结构层厚度 h_{lm}/cm	70
沉降控制目标	总变形量 D/cm	30

根据融沉系数算得容许的冻土上限下降量

d 为

$$d=\frac{D}{\omega}=\frac{0.3}{0.3}=1\text{ (m)}$$
 (18)

计算得到所需的块石层冷却功率 P_x 为

$$P_x=0.49-0.17\times\sqrt{0.93+d}=0.25\text{ (W/m}^2\text{)}$$
 (19)

计算得到合适的块石层厚度 h_{ks} 为

$$h_{ks}=5.56(P_x-0.1H_L)+1.81=1.53\text{ (m)}$$
 (20)

进行块石路基结构设计:依据前节分析,块石层粒径确定为 15~30 cm,结合目前青海省 G214 共和—玉树公路中采用的找平层设计参数(找平层经现场铺筑后确定设计合理),块石气冷路基几项结构参数如表 5 所示。

表 5 块石气冷路基结构设计参数

Tab. 5 Structural design parameters of air-cooled embankment

工程内容	参数
块石层粒径/cm	15~30
块石层上部找平层 h_{zp}	20 cm 碎石+30 cm 砂砾
碎石找平层粒径/cm	5~6

进行路基高度验算

$$d_A=h_{ks}+h_{lm}+h_{zp}=1.5+0.7+0.5=2.7\text{ m}<H_L=3\text{ (m)}$$
 (21)

式中: d_A 为块石路基和路面结构层总厚度。

验证满足路基高度要求,设计完成,块石气冷路基结构设计如图 10 所示。

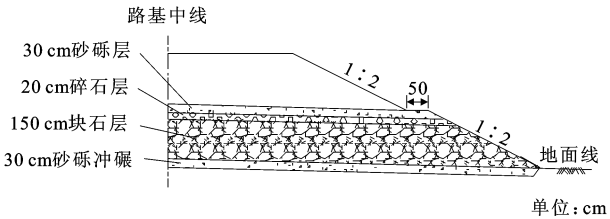


图 10 块石气冷路基结构设计

Fig. 10 Structural design of air-cooled embankment

5 结 语

(1)引入表征块石气冷路基对多年冻土层作用强度大小的指标——块石层冷却功率,对不同厚度块石层及不同高度路基的数值计算表明,路基高度一定的情况下,块石路基冷却功率随块石层厚度增加而增加;相同块石层厚度情况下,块石气冷路基冷却功率随路基高度增加而减少。

(2)将路基沉降控制目标、冻土类型以及块石层结构设计几个方面通过多年冻土层对冷却功率的需求大小而联系在一起,设计流程简洁明确,易于

推广。

(3)设计方法建立在年平均气温 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区,下一步研究将进行年平均气温对块石冷却功率影响的分析,并对计算公式进行修正。

参考文献:

References:

- [1] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134-141.
CHENG Guo-dong. Research on engineering geology of the roadbed in permafrost regions of Qinghai-Xizang plateau[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 134-141. (in Chinese)
- [2] Tong C J, Wu Q B. The effect of climate warming on the Qinghai-Tibet highway, China[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24(1): 101-106.
- [3] 陈建兵, 汪双杰, 章金钊, 等. 青藏公路高路基病害的形成及其机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 30-35.
CHEN Jian-bing, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Formation and mechanism of high subgrade diseases of Qinghai-Tibet highway [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 30-35. (in Chinese)
- [4] Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 43(3): 150-163.
- [5] Wu Q B, Lu Z J, Zhang T J, et al. Analysis of cooling effect of crushed rock-based embankment of the Qinghai-Xizang railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 271-282.
- [6] 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)
- [7] 蒋富强, 杨永鹏. 青藏高原多年冻土区通风管路基传热规律研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 11(122): 27-48.
JIANG Fu-qiang, YANG Yong-peng. Rresearch on the heat transfer law of ventilation pipeline embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 11(122): 27-48. (in Chinese)
- [8] 孙志忠, 马 巍, 李东庆. 青藏铁路北麓河试验段块石路基与普通路基的地温特征[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 303-308.
SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Ground temperature characteristics of block stone embankment and traditional embankment at Beiluhe along Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 303-308. (in Chinese)
- [9] Zhang M Y, Lai Y M, Yu W B, et al. Experimental study on influence of particle size on cooling effect of crushed-rock layer under closed and open tops[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(3): 232-238.
- [10] 卞晓琳, 何 平, 吴青柏, 等. 粒径对块石层自然对流特性影响的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 1-6.
BIAN Xiao-lin, HE Ping, WU Qing-bai, et al. Experimental study on the influence of the particle diameter on the natural convection characteristics of the block stone layer[J]. China Railway Science, 2011, 32(1): 1-6. (in Chinese)
- [11] 王爱国, 马 巍, 王大雁. 不同厚度块石路堤对冻土路基冷却效果对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3283-3288.
WANG Ai-guo, MA Wei, WANG Da-yan. Comparison study on cooling effect of frozen-soil foundation on block-stone railway embankment with different thickness of block-stone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3283-3288. (in Chinese)
- [12] 王爱国, 马 巍, 吴志坚. 块石路堤上覆砂砾石厚度对冻土路基冷却效果的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2333-2341.
WANG Ai-guo, MA Wei, WU Zhi-jian. Study on influence of sand-and-gravel layer thickness up block-stone railway embankment on cooling effect of frozen-soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2333-2341. (in Chinese)
- [13] 吴青柏, 董献付, 蒋观利. 开放和封闭条件下块石结构路基下部降温效果差异[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2565-2571.
WU Qing-bai, DONG Xian-fu, JIANG Guan-li. Cooling effect differences of soil beneath open and closed block-stone embankments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2565-2571. (in Chinese)