

文章编号:1001-7372(2004)02-0018-06

路堤块石自然对流机理的室内模拟试验研究

汪双杰^{1,4}, 孙斌祥^{2,3}, 徐学祖^{2,3}, 章金钊⁴

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000;

3. 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;

4. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710075)

摘要:为研究路堤块石在边界温度周期波动条件下的自然对流发生机理及降温效应的表征参数, 采用室内模拟方法对 $50 \times 50 \times 65 \text{ cm}^3$ 尺寸的不同块石试样进行了试验和理论分析, 结果表明: 平均 RAYLEIGH 数能描述块石层自然对流的发生情况, 不同厚度的块石层将产生不同的对流模式, 厚度大的块石层所产生的自然对流降温效应也较大, 上层砂砾加下层块石的结构自然对流效应最弱。块石层降温效果取决于块石粒径、层厚及铺筑在路堤中的位置, 这一结论对多年冻土地地区路堤设计、施工, 合理确定块石铺筑层厚、铺筑层位具有现实指导意义。

关键词:道路工程; 块石层自然对流机理; 室内模拟试验; RAYLEIGH 数

中图分类号: U416.12

文献标识码: A

Research on laboratory experiment of natural convection mechanism of embankment ballast

WANG Shuang-jie^{1,4}, SUN Bin-xiang^{2,3}, XU Xue-zu^{2,3}, ZHANG Jin-zhao⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Department of Civil Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China;

4. The First Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to study the natural convection mechanism of embankment ballast and the token parameter influenced by lowering temperature during cyclical fluctuations of verge temperature, various ballast samples with dimensions of $50 \times 50 \times 65 \text{ cm}^3$ have been tested and studied theoretically. The results show that the mean RAYLEIGH number can effectively represent the conditions of natural convection of the ballast layers. The ballast layers with different depth will have various convection mechanism. The cooling effect of natural convection in ballast layer will increase with the ballast layer depth increasing. The effect of natural convection in the roadbed composition of sand-gravel layer with ballast layer is very poor. The effect resulting from lowering temperature of ballast layer will depend on the gravel diameter. The conclusion of ballast layer depth and its position in embankment can be used effectively for the design of ballast embankment in cold regions and determining the ballast layer depth and its location during construction.

Key words: road engineering; natural convection mechanism of ballast layer; laboratory experiment; RAYLEIGH number

收稿日期: 2003-05-18

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2002 318 00004); 中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金项目(200103)

作者简介: 汪双杰(1962-), 男, 安徽安庆人, 中交第一公路勘察设计研究院教授级高级工程师, 东南大学工学博士研究生。

E-mail: wangshj@ccroad.com.cn

0 引言

青藏高原高温、高含冰量多年冻土和气候变暖等因素直接影响公路、铁路的路基稳定^[1,2,3~5],采用一般路基结构很难解决这一问题,建设中通常需要采用专门技术来减少因冻土层热学状况变化而引起的路基融沉,以保证路基稳定性^[1~10]。研究表明^[8~13]:采用多孔块石填筑的路堤结构具有较强的冬季自然对流降温效应,能够自然冷却路基下的冻土层,以达到减少甚至消除寒区路基的融沉。目前,对于恒定边界温度条件下路堤块石的自然对流发生机理已有一些试验证明^[10],对于边界温度周期波动条件下路堤块石小试样的自然对流发生机理也有相应的试验和理论研究^[11~12],但有关边界温度波动条件下路堤块石大试样的自然对流发生机理研究相对缺乏,在边界温度周期波动条件下路堤块石自然对流降温效应的表征参数也还需要明确,有关具体工程的应用条件和相关参数等也需进一步研究。对上述问题进行研究将有助于相关技术应用于青藏公路整治改建工程及青藏铁路工程建设之中。

1 试验方法

路堤块石的试样盒设计成内尺寸为 $50 \times 50 \times 65 \text{ cm}^3$ 、壁厚 5 cm 的绝热箱体,盒内填入给定粒径的路堤块石,并用振动的方法筑实,为进行对比试验,其内也可填装砂砾石,或者在底部填筑一定厚度的砂砾石层后再填装给定粒径的路堤块石。试样盒内上端要预留 10 cm 以上的空间,以便试样盒上端用与一台制冷机单独相连的一个可调控温度的顶板覆盖,顶板外侧采用和试样盒相同的绝热材料,使内部块石试样与外界环境处于绝热状态,整个试样盒见图1。为减小侧向热传导对试样盒内块石温度变化的影响,试验中采用二级控温方式进行温度控制,具体做法是把上述两个试样盒并排放入尺寸为 $150 \times 80 \times 110 \text{ cm}^3$ 的低温模拟试验箱中,低温模拟试验箱的箱温被控制为近似恒温,为了凸显路堤块石冬季自然对流的降温效应,低温模拟试验箱中的环境温度应高于顶板温度周期波动的平均值,温度单独由一台制冷机控制,实际测得的试验箱环境温度为 $0 \sim 1^\circ\text{C}$,这时环境温度对试样盒内负半周温度变化的影响将有增温的趋势,如果能测到块石中低于热传导的降温效应,则其可确定为由冬季自然对流所产生。每个试样盒内块石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,正中

心一排(A_2 、 B_2)各有12只,两边距侧壁 5 cm 处各一排(A_1 、 A_3 和 B_1 、 B_3)各有7只,每个热敏电阻传感器均被精确标定,传感器在块石试样中竖直方向的位置被预先给定,具体布置位置见图1。所有传感器都被连接到能自动定时采集数据的数据采集仪中,再与一台式计算机相连,每隔 5 min 由计算机程序自动采集、存贮温度读数。

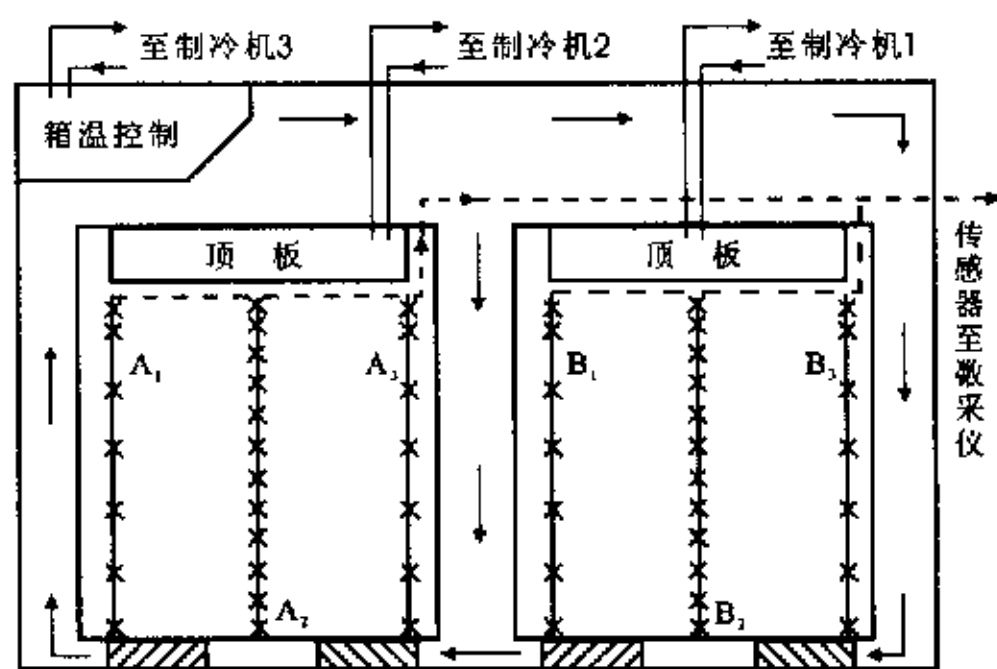


图1 试验装置

Fig. 1 Test setting

为了比较路堤块石和砂砾石的冬季自然对流降温能力,试验中针对4种试样进行了具体测试。1号试样由粒径为 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 的块石组成;2号试样为双层结构,上部分填筑粒径为 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 的块石,下部分敷设粒径小于 0.5 cm 的砂砾石;3号试样也为双层结构,但上部分填筑砂砾石,下部分铺设粒径为 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 的块石;4号试样完全由砂砾石组成。各层具体高度见表1,试验所用块石、砂砾石和空气的物理参数见表2。

表1 试样参数

Tab. 1 Test sample parameter

试样号	1	2	3	4
试样组成	块石	上层块石+ 下层砂砾	上层砂砾+ 下层块石	砂砾
高度/cm	53	25+29	19+36	55
平均温度/ $^\circ\text{C}$	-1.00	-1.79	-0.06	0.61
温度振幅/ $^\circ\text{C}$	16.43	11.33	10.65	8.71

试验中,每个试样盒的顶板温度分别各用一台能预先设置给定温度波动规律的可编程低温循环制冷机控制,温度波动规律被设定为按正弦函数变化,温度波动的振幅为 25°C ,温度波动的平均值为 0°C ,由于能量损耗,具体测得的顶板平均温度值要比该设定值大。需要特别指出:试验中块石试样表面的温度变化是由预设的顶板温度波动通过顶板下的空气引起的,故块石试样表面的温度变化远比顶板内的温度变化要小,其实际变化需要通过传感器进行

监测,具体结果见表 1。从实测结果可知,在相同顶板温度波动条件下,4 种试样表面温度变化的振幅和平均值是不同的,并且块石试样表面的平均温度

更低一些,附着层理论^[14]认为相同的气温波动在不同的材料表面引起的温度变化应该是不同的,因此试验结果是合理的。

表 2 材料的物理参数

Tab. 2 Physical parameter of material

材料	粒径/cm	密度/kg·m ⁻³	空隙率/%	渗透率/m ²	导热系数/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	容积热容量/J·m ⁻³ ·K ⁻¹
块石	6~8	1 490	45.7	4.38×10 ⁻⁶	0.396	1.250×10 ⁶
砂砾	≤0.5	1 800	—	3.00×10 ⁻¹⁰	1.128	2.176×10 ⁶
空气	—	0.800	—	—	0.024	1.010×10 ³

2 试样的物理假设及数学描述

2.1 物理假设和控制方程

路堤块石自然对流属于多孔介质单相不可压缩气体非稳态的非等温渗流问题。设多孔块石被空气所饱和,并且块石是均质和不变形的,块石试样的固相岩石与气相空气间处于局部的热平衡状态,认为多孔介质的 PRANDTL-DARCY 数比较大,可略去惯性项使 DARCY 定律能够满足,另外,块石试样中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,BOUSSINESQ 近似能成立^[15]。设路堤块石试样的渗透率为 K ,有效导热系数和有效容积热容量为 λ_e 和 C_e ,块石试样空隙中空气的热膨胀系数、动力粘滞系数、容积热容量分别为 β 、 μ 和 C_a ,则多孔块石试样要满足的连续性方程、能量方程和动量方程,可表示为

$$\Delta v = 0 \quad (1)$$

$$C_e \frac{\partial \theta}{\partial t} + C_a v \Delta \theta = \Delta(\lambda_e \Delta \theta) \quad (2)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} [\Delta p + \rho_0 \beta (\theta - \theta_0) g] \quad (3)$$

式中: θ 、 t 分别为温度和时间; v 为块石试样空隙中空气的速度矢量; θ_0 、 ρ_0 分别为参考温度及空隙空气在该参考温度下的密度; g 为重力常数矢量; $p = p' - \rho_0 g z$,为去除静水压力后的空气压强, p' 为块石试样空隙中的空气压强, z 轴取竖直向下为正向。

当介质处于冻、融的交替变化时,热质传输问题需要考虑介质冻融的相变潜热,具体分析时可采用显热容法来确定能考虑相变法潜热的有效导热系数 λ_e 和有效容积热容量 C_e ^[15]。这样,式(1)~(3)所描述的方程组是一组耦合的非线性偏微分方程组,需要用数值方法进行分析^[10,15],据此可以求得介质中的温度分布和空隙中空气的自然对流情况。要求解式(1)~(3)还需要边界条件,严格来说,试验所采用的块石试样应属于三维问题,但针对中心剖面上自然对流问题可近似为二维问题^[10]。因此,对于块

石试样,除块石层表面边界外,其他边界均可近似为绝热、不透气的边界,而块石层表面边界的热边界条件为给定温度,由传感器实际监测结果可知,在指定时刻其值沿整个块石上表面边界可近似为等温条件,同时,由于顶板的密封,块石层表面边界的压力边界条件可简化为不透气的边界。

2.2 平均 RAYLEIGH 数

研究表明^[9~11,15,16],多孔介质中自然对流是否发生强烈依赖于渗流 RAYLEIGH 数,它决定着多孔路堤块石空隙中空气流动的特性。通常,RAYLEIGH 数 R_a 被定义为

$$R_a = \frac{\rho_0 g \beta C_a K H \Delta \theta}{\mu \lambda_e} \quad (4)$$

式中: $\Delta \theta$ 为多孔块石层底部与表面之间的温度差; H 为多孔块石层的高度。当块石层表面的温度随时间发生变化时,RAYLEIGH 数 R_a 也将随时间变化,其中,在温度波动到负温时,块石层中有可能产生浮力驱动的自然对流降温效应,实际工程应用中如能强化这种冬季降温效应,将能减小寒区路堤的融沉。

当块石层铺设在路堤下某一深度位置时,其上、下边界通常表现为非等温边界,这时,式(4)中的温度差 $\Delta \theta$ 将沿上、下边界变化,为研究块石层自然对流的整体效果,可定义一个块石层下边界 z_2 处与上表面边界 z_1 之间的平均温度 $\Delta \bar{\theta}$,具体为

$$\Delta \bar{\theta} = \frac{1}{L_d} \int_{L_d} (\theta|_{z=z_2} - \theta|_{z=z_1}) dy \quad (5)$$

式中: L_d 为块石层边界特征长度; y 为水平坐标。

于是,平均 RAYLEIGH 数 \bar{R}_a 可具体表示为

$$\bar{R}_a = \frac{\rho_0 g \beta C_a K H \Delta \bar{\theta}}{\mu \lambda_e} \quad (6)$$

一般情况下,寒区块石路堤中自然对流的发生情况通常是通过 0℃ 等温线和温度波动平均值的变化来讨论的^[9,10,13],然而,如果能够确定块石层中自然对流效应与随时间变化的平均 RAYLEIGH 数之间的关系,将能有效地分析块石路堤冬季自然

对流降温效应的发生情况。

3 试验结果和讨论

3.1 块石层中的自然对流

通过实测温度值拟合,可由式(6)求得1~3号试样中块石层下、上边界间随时间变化的平均RAYLEIGH数 \bar{R}_a ,具体变化规律见图2,其中零线(点线)以上部分正的RAYLEIGH数将对应于块石层可能产生的自然对流,而负号部分只对应于单纯热传导状态。很明显,1号试样的平均RAYLEIGH数波幅为最大,3号试样的平均RAYLEIGH数波幅为最小,这主要是由于1号试样中块石装满整个试样盒,且顶板温度波幅大,特别是由砂砾石组成的4号试样的平均RAYLEIGH数几乎为零。另外,块石层中自然对流是否发生还与块石层的形状尺寸及边界条件有关,其影响主要表现为存在一个最小临界RAYLEIGH数 R_{ac} ,只有当试样中块石层的RAYLEIGH数变化到大于最小临界RAYLEIGH数 R_{ac} 时才会产生自然对流^[11,15,16]。

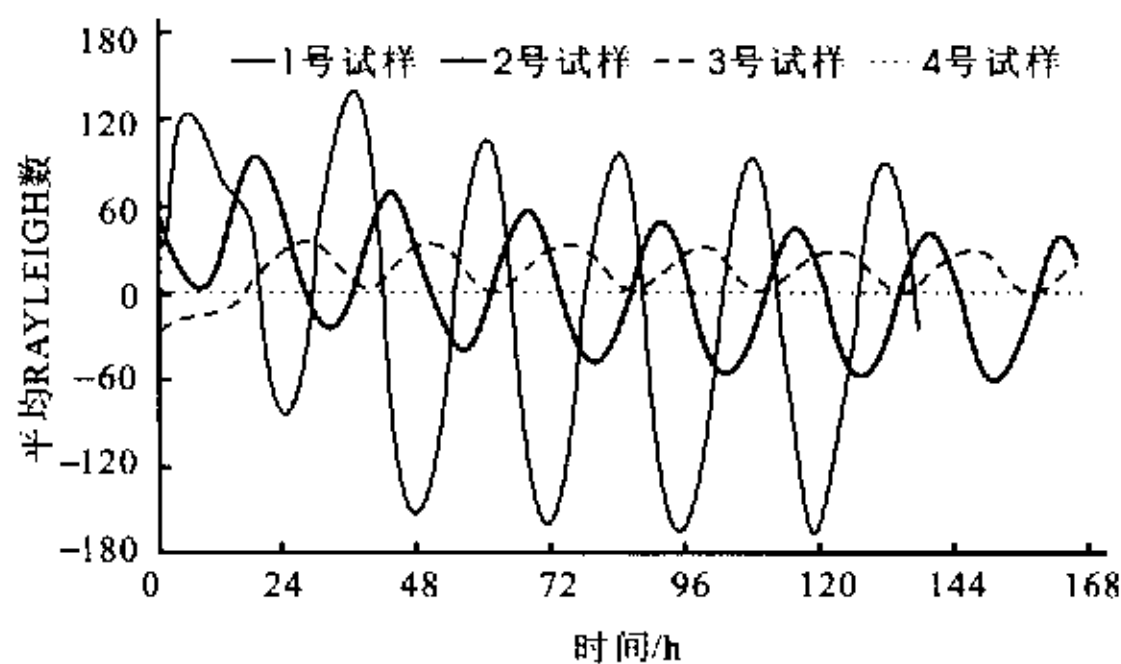


图2 块石层的平均RAYLEIGH数 \bar{R}_a

Fig. 2 Mean RAYLEIGH of ballast layer

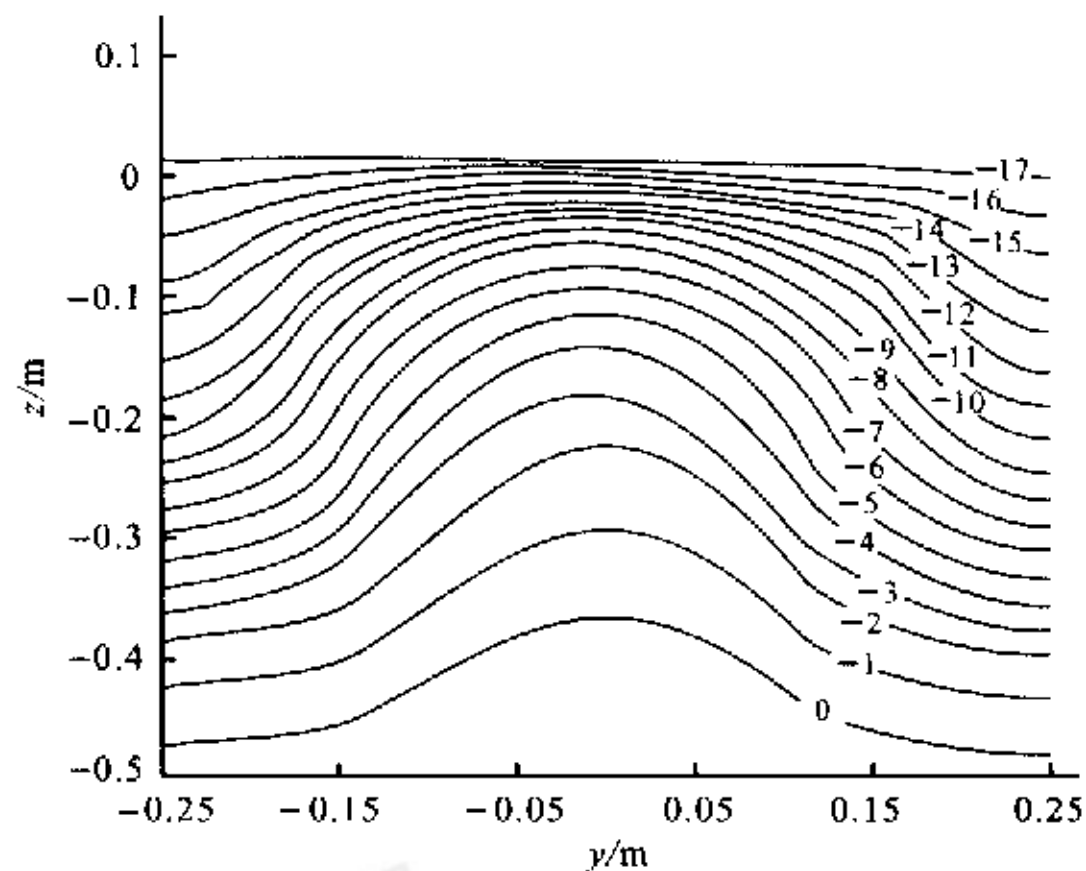


图3 1号试样在边界温度最低时的温度场

Fig. 3 Temperature field of No. 1 sample at lowest verge temperature

为研究不同试样块石层中产生的自然对流效应,图

3~5给出了1~3号试样在表面温度波动到最低时由式(1)~(3)求得的温度分布情况,结果均显示出有自然对流效应产生。其中,1号试样块石层中形成了两个并排的对流涡包,即为(2,1)对流模式,使试样中的温度分布表现为两边的温度下降要比中间快得多,在1号试样中发生(2,1)对流模式的最小临界RAYLEIGH数 $R_{ac} \approx 66.3$,对照图2,1号试样的

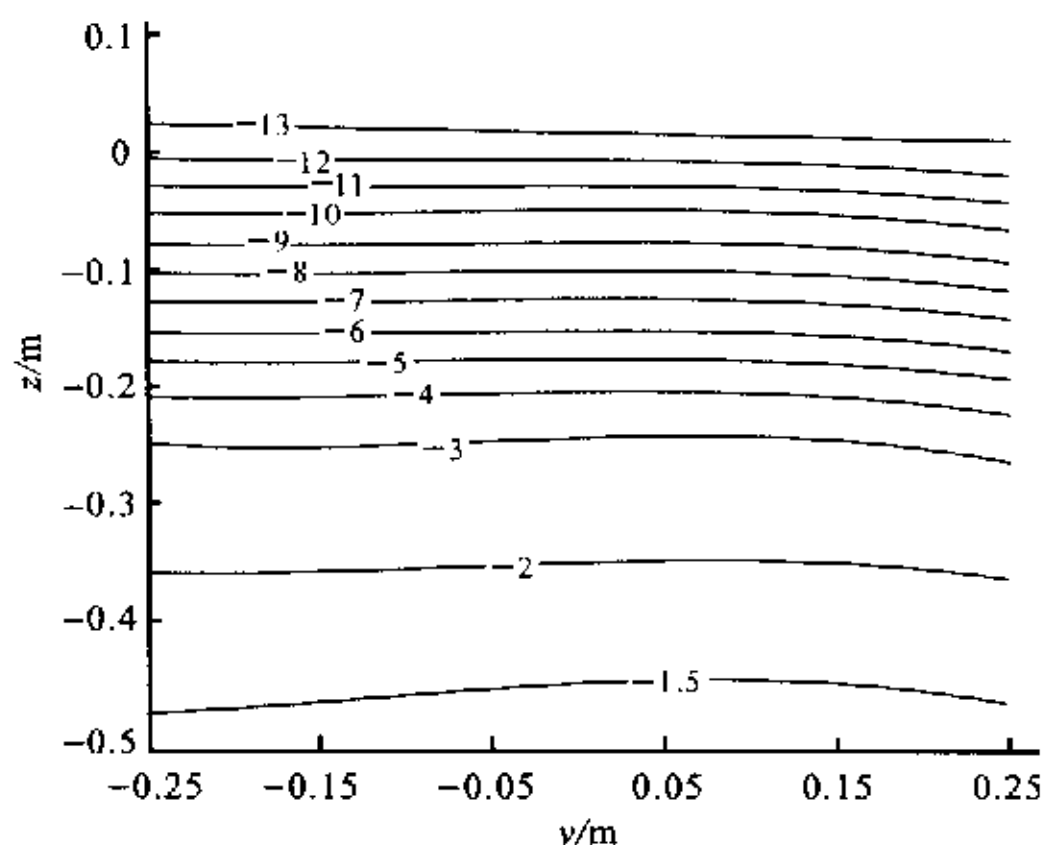


图4 2号试样在边界温度最低时的温度场

Fig. 4 Temperature field of No. 2 sample at lowest verge temperature

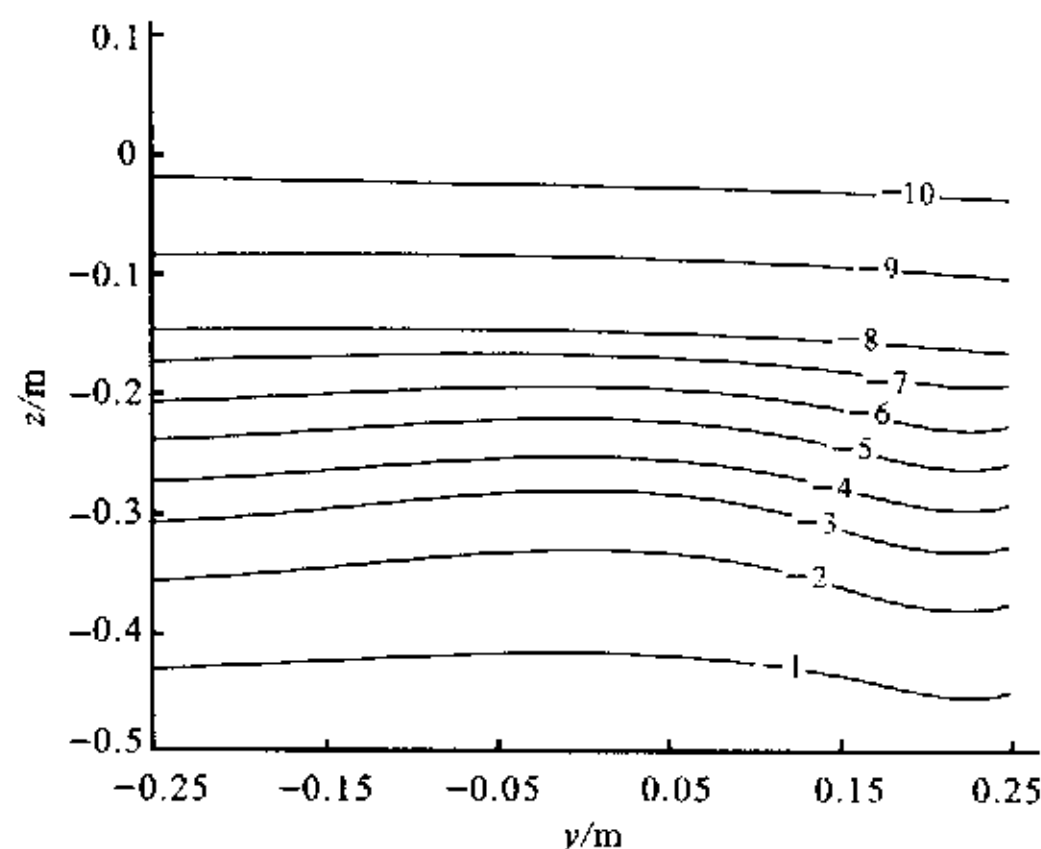


图5 3号试样在边界温度最低时的温度场

Fig. 5 Temperature field of No. 3 sample at lowest verge temperature

平均RAYLEIGH数很多时候均能远大于 R_{ac} 。2号试样块石层中发生的自然对流为(1,1)模式,只形成一个对流涡包,试样中的温度分布表现为右边的温度下降要比左边快,但总体上自然对流效应比较小,这是由于在2号试样中发生(1,1)对流模式的 $R_{ac} \approx 56.5$,而产生自然对流的平均RAYLEIGH数可以大于这一最小临界RAYLEIGH数,更进一步的理论分析发现,当平均RAYLEIGH数小于上述临界值时,块石中发生的对流模式为(2,1)模式。3号试样块石层中发生的自然对流显示为(2,1)模式,

也形成了两个对流涡包,试样中的温度分布与1号试样的相似,但自然对流效应比前两种情况要小,从图2看出,3号试样的平均 RAYLEIGH 数为最小,但其还是产生了(2,1)对流模式,因为产生该对流模式的最小临界 RAYLEIGH 数 $R_{ac} \approx 45.0$ 。最后,数值计算表明:完全为砂砾石的4号试样几乎不产生自然对流,试样内的等温线为一簇水平平行线,与一维单纯热传导数值解相对应。

3.2 块石层中自然对流效应的试验验证

图6、7分别给出了表面温度周期波动条件下1号试样、2号试样25 cm处左、中、右3点的温度变化测试值与计算值比较。试验值与理论计算值均显示试样表面温度波动到正温时3点温度变化趋于重合,这表明当温度波动到正半周时块石中并不产生自然对流,试样热传输机理表现为单纯的热传导形

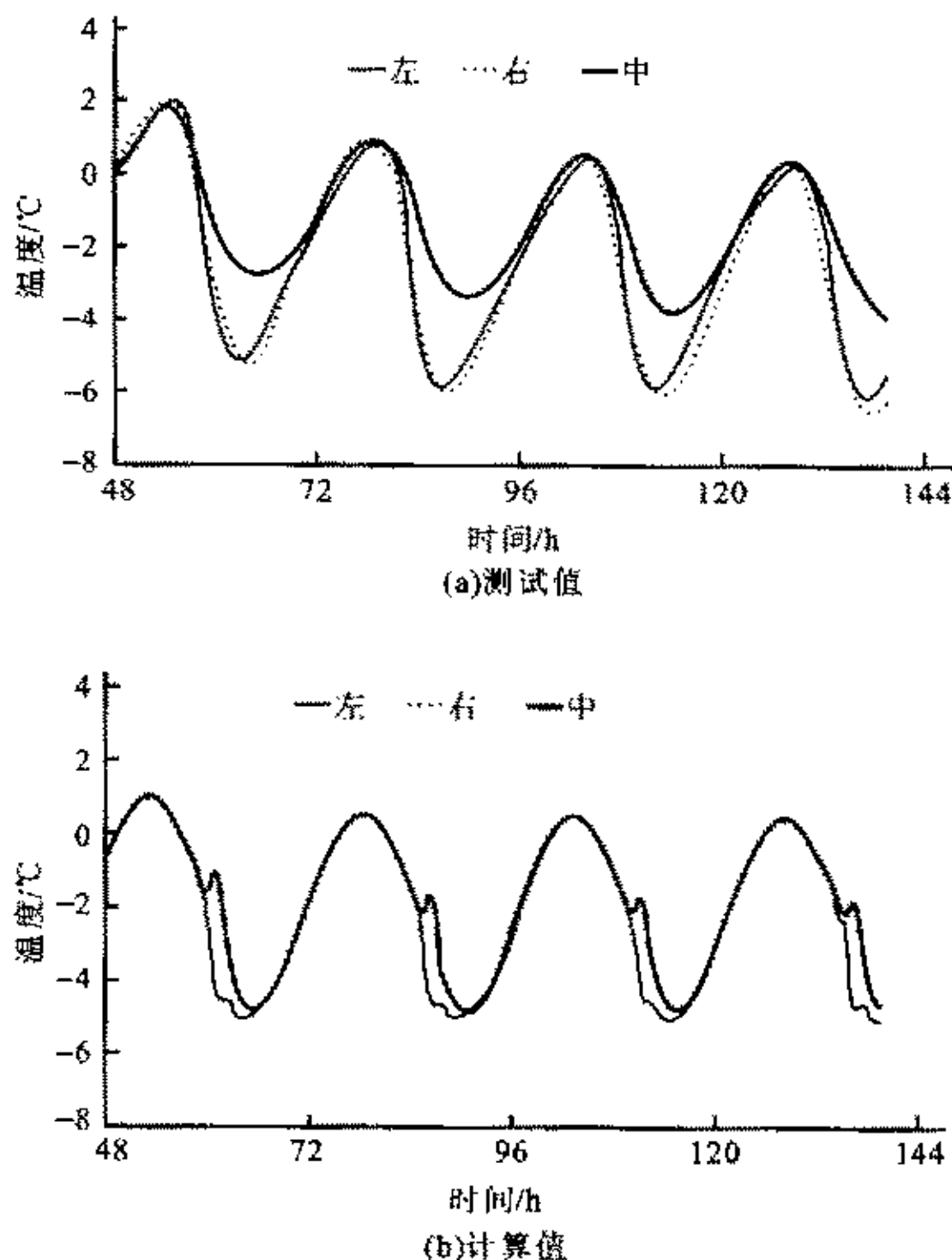


图6 1号试样25 cm处温度变化值比较
Fig. 6 Temperature comparison of No. 1 sample at depth of 25 cm

式,而当试样表面温度波动到负半周时3点温度变化趋于分离,这种趋势1号试样比2号试样表现得明显,特别是1号试样中左、右两点具有相同的温度变化且比中间点要下降得快,这与前面理论分析认为的发生(2,1)对流模式相一致。而2号试样中这3点温度的变化是不同的,显示出右边温度比左边下降得更低,中间点下降程度居于左右两点之间,这也与(1,1)对流模式相一致。结果表明:温度波动

到负半周时试样块石层中产生了自然对流效应,这使得试样从下部向上部传输的热量要大于单纯的热传导传热,显示出块石层在冬季具有自然对流降温效应。另外,从温度变化的试验曲线和理论曲线均表现出当温度从最低值上升时自然对流迅速减弱直至消失的特点。块石层厚度较大的1号试样自然对流效应要比2、3号试样的自然对流效应强得多,在相同的表面温度波动情况下,上面填筑有较厚砂砾层的3号试样的自然对流效应为最弱,因此,在实际的块石路堤施工中要注意块石表面不能填筑太厚的粘土等小粒径材料。

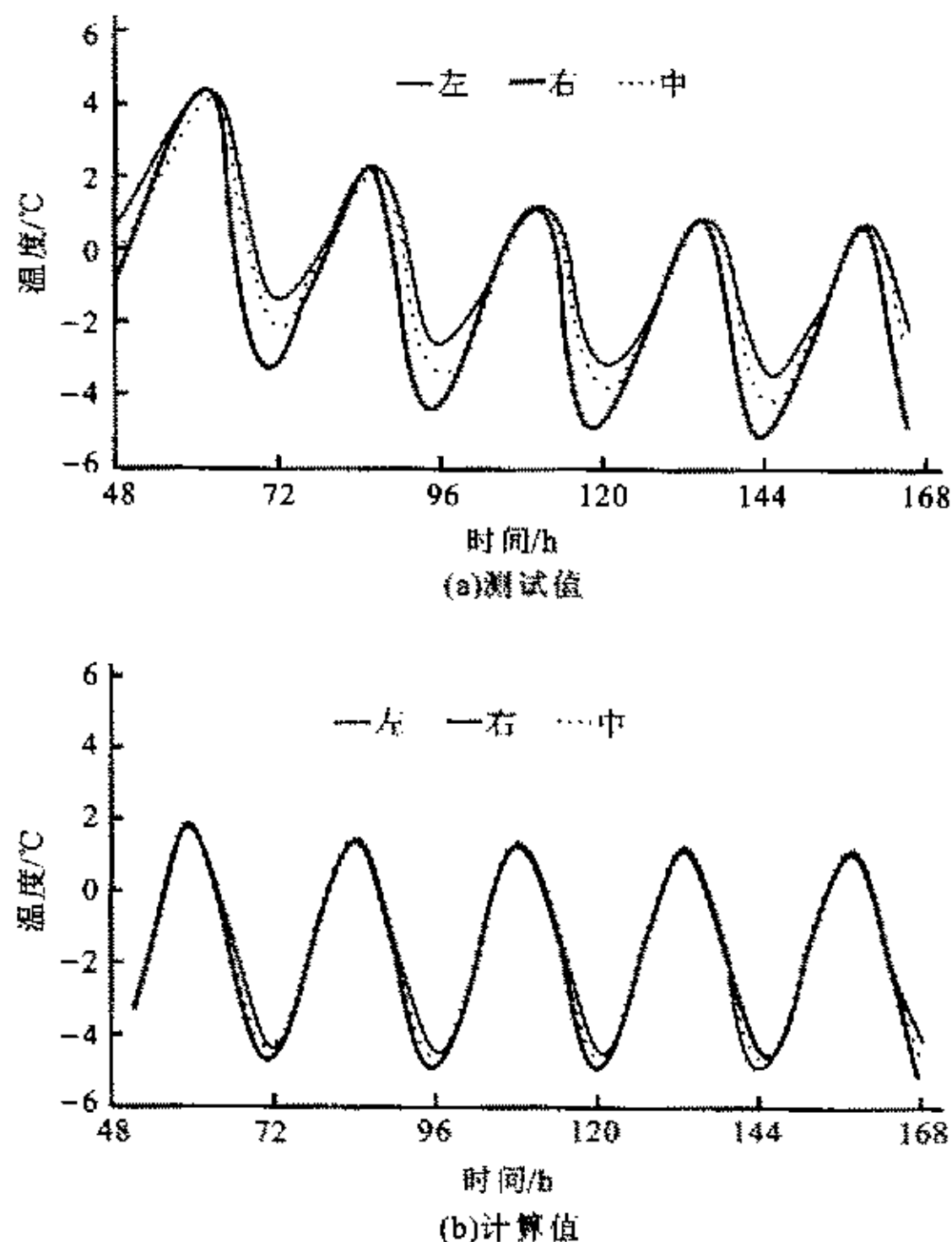


图7 2号试样25 cm处温度变化值比较
Fig. 7 Temperature comparison of No. 2 sample at depth of 25 cm

图6、7的结果表明:实际测得的自然对流降温效应要比理论计算结果大,首先它与理论计算中选取块石、空气和砂砾的物理参数有关;也与测量温度的热敏电阻传感器的定位精确性有关。由于块石的粒径比较大,测量温度的传感器偏离原来初定的位置,也会造成较大的影响。

4 结 语

试验研究和理论分析表明:在温度周期波动条件下,块石层将能产生有利于寒区路堤稳定的自然对流降温效应,采用平均 RAYLEIGH 数可有效地判断块石层自然对流效应的发生情况,不同厚度的

块石层将发生不同形式的对流模式,厚度较大的块石层所产生的自然对流降温效应也越大,在块石层表面填筑小渗透性材料的隔离层时要注意尽量减小其厚度,以免减弱块石层的自然对流降温效应。

参考文献:

- [1] 窦明健,胡长顺.多年冻土地区路基设计原则及其应用[J].冰川冻土,2001,23(4):402—406.
- [2] 王铁行,胡长顺,王秉纲,等.考虑多种因素的冻土路基温度场有限元方法[J].中国公路学报,2000,13(4):8—11.
- [3] KANE D L, HINKEL K M, GOERING D J, et al. Non-conductive heat transfer associated with frozen soils[J]. Global and Planetary Change, 2001, 29(1): 275—292.
- [4] SIMONSEN E, ISACSSON U. Thaw weakening of pavement structures in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 135—151.
- [5] WU Qing-bai, ZHU Yuan-lin, LIU Yong-zhi. Evaluation model of permafrost thermal stability and thawing sensibility under engineering activity[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 19—30.
- [6] WU Qing-bai, SHI Bin, LIU Yong-zhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang Highway[J]. Science in China (Series D), 2002, 45(12): 1—9.
- [7] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001.
- [8] 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.
- [9] GOERING D J, INSTANES A, KNUDSEN S. Winter-time convection in open-graded embankments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24(1): 57—74.
- [10] GOERING D J, KUMAR P. Convective heat transfer in railway embankment ballast [A]. THIMUS. Ground Freezing 2000[C]. Rotterdam: Balkema Publishers, 2000. 31—36.
- [11] 孙斌祥,徐学祖,赖远明,等.块石路堤、护坡导热系数的试验研究[J].中国公路学报,2003,16(3): 6—10.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 吴紫汪,程国栋,朱林楠,等.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1988.
- [15] NIELD D A, BEJAN A. Convection in Porous Media [M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [16] 孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科技大学出版社,1999.

《中国公路学报》入选“中国期刊方阵”

“中国期刊方阵”的建设是现阶段中国期刊出版事业发展的需要,是推进新世纪中国期刊发展的战略性举措,它将促进中国期刊“精品战略”的实施,创出一批品牌期刊使之成为中国期刊的“中坚”。“中国期刊方阵”分为四个层面:第一个层面是“双效”期刊,就是以全国现有的8000多种期刊为基数,选取10%~15%社会效益、经济效益都好的重点期刊,大约1000种左右。这一部分是“中国期刊方阵”的基础,由新闻出版署制定统一标准,把指标分配到各个省和中央的有关部门抓落实。第二个层面是“双百”期刊,就是每两年一届滚动式评选的百种重点社科期刊和百种重点科技期刊。这一层面虽然只有200种,但在“中国期刊方阵”中是最充满活力的。这一部分由新闻出版署和科技部直接抓落实。第三个层面是“双奖”期刊,就是获得国家期刊奖和获得国家期刊奖提名奖的期刊,每3~4年评选一次,获奖期刊100种左右。这一部分基本上是大刊名刊,具有较强的自我扩张能力,它们实际上已经是国内的名牌期刊。第四个层面是“双高”期刊,就是高科技和高学术水平的期刊。本次评选出716种科技期刊进入“中国期刊方阵”,其中“双高”期刊40种,“双奖”期刊58种,“双百”期刊122种,“双效”期刊496种。《中国公路学报》属“双效”期刊。

《中国公路学报》编辑部