

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0076

LIANG Mingxuan, GE Jianrui, NIU Yonghong. Study on the effect of ambient temperature on heat transfer characteristics of gravel layer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3):1006-1015. [梁铭轩, 葛建锐, 牛永红. 环境温度对碎石层传热特性的影响研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3):1006-1015.]

## 环境温度对碎石层传热特性的影响研究

梁铭轩<sup>1,2</sup>, 葛建锐<sup>3</sup>, 牛永红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 碎石层的传热机理研究对寒区路基改善技术的应用以及自然界中的“异常”冻土分布的解释有着重要的意义。很多研究者曾对碎石层进行了试验研究,但试验中的温度设置并无统一标准。相较于细颗粒土,粗颗粒材料中水分的影响较小,因此在试验中的温度设置对试验的结果起到了关键作用。为了对比不同的温度设置情况对碎石传热过程的影响,以不同的顶板温度、底板温度以及环境温度进行复合,并对不同组合情况应用COMSOL软件,在考虑碎石层多孔介质传热的情况下进行模拟。结果表明:即使在保温层包裹的情况下,环境温度依然能对温度剖面以及垂直方向上的热通量产生明显的影响。当环境温度与碎石层平均温度一致时,垂直方向上的热通量达到最小值,此时换热效率最低。因此,在此后的室内碎石层试验设计中,若需减少水平方向上的热量交换带来的影响,应尽量将环境温度设置在碎石层平均温度附近。工程中可通过降低碎石层侧边界温度来增强碎石层内外的热量交换,从而增强碎石层的换热效率。

**关键词:** COMSOL; 多孔介质; 传热; 热通量; 温度剖面

**中图分类号:** TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)03-1006-10

### 0 引言

碎石堆积是自然环境下的常见现象,这种局部因素可以改变局地的地气热交换状况,影响其下土体的温度分布,导致在某些低纬度、低海拔的地区形成局部点状多年冻土<sup>[1]</sup>。Harris等<sup>[2]</sup>通过对地温和气温的监测,发现碎石堆中的平均地温会比其周边低4~7℃;Delaloye等<sup>[3]</sup>在瑞士西北的Creux du Van的岩屑下发现了多年冻土,此地年平均气温为5.5℃;Niu等<sup>[4]</sup>在中国北部某位于多年冻土南界以南超600 km的碎石坡上发现了多年冻土,该区域的年平均气温为6~8℃。这些现象的形成成因与碎石层的传热特性紧密相关。

程国栋等<sup>[5]</sup>以数值模拟与模型试验的方式对封闭碎石层内对流模式进行了系统的分析,揭示了其物理基础为Rayleigh-Bénard对流,当碎石层下界面

温度高于上界面温度且温差足够大时,下层空气受热膨胀从而向上运动,而上层密度较大的冷空气则会下沉,进而强化上下之间的热交换。在冬季时,地温高于气温,碎石层内形成的热对流有效地排出了碎石内的热量,夏季时则由于空气较弱的导热能力且热对流不形成,外部热量向碎石层内部的传递受到了限制。如此碎石层整年的热量处于支出状态,碎石起到了“热半导体”的作用,能降低地层温度,保护其下部的多年冻土。

程国栋<sup>[6]</sup>提出“主动冷却地基”的思路,主张使用积极的措施保护多年冻土、冷却地基,以确保工程的稳定。块石通风路基、抛片石护坡、渠基碎石换填以及抛石路基等块碎石相关工程技术被广泛应用在寒区的公路、铁路、输水渠道等诸多方面<sup>[7-9]</sup>,与我国重大工程建设项目紧密联系。一些研究者通过数值模拟、模型试验以及现场试验的方式对块

收稿日期: 2022-04-12; 修订日期: 2022-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405103); 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-051)资助

作者简介: 梁铭轩, 硕士研究生, 主要从事寒区渠道研究. E-mail: liangmingxuan20@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 牛永红, 副研究员, 主要从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: yhnium@lzb.ac.cn

碎石相关工程措施进行了研究<sup>[5,10-14]</sup>,证明了碎石层在工程中的应用均能有效地降低土体温度,保护多年冻土。相关措施的实际工程应用效果也得到了实地检测的有效证明<sup>[15-17]</sup>。研究碎石层的传热特性对解释自然环境下“异常”的冻土分布现象,在工程建设中利用碎石层传热特性改善冻土区地基状态、优化工程建筑物运营状况有着很重要的意义。

为了探究碎石层传热过程中的影响因素,弄清其作用机理,加强碎石层在工程中的作用,对碎石层传热的方式和关键参数进行室内试验研究必不可少。喻文兵<sup>[18]</sup>通过室内试验得出,封闭条件下碎石降温效果会更明显。汪双杰等<sup>[19]</sup>对路堤块石进行了室内试验,发现碎石层中的自然对流降温效应与碎石层厚度正相关。孙斌祥等<sup>[20]</sup>研究了碎石粒径对寒区路堤自然对流降温效果的,发现不同粒径的碎石层将产生不同的自然对流降温效果,其强度随着粒径的增大而增大。徐敦祖等<sup>[21]</sup>对青藏铁路块碎石路基进行了长期分析,认为岩石风化、水汽迁移以及震动荷载等因素会对碎石对流换热产生影响。徐敦祖等<sup>[22]</sup>通过室内试验发现混合粒径会导致对流效果减弱,为充分利用自然对流机制,应当使用单一粒径的碎石铺设路基;碎石层的平均温度会随着碎石层的增厚而下降。赖远明等<sup>[23]</sup>通过模型试验对开放边界强迫对流情况和封闭边界自然对流情况下的碎石层传热效果进行了研究。这些研究工作对碎石层传热过程的诸多影响因素进行了研究,为实际工程应用中的技术改进提供了理论和计算基础。

为了探讨块石路基自然对流发生的物理机制、测量块石路基单元的传热效率、研究不同因素,比如块石大小、排列方式,块石层厚度、顶底温差等对块石层传热效率的影响,侧向绝热(单向,或者说一维)的块碎石层传热特性试验是最基本也是最重要的试样手段。在进行碎石层传热特性室内试验时,设定合理的试验条件,保证试样处于单向传热状态至关重要。孙斌祥等<sup>[24]</sup>对不同粒径块石的热扩散系数以及导热系数进行了室内试验测量,在该过程中将试样桶用厚度为 10 cm 的海绵包裹,目的是使得试样桶侧向与底板绝热,为减少环境温度对测试的影响,环境温度被控制为恒温,数值为顶板温度波动的平均值;杨丽君等<sup>[25]</sup>以室内试验的方式研究了通风情况对透壁通风管开放碎石路堤降温效果的影响,此试验采取了双层温控系统,内层试验箱

为试样提供以正弦函数波动的空气温度,外层试验箱设置为内层试验箱波动温度的平均值,为内层提供近似恒温的外部温度状态;姚仰平等<sup>[26]</sup>研究了考虑覆盖层、碎石层、黏土层结构的锅盖效应导致的增水规律,在试验中试样上下两端的温度恒定,试样桶外侧包裹了保温材料,以进行单向冻结。整个冻结过程中试验装置被放置在室内;张春洋<sup>[27]</sup>对不同粒径的碎石进行了补水情况下的单向冻结研究,试验试样用保温材料包裹,试样顶底温度通过温控系统控制为稳定数值,环境温度被设定为顶底板温度的平均值。以上的研究者在试验过程中都很重视温度的控制,但试验时的隔热处理、环境温度如何设置,顶底温度的调节这些因素在研究时没有统一标准,试验条件的设置也不尽相同。不合适的试验设置可能会导致试验结果误差的增大,且不统一的控制条件使得不同的研究结果之间缺乏可比性。

侧向绝热的条件在理论上来说非常简单和直观,但在具体试验中实现起来却比较困难。研究者在进行类似试验研究时常用保温材料包裹试样,这一行为的目的是减少水平方向上的热量交换,减小环境温度对试验结果的影响,以达到侧向绝热的目的。但保温材料并非绝对绝热,所以实际的试验条件并非完全的侧向绝热,环境温度对试验结果可能具有较显著的影响。因此需要对这一问题进行研究,对环境温度的影响进行评估,并给出在现有试验条件下的优化措施。对外绝热的传热试验是一个简单的理论模型,虽然在实验室中难以准确做到,但可以通过计算机模拟计算方便地进行横向绝热状态下碎石层传热的分析。因此,在前人的数值分析工作的基础上,本文拟用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行模拟计算,对不同控制条件下的热传导问题进行分析,分析不同的设置方式与理论绝热状态的偏差程度,及其对试验结果的影响情况,以探究碎石层传热室内机理试验最优的环境设置。

## 1 研究方法 with 模型建立

本文通过 COMSOL Multiphysics 软件,对块碎石层单向冻结过程进行数值模拟。COMSOL Multiphysics 软件可以高效准确地对各种耦合物理场的数值仿真进行分析,软件本身提供了大量的预定义物理场,操作简便,软件操作界面对用户友好。对于较为复杂的物理场模拟,该软件提供了 PDE 模块

用于用户自行输入偏微分方程(PDEs)并指定方程之间的关系。目前 COMSOL 已成为寒区岩土计算领域的常用数值计算软件,其高效与准确性得到了认可<sup>[28-31]</sup>。

### 1.1 数学模型与控制方程

碎石区域可近似看成多孔介质<sup>[32]</sup>,在其内部可发生自然对流。做出以下假设以简化计算:

(1)符合 Boussinesq 假设,即模型中的气体不可压缩;

(2)碎石所近似的多孔介质与其中的流体均处于局部热平衡状态;

(3)将碎石层区域视为均匀和各向同性的。

碎石层内部空气运动方式为非稳态的非等温渗流,该区域控制方程如下<sup>[33-35]</sup>:

连续性方程:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{k} v_x - \rho B |v| v_x \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2} v - \rho B |v| v_y - \rho_a g \quad (3)$$

$$|v| = (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $B$ 为非达西流的惯性阻力系数; $k$ 为多孔介质的渗透系数; $\rho B |v| v_x$ 为惯性损失项; $p$ 为空气压力; $\mu$ 为空气黏度系数。

渗透率<sup>[36]</sup>与惯性阻力系数<sup>[37]</sup>由式(5)、(6)确定:

$$k = \frac{n^3}{390(1-n)^2} D^2 \quad (5)$$

$$B = \frac{\alpha(1-n)}{Dn^3} \quad (6)$$

式中: $n$ 为碎石孔隙率; $D$ 为碎石颗粒粒径;当碎石平均粒径大于 15 cm 时, $\alpha$ 取 1.32,当碎石平均粒径小于 15 cm 时, $\alpha$ 取 1.75。

能量方程:

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \rho C_p \left( \frac{\partial (v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y T)}{\partial y} \right) \quad (7)$$

式中: $C_p$ 为空气定压比热容; $C_e$ 为介质的等效体积热容; $\lambda_e$ 为等效导热系数。

$$C_e = (1-n)C_s + nC_p \quad (8)$$

$$\lambda_e = (1-n)\lambda_s + n\lambda + \lambda_{\text{disp}} \quad (9)$$

式中: $C_s$ 与 $\lambda_s$ 分别为碎石的热容与导热系数; $\lambda_{\text{disp}}$ 为热弥散系数。

在假设中设定空气不可压缩,但密度 $\rho_a$ 与温度

相关,在这里使用 Boussinesq 假设,仅考虑重力项中的空气改变。 $\rho_a$ 可表示为:

$$\rho_a = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (10)$$

式中: $\beta$ 为空气的热膨胀系数; $\rho_0$ 为空气密度参考值; $T_0$ 为空气温度参考值。

### 1.2 边界条件

考虑到模型区域与外界之间的空气对流换热,在模型中设置了垂直壁对流热通量与水平平板对流换热,计算公式如下。

垂直壁对流热通量:

$$q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad (11)$$

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left[ 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right] & \text{if } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left[ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 & \text{if } Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (12)$$

水平平板对流热通量:

$$q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad (13)$$

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} 0.54 Ra_L^{1/4}, & \text{if } T > T_{\text{ext}} \text{ and } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \\ \frac{k}{L} 0.15 Ra_L^{1/3}, & \text{if } T > T_{\text{ext}} \text{ and } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \\ \frac{k}{L} 0.27 Ra_L^{1/4}, & \text{if } T \leq T_{\text{ext}} \text{ and } 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $T_{\text{ext}}$ 为外界空气温度; $L$ 为换热边界的特征长度; $Ra_L$ 为瑞利数,用于判定浮力导致的流动强度,计算公式如下:

$$Ra_L = \frac{C_p \beta \rho^2 g L^3 \Delta T}{\lambda \mu} \quad (15)$$

式中: $\Delta T$ 为换热温差。

### 1.3 计算参数及模型建立

#### 1.3.1 计算参数

数值分析过程中所需输入的碎石骨架参数、流体参数及环境参数设置见表 1,在实际的传热过程中,模型内部空气的温度在不断变化,其黏度系数、比热容等物性参数也会随之变化,但在碎石层工作的温度变化范围内,空气的物性参数随温度变化对碎石层传热过程的影响较小<sup>[38]</sup>,故采用一个标准大气压下、0℃的空气的物性参数作为计算参数。

#### 1.3.2 模型建立

碎石层传热特性室内试验的试样一般为圆柱



表1 参数表		
Table 1 Parameter list		
物理量	数值	描述
$T_0$	273.15 K	温度参考值
$p_0$	$1.01\times10^5$ Pa	压强参考值
$\rho_a$	$1.293\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	空气密度参考值
$\mu$	$1.72\times10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$	空气黏度系数
$\nu$	$1.33\times10^{-5}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	空气运动黏度
$\beta$	$3.676\times10^{-3}\text{ K}^{-1}$	空气热膨胀系数
$\lambda$	$2.44\times10^{-2}\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	空气热传导系数
$c_p$	$1\,005\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	空气定压比热容
$\lambda_{\text{disp}}$	$0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	热弥散系数

状，高度范围在 10~60 cm，截面直径在 10~30 cm<sup>[24,26-27,39]</sup>，由于圆柱状试样的对称特性，可将计算区域简化成高为  $H$ ，高径比为  $r$  的长方形，范围分别为 10~60 cm 与 1:1~4:1。同理试样外层的有机玻璃与保温材料同样简化为长方形区域，厚度为 1 cm 与 2 cm，导热系数分别为  $0.19\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  与  $0.03\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。在有机玻璃与保温材料与外界环境的接触面设置热通量模块以模拟模型与外界环境的自然对流换热，当禁用热通量组件时，模型为对外绝热情况。

2 试验数据对比

2.1 室内单向冻结试验

为了验证计算模型，和参数取法的有效性，我们进行了碎石层单向降温过程的室内试验，所使用的材料为碎石换填料，通过等效球粒径对碎石进行了标定，用灌水法测量了其正常堆积情况下的空隙率。碎石的等效粒径为 1.01 cm，其空隙率为 44.50%。碎石的比热容、密度与导热系数分别为  $891\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $1\,334\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  与  $0.387\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。试样桶是高 20 cm，内径为 10 cm，外径为 12 cm 的空心圆柱体，由有机玻璃材质制成。桶身前方开有直径 0.3 cm 的圆孔 10 个，用于在垂直方向上布置温度探头。孔洞间距为 1 cm，其中最底部的孔洞圆心距离试样桶下部温度边界距离为 0.5 cm，最上方的孔洞距离下部温度边界距离为 9.5 cm。试样桶示意如图 1 所示。试样桶顶底分别与冷浴循环系统连接，通过冷液的循环可控制试样顶底温度稳定，使碎石层发生单向冻结。

具体试验步骤如下：首先冲洗并烘干所取碎石，以防止杂质对试验产生干扰，再将碎石逐层铺入试样桶中。当铺设到对应孔洞高度时，从侧边插

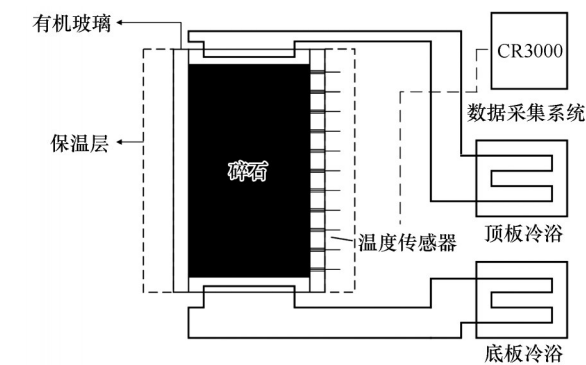


图1 试验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of test device

入温度探头，如此反复直至碎石高度达到 10 cm。用橡皮泥包裹温度探头暴露在外的部分，以封闭传感器周边的空隙。打开数据采集仪，观察传感器状态，确认均在正常工作后，将顶部冷板压放在碎石试样顶上，用保温材料包裹住试样桶，随后开启试样箱的温度控制，将环境温度设定为 5℃，恒温 6 小时，以确保试样温度稳定。待试样温度稳定后，调节顶板温度与底板温度为所需设定的温度，开启冷液循环，进行 12 小时的降温与数据采集。

2.2 试验数据与模拟对比

试验结束后对温度数据进行处理，由于冷浴设备的精度问题，实际顶底板温度与设定值存在一定误差，实际测得的顶底板温度分别为 -5.8℃ 和 4.8℃ 左右，环境温度约为 5.0℃。将这三个温度作为模型的边界温度代入计算后得到计算出的温度剖面数据，与试验数据进行对比得到图 2。九个温度测点的试验数据与模拟数据之间的相对偏差如表 2 所示。最大偏差为 3.05%，在误差允许范围内，可以认为模拟得到的结果基本可以反映冻结后的温度情况，各点位温度数据与实测基本吻合，由此认为该模型是有效、可靠的。

3 模拟方案及结果分析

3.1 模拟方案分组

通过室内进行的模型试验数据与简化后的数值模拟对比，证实了可以使用 COMSOL Multiphysics 软件来对不同环境条件下的碎石层传热过程进行分析研究。利用之前所使用的控制方程与边界条件，通过改变环境温度参数与温度梯度参数，计算不同参数对碎石层热状况的影响，导出温度剖面曲线数据。为判别各组模拟结果与理想状态热状态之间的偏差，将其量化为  $x=0.035\text{ m}$ （温度传感器

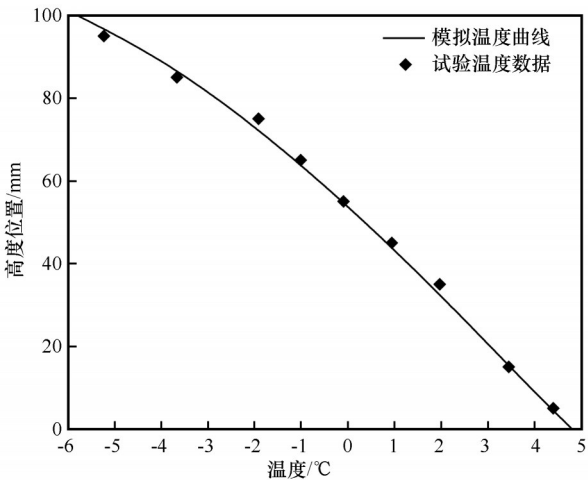


图2 试验数据与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison between experimental data and simulation results

表2 各点的计算相对偏差

Table 2 The calculation relative deviation of each point			
温度测点高度	试验数据/℃	模拟数据/℃	相对偏差/%
5 mm	4.398	4.349	-0.46
15 mm	3.445	3.475	0.29
35 mm	1.965	1.737	-2.15
45 mm	0.942	0.827	-1.01
55 mm	-0.093	-0.128	-0.33
65 mm	-1.009	-1.141	-1.25
75 mm	-1.912	-2.235	-3.05
85 mm	-3.659	-3.459	1.88
95 mm	-5.222	-4.940	2.66

探入位置)处温度剖面曲线的累积偏差 $\Delta = \int_{H_{\text{bot}}}^{H_{\text{top}}} (|T_{\text{cal}} - T_{\text{adia}}|) dh$ ,并计算其最大温度偏差 $\delta T_m = \max(T_{\text{cal}} - T_{\text{adia}})$ ,探寻最合适的机理试验环境温度设置标准。分组情况见表3。

为使得横向热量交换的影响更易在图中观察,

表3 各计算方案的温度参数设定

Table 3 Temperature parameter setting of each calculation case				
方案编号	顶板温度/℃	底板温度/℃	顶底温差/℃	环境温度/℃
1	-5	15	20	绝热
2	-5	15	20	5
3	-5	15	20	10
4	-5	15	20	0
5	0	15	15	绝热
6	0	15	15	7.5
7	-10	15	25	绝热
8	-10	15	25	2.5

将碎石层厚度增加至0.2 m,并将碎石的粒径增大到3.2 cm左右。

3.2 计算结果与分析

对碎石层的研究主要着眼于碎石层从下向上的热量释放过程,又由于Rayleigh-Bénard流的形成,使得不同位置的温度剖面曲线有一定的差异。为避免选取受对流扰动较大的边缘位置从而得到较为偏颇的结论,同时又要保证温度曲线的差异便于识别,对各方案模拟得到的温度场数据,我们取模型中的A(0.035,0)、B(0.035,0.2)两点作截线,提取该线上的温度数据,以2 h为时间节点,至温度场数据稳定,约24 h。整个模型区域的初始温度与底端温度相当,当计算开始后,各位置的温度在恒定的顶底温差以及环境温度的影响下变化。各方案的计算结果如下所示。

图3中方案1~4、5~6以及7~8分别对应三个不同的温度梯度,可以发现当侧边界由绝热变为非绝热后,各方案的温度曲线均出现了不同程度的变化,这说明侧边界上的热量交换即使在设置有隔热层的情况下也能对试样内的温度场产生明显的影响;各方案温度场在冻结进行了24 h后基本稳定,通过对比各图中试样单向冻结过程持续12 h与24 h时的温度曲线,可以发现非绝热情况的几组方案中两条曲线的差距更小,这说明热传导效率发生了变化。接下来会对这两点变化进行进一步的分析。

3.2.1 环境温度对温度剖面的影响

图4给出了方案1、方案2、方案3以及方案4四种温度条件设置情况下的最终稳态数据曲线对比。通过对比这四条曲线的情况,可以看出:环境温度设置越高,在同一高度位置的温度就越高,这是由于外界环境与模型内部形成了温度梯度,通过壁对外界的空气自由对流换热进行了温度交换,温度梯度越大则内部升温越多。在模拟情况下,桶内温度分布在-5~15℃的范围内。在方案3的条件下,外界温度设置为10℃,高于桶内平均温度,因此其曲线相较于方案1(绝热条件)下的曲线均有向高温侧偏移的现象。在方案2的条件下,外界温度设置为5℃,图中可见方案2的曲线与方案1的曲线相交于横坐标约3.7℃,纵坐标11.7 cm左右,在交点左侧,曲线向正温区弯曲;在交点右侧,曲线向负温区弯曲。说明在高于11.7 cm的位置,环境温度大于相同高度位置的桶内温度,热量通过壁面从外界向桶内传递;在低于11.7 cm的位置,环境温度小于桶

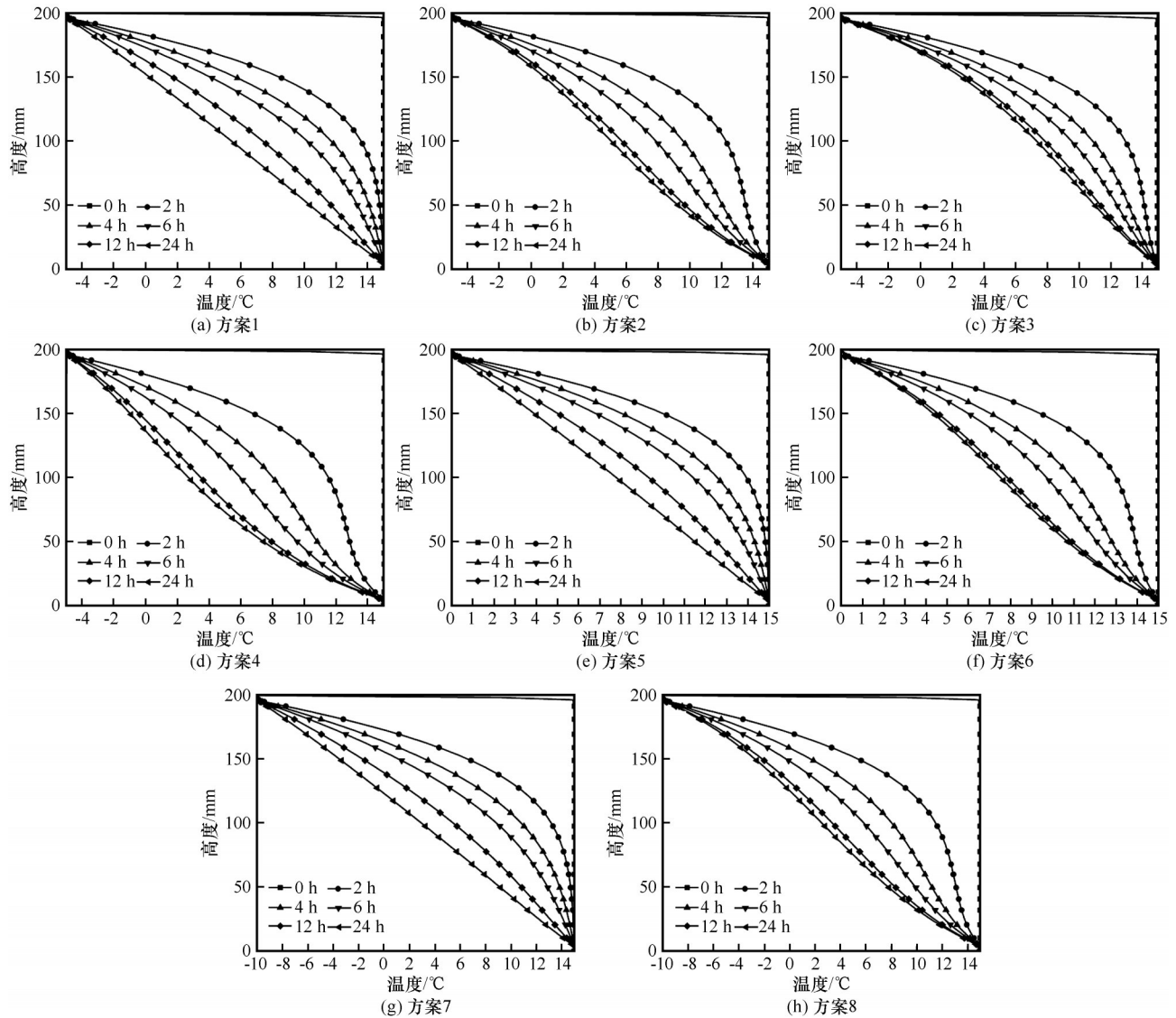


图3 各方案瞬态研究温度剖面图

Fig. 3 Transient study temperature profile of each case: case 1~8 (a)~(h)

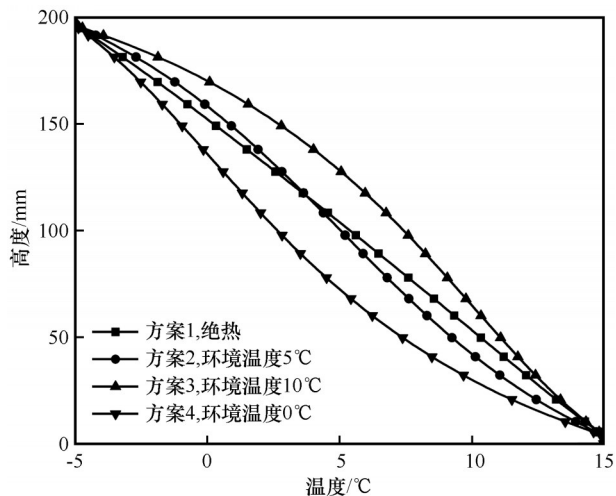


图4 方案1~4单向冻结24小时后的温度剖面曲线

Fig. 4 Temperature profiles of the case 1~4 after 24 hours of unidirectional freezing

内温度, 热量则是从桶内向外界散失。方案4的环境温度设置小于桶内平均温度, 温度剖面曲线向低温侧弯曲。

### 3.2.2 温度对热通量的影响

热通量定义为在单位时间内通过单位面积的热能, 在碎石的单向冻结过程中, 热通量的大小可以表现传热过程的强烈程度。在不考虑热辐射的情况下, 总热通量大小由对流热通量与传导热通量组成。为探究环境温度对碎石层降温过程的影响, 应以柱坐标系 $z$ 方向的热通量分量数据进行分析。方案1~4中碎石层的平均热通量随时间变化的情况如图5所示。各方案的温度梯度、环境温度设置与温度场稳定后的垂直方向热通量数据在表4中记录。



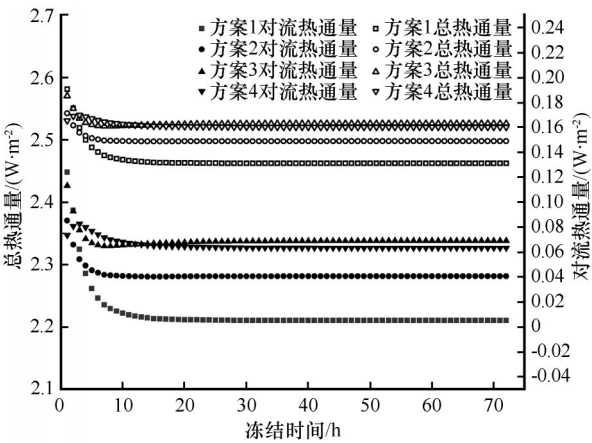


图5 热通量随时间的变化情况  
Fig. 5 Variation of heat flux over time

(1)环境温度对热通量的影响

从图5以及表4中可以看出,当试样桶与环境之间为非绝热状态时,两者之间的热量交换均会导致热通量的增大,这种影响主要体现在对流热通量的变化上。当环境温度较低时(如环境温度与顶板温度相同时),底部与环境温度之间的温差使得热量可以在其间传递,由此使得底板的换热效率显著提升;而顶板与环境温度温差极小,其整体热阻大小与绝热情况下基本一致,所以此时顶板换热效率的降低并不明显。当环境温度较高时(如环境温度与底板温度相同),可以用相同的方法分析得到:顶

板的换热效率会显著提升,而底板换热效率则不会有明显的变化。考虑到将绝热壁替换为冷壁(或热壁)的正面效应比负面效应更为明显,所以替换后的整体换热效率表现为增加,即热通量的增大。在方案2、3、4中,方案2的环境温度设置为顶底温度的平均值,其侧壁条件最接近绝热情况,此时侧壁与顶底边界都存在一定的温差,热量交换给换热率带来的正面效应在负面效应的抵消下显得不那么明显,因而此时的换热率较低,热通量较小。方案3与方案4中,试样桶平均温度与环境温度之间差值的增大,强化了热量交换给换热率带来的正面效应,弱化了其负面效应,使得对流热通量进一步增大。相较于方案2、方案3与方案4中热通量达到稳定的时间更为靠后,且最终稳定后的热通量大小均大于方案2的热通量。

(2)顶板温度对热通量的影响

由方案2、方案6与方案8这三个方案稳定后热通量数据发现:垂直方向上的温度梯度的增大会导致碎石层区域的热通量的增大,这一点同时体现在了传导通量与对流通量上。传导部分遵从傅里叶定律,其热通量大小与温度梯度正相关。碎石层中自然对流的产生源自试样顶底温差,温差(即温度梯度)越大则瑞利数越大,对流就越强烈,热通量自然也就越大。

表4 各组顶底温差与热通量数据  
Table 4 The top-bottom temperature difference and heat flux data of each case

方案编号	顶底温差/℃	环境温度/℃	总热通量/(W·m <sup>-2</sup> )	传导热通量/(W·m <sup>-2</sup> )	对流热通量/(W·m <sup>-2</sup> )
1	20	绝热	2.4623	2.4571	0.0052
2	20	5	2.4978	2.4571	0.0407
3	20	10	2.5261	2.4571	0.0691
4	20	0	2.5203	2.4571	0.0632
5	15	绝热	1.8614	1.8579	0.0035
6	15	7.5	1.8789	1.8579	0.0210
7	25	绝热	3.0534	3.0461	0.0074
8	25	2.5	3.1167	3.0461	0.0706

3.2.3 最佳的环境温度选择

由于现实中无法做到完全绝热,在进行碎石层传热研究时,应当选取一个最优的环境温度进行设置以减小试验箱环境温度对试样桶传热的影响,从而得到对碎石层传热更为准确的分析。为减小环境温度的影响以逼近绝热条件下的温度剖面曲线,应当尽可能地使各高度试样外侧的环境温度接近同高度的桶内温度。但受到目前技术的限制,这样

的环境温控也难以做到,因此下面考虑的是仅有一个整体箱温可调控情况下的优化问题。对软件导出的方案1~4绘图数据进行对比分析,计算其各自相较于绝热温度曲线的偏差程度,结果如图6所示。由图4和图6可看出,当环境温度设置为试样桶内平均温度时,其温度剖面曲线与绝热情况下的温度剖面曲线最为接近,也可将环境温度对试验桶温度的影响降低到最小。同时,由于热对流的出现,在

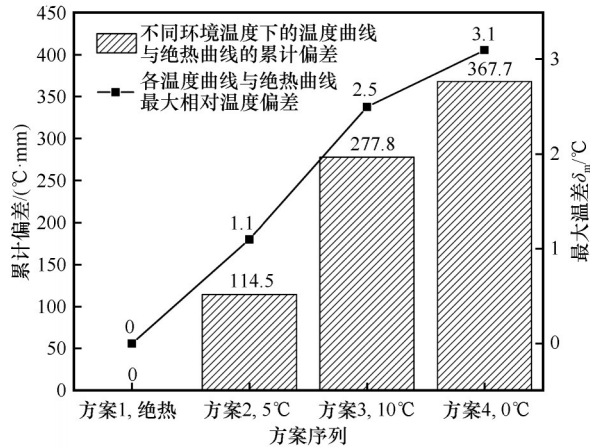


图6 各温度曲线与绝热温度曲线的累积偏差及最大偏差  
Fig. 6 Cumulative deviation and maximum deviation between each temperature curve and adiabatic temperature curve

碎石区域底部的热量会被带往碎石区域上层,与单一介质热传导的温度剖面对比时表现为底部温度偏低而上层温度偏高,方案2的温度曲线较好地保留了这一特征。对照方案1与方案2;方案5与方案6;方案7与方案8这三组不同温度梯度的数据,得到图7。方案5与方案7所设置的环境温度均为模型内部平均温度,可以发现在这两组不同的温度梯度下的曲线中,均出现了与方案1、方案2之间相同的曲线关系:曲线两两相交于曲线中部,在低温侧绝热情况下的曲线所表示温度更低,在高温侧其表示的温度则相对较高。

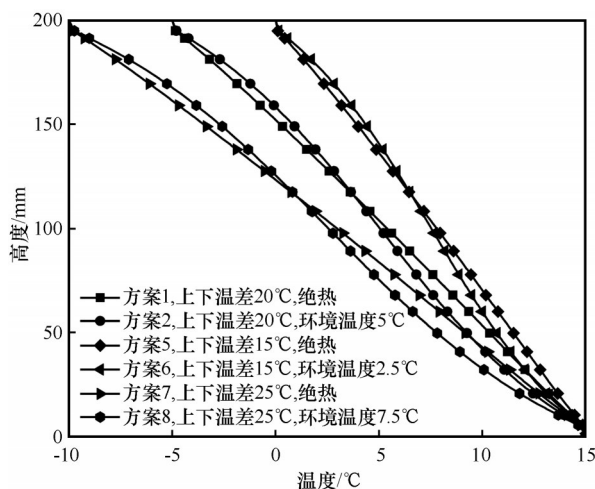


图7 三组温度梯度下的绝热曲线与最优环境温度曲线  
Fig. 7 Adiabatic curve and optimal environmental temperature curve under different temperature gradients

## 4 结论

本文通过使用COMSOL软件,以单向冻结试验

常用试样桶为建模原型,设置了一系列参数,对碎石层传热试验进行了软件模拟与温度场数值分析,探究了一系列问题,得出以下结论:

(1)在碎石层传热过程中,环境温度能对碎石层温度场产生明显的影响,当环境温度大于碎石层平均温度时,碎石层温度剖面曲线会向高温侧偏移,试验所得温度数据偏大;当环境温度小于碎石层平均温度时,碎石层温度剖面曲线则会向低温侧偏移,试验所得温度数据偏小。

(2)环境温度能对碎石层内的热通量产生影响,相较于绝热条件,环境与碎石之间的热量交换会使得碎石层内热流密度数据产生变化,当环境温度与碎石层顶底平均温度接近时,碎石层内部的对流强度达到最小值,随着环境温度的升高/降低,对流强度会逐渐增强。碎石层垂直方向上的温度梯度的增加能明显增大碎石内的热流密度,反之则将减小碎石内的热流密度。

(3)在进行有关碎石层传热内容的试验时,为减小环境温度设置对传热的干扰,体现热对流过程对碎石层热状态的影响,侧壁条件为只有箱体温度可以调节的情况下,应当设置环境温度为碎石层平均温度。

(4)实际工程中可以通过遮阳棚等措施来增大冷季碎石层顶底平均温度与外界温度之间的差值,从而增强碎石层垂直方向上的换热效率。

## 参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Harris S A, Pedersen D E. Thermal regimes beneath coarse blocky materials [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1998, 9(2): 107-120.
- [3] Delaloye R, Reynard E, Lambiel C, et al. Thermal anomaly in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland) [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost. Balke-ma: Zurich, 2003, 2125: 175-180.
- [4] Niu F, Cheng G, Niu Y, et al. A naturally-occurring 'cold earth' spot in Northern China[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34184.
- [5] Cheng Guodong, Lai Yuanming, Sun Zhizhong, et al. On the "thermal diode" function of crushed rock layer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 1-7. [程国栋, 赖远明, 孙志忠, 等. 碎石层的“热半导体”作用[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 1-7.]
- [6] Cheng Guodong. Influence of local factors on permafrost distribution and its enlightenment to Qinghai-Tibet Railway design [J]. Science in China: Series D, 2003, 33(6): 602-607. [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.]
- [7] Zhu Zhaorong, Zhao Shouquan, Han Kan, et al. Test device



- and method for frost heave characteristics of subgrade filling of freeway in cold regions[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 156-162. [朱兆荣, 赵守全, 韩侃, 等. 寒区高速公路路基填料冻胀特性的试验装置及方法[J]. 公路工程, 2020, 45(1): 156-162.]
- [8] Liu Yue, Wang Zhengzhong, Li Jialin, et al. Evaluation on the effects of freezing-thawing resistance by block-stone replacement for main canal in Jingdian Project[J]. Yellow River, 2018, 40(4): 147-149. [刘月, 王正中, 李甲林, 等. 景电工程干渠块石换填措施抗冻融效果评价[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 147-149.]
- [9] Miao Qi, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. Progress and prospects of research on frost heave of high speed railway subgrade in seasonally frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 669-679. [苗祺, 牛富俊, 林战举, 等. 季节冻土区高速铁路路基冻胀研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 669-679.]
- [10] Yang Hairong. The roadbed stability in permafrost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(1): 83-88. [杨海蓉. 多年冻土地区防治路基融化下沉及提高其稳定性的措施[J]. 冰川冻土, 1985, 7(1): 83-88.]
- [11] Goering D J, Instanes A, Knudsen S. Convective heat transfer in railway embankment ballast [M]//Ground freezing 2000: frost action in soils. CRC Press, 2020: 31-36.
- [12] Feng Wenjie, Ma Wei, Zhang Luxin, et al. Application of riprap slope protection to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 632-637. [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.]
- [13] Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qinghai-Tibet Railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(3): 292-297. [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] Wen Zhi, Sheng Yu, Ma Wei, et al. Study on in-situ monitoring of effect of degenerative permafrost protected by crushed rock revetment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(11): 26-30. [温智, 盛煜, 马巍, 等. 抛石护坡保护公路下退化性多年冻土效果现场监测研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(11): 26-30.]
- [15] Xu Lianjun, Luo Qiang. Analysis of temperature variation characteristics of gravel slope protection base of Qinghai-Tibet Railway[J]. Subgrade Engineering, 2007(6): 93-94. [徐连军, 罗强. 青藏铁路碎石护坡路基地温变化特点分析[J]. 路基工程, 2007(6): 93-94.]
- [16] Liu Zhengping. Study on long-term stability of gravel slope protection subgrade in permafrost region of Qinghai-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2010(Suppl 1): 56-59. [刘争平. 青藏铁路多年冻土区碎石护坡路基长期稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2010(增刊1): 56-59.]
- [17] Sha Zhiwei, Pu Bu, Mao Xuesong. Cooling analysis of gravel subgrade engineering in permafrost areas of Qinghai-Tibet Highway[J]. Subgrade Engineering, 2011(1): 140-143. [沙志伟, 普布, 毛雪松. 青藏公路多年冻土区碎石路基试验工程的降温分析[J]. 路基工程, 2011(1): 140-143.]
- [18] Yu Wenbing. Study on special embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2003. [喻文兵. 青藏铁路多年冻土区特殊结构路基研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003.]
- [19] Wang Shuangjie, Sun Binxiang, Xu Xiaozu, et al. Research on laboratory experiment of natural convection mechanism of embankment ballast[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 18-23. [汪双杰, 孙斌祥, 徐敦祖, 等. 路堤块石自然对流机理的室内模拟试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 18-23.]
- [20] Sun Binxiang, Xu Xiaozu, Lai Yuanming, 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. [孙斌祥, 徐敦祖, 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.]
- [21] Xu Xiaozu, Sun Binxiang, Lai Yuanming, 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. [徐敦祖, 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.]
- [22] Xu Xiaozu, Sun Binxiang, Liu Qi, et al. Laboratory experiment on the influence of paving location and diameter on the cooling effect of ballast embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 254-257. [徐敦祖, 孙斌祥, 刘琦, 等. 碎石铺设位置及粒径对路基降温效果影响的室内试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 254-257.]
- [23] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Yu Wenbing, et al. The influence of boundary conditions on the cooling effect and mechanism of eipped-rock layers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 163-168. [赖远明, 张明义, 喻文兵, 等. 边界条件对碎石层降温效果及机理的影响[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 163-168.]
- [24] Sun Binxiang, Xu Xiaozu, Lai Yuanming, et al. Determination of thermal diffusivity and conductivity on ballast[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 790-795. [孙斌祥, 徐敦祖, 赖远明, 等. 块石的热扩散系数和导热系数确定方法[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 790-795.]
- [25] Yang Lijun, Sun Binxiang, Liu Qi, et al. Experimental investigation on cooling capability of open crushed rock embankment enhanced by perforated ventilation pipe[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 407-414. [杨丽君, 孙斌祥, 刘琦, 等. 透壁通风管增强开放碎石路堤降温效果试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 407-414.]
- [26] Yao Yangping, Wei Bin, Chen Han, et al. Research on the law of water vapor circulation of the pot cover effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1512-1518. [姚仰平, 韦彬, 陈含, 等. 锅盖效应的水汽循环规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1512-1518.]
- [27] Zhang Chunyang. Study on the improvement of frost heaving characteristics of channel foundation by replacement technology [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 20-33. [张春洋. 碎石换填槽技术对于改善渠基冻胀特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 20-33.]
- [28] Bai Ruiqiang. Study on the coupled heat-water-vapor-mechanics model of unsaturated soils[D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2020: 61-78. [白瑞强. 非饱和土水-热-气-力耦合模型研究[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2020: 61-78.]
- [29] Zhang Mingli. The influence of rainfall variations on the thermal-moisture dynamics of the embankment in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2016: 34-69. [张明礼. 青藏高原冻土路基水热

- 过程对降雨变化的响应研究[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2016: 34-69. ]
- [30] Teng Jidong, He Zuoyue, Zhang Sheng, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: physical mechanism and numerical model for two types of “canopy effect”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1813-1821. [滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水气迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1813-1821. ]
- [31] Wang Xiaogang. Study on characteristics of frost heave and thawing settlement of pile-soil system in permafrost regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 40-54. [王晓刚. 冻土区桩土体系冻胀融沉特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019: 40-54. ]
- [32] Lai Y, Zhang L, Zhang S, et al. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qing-Tibet Railway under climatic warming [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598-604.
- [33] Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media [M]. Hefei: USTC Press, 2010. [孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. ]
- [34] Kong Xiangyan, Wu Jianbing. A bifurcation study of non-darcy free convection in porous media[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(2): 177-185. [孔祥言, 吴建兵. 多孔介质中的非达西自然对流的分岔研究[J]. 力学学报, 2002, 34(2): 177-185. ]
- [35] Nield D A, Bejan A. Convection in porous media [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [36] Zhang Wei. Experimental study on the mechanism of abnormal ground temperature distribution under gravel layers [D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2016: 15-17. [张蔚. 碎石堆积层下地温异常分布现象形成机制试验研究[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2016: 15-17. ]
- [37] Zhang Mingyi. Study on long-term thermal stability of air-cooled subgrade in permafrost regions [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007: 46-49. [张明义. 多年冻土区气冷路基长期热稳定性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007: 46-49. ]
- [38] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 559-560. [杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 559-560. ]
- [39] Luo Ting, Chen Han, Yao Yangping, et al. Experimental study on vapor transfer under pot-cover effect of subgrade soil in cold regions[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(Suppl 1): 29-34. [罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 寒区路基土锅盖效应气态水迁移试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊1): 29-34. ]

## Study on the effect of ambient temperature on heat transfer characteristics of gravel layer

LIANG Mingxuan<sup>1,2</sup>, GE Jianrui<sup>3</sup>, NIU Yonghong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The study of heat transfer mechanism of gravel layer is of great significance to the application of subgrade improvement technology in cold regions and the interpretation of “abnormal” frozen soil distribution in nature. Many researchers have carried out experimental research on the gravel layer, but there is no unified standard for the temperature setting in the test. Compared with fine-grained soil, the influence of moisture in coarse-grained material is smaller, so the temperature setting in the test plays a key role in the test results. In order to compare the influence of different temperature settings on the three-dimensional heat transfer process of gravel, different roof temperatures, floor temperatures and ambient temperatures are combined, and COMSOL software is used to simulate different combinations under the condition of considering the heat transfer of porous media in gravel layer. The results show that even when the insulation is wrapped, the ambient temperature can still have a significant impact on the temperature profile and the heat flux in the vertical direction. When the ambient temperature is consistent with the average temperature of the gravel layer, the heat flux in the vertical direction reaches the minimum, and the heat transfer efficiency is the lowest. Therefore, in the subsequent indoor gravel layer test design, if it is necessary to reduce the impact of heat exchange in the horizontal direction, the ambient temperature should be set near the average temperature of the gravel layer as far as possible. In the project, the heat exchange inside and outside the gravel layer can be enhanced by reducing the side boundary temperature of the gravel layer, so as to enhance the heat exchange efficiency of the gravel layer.

**Key words:** COMSOL; porous media; heat transfer; heat flux; temperature profile

(责任编辑: 温智)