

边界温度周期波动下块石的温度变化规律

Variation of temperature in ballasts under periodic fluctuation of boundary temperature

徐学祖^{1,2}, 孙斌祥^{1,2}, 李东庆¹, 赖远明¹

(1. 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; 2. 绍兴文理学院 建筑技术研究所, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 将块径为 6~8 cm、4~6 cm 和 2~4 cm 的块石分别装入直径为 15 cm、高度为 59 cm 的有机玻璃筒内, 进行了边界温度周期波动条件下块石体中一维温度场的测试, 以考察多孔块石体中温度变化规律。试验表明, 开放系统条件下, 块石体温度随时间变化具有不对称性; 温度随深度变化不符合基于热传导理论的傅立叶第一定律, 具有迟缓性; 块石体中的平均温度经过几个周期会低于其表面平均温度, 说明其中存在对流换热机制。封闭系统条件下, 三种块径的块石体的温度变化均无上述规律, 表明其中对流换热机制尚不存在或十分微弱。

关键词: 块石; 温度; 变化规律

中图分类号: U 213.1; TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)01-0091-05

作者简介: 徐学祖(1940-), 男, 浙江杭州人, 1962年毕业于上海同济大学勘测系工程地质水文地质专业, 现为绍兴文理学院研究员, 主要从事冻土物理学研究, 在冻土中水分迁移、土体冻胀和盐胀机理研究方面成绩突出。

XU Xue-zu^{1,2}, SUN Bin-xiang^{1,2}, LI Dong-qing¹, LAI Yuan-ming¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: The one-dimensional tests were carried on the ballasts with diameters of 6~8 cm, 4~6 cm and 2~4 cm in the plexiglass cylinder of 15 cm in diameter and 59 cm in height under periodical fluctuation of boundary temperature to investigate the variation of temperature in the ballasts. Results show that the temperature changes of ballast are unsymmetrical with time and the temperature attenuation is slow with depth and the mean temperature of ballasts is always lower than that on the surface under condition of open system. It implies that there exist two mechanisms of conduction and convection for heat exchanging in ballasts. Inversely, there are no such variation of temperature under condition of closed system. It means heat conduction may be the only mechanism in the test specimen of the designed sizes.

Key words: ballast; temperature; changing laws

0 引言*

利用多年冻土区年平均气温低于 0℃的环境和诸如块石等多孔材料的对流换热机制来保持路基稳定是一种无源技术。尽管 30~50 年前国内外已开始该项研究, 如俄罗斯的西伯利亚大铁道、美国阿拉斯加公路和我国青海热水煤矿建设的工程实践中均尝试过这种技术。但较系统地研究块石降温机理并行数值模拟却只是近 10 年的事^[1~6]。

青藏高原多年冻土区铁路的兴建和公路的翻修均期望利用该项技术。笔者认为, 块石护坡不失为保持多年冻土区路堤稳定的良策, 但块石的大小、铺筑的高度及其适用范围尚需通过进一步试验和理论分析来确定, 以提高经济合理和安全可靠。为此, 在室内开展了边界温度周期波动条件下块石体温度变化规律的试验研究。本文旨在论述相关试验结果并总结一些结论。

1 试验方法

将块径为 6~8 cm、4~6 cm 和 2~4 cm 的块石试

样分别装入直径为 15 cm、高为 59 cm 的有机玻璃筒中, 并在筒底垫 4 cm 高的兰州黄土, 实际块石高度约为 52 cm。有机玻璃筒的侧壁及底部均用 10 cm 厚的聚氯乙稀软泡沫保温, 以建立一维换热条件。筒内设有热敏电阻传感器共 22 个测点, 并通过数据采集仪与计算机相连, 每 5~10 min 采集一次数据。图 1 列举了试验装置示意图。将装有块石试样和测试元件的有机玻璃筒放入用于冻融试验的保温箱内。试验分两种情况进行: 一种是块石顶面直接与保温箱内空气接触的开放系统, 通过箱内气温周期波动建立一维换热条件, 称为开放系统试验; 另一种是保持箱温恒定, 通过块石顶面加设温度周期波动的顶板建立一维换热条件, 为试验筒内部不与外部空气直接接触的封闭系统, 称为封闭系统试验。

* 基金项目: 中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(200103); 中国科学院“百人计划”资助项目(赖远明); 中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向项目(KZCX2-306); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程项目(CACX210015)

收稿日期: 2002-04-01

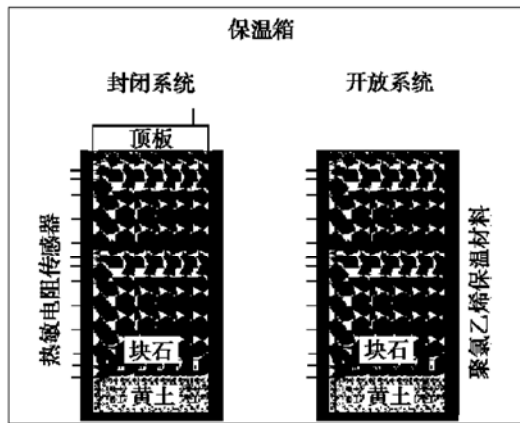


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Test apparatus

作为初始条件, 试验开始前将箱温或顶板温度调至 $-20\sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 恒定 10 h , 再调至 $0\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 恒定 10 h , 使块石内自上而下建立近似线性的温度分布且平均温度为 $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以便于观测块石温度的变化规律。试验采用的块径及边界温度见表1。

表1 各次试验的块径及边界条件

Table 1 Ballast diameters and boundary conditions for each test

试验序号	块径/cm	系统	箱温/ $^{\circ}\text{C}$	顶板温度/ $^{\circ}\text{C}$
No. 1	4~6	开放	$-9.3\sim 9.4$	
No. 2	6~8	开放	$-8.3\sim 8.3$	
No. 3	6~8	封闭	0	$-11.3\sim 11.4$
No. 4	6~8	封闭	0	$-14.8\sim 14.8$
No. 5	6~8	封闭	0	$-19.6\sim 20.0$
No. 6	6~8	封闭	-0.5	$-20.3\sim 19.5$
No. 7	2~4	封闭	0	$-20.0\sim 19.9$

2 试验结果

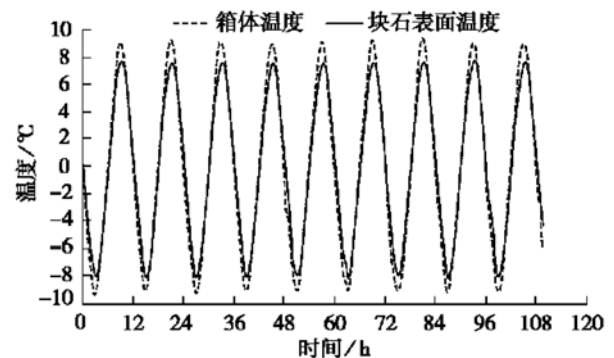
2.1 开放系统块石体中的温度变化特征

(1) 块石体中温度随时间变化的不对称性

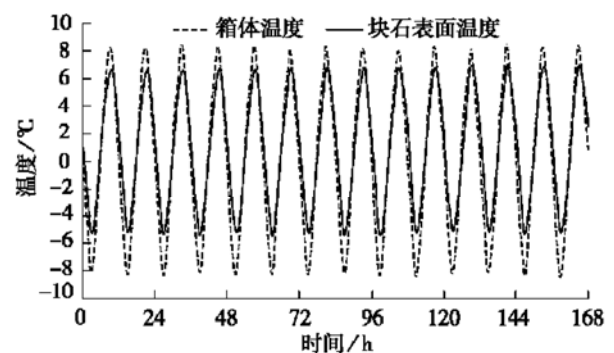
图2列举了No. 1和No. 2的箱温随时间变化曲线。由图2可见, 每次试验的温度边界条件是箱体温度以谐波形式波动, 温度波动周期为 12 h , 块石表面温度变化幅度均小于箱体温度变化幅度。对于No. 1的试验: 箱温振幅 $A_a = 18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温度 $A_o \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 块石表面温度振幅 $A_s = 15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温度 $A_o \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 对于No. 2的试验: 箱温振幅 $A_a = 16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温度 $A_o \approx 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 块石表面温度振幅 $A_s = 12.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温度 $A_o \approx 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度波动曲线以平均温度为基线呈对称形态分布。

在图2所列温度边界条件下, 块石体内温度随时间变化表现出明显的不对称性。由图3所列块石体内温度随时间变化曲线可见, 17.5 cm 深度以下的温度波峰彼此之间相距较大, 而温度波谷则相互接近。温

度变化的不对称性说明在边界温度波动且有风的条件下, 出现强迫对流情况, 使密度较大的冷空气比密度较小的热空气更容易沉入块石体内。



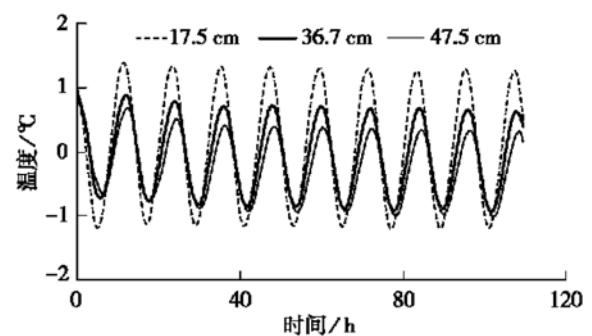
(a) No.1的箱温随时间变化曲线



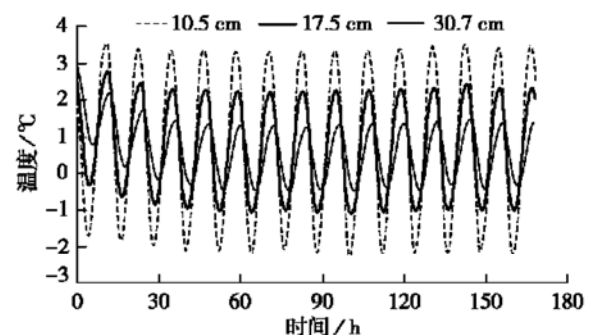
(b) No.2的箱温随时间变化曲线

图2 箱温随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of temperature vs time in the chamber



(a) No.1块石体内温度随时间变化曲线



(b) No.2块石体内温度随时间变化曲线

图3 块石体内温度随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of temperature vs time in ballast

(2) 块石体内温度随深度变化的迟缓性

在无内热源的条件下, 基于热传导理论的傅立叶第一定律给出了均质体中温度波幅随深度按指数规律衰减的表达式^[7]

$$A_z = A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}} \quad (1)$$

式中 A_z 和 A_0 分别为块石体内某一深度和表面的温度波幅, $^{\circ}\text{C}$; z 为深度, m ; α 为块石体的热扩散系数, m^2/h ; T 为温度波动周期, h 。

根据试验实测块径为 6~ 8 cm、4~ 6 cm 和 2~ 4 cm 的热扩散系数^[8]和块石表面的温度波幅, 计算了温度波幅 $A_z = 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深度, 计算结果列于表 2。

表 2 温度波衰减深度的理论计算值

Table 2 Theoretical values of depth of temperature attenuation

D/cm	$2A_0/^{\circ}\text{C}$	$2A_z/^{\circ}\text{C}$	$\alpha/(10^{-3}\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$	Z/m
6~ 8	22.87	0.1	1.385	0.39
	39.58	0.1	1.359	0.43
	39.96	0.1	1.349	0.43
	39.80	0.1	1.373	0.43
4~ 6	40.02	0.1	0.983	0.37
2~ 4	39.90	0.1	1.105	0.39

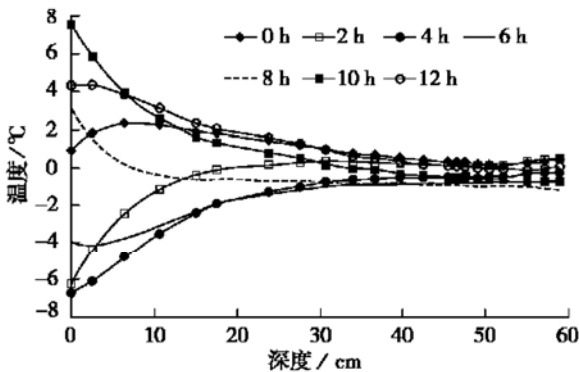
由表 2 可见, 3 种块径的块石体在表面温度振幅为 22.87~ 40.02 $^{\circ}\text{C}$ 、周期为 12 h 情况下, 温度波的传播深度仅为 0.37~ 0.43 m。

图 4 列举了块石体内温度随深度变化的包络线。由图 4 可见, 尽管块石体的温度波幅随深度增大有所衰减趋势, 但衰减速度比较缓慢。块石体深度为 40 cm 处的温度波幅 $A_z = 0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 比理论计算的设定的 $A_z = 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 明显偏大。由这一现象可以推测, 开放系统试验中不但存在热传导换热机制, 而且存在对流换热机制。否则, 不会在 40 cm 深度处仍有如此之大的温度振幅。

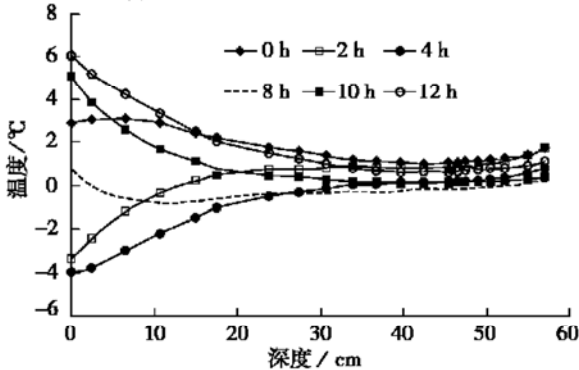
(3) 块石体平均温度低于其表面平均温度

尽管气温周期波动条件下, 块石体内的温度场属于不稳定温度场, 但由于温度波动为等幅波动且波动频率不是很大, 可视为与初始温度条件无关的准稳态温度场。由此可用块石体平均温度这一指标来评价气温周期波动条件下的宏观效果。

图 5 列举了块石体平均温度随气温波动周期数的变化曲线。图中画有 3 条曲线, 分别代表了块石体平均温度、块石体表面平均温度和箱体中的平均气温。由图 5 可见, 在气温和块石表面温度相对稳定的条件下, 块石体的平均温度有随周期波动数增加而逐渐降低的趋势, 表明在对流机制影响下, 块石体中的降温具有叠加效应。其中以 No. 1 ($D = 4\sim 6\text{ cm}$) 试验更为明



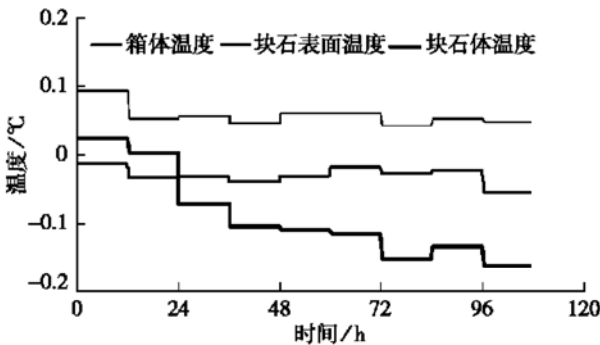
(a) No.1块石体内温度随时间变化曲线



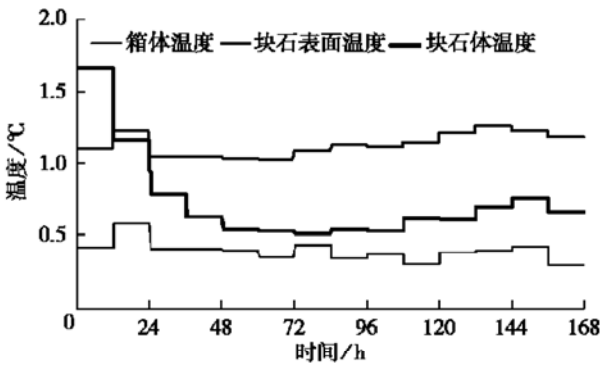
(b) No.2块石体内温度随时间变化曲线

图 4 块石体内温度随深度变化曲线

Fig. 4 Curves of temperature vs depth in ballast



(a) No.1块石体内温度随时间变化曲线



(b) No.2块石体内温度随时间变化曲线

图 5 块石体平均温度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of mean temperature vs time in ballast

显, 经过 3 个周期波动后, 块石体的平均温度均低于块石体表面平均温度和箱体气温的平均温度。No. 2 ($D =$

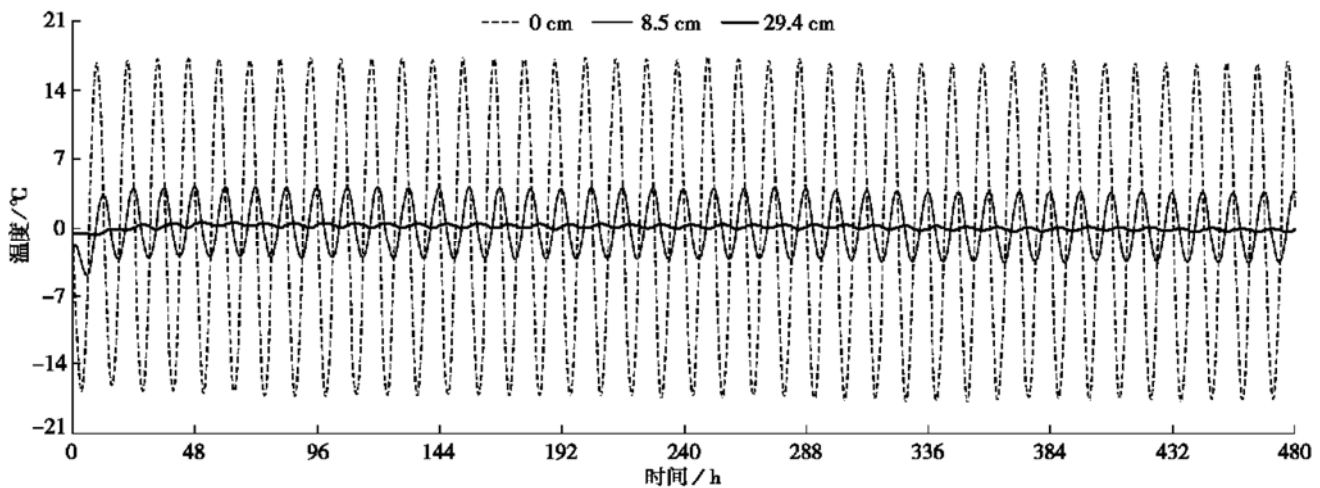


图6 No.6 块石体中温度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of temperature vs time in ballast No. 6

= 6~8 cm) 试验中, 在第 10 个周期后块石体的平均温度有所上升, 是因为环境温度升高引起块石体表面平均温度升高的缘故。

2.2 封闭系统块石体内的温度变化特征

(1) 块石体内温度随时间变化的对称性

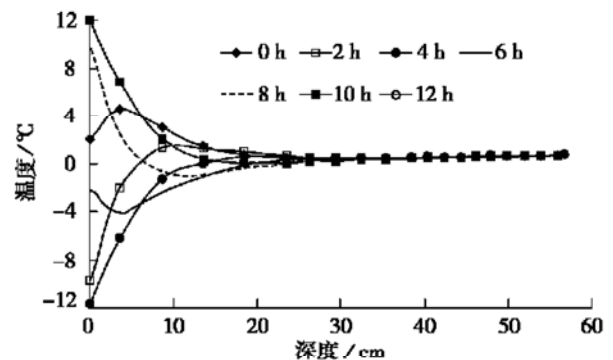
图 6 所示, 块石体内温度随时间变化表现出对称性, 即各深度温度曲线的波峰和波谷间距基本相同, 不存在波谷下移、彼此靠近的情况。说明对应于本试样尺寸的封闭系统条件下, 冷热空气间的密度差并没有大到足以引起明显的冷空气下沉。

(2) 块石体内温度随深度变化符合傅立叶定律

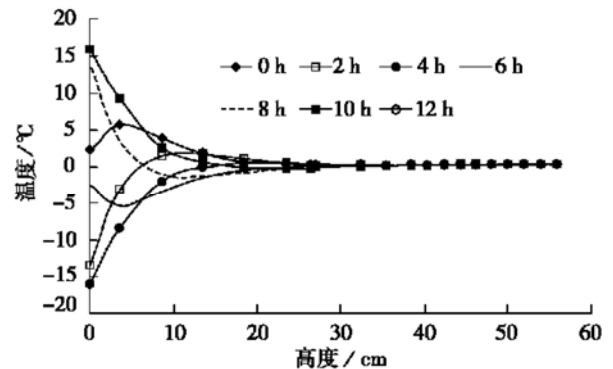
图 7、8 分别列举了 No. 4、No. 6 和 No. 7 的试验结果(注: 图 7(a)、(b) 中 0 h 和 12 h 曲线几乎重合)。由图 7、8 可见, 块石体的块径为 $D = 6 \sim 8$ cm 和 $D = 2 \sim 4$ cm 以及块石表面温度变化范围为 $2 \times A_0 = 22 \sim 32$ °C, 在块石体 40 cm 深度处的温度变化范围 $2 \times A_z$ 均为 0.1 °C 左右, 与按傅立叶第一定律的计算结果基本相符。这表明在本试验所设计的试样尺寸条件下, 封闭系统块石体在界面温度周期波动条件下, 仍以热传导为其基本换热形式。

(3) 块石体的平均温度始终高于其表面平均温度

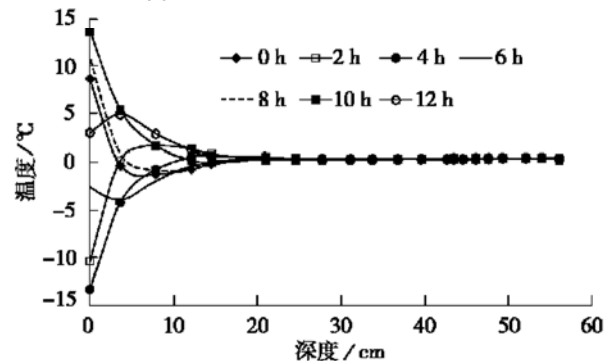
在封闭系统一维热传导的条件下, 块石体与外界的热交换是通过顶板温度与块石表面的温度差以及块石体内的温度梯度来进行的。因此, 当块石体内的初始平均温度高于试验顶板平均温度时, 块石体内的热量将通过顶板输出, 表现为随试验周期数的增大, 块石体平均温度持续降低, 直到两者平均温度相等, 换热过程结束, 所以在有限的试验周期数内, 块石体的平均温度始终高于其表面平均温度是十分自然的。图 8 的试验曲线证实了该论断。



(a) No.4 块石体内温度随深度变化曲线



(b) No.6 块石体内温度随深度变化曲线



(c) No.7 块石体内温度随深度变化曲线

图7 块石体内温度随深度变化曲线

Fig. 7 Curves of temperature vs depth in ballast

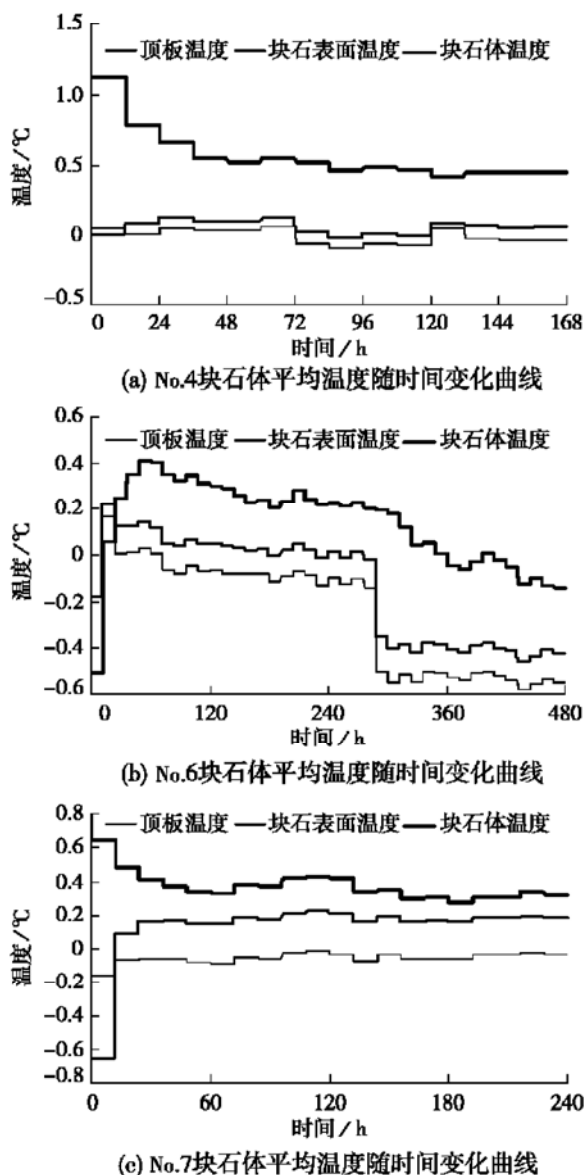


图8 块石体平均温度随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of mean temperature vs time in the ballast

3 结 论

(1) 边界温度周期波动条件下, 开放系统块石体温

度场具有3个特征: 块石体内温度随时间变化的不对称性、随深度变化的迟缓性及块石体的平均温度低于其表面平均温度, 表明其中热传导和对流换热机制并存。

(2) 在试验设计的试样尺寸条件下, 封闭系统块石体内温度场具有温度随时间变化的对称性、随深度变化符合傅立叶第一定律及块石体平均温度高于其表面平均温度的特征, 表明其中热传导是主要换热机制。有关其原因的理论分析将由另文阐述。

参考文献:

- [1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所青藏公路冻土路基研究组. 冻土路基工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988.
- [2] Goreing D J, Kumar P. Convective heat transfer in railway embankment ballast[A]. Thimus, ed. Ground freezing 2000[C]. Rotterdam: Balkema, 2000. 31- 36.
- [3] Goreing D J, Instanes A, Knudsen S. Winter- time convection in open- graded embankments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24: 57- 74.
- [4] Hinkel K M. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 26: 1- 15.
- [5] Izadpanah M R, Muler-Steinhagen H, Jamialahmadi M. Experimental and theoretical studies of convective heat transfer in a cylindrical porous medium[J]. Int J Heat and Fluid Flow, 1998, 19: 629- 635.
- [6] Kane D L, Hinkel K M, Goreing D J, et al. Nonr conductive heat transfer associated with frozen soils[J]. Global and Planetary Change, 2001, 29: 275- 292.
- [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] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 李东庆. 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.

致本刊编委及各位审稿人

为感谢审稿人的辛勤劳动, 本刊向所有审稿人均按时寄送微酬。但由于种种原因, 汇款单被退回的情况时有发生。本刊除向这些审稿人致谢、致歉外, 希望尚未收到审稿费的各位, 将您的准确地址通知本部, 以便重新补寄审稿费。并按您的要求赠阅相应刊期。

本刊编辑部