

# 纵向布管调控冻土路基温度场的模拟试验研究

刘志强<sup>1,2</sup>, 马巍<sup>2</sup>, 周国庆<sup>1,2</sup>, 牛富俊<sup>2</sup>, 段全江<sup>1</sup>, 王建洲<sup>1</sup>, 赵光思<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008;

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:** 在多年冻土地区修建铁路, 为确保冻土路基的稳定, 应使路基长期处于冻结状态。通过分析影响冻土路基温度场的主要因素, 建立冻土路基模拟试验装置; 在路基内部纵向布置调控管, 进行冬季采集天然冷量和冬季采集天然冷量同时夏季辅助利用人工制冷冷量来调控冻土路基温度场的模拟试验。试验获得了采集天然冷量和采集天然冷量同时辅助利用人工制冷冷量调控路基时路基内部温度场的变化情况。试验结果表明, 采集天然冷量同时辅助利用人工制冷冷量可有效地维护冻土路基的稳定。

**关键词:** 土力学; 青藏铁路; 冻土路基; 纵向调控管; 温度场; 模拟试验

**中图分类号:** P 642.14; TU 475<sup>+</sup>.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)11-1827-05

## SIMULATED EXPERIMENT STUDY ON THE TEMPERATURE FIELD OF FROZEN SUBGRADE MODULATED BY HORIZONTAL PIPES

LIU Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>2</sup>, ZHOU Guo-qing<sup>1,2</sup>, NIU Fu-jun<sup>2</sup>, DUAN Quan-jiang<sup>1</sup>,  
WANG Jian-zhou<sup>1</sup>, ZHAO Guang-si<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In permafrost regions, the construction of railway should keep the subgrade frozen permanently so as to maintain the stability of the frozen subgrade. The main factors that influence the temperature field of the frozen subgrade are presented. Using the self-made experimental equipment for simulating frozen subgrade which is supported by horizontal pipes placed in the embankment, two means of maintaining frozen subgrade are simulated in the laboratory. One method is controlling natural cold energy only, and the other is controlling natural cold energy accompanied with artificial refrigeration simultaneously. The experimental results indicate that the subgrade temperature can not go down below 0 until at least 2 years after completion when only using natural cold energy in winter, but it can be below 0 at the completion of construction when using natural cold energy in winter and artificial refrigeration in summer. The advantages of sufficiently using natural cold energy can gradually emerge after 2 years. However, the superiority of using artificial refrigeration becomes weaken after 4 years.

**Key words:** soil mechanics; Qinghai—Tibet railway; frozen subgrade; horizontal pipes; temperature field; simulated experiment

**收稿日期:** 2004-03-16; **修回日期:** 2004-05-21

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); 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开放基金(SKLFSE200304); 江苏省“青蓝工程”新世纪学术带头人专项联合资助项目

**作者简介:** 刘志强(1964-), 男, 硕士, 1986年毕业于中国矿业学院矿山建筑工程系矿井建设专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程学科方面的教学与研究工作。E-mail: zqliu@cumt.edu.cn.

# 1 引言

在多年冻土地区建设铁路或公路，会受到冻土稳定性的影响，因而冻胀、融沉、道路翻浆、融冻泥流等工程冻害时有发生。新建的青藏铁路全长 1 110 km，其中多年冻土区长度为 632 km，大片连续多年冻土区长度约 550 km。冻土在冻结状态下具有较高的强度和稳定性，确保青藏铁路冻土路基稳定的一个有效方法就是使路基长期处于冻结状态，亦即路基土体长期处于负温条件<sup>[1-3]</sup>。对于这一重大工程问题，积极地保护冻土已成为首选的解决思路。采用桩基、热桩、人工制冷、通风管、隔热材料、表面涂层和遮阳棚等均可积极地保护冻土<sup>[2-6]</sup>。由于冻土路基的稳定性与内部温度密切相关，在天然冻土地基上修筑铁路路基时，人为的热扰动使得路基下卧地基出现冻土融化，影响冻土路基的稳定性，因而必须对路基内部温度场进行调控<sup>[7, 8]</sup>。考虑到青藏铁路所穿过的地区为高海拔和多年冻土地区，具有较好的实现采集天然冷量来维护冻土路基的基本条件，因此积极主动地通过改变路基与大气的对流换热条件，利用天然冷量改变冻土路基的温度场，可使路基保持在负温状态，从而维护路基稳定。在路基中心纵向布置调控管，是一种有效的主动调控路基温度场的方法，对该调控方法进行模拟试验研究可为工程应用的实施提供技术条件。

## 2 纵向布管调控冻土路基温度场的模拟试验设计

### 2.1 影响冻土路基温度场的主要因素

采集天然冷量维护冻土路基是目前积极、主动稳定冻土路基温度场、变形场和应力场的措施之一。该方法主要是通过采用沿路基纵向水平布置的调控管来采集、调节、控制天然冷量(必要时辅以人工制冷技术)来改变冻土路基的温度场，从而保持路基特别是高温冻土、富冰冻土区路基的冻土状态，确保冻土路基的长期稳定性。

纵向布管调控冻土路基温度场模拟试验主要影响因素包括：几何尺寸  $l$ 、时间  $\tau$ 、温度  $t$ 、冻土上限、地表温度  $t_0$ 、冻土温度  $t_D$ 、空气温度  $t_K$ 、人工制冷介质温度  $t_R$ 、换热系数  $\alpha$ 、土的导温系数  $a$ 、土的导热系数  $\lambda$ 、土的相变潜热  $G$  等<sup>[9-14]</sup>，其关系可表示为

$$f(l, \tau, t, t_0, t_D, t_K, t_R, \alpha, a, \lambda, G) = 0 \tag{1}$$

### 2.2 冻土路基温度场模拟试验准则

根据影响冻土路基温度场的因素，利用量纲分析的方法，可得到冻土路基温度场模拟试验应遵循的相似准则为

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{l}{\xi} = R \text{ (几何准则)} \\ \pi_2 &= \frac{t}{t_0} = \frac{t}{t_D} = \frac{t}{t_K} = \frac{t}{t_R} = \Theta \text{ (温度准则)} \\ \pi_3 &= \frac{\alpha l}{\lambda} = Nu \text{ (努谢尔准则)} \\ \pi_4 &= \frac{a\tau}{l^2} = Fo \text{ (傅立叶准则)} \\ \pi_5 &= \frac{Gl^2}{\lambda\tau t} = \frac{G}{c_v t} \frac{l^2}{\lambda \tau} = \frac{G}{c_v t} \frac{l^2}{a\tau} = Ko \frac{1}{Fo} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

(柯索维奇准则及傅立叶准则)

式中： $c_v$  为冻土的体积比热容。

冻土路基温度场模拟试验准则方程可表示为

$$f(R, Nu, Fo, Ko) = 0 \tag{3}$$

### 2.3 冻土路基温度场模拟试验设计

纵向布管调控冻土路基温度场模拟试验装置由 4 部分组成：模型试验箱、温控系统、调控系统和测试系统。为保证模拟试验边界条件的相似，模型试验保温试验箱由 150 mm 厚的聚胺酯保温层和 1 mm 厚的钢板组合而成，内部试验空间净尺寸为 2.5 m×2.0 m×2.0 m。

模拟试验的温度控制系统是确保边界条件实现的关键。试验温度控制系统包括冻土的冻结和维护制冷系统、大气的调节和维护制冷系统、调控管的冷量制备和维护制冷系统。

模拟试验的调控系统主要包括冻土温度调控系统、大气温度调控系统、调控管空气调控系统等。冻土温度调控系统主要依靠埋在冻土中的温度控制传感器和冻土制冷控制系统来实现。大气温度调控系统主要依靠安设在空气和冻土表面上的温度控制传感器和大气制冷控制系统、大气加热控制系统来实现。当模拟冬季低温气候时，使用大气制冷控制系统；当模拟夏季高温气候时，使用大气加热控制系统，加热采用 6 个浴霸灯泡加热和 1 台风扇进行调控。调控管空气调控系统由低温空气制冷机及控制装置、冻土路基中的倾斜调控管和风机组成。冬季向管内压入低温空气，夏季关闭。采用人工制

冷辅助冷却路基时，夏季压入低温空气。

模拟试验的测试系统主要是温度测试系统，测试冻土土体温度在纵向布管调控条件下的变化情况、路基土体温度场的分布情况、地表和大气温度的变化情况。温度测试系统由热电偶传感器、数据采集仪和计算机组成。模拟试验系统和结构见图 1。

### 3 纵向布管调控冻土路基温度场的模拟试验工作

纵向布管调控冻土路基温度场模拟试验是在实验室利用相似模拟原理，进行采集和调控天然冷量(必要时辅助利用人工制冷冷量)来维护冻土路基的试验。试验规模主要决定于模拟试验的几何缩比  $C_l$ ，根据相似准则并结合试验的实际条件，设计几何缩比  $C_l=15$ 。取冻土路基的实际宽度 30 m，高度 15 m，则冻土路基模型的几何尺寸为宽度 2 m，高度 1 m，

试验中的冻结时间缩比  $C_t = 225$ ，土的导温系数、导热系数和相变潜热不变，采用与原形相同的重塑土进行模拟试验，土体为砂质粘土，主要土性参数：干密度为  $1.81 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，含水量为 15%，冻土导热系数为  $1.123 \text{ W/(m} \cdot \text{)}$ ，相应冻土体积比热容为  $2.537 \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \cdot \text{)}$ ，相变潜热为  $60.3 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ 。

模拟试验首先是形成试验所要求的冻土温度边界条件，然后进行采集天然冷量和采集天然冷量同时辅助利用人工制冷冷量调控路基温度场的模拟试验。试验中大气的温度变化与青藏高原实际的温度变化一致。为方便试验的实施和控制，对于太阳辐射的模拟主要以地表温度进行实际控制；对于调控管内天然冷量采控模拟主要以管壁温度进行控制；试验中努谢尔准则遵循的是以地表实际温度来进行控制的。

冻土路基的温度测点布置了 2 个断面，其间距为 0.5 m，温度测点的布置及编号如图 2 所示。

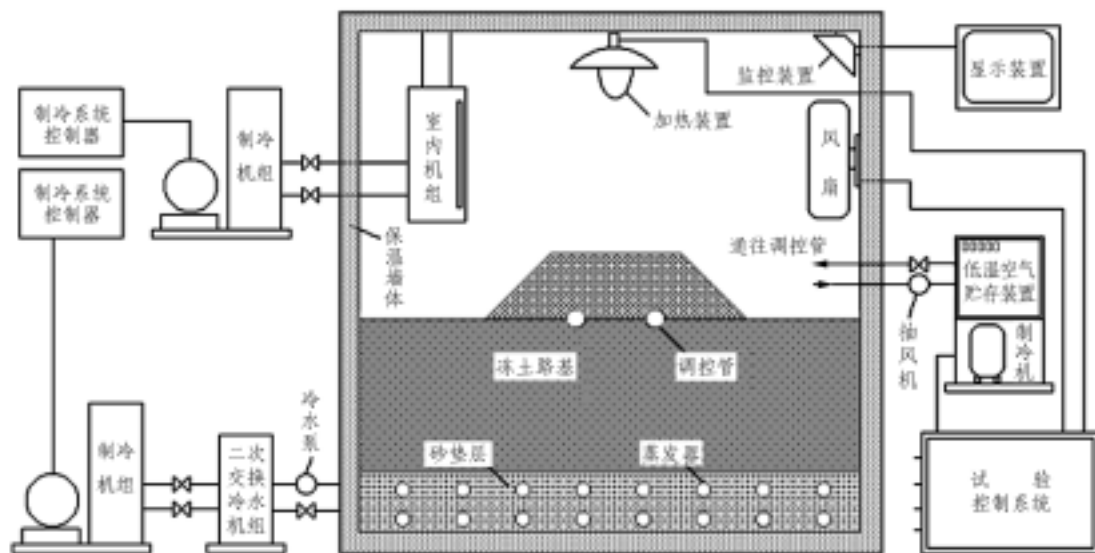


图 1 模拟试验系统和结构简图

Fig.1 Sketch of the simulated experiment system

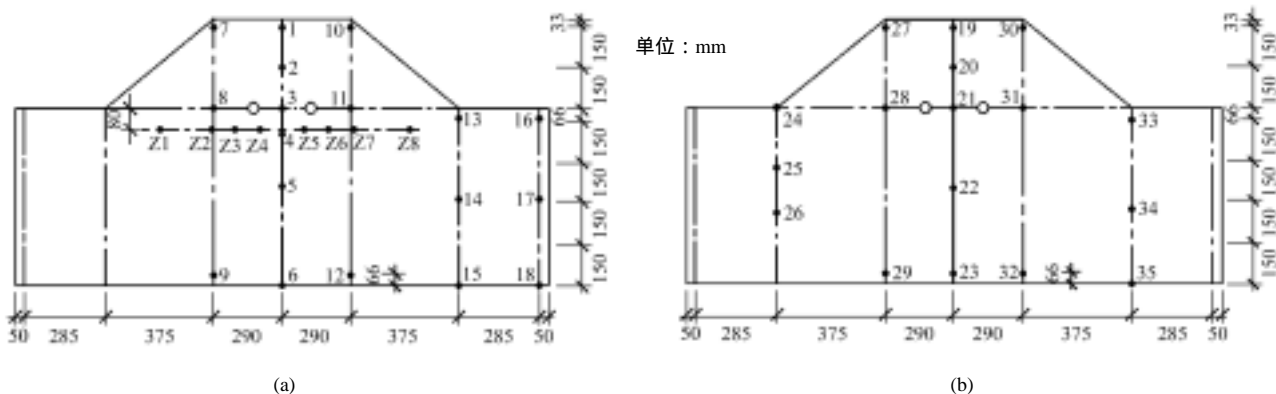


图 2 模拟试验温度测点布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the position for temperature measuring points in the simulation experiment

### 4 纵向布管调控冻土路基温度场模拟试验结果与分析

纵向布管调控冻土路基温度场模拟试验获得了冻土路基内主要测点温度随冷量调控时间和调控方式的变化而变化的情况，为研究路基温度场分布提供可靠的试验数据。

图3是模拟试验中大气温度实际控制情况及冻土路基地表温度的变化。从图中可看出，大气的温度是比较准确的按照青藏高原的实际条件控制的，对于冻土路基地表的温度，其变化与大气温度的变化趋势一致，试验较好地控制了大气冷量与路基表面的热交换，确保了模拟试验相似准则的满足条件。

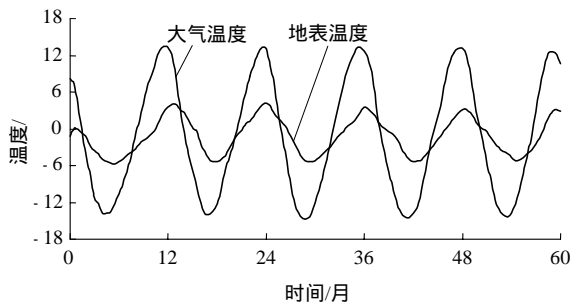


图3 纵向调控管模拟试验大气温度及路基地表温度  
Fig.3 Temperature variations of the surface for subgrade and the simulated temperature of the air in the horizontal pipes

图4是调控天然冷量的冻土路基内部测点温度的变化情况。图中温度变化起伏较大的测点1为距离地表的测点，测点6是下部测点基本维持在-1左右，路基内部测点2和4的温度前2a变化较大，第3年以后逐渐稳定，且处于负温。因此可以看出，冻土内部实测温度变化既受大气温度的影响，也受调控管内温度的影响。当冬季利用天然冷量来调控路基温度场时，在路基修筑的前2a内，路基内部测点仍然有正温，表明路基内部存在有融化区，路基会呈现不稳定状态。随着冷量的不断利用，第3年以后路基内部测点温度变为负值，融化区逐渐消失，整个路基基本呈现负温状态，这对路基的稳定十分有利。

图5是调控天然冷量同时采用人工制冷冷量进行调控冻土路基时，路基温度的变化情况。从图中可看出，冻土路基的温度有所下降，特别是路基内部测点，基本不出现正温，说明利用人工制冷冷量来调节路基内部温度场是十分有效的，有效调节距

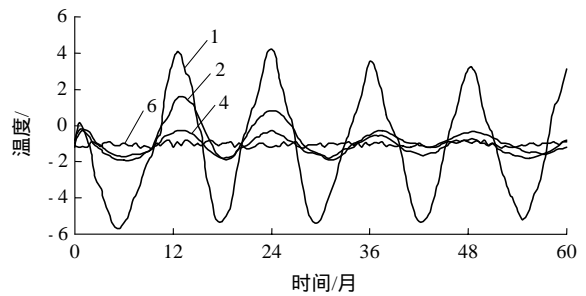


图4 调控天然冷量的冻土路基内部温度变化  
Fig.4 Temperature variations in the frozen subgrade controlled by natural cold energy

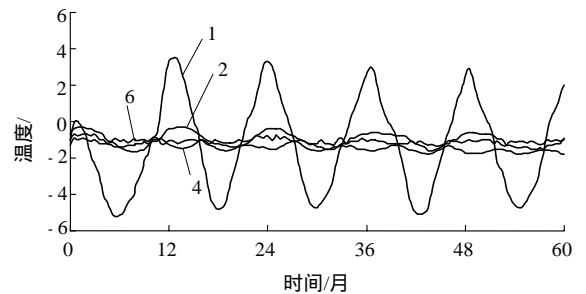


图5 调控天然冷量并采用人工制冷的冻土路基内部温度变化  
Fig.5 Temperature variations in the frozen subgrade controlled by natural cold energy and man-made refrigeration

离可达5m左右，有利于维护冻土路基的稳定。

从模拟试验结果可以看出，对于冬季利用天然冷量和冬季利用天然冷量同时夏季利用人工制冷冷量调节冻土路基的温度场的情况，前者必须有一定的时间，通常2a以后才能维持冻土路基到负温状态，而后者可迅速地使冻土路基维持到负温。但随着时间的推移，充分利用天然冷量的优越性逐渐表现了出来，当进入第4年以后，夏季利用人工制冷冷量的优势已不明显，这一结果表明，青藏铁路修建时，人为扰动冻土，必然会对冻土的温度场产生影响，但只要充分利用冬季的冷量，在工程结束后2~3a，可逐渐恢复冻土到负温状态。同时可知道，由于人为的扰动，必然会对冻土的温度场产生影响，若对路基进行预冷，并充分利用冬季的冷量进行调控路基，可保持冻土到负温状态；若不进行预冷，就必须在夏季利用人工制冷冷量来进一步调控路基，方可使路基恢复到负温状态，以确保冻土路基的稳定。

利用纵向布置调控管可有效地调控冻土路基的温度场，该方法在工程实施中，应根据调控管布置的位置、尺寸等特征，并结合冷量的输入方式进行具体的工程设计和实施。

## 5 结论及建议

通过对纵向布置调控管的冻土路基温度场进行模拟试验研究和分析, 获得下面几点结论和建议:

(1) 采用纵向布置调控管利用天然冷量来调控冻土路基温度场时, 路基内部的温度变化既受大气温度的影响, 也受调控管调控的影响, 路基内部距离调控管较近的土体温度可得到有效下降, 对冻土路基的稳定十分有利。

(2) 采用纵向布置调控管利用天然冷量且夏季还辅助利用人工制冷冷量来调控冻土路基温度场时, 冻土路基可长期保持处于负温状态, 路基内部不会出现融化区域, 可长期维持冻土路基的稳定。

(3) 冬季利用大气冷量来调节冻土路基的温度场, 必须有一定的时间, 通常 2 a 以后才能维持冻土路基到负温状态; 辅助利用人工制冷冷量可迅速地使冻土路基的温度维持到负温。但随着时间的推移, 充分利用天然冷量的优越性逐渐会表现出来, 当进入第 4 年以后, 夏季利用人工制冷冷量的优势已不明显, 这样在青藏铁路修建时, 若充分利用冬季的冷量, 一般可在工程结束后 2~3 a, 逐渐恢复冻土呈负温状态。

(4) 根据冻土路基模拟试验结果, 建议青藏铁路冻土路基设计时, 应充分考虑利用天然冷量来维护路基的稳定, 施工中应尽量减少对冻土的扰动, 有条件时积极采用预冷路基土的方法, 来维护冻土路基的稳定。

### 参考文献(References):

- [1] 程国栋, 何平. 多年冻土线性工程[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213-217.(Cheng Guodong, He Ping. Linearity engineering in permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 213-217.(in Chinese))
- [2] 王志坚, 张鲁新. 青藏铁路建设过程中的冻土环境问题[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 588-592.(Wang Zhijian, Zhang Luxin. Permafrost environmental problem in the construction of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 588-592.(in Chinese))
- [3] 王志坚. 青藏铁路建设中的冻土工程问题[J]. 中国铁路, 2002, (12): 31-37 (Wang Zhijian. Permafrost engineering in Qinghai-Tibet railway construction[J]. Chinese Railways, 2002, (12): 31-37.(in Chinese))
- [4] 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.(Dou Mingjian, Hu Changshun. The design principles of embankment of highway in permafrost regions and their application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4): 402-406.(in Chinese))
- [5] 黄小铭. 论高原冻土区铁路路基的设计原则及其应用[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(1): 23-31.(Huang Xiaoming. Design principle of railway subgrade for plateau frost soil zone and its application[J]. China Railway Science, 2001, 22(1): 23-31.(in Chinese))
- [6] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579-587.(Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579-587.(in Chinese))
- [7] 吴青柏, 朱元林, 刘永智. 工程活动下多年冻土热稳定性评价模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 129-133.(Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi. Assessment model of permafrost thermal stability under engineering activity[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 129-133.(in Chinese))
- [8] 刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 高原多年冻土地区公路路基温度场现场实验研究[J]. 公路, 2000, (2): 5-8.(Liu Yongzhi, Wu Qingbai, Zhang Jianming, et al. Analysis of the temperature field of highway embankment in cold regions[J]. Highway, 2000, (2): 5-8.(in Chinese))
- [9] 章金钊, 李祝龙, 武愨民. 冻土路基稳定性主要影响因素探讨[J]. 公路, 2000, (2): 17-20.(Zhang Jinzhao, Li Zhulong, Wu Jinmin. Discussion on main factors about frozen subgrade stability[J]. Highway, 2000, (2): 17-20.(in Chinese))
- [10] 李祝龙, 章金钊, 武愨民. 冻土路基热学计算研究[J]. 公路, 2000, (2): 9-12.(Li Zhulong, Zhang Jinzhao, Wu Jinmin. Analysis of the thawing of frozen subgrade[J]. Highway, 2000, (2): 9-12.(in Chinese))
- [11] 崔广心. 相似理论与模拟试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.(Cui Guangxin. Similitude Principle and Simulated Test[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [12] 喻文兵, 赖远明, 牛富俊, 等. 多年冻土区铁路通风路基室内模型试验的温度场特征[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 601-607.(Yu Wenbing, Lai Yuanming, Niu Fujun, et al. Temperature field features in the laboratory experiment of the ventilated railway embankment in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 601-607.(in Chinese))
- [13] 喻文兵, 赖远明, 牛富俊, 等. 多年冻土铁路通风路基室内模型试验研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 78-83.(Yu Wenbing, Lai Yuanming, Niu Fujun, et al. Laboratory experiment study on the railway ventilated embankment in permafrost regions[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(6): 78-83.(in Chinese))
- [14] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 多年冻土区道碴、通风管结构铁路路基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 436-440.(Yu Wenbing, Lai Yuanming, Zhang Xuefu, et al. Laboratory experiment study on the ballast and ventilated railway embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 436-440.(in Chinese))