

文章编号: 1000-0240(2004)05-0582-05

# 青藏铁路透壁通风管通风路基模型试验 及初始温度场特征

胡明鉴<sup>1</sup>, 汪 稔<sup>1</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 葛修润<sup>1, 2</sup>, 石祥锋<sup>1</sup>, 黄明奎<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 上海交通大学 岩土力学与工程研究所, 上海 200030)

**摘 要:** 通风路基作为一种积极主动保护冻土路基的冷却调控技术能有效的抬升多年冻土上限, 保护冻土路基的稳定性. 目前实体试验工程通风路基一般采用路基内预埋实体混凝土管或 PVC 管, 管壁不能透风, 管壁与土体间主要通过热传导进行换热. 一种管壁开孔、可以透风的新型通风管——“透壁通风管”既能以管内空气间的对流带走管内热量; 因其管壁透风, 低温的冷空气可以透过管壁的大孔眼穿透到通风管周围的介质中, 直接与其进行热交换, 从而改善传统通风管换热模式. 为探索透壁通风管在青藏铁路路基中的实际温控效果而进行了青藏铁路透壁通风管路基现场试验, 试验路基短期监测资料的分析结果显示, 透壁通风管对青藏铁路路基具有良好的冷却能力, 可在一定程度上抬升冻土上限; 透壁通风管路基经填土级配优化重组后更能充分发挥其路基冷却效果

**关键词:** 路基; 透壁通风管; 模型试验; 温度场特征

**中图分类号:** U213.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A

## 1 前言

通风基础是多年冻土区房屋建筑行之有效的办法, 目前已在世界各国普遍采用<sup>[1]</sup>. 工作原理是在寒冷的季节, 依靠冷空气密度较大和自身重力以及风力的作用下带走管内的热空气, 并通过冷空气与管壁之间的热传导方式逐步达到促使基底热量散失, 提高基底的冷储量, 维护基底多年冻土基底稳定性的目的<sup>[2]</sup>. 将此方法移植到冻土区路基工程, 许多学者为此进行大量的可行性论证和试验及理论研究<sup>[2~9]</sup>. 但目前采用的通风管多为实体的混凝土管或 PVC 管, 管壁不能透风. 从其工作原理可以看出, 仅通过空气流动带走通风管内热空气的热能和通过热传导方式冷却通风管周围的介质, 对路基的冷却能力受到一定程度的限制. 中国科学院武汉岩土力学研究所葛修润院士提出一种管壁开孔、可以透风的新型通风管——“透壁通风管”, 既可以使低温的自然风通过管道运动降温; 还因管壁透风, 低

温的冷空气可以透过管壁的大孔眼穿透到通风管周围的介质中, 直接与其进行热交换, 改善传统通风管换热模式, 从而可更为有效的促使路基内热量的散失. 为探索透壁通风管在青藏铁路路基中的冷却效果, 我们在青藏铁路北麓河试验场进行透壁通风管路基冷却效果现场试验研究, 在试验路基内埋设透壁通风管和普通通风管, 监测试验路基温度场和变形以兹对比; 并对路基填土进行级配分选重组试验, 探索透壁通风管路基冷却作用发挥的优化路基结构和优化方法.

## 2 土体性质及透壁通风管特征

试验路基填土物理参数如表 1, 颗粒级配累积曲线如图 1. 该路基填土含较多卵、砾石, 适宜路基填筑. 透壁通风管为混凝土管, 每根长 1 m, 内径 400 mm, 壁厚 40 mm. 管壁预留直径 50 mm 的通风孔(图 2). 普通通风管每根长 2 m, 材料、内径和壁厚与透壁通风管相同.

收稿日期: 2004-01-22; 修订日期: 2004-05-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); 中国科学院武汉岩土力学研究所前沿基金项目(Q000207)资助

作者简介: 胡明鉴(1974—), 男, 重庆垫江人, 2001 年在中国科学院武汉岩土力学研究所获硕士学位, 现从事岩土力学与岩土工程方面的工作. E-mail: hmjmd@163.com

表1 试验路基填土物理参数

Table 1 Physical parameters of the roadbed fill

| 物理参数                        | 试验路基填土(北麓河)    |
|-----------------------------|----------------|
| 最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.67~1.69      |
| 最佳含水量/%                     | 7.6            |
| 天然含水量/%                     | 6~13           |
| 比重/(g·cm <sup>-3</sup> )    | 2.649          |
| 液限/塑限/塑性指数/%                | 24.8/11.4/13.4 |

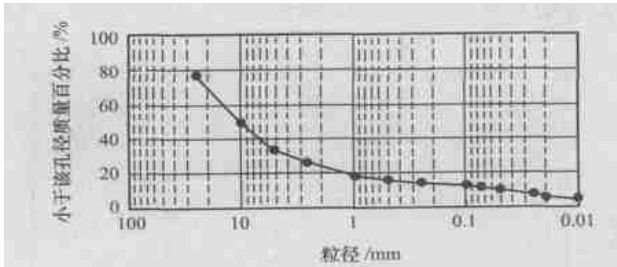


图1 北麓河路基填土粒径级配累积曲线

Fig. 1 The grain size gradation curve of the Beiluhe roadbed fill

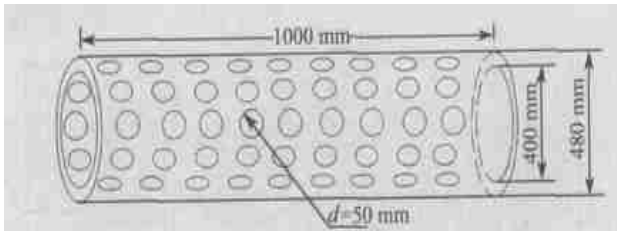


图2 透壁通风管几何尺寸

Fig. 2 Dimension of the perforated ventilation pipe

### 3 试验场地与测点布置

#### 3.1 试验场地

试验路基位于青藏铁路正线路基(里程标号DK1140+970~DK1140+985)右侧挡水埝上,长15 m,分普通通风管试验段、透壁通风管试验段、透壁通风管+填土分选重组+塑料排水板试验段(简称综合处理措施试验段)、填料级配分选重组试验段和普通路基试验段5段,每段长3 m,试验场地布置如图3(填料级配分选重组试验段内容另文介绍,这里仅作简要说明)。路基上宽2 m、坡比1:1.5、高1.6 m。其中综合措施试验段将填土按粒径 $\phi > 25$  mm(粗)、 $10 \text{ mm} < \phi < 25$  mm(中)和 $\phi < 10$  mm(细)进行筛分并依细粒、细粒、中粒、粗粒次序分4层填筑,每层厚40 cm。

根据室内试验结果并结合邻近青藏铁路路基填筑施工工艺调查,当填土含水量7%~11%,松铺厚度20 cm时手扶式蛙式打夯机夯击6遍,可以满足密实度和强度要求。试验路基填筑前先进行场地平整,填筑综合措施试验段时,当粒径 $\phi < 10$  mm

填土填筑厚度为40 cm时,平整、紧密铺设塑料排水板(图4),以期切断通风管周围空气冷凝形成的冷凝水向下部顺利迁移的通道和防止路基产生不均匀沉降;透壁通风管外包装透水透气性很强的纱网以防止周围土颗粒进入通风管且不影响透壁通风管的通风效果(图5),同时将原挡水埝修整成与试验路基相同的规模予以对比。

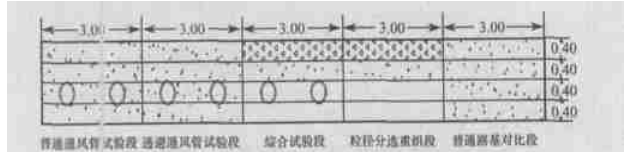


图3 试验路基纵剖面图

Fig. 3 Vertical section of the tested embankment



图4 塑料排水板铺设现场

Fig. 4 A photo showing how to lay the prefabricated plastic strips for drainage



图5 试验路基通风管埋设照片

Fig. 5 A photo showing how to lay the ventilation pipes in the tested embankment

#### 3.2 测点布置

温度场监测采用热敏电阻,热敏电阻室内测温精度可达0.01 °C。考虑到试验路基的尺寸对监测设备的边界效应,设备仅埋设在各试验段中心,钻孔和热敏电阻测点布置如图6和图7。

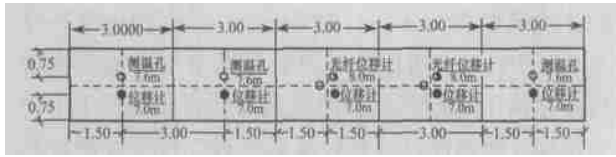


图 6 试验路基钻孔布置

Fig. 6 Allocation of the boreholes on a tested embankment

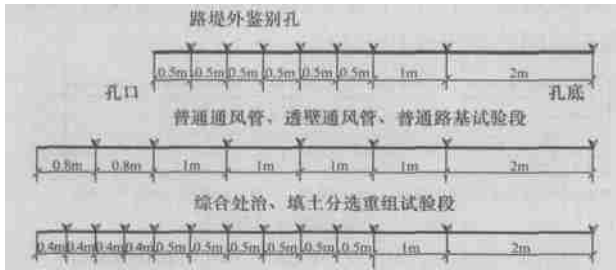


图 7 热敏电阻测点布置

Fig. 7 Allocation of the thermistor themometers

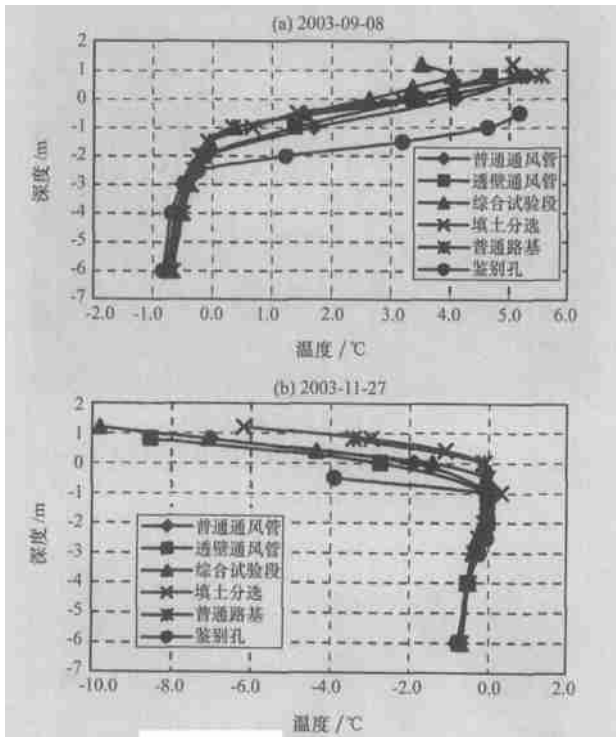


图 8 温度随深度变化关系曲线

Fig. 8 Temperature changing with depths

试验路基修筑和设备安装于 2003 年 9 月 7 日完成. 经调试后于 9 月 8 日即进行观测. 初期每天一次变形观测; 上、下午各进行一次温度测试, 持续一个月. 后期每月进行 3 次温度场观测, 变形观测时间间隔视变形情况进行调整.

#### 4 试验结果对比分析

经观测所得的温度随深度变化关系曲线见图 8. 不同时间等温线位置对比见图 9. 从中可以看出, 试验初期各钻孔 0 °C 点以上, 温度随深度的增加几乎呈线性显著降低; 0 °C 点下温度随深度的增

加而缓慢降低. 各试验段下 0 °C 点位于地面下 1.5 m 左右, 天然地表的 0 °C 点在地面下 2.5 m 处. 即填筑高度为 1.6 m 的试验路基, 使 0 °C 点上升约 1.0 m 左右. 当冬天气温比地温高时, 各钻孔 0 °C 点以上, 温度随深度的增加几乎呈线性的增加, 由负温逐渐增加到 0 °C; 在 0 °C 点以下, 温度随深度的增加几乎呈线性的降低, 增加和降低幅度不同, 前者增幅明显而后者降幅缓慢.

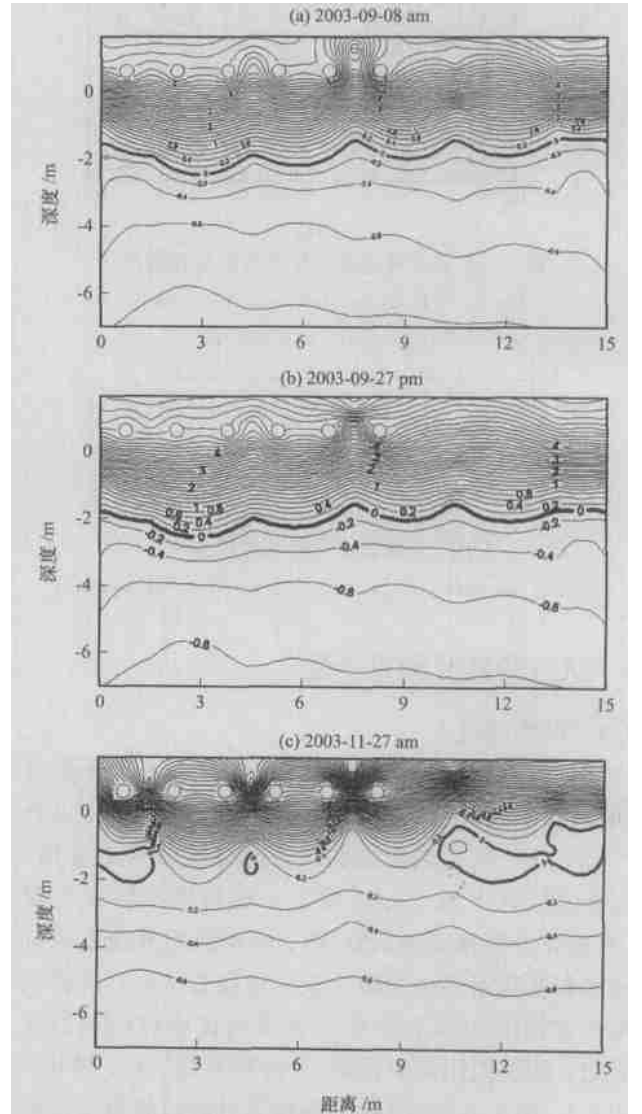


图 9 不同时间等温线模拟

Fig. 9 Simulated isotherms for different times

通过不同时期各钻孔温度曲线对比后发现不同处治方式下 0 °C 点位置变化是不同的, 部分钻孔还出现了连续多个 0 °C 点(表 2), 短期内普通通风管 0 °C 点位置保持不变, 透壁通风管试验段、综合处治试验段、填土分选重组试验段 0 °C 点位置有少许上升; 3 个月后, 0 °C 点抬升明显, 各处置方式下还出现了近 1.0 m 的 0 °C 区.

从温度场实测数据等温线(图9)可以看出, 2003年9月8日的冻土上限略高于2003年9月27日, 说明短期内各试验段冻土上限略有降低, 未经任何处治的普通路基冻土上限抬升最为明显, 约0.1~0.2 m. 这与工程活动带入路基的热量逐渐消散将消耗路基内的冷能, 引起冻土上限降低相吻合. 由于普通路基在原挡水捻上直接修整, 没有经历重新开挖回填工序, 工程活动带入试验路基的热量少, 因此冻土上限保持相对稳定, 位置也比其他试验段略高.

随着时间的推移(80 d), 工程活动带入试验路基的热量的逐渐消散以及路基本身调控作用的逐渐发挥, 地基深部等温线逐渐趋于平缓, 冻土上限也相应地发生改变. 没有任何处理措施的普通路基下部形成较大面积的融化盘, 普通通风管路基下部也有小块区域的融化盘; 透壁通风管处理措施试验路基融化盘更小; 而设置砂砾石反滤层并铺设塑料排水板的综合处理措施路基下没有形成融化盘. 说明透壁通风管对冻土路基具有更好的温度调控能力, 经过路基填土的分选重组和路基结构优化, 冷却效

表2 不同时间0℃距地表距离(m)

Table 2 Depth of 0℃ position changing with time(m)

| 测试时间<br>(月-日) | 普通通风路基<br>试验段 | 透壁通风管<br>试验段 | 综合处治<br>试验段 | 填土分选<br>重组<br>试验段 | 普通路基<br>基试验<br>段 | 堤外鉴<br>别孔 |
|---------------|---------------|--------------|-------------|-------------------|------------------|-----------|
| 08-09         | -1.90         | -1.87        | -1.40       | -1.40             | -1.40            | -2.38     |
| 09-27         | -1.90         | -1.85        | -1.35       | -1.35             | -1.40            | -2.38     |
| 11-27         | -1.0          | -1.0         | -0.5        | -0.5              | -1.0             | -1.0      |
|               | -2.0          | -2.0         | -1.0        | -1.0              | -1.5             |           |
|               |               |              | -1.5        | -1.5              |                  | -2.0      |

果更加明显.

## 5 认识与启示

(1) 受工程活动的影响和路基热量的逐渐消散, 消耗路基内的冷能, 使试验初期路基冻土上限略有降低. 工程活动带入普通路基的热量相对较小, 冻土上限保持相对稳定, 位置比其它试验段略高.

(2) 透壁通风管对路基具有良好的冷却能力, 下部融化盘很小; 经过路基填土的分选重组和路基结构优化, 冷却效果更加明显, 融化盘消失; 普通通风管路基下部均存在明显的融化盘, 未经任何处理措施的普通路基融化盘区域更大.

(3) 当地温高与气温时, 低温的空气能有效的通过透壁通风管壁孔与通风管周围土体进行热交换带走路基内的热量, 达到保护冻土的目的, 实现路基的主动冷却; 但当气温比地温高时, 热空气也将比普通通风管更容易与通风管周围土体进行热交换, 增加路基内的热量, 对冻土和路基稳定反而不利. 后期将对透壁通风管加装具有管内外温差感应、可适时开关的风门; 并加强变形和温度场观测, 结合室内试验进行数值分析和冷却机理研究.

致谢: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所马巍教授、吴青柏教授、刘永智教授、马治学先生和青藏高原观测研究站的全体工作人员对本试验研究给予的大力支持和帮助, 使本项试验工作得以顺利完成, 在此表示衷心的感谢.

## 参考文献(References):

- [1] Cheng Guodong. Construction of Qinghai-Tibet Railway cooled roadbed [J]. China Railway Science, 2003, 24(3): 1-4. [程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 1-4.]
- [2] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in pemafrst regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579-586. [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): 579-586.]
- [3] Ma Wei. Rock and soil engineering problems in pemafrst regions on Qinghai-Tibet Railway construction [A]. The Ninth Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Symposium, Chinese Civil Engineering Association [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 155-162. [马巍. 青藏铁路建设中冻土区岩土工程问题 [A]. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册) [C]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 155-162.]
- [4] Cheng Guodong. Pemafrst distribution influenced by local factors and its inspiration for the design of the Qinghai-Tibet Railway [J]. Science in China (Series D), 2003, 33(6): 602-606. [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): 602-606.]
- [5] Niu Fujun, Cheng Guodong, Lai Yuanming. Laboratory study on ventilation duct roadbed of Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2002, 24(3): 1-6. [牛富俊, 程国栋, 赖远明. 青藏铁路通风路堤室内模型试验研究 [J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(3): 1-6.]
- [6] Yu Wenbing, Lai Yuanming, Niu Fujun, et al. Temperature field features in the laboratory experiment of the ventilated railway embankment in pemafrst regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 601-607. [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.]
- [7] Wu Ziwang, Cheng Guodong, Zhu Linran, et al. Embankment Engineering of Frozen Soils [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998. [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, 1998.]

[8] Temporary Provisions of the Engineering Construction in Qinghai-Tibet Plateau Frozen Soils Regions. Standard of the Ministry of Railways of the People's Republic of China[S]. Beijing: the Ministry of Railways of the People's Republic of China. 2001. [中华人民共和国铁道部标准. 青藏高原铁路多年冻土区工程建设暂行规定[S]. 北

京: 中华人民共和国铁道部, 2001.]

[9] Cheng Guodong, He Ping. Linearity engineering in permafrost areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 213-217. [程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213-217.]

## Simulated Experiment of the Embankment with Perforated Ventilation Pipes and the Features of Its Initial Temperature Field of the Qinghai-Tibet Railway

HU Ming-jian<sup>1</sup>, WANG Ren<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, GE Xiu-run<sup>1,2</sup>,  
SHI Xiang-feng<sup>1</sup>, HUANG Ming-kui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan Hubei 430071, China

2. Institute of Geotechnical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Ventilation cooling railway embankment, as an initiative-cooling embankment, attracts more and more attention. It can upgrade permafrost table, protect the embankment in permafrost regions effectively and enhance the stability of the railway foundation. At present the ventilation pipes are generally made of concrete or PVC, and without holes on their walls. Due to airflow and heat transference through air in the pipes and the soil around them, the cooling effect of this simplex mode is low at a certain extent. A new type of ventilation pipes perforated ventilation pipes is invented, which have holes on the pipe walls. Through these holes the embankment with perforated ventilation pipes can be cooled through convec-

tion heat between airflow and soil around the pipes as well as airflow and heat transference. In order to understanding the cooling effect of the perforated ventilation pipes, a in-situ contrast experiment between the ordinary ventilation pipes and the perforated ventilation pipes was carried out. Short-term observation shows that the perforated ventilation pipes are more capable than the ordinary ventilation pipes in railway embankment cooling, upgrading the permafrost table more efficiently. With embankment structure optimizing the cooling ability will exert sufficiently. It is believed that long-term cooling effect of the perforated ventilation pipes will come out as continuous observation and further analysis.

**Key words:** embankment; perforated ventilation pipe; model experiment; temperature field features