

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.05.004

通风管路基的调温机理

孙红¹, 葛修润¹, 章金钊², 牛富俊³

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075

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)

摘要: 考虑通风管路基中通风管的空气对流换热特点, 摒弃把通风管的影响作为边界条件处理的方法, 建立多年冻土区的通风管路基的数值模型, 对设置和未设置风门的通风管路基的温度特性进行数值模拟, 分析2种情况下通风管路基的调温效果, 为多年冻土区的路基工程的建设及安全运营提供技术支持。研究表明: 通风管路基能够明显地降低冻土地基的温度, 提高冻土的人为上限; 与无风门的路基相比, 有风门的通风管路基降低冻土地基的温度的效果更加明显, 降温作用发生得更早, 冻土人为上限的提高幅度更大, 路基中心和路肩下的地基温度降低更快, 且温度分布较均匀, 路基温度稳定所需要的时间减少。

关键词: 道路工程; 通风管路基; 调温机理; 数值模拟; 多年冻土; 风门

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2013) 05-0019-05

Temperature Adjustment Mechanism of Ventilation Pipeline Embankment

SUN Hong¹, GE Xiu-run¹, ZHANG Jin-zhao², NIU Fu-jun³

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China;

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

Abstract: Based on convection heat transfer characteristics of air inside ventilation pipe of ventilation pipeline embankment, discarding the method which takes the influence of ventilation pipe as boundary condition, the numerical model for ventilation pipeline embankment on permafrost region is established. The temperature characteristics of ventilation pipeline embankment with air doors and without air door are simulated, and their cooling effects are analysed to provide the technical support for the construction and safe operation of embankment in permafrost region. It is shown that (1) the underlying permafrost temperature can be obviously reduced and artificial upper table of permafrost can be raised by the ventilation pipeline embankment; (2) compared with the ventilation pipeline embankment without air door, the cooling effect of embankment with air doors is better, its cooling function operates earlier, and the artificial upper table of permafrost rises higher, the underlying permafrost temperature under the center and shoulder of the embankment reduces more quickly with basic uniform distribution, and it costs shorter time to become stable for embankment temperature.

Key words: road engineering; ventilation pipeline embankment; temperature adjustment mechanism; numerical simulation; permafrost; air door

收稿日期: 2012-09-18

作者简介: 孙红 (1970-), 女, 辽宁瓦房店人, 博士, 副教授. (sunhong@sjtu.edu.cn)

0 引言

多年冻土路基稳定性一直是人们所关心的重点,由于路基的修建,改变了冻土的水热状况,引起水热的重分布、路基土体工程性质产生变化,导致路基各部分产生不均匀变形,及至路基沉陷破坏^[1-2]。路基沉陷病害是多年冻土地区路基的主要病害,影响着多年冻土地区道路工程的质量,也是诱发其他类型路基病害、导致路面病害增加的主要原因^[3-4]。事实表明:采用主动降温、冷却地基和保护冻土为原则的工程措施,积极主动调控地温的工程结构能够确保路基的稳定^[5-8]。

通风管路基是主动调温措施之一,在路基体中埋设通风管,不但有效地增加路基体与空气的接触面,而且通过高原空气的强对流活动,消耗路基体中存在的能量,有效阻止路基表面吸收的辐射热量下传,抬高多年冻土上限,起到保护下伏多年冻土维持冻结状态、维持路基体稳定的作用。通风管的现场观测资料表明,通风管路基具有较好的工程效果,能降低下部多年冻土温度^[9-10]。对青藏高原多年冻土区通风管路基进一步研究发现,通风管路基主要通过强迫对流换热方式降低地温^[11],而目前通风管路基数值模拟多把通风管进行边界处理^[12-13],没有反映通风管的空气对流换热的物理过程。

本文考虑通风管的空气对流换热特点,对多年冻土区通风管路基和设置风门的通风管路基的温度特性进行数值模拟,为冻土区的路基工程的建设 and 安全运营提供技术支撑。

1 通风管路基控制微分方程

1.1 通风管中纯流体区域流动控制方程

对于二维稳态流动,反映惯性力、压力及粘性力平衡的奈维-斯托克斯方程:

$$\begin{cases} \rho \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度; F_x 、 F_y 分别为体积力; p 为压力; U 、 V 分别为 x 和 y 方向的气体平均化流速; η 为气体的动粘滞系数。

1.2 能量守恒微分方程

假设通风管壁和路基土体的接触面的温度是连续的,通风管内部传热和路基土体的传热依据各自

的控制方程进行。考虑对流换热特点,通风管内的二维传热的控制方程如下:

$$C_L \frac{\partial T}{\partial t} = K_L \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + C_L \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2)$$

式中, C_L 为气体的体积热容; K_L 为气体的导热系数; T 为温度; t 为时间。

寒区路基的冻害问题主要由土体的冻胀、融沉作用造成。土体冻胀、融沉过程存在相变问题,对于含有相变的热传导问题来说,可采用穿越相变界面温度时的热物理参数来表示,本文采用显热容法处理。

对于非通风管区域,因没有气体的影响,传热的控制方程为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

式中, C 为体积热容; K 为导热系数。

考虑相变潜热的影响,冻土的体积热容 C 和导热系数 K 分别表示为:

$$C = \begin{cases} C_f & T < T_f - \Delta T \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ C_u & T > T_f + \Delta T \end{cases}, \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} K_f & T < T_f - \Delta T \\ K_f + \frac{K_u - K_f}{2\Delta T} [T - (T_f - \Delta T)] & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ K_u & T > T_f + \Delta T \end{cases}, \quad (5)$$

式中, u 为未冻区; f 为正冻区; ΔT 为发生相变的温度区间; L 为冰水的相变潜热。

本文采用 Galerkin 法对上述方程进行有限元方程的推导,方程从略。

2 通风管路基模型的建立

2.1 路基模型

研究通风管的降温效果,选取路基的横断面进行研究,并分无风门和有风门 2 种情况进行分析。路基几何尺寸如图 1 所示,其路面宽度为 10 m,路基高为 3 m,路基边坡为 1:1.5,路基为对称结构,通风管管中心线距地面为 0.25 m,直径为 0.4 m,计算地基深度为 40 m,路基外围两侧计算宽度为 30 m。采用三角形单元,单元共 94 128 个。

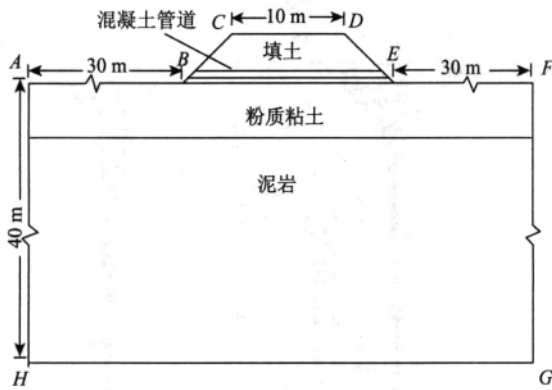


图1 路基温度场模拟计算区域

Fig. 1 Calculation area for temperature field of embankment

2.2 各种材料的物理参数

高原的空气比重为 0.641 kg/m^3 , 传热系数为 $0.025 \text{ J/(m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s)}$, 比热容为 $1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$, 动粘滞系数 η 为 $1.75 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$, 相变潜热为 334.56 kJ/kg , ΔT 为 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

土层从上到下依次为 3 m 厚填土, 6.6 m 厚粉质粘土, 下部为泥岩, 各种材料的岩土参数见表 1。

表1 土层的岩土参数表

Tab. 1 Geotechnical parameters of soil layers

土性	$\lambda_f / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s})^{-1}$	$C_f / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	$\lambda_u / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s})^{-1}$	$C_u / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	$\gamma / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
填土	2.200	0.857	1.680	1.103	1 870
粉质粘土	1.224	1.070	0.883	1.370	1 708
泥岩	2.033	0.785	1.662	0.890	1 962
混凝土管	1.770	1.000	1.770	1.000	2 400

2.3 初始条件

路基初始温度根据天然地基的实测值, 见文献 [4]。

2.4 边界条件

通风管入口风速为 4 m/s , 出口边界的压力为大气压力。模型下边界 HG 的热流密度为 0.06 W/m^2 , 侧面 AH 和 FG 为绝热边界。该路基所在区域, 年平均温度 $-3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由附面层理论 [5], 假定路基模型的边界条件如下 [4]。

天然地表 AB 和 EF 的温度变化按下式计算:

$$T = -0.3 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

路堤斜坡 BC 和 DE 的温度变化规律为:

$$T = 0.7 + 13 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

路基中面 CD 的温度为:

$$T = 1.9 + 14 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

空气 (风门关闭时通风管管口) 的温度为:

$$T = -3.6 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760 \times 3600}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

3 数值分析与比较

路基完工是在 7 月份, 计算完工后 1~6 a 12 个月份的温度场分布情况。此路基是对称的, 只分析一半区域的随机温度场的计算结果。

3.1 无风门通风管路基的温度特点

图 2~图 4 分别为坡趾、坡肩和路基中心下地基在施工后第 1 a 和第 4 a 的温度随深度的变化图。

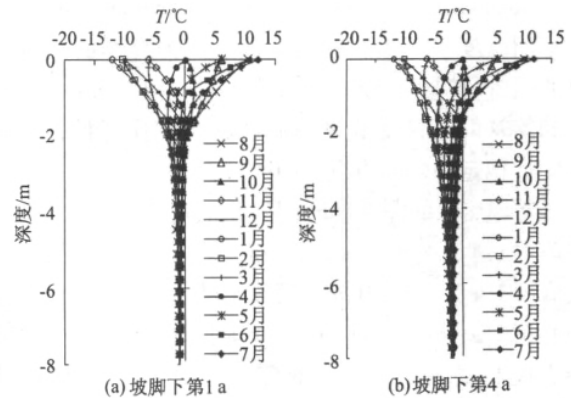


图2 无风门通风管路基坡脚下的地基温度与深度关系曲线
Fig. 2 Foundation temperature vs. depth under toe of ventilation pipeline embankment without air door

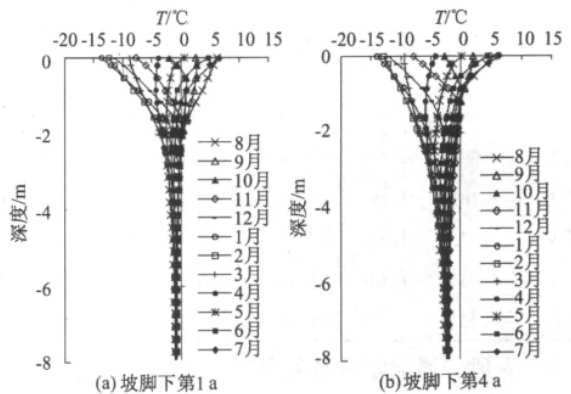


图3 无风门通风管路基路肩下的地基温度与深度关系曲线
Fig. 3 Foundation temperature vs. depth under shoulder of ventilation pipeline embankment without air door

通风管具有降低冻土温度的特点, 从坡趾、坡肩和路基中心下的地基温度随着时间的增长逐渐降低, 并且冻土上限提高。从图 2~图 4 看出, 坡肩和路基中心下的温度变化较接近, 但数量不同, 与坡

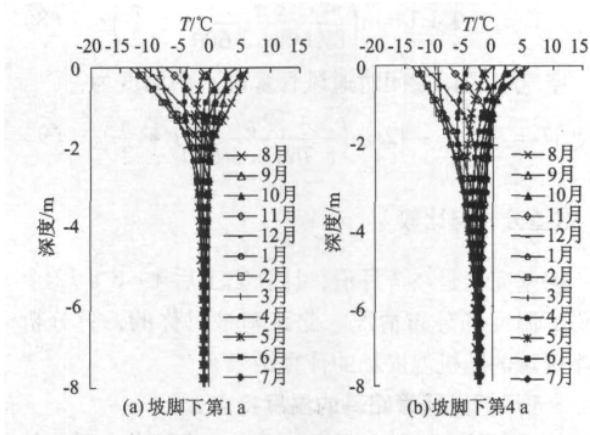


图4 无风门通风管路基中心下的地基温度与深度关系曲线
Fig. 4 Foundation temperature vs. depth under center of ventilation pipeline embankment without air door

趾下的温度变化相差较大。这是因为夏季的热量通过通风管传递到土层,引起土层的温度分布不均匀,冷却路基的效果受到夏季温度的影响而降低,且温度接近稳定的时间将近5~6 a。

零温度线的深度随时间变化的规律见表3。坡趾下第1 a 零温度线在-2.357 m,第6 a 提高0.785 m;坡肩第1 a 为-2.291 m,第6 a 提高1.110 m;路基中心第1 a 为-2.291 m,第6 a 提高1.135 m,路基中心提高最大,第6 a 时零温度线比坡趾的高出0.416 m。

表3 施工结束后零温度线的深度(单位:m)

Tab. 3 Depth of 0 °C isotherm after construction (unit: m)

深度	无风门通风管路基			有风门通风管路基		
	坡趾	坡肩	路基中心	坡趾	坡肩	路基中心
第1 a	-2.357	-2.291	-2.290	-2.422	-2.291	-2.291
第2 a	-1.900	-1.377	-1.312	-1.704	0.322	0.322
第3 a	-1.181	-1.181	-1.181	-1.573	0.322	0.387
第4 a	-1.572	-1.312	-1.181	-1.573	0.387	0.387
第5 a	-1.638	-1.181	-1.050	-1.508	0.387	0.387
第6 a	-1.572	-1.181	-1.156	-1.508	0.387	0.387

3.2 有风门通风管路基的温度特点

防止夏天温度高时热量向路基传热,在通风管两侧安装风门,风门关闭时间为5—10月,其余时间开后,利于制冷。图5~图7分别为坡趾、坡肩和路基中心下地基在施工后第1 a 和第4 a 的温度随深度的变化图。

有风门的通风管降低冻土温度的效果明显,降温效果在第1 a 就有所显现,第2 a 已经非常明显,尤其在路肩和路基中心下面的地基温度基本上都低

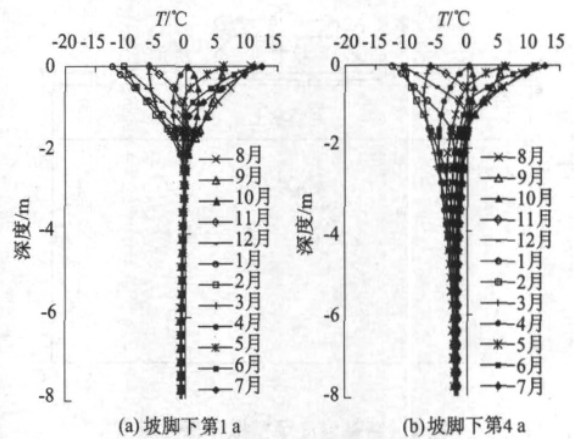


图5 有风门通风管路基坡脚下的地基温度与深度关系曲线

Fig. 5 Foundation temperature vs. depth under toe of ventilation pipeline embankment with air doors

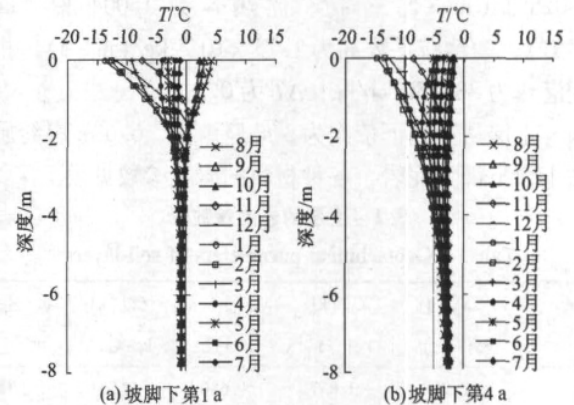


图6 有风门通风管路基路肩下的地基温度与深度关系曲线

Fig. 6 Foundation temperature vs. depth under shoulder of ventilation pipeline embankment with air doors

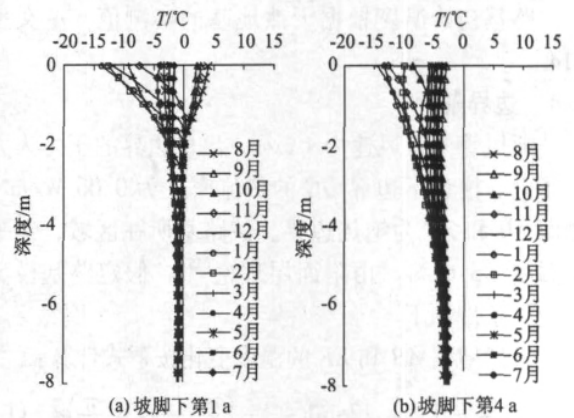


图7 有风门通风管路基中心下的地基温度与深度关系曲线

Fig. 7 Foundation temperature vs. depth under center of ventilation pipeline embankment with air doors

于零度。从坡趾、坡肩和路基中心下的地基温度随着时间的增长明显地降低,并且冻土上限幅度提高。

如表3所示,有风门时坡趾下第1a零温度线在-2.422 m,第6a提高0.914 m;坡肩和路基中心第1a为-2.291 m,第6a提高2.687 m;路基中心和坡肩的零温度线较坡趾要提高1.587 m。风门的安装,使路基的零温度线比无风门的提高程度增大,而且趋于稳定所需的时间短,将近3~4 a。坡肩和路基中心下的零温度线位置提高较大,且提高幅度较相近,但是坡趾的零温度线提高相对较少。风门关闭阻止夏季的热量通过通风管传递到土层,使土层的温度分布较均匀,冷却路基的效果更加明显。

4 结论

考虑通风管中空气的对流换热特点,建立通风管路基控制微分方程,对多年冻土区普通的通风管路基和设置风门的通风管路基的温度特性进行数值模拟。研究表明,通风管路基能够明显地降低冻土地基的温度,提高冻土的人为上限。有风门的通风管路基降低冻土地基的温度的效果更加明显,降温作用发生得更早,冻土人为上限的提高幅度更大,路基和路肩下的地基温度分布较均匀,路基温度稳定所需要的时间减少。

参考文献:

References:

- [1] CHENG Guo-dong, SUN Zhi-zhong, NIU Fu-jun. Application of the Roadbed Cooling Approach in Qinghai-Tibet Railway Engineering [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53 (3): 241-258.
- [2] 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.
CHENG Guo-dong, HE Ping. Linearity Engineering in Permafrost Areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23 (3): 213-217.
- [3] 刘永智,吴青柏,张建明,等. 青藏高原多年冻土地地区公路路基变形 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (1): 10-15.
LIU Yong-zhi, WU Qing-bai, ZHANG Jian-ming, et al. Deformation of Highway Roadbed in Permafrost Regions of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (1): 10-15.
- [4] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地地区路基沉陷研究 [J]. 冰川冻土, 1999, 21 (2): 155-158.
YUAN Xi-zhong. Study on Thaw Settlement of Subgrade

in Permafrost Regions in the Northern Part of Da Hinggan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21 (2): 155-158.

- [5] LAI Yuan-ming, GUO Hong-xin, DONG Yuan-hong. Laboratory Investigation on the Cooling Effect of the Embankment with L-shaped Thermosyphon and Crushed Rock Revetment in Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58 (3): 143-150.
- [6] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, DONG Yuan-hong. Numerical Study on Temperature Characteristics of Expressway Embankment with Crushed Rock Revetment and Ventilated Ducts in Warm Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59 (1): 19-24.
- [7] 程国栋,孙志忠,牛富俊. “冷却路基”方法在青藏铁路上的应用 [J]. 冰川冻土, 2006, 28 (6): 797-808.
CHENG Guo-dong, SUN Zhi-zhong, NIU Fu-jun. Application of Roadbed Cooling Methods in the Qinghai-Tibet Railway Construction [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (6): 797-808.
- [8] 刘琦,孙斌祥,杨丽君,等. 透壁通风管路堤的降温特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (8): 1152-1157.
LIU Qi, SUN Bin-xiang, YANG Li-jun, et al. Cooling Effect of Embankment with Perforated Ventilation Pipes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (8): 1152-1157.
- [9] 牛富俊,马巍,赖远明. 青藏铁路管道通风路堤下土体的温度变化分析 [J]. 铁道工程学报, 2003, 80 (4): 29-32.
NIU Fu-jun, MA Wei, LAI Yuan-ming. Analysis on Ground Temperature Changes of the Soils under Duct Ventilation Embankment of Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003, 80 (4): 29-32.
- [10] 杨永鹏,蒋富强. 青藏高原多年冻土区通风管路基温度特性分析 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (4): 7-10.
YANG Yong-peng, JIANG Fu-qiang. Analysis on the Temperature Characteristics of the Ventilation Pipeline Embankment in the Permafrost Regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. China Railway Science, 2010, 31 (4): 7-10.
- [11] 蒋富强,杨永鹏. 青藏高原多年冻土区通风管路基传热规律研究 [J]. 铁道工程学报, 2008, 48 (11): 27-30.

- 改进 [J]. 水力发电, 2008, 34 (12): 58-59.
GONG Bao-chen, WU Yi-jin, SHEN Yi-sheng. Working Principle and Improvement of Hydraulic Settlement Device [J]. Water Power, 2008, 34 (12): 58-59.
- [8] 刘朝英. QC-1型沉降仪在汕汾高速公路软基沉降观测中的应用 [J]. 水利科技与经济, 2008, 14 (7): 594-595.
LIU Chao-ying. Application of QC-1 Settlement Meter in Shanfen Expressway Soft Soil Settlement Observation [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 14 (7): 594-595.
- [9] 李之中, 李杰, 郑水华, 等. 水管式沉降仪的几点改进措施 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34 (6): 31-33.
LI Zhi-zhong, LI Jie, ZHENG Shui-hua, et al. Several Measures for Improving Hydraulic Overflow Settlement Gauge [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34 (6): 31-33.
- [10] 白忠良, 徐泽中, 吴赞平, 等. 高等级公路软基沉降观测的精度指标及观测规范化问题 [J]. 水利水电科技进展, 1998, 18 (2): 27-30.
BAI Zhong-liang, XU Ze-zhong, WU Zan-ping, et al. Precision Index for Subsidence Observation of Soft Foundation of Expressway and Standardization of Observation [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18 (2): 27-30.
- [11] 何良德, 洪波, 许永明, 等. 高速公路软土路基沉降观测的精度控制 [J]. 公路, 2003 (4): 74-78.
HE Liang-de, HONG Bo, XU Yong-ming, et al. Settlement Observation Precision Control of Expressway Soft Soil Roadbed [J]. Highway, 2004 (4): 74-78.
- [12] 杨宝清. 现代传感器技术基础 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
YANG Bao-qing. Modern Sensor Technology Foundation [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.
- [13] 郝芸. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
HAO Yun. Sensor Principles and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [14] 郑文学, 王金波. 仪器精度设计理论 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
ZHENG Wen-xue, WANG Jin-bo. Instrument Accuracy Design Theory [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1992.
- [15] 何昭强. 电位器的基本性能、选型依据及使用原则 [J]. 电子元件与材料, 1996, 15 (6): 42-48.
HE Zhao-qiang. Basic Performances, Basis to Select Types and Service Principles of Potentiometers [J]. Electronic Components and Materials, 1996, 15 (6): 42-48.
- [16] 余俊, 徐真, 赵冬初, 等. 摩擦学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1984.
YU Jun, XU Zhen, ZHAO Dong-chu, et al. Tribology [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1984.

(上接第23页)

- JIANG Fu-qiang, YANG Yong-peng. Research on the Heat Transfer Law of Ventilation Pipeline Embankment in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 48 (11): 27-30.
- [2] 李国玉, 李宁, 全晓娟, 等. 青藏铁路可控通风管路基温度场的三维非线性分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27 (1): 128-133.
LI Guo-yu, LI Ning, QUAN Xiao-juan, et al. 3D Nonlinear Analysis of the Temperature Field of an Adjustable Ventilated Embankment in Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27 (1): 128-133.
- [3] 刘志强, 赖远明, 张淑娟, 等. 青藏铁路通风路基三维温度场的数值分析 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (1): 70-74.
LIU Zhi-qiang, LAI Yuan-ming, ZHANG Shu-juan, et al. Numerical Analysis for the Ventilated Embankment in Qing-Tibet Railway [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (1): 70-74.
- [4] 孙红, 牛富俊, 葛修润. 基于 Monte-Carlo 法的冻土区路基温度场随机分析 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (5): 738-742.
SUN Hong, NIU Fu-jun, GE Xiu-run. Stochastic Temperature Field of Frozen Soil Roadbed Based on Monte-Carlo Method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45 (5): 738-742.
- [5] 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.
WU Zi-wang, CHENG Guo-dong, ZHU Lin-nan, et al. Frozen Ground Roadbed Engineering [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988.