

# 透壁通风管路堤降温效应的室内试验研究

刘 琦<sup>1</sup>, 孙斌祥<sup>1</sup>, 徐学祖<sup>1</sup>, 汪双杰<sup>2</sup>, 章金钊<sup>2</sup>

(1. 绍兴文理学院土木工程系, 浙江 绍兴 312000; 2. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710068)

**摘 要:** 介绍了研究透壁通风管路堤降温效果的室内试验方法, 对 100 cm×60 cm×100 cm 尺寸的不同通风管路堤试样进行了实验研究。结果表明, 采用透壁通风管能明显增强路堤的降温效果, 而只在负温期间通风的透壁通风管路堤降温效果更为显著, 路堤在通风管进风口附近的温度变化幅度以及负温区域的范围都明显大于通风管出风口处, 形成了路基温度场沿着风向的不对称分布。

**关键词:** 多年冻土; 通风管路堤; 降温效果; 自然采风口; 透壁通风管

**中图分类号:** TU445; U213.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)09-1153-06

**作者简介:** 刘 琦(1961-), 女, 副教授, 主要从事路基稳定性和土动力学特性等方面的研究工作。

## Investigation of laboratory tests on cooling effect of embankments with perforated ventilation pipes

LIU Oi<sup>1</sup>, SUN Bin-xiang<sup>1</sup>, XU Xue-zu<sup>1</sup>, WANG Shuang-jie<sup>2</sup>, ZHANG Jin-zhao<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, China; 2. The First Highway Survey &

Design Institute, Ministry of Communications, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** A technique of laboratory tests for the cooling mechanism in embankments with perforated ventilation pipes was introduced. Various ventilated-embankment samples with dimensions of 100 cm×60 cm×100 cm under cyclically fluctuating upper-surface temperature were studied experimentally. It was shown that the ventilated embankment with perforated ventilation pipe could enhance the cooling effectiveness of the embankment base. The cooling of perforated ventilation pipe embankment was effective only under negative temperature. Temperature change amplitudes and distribution ranges of negative temperature in the vicinity of air inlet of ventilation pipe were larger than those in the vicinity of air outlet of ventilation pipe. This was a direct consequence of unsymmetrical temperature distribution along a wind direction parallel to the ventilation pipes.

**Key words:** permafrost; ventilation pipe embankment; cooling effect; self-windward vent; perforated ventilation pipe

## 0 引 言

由于施工、营运以及全球气候变暖等多种因素的共同影响, 青藏公路沿线多年冻土的退化已越来越严重, 而路基下冻土层的退化速度更为迅速, 使沿线冻土环境条件受到强烈扰动和产生新的变化, 并引起道路病害的发展和病害的产生, 已严重影响车辆安全运行<sup>[1-5]</sup>, 有必要针对冻土退化问题研究提出一些能对现行路基稳定性切实有效的整改措施<sup>[2-3]</sup>, 其中, 遵循冻土保护原则是寒区工程建设符合国家可持续发展战略的先进理念<sup>[1-3]</sup>。为此, 青藏铁路建设和青藏公路改扩建工程中希望采用主动调节和控制地温的技术来保护冻土<sup>[6-22]</sup>, 使土层减少冻融相变或融化、保持冻结, 抑制冻土层的退化甚至使路堤下冻土层有所加厚, 从而达到工程安全营运的目的。利用块(碎)石路堤、护坡和通风管路堤以造价、营运和维护成本较低的特

点而广受工程界的青睐, 但在青藏高原的高海拔多年冻土地区, 年平均气压低, 空气稀薄, 由块(碎)石路堤、护坡孔隙空气密度不均匀引起的冬季自然对流降温效应也会减弱很多<sup>[6-12]</sup>。因此, 通过其它技术措施来冷却地基是一个迫切需要研究的问题<sup>[2-3]</sup>, 利用冬季冷空气来降低路基土层温度的通风管路堤是一种有效的地温调控技术<sup>[13-22]</sup>。为了充分利用青藏高原的冬季风能, 通风管口加装自然迎风的采风口及其通风管增加透气小孔的强化路基降温技术措施有必要进行深入的实验和理论研究。目前, 在青藏铁路风火山北麓河试验段正在进行透壁通风管路堤降温效应的现场试验

**基金项目:** 浙江省自然科学基金资助项目(M503145); 国家西部交通建设科技项目(200231800004); 绍兴文理学院重点学科建设联合资助  
**收稿日期:** 2005-07-06

研究<sup>[19]</sup>，但加装采风口和透壁通风管路基室内试验尚未见公开报道。本文通过二级控温室内试验，以研究通风管类型、埋深以及采风速度等对通风管路降温效果的影响。

# 1 试验方案

## 1.1 试验装置

实验采用的试验装置主要由五个部分组成：控温试验箱、试样箱、控温、通风及测温等系统，如图 1 所示。控温试验箱分为固定的外箱体 1 号试验箱和可以沿道轨滑动的内箱体 2 号试验箱，两者都被设计成密封绝热箱体，每个箱体的一端都安装有能向左右两侧开启的大门，1 号试验箱用来控制 2 号试验箱的环境温度，试样箱顶面开口、侧面和底面绝热，其长宽高尺寸为 100 cm×60 cm×100 cm，试样箱在外面装好试样后通过道轨推入 2 号试验箱，关门密封后通过道轨再把 2 号试验箱推入到 1 号试验箱中，三箱体逐级相套。控温系统由电脑温控器、二台大功率的冻融循环压缩机及计算机等组成，通风系统由可调微型风扇、各类通风管和采风口等组成。测温系统由热敏电阻传感器、二台 DT500 型数据采集仪及计算机组成，每个热敏电阻传感器在实际测量前均被精确标定，传感器的精度为±0.05℃，数字风速仪的精度与所测风速有关，当风速处于 1.00~1.99 m/s 之间，其精度为±0.05 m/s，当风速处于 2.00~5.00 m/s 之间，精度为风速读数的±2% m/s。

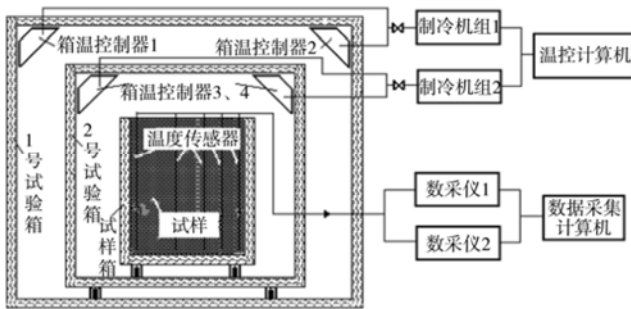


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

## 1.2 试验条件及试验过程

1 号试验箱用于 2 号试验箱的环境温度控制，以减少外界环境温度变化对试验的影响。试验时，1 号试验箱内温度控制在 0℃ 左右，为 2 号试验箱提供一个恒温环境，而 2 号试验箱用于试样箱的环境温度控制，也单独与一台制冷机相连，为模拟自然环境温度变化，其温度波动采用正弦变化，控温过程经人工设定后，由计算机自动控制，波幅为-25℃~25℃，波动周期为 24 h，试验循环数为 6，实验开始前 2 号箱系

统要恒温 24 h。试样箱内填装具有 10%左右含水量的天然砂土，试样箱填土过程中应不断对砂土进行筑实，通风管埋于一定深度，通风管为管壁无孔和有孔的钢管，有孔透壁钢管上开有孔径为 1 cm、孔距为 0.5 cm 的透气孔，通风管长 1 m、内直径 8 cm，通风管埋深位置分为距离试样箱顶面 33 cm、53 cm、73 cm 3 种，为避免砂土从小孔漏入管内引起堵塞，透壁通风管外侧要包裹一层钢丝网。

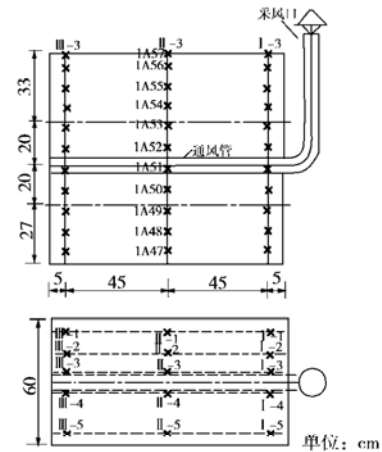


图 2 试验箱中传感器的立面、平面布置

Fig. 2 Distribution of thermistor sensors in the test box

图 2 为试样箱中电阻传感器的立面、平面布置情况。试验时，试样箱内砂土试样中共布置了 3 个测温剖面，即右 (I)、中 (II) 和左 (III) 3 个剖面，每个测温传感器的空间位置全部通过一个预先定制的拆卸式木框架精确给定，给定编号的传感器被固定在木框架的指定位置。另外，传感器 1A2 用于监测 1 号试验箱的箱体温度变化，传感器 1A1 用于监测 2 号试验箱中试样表面的实际温度变化。所有测温传感器都被连接到能自动定时采集数据的 DT500 型数据采集仪中，并与一台计算机相连，每隔 10 min 由计算机控制程序自动采集、存贮温度读数。利用本文介绍的实验装置，基于试样表面温度周期波动条件下，对不同试验情况的砂土试样进行了温度测量，分析了影响降温效果的主要因素。

# 2 试验结果与分析

为了研究通风管路基室内试验的温度场特征，主要选择某一测温点每一周期内的平均温度作为判别指标。在不同的试验条件下，通过对试样 3 个测温剖面平均温度变化的比较，初步掌握了通风管类型、风速等因素对路基降温效果的影响规律。

## 2.1 通风管路堤的降温效果

图 3 列举了试样箱中 II-3 位置上各测点（即沿深度方向的 11 个测点）的周平均温度随气温波动次数的

变化曲线,分为有通风管(图3(a))和无通风管(图3(b))两种情况,其中,通风管在整个气温波动期间全部通风。从图中可见,在经历第1、2次表面温度波动时,由于砂土试样的初始温度较高,试样表面和通风管中的空气温度相对较低,根据热传导原理,土体的降温幅度较大,特别是在通风管附近(埋深73 cm)的土体存在明显的降温现象,随着循环次数的增加,土体内的温度越来越低,但其降温幅度也逐渐减小,有通风管时接近于0℃,而无通风管时接近于1℃。总体上,随着表面气温的周期波动,有通风管路堤降温能力明显强于无通风管路堤降温能力,从保护冻土的角度来看,通风管路堤确实是一种有效的地温调控技术<sup>[15-22]</sup>。

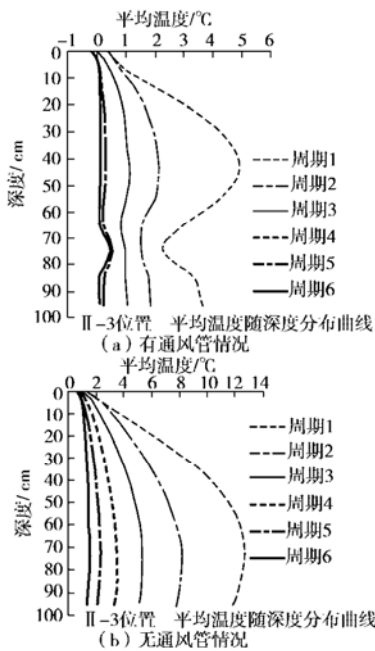


图3 通风管对路堤温度分布的影响

Fig. 3 Influence of ventilated pipe on temperature distribution in embankment

图4所示曲线为通风管只在负温期间通风的砂土试样沿深度方向平均温度随表面气温周期波动的变化情况。随着气温波动次数的增加,通风管附近(埋深53 cm)的土体温度下降幅度明显高于其它位置,其值远大于气温波动的平均值,并且,砂土试样通风管位置附近相当部分土样平均温度为负值。因此,只在气温波动到负温期间才通风的通风路堤降温效果非常明显。

再从图3(a)和(b)有、无通风管的路堤温度变化情况看,在第4、5、6次循环(这时,试样土体温度已接近气温波动的平均值)时,在通风管附近的土温反而略高于其它位置,有一个小的峰值,如图3(a),而在未埋设通风管的路堤试样中未发现此现象,

如图3(b)。这说明当路堤试样温度下降到气温波动的平均温度附近时通风管的降温效果已比较小,使通风管在正温期间通风所产生的增温效应也显现出来,将不利于路堤土体的降温。因此,实际工程应用中在正温期间应关闭采风口,以确保路堤具有较好的降温效果。

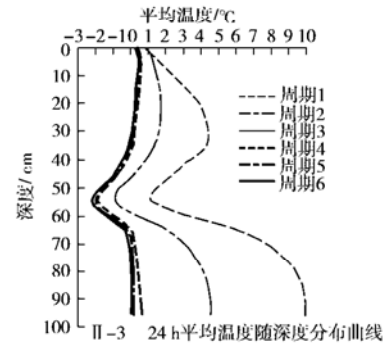


图4 负温期间通风对路堤温度分布的影响

Fig. 4 Influence of ventilation on temperature distribution in ventilated embankment under negative temperature

### 2.2 透壁通风管对路堤降温效果的影响

图5为透壁通风管和密封通风管路堤试样距离管壁1 cm(图5(a))和11 cm(图5(b))二个点的平均温度随气温波动次数的变化曲线。比较无通风管、透壁通风管正负温期间均通风和透壁通风管只在负温期间通风3种情况。在表面气温波动1个周期后,不同试验条件下两个点的平均温度都有不同程度的下降,其中,无通风管路堤试样降温最慢,正负温期间均通风的透壁通风管路堤试样次之,而只在负温期间通风的透壁通风管路堤试样降温效果最快。另外,对于相同试验条件,近管壁点的降温要比远管壁点的降温快,但随着循环次数的增加,不同试验条件的路堤试样降温有趋于重合的倾向,这是由于多次气温周期波动引起的通风管路堤降温效果使路堤试样的平均温度趋近于气温波动的平均温度值,由热传导产生的降温效果不再明显。从图中曲线可见,透壁通风管的砂土试样降温效果明显优于无通风管的路堤试样降温情况,试样砂土的平均温度值能更快降到气温波动的平均值,且出现平均温度为负值。

### 2.3 通风管对路堤温度场的影响范围

图6所示为试验第6天时砂土试样沿深度方向温度随时间变化的分布曲线,通风管管径8 cm、管壁有孔、采风速度为4.0 m/s,图6(a)的通风管埋深距试样表面为33 cm,图6(b)的通风管埋深距试样表面为73 cm,其它情况相同。由于通风管在正负温期间均通风,所以正温波动期间也存在增温现象。

为了有利于通过降低路堤本身温度来保护其下的

多年冻土层,路堤通风管埋深位置应接近于路基底部。由图6可知,当通风管埋深为33 cm时,路堤试样底部的温度高于气温波动的平均温度值,而当通风管埋深位置为73 cm时,路堤试样上部和底部的土体温度都能保持在气温的平均温度附近。另外,从图6所示2种情况的比较可见,通风管的径向影响范围均保持在30 cm左右,也即通风管壁外围12 cm左右。事实上,通风管对路堤温度场的影响范围主要是由试验箱内气温波动的振幅、路堤试样砂土的热扩散系数等决定。

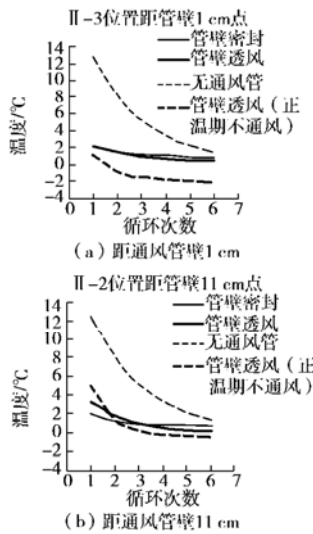


图5 透壁通风管对路堤降温效果的影响

Fig. 5 Influence of perforated ventilation pipe on the cooling effect of ventilated embankments

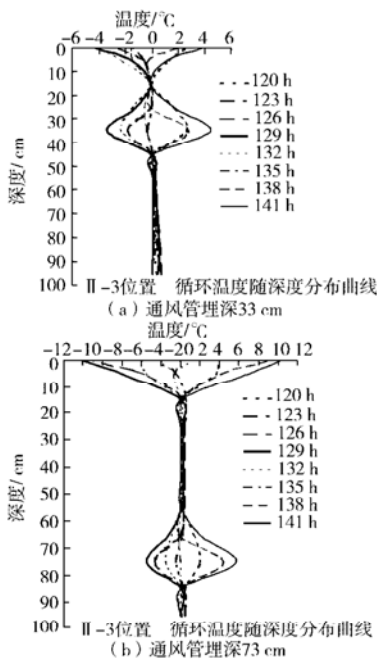


图6 通风管对路堤温度场的影响范围

Fig. 6 Influence of ventilated pipe on temperature field of embankments

### 2.4 通风方向对通风管路基温度场的影响

图7所示为路堤试样在第6次温度循环时沿通风管方向I-3、II-3和III-3三个位置的温度变化幅度随深度的变化曲线,I-3位于通风管进风口附近,II-3位于通风管中间,III-3位于通风管出风口附近,通风管为透气管壁,采风速度为4.0 m/s,通风管只在负半周气温波动期间通风。比较温度变化幅度曲线可得,砂土试样在通风管进风口附近的温度变化幅度以及负温区域的范围都明显大于出风口处,在通风管进风口附近负温区的最大径向距离达45 cm以上。这是由于刚进入通风管的空气温度较低,热传导效应明显,但随着热交换的进行,通风管出口处附近的空气温度将高于通风管进风口附近的空气温度,由此导致出风口附近的降温效果低于进风口处。这种温度变化的不均匀性,是形成路基温度场沿着风向方向不对称分布的重要原因。这种现象有可能造成甚至加重冻土路堤的阴阳坡现场,这需要在实际工程应用中引起注意。

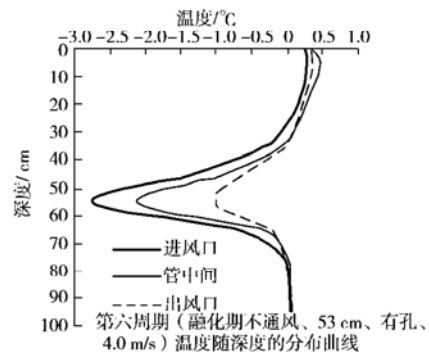


图7 通风方向对路堤温度分布的影响

Fig. 7 Influence of ventilated direction on temperature distribution of ventilated embankments

## 3 结 语

(1) 通风管路堤降温能力明显强于无通风管路堤的降温能力,而采用透壁通风管将使路堤的降温效果进一步加强。

(2) 正负温期间均通风的透壁通风管路堤降温效应要比只在负温期间通风的透壁通风管路堤降温效应弱,且正温期间通风将产生增温效应,因此,在实际工程应用中最好在正温期间关闭采风口,避免增温效应发生,以确保路堤具有较好的降温效果。

(3) 路堤在通风管进风口附近的温度变化幅度以及负温区域的范围都明显大于通风管出风口处,形成了路基温度场沿着风向方向的不对称分布,这种现象有可能造成甚至加重冻土路堤的阴阳坡,需要在实际应用时引起注意。

## 参考文献:

- [1] 张鲁新. 青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J]. 中国铁道科学, 2000, **21**(1): 37 - 47. (ZHANG Lu-xin. Regularity of ground temperature variation in Qinghai-Tibet Plateau permafrost region and its effect on subgrade stability[J]. China Railway Science, 2000, **21**(1): 37 - 47.)
- [2] 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. (CHENG Guo-dong. Influence of local factors on permafrost occurrence and their implication for Qinghai-Xizang railway design[J]. Science in China (Series D), 2003, **33**(6): 602 - 607.)
- [3] 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 Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 578 - 587.)
- [4] 王铁行, 胡长顺, 李宁, 等. 青藏高原多年冻土地区实际边界浅层土体温度场数值分析[J]. 中国科学(E辑), 2003, **33**(7): 655 - 662. (WANG Tie-hang, HU Chang-shun, LI Ning, et al. Numerical analysis of ground temperature in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series E), 2003, **33**(7): 655 - 662.)
- [5] WU Q, ZHU Y, LIU Y. Evaluation model of permafrost thermal stability and thawing sensibility under engineering activity[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, **34**: 19 - 30.
- [6] GOERING D J, INSTANES A, KNUDSEN S. Winter-time convection in open-graded embankments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, **24**: 57 - 74.
- [7] SUN B X, XU X Z, LAI Y M, et al. Experimental researches of thermal diffusivity and conductivity in embankment ballast under periodically fluctuating temperature[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **38**(2/3): 219 - 227.
- [8] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 温度周期波动时自然对流对块石导热系数测定的影响[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(1): 99 - 103. (SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, et al. Influence of natural convection on determining thermal conductivity of ballast under periodically fluctuating temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, **37**(1): 99 - 103.)
- [9] 孙斌祥, 徐学祖, 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. (SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, 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.)
- [10] SUN B X, XU X Z, LAI Y M, et al. Evaluation of fractured rock layer heights in ballast railway embankment based on cooling effect of natural convection in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, **42**: 120 - 144.
- [11] SUN B X, XU X Z, LAI Y M, et al. Mechanism of evolution on winter-time natural convection cooling effect of fractured-rock embankment in permafrost regions[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(23): 2744 - 2754.
- [12] 徐学祖, 孙斌祥, 李东庆, 等. 边界温度周期波动条件下块石中的温度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 91 - 95. (XU Xue-zu, SUN Bin-xiang, LI Dong-qing, et al. Changing laws of temperature in ballasts under periodic fluctuation of boundary temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 91 - 95.)
- [13] CUI Guang-xin. Application of natural cold to maintain the environment in cold area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(S): 231 - 236.
- [14] 徐学燕, 仲丛利. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 - 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 77 - 81.)
- [15] YU W B, LAI Y M, ZHANG X F, et al. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions[J]. Cold Regions Science Technology, 2004, **38**(1): 31 - 42.
- [16] LAI Y, WANG Q, NIU F, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science Technology, 2004, **38**(2/3): 165 - 184.
- [17] SU B, LI N, QUAN X. The numerical study on the ventilated embankment in permafrost regions in Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science Technology, 2004, **38**(2/3): 229 - 238.
- [18] 刘志强, 赖远明. 对青藏铁路部分路段通风路基温度场的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2004, **81**(1): 39 - 43. (LIU Zhi-qing, LAI Yuan-ming. Numerical analysis of temperature field in sections of ventilation subgrade on Qinghai-Tibet Railway line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, **81**(1): 39 - 43.)
- [19] 胡明鉴, 王稔, 孔令伟, 等. 青藏铁路透壁通风管通路基模型试验及初始温度场特征[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 582 -

- 586.(HU Ming-jian, WANG Ren, KONG Ling-wei, et al. Simulated experiment of the embankment with perforated ventilation pipes and the features of its initial temperature field of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 6(5):582 - 586.)
- [20] 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 Wen-bing, LAI Yuan-ming, 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.)
- [21] 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.)
- [22] 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.(NIU Fu-jun, CHENG Guo-dong, LAI Yuan-ming. Laboratory study on ventilation duct roadbed of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2002,24(3):1 - 6.)

## 关于召开2006年全国公路岩土与公路工程地质技术研讨会的 通 知

随着我国公路建设的发展,公路岩土工程技术得到了迅速提高并积累了丰富的经验,同时也出现许多新的公路岩土与工程地质方面的技术问题。中国公路学会工程地质分会将于11月份主办学术研讨会,对我国近年来在岩土工程领域的技术、经验、存在的问题及最新技术研究进展进行广泛的研讨交流。会议由中国公路技术网承办,会议具体安排如下:

### 一、会议时间和地点

(1) 时间: 2006年11月10日——11月11日, 11月9日全天报到。

(2) 地点: 广西·桂林(待收到回执后,再通知具体的会议地点与时间)

### 二、会议议题

- (1) 公路隧道岩土技术;
- (2) 公路边坡新技术;
- (3) 公路减灾;
- (4) 公路环境岩土技术;
- (5) 公路岩土工程中的新技术与新材料;
- (6) 公路工程勘察新技术新方法应用。

### 三、会议议程

- (1) 开幕式;
- (2) 专家、学者就会议议题做专题报告;
- (3) 公路岩土工程技术经验交流研讨;
- (4) 公路岩土工程新技术、新方法交流研讨;

(5) 公路岩土新技术新材料,工程勘察新方法新技术展示。

### 四、参会人员

(1) 各省、市、直辖市公路(高速公路)管理部门主管技术工作的领导及工程师、高速公路管理局(公司)主管技术工作的领导及工程师;

(2) 各公路交通设计院、科研院领导及相关技术人员;

(3) 各省质量监督部门的相关技术人员;

(4) 全国相关公路岩土及勘察技术人员;

(5) 全国相关公路工程监理、施工单位技术人员;

### 五、报名方式

请参会者将报名回执单(回执单见附件1)传真或E-mail至大会承办单位。

具体联系方式如下:

地址: 北京市中关村南大街17号韦伯时代中心C座2208。

联系人: 刘欣红、刘芳。

联系电话: 010-88579539, 13146835262。

传真: 010-88579550。

邮编: 100081。

E-mail: hy@ch7918.com。

会议查询网址: 中国公路技术网<http://www.ch7918.com>。

### 六、会议费用

会议注册费1100元/人,食宿由组委会统一安排,费用自理。

(中国公路技术网 供稿)