

多年冻土区道碴 通风管结构铁路路基室内试验研究

Laboratory experiment study on the ballast and ventilated railway embankment in permafrost regions

喻文兵, 赖远明, 张学富, 肖建章

(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: 分析了路基典型部位的温度随时间的变化情况以及整个路基中 2 个典型断面的温度场特征。结果表明: 沿着风向方向, 路基温度场呈不对称分布; 通过通风管中心的断面和位于两根通风管中间的断面温度场在同一时刻相似; 随着时间的推移, 路基土体的温度有明显的降低, 最大融化深度在逐渐减小, 说明通风管结构形式能有效地为路基提供冷能, 维持路基的稳定。

关键词: 多年冻土; 道碴; 通风管; 路基

中图分类号: TU 475. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2003) 04- 0436- 05

作者简介: 喻文兵(1973-), 男, 重庆永川人, 1998 年毕业于兰州大学地质系, 博士研究生, 从事寒区工程与冻土力学学习研究工作。

YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, XIAO Jian-zhang

(State Key Lab. of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This paper introduces the laboratory experimental results of the ballast and ventilated duct of railway embankment in permafrost regions. Results show that the temperature of the embankment soil mass goes down and the biggest thawing depth reduces gradually as time goes by, which proves that the combining railway embankment structure of ballast and ventilated duct can supply cold energy for the embankment soil mass and protect the permafrost underlying it, and further maintain the stability of the railway embankment.

Key words: permafrost; ballast; ventilated duct; embankment

0 引言*

冻土区路基普遍存在严重的病害: 冻胀、裂缝、路面翻浆、冒泥、路肩滑塌和路面沉陷等, 给道路运营带来困难。调查表明青藏高原多年冻土区公路路基病害, 80% 以上是由于路基下部多年冻土的热融沉陷引起^[1], 俄罗斯贝阿铁路约 1/3 的路段产生病害, 其中不均匀沉降约占 20%。路基本体的水热状态直接影响着下部多年冻土的热状况, 进而影响路基的稳定。目前, 针对多年冻土路基稳定性的研究, 研究人员做了较多工作^[2~4]。

随着西部开发的推进, 高原多年冻土区的道路工程建设将越来越多。正在建设的青藏铁路格拉段, 地处青藏高原腹地, 全线海拔高度大于 4000 m 的地段 965 km, 经过连续多年冻土地段 550 km, 是目前世界上穿越高原、高寒、缺氧及连续多年冻土地区的最长的铁路, 冻土问题是影响铁路建设和安全运营的首要因素。本研究旨在根据青藏高原多年冻土区的气候、路基填土特征, 进行道碴通风管路结构形式的室内模型试验, 这对高原多年冻土区的铁路建设及维护有重要的借鉴意义。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验装置由 4 部分组成: 模型试验箱为一 8 m × 1.84 m × 2.7 m 的保温箱, 箱体采用 10 cm 厚的冷库保

温板; 控温系统由 7.5 kW 的 SANYO 双头压缩机组、电脑温控器(分辨率 0.1 °C, 精度 ±0.3 °C)、氟利昂液体循环的管道、蒸发器及温度传感器组成; 控温过程经人工设定后, 由电脑温控器自动控制。系统控温范围为 -60~50 °C; 通风系(统由冷却风扇、加速风机、风速调节装置、回流风道等组成, 风向平行于箱体的长度方向, 与通风管的走向一致; 观测系统由温度传感器、风速仪 JT500 型数采仪及计算机组成。

1.2 试验条件

试验控制温度函数为 $T = -3.5 + 12\sin(\frac{2\pi}{15}\tau)$ 。一个试验周期为 15 d, 其中冻结期 8.9 d, 融化期 6.1 d。

控制风速为常风速, 通风管进风口端风速为 3.20 m/s, 出口端为 2.37 m/s, 路基顶部风速为 2.50 m/s。

路基填土采用与青藏铁路风火山现场路基试验段路基填土颗粒级配相似的砾砂。不均匀系数 $C_u > 5$, 粒径大于 2 mm 的颗粒含量在 35% 与 42% 之间。压实后的含水率为 8.6%, 干密度为 1.86 g/cm³。

道碴层厚 30 cm, 为铁路标准道碴, 粒径尺寸 4~10.5 cm, 平均粒径 6.68 cm, 孔隙率 46%。

试验根据近似相似理论进行, 控制方程采用二维

* 基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(40225001); 中科院百人计划项目(A 类)

收稿日期: 2002- 10- 07

瞬态带相变的热传导方程。温度边界、风速边界及土质参数的相似常数都取1,时间常数 $C_t = 24$, 几何常数 $C_l = 4.9$,路基高1.00 m,底部长5.13 m,顶部长2.13 m,宽1.84 m,坡度1:1.5。通风管为6根钢管,位于路基中部,管间距为两倍管径。每根长3.80 m,内径10.3 cm,外径11.5 cm。路基本部和侧边为隔热边界。

1.3 通风管及温度测点布置

通风管布置见图1(a)。温度观测断面有2个:一个断面通过通风管的中心轴(中轴断面),见图1(b),另一断面位于两根通风管之间(管间断面);在路基表面及距离表面40 cm的位置布置了13个温度传感器,在箱体底部及侧边布置了5个温度传感器(图1(a))。

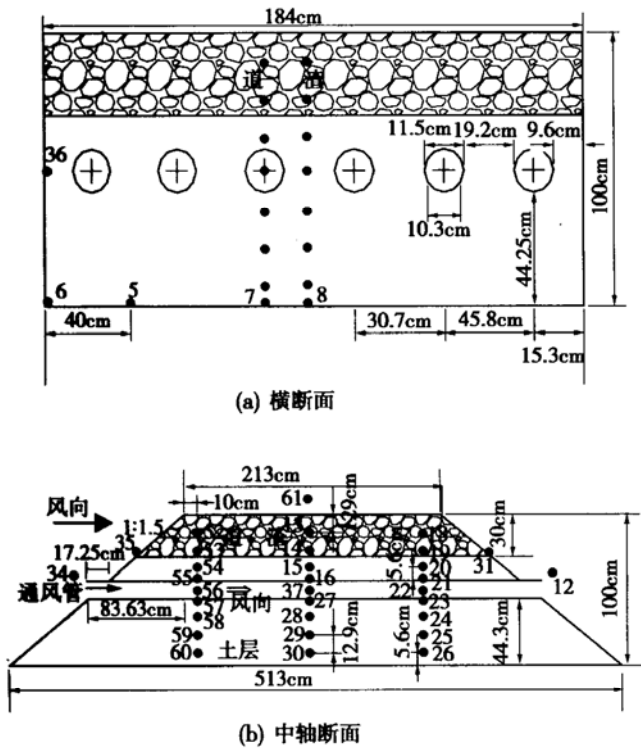


图1 断面及温度测点分布

Fig.1 Sections of embankment and arrangement of temperature sensor

2 试验结果及分析

试验进行了3个周期,45 d。选取每个周期内的3个时间点的数据进行分析。温度场选取中轴断面和管间断面;同时绘制了特殊部位点温度随时间的变化曲线(见图2~4)。曲线0表示控制温度,其峰值为-15.5℃和+8.5℃;曲线34为路基进风口端的气温;曲线61表示路基顶部的气温;而曲线12表示的是路基出风口端的气温。路基进风端和顶部位置的气温与控制温度相近,而出风口端则与它们相差很大,且路基在这3个部位的温度峰值在试验的不同时期也不同(见表1)。

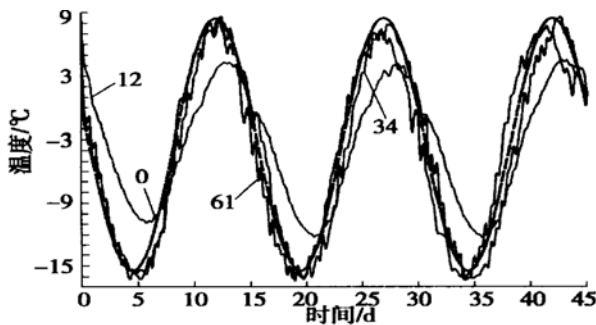


图2 路基环境温度与控制温度间的关系

Fig.2 Environmental temperature of embankment and the controlled temperature

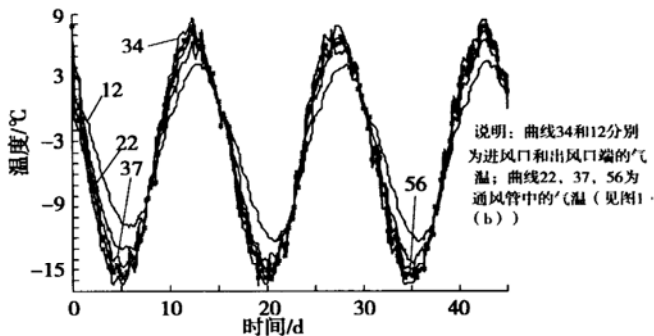


图3 通风管中温度与进风口和出风口端温度的关系

Fig.3 Air temperature in ventilated duct and the environmental temperature of embankment

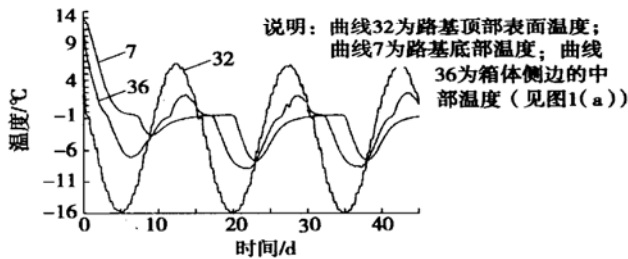


图4 路基顶部气温与箱体边缘温度关系

Fig.4 Temperature at the top and edges of embankment

表1 气温峰值

Table 1 Peak of air temperature (°C)

周期	曲线0	曲线12	曲线61	曲线34
1	-15.5, +8.5	-10.9, +4.3	-15.8, +8.4	-16.3, +8.4
2	-15.5, +8.5	-12.3, +4.2	-16.1, +7.3	-16.3, +7.9
3	-15.5, +8.5	-12.2, +4.5	-16.2, +7.7	-16.3, +8.2

因为进风口端和顶部的气温与控制温度间很相近,所以他们能够反映试验温度的控制效果。从表1看到:曲线61和34的正温峰值低于控制温度,而负温的峰值却超过了控制温度。从整个温度曲线变化的趋势看,试验路基的环境温度达到了按正弦曲线波动的要求。另外,从时间方面看:顶部位置和进风端的温度峰值几乎是同时出现的,但出风口端与之差异很大,存在明显滞后,正温峰值平均滞后6 h,负温峰值平均滞后18.6 h。

从图3看出:通风管中的曲线22,37,56的温度变

化趋势与路基进风端的变化趋势是一致的,都以简谐波的形式变化。在冻结期降温阶段,通风管中的温度比路基进风口端的气温高,这是由于在这个期间土体的温度较高,而进入通风管中的空气温度较低,这种状态下,土体对空气进行加热,热量从土体传向通风管,通过空气的流动,带走了路基土体里的热量,降低土体内部的温度,有利于冻土的保护;同时,通风管中的温度又低于出风口端的气温,这是由于出风口端的风速比较小,对调控温度响应缓慢的结果。在冻结期的升温阶段,空气温度与通风管中的温度差别很小,这是因为在这一阶段土体和进入通风管中的温度值相差较小,它们之间的对流换热作用很弱,于是进入通风管中的温度就没有发生明显的变化。在融化期的升温阶段,通风管中的温度比空气的温度低,这是由于在这一时期,土体的温度低,而空气的温度高,这时,反而是空气对土体加热,空气的热量传向土体,于是通风管中的温度降低,而路基土体温度升高,这对冻土的保护不利;在融化期的降温阶段,通风管中的温度与路基顶部气温的差别甚微,这是由于这个阶段土体对通风管的降温强度降低,且时间较短的缘故。同时还看到:在冻结期的降温阶段,在同一时刻通风管中各点的温度沿着风向在逐渐升高,在接近峰值的时候差别最大;在冻结期升温阶段各点的温度在同一时刻差别甚微。在融化期的升温阶段,通风管中各点的温度在同一时刻是逐渐降低的,在接近峰值时,差别最大;在融化期降温阶段,各点温度差别不明显,这与冻结期的特点相反。

对图 3 的分析看到:通风管中的温度变化介于进风口端和出风口端之间。通风管中的温度沿风向分布是不均匀的,通风管前部比后部温度高时,其温差最大达到 2.3°C ,当通风管前部比后部温度低时,其温差最大达到 3.5°C :这是通风管与土体发生热交换的结果。这种不均匀的分布特征与整个路基土体温度沿风向不均匀分布的特征是一致的。

从图 4 可以看出:路基侧边上曲线 36 和路基底部曲线 7 的温度变化曲线在接近 0°C 时,曲线的斜率变得很小,温度值变化非常缓慢,曲线 7 表现得特别明显,且它具有降温快,升温缓慢的特点,这与路基顶部的气温(曲线 32)的变化规律不同。从整体来看曲线 36 的温度变化趋势与曲线 32 的气温变化趋势一致,但存在滞后现象。曲线 7 的温度变化趋势与曲线 32 的变化趋势不一致。在试验进行约 5.42 d,气温达到最低负温,点 7 的温度开始降为负值,并始终处于 0°C 以下。这说明在经过半个冻结期后路基底部中心部位土体便始终处于冻结状态。路基底部的最低温度为 -7.6°C ,比路基顶部表面的最低温度值 -15.9°C 高 8.3°C ,且时

间滞后 2.75 d。以上分析表明:在土体中温度向 0°C 接近时,其变化过程比较缓慢,越是远离路基表面,这种规律越明显:这是土体中发生相变的结果;同时,距离路基表面越近,其温度变化受空气温度变化的影响就越明显,其变化趋势也就越相似,且响应速度也越快。

图 5 表明:模型路基修筑好以后,初始温度场是不均匀的,在顶端表面和进风口端的温度低,而在断面的出风口端及路基中心部位较高。路基最高温度约 15.0°C ,最低约 6.5°C 。

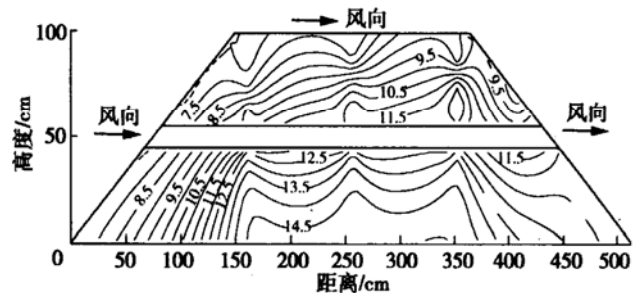


图 5 初始温度场

Fig. 5 Initial temperature field

图 6~8 是 3 个试验周期内同一断面的温度场。从温度场纵向变化过程中可看出路基温度场随时间变化情况,道碴、通风管结构路基对保护冻土路基的效果。

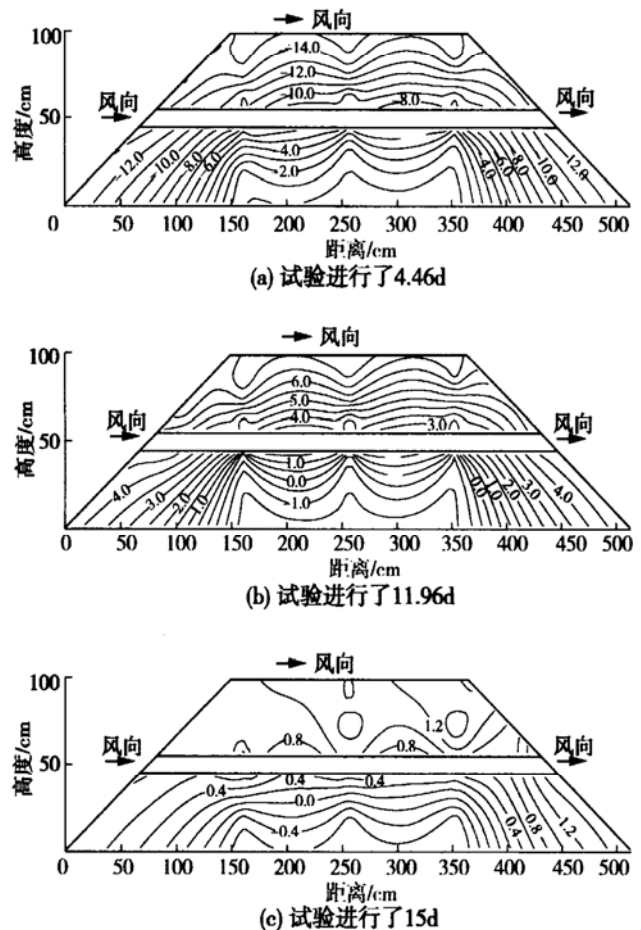


图 6 第一个试验周期内中轴断面温度场

Fig. 6 Temperature fields of center axis section in the 1st period

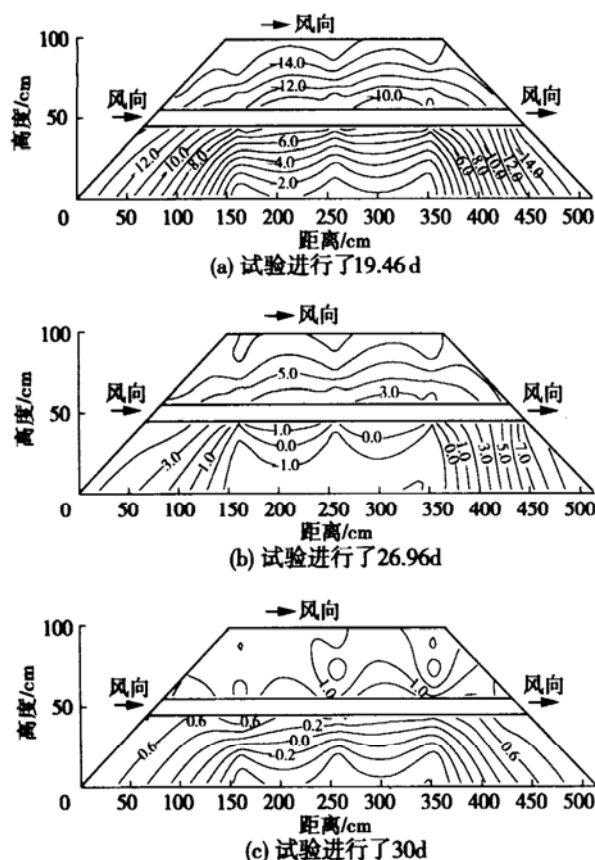


图7 第二个周期内中轴断面温度场

Fig. 7 Temperature fields of center axis section in the 2nd period

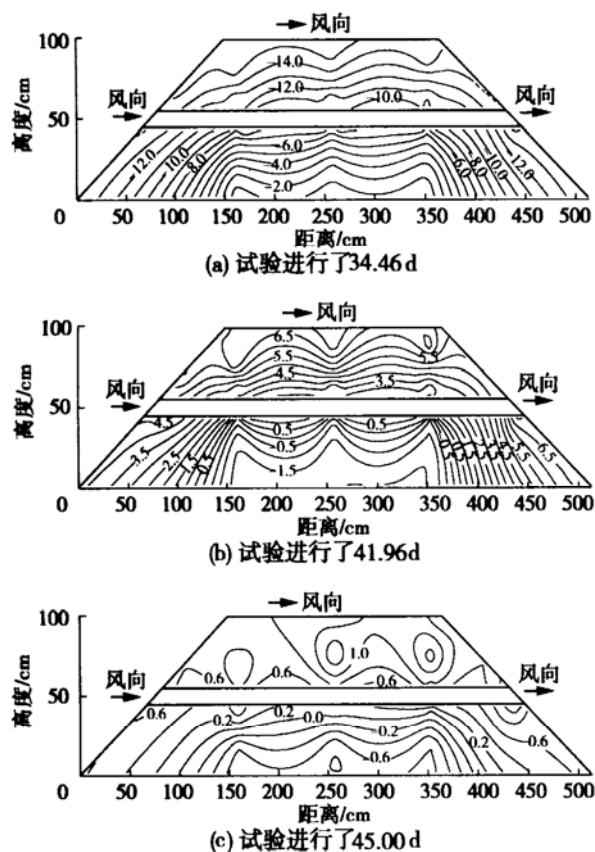


图8 第三个周期内中轴断面温度场

Fig. 8 Temperature fields of center axis section in the 3rd period

图6(a)是试验进行了4.46d时的温度场(第一个最低气温时),此时环境温度最低。路基的最低温度约为 -16.0°C ,图中可看到一个偏心融化盘,中心线的右边低,左边高。 0°C 等温线与路基中轴的交点坐标为22.0cm。沿风向方向, 0°C 等温线逐渐升高,其最高点距路基底部为22.0cm,融化盘的横向距离为208.0cm。

图6(b)是试验进行了11.96d时的温度场(第一个最高气温时),此时环境温度最高。路基的最低温度为 -2.0°C ,路基中有一明显的冻土核,根据实测数据, 0°C 等温线左边的最高点纵坐标为37.3cm,与路基中轴的交点为40.7cm,右边最高点为42.3cm,冻土核的水平距离为246.7cm。

图6(c)是试验进行15d时的温度场(第一个融化期结束),此时融化期已结束,冻土融化达到最大深度。与图6(b)相比冻土核缩小了很多, 0°C 等温线左边最高点坐标为26.7cm,与路基中轴的交点坐标为33.3cm,右边最高点为36.7cm,冻土核的水平距离为283.3cm。

图7(a)是第二个周期最冷时候的温度场(第二个最低气温时),试验进行了19.46d,与第一个周期同一时刻的图6(a)相比路基整体的温度很相似,最低温度也为 -16.0°C ,但是路基中心的融化盘已经消失,整个土体都已经处于冻结状态。这说明在经历一个周期后,道碴通风管结构已经开始为路基提供冷能,发挥了降低路基温度,保证冻土路基稳定的作用。

图7(b)是试验进行了26.96d时的温度场(第二个最高气温时),与第一个周期同一时刻的图6(b)比较,冻土核面积有所扩大。根据实测数据, 0°C 等温线左边最高点纵坐标为43.0cm,与路基中线的交点为51.7cm,右边最高点为54.0cm。这分别比图6(b)增加了5.7,11.0,11.7cm。冻土核水平距离为252cm,比图6(b)增加了5.3cm,从整个冻土核的发展来看,冻土核比第一个周期内的同一时刻发展扩大了,这对保护路基的稳定是有利的。

图7(c)为第二个周期融化结束时的温度场(第二个融化期结束时),历时30d,与图7(b)比较看出,冻土核缩小了很多,但与第一个周期同一时刻的图6(c)相比,可以看出冻土核有所扩大。 0°C 等温线左边最高点纵坐标为26.9cm,与路基中线的交点为36.0cm,右边最高点为38.0cm。这分别比图6(c)增加了0.2,2.7,1.3cm。冻土核水平距离为296.0cm,比图6(c)相比增加了12.7cm,这进一步说明了道碴通风管结构能为路基提供冷能,冷却路基。

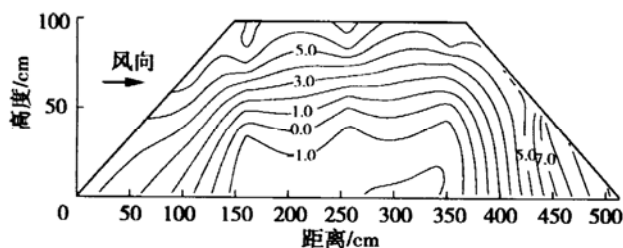
图8(a)是第三个周期环境温度最低时的温度场(第三个最低气温时),历时了34.46d。路基最低温度

也为 -16.0°C ,整个温度分布与前两个周期的同一时刻的图 6(a) 和图 7(a) 相似,但就 -2.0°C 的等温线来看,这个时刻的 -2.0°C 的等温线比图 7(a) 下移了,这说明路基中心部位的温度比前两个周期的同一时刻都低,道碴、通风管结构继续发挥着提供冷能的作用。

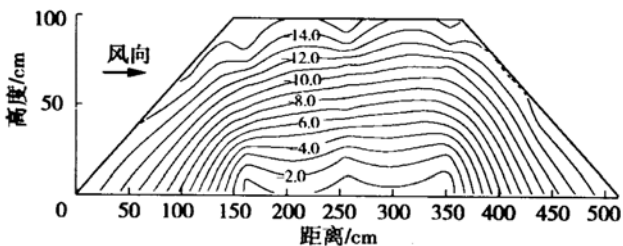
图 8(b) 是试验进行了 41.96 d 时的温度场(第三个气温最高时),同样与前两个周期同一时刻的图 6(b) 和图 7(b) 相比可以看到,冻土核比它们都大。 0°C 等温线左边最高点纵坐标为 46.7 cm,与路基中线的交点为 51.7 cm,右边最高点为 55.0 cm。这分别比图 7(b) 增加了 3.7, 0.0, 1.0 cm。冻土核水平距离为 260.0 cm,与图 7(b) 比增加了 8.0 cm。

图 8(c) 是第三个融化期结束时的温度场(第三个融化期结束时),历时 45 d,与图 6(c) 和 7(c) 相比可以看到冻土核发展了, 0°C 等温线左边最高点纵坐标为 28.8 cm,与路基中线的交点为 38.8 cm,右边最高点为 41.6 cm。这分别比图 7(c) 增加了 1.9, 2.8, 3.6 cm; 比图 6(c) 增加了 2.1, 5.5, 4.9 cm。冻土核水平距离为 312.0 cm,比图 7(c) 相比增加了 16.0 cm; 比图 6(c) 增加了 28.7 cm。

图 9 是管间断面在不同时刻的温度场。图 9(a) 与图 7(c)、图 9(b) 和图 8(a) 对比可以看到:通过通风管的断面和两根通风管中间断面的温度场在同一时刻非常相似,这说明在试验路基的横断面上,路基的温度分布是均一的。为节省篇幅,只选择 2 个时刻进行对比。



(a) 试验进行了 30d



(b) 试验进行了 34.46d

图 9 管间断面温度场

Fig. 9 Temperature field of the section between two ducts
通过对三个试验周期内不同时期路基温度场的对

比分析可以看到,随着时间的推移,每个周期比前一周期同一时刻的冻土温度都要低,冻土保持了稳定,并且在不断地发展。这说明道碴、通风管结构路基对冻土的制冷作用是明显有效的,能有效地降低冻土路基温度,保持路基下覆的多年冻土的稳定,保证冻土路基的稳定,对多年冻土区高温冻土地段的路基建设具有重要意义。另外,从所有的温度场图上可以看到,沿着风向,路基的温度分布是不对称的,在路基的表面表现得比较明显,越向路基中心靠近,这种温度分布的不对称性在减弱。在实体工程应用中应该注意这种现象。另外,其它路基结构形式的试验也应该进行,以比较各种路基结构形式的优劣。

3 结论和讨论

本文利用室内模型试验预测了多年冻土区道碴、通风管结构铁路路基在修筑以后的温度场发展变化情况。试验结果表明:试验对变温条件的控制是成功的;路基环境温度的不均匀、风速的不均匀和通风管中温度分布的不均匀,使得路基土体的温度场在沿风向上呈不对称分布的特征,这是实际应用中要注意的问题;通风管中心的断面和位于两根通风管中间断面的温度场在同一时刻非常相似,这说明在路基的横断面上温度分布是均一的;道碴、通风管路基结构形式能够有效地为路基土提供冷能,发挥保护冻土,维护冻土路基稳定性的作用,可以将其作为高原多年冻土区一种有效地保护冻土的路基结构形式。

本试验是在底部和侧边为隔热条件下进行的,这与实际情况有差异,但仍可以预测到通风管结构保护冻土的效果,可以证明这种路基结构在高原多年冻土区的可行性,其具体的设计参数(通风管的几何尺寸、最佳间距、最佳铺设位置等)有待进一步的对比试验和数值模拟计算来解决。

参考文献:

- [1] 刘永智,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.
- [2] Lai Yueming, et al. Cooling effect of ripped stone embankments on Qing-Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598-604.
- [3] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地区路基沉降研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 155-158.
- [4] 王绍令,等. 青藏公路多年冻土段沥青路面热量平衡及路基稳定性研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 111-118.