

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.001

## 深季节冻土区涵洞热状况分析

汪江红<sup>1</sup>, 牛永红<sup>2</sup>, 慕青松<sup>1</sup>, 牛富俊<sup>2</sup>, 李蒙蒙<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室; 土木工程与力学学院, 兰州 730000;  
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, 兰州 730000)

**摘要:**为分析深季节冻土区涵洞对路基及其下地基热状况的影响,建立了涵洞温度场计算模型,基于已有的试验涵洞监测数据,对比分析了所建模型的可靠性,再在该模型基础上,通过改变材料参数和模型尺寸,进行不同情况下的数值计算。结果表明:模拟季节冻土区涵洞温度场时,需要充分考虑热对流效果,忽略填土热对流效果是不合适的,考虑热对流效果的模型在定性和定量上均与现场监测情况一致;在季节性冻土区涵洞设计工作中,应该采取一些积极措施避免或减少对流传热对涵底冻深发展的影响;涵底最大冻结深度随着含水量呈三段式的变化规律:随其增大先减小,后减小速度变缓甚至冻深略有增加,最后又趋于减小;寒区涵洞内径的尺寸对涵底冻结深度方面的影响较大,而净高对涵底冻结深度方面的影响很小,可以不考虑。

**关键词:**深季节冻土;涵洞;温度分布;模拟计算

**中图分类号:**TU445;U24 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)05-0001-10

## Thermal Conditions of Culvert in Deep Seasonally Frozen Region

Wang Jianghong<sup>1</sup>, Niu Yonghong<sup>2</sup>, Mu Qingsong<sup>1</sup>, Niu Fujun<sup>2</sup>, Li Mengmeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education of China; College of Civil Engineer and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;  
2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the impact of culvert on the roadbed-culvert transition section in deep seasonally frozen region, a finite element model was established to simulate culvert's temperature fields considering latent heat, and judged the reliability through comparing the simulation results with the existing monitoring data. Models of different parameters or different sizes were stimulated to investigate the influence on the maximum frozen depth. The results indicate that: 1) The measured temperatures and simulated temperatures agree well which demonstrated the accuracy of the numerical model. 2) In the design of culvert in seasonally frozen region, foundation convection under the culvert in cold season could not be ignored. Some active measures should be taken to protect the subsoil from the effect of convective heat transfer. 3) The culvert maximum frozen depth changing with the amount of water content is divided into three steps. At first, it decreased with increasing water content. And then, the reduction got slow, even the frozen depth increased slightly. At last, it decreased again; 4) The diameter of culvert greatly

收稿日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金(41071045);铁道部科技研究开发计划项目(Z2012-062);冻土工程国家重点实验室自主立项课题(SKLFSE-ZY-15)

作者简介:汪江红(1988-),男,主要从事热力学、岩土工程方面研究,(E-mail)wjh-2008-ok@163.com。

牛永红(通信作者),男,博士,副研究员,(E-mail)yhniu@lzb.ac.cn。

affected the maximum frozen depth, while the size of clear height had little effect on it. Diameter is priority for the requirements of strength, stability, functionality, etc. and the clear height could be considered at last.

**Key words:** seasonally frozen ground; culverts; temperature distribution; simulated calculation

寒区涵洞建设是路基工程中必不可少的一部分,它的设置改善了冻土地区路基横向排水条件,优化了交通路线,但同时也改变了路基原有的水、热平衡状态,对路基的热稳定性有一定的影响。到目前为止,针对多年冻土区涵洞对路基热稳定性的影响,很多学者展开了研究,也取得了很多成果:俄罗斯专家 Passek 等综合运用数值模拟和现场观测方法,研究了大口径波纹管涵在道路工程中的应用;Kunitake 等<sup>[1]</sup>采用三维温度场的有限元法对一混凝土箱涵进行了数值模拟;王凯等<sup>[2]</sup>针对青藏铁路自身所处的特殊自然条件,对涵节预制、涵节运输、涵洞基础施工和涵节现场拼装等技术作了技术改进,克服了现浇涵洞中所遇到的一些困难缺点;吴少海等<sup>[3]</sup>根据青藏公路涵洞的经验,结合青藏铁路的特点,提出了适合多年冻土区的桥涵结构、支座类型、墩台结构形式、基础类型、混凝土材料及其施工方案;张学富等<sup>[4]</sup>通过对青藏铁路某处涵洞现浇混凝土基础水化热进行数值分析,发现现浇混凝土水化热对涵洞周围冻土的热状况有较大影响,并计算分析了在涵底基础下铺设保温层时冻土热状况;张旭芝<sup>[5]</sup>通过对青藏铁路沱沱河试验段两座试验涵洞进行地温现场监测和对观测数据的分析,研究了适合青藏高原特殊施工环境的涵洞施工工艺、最佳施工季节、施工对多年冻土的影响以及沿涵洞轴向多年冻土上限的变化特征;孙文等<sup>[6]</sup>运用渗流理论和传热学理论,计算并讨论了渗流对涵洞地基温度场的影响以及涵洞对路基热稳定性的影响。由于早期季节冻土区工程经验不足,因此有关季节冻土区涵洞对路基热稳定性的影响研究不多。

哈尔滨—大连高速铁路(简称“哈大高铁”)是我国在严寒地区设计、建造的第一条铁路客运专线,该线穿越东北地区中部山前平原,处于中—深季节冻土区,随着它的建成通车,为铁路建设提供了大量宝贵的资料和经验,基于此,许健等<sup>[7]</sup>运用数值方法模拟分析了季节冻土区保温路基设计参数;Liu 等<sup>[8]</sup>分析了季节性冻融路堤和地基不同的温度变化过程,牛富俊等<sup>[9]</sup>对哈大高铁某涵洞的路涵过渡段路基土体的冻结特征展开监测,并分析了路涵过渡段路基及其下地基土的冻结特征和时空变化过程及其对路基稳定性的影响,取得了一定的成果,但对于季节冻土区涵洞的研究还可以更加深入。

本文以哈大高铁典型涵洞为原型,以热学理论为基础,建立了季节冻土区涵洞的温度场计算模型,并与监测数据进行对比分析该模型的可靠性,通过改变参数和尺寸,对不同模型进行数值计算,分析了冷季涵底基础的对流效果、地基土含水量和涵洞尺寸对最大冻结深度发展的影响,对深季节冻土区涵洞工程建设和维护具有实际意义。

## 1 试验涵洞概况

哈大客运专线涵洞防冻胀试验研究试验场地位于吉林省中西部的公主岭市西北郊范家屯附近,海拔 204 m,属于温带半湿润季风气候,其特点为:冬冷夏热,温度、雨量、光照等季节性变化显著,春季干旱多大风,回暖迅速;夏季热而多雨;秋季温暖多晴朗天气;冬季漫长而寒冷。年平均气温 5.6℃。据气象资料及现场监测的天然场地冻结深度变化数据显示,最大冻结深度为 1.56 m。

现场试验涵洞设计里程为 DK673+820,是 1 孔 2.0 m 的钢筋混凝土箱型涵。该涵为排地表水而设,与线路正交。上下游均采用标准铺砌,翼墙采用直径  $\phi 12$  mm、间距 15 cm 的护面钢筋,基础底地基处理方法同相邻路基处理。上游侧路基边坡上设置简易检查梯一座。

试验涵洞处的底层岩性特征为:

黏质黄土:厚 5~16 m,分布于地表,软塑为主,局部硬塑,Ⅲ级硬土。

粗砂:厚 1.0~3.0 m,透镜状分布于黏质黄土之下,中密,饱和,Ⅰ级松土。

泥岩夹砂岩:成岩作用差,全风化泥岩岩芯呈泥柱状、土状,强风化泥岩岩芯呈块状、碎石状、短柱状,锤击易碎,风化层厚度大于 10 m,Ⅲ级硬土,弱风化,泥岩为主,泥质胶结,Ⅳ级软石,为极软岩,泥岩具有弱膨胀性。

地下水位埋深 1~4 m,地下水对混凝土不具有侵蚀性,监测资料显示,地下水位在 3 到 4 月份保持在最低值,之后随降水量的增加逐渐上升,到次年 7~8 月降水量最大时达到最高位,然后降水量的减少而缓慢下降,并保持水位在 1 m 以内到 11 月底,之后,降水量很小,地下水位迅速下降,并于 3 月初达到最低值。

试验涵洞段的路堤表层上是厚 0.1 m 的强化基底表层混凝土、其下是 0.65 m 的级配碎石砂砾土、1.00 m 的非冻胀性 A/B 组填料、1.30 m 的普通 A/B 组填料、基床以下路堤是 1.66 m 的普通 A/B/C 组填料,再下面是 0.50 m 的褥垫层和黏质黄土地

基。路涵过渡段路基采用的是一段式过渡,涵洞高 2.50 m,涵侧混凝土壁厚 0.22 m,涵顶和涵底厚 0.28 m,涵身以下设置了厚 1.02 m 的涵底地基,总厚度达 1.30 m,各构件组成图如图 1 所示。

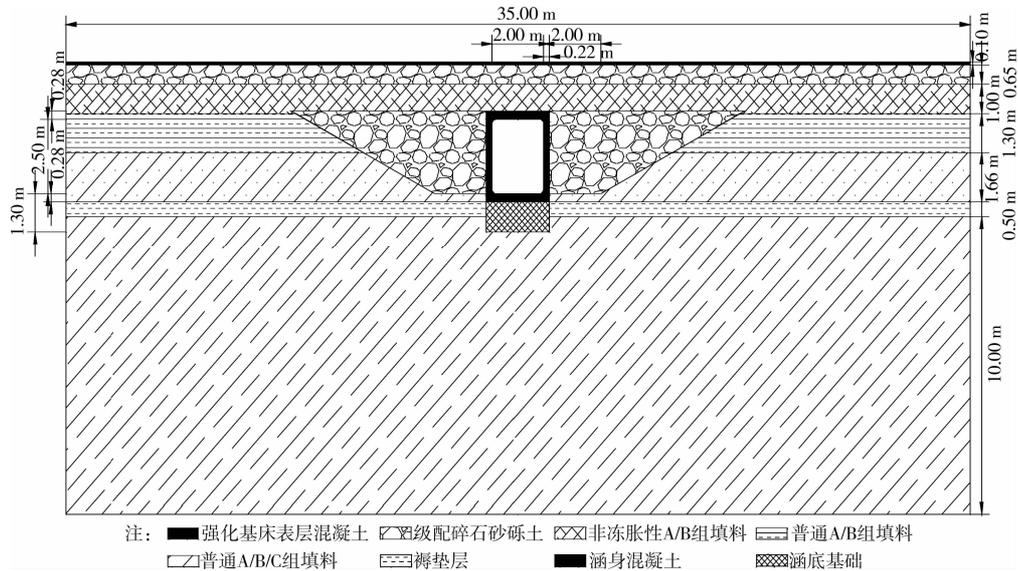


图 1 涵洞各组成构件位置示意图

## 2 计算模型

目前有关冻土区温度场数值模型的研究比较多<sup>[10-14]</sup>,本文采用了一种较成熟的数值模拟方法,旨在研究深季节冻土区涵洞模型参数的选取以及分析各参数对其温度场的影响。

### 2.1 理论模型

控制微分方程及其有限元公式

只考虑热传导和相变的情况下,温度场的数学模型方程为<sup>[15]</sup>

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } \lambda \text{grad } T + L\rho_d \frac{\partial W_i}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $C$ 、 $\lambda$ 、 $\rho_d$  分别为模型中各材料的容积热容量、导热系数和干容重,  $W_i$  为含冰量;  $L$  为冰、水的相变潜热。

在冻结过程中,未冻水含量是温度的函数<sup>[16]</sup>,不考虑水分迁移,则

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \frac{\partial W_i}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

将式(2)带入式(1),简化为

$$\bar{C} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } \lambda \text{grad } T \quad (3)$$

其中  $\bar{C}$  为模型材料的视热容量。

假设剧烈相变发生在  $(T_m - \Delta T, T_m)$  范围内,

且在这范围内,体积热容量  $C$  及导热系数  $\lambda$  均随着温度线性变化<sup>[9-10]</sup>。则

$$\bar{C} = \begin{cases} C_u & (T > T_m) \\ C_f + \frac{C_u - C_f}{\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] - L\rho_d \frac{\partial W_i}{\partial T} & (T_m - \Delta T < T < T_m) \\ C_f & (T < T_m - \Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_u & (T > T_m) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & (T_m - \Delta T < T < T_m) \\ \lambda_f & (T < T_m - \Delta T) \end{cases} \quad (5)$$

冻融过程的热传导是一个二维变系数非线性问题,采用具有迭代的有限元法,并通过减少时间步长提高精度,计算模型的有限元公式导出为

$$(\Delta t \mathbf{K} + \mathbf{M})\mathbf{T}_1 = \Delta t \mathbf{Q}_1 + \mathbf{M}\mathbf{T}_0 \quad (6)$$

式中:  $\Delta t$  为时间步长;  $\mathbf{T}_0$ 、 $\mathbf{T}_1$  分别表示每个计算步长开始之前和结束时温度列向量;  $\mathbf{K}$  表示导热系数矩阵;  $\mathbf{M}$  表示总变温矩阵;  $\mathbf{Q}_1$  与边界条件有关的热流量矢量列阵。

计算时,首先根据上个时间步的结果  $\mathbf{T}^{n-1}$  做为初始温度条件,确定各单元的初始状态,材料视热容量  $\bar{C}_i^n$  和导热系数  $\lambda_i^n$ ,由此计算  $\mathbf{T}_1^n$ ,再根据  $\mathbf{T}_1^n$  计算  $\bar{C}_2^n$ ,

$\lambda_2^i, T_2^i$ , 不断重复, 直到迭代  $i$  次以后使得  $|T_i^* - T_{i-1}^*|$  小于给定的精度就停止该时间步, 根据这一步计算下一步, 周而复始, 直到所要计算的时间点为止<sup>[15]</sup>。

采用 Geo-Studio 软件中 TEMP/W(地下热传递分析软件)进行模拟计算, Geo-Studio 是一套适用于岩土工程和岩土环境模拟计算的仿真软件。在 TEMP/W 软件中, 不再需要编制繁杂的求解器, 它含有全面的地热模型, 用户可以根据自己的需要设定, 能在水转化成冰和冰转化成水的过程中释放和吸收的相变潜热问题进行计算分析, 并且将其表示为未冻水含量的函数。TEMP/W 是一种对各种不同地面条件进行分析的强大软件。

## 2.2 模型计算区域及土体热物理参数

试验涵洞在几何形状上是关于横截面和中截面对称的, 忽略阴阳坡效应等一些不对称因素, 将涵洞及其过渡段简化为一半来计算。根据《高速铁路设计规范(试行)》(2009 年), 综合考虑现场实际情况(图 1), 将计算区域延伸到天然地表以下 14 m, 沿路基方向取 25 m, 模型示意简图如图 2。

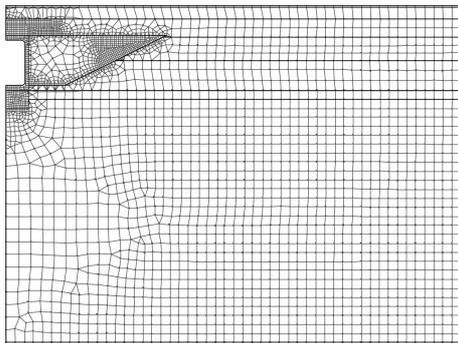


图 2 计算模型示意简图

## 2.3 初始条件及边界条件的选择

由于涵顶在 2009 年底做了堆载预压处理, 于 2010 年 6 月底卸除完毕, 并从 2010 年 7 月开始以每周一次的频率进行正式的地温监测, 所以以 2010 年 7 月 10 日这一天的实测温度场数值作为初始温度场。

涵洞及其过渡段温度场初始温度条件为:  $T(t)|_{t=0} = T_0$ 。

监测结果显示涵洞处深部地温为 8 °C 左右, 且年变幅只有 0.1 °C, 因此取模型的下部边界条件为:  $T = 8$  °C。

左边界是在对称轴上, 两侧无热量交换, 当轴间距离足够时, 可以认为右边界两边路基温度没有变化, 取模型的左右边界条件为:  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ 。

对于上边界和涵洞内壁温度边界条件, 为了使得计算模型更加符合实际情况, 减小由于边界条件的选择而产生的误差, 拟采取实测温度(如图 3)进行计算。

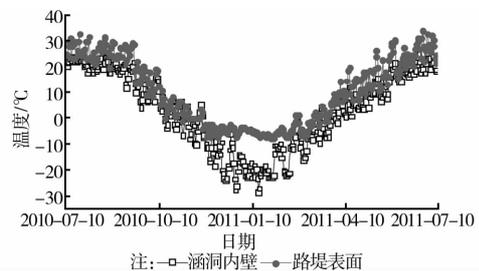


图 3 温度边界条件

涵洞内壁没有太阳直射, 取室外大气温度作为计算温度, 室外温度理论上应该是一天内各个时间段气温的加权平均值, 采用平均温度之半加上最低温度之半所得的值作为涵洞内壁温度边界条件的计算数值, 对于上边界混凝土路面的温度边界条件, 采用地表的实测温度值作为上边界的温度边界条件。

## 3 参数选取及计算结果分析

### 3.1 参数的选取

为了方便模型的建立, 引入如下基本假定:

1) 假定在每次的模拟过程中涵洞及路基填料无水分补给和排水作用, 即忽略水分迁移, 这样可以将含水量固定为一个常量, 同时也是考虑到试验涵洞现行的排水措施的有效性。

2) 假定填料及地基土介质为刚性体, 在冻结过程中土体不发生变形。

3) 各区域的材料均匀且各向同性。

4) 考虑热传导和相变作用, 忽略填料内部热对流的影响。

5) 土层热物理参数的选择, 由于温度对填料的体积热容量影响比较小, 为了简便起见, 计算过程中, 土体在未相变区和冻结相变区的体积热容量只取其融、冻两种状态的数值, 即融土和冻土, 同样, 忽略温度对导热系数的影响, 在未相变区和冻结相变区土体的导热系数只考虑冻融状态<sup>[17-18]</sup>。

2011 年春季以后, 该处涵洞进行了修补操作, 在涵底加铺了 20 cm 的混凝土层等, 考虑到水化热等影响较大, 本文所要研究的主要内容是围绕最大冻结深度等内容展开, 而 4 月份以后气温已经升到 0 °C 以上, 所以所模拟的时间区间为 2010-07-10 到 2011-04-02。

根据现场实测资料和有关参考资料的研究<sup>[7,18]</sup>, 土层的热物理参数见表 1。

表 1 模拟计算中各土层热物理参数

材料	干密度 $\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\lambda_u /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$\lambda_l /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$c_u /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$c_l /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	含水量 $W /$ %
强化基床表层混凝土	2 500	1.74	1.74	2 300.0	2 300.0	0
级配碎石砂砾土	1 800	1.71	2.27	1 881.9	1 543.2	6
非冻胀性 A/B 组填料	2 060	1.15	1.40	1 881.2	1 542.9	6
普通 A/B 组填料	2 080	1.02	1.34	1 656.2	1 333.5	6
普通 A/B/C 组填料	1 980	0.90	1.20	1 485.5	1 135.3	15
涵身混凝土	2 500	1.74	1.74	2 300.0	2 300.0	0
褥垫层	1 800	0.95	1.19	1 580.8	1 392.6	2
涵底基础	2 100	1.28	1.28	1 932.0	1 932.0	0
黏质黄土地基	1 500	1.13	1.58	2 822.9	2 229.0	25

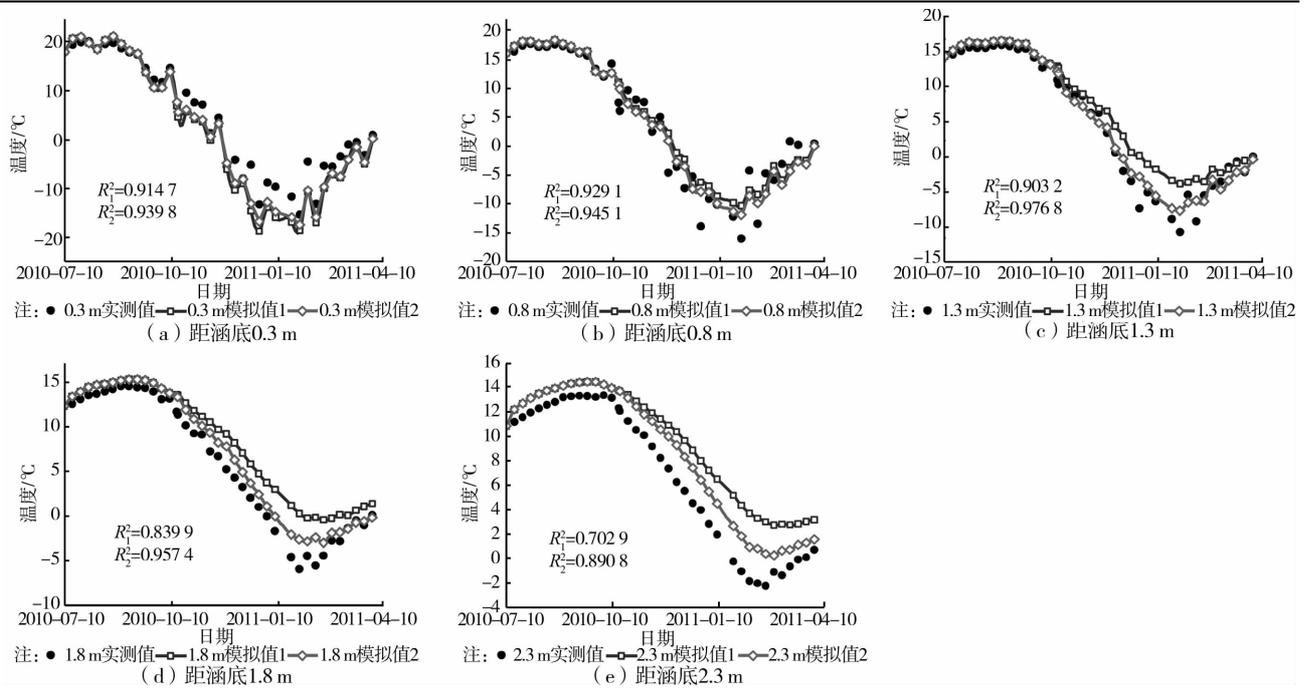


图 4 涵下不同深度探头处实测值与计算值的比较

为了验证计算模型的可行性,取涵底下 0.3、0.8、1.3、1.8 和 2.3 m 各位置上的温度变化情况(如图 4 中的模拟值 1),与实测结果分别进行对比。

对涵底以下各探头处实测值与计算值进行对比,可以看到,按表 1 所示的热物理参数计算,暖季涵下温度一致性比较好,但是冷季温度远高于监测数据,从而由此得出的冻结深度也远小于监测数据。考虑

到涵底基础是由片石混凝土或浆砌片石铺砌,涵底在暖季热传导起主流作用,在冷季热对流会对其产生明显影响,所以在模拟过程中忽略冷季热对流效果会导致很大误差,假定 4)并不适用。因此假设涵底基础冷季当量导热系数为暖季的 2 倍(具体热物理参数如表 2 所示),并进行计算对比,对于不同涵底基础热对流效果对涵底最大冻深的影响在后面进行讨论。

表 2 涵底基础热物理参数

材料	干密度 $\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\lambda_u /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$\lambda_l /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$c_u /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$c_l /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	含水量 $W /$ %
涵底基础(暖季)	2 100	1.28	1.28	1 932.0	1 932.0	0
涵底基础(冷季)	2 100	2.56	2.56	1 932.0	1 932.0	0

图 4 中模拟值 2 是假设涵底基础冷季当量导热系数为暖季的 2 倍时涵底下不同深度探头的温度计算值,对比实测值可以看到,在模拟时间段内,各探头点的模拟计算结果与实测数据吻合的相当好,误差都比较小,该模拟结果不仅在温度上升下降的整体趋势是与实测值相符合,在对涵洞进行定量计算都有一定的可靠性。

为了进一步分析模拟结果与实测结果之间的差值随深度的变化规律,取 2010-12-04 和 2011-02-26 涵底不同位置温度示意图(图 5),可以看出进行参数修正以后,模拟精度得到提高,尤其在冻结层附近的温度拟合精度较高。

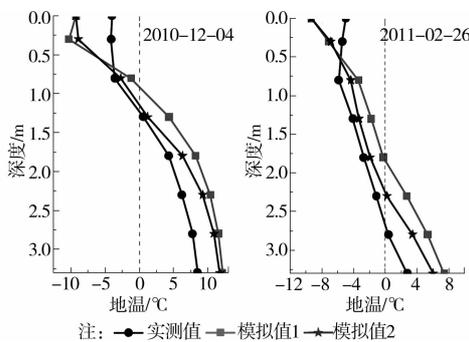


图 5 涵底地温随深度分布对比示意图

### 3.2 涵洞热状况分析

根据第二次模拟结果,对涵洞的热状况进行分析。

如图 6 所示,取路基下 0.65 和 3.25 m 距涵洞中心不同距离处的温度进行对比,可以看出涵洞对涵周路基温度分布有显著影响,加大了路基温度随

气温变化而改变的幅度,对气温改变的响应更为迅速,而且越接近涵壁,这种影响更为剧烈。

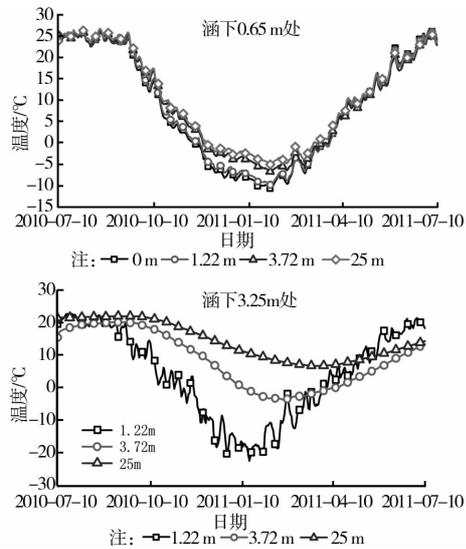


图 6 路基下距涵洞中心不同距离处的温度变化图

如图 7 所示的涵顶填料中不同位置温度时程曲线图,可以看到在高温段和低温段,涵顶温度发展较均衡,温差较小,而且由于太阳辐射的作用,从上往下温度降低,另外在降温 and 升温过程中,分别表现出上下低于中心和上下高于中心的特点,双向冻结和双向融化明显。

为便于对涵洞下冻结深度的发展过程有个直观了解,根据有限元模型的计算结果,绘制了涵下基础中不同深度温度时程曲线(如图 8)。其中横坐标表示时间历程,纵坐标表示从涵洞底向下的深度。

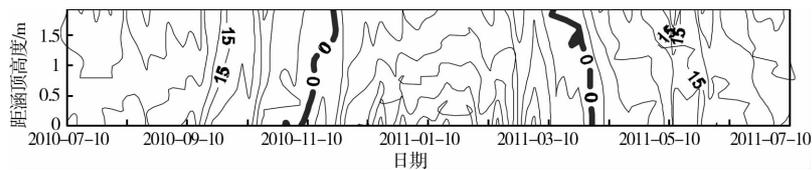


图 7 涵顶填料中不同高度温度时程曲线

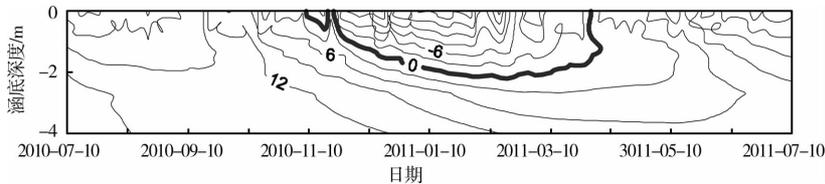


图 8 涵洞基础中心下不同深度温度时程图

计算模型温度边界条件采用的是实测温度,在冻结初期,由于温度的扰动产生了一段波动,但随着温度整体趋势趋于下降,涵洞下土体正式进入冻结阶段,正式冻结开始后,涵底 1 m 范围内温度下降迅速,在 1 周内即整体下降到 0 °C 以下,然后趋于平

缓,以一定的速率向下发展,经历大概 100 d,达到最大冻结深度;之后进入融化阶段,冻深慢慢减小,仔细观察包络线,会发现融化结束前 0 °C 线几乎是垂直的,表明涵洞中心下温度梯度很小。

如图 9 所示的涵周路基冻结圈发展历程,在冻

结期内,涵洞周围路基内形成的冻结圈呈“倒钟”形。涵周填土首先形成冻结圈,然后涵顶双向冻结,涵底单向冻结,第 4 d 涵顶填料就整体冻结,形成“倒钟”形冻结圈,再经过大约 90 d,于 2011-02-22 形成最大

冻结圈;再经过 40 d 左右,涵顶和大部分涵下冻层消失,一个月以后,于 2011-05-06 冻层彻底消失,这些与现场实测数据体现的冻结圈发展历程基本吻合。涵底中心冻结层最大厚度为 2.26 m。

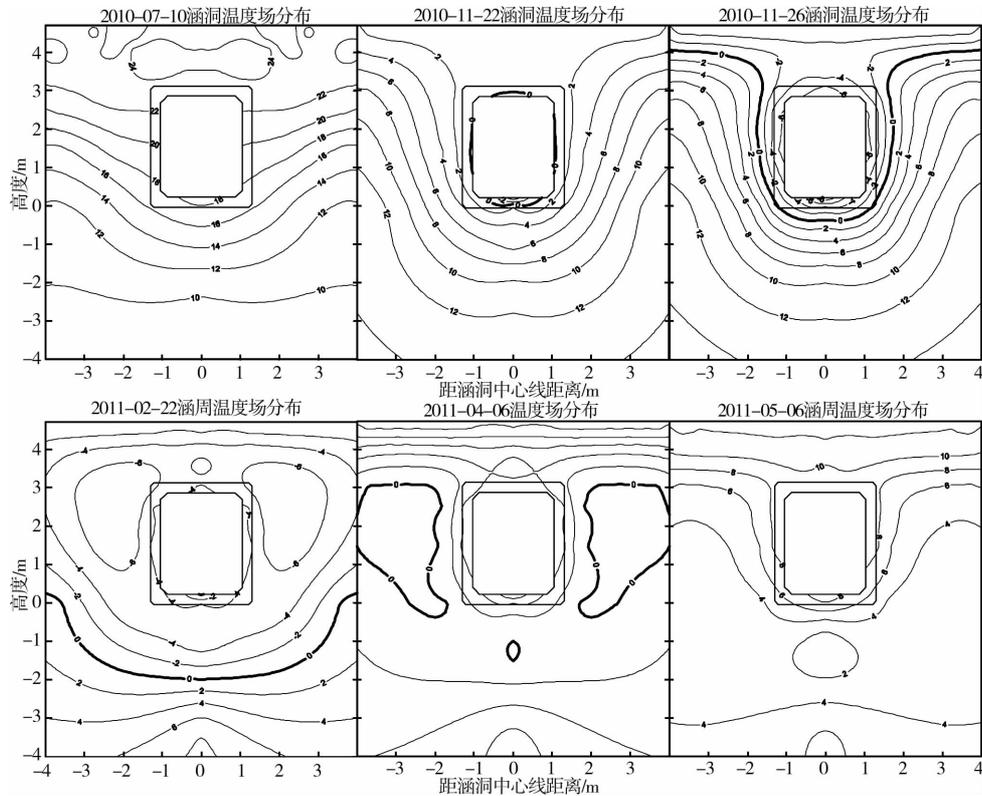


图 9 涵周路基冻结圈的发展历程图

综上对比分析计算结果和实测数据,可以看出,这种根据试验涵洞实际铺砌情况及实测温度建立的涵洞段温度场模型,不仅在定性分析涵洞热状态变化趋势上与现场实际情况有较好的吻合,而且在定量计算上都有一定的可靠性。这说明在温度场模型建立过程中,应该根据填料热对流实际情况,确定其冷季当量导热系数,由此建立模型计算结果才能够准确的反应温度状况,对其它涵洞工程的设计具有一定的参考价值。

### 3.3 涵底基础热对流效果对涵底最大冻深的影响

涵底基础是由片石混凝土或浆砌片石铺砌的,在前面的分析讨论中看到,涵底基础的冷季对流效果明显,加深了涵底最大冻结深度。

在多年冻土区,碎石通风路基是一种积极保护多年冻土的工程措施,工作原理是:在寒冷季节,冷空气有较大的密度,在自重和风的作用下使片石间隙中的热空气上升,冷空气下降并进入地基;而在温暖的季节,热空气密度小,很难进入地基,类似于热开关效应。碎石路基在多年冻土区对于保护地基土

冻结状态具有优势,被国内外广泛应用于冻土区房屋建筑,相关资料指出,某试验中块石层的有效导热系数在冬季是夏季的 12.2 倍<sup>[19]</sup>。

但在季节性冻土区,由于防止冻胀灾害关键在于减小冻结深度,减小冻胀量,而非多年冻土区的保护冻土层,防止冻土层的退化。在上面建立的涵洞温度场计算模型中,考虑到对流作用,对涵底基础取 2 倍于暖季导热系数的当量导热系数为其冷季热参数值,与实测数据的比较也能看出,这种处理办法是符合客观规律的。

为了讨论季节性冻土区涵底碎石对流效果对涵底最大冻结深度的影响,采用上面建立的温度场模型,取冷季当量导热系数分别为暖季的 1~12 倍,其它参数不变进行计算。

如图 10 所示最大冻结深度与冷、暖季涵底基础当量导热系数比值之间的关系,可以用下面的函数公式进行较好的拟合:

$$H = k \ln n + An^2 + Bn + C \quad (7)$$

随着涵底碎石冷、暖季当量导热系数比值的增

加,涵底冻结深度呈增函数形式变化,而且增长先快后慢,当 $\lambda_c/\lambda_w = 2$ 时,最大冻结深度较没有热对流时增加了 0.38 m,从而看出,对于深季节冻土区,碎石层的对流传热对防止冻胀灾害是极其有害的,所以在季节性寒区涵洞设计工作中,应该避免一般涵洞设计中,涵底基础统一用片石混凝土或浆砌片石,应该采用新工艺,减少碎石中的孔隙,或者减少孔隙连通性,减少对流传热对涵底冻深发展的影响,使得涵底碎石基础在稳固路基的同时,还能够起到很好的保温效果。

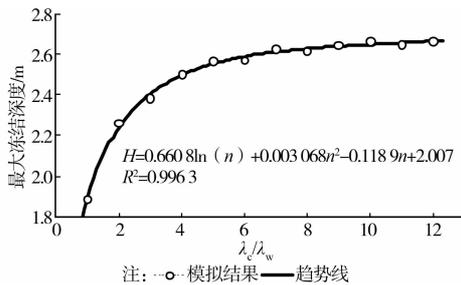


图 10 当  $W=25.0\%$  时,最大冻结深度随  $\lambda_c/\lambda_w$  的变化趋势

### 3.4 地基土含水量对涵底最大冻深的影响

为了研究地基土含水量对最大冻深的影响,分别取不同含水量的地基土所对应的热学参数(如图 11、12 所示),带到上面有限元模型中进行计算。

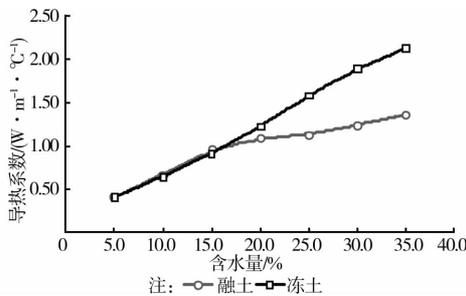


图 11  $\lambda_u$ 、 $\lambda_f$  随含水量的变化规律

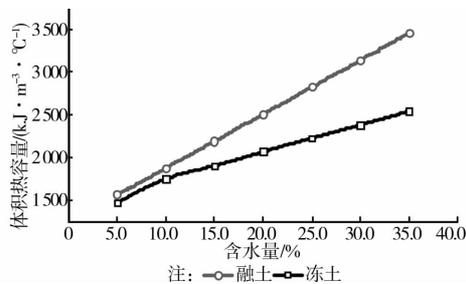


图 12  $C_u$ 、 $C_f$  随含水量的变化规律

不同体积含水量地基土涵底最大冻结深度变化趋势如图 13 所示,随着含水量的增加,最大冻结深度的变化规律大致可分为 3 段:1)当含水量  $W <$

17.5%,冻深随着含水量的增大而减少;2)当  $17.5\% < W < 27.5\%$  时,涵下最大冻结深度减小速度减缓,冻深减小速度减缓,接着稍稍有些加深;3)当  $W > 27.5\%$  时冻深随着含水量的增加而减小。

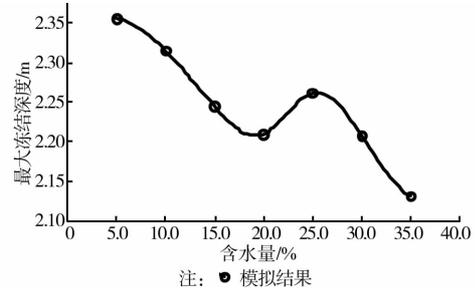


图 13 最大冻结深度随体积含水量变化图

分析图 11、12 中融、冻地基土的导热系数、体积热容量与含水量之间的关系,可以看到,融土导热系数随含水量增加的变化规律是前面增加的快,后面增加的慢,冻土的变化曲线分 3 个阶段,两头缓中间陡;融土的容积热容量随含水量呈直线增大,冻土的容积热容量随含水量呈折线增大,整体上冻土容积热容量随含水量增大的斜率较融土的缓<sup>[18]</sup>。据此可以分析最大冻结深度随含水量变化规律。

第 1 阶段,干燥即结合水未达到最大值时,这段时间内,冻、融土的导热系数与体积热容量基本上都呈线性变化趋势,同时,随着含水量的增加,潜热变大,从而导致涵底最大冻结深度不断减小;第 2 阶段,冻、融土的体积热容量依然呈线性变化趋势,融土的导热系数随含水量的变化依然保持第 1 阶段的增速,但冻土的导热系数随着含水量的变化快速增大,从而导致在冷季,地基土中能量大量流失,从而导致涵下最大冻结深度减小速度减缓,随着含水量的持续增加,冻深稍稍有些加深;第 3 阶段,随着含水量的增加,冻、融土的导热系数和体积热容量的变化规律又趋于一致,由于潜热的增大,涵底最大冻结深度又开始不断减少。这与冻土导热系数随含水量变化规律分 3 个阶段是一致的。整体上看,涵底最大冻结深度随着含水量的增加呈减小趋势。

在实测中,涵底最大冻深为天然地层的两倍左右,究其原因,通过上面的计算讨论,最有可能是有两个方面:1)冷季涵底基础热对流效果明显,当量导热系数远大于天然地层,散热严重;2)由于天然地层的含水量较涵底碎石基础的要高,根据最大冻结深度随含水量变化规律,天然地层的冻深较浅显而易见。涵底冻深较大,一方面体现出涵洞及路基内采取的隔水措施是有效的;另一方面,也表明当区域地基土是冻胀敏感性土,且隔、排水措施完善,人为冻

深也需要考虑的相对较深。

### 3.5 涵洞尺寸对涵底冻深的影响

试验涵洞为钢筋混凝土箱型涵,为了排地表水而设,根据《铁路桥涵设计基本规范》<sup>[20]</sup>,泄水涵洞的孔径不宜小于2.0 m,涵洞顶至轨底的填方厚度不小于1.2 m,并且对涵洞净高与涵洞长度做出了规定。为了研究涵洞几何尺寸对季节冻土区涵底最大冻结深度的影响,利用上面的模型,针对不同尺寸的涵洞计算其涵底最大冻结深度,为了满足排水需求,而且在规范要求内,将涵洞孔径和净高均控制在2.00~2.95 m之间,同时计算过程中不考虑强度、稳定性等要求,仅仅讨论净高、内径的改变对涵底冻深的影响,求得最合适的涵洞尺寸。计算结果如图14所示。

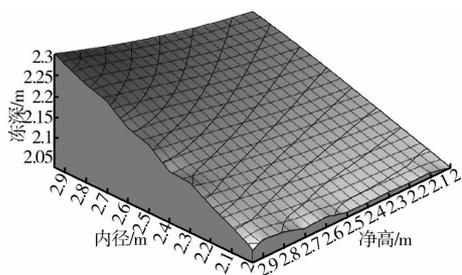


图14 不同尺寸下涵底最大冻结深度值的对比

从图14可以看出,箱涵的净高对涵底最大冻结深度的影响很小,当内径恒定为2 m,箱涵的净高从2 m增加到2.95 m时,最大冻结深度仅增加了4.5 cm,增加率仅为2.22%;相较于净高,内径对涵底最大冻结深度的影响相当明显,随着内径的增大,最大冻结深度呈线性加深,当净高恒定为2.95 m,内径从2 m增加到2.95 m时,最大冻结深度增加了0.251 m,增加率为12.23%。所以在寒区涵洞的设计过程中,在满足强度、稳定性、功能性等一系列要求外,尺寸方面优先考虑内径,取允许的最小内径,由于净高对涵底冻结深度方面的影响很小,可以不考虑。

## 4 结 论

1) 根据试验涵洞实际铺砌情况及现场气象资料,建立了考虑相变潜热的涵洞段温度场模型,对比分析计算结果和实测数据,表明考虑冷季热对流效果后,计算结果不仅在定性分析涵洞热状态变化趋势上与现场实际情况有较好的吻合,而且在定量计算上都有一定的可靠性,能够准确的反应温度状况,对季节冻土区其它涵洞工程设计有一定的参考价值。

2) 在多年冻土区,忽略对流传热的计算是基于一种不利的情况进行计算,对于工程安全稳定趋于保守的,但在季节冻土区,忽略对流传热的影响相当于是基于一种有利的情况进行计算,得到的人为冻结深度要浅于实际人为冻结深度,由此指导设计的涵洞工程就不能达到预定的安全系数。

3) 在深季节性冻土区涵洞设计工作中,冷季涵底基础对流传热的影响不容忽视,应该避免一般的涵洞设计中,涵底基础统一用片石混凝土或浆砌片石;应该采用新工艺,减少碎石中的孔隙,或者减少孔隙连通性,从而减小对流传热对涵底冻深发展的影响,使得涵底碎石基础在稳固路基的同时,还能够起到很好的保温效果。

4) 涵底最大冻结深度随着含水量变化规律呈三段:当含水量 $W < 17.5\%$ ,冻深随着含水量的增大而减少;当 $17.5\% < W < 27.5\%$ 时,冻深减小速度减缓,接着稍稍有些加深;当 $W > 27.5\%$ 时冻深随着含水量的增加而减小。涵底最大冻结深度整体上随着含水量的增加呈减小趋势。据此,在隔、排水措施完善的区域,人为冻深相较更深,需要给予更多注意。

5) 研究了寒区涵洞尺寸对涵底冻深的影响,分别计算了不同净高和不同内径下涵底最大冻结深度值,通过对比可以看出其内径对涵底冻结深度方面的影响很大,在满足强度、稳定性和功能性等一系列要求后应该优先考虑,而净高对涵底冻结深度方面的影响很小,可以不考虑。

### 参考文献:

- [1] Kunitake M, Ogata H, Nakazawa T, et al. Temperature distribution in a concrete box culvert using 3-D FEM [C]//Proceedings of the 2nd Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, 1993:215-228.
- [2] 王凯,罗广宇,罗英,等. 高含冰量冻土地区拼装涵洞施工技术[J]. 长安大学学报:建筑与环境科学版, 2003, 20(1):30-32.  
Wang K, Luo G Y, Luo Y, et al. The construction technique of precast installed culvert at high-ice content frozen soil [J]. Journal of Chang'an University: Architecture and Environment Science Edition, 2003, 20(1):30-32.
- [3] 吴少海. 青藏铁路多年冻土区桥涵设计与施工[J]. 冰川冻土, 2003, 25(Sup1):59-68.  
Wu S H. Design and construction of bridges and culverts of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(Sup1):59-68.
- [4] 张学富,赖远明,喻文兵,等. 青藏铁路涵洞现浇混凝土

- 基础水化热的数值分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 106-111.
- Zhang X F, Lai Y M, Yu W B, et al. Numerical analysis for the hydration heat of cast-in-situ concrete foundation of the culvert on the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 106-111.
- [5] 张旭芝, 王星华. 冻土铁路涵洞施工对地基土温的影响[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 19-24.
- Zhang X Z, Wang X H. Impact of railway culvert construction on the ground temperature of foundation soil in permafrost regions [J]. China Railway Science, 2007, 28(4): 19-24.
- [6] 孙文. 多年冻土区渗流对路基热稳定性的影响分析[J]. 城市道桥与防洪, 2012, 29(2): 108-111.
- Sun W. Analysis on influence of seepage flow in permafrost area on thermal stability of roadbed [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012, 29(2): 108-111.
- [7] 许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 季节冻土区保温路基设计参数[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 83-89.
- Xu J, Niu F J, Niu Y H, et al. The design parameters of roadbed with insulation in seasonal frozen ground [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3): 83-89.
- [8] Liu H, Niu F J, Niu Y H, et al. Experimental and numerical investigation on temperature characteristics of high-speed railway's embankment in seasonal frozen regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 81: 55-64.
- [9] 牛富俊, 刘华, 牛永红. 高速铁路路涵过渡段路基冻结特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 639-646.
- Niu F J, Liu H, Niu Y H. Study on the freeze characteristic in roadbed-culvert transition section along a high-speed railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 639-646.
- [10] Lunardini V J. Heat transfer with freezing and thawing [M]. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- [11] Miao T D, Guo L, Niu Y H, et al. Modeling on coupled heat and moisture transfer in freezing soil using mixture theory [J]. Science in China, Series D, 1999, 42(Sup1): 9-16.
- [12] Wang Z L, Fu Q, Jiang Q X, et al. Numerical simulation of water-heat coupled movements in seasonal frozen soil [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54(3/4): 970-975.
- [13] Zhang K, Li D Q, Niu F J, et al. Cooling effects study on ventilated embankments under the influence of the temperature differences between the sunny slopes and the shady slopes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 226-233.
- [14] Wu D, Jin L, Peng J B, et al. The thermal budget evaluation of the two-phase closed thermosyphon embankment of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 103: 115-122.
- [15] 安维东. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1990: 21-54.
- [16] Lai Y M, Zhang S J, Mi L. Effect of climatic warming on the temperature fields of embankments in cold regions and a countermeasure [J]. Numerical Heat Transfer Part A: Application, 2004, 45(2): 191-210.
- [17] 丑亚玲, 盛煜, 马巍. 多年冻土区道路边坡热状况差异对多年冻土融化形态的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 977-985.
- Chou Y L, Sheng Y, Ma W. Effect of the differences of thermal regime within roadbed slopes on thawing morphology in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 977-985.
- [18] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2001: 75-86.
- [19] 葛建军. 青藏铁路高原多年冻土区片石通风路基[J]. 冰川冻土, 2003, 25(Sup1): 52-53.
- Ge J J. The ventilative sheet-stone roadbed of the Qinghai-Tibet Railway in plateau permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(Sup1): 52-53.
- [20] 中华人民共和国铁道部. TB 10002. 1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

(编辑 王秀玲)