

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1096

LIU Hua, NIU Zelin, NIU Fujun, et al. Numerical analysis on freezing characteristics and thermal influence areas of roadbed-bridge transition section of high-speed railway in cold region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1256-1266. [刘华, 牛泽林, 牛富俊, 等. 寒区高速铁路桥过渡段冻结特征及热影响区域数值分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1256-1266.]

## 寒区高速铁路桥过渡段冻结特征 及热影响区域数值分析

刘 华<sup>1</sup>, 牛泽林<sup>1</sup>, 牛富俊<sup>2,3</sup>, 张 楠<sup>4</sup>, 鲁 洁<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 随着我国高速铁路网络逐步向寒区大范围延伸, 线路纵向上选用了较高比例的桥梁以跨越地形, 势必出现大量的路桥过渡段。路桥过渡段使线路纵向上出现了刚度变化以及桥用、路用材料的工程抗冻性能差异, 进而引发不均匀的冻胀和融沉变形, 产生桥头跳车的可能, 降低行车的舒适度和安全性。文章运用土壤冻融条件下热传导理论的基本方程和数值方法, 结合哈大高铁的典型工况建立路桥过渡段模型, 计算分析其在春季融化期间的冻结特征差异和演变规律, 并基于工程优化设计了三种不同的台后填筑模式, 得到冻融条件下该气候分区的热影响范围, 并基于此分析了冻结圈面积、周长、长宽比和横向热扰动距离等几何指标。计算结果表明, 仅考虑热学影响时, 在有保温层和无锥台护坡工况下, 路桥过渡段的综合效果较好。

**关键词:** 寒区高铁; 路桥过渡段; 冻结特征; 填筑模式; 热影响区域

**中图分类号:** U213.1; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1256-11

### 0 引言

随着我国高速铁路网络的逐步扩展, 在2016年7月多部委联合发布的《中长期铁路网规划》中, 提出了规划建设“八纵八横”的高速铁路网络格局, 高速铁路的总长度要达到 $3.8 \times 10^4$  km。其中部分高速铁路线路穿越了我国不同冻结深度与气候条件的广大寒区, 面临着不同工程性质的土质条件。为保障线路的安全运营, 无砟轨道路基的轨面变形控制要求极为严格<sup>[1-2]</sup>, 因此工程上要面对和亟需解决大量的冻害问题。同时, 为保证列车高速运行的安全舒适性, 线路中大量采用了高架桥的形式跨越地形和协调纵向坡率, 从而出现相对应的路桥过渡段, 比如我国第一条寒区高铁哈大高铁的线路中桥梁比约为73%<sup>[3]</sup>。考虑到线路走向、桥梁净空和

局地地形等工程条件, 不同气候分区的路桥过渡段呈现出不同的冻结特征及演变规律, 进而表现出不同的冻土力学行为, 因此需要对路桥过渡段的冻结特征分布特点和工程影响进行深入分析。

冻土的力学行为具有显著的热敏性, 以及动力荷载对冻土的扰动等诸多因素, 结合高速铁路路桥过渡段差异变形的高要求(工后沉降差异 $\leq 5$  mm, 且折角 $\leq 0.001$  rad)<sup>[1-2]</sup>, 使冻土地区路桥过渡段的差异变形问题更为复杂。张玉芝等<sup>[4]</sup>在哈大高速铁路德惠试验点选取了一个典型的路桥过渡段, 实测了2个冻融循环期间的地温和路基变形数据, 探讨了由于冻融过程诱发的差异性沉降演变规律。田亚护等<sup>[5]</sup>根据青藏高原多年冻土区公路路桥过渡段路基在竣工后3年内的现场试验数据, 分析了路基不同位置的地温变化、路基基底沉降变形和路基不

收稿日期: 2018-07-19; 修订日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608436; 41730640); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-037); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5003)资助

作者简介: 刘华(1983-), 男, 陕西延安人, 副教授, 2013年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事寒区岩土工程研究。E-mail: liuhua029@xauat.edu.cn.

同位置沿横向及纵向的沉降变形规律。牛富俊等<sup>[6]</sup>通过对青藏铁路西大滩至尺曲谷地 164 座桥梁路桥过渡段的沉降病害调查及相关因素分析,发现过渡段路基沉降与桥梁走向的南北端、路基坡向、路基高度、多年冻土类型(含冰量)、地温、路基结构以及地质条件等因素密切相关。金会军等<sup>[7]</sup>通过对比讨论国内外几条重要的冻土地区温热油管在极端环境下的热稳定性,提出了在此类工程中需面对的差异性沉降工程问题和解决思路。由此可见,路桥过渡段的差异性沉降是铁路、公路、输油管线等线性工程中普遍存在的问题<sup>[8-9]</sup>,尤其是运营时在动力荷载作用下的变形表现得更为明显<sup>[10-11]</sup>。

基于此,专家学者和工程师们对寒区高铁路基<sup>[12-16]</sup>以及路桥过渡段路基进行了针对性的研究。刘建坤等<sup>[17]</sup>基于青藏铁路清水河地区的工程特点,提出了一种新型的路桥过渡段结构形式,即通过在路堤底层堆砌一定厚度的片石填料形成通风型路基,片石区以上采用倒梯形的过渡段填筑形式,并于路基两侧加设保温护道,通过实测发现该种结构的过渡段型式呈现出良好的工程效果。考虑到冻土路基变形对高速列车的动力响应,盛岱超等<sup>[18]</sup>、Sheng 等<sup>[19]</sup>基于列车的动荷载、冻土路基和孔隙水压力的交互影响,提出了一种可能的冻胀机理,分析了差异性变形存在的可能原因。在路桥过渡段工程问题的研究和设计中,由冻融环境引发的差异性变形及其热效应至关重要。而探寻路桥过渡段路基热稳定性的关键性指标之一是地温与变形的差异,寻找纵向结构的差异性响应引发的影响区域对设计、运营具有至关重要的意义。

哈大高铁桥梁数目众多,全线共有中型以上桥梁 162 座,路桥过渡段路基的稳定性严重制约着整条线路的安全运营。一旦出现差异性变形过大,轨枕系统增大的附加应力极有可能出现桥头跳车(落车)、扣件脱扣、安全储备降低和拉裂轨道板的故事。影响冻土路基热稳定性的一个关键因素是冻结特征,尤其在春季融化期,路桥过渡段三向融化,使路基下出现冻结夹层,更进一步扩大了这种影响。哈大线地处我国东北地区,一般在第二年的 3 月底 4 月初开始解冻,融化期持续长达一个月以上。路桥过渡段的路基填土在差异性地气换热冻结融化过程中,热影响域的演变过程和结果对填土的热稳定性和力学特征影响甚大,有必要对其热影响的几何边界和时间尺度进行分析讨论。本文基

于有限元和热传导的基本原理,建立了不同工况下的路桥过渡段数值计算模型,目的在于评价路桥过渡段路基热影响域范围和探寻较优的台后填筑方式,分析不同工况下路桥过渡段的冻结特征,为工程设计和决策提供数据支持。

## 1 计算模型

### 1.1 控制方程

线路走向、倾向和倾角的不同诱发的热不对称性,使过渡段上的路基稳定性呈现出极大的差异<sup>[20-23]</sup>,在冻土路基工程中称为“阴阳坡效应”。考虑到阴阳坡效应在数值模型中的实际叠加方法,本文中仅将不同朝向坡体的温度差异作为阴阳坡效应的体现,以给定不同的边界温度值作为实际边界条件。且由于路基中粗颗粒填料的含水率和细粒含量较低,在分析路桥过渡段的路基温度场数值反演过程中,对过渡段这一线性工程的传热过程作如下假设:①路基填土及其下地基层均匀且均为各向同性体;②路基各边界均不发生水分迁移,水分蒸发及各类化学势转变引起的热量变化忽略不计,只考虑热传导和相变作用,模型遵循能量守恒定律;③不考虑路基表面无砟轨道路基轨道板系统(CRTS-I)的热影响;④不考虑桥梁与台座的横向热传导,该边界处简化为大气温度边界条件。

在寒冷地区,路基在季节活动层内的填土和其他构件每年均会发生冻结和融化过程,所以本问题是具有相变的传热问题,可利用显热容法得到其控制方程<sup>[24-25]</sup>。冻土地区路基温度场热量平衡控制微分方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

该温度场演变问题是一个带相变的瞬态温度场问题,加上冻融界面的位置不固定,因此界面的能量守恒条件是非线性的,该问题在数学上是一个强非线性问题。本文采用 Galerkin 法,将本计算模型热传导控制方程和有限元计算公式导出为

$$[M] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K][T] = [F] \quad (2)$$

$$M_{ij} = \sum_{\Omega^e} C N_i N_j d\Omega \quad (3)$$

$$K_{ij} = \sum_{\Omega^e} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \sum_{\Gamma_2^e} \alpha N_i N_j d\Gamma \quad (4)$$

$$F_i = \sum_{\Gamma_2^e} \alpha T_a N_j d\Gamma \quad (5)$$

1.2 模型与计算参数

以哈大高铁和哈齐高铁路基为研究对象，路桥过渡段计算模型如图 1 所示。计算区域中的地层从上至下依次为：混凝土强化表层、级配碎石砂砾土、非冻胀性 A、B 组填料、普通 A、B 组填料、褥垫层(3 层碎石+2 层中粗砂)、黏质黄土

层以及桥头边坡上的浆砌块石护坡。同时，忽略路基主体中的两层复合土工膜和土工格栅的传热效果；并假设护坡浆砌块石只发生传导传热，忽略大孔隙的对流传热；忽略路面上方的轨道板覆盖影响；忽略路基边坡上防护对热传导的影响。

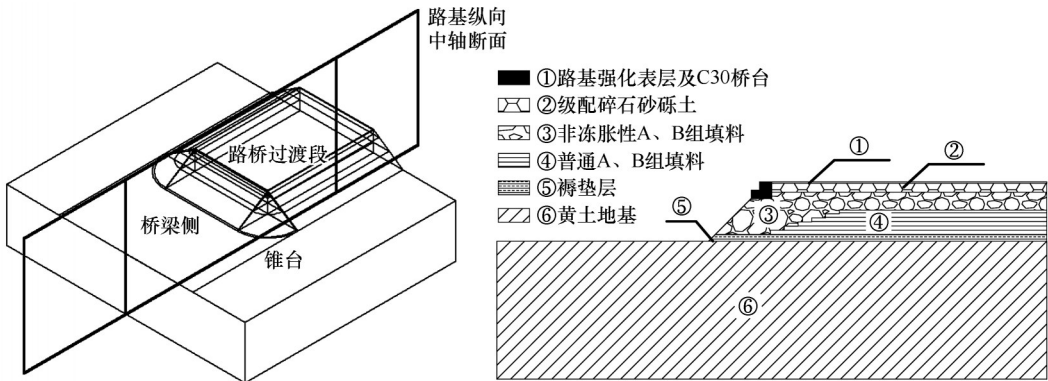


图 1 路桥过渡段计算几何模型  
Fig. 1 The models of roadbed-bridge transition section

在路桥过渡段的端部处，在填土压实的过程中并无侧向限制或者具有较弱的侧限，路基土体压实并不能达到理想的压实效果，同时该处土体又受到三个方向的负温冻结作用。因此，考虑将锥台护坡取消，换成倒 T 型的悬臂式钢筋混凝土挡土墙，而且也可在挡土墙后铺设保温材料，以便于机械化施工。

与分层填筑的路基填筑方式相比，一段过渡的

路基填筑方式，一方面在路基填筑时，可以保证边界处路基的填筑质量不至于压实度不够而过于松散；另一方面选用非冻胀性 A、B 组填料，使交界处的路基冻胀性能减弱，从而使路桥(涵)过渡段更加趋于稳定。因此，从施工上讲，一段过渡的填筑方式是可行的。文中模拟工况详情见表 1 和图 2，计算所需热学参数见表 2。

表 1 三种模拟工况  
Table 1 The three simulated working conditions

工况	编号	保温板厚度/cm	保温板布设方式	台前填土形式	台后填土形式
现有工况	I0C1	0	无	有锥台护坡	一段过渡
模拟工况 1	I0C0	0	无	无锥台护坡	分层
模拟工况 2	I1C0	10	紧贴台壁后方，全高	无锥台护坡	分层
模拟工况 3	I1C1	10	紧贴台壁后方，全高	有锥台护坡	一段过渡

注：编号中 I 为保温板，C 为锥台护坡，0 表示没有该措施，1 表示有该措施。

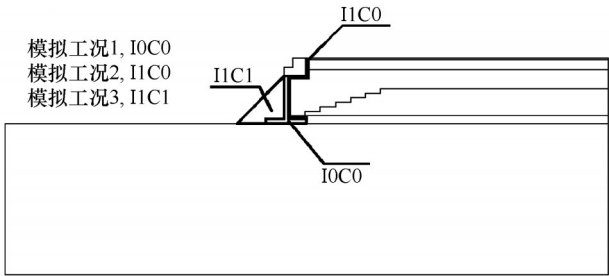


图 2 计算模型的纵轴剖面  
Fig. 2 Longitudinal section of the model

1.3 边界条件与初始条件

边界条件采用长春地区的气象统计资料和实测地温资料，计算方法和思路基于文献[26]。边界条件为：

模型四周，

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \tag{6}$$

模型下部，

$$T=8\text{ }^{\circ}\text{C}(\text{实测温度}) \tag{7}$$



表2 模拟计算时的各土层热物理参数  
Table 2 The thermal physics parameters in computing

土性/材质	位置	干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%	导热系数/(J·m <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )		比热/(J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	
				冻	融	冻	融
桥台基座 C30	基床表层上部	2 550	0	5 580	5 580	976	976
10 cm 强化表层	基床表层上部	2 450	0	5 580	5 580	976	976
级配砂砾土	基床表层	1 800	7	4 789	3 988	1 731	2 033
非冻胀 A、B 料	基床底层上部	2 060	6	5 040	4 140	707	862
普通 A、B 料	基床底层下部	2 080	6	4 830	3 680	605	751
褥垫层	基床地基交界	1 850	0	1 246	1 246	649	649
黏质黄土	地基	1 540	30	5 688	4 057	1 158	1 466
保温材料	挡土墙后	30	0	126	126	1 250	1 250
浆砌块石	护坡	2 480	0	8 740	8 740	1 466	1 466

模型上表面，

$$T = T_m + \frac{\Delta T}{8760} \cdot t + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + a\right) + \Delta T_f + \Delta T_s \quad (8)$$

式中： $T_m$ 为地表温度的年平均值，实测值为 9.32℃； $\Delta T$ 为考虑气候变暖的外界气温升高幅度，东北地区约为 0.04℃·a<sup>-1</sup>； $A$ 为地表温度波动变化年振幅的一半，实测值为 19.49℃； $a$ 为路基填筑时刻的时间初始相位，随路基填筑时间不同而变化，本例中为  $-\frac{11}{12}\pi$ ； $\Delta T_f$ 为下附面层温度增量，根据附面层理论，可得混凝土路面为 1.5℃，天然地表为 3.5℃，同时假设浆砌块石面下为 2.5℃； $\Delta T_s$ 为阴阳坡效应的差异均值，根据实测数据，阳坡为 1.5℃，阴坡为 -1.5℃，桥头处锥台护坡为 0℃。

模拟计算采用通用软件 ANSYS 对模型进行网格划分。路基主体填筑完成于 2010 年 10 月 30 日，故将该日的实测温度场数值作为初始温度场。路基温度场初始温度条件为  $T(t)|_{t=0} = T_0$ ，式中  $T_0$ 为初始实测温度<sup>[27]</sup>。

2 结果与分析

2.1 典型路桥过渡段影响区域

在全球升温背景下的路基运营 20 年后，路桥过渡段中轴纵向断面的路基温度场分布如图 3 所示。其中，图 3(a)为现有锥台护坡路基 4 月 15 日的温度场情况，可见桥台后 6 m 左右地温等值线平缓，桥台下三向的冻结圈影响可达桥台后 4 m。由图 3(b)可见，在没有锥台护坡的工况下，冻结圈在春融期反而增大，这对路桥过渡段热影响域的判别起到关键作用。

对比图 3(b)和(c)可见，同样的工程措施和填

筑模式下，保温板的存在使台后填土中的冻结圈面积迅速缩小，减小了冻结核对融期路基稳定性的影响。对比图 3(c)和(d)可见，增加的锥台护坡在融期导致冻结圈增大，在三向冻结时，锥台护坡存储了较多的“冷量”，在三向融化时，锥台护坡又间接增大了热阻，使台后填土中的冻结区域不能迅速减小，呈现出较为扁平的冻结圈。

2.2 不同台后距离的地温场

图 4~6 对比了三种工况下桥台不同距离处的地温场分布。可见，基本上在竣工后 20 年的 3 月 30 日和 4 月 15 日两个特征时间点上，在距离桥台 2.5 m 以外，地温沿着高度的分布近乎一致，差别在 0.5℃以内。对比台后 0 m 和台后 2.5 m 的地温曲线可见，保温板的工程效果十分显著。

图 5 和图 6 中，紧贴台后的地温曲线出现间断是由于该处设置了保温板，使地温出现跳跃。由图 6 可见，锥台护坡的存在使地温曲线在不同的台后距离上更加趋近。

2.3 不同台后高度的地温场

过渡段路基高度为 4.31 m，现选取天然地表处和距天然地表 2 m 高度处作为代表深度进行对比分析。由图 7~9 可见，台后 6 m 处，两个特征深度处的地温曲线随着到台后距离的增加而基本稳定。因此在纵向上可以认定，在三向冻融条件下，台后 6 m 是路桥过渡段的热影响区域。

2.4 台后热影响区域定量分析

将数值计算得到的地温场数据，通过插值处理绘制成等温线分布图，并提取冻结圈图像的数字化的数据，借用计算机图像统计的方法和程序，获取了不同工况下冻结圈的位置，以及面积、周长、长宽比和横向热扰动距离等数据。图 10 为提取数字化

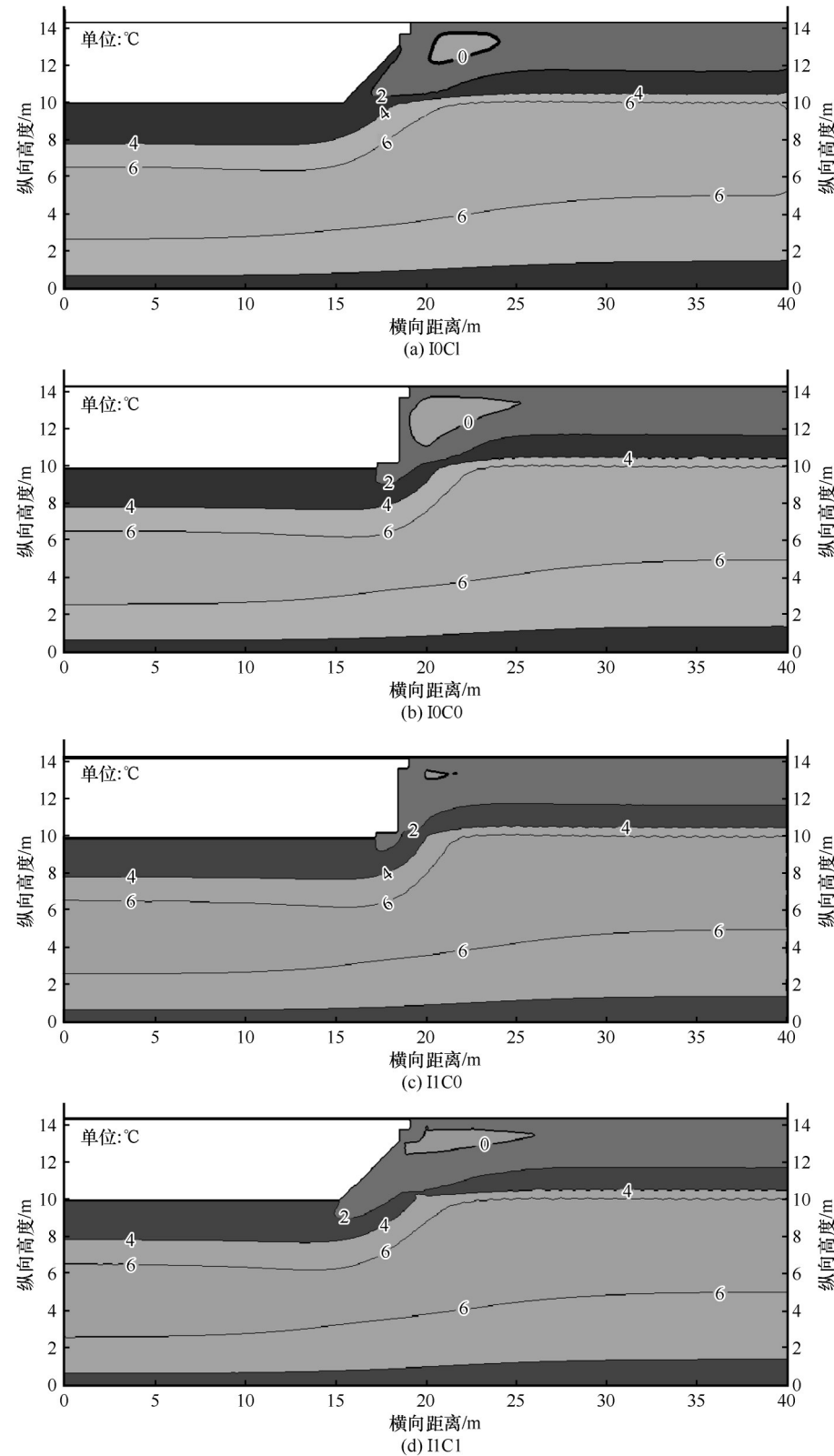


图3 不同工况下路桥过渡段地温场分布(20年后4月15日)  
Fig. 3 The thermal regime of the four different working conditions in roadbed-bridge transition section on April 15, 20th year after the project completion

信息的流程图。图 11 为路基施工完成后第 20 年 4 月 15 日冻结圈的面积、周长和所在区域的长宽比 (横向长度与纵向高度之比)。由图可见, 在没有保温板情况下, 无锥台和有锥台时结果差异较大, 无

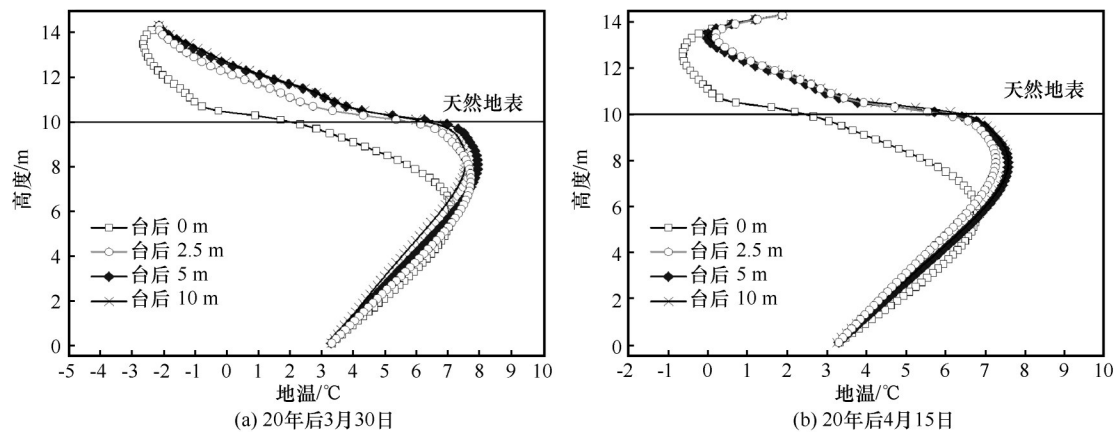


图4 I0C0不同的台后距离处竖向地温分布

Fig. 4 The vertical temperature distribution in different distance aside abutment at I0C0 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

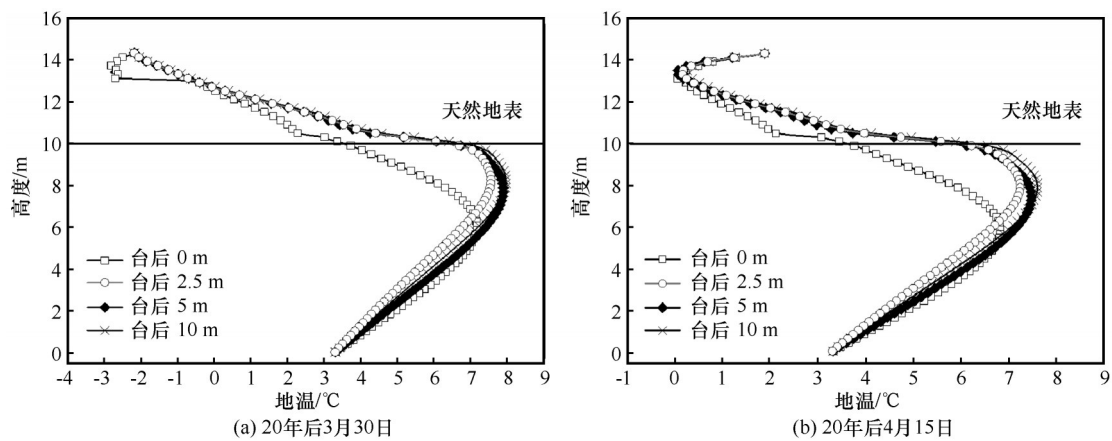


图5 I1C0不同的台后距离处竖向地温分布

Fig. 5 The vertical temperature distribution in different distance aside abutment at I1C0 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

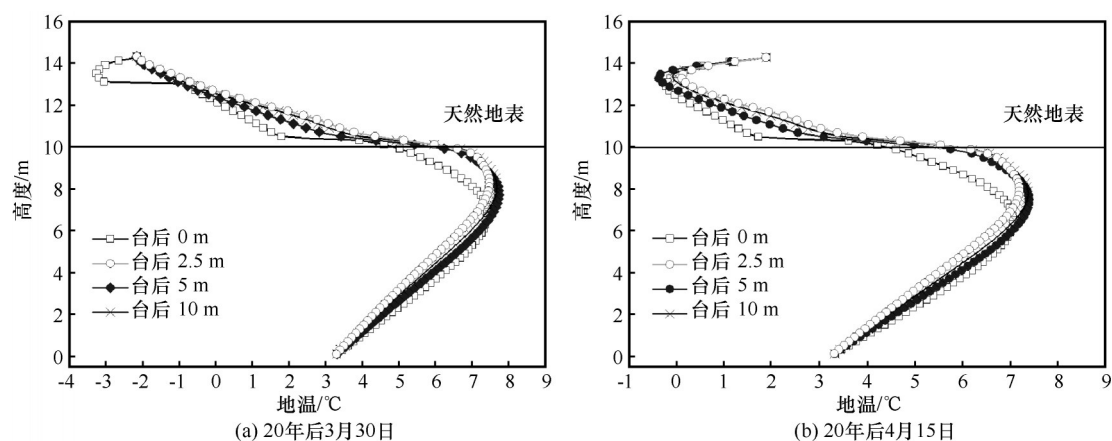


图6 I1C1不同的台后距离处竖向地温分布

Fig. 6 The vertical temperature distribution in different distance aside abutment at I1C1 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

论是面积、周长还是长宽比均存在下降趋势,这是由于在春融期锥台增大了热交换的幅值。在有保

温板情况下,无锥台和有锥台时结果同前者恰恰相反,各项几何指标均呈现增大趋势。对比分析

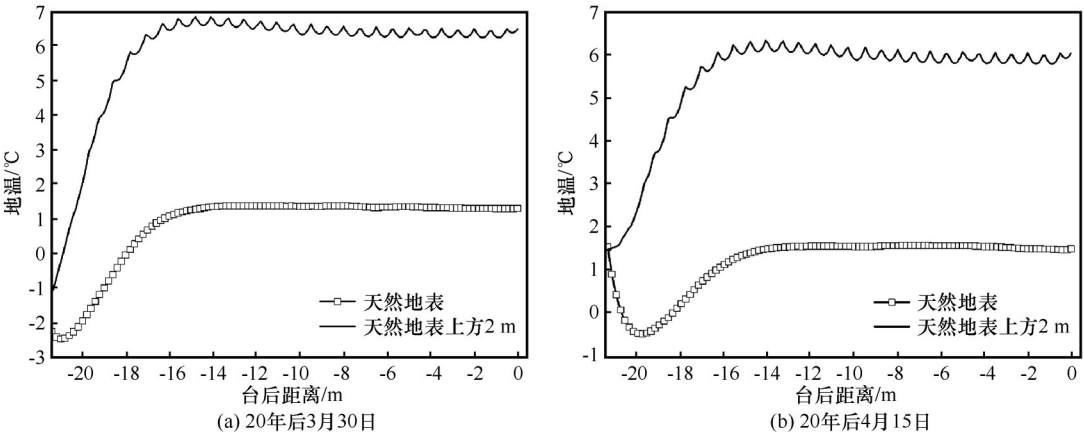


图 7 I0C0不同的台后距离处地温分布

Fig. 7 The transverse temperature profiles of the original surface and 2 m above the original surface at I0C0 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

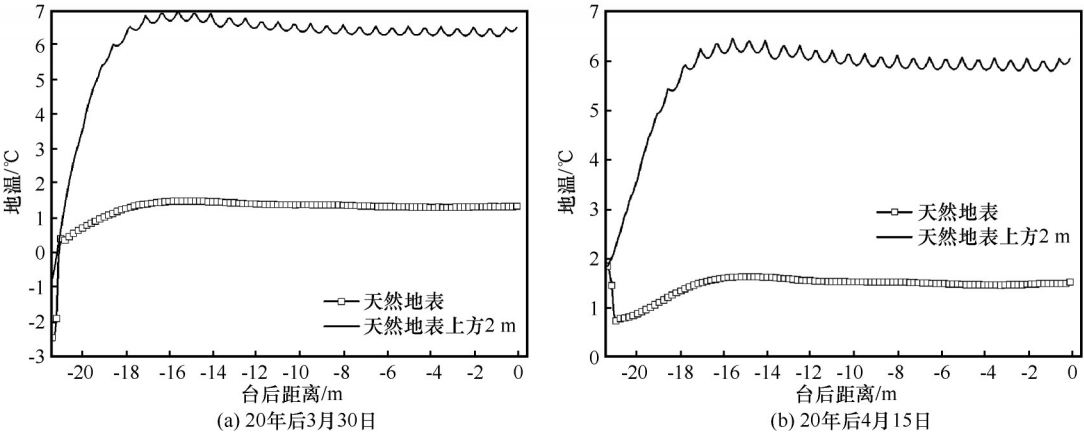


图 8 I1C0不同的台后距离处地温分布

Fig. 8 The transverse temperature profiles of the original surface and 2 m above the original surface at I1C0 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

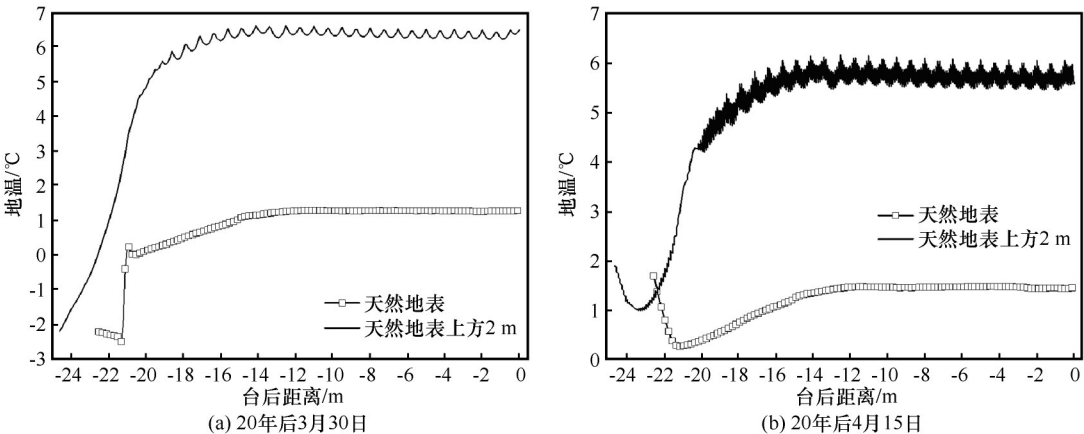


图 9 I1C1不同的台后距离处地温分布图

Fig. 9 The transverse temperature profiles of the original surface and 2 m above the original surface at I1C1 on March 30 (a) and April 15 (b), 20th year after the project completion

可知，台后保温板的存在直接影响了热交换过程，保温板比锥台对融化的影响程度大。保温板的隔

热效果非常显著，但同时叠加锥台的影响后，冻结圈更加扁平，使长宽比变大，进而可知纵向设置的

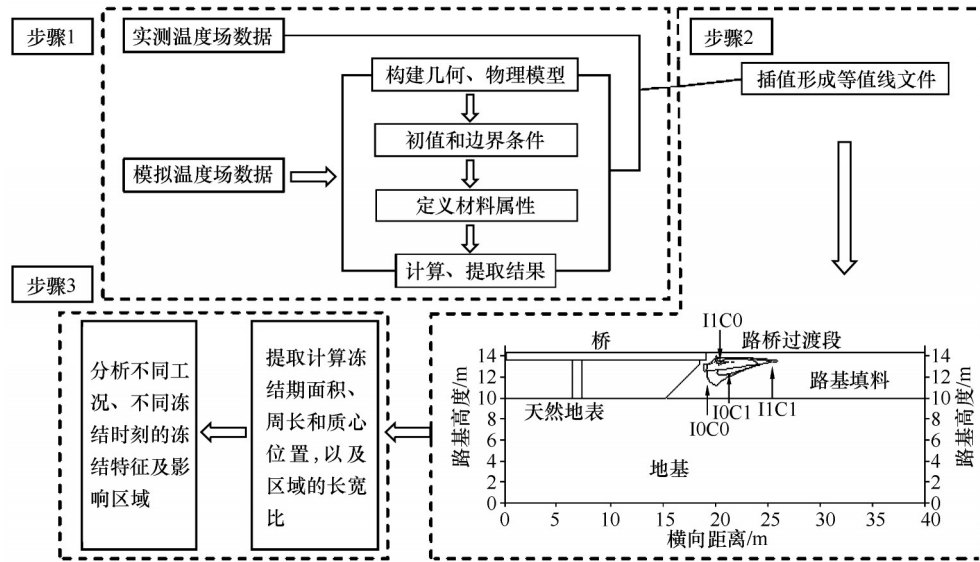


图 10 提取数字化信息流程

Fig. 10 Digitization flow chart

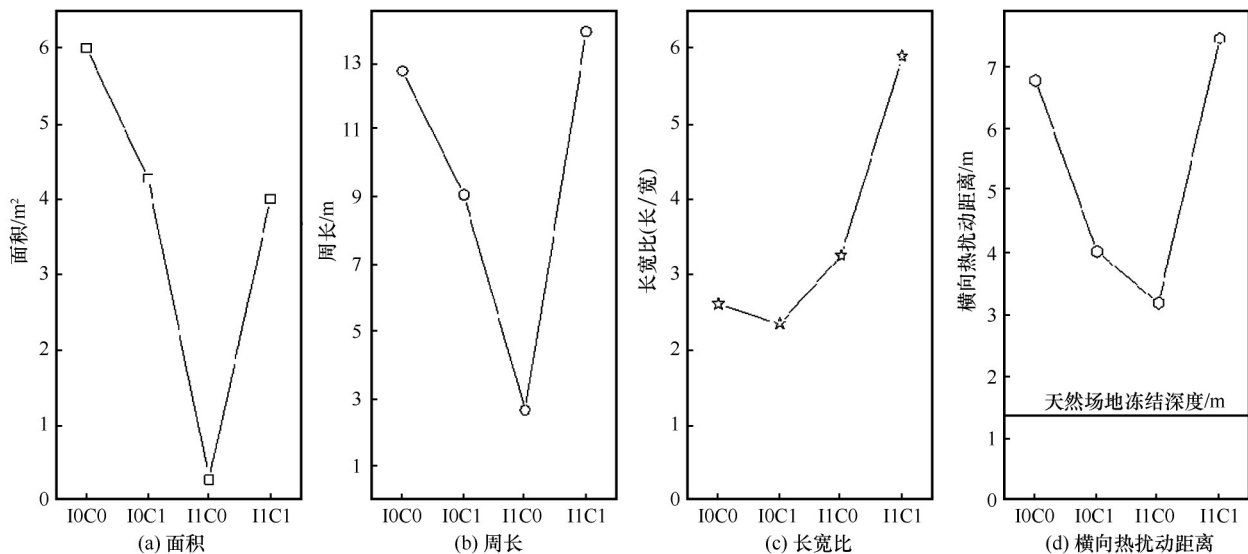


图 11 不同工况下的冻结圈面积、周长、长宽比及横向热扰动距离

Fig. 11 Frozen area (a), perimeter (b), ratio of length and width (c), and transverse thermal disturbance distance (d) of the freezing ring under the four different working conditions on April 15, 20th year after the project completion

保温板隔热效果要远大于横向路基受到大气热扰动的影响。在有锥台情况下,不论有无保温板,冻结圈的面积都差别不大,但周长和长宽比差异较大,可见同时选取纵向设置的保温板和锥台护坡的情况下,这种保温效果并不十分显著。该场地的天然冻结深度为 1.37 m,但桥台属于三向冻结,横向的热扰动深度要大。尽管台后设置了纵向的保温板,其横向扰动距离也有 3.18 m,为冻深的 2.32 倍。而在有锥台情况下,横向扰动距离可达 7 m 以上。

综合分析结果,结合现场实际工况并考虑工程经济因素,有保温板无锥台(IIC0)的结构型式热影响区域最小,冻结圈的几何指标最优。

### 3 讨论

(1) 桥-堤-堑连续过渡与阴阳坡效应的耦合

当考虑线路纵向坡率的平顺需求和出现局地过大高差时,线路设计中需开挖土体,以至出现桥-堤-堑的连续过渡段,这种情形导致在线路一侧方向出现桥梁-阳坡(路堤)-阴坡(路堑)或是桥



梁-阴坡(路堤)-阳坡(路堑)的热环境条件。这种工况下,过渡段的热影响区域变化更加复杂。结合阴阳坡效应,极有可能在路桥过渡段中,线路纵向出现刚度先变大后减小,或是先减小后增大。

#### (2) 桥台及台后填土模式与冻融作用的耦合

桥台前锥台护坡和台后的填土模式对路桥过渡段热影响区域的判定,不仅直接受填筑模式、桥台型制和动力荷载的综合影响,同时也受热力环境的间接影响。《高速铁路设计规范》<sup>[1]</sup>推荐一段过渡的倒梯形填筑型式,可以较好解决变刚度问题,但此种情况是否具有最佳的热学结果仍不确定。因此,在力学和热学的影响域中找到平衡点,仍需要大量论证和分析。

## 4 结论

通过构建寒区高速铁路桥过渡段的三维几何模型,应用非线性热传导数值分析的手段,得到了以下结论:

(1) 现有工况(I0C1)下,台后的冻融影响区域基本在4 m左右,考虑到台高为4.31 m,可将春融期热影响区域的横向长度扩展为 $1.0H \sim 1.5H$ ,纵向影响深度为该路基条件下的最大冻结深度。

(2) 提出了冻结圈面积、周长、长宽比和横向热扰动距离等几何指标,对比分析了不同工况下的热影响区域和冻结圈的几何特征。

(3) 对比现有路桥过渡段结构和三种优化后结构型式,发现应用保温板、倒T型挡土墙的结构形式,在融期呈现出较小的冻结圈和较快的融化速率,这让路基纵向刚度变化更加平顺。

## 参考文献(References):

- [1] Code for design of high speed railway: TB 10621-2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. [高速铁路设计规范: TB 10621-2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.]
- [2] Code for design of railway earth structure: TB 10001-2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. [铁路路基设计规范: TB 10001-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.]
- [3] Zhao Shiyun, Zhang Xianjun, Shi Gangqiang. General description of key technologies for construction of high speed railway in cold area[J]. Railway Standard Design, 2012(5): 1-9. [赵世运, 张先军, 石刚强. 严寒地区高速铁路关键施工技术综述[J]. 铁道标准设计, 2012(5): 1-9.]
- [4] Zhang Yuzhi, Du Yanliang, Sun Baochen. Roadbed deformation characteristics of roadbed-bridge transition section for high-speed railway in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 39-45. [张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路桥过渡段路基变形特征分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 39-45.]
- [5] Tian Yahu, Liu Jiankun, Peng Liyun. Experiment on ground temperature field and deformation of bridge-subgrade transition section in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 19-24. [田亚护, 刘建坤, 彭丽云. 多年冻土区路桥过渡段变形及地温场试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 19-24.]
- [6] Niu Fujun, Lin Zhanju, Lu Jiahao, et al. Study of the influencing factors of roadbed settlement in embankment-bridge transition section along Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl 2): 372-377. [牛富俊, 林战举, 鲁嘉豪, 等. 青藏铁路路桥过渡段沉降变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 372-377.]
- [7] Jin Huijun, Yu Wenbing, Chen Youchang, et al. (Differential) frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipelines in permafrost regions: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 454-464. [金会军, 喻文兵, 陈友昌, 等. 多年冻土区输油管道工程中的差异性融沉和冻胀问题[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 454-464.]
- [8] Yin Qixiang. Study of thermal stability in embankment-bridge transition section on Qinghai-Tibet Railway under climate warming[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(1): 1-5. [阴琪翔. 气候变暖条件下青藏铁路路桥过渡段长期热稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(1): 1-5.]
- [9] Zhao Xingxiang, Yang Lijun. Analysis and management methods for the road and bridge transition's sedimentation on the soft clay ground in Shanghai[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(6): 37-40. [赵兴祥, 杨丽君. 上海软土地基路桥过渡段沉降分析及治理方法研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(6): 37-40.]
- [10] Wang Youping. Research on the mechanism of differential settlement in embankment-bridge transition section of permafrost regions and prevention methods of the freezing damage[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. [王友平. 冻土地区路桥过渡段不均匀沉降的产生机理及冻害防治技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.]
- [11] Luo Qiang. Dynamic performance analyses and experiment study on bridge/approach embankment of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. [罗强. 高速铁路路桥过渡段动力学特性分析及工程试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.]
- [12] Niu Fujun, Lin Zhanju, Wu Xuyang, et al. Characteristics of subgrade's temperature, moisture and frost heave deformation in Haomen, passenger railway line from Lanzhou to Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1074-1082. [牛富俊, 林战举, 吴旭阳, 等. 兰新客运专线浩门区间路基温度、水分及冻胀变形特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1074-1082.]
- [13] Shi Gangqiang, Zhao Shiyun, Li Xianming, et al. The frost heaving deformation of high-speed railway subgrades in cold regions: monitoring and analyzing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 360-368. [石刚强, 赵世运, 李先明, 等. 严寒地区高速铁路路基冻胀变形监测分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 360-368.]
- [14] Tai Bowen, Liu Jiankun, Li Xu, et al. Numerical model of frost heaving and anti-frost heave measures of high-speed railway subgrade in cold regions[J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 1-9. [邵博文, 刘建坤, 李旭, 等. 寒区高速铁路路基冻胀数值模型及防冻胀措施[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 1-9.]

- [15] Li Xianming, Niu Fujun, Liu Hua, et al. Characteristics and engineering significance of frost heaving in subgrade of Harbin-Dalian high-speed railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 55 – 61. [李先明, 牛富俊, 刘华, 等. 哈大高铁路基面冻胀变形特征及工程意义[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 55 – 61.]
- [16] Cao Li. Study of water thermal characteristics and frost heave process monitoring in the roadbed of cutting section in seasonally frozen soil regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1065 – 1074. [曹立. 我国季节冻土区路堑段路基水热特性及冻胀发展过程监测研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1065 – 1074.]
- [17] Liu Jiankun, Bao Weimeng, Han Xiaogang, et al. Observation and analysis of a new type embankment-bridge transition section in permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 800 – 805. [刘建坤, 鲍维猛, 韩小刚, 等. 多年冻土区路桥过渡段一种新结构的试验观测与分析[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 800 – 805.]
- [18] Sheng Daichao, Zhang Sheng, Li Xi. Effects of train loads on frost heave of embankments[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2186 – 2191. [盛岱超, 张升, 李希. 高速列车与路基冻胀相互作用机理[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2186 – 2191.]
- [19] Sheng D, Zhang S, Niu F, et al. A potential new frost heave mechanism in high-speed railway embankments[J]. *Geotechnique*, 2014, 64(2): 144 – 154.
- [20] Chou Yaling, Sheng Yu, Ma Wei. Calculation of difference in temperature between sunny slope and shady slope along railways in permafrost regions in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Suppl 2): 4102 – 4107. [丑亚玲, 盛煜, 马巍. 青藏高原多年冻土区铁路路基阴阳坡表面温差的计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊2): 4102 – 4107.]
- [21] Chou Yaling, Sheng Yu, Wei Zhenming. Temperature and deformation differences between southern and northern slopes of highway embankment on permafrost[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1896 – 1903. [丑亚玲, 盛煜, 韦振明. 多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1896 – 1903.]
- [22] Chou Yaling, Sheng Yu, Li Yuwen, et al. Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63(1/2): 78 – 86.
- [23] Sheng Yu, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Analysis of difference in thermal state between south faced slope and north faced slope of railway embankment in permafrost region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3197 – 3201. [盛煜, 马巍, 温智, 等. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3197 – 3201.]
- [24] Bonacina C, Comini G, Fasano A. Numerical solution of phase-change problems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, 16(6): 1832 – 1852.
- [25] Lai Yuanming, Wang Qiusheng, Niu Fujun, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 38(2/3): 165 – 184.
- [26] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Liu Zhiqiang, et al. Numerical analysis for cooling effect of open boundary ripped-rock embankment on Qinghai-Tibetan Railway[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006, 49(7): 764 – 772.
- [27] Niu Fujun, Liu Hua, Niu Yonghong. 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. [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.]

## Numerical analysis on freezing characteristics and thermal influence areas of roadbed-bridge transition section of high-speed railway in cold region

LIU Hua<sup>1</sup>, NIU Zelin<sup>1</sup>, NIU Fujun<sup>2,3</sup>, ZHANG Nan<sup>4</sup>, LU Jie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** With the gradual development of high-speed railway in cold region, a large proportion of bridges were used to cross the complex terrain and roadbed-bridge transition sections were appeared. For the discontinuities changes of stiffness between bridge and roadbed, and the anti-frost properties difference of geomaterials, the uneven frost heave could be triggered and reduce the comfort and safety of the vehicle. In this paper, the equations of heat transfer about soil freezing and thawing were considered to analyze the freezing characteristics and changing process, with the parameters of model which derived from Harbin-Dalian high-speed railway. Then in the optimal design stage, three different models were analyzed for the four parameters of frozen area, perimeter, ratio of length and width, and transverse thermal disturbance distance. The results show that the model of insulation layer and non-cone slope provides a better effect for the roadbed-bridge transition section, as just considering thermal influence.

**Key words:** high-speed railway in cold region; roadbed-bridge transition section; freezing characteristics; filling mode; thermal influence areas

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)