

青藏高原多年冻土区铁路路桥过渡段 温度场三维数值分析

阴琪翔¹, 周国庆^{1,2}, 王涛¹, 夏利江¹, 刘宇翼¹

1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116
2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 徐州 221116

摘要 基于过渡段相变三维传热分析模型, 对未来30年路桥过渡段温度场进行分析与预测, 研究了过渡段阴阳坡时空效应对路桥过渡段长期热稳定性的影响。计算结果表明: 随着路桥过渡段运营时间的增长, 各纵断面最大融化深度部位逐渐由过渡段转移到台背后路基, 各横断面最大融深及最大融化速率位置均由阳坡坡脚转移到路基中心与阳坡路肩之间, 相同运营时间, 沿台背方向阴坡坡脚冻土上限变化并不明显; 随着运营时间的增长, 各横断面阳坡坡脚融化速率均大于天然冻土地基融化速率; 各横断面除阳坡坡脚的其余部位在运营25年以前, 人为上限退化率基本小于天然冻土上限, 运营25年后, 人为上限退化率逐渐大于天然冻土上限。

关键词 热稳定性预测; 数值模拟; 路桥过渡段; 多年冻土

中图分类号 TU445

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.007

Numerical Simulation of Thermal Field in Permafrost Embankment-bridge Transition Section of Qinghai-tibet Railway Bridge

YIN Qixiang¹, ZHOU Guoqing^{1,2}, WANG Tao¹, XIA Lijiang¹, LIU Yuyi¹

1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract A 3-D numerical simulation model of the permafrost roadbed-bridge transition section thermal field is built and the finite element method is adopted to predict and compare the thermal field for different transition section heights and different types of permafrost by raising temperature by 2.6°C in the coming 50 years. The calculated results show that with the time, the maximum thawing depth profile parts move gradually from the transition section to the place behind the embankment, and the positions of the largest cross-sectional thawing depth and the maximum thawing rate move from the northern slope foot between the slope shoulders to the subgrade center. The cross sectional northern slope foot thawing rate becomes greater than the natural thawing permafrost foundation rate. For the rest parts of the transect before the operational 25 years, the artificial permafrost table degradation rate is lower than the natural permafrost table, and 25 years later, the artificial permafrost table degradation rate is higher than that of the natural permafrost table gradually.

Keywords heat stability prediction; numerical simulation; roadbed-bridge transition section; permafrost

地球多年冻土区分布广阔, 全球多年冻土区面积约占 22.4%^[1,2]。冻土地区的病害主要来源于冻胀与融沉作用, 其中青藏线路桥过渡段作为整个青藏交通线的重要组成部分, 总陆地面积的 25%, 中国多年冻土区约占国土面积的

收稿日期: 2014-06-10; 修回日期: 2014-07-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB026103); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA06A401); 国家自然科学基金项目(41271096)

作者简介: 阴琪翔, 博士研究生, 研究方向为冻土路基工程, 电子信箱: yinqixiang1988@163.com

引用格式: 阴琪翔, 周国庆, 王涛, 等. 青藏高原多年冻土区铁路路桥过渡段温度场三维数值分析[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 43-48.

其稳定性不仅受大气和人类活动的影响,而且还与其本身的路基与桥台的刚度差、过渡段路基高度、阴阳坡等诸多因素相关。

国内外众多学者已经对路桥过渡段进行了一定的探索和研究,取得了诸多成果。张军等^[3,4]将加筋技术运用到路桥过渡段并进行了数值分析。聂如松等^[5,6]研究了软土地基路桥过渡段不均匀沉降对桥台及桥台桩基的影响。刘建坤等^[7,8]通过对清水河路桥过渡段试验段的持续监测,分析并得出了寒区过渡段路基不同位置地温变化、路基基底沉降变形等规律。牛富俊等^[9]通过对青藏铁路路桥过渡段的实地调查,总结了高原过渡段桥梁走向、路基高度、地基土类型等因素与过渡段沉降大小的关系,并对过渡段沉降与各因素的相关性进行了分析。马巍等^[10,11]基于青藏铁路长期热稳定性监测资料,对铁路沿线不同形式路基和不同类型地基受工程扰动的影响进行了大量分析。然而纵观国内外文献,关于寒区路桥过渡段整体热稳定性研究却鲜有报道。基于此,本文在考虑全球变暖的条件下,对青藏高原多年冻土区试验段未来30年地温变化进行三维模型预测分析。

1 控制微分方程

青藏高原多年冻土区路桥过渡段主要的病害是融沉作用,土体的融沉作用存在相变问题,考虑到土骨架和介质的热传导和冰水相变作用,认为未冻水含量是温度的函数。基于显热容法得出的三维传热主要控制方程^[12]为

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

式中, ρ 为材料密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; c 为材料比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; t 为时间, s ; λ 为材料热传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。相变热是指单位体积土中由于水的相态改变所放出和吸收的热量,其计算式为

$$Q = L\rho_d(w - w_u) \quad (2)$$

式中, ρ_d 为材料干密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; L 为水的结晶或融化热值, J/kg ; w 为材料总水含量; w_u 为冻土中未冻水含量。

相变变化的过程吸收或释放热量,通过定义材料的焓随温度变化来考虑融熔潜热,焓是密度与比热容的乘积对温度的积分,即

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (3)$$

土是由有机质、矿物骨架、水溶液和气体组成的多相细碎介质。冻土与融土的最大区别在于冻土中含有冰。实验表明,土的比热容具有按各物质成分的质量加权平均的性质^[13],即

$$c_{du} = \frac{c_{su} + wc_w}{1 + w} \quad (4)$$

$$c_{df} = \frac{c_{sf} + (w - w_u)c_i + w_u c_w}{1 + w} \quad (5)$$

式中, c_{du} 和 c_{df} 分别为冻土和融土的比热容; c_{su} 、 c_{sf} 、 c_w 和 c_i 分别为融土骨架、冻土骨架、水及冰的比热容。

将式(4)、(5)分别代入式(3)中,可计算出土体在不同时

刻的焓值。

当 $T \geq 273.15 \text{ K}$ 时

$$H = \int \rho c(T) dT = \int \rho_d(c_{su} + wc_w) dT \quad (6)$$

当 $T < 273.15 \text{ K}$ 时

$$H = \int \rho c(T) dT = \int \rho_d[c_{sf} + (w - w_u)c_i + w_u c_w] dT \quad (7)$$

在时间领域内采用差分法,在空间领域上采用有限元法,求解不同时刻空间领域温度场分布。由于

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

可得

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (9)$$

2 计算模型和参数

2.1 计算区域

本文以青藏高原清水河附近多年冻土区试验段作为研究对象^[7,14],该区海拔4450~4520 m,位于青藏高原腹地,属楚玛尔河高平原区,地形平缓,略有起伏,发育开阔型冲沟,沿线多分布有半固定沙丘。过渡段长度14.0 m,宽度8.4 m,路基高度6.0 m,过渡段采用倒梯形,过渡段与路堤接触纵断面坡度为1.0:2.0,路基边坡坡度为1.0:1.5,过渡段填料为粗颗粒填料。年平均地温为 -0.7°C ,为高温不稳定多年冻土,年平均气温为 -4°C 。

对试验段模型进行简化,计算模型如图1所示。其中,区域I为桥台,区域II为路桥过渡段粗颗粒填料,区域III为路堤砂砾填土,区域IV为片石层,区域V为砂类土,区域VI为多年冻土层。区域V和区域VI的厚度分别为3 m和30 m,考虑边界尺寸的影响,取AK长度为12.0 m,DE长度为6.0 m。

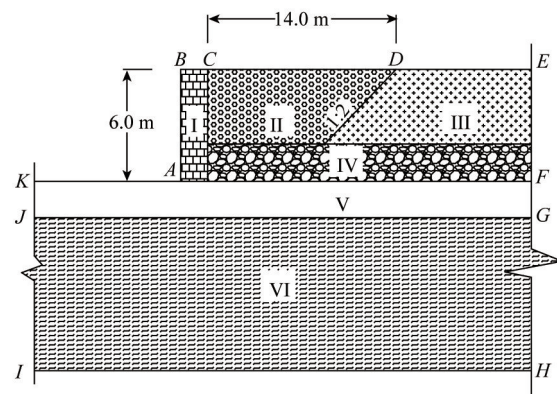


图1 过渡段计算模型剖面示意

Fig. 1 Transition section of the model

2.2 边界条件及物理参数

模型初始温度场以不考虑升温的天然地表温度作为上边界条件进行计算,得出比较稳定的温度场作为地基初始温度场。为确保计算结果的有效性和实用性,施工完成后路堤

区域(过渡段填土和桥台)温度取地基稳定温度场的地表温度^[15]。由于受坡向的影响,路基两侧边坡的太阳辐射、地表湍流等边界条件不同,形成路基横向热交换的不对称,从而形成了过渡段的阴阳坡效应。所计算三维模型如图2所示,计算模型沿路基宽度方向总长为50 m。依据附面层理论,得出各边界温度变化如下^[17,8,16]。

天然地表温度变化为

$$T(t) = -1.5 + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \pi\right) + \frac{2.6t}{365 \times 24 \times 50} \quad (10)$$

路基顶面温度变化为

$$T(t) = 1.5 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \pi\right) + \frac{2.6t}{365 \times 24 \times 50} \quad (11)$$

阳坡坡面温度变化为

$$T(t) = 1.43 + 13.8 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \pi\right) + \frac{2.6t}{365 \times 24 \times 50} \quad (12)$$

阴坡坡面温度变化为

$$T(t) = -1.3 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \pi\right) + \frac{2.6t}{365 \times 24 \times 50} \quad (13)$$

桥台边界温度变化为

$$T(t) = 2.4 + 16 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \pi\right) + \frac{2.6t}{365 \times 24 \times 50} \quad (14)$$

图2中30 m深处地热流密度 q 为0.06 W/m²,模型四周边界设为绝热边界条件。各材料热物理参数见表1^[8,13],表1中 λ 为导热系数。

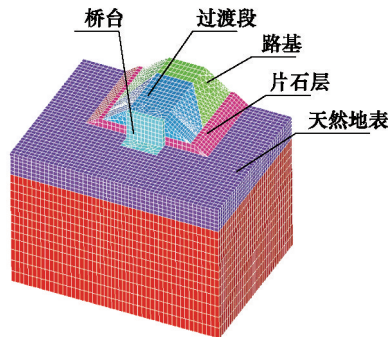


图2 有限元单元划分模型

Fig. 2 Finite element meshes

表1 材料热物理参数

Table 1 Thermo physical parameters of the materials

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$		$\lambda/[\text{J}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})^{-1}]$	
		融化状态	冻结状态	融化状态	冻结状态
混凝土	2500	950	950	10584	10584
粗颗粒填料	1890	1481	1983	8396	6075
砂砾填土	1640	1260	1660	7460	4980
砂类土	1540	1158	1466	6840	3960
多年冻土	1660	1108	1344	5040	5004
片石层	2015	710	710	2150	2150

2.3 模型验证

计算模型获得的地基初始温度场如图3所示,与试验段10月份天然地温孔实测地温^[7]曲线具有较好的一致性。说明所建立模型及采用的边界条件较为合理。地表至地表下3 m之间温度分布有一定差异,有可能是实测地表处植被、风沙等条件的影响,但并未影响深层地基温度场分布。

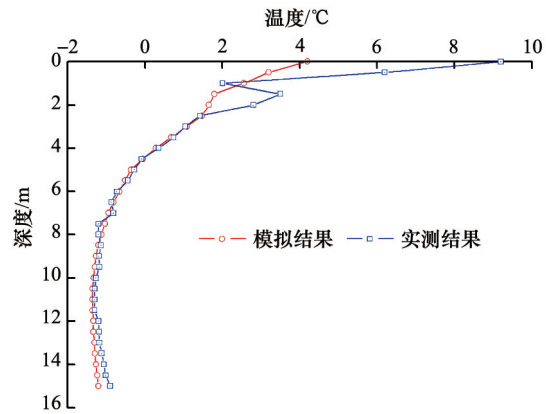


图3 过渡段初始测温对比

Fig. 3 A comparison of the initial temperature in the transition section

3 结果与分析

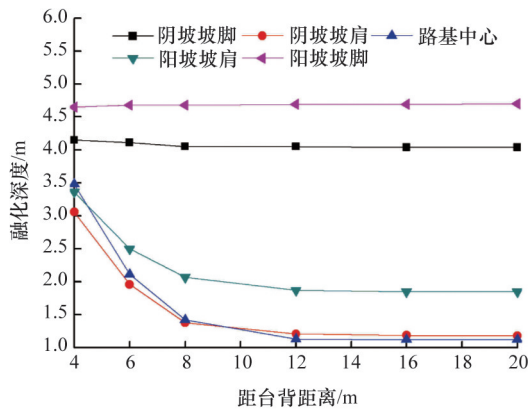
为了掌握随路桥过渡段运营时间的增长,路桥过渡段地温场的变化规律,在台背阴坡坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚沿距台背4,6,8,12,16,20 m处各布设了一条测温孔,监测最大融化深度值(距天然地表距离)。

3.1 过渡段纵断面温度场预测分析

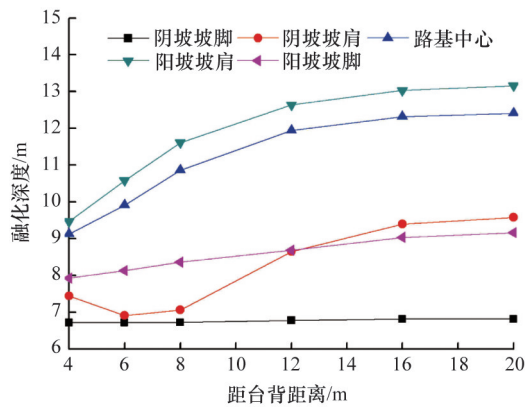
图4为最大融深月份(不同年份)路桥过渡段沿台背方向融化深度分布。由图4可以看出,随完工后年限的增加,台背总体融化深度逐渐增大。完工后第1年沿台背纵断面方向,阴坡坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚最大融化深度依次为4.15,3.06,3.48,3.36,4.65 m,且均位于距台背4 m处;最大融深减少量依次为0.11,1.88,2.36,1.51,0.05 m,减少幅度依次为2.65%,61.44%,67.82%,44.95%,1.08%。完工后第30年沿台背纵断面方向,阴坡坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚最大融化深度依次为6.82,9.58,12.41,13.16,9.17 m,且均位于距台背20 m处;最大融深增加量依次为0.10,2.13,3.18,3.69,1.24 m,增加幅度依次为1.47%,22.23%,26.43%,28.04%,13.52%。

上述数据说明随着距台背距离的增加,第1年过渡段不同纵断面最大融化深度逐渐减小,第30年过渡段不同纵断面最大融化深度逐渐增大,即受时间效应的影响,路桥过渡段最大融化深度部位逐渐由过渡段转移到路基。其原因是不同于普通路基的二维平面计算模型,路桥过渡段为三维空间传热模型,过渡段在受到两侧边坡的热源影响外,还受到了

桥头热源的影响,使得沿台背方向纵断面的最大融化深度,受时间效应影响产生了空间位置的改变。



(a) 第1年10月15日



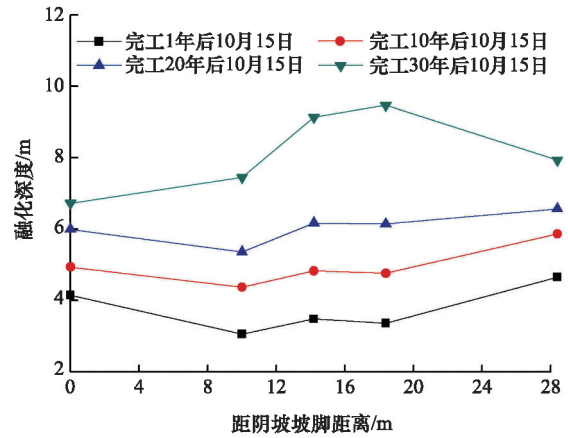
(b) 第30年10月15日

图4 最大融深月份(不同年份)路桥过渡段纵断面融化深度
Fig. 4 Longitudinal profile thawing depth in roadbed-bridge transition section in the maximum thawing depth month (in various years)

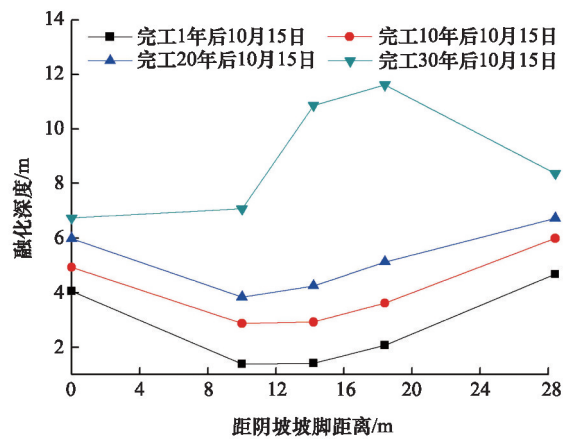
3.2 过渡段横断面温度场预测分析

图5为最大融深月份(不同年份)台后4,8,16 m横断面融化深度分布。图中距阴坡坡脚10.0,14.2,18.4,28.4 m分别对应过渡段的阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩、阳坡坡脚。由图5可以看出,随着距阴坡坡脚距离的增加,各断面在完工后1年、10年、20年的最大融深呈先减小后增大趋势,在完工30年后融深呈先增大后减小趋势;30年后所有横断面最大融深部位均位于距阴坡坡脚18 m处,即阳坡路肩下。完工30年后,台背4 m处阴坡坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚最大融化深度依次为6.72,7.45,9.13,9.74,7.93 m,融化速率依次为8.86,15.14,19.48,21.07,11.31 cm/a。台背8 m处阴坡坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚最大融化深度依次为6.73,7.07,10.86,11.61,8.36 m,融化速率依次为9.24,19.62,32.55,32.89,12.69 cm/a。台背16 m处阴坡

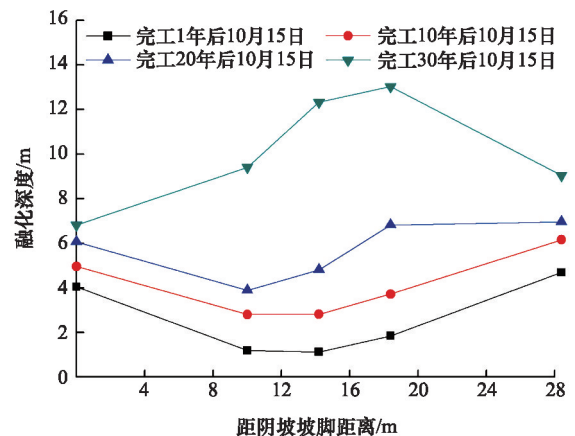
坡脚、阴坡坡肩、路基中心、阳坡坡肩和阳坡坡脚最大融化深度依次为6.82,9.40,12.32,13.03,9.04 m,融化速率依次为9.59,28.31,38.62,38.55,15.0 cm/a。



(a) 台背4 m处横断面



(b) 台背8 m处横断面



(c) 台背16 m处横断面

图5 最大融深月份(不同年份)路桥过渡段横断面融化深度
Fig. 5 Roadbed-bridge transition section profile thawing depth in maximum thawing depth month(in various years)

上述数据说明,随着运营时间的增长,路桥过渡段各横断面最大融深及最大融化速率位置均由阳坡坡脚转移到路基中心与阳坡路肩之间;路桥过渡段受阴阳坡影响,温度场在空间上不对称,时间上不同步。

3.3 过渡段不同断面人为上限相对天然上限变化值预测

过渡段不同断面人为上限相对天然上限变化值,即为过

渡段下最大融化深度与天然地表下最大融化深度的差值,计算结果如图6所示。由图6可知,随着运营时间的增长,各横断面阳坡坡脚融化速率均大于天然上限融化速率,但沿台背纵断面融化速率大小各有不同,随着距台背距离的增加相对融化速率逐渐增大,台背4 m处相对融化速率为3.35 cm/a,台背20 m处相对融化速率为7.45 cm/a;在运营20年期间,各

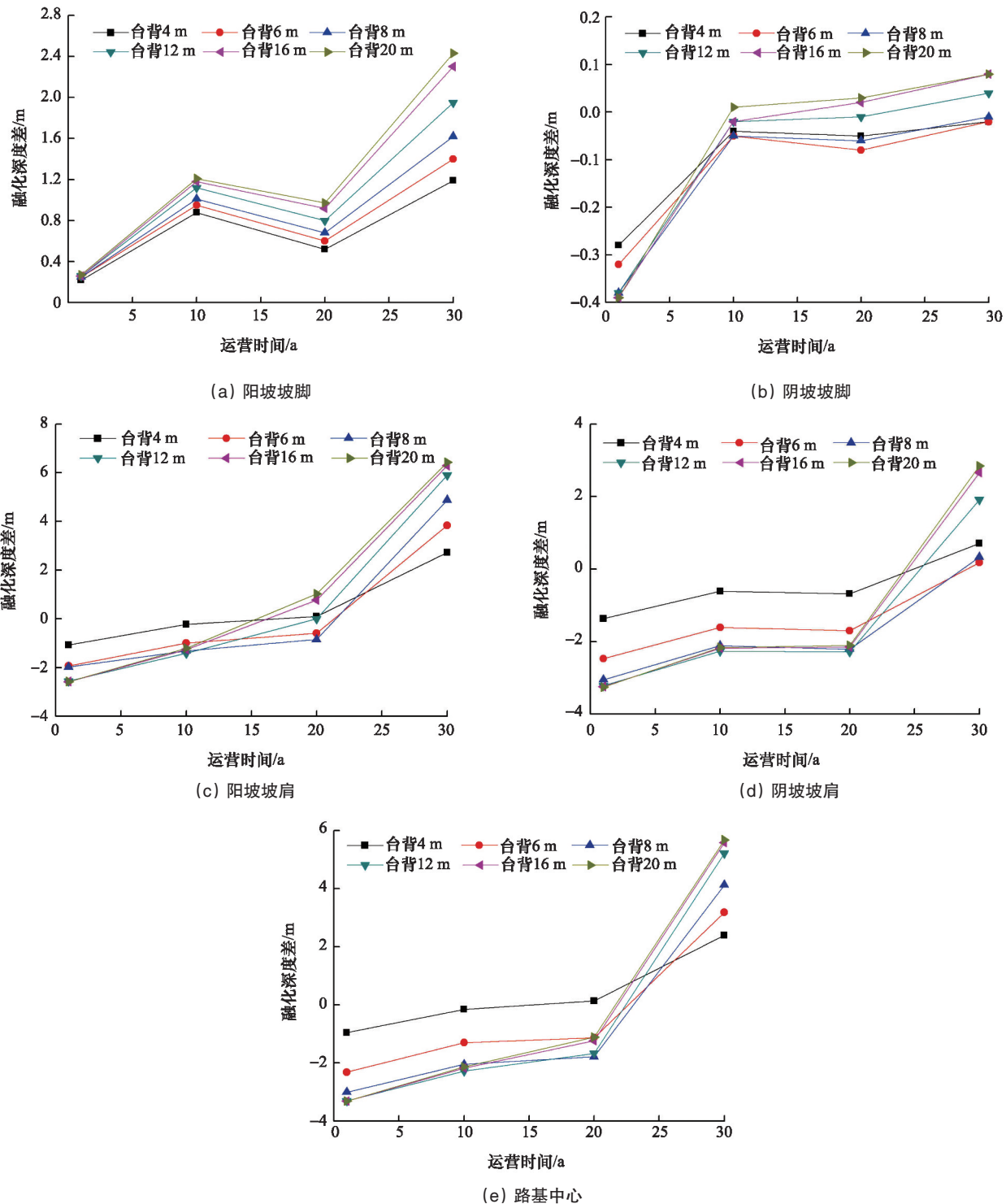


图6 过渡段不同断面人为上限相对天然上限融化深度差变化

Fig. 6 Artificial permafrost table relative to natural permafrost table change of different roadbed-bridge transition sections

横断面阴坡坡脚融化速率基本小于天然地基融化速率,但在运营第10年时融化速率发生了突变,以台背20 m阴坡坡脚为例,在前10年相对融深变化率为4.44 cm/a,后10年相对融深变化率为0.22 cm/a;各横断面其余部位在运营25年以前融化速率基本小于天然地基融化速率,运营25年后人为上限对温度响应更加明显。

上述数据说明,在路桥过渡段施工完成后,受阴阳坡的影响,阳坡坡脚受时空效应响应更加明显,其余部位在运营25年内人为上限基本高于天然上限,说明路基下片石层一定程度的保护了路桥过渡段上限下移。

4 结论

随着路桥过渡段运营时间的增长,台背总体融化深度逐渐增大;运营第1年,不同纵断面融化深度沿台背方向均呈现逐渐减小趋势,运营第30年,不同纵断面融化深度沿台背方向均呈现逐渐增大趋势,最大融化深度逐渐从过渡段转移到过渡段后路基处。

随着运营时间的增长,路桥过渡段各横断面最大融深及最大融化速率位置均由阳坡坡脚转移到路基中心与阳坡路肩之间。

受阴阳坡效应的影响,过渡段运营期间,阳坡路脚人为上限均大于天然冻土上限;同时由于片石层的保温作用,使得路桥过渡段在运营25年内,除阳坡坡脚外的其他部位人为上限得到了保护。

参考文献 (References)

- [1] Yershov E D. General geocryology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 37-41.
Zhuo Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 37-41.
- [3] 张军, 郑俊杰, 马强, 等. 路桥过渡段路堤加筋现场试验和数值模拟分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 87-90.
Zhang Jun, Zheng Junjie, Ma Qiang, et al. Experimental and numerical simulation analysis on geosynthetic reinforced embankment at bridge approaches[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2011, 39(9): 87-90.
- [4] Graeme D, Skinnerra R, Kerry R. Design and behaviour of a geosynthetic reinforced retaining wall and bridge abutment on a yielding foundation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23: 234-260.
- [5] 聂如松, 冷伍明, 律文田. 软基台后路基填土对桥台桩基侧向影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1487-1490.
Nie Rusong, Leng Wuming, Lü Wentian. Experimental study on lateral influence of embankment construction on piles in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1487-1490.
- [6] 陈雪华, 律文田, 王永和. 台后填土对桥台桩基的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 910-913.

- Chen Xuehua, Lü Wentian, Wang Yonghe. In-situ test of negative friction of abutment piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 910-913.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
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.
- [9] 牛富俊, 林战举, 鲁嘉濠, 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(S1): 372-377.
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(S1): 372-377.
- [10] 马巍, 穆彦虎, 李国玉, 等. 多年冻土区铁路路基热状况对工程扰动及气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(3): 478-489.
Ma Wei, Mu Yanhu, Li Guoyu, et al. Responses of embankment thermal regime to engineering activities and climate change along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(3): 478-489.
- [11] 马辉, 刘建坤, 张弥, 等. 青藏铁路建设中的冻土工程问题及其应对措施[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 85-106.
Ma Hui, Liu Jiankun, Zhang Mi, et al. Frozen soil problems in Qinghai-Tibet railway construction and engineering measures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 85-106.
- [12] 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 Ziwan, Cheng Guodong, Zhu Linnan, et al. Roadbed engineering in permafrost regions[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988.
- [13] 徐教祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 史聪慧. 青藏铁路清水河高温高含冰量冻土区“以桥代路”工程稳定性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
Shi Conghui. Research of engineering stability for the bridge-instead-of-embankment structure[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy, 2007.
- [15] 赖远明, 张明义, 李双洋, 等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 52-53.
Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Li Shuangyang, et al. Theory and application of cold regions engineering[J]. Beijing: Science Press, 2009: 52-53.
- [16] Qin D H. The comprehensive evaluating report on the environment evolvement in west China[M]. Beijing: Science Press, 2002, 57-58.

(责任编辑 赵业玲)