

文章编号:1671-1637(2016)04-0068-10

高寒高海拔多年冻土区拓宽路基差异沉降

穆柯,袁堃,金龙,董元宏

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路
工程安全与健康国家重点实验室,陕西 西安 710075)

摘要:为了研究高寒高海拔多年冻土区拓宽路基面层吸热对下伏多年冻土温度与沉降的影响,建立了基于热力耦合理论的差异沉降计算的有限元模型,并利用实体工程监测数据对模型进行了修正,分析了不同季节、不同填高与阴阳坡工况下拓宽侧路基差异沉降分布规律,确定了多年冻土区最优路基拓宽位置。研究表明:多年冻土区拓宽路基最大融深与沉降均出现在秋季,10月份的变形最不利,病害特征最突出,其中4 m填高路基第10年最大差异沉降为16.9 cm,分别为7、1、4月份沉降的1.1、1.4、1.7倍;差异沉降与路基填高存在正相关性,当路基填高分别为2、4、6 m时,10年内路基的差异沉降分别为13.2、16.9、18.1 cm;阴坡侧拓宽路基的温度与沉降变化小于阳坡侧,在10年内,阳坡侧拓宽路基底面最大升温为1.3℃,阴坡侧为0.6℃,阳坡侧拓宽路基最大差异沉降为16.9 cm,阴坡侧为12.3 cm;即使阴坡侧拓宽,差异沉降仍使拓宽路基顶面形成一个斜率为2%~3%的斜坡,进而使路面产生较大附加应力,最终造成结构层病害。

关键词:路基工程;冻土路基;差异沉降;阴阳坡效应;热力耦合理论;融沉监测

中图分类号:U416.168

文献标志码:A

Differential settlement of widened subgrade in cold and high-altitude permafrost regions

MU Ke, YUAN Kun, JIN Long, DONG Yuan-hong

(State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions,
CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the influence of heat absorption of widened subgrade surface on underlying permafrost's temperature and settlement in cold and high-altitude permafrost regions, a finite element model computing the differential settlement of widening subgrade based on the thermal-mechanical coupled theory was established and corrected by the monitoring data of practical engineering, the differential settlement distributions under diverse seasons, different filling heights and working conditions at sunny and shady slope sides were studied, and the optimal widened location of subgrade in permafrost regions was determined. Research result shows that the maximum melting depth and settlement of widened subgrade appear in autumn, October is most unfavorable for subgrade settlement, and disease characteristics are remarkable. When the filling height of subgrade is 4 m, the maximum differential settlement of subgrade is 16.9 cm and 1.1, 1.4, 1.7 times larger in October than in July, January and April within 10 years. Within 10 years, when the filling heights of subgrade are 2, 4 and 6 m respectively, the

收稿日期:2016-06-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01,2014BAG05B03);交通运输部建设科技项目(2013 318 490 010);交通运输部应用基础研究项目(2014 319 495 090);陕西省青年科技新星计划项目(2016KJXX-91)

作者简介:穆柯(1983-),男,陕西西安人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司高级工程师,工学博士,从事冻土区道路工程研究。

differential settlements are 13.2, 16.9 and 18.1 cm respectively, so the differential settlement increases with the increase of filling height. Within 10 years, the maximum rising temperature of subgrade is 1.3 °C at sunny slope side and 0.6 °C at shady slope side, the maximum differential settlement of subgrade is 16.9 cm at sunny slope side and 12.3 cm at shady slope side, so the temperature and settlement of widened subgrade change smaller at shady slope side than at sunny slope side. Even widening subgrade at shady slope side, the differential settlement of subgrade still results in a 2%-3% slope at the top of subgrade, the slope will result in the great additional stress of pavement, so that the diseases of pavement structure occur. 2 tabs, 15 figs, 23 refs.

Key words: subgrade engineering; permafrost subgrade; differential settlement; shady-sunny slope effect; thermal-mechanical coupled theory; thawing settlement monitoring

Author resume: MU Ke(1983-), male, senior engineer, PhD, +86-29-88853000, changdamuke@163.com.

0 引言

差异沉降是路基拓宽后最常见的病害形式,在一般地区,路基差异沉降主要成因为新旧路基填料固结程度不同,旧路基经常年运营,沉降区域稳定,而拓宽路基在自重与行车荷载作用下,需进行一段时间的固结沉降,才能与旧路变形一致。在高寒高海拔多年冻土区,路基拓宽工程在承受新旧路基填料引起的差异沉降的同时,拓宽部位下伏多年冻土受路面吸热影响不断退化,且二者叠加作用,使多年冻土区拓宽路基差异沉降严重程度更甚于一般地区,如图1所示,差异沉降一方面使路基内产生微裂纹,增大路基失稳风险,另一方面,使新旧路基搭接处产生应力集中,造成路面结构层贯穿性开裂,进而产生严重路面病害,影响行车安全。

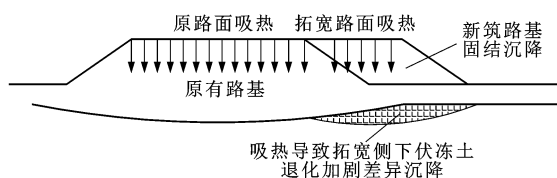


图1 拓宽路基病害机理

Fig. 1 Disease mechanism of widened subgrade

对于由新旧路基填料固结程度不同而引发的差异沉降,从病害产生机理到施工工艺,国内已进行系统研究,傅珍等研究了拓宽方式对高速公路差异沉降影响,对差异沉降进行等级划分^[1-3],并计算了差异沉降对路基与路面结构的影响^[4-5];翁效林等研究了拓宽软土路基差异沉降,与融化后冻土路基性能相似^[6-7]。上述研究主要集中在材料固结对差异沉降的影响,未考虑多年冻土区特有的路面吸热对差异沉降的影响。目前,关于多年冻土区路面吸热造

成普通路基沉降问题,已有相关研究,Lai等对沥青路面吸热所造成冻土融化问题进行了大量二维、三维数值分析,基于附面层理论提出了整套数值传热计算方法^[8-9];Zhang等提出以块石处治冻土路基,并深入研究其降温机理^[10];Yu等在对青藏铁路冻土区工程实际病害调查基础上,评价了现有冻土路基处治措施实际效果^[11];Mu等对冻土区块石路基降温机理与效果进行研究^[12-13]。这些研究重点关注了冻土融化对普通路基的影响,但对于拓宽路面吸热导致下伏冻土融化,进而造成的差异沉降问题,则鲜有涉及。随着青藏地区社会经济发展,对高等级公路需求日趋迫切,在未来高等级公路建设中,采用拓宽旧路的形式进行公路改建,成为该地区道路设计者亟需解决的问题。

本文基于青藏公路沿线气象监测数据,结合地质勘察资料,采用热力耦合分析的数值计算方法,研究了拓宽侧路面吸热对新老路基差异沉降的影响,分析了冻土退化对拓宽路基沉降的影响规律,提出了科学的路基拓宽策略,并结合青藏公路K2981局部拓宽路段现场监测数据,对拓宽路基实际效果进行了验证。

1 理论基础

1.1 热传导理论

在空间内以三维坐标形式表示路基几何特征, O 为坐标原点, x 、 y 、 z 分别为路基的长、宽、高,路基温度梯度可表示为

$$T_g = \frac{l\partial T}{\partial x} + \frac{j\partial T}{\partial y} + \frac{m\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

式中: T 为计算点温度; T_g 为温度梯度; l 、 j 、 m 分别为 x 、 y 、 z 方向热导系数,假定土体导热各项均质,

即 $l=j=m$ 。

假设模型土体共有 n 层,第 i 层土的热导系数、导温系数分别为 λ_i 和 α_i ($i=1,2,\dots,n$); t 为时间;土层厚度为 h_i ;温度为 T_i ; g_i 为 i 层厚度之和,其中 g_0 等于 h_1 。各层温度函数 T_i 需满足

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) & 0 \leq z < g_0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) & g_0 \leq z < g_1 \\ \vdots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) & g_{n-2} \leq z \end{cases} \quad (2)$$

1.2 沉降计算理论

将传热计算结果导入力学计算模型,分析其沉降规律,为了简化计算,本文假定路基材料为线弹性模型,材料均质且各向同性,在空间体系中主应力与偏应力应满足

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

在微元体中主应力与偏应力应满足

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为材料弹性模量; μ 为泊松比; ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向应变; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向应力; γ_{xy} 、 γ_{xz} 、 γ_{yz} 分别为 xOy 、 xOz 、 yOz 平面内剪应变; τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 分别为 xOy 、 xOz 、 yOz 平面内应力; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向位移分量。

2 模型建立

2.1 模型几何尺寸

参考一般地区拓宽路基数值建模尺寸标准,并依据青藏公路沿线地质调查情况进行本文模型建立,该地区路基高度大都分布在 2~5 m 之间,路基高度建模尺寸分别取 2、4、6 m;通过初步计算可得,超过坡脚 20 m 对计算结果影响可忽略不计,考虑本模型左右两侧后期拓宽影响,取旧路基两侧坡脚外 30 m、地表以下 30 m 为计算边界;依据该地区地质勘查资料,地基部分模型分别取 1 m 草皮土、3 m 黏粉土、26 m 卵石土。路基几何模型见图 2。

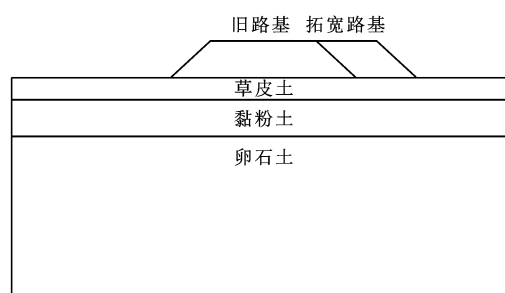


图 2 几何模型

Fig. 2 Geometric model

采用渐缩式网格划分图 2 几何模型,靠近路基与拓宽部位网格边长为 30 cm,远端边界处网格边长为 1.2 m,该种网格划分形式可在满足精度要求的同时极大缩减了计算时间,见图 3。

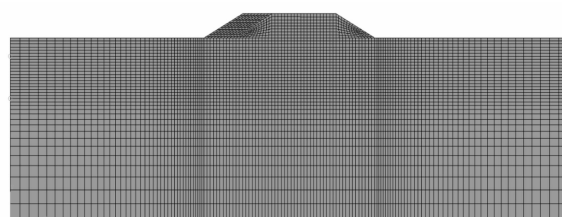


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

采用热力耦合的方式进行模型计算,首先根据气候监测数据,进行热传导计算,得出不同季节、填高、阴阳坡效应下路基冻土上限退化状况及其温度场特征;之后将温度计算数据导入力学分析模型,确定在不同上限退化工况下拓宽路基应力与沉降分布规律,为评价路面吸热导致的拓宽路基差异沉降提供理论基础。

2.2 模型计算参数

为了考虑冰水相变对土体热力学性质的影响,分别提供材料冻融状态下的计算参数。参考国内外研究资料^[14-16],温度计算所需主要参数有:冻结时导

热系数 λ_f 、融化时导热系数 λ_u 、冻结时土的比热容 C_f 、融化时土的比热容 C_u 与土的相变热 L ,热传导参数见表 1。材料力学参数主要由密度、弹性模量与泊松比组成,参考国内外研究资料^[17-20],材料参数见表 2。

根据上述参数,首先进行路基温度场计算,之后

表 1 热传导参数

Tab. 1 Parameters of heat conduction

参数	$\lambda_f/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	$C_f/[\text{MJ} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}]$	$\lambda_u/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	$C_u/[\text{MJ} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}]$	$L/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
路基	1.980	1.913	1.919	2.227	20.4
草皮土	1.431	1.884	1.258	2.271	70.3
黏粉土	1.351	1.879	1.125	2.357	40.3
卵石土	1.824	1.846	1.474	2.099	37.7

表 2 沉降计算参数

Tab. 2 Calculating parameters of settlement

参数		密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
路基	冻结	1 950	11	0.30
	融化		6	
草皮土	冻结	1 750	3	0.35
	融化		1	0.40
黏粉土	冻结	1 700	7	0.30
	融化		3	
卵石土	冻结	1 700	8	
	融化		8	

将温度计算结果导入力学计算模型,获取路面吸热对拓宽路基差异沉降影响数据。

2.3 边界条件

路面、边坡、天然地表等边界受辐射、湍流、热传导等因素影响,热流分布情况复杂,为简化其边界条件^[21-23],采用附面层理论,以统一的正弦函数温度曲线,表征复杂的外部边界条件,依据 K2981 野外试验段气象站与地表测温电缆实测数据,将边界条件拟合合成式(5)的函数形式,来表征高原冻土地区四季温度变化规律,计算模型内各边界正弦函数曲线见表 3,通式为

$$T_f = T_0 - \frac{A}{2} \sin(\pi t/4\ 380 + \pi/2) + g(t) \quad (5)$$

式中: T_f 为拟合后的附面层温度; T_0 为平均气温; A 为最大温差; $g(t)$ 为考虑气候变暖的年均增温率,由于本文最长预测拓宽后第 10 年内温度与沉降规律,该项对结果影响较小,故而忽略。

表 3 计算模型边界条件

Tab. 3 Boundary conditions of calculating model

边界类型	边界函数
路面边界	$T=2.5+15.15\sin(\pi t/4\ 380+\pi/2)$
天然边界	$T=0.5+11.5\sin(\pi t/4\ 380+\pi/2)$
阳坡边界	$T=2.3+14.5\sin(\pi t/4\ 380+\pi/2)$
阴坡边界	$T=-1.8+14.5\sin(\pi t/4\ 380+\pi/2)$

3 试验路段监测与模型验证

为了获取拓宽路基温度与差异沉降实测数据,使研究结果更为真实可靠,于青藏公路 K2981 处布设试验断面,进行野外长期观测,为验证模型准确性提供依据;对于多年冻土区,拓宽部位冻土上限年变化值与年沉降变化值 2 个指标尤为关键,上限变化反映了拓宽路面吸热对下伏冻土影响程度,而年沉降变化是冻土融化对路基稳定性影响的最直接表达,二者计算的精度是验证模型是否合理的重要依据,本文选取二者实测值与计算值进行对比。

该段路基填高为 2.5 m,坡度为 1:1.5,年均地温约为-0.5℃,冻土上限为 3 m,地质勘查资料显示该路段地下冰较厚,融沉严重,阴阳坡效应显著,在青藏公路具有代表性。该路段原路基宽度为 10 m,阴坡侧加宽 3.5 m 作为停车港湾,加宽长度为 200 m,见图 4、5。

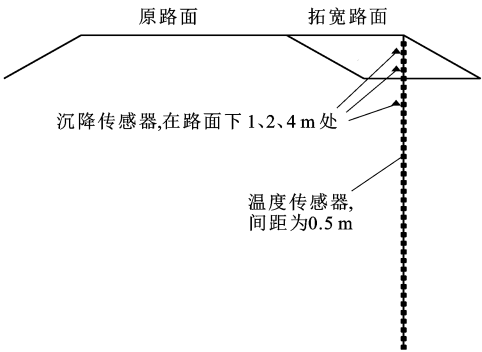


图 4 监测传感器分布

Fig. 4 Distribution of monitoring sensors

由图 6、7 实测数据可知:路基拓宽后受路面吸热影响,升温效果明显,5 年内顶面温度由 1.5℃,提升到 6.5℃;多年冻土区路基拓宽后,加铺面层会对路基产生极大的热效应,加速下伏冻土融化,加剧差异沉降病害程度,在每年 4 个季节中,1~4 月份沉降几乎不发展,4~7 月份沉降发展开始加速,7~



(a) 路面



(b) 边坡

图5 拓宽路段

Fig.5 Widened road section

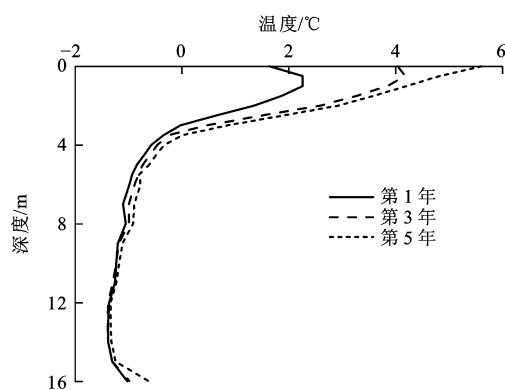


图6 拓宽路基实测温度

Fig.6 Actual measuring temperatures of widened subgrade

10 月份沉降达到最大,尤其 10 月份左右到达峰值,10 月份至来年 1 月份沉降趋于平缓;沉降实测数据一年四季周期变化规律显著,且沉降量随拓宽路基修筑时间延长逐渐放缓。

由图 8、9 拓宽路基监测值与计算值对比可知:计算模型具有较高精度,冻土上限计算最大误差为 5.7%,沉降计算最大误差为 12.0%,满足工程要求,但实测数据周期较短,仅为 5 年,且从第 5 年开始实测值与计算值的误差有逐渐扩大趋势,应根据实测数据逐年对本模型进行修正,以保证预测精度;沉降实测值较计算值偏大,其原因为数值分析过程中假定旧路沉降已趋于稳定,计算值为新旧路基单

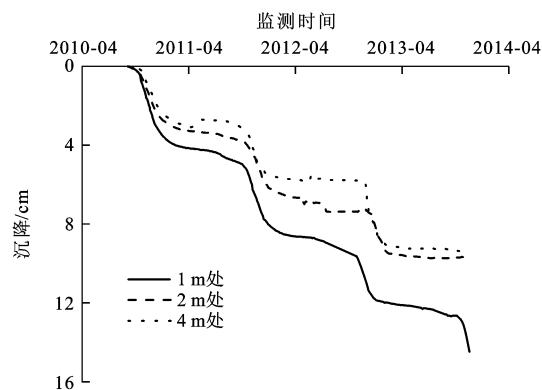


图7 拓宽路基实测沉降

Fig.7 Actual measuring settlements of widened subgrade

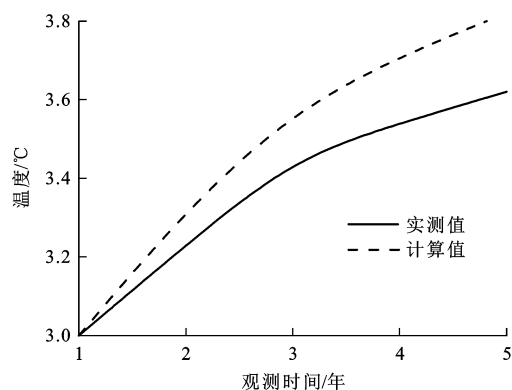


图8 冻土上限实测值与计算值对比

Fig.8 Comparison between measured and calculated values of permafrost table

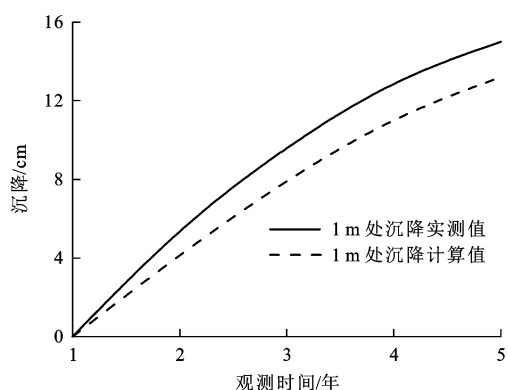


图9 沉降实测值与计算值对比

Fig.9 Comparison between measured and calculated values of settlement

纯差异沉降,而在实测数据中,除包括差异沉降外,还包括路基整体沉降,但总沉降部分对路基病害影响较小,因此,须进行一定折减,去除总沉降部分,才能完全反映拓宽路基差异沉降。

4 计算结果分析

4.1 不同季节拓宽路基温度与沉降

4.1.1 不同季节的拓宽路基温度场

为了研究不同季节下拓宽路基温度与沉降特

征,对第10年1、4、7、10月份温度场进行计算,并在温度计算的基础上,进行热力耦合计算,分析相应温度工况下拓宽路基沉降情况。路基底面温度见图10,其中横坐标为计算点至阳坡坡脚距离,距离阳坡坡脚0~5 m范围为阳坡,5~22 m范围为路基,22~27 m范围为阴坡。

由图10可知:在1、4月份,路基底面中心处温度分别为 0.2°C 、 -0.1°C ,拓宽路基均处于回冻状态,但回冻程度不同,其中1月份左右时,外界气温虽然达到最低,但由于经过前一年暖季的路面吸热

蓄热过程,路基体内融化核并未完全回冻,此时路基体内融化核形态较大,4月份为外界气温拐点,1~4月份温度虽有回升,但总体气温仍在 0°C 以下,4月份之后温度逐渐回暖,气温升至 0°C 以上,此时路基处于最大回冻状态;7、10月份路基底面中心处温度分别为 1.9°C 、 4.7°C ,10月份温度大于7月份,7月份路基内形成融化盘,路基阴阳坡处温度差异开始显现,7~10月外界气温虽有所回落,但仍处于 0°C 以上,融化盘进一步发展,于10月份达到最大,拓宽路基处于最不利状态。

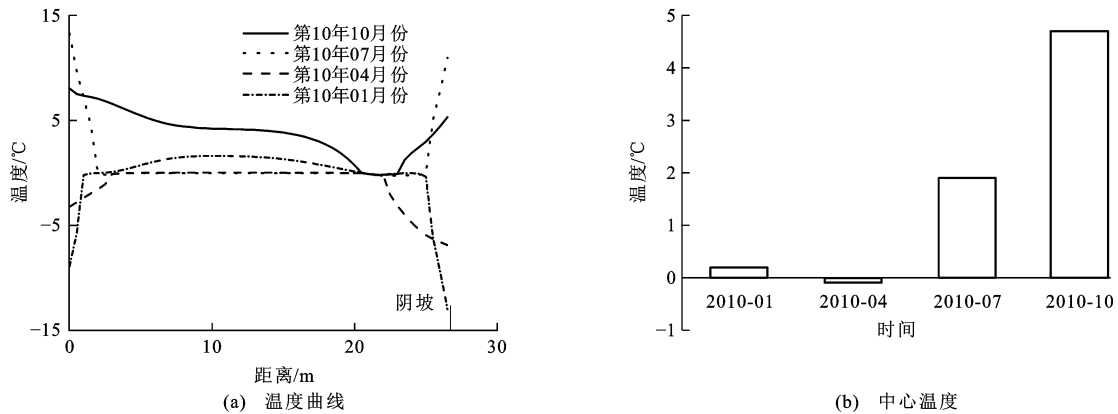


图10 不同月份路基底面温度

Fig. 10 Bottom temperatures of subgrade at different months

4.1.2 不同季节拓宽路基沉降

在第10年1、4、7、10月份温度场计算结果基础上,进行热力耦合分析,以计算点至阳坡坡脚距离为横坐标,得到其沉降规律见图11。不同月份,路基拓宽侧沉降严重,但沉降中心并不在拓宽路基顶部中心,而是位于靠近边坡处,其原因为阳坡处冻土的融化造成坡脚软弱,路基沿旧路基边坡向下滑移,造成融沉中心向边坡倾斜;10月份拓宽路基沉降最大,与温度分析结果中10月份路基处于最软弱状态

一致;7月份融沉发展开始显著,沉降处于上升阶段;1~4月份处于冷季,路基大部处于冻结状态,沉降较小;10月份沉降最大,4 m填高拓宽路基沉降达到16.9 cm,7月份次之,达到15.8 cm,之后为1月份,为12.4 cm,4月份沉降最小,为10.1 cm。

4.2 不同填高下拓宽路基温度与沉降

4.2.1 不同填高拓宽路基温度场

横坐标为计算点至路基中心处距离,路面幅宽为12 m,坡度为1:1.5,2、4、6 m填高路基温度场

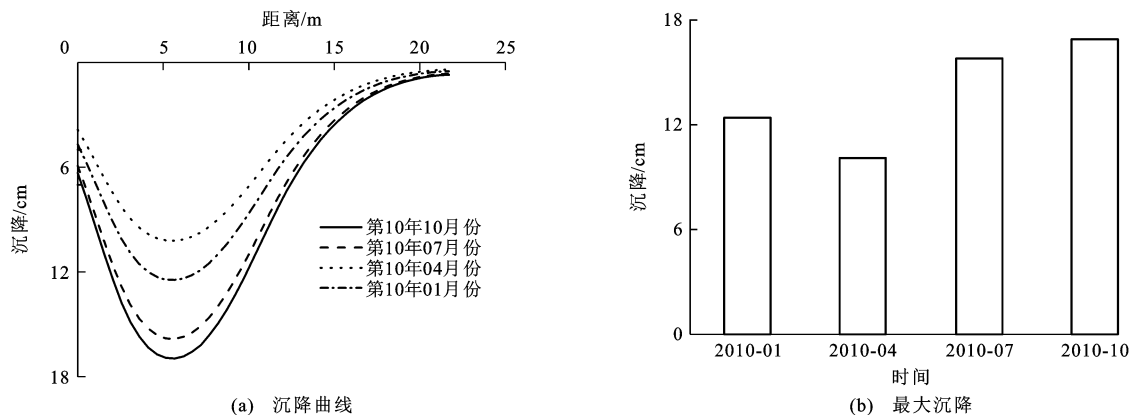


图11 不同月份拓宽路基沉降

Fig. 11 Settlements of widened subgrade at different months

计算结果见图 12。在最大融深季节(10 月份),2、4、6 m 拓宽路基均处于最大融化状态;随着路基高度的抬升,拓宽路基体内最大融化下限不断提高,以原地面为参考,当路基高度分别为 2、4、6 m 时,其冻土上限分别为 4.5、1.8、1.6 m,路基底面中心处温度分别为 8.2 °C、4.7 °C、1.2 °C,提高填土高度可有效增大热阻,降低路基底面温度,但这种降温效果虽然在 2~4 m 填高时显著,但填土高度大于 4 m 时降温效果开始衰减;在拓宽路基阳面坡脚处,均会形成较大融深,受路基填高影响较小,与外界气温及冻土状况联系密切,同时考虑到路基坡脚处容易形成积水面,且受施工作业面限制,边坡及坡脚处不宜

被压实,因此,极易在此形成薄弱点,进而影响路基稳定性。

4.2.2 不同填高的拓宽路基沉降

在 2、4、6 m 填高拓宽路基温度场计算结果的基础上,以计算点至阳坡坡脚距离为横坐标,进行热力耦合分析,结果见图 13。随着路基填筑高度的增大,拓宽部位最大沉降区域呈不断增大趋势,且沉降范围不断向原路基体延伸;在重力作用下,2、4、6 m 填高拓宽路基最大沉降分别为 13.2、16.9、18.1 cm,说明提升路基高度虽然有保护冻土维持冻土上限稳定的作用,但依然不能有效降低新旧路基差异沉降。

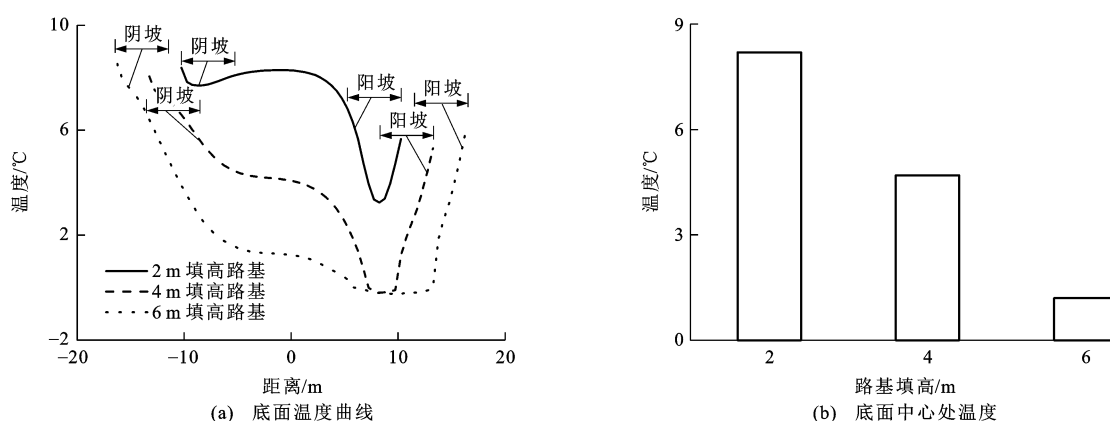


图 12 不同填高拓宽路基温度分布

Fig. 12 Temperature distributions of widened subgrades with different filling heights

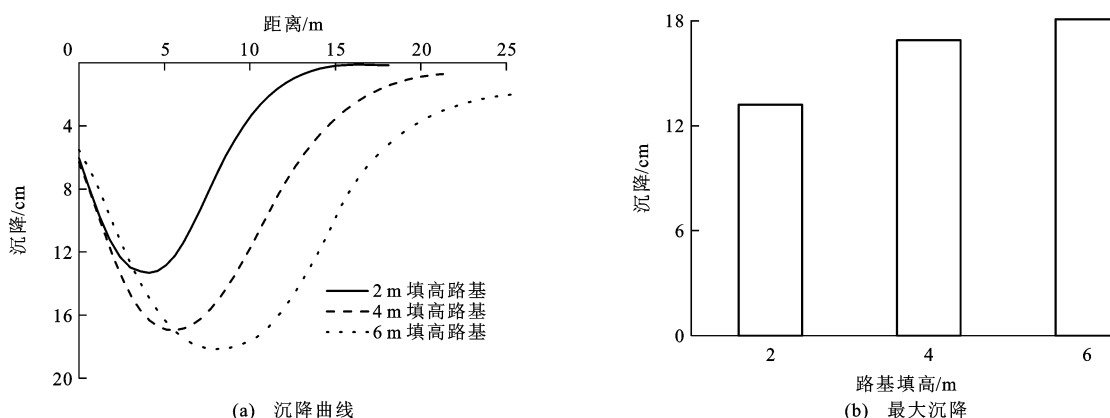


图 13 不同填高拓宽路基沉降分布

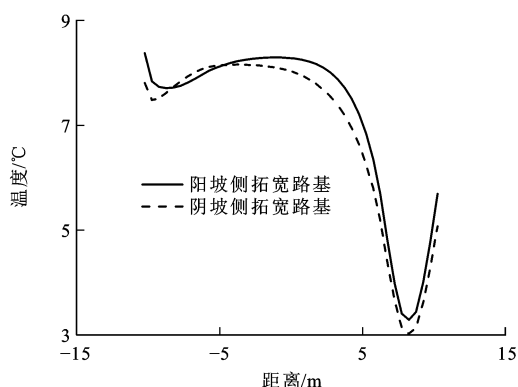
Fig. 13 Settlement distributions of widened subgrades with different filling heights

4.3 阴阳坡面拓宽路基温度与沉降

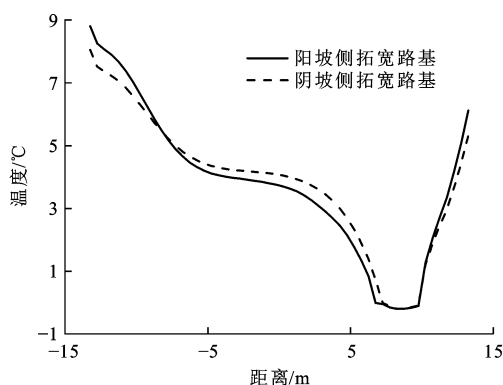
4.3.1 不同坡面拓宽路基温度场

2、4、6 m 拓宽路基阴阳坡底面温度见图 14: 10 月份为路基体最大融化季节,路基拓宽均会加大路基最大融深,其中阳坡拓宽后 10 年内最大融深增加了 0.3~0.6 m,阴坡侧由于气温较低,拓宽后最大融深增大了 0.1~0.3 m,虽然阴坡拓宽最大融深

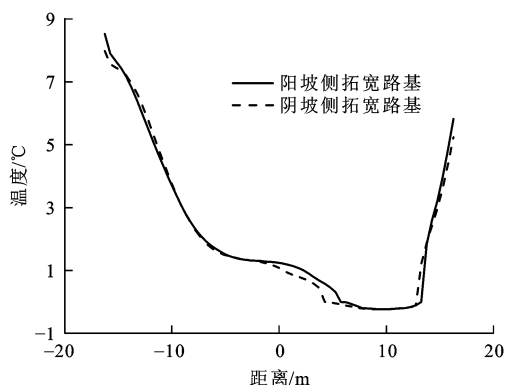
增大不显著,但从升温趋势分析,阴坡侧拓宽后第 10 年最大基底升温约为 0.6 °C,而阳坡侧基底最大升温高达 1.3 °C,说明阳坡拓宽对温度场改变更为敏感。不同阴阳坡侧路基拓宽的温度形态不同,阴坡拓宽后,最大融化深度为 4.5 m,上限被抬升;第 10 年,阴阳坡路基已形成非对称的融化盘,即阳坡融深不断加大,阴坡由于融化较慢而形成突出的



(a) 2 m 填高路基



(b) 4 m 填高路基



(c) 6 m 填高路基

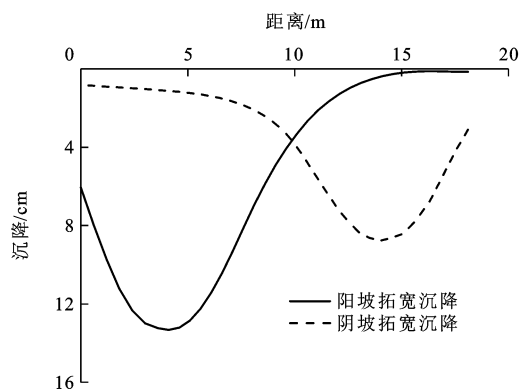
图 14 不同填高阴阳坡侧拓宽路基温度分布

Fig. 14 Temperature distributions of widened subgrades with different filling heights at sunny and shade slopes sides

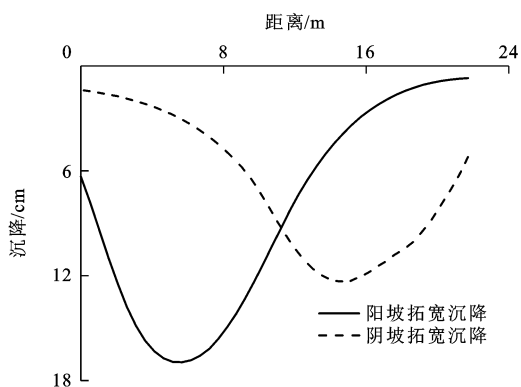
冻结峰面,影响拓宽路基稳定性。

4.3.2 不同坡面拓宽沉降

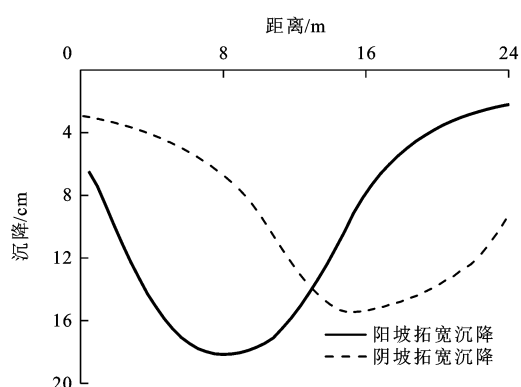
在不同阴阳坡面拓宽路基温度场计算结果的基础上,进行热力耦合分析,以计算点至阳坡坡脚距离为横坐标,得到其沉降规律见图 15。在阴阳坡侧拓宽均会加速拓宽侧路基沉降,其中,阳坡侧拓宽路基沉降较阴坡大 4~6 cm,且随着路基填高的增大而增加,其原因主要是由于阴坡侧路基温度低,下伏冻土上限高,在路基体内形成冻结面,一定程度上提高了阴坡侧路基强度;从路基修筑 10 年内沉降发展曲线可知,拓宽后的路基一般在第 1、2 年内会有较大



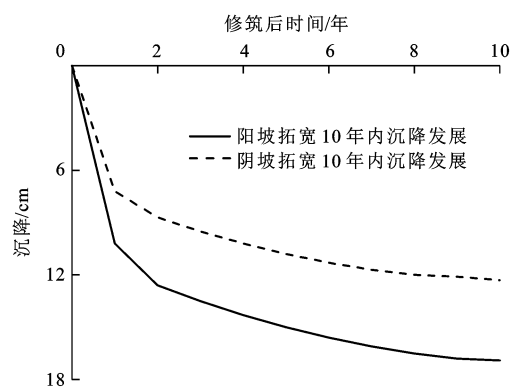
(a) 2 m 填高路基沉降



(b) 4 m 填高路基沉降



(c) 6 m 填高路基沉降



(d) 4 m 填高路基 10 年沉降

图 15 拓宽路基沉降对比

Fig. 15 Settlement comparison of widened subgrades

沉降,沉降比例占总沉降的 60%~80%,由于拓宽路基宽度为 5 m,沉降为 12.3 cm(阴坡)与 16.9 cm(阳坡),使拓宽路基顶面形成一个斜率为 2%~3%的坡,该斜坡是导致拓宽部位路面结构层病害的最主要原因。

5 结 语

(1)拓宽路基温度与沉降分布规律有显著季节性,从温度场角度分析:冬、春季处于冻结状态,融深小,路基整体强度高;夏、秋季处于融化状态,融深小,路基与地基整体软弱。从沉降角度分析:秋季的 10 月份沉降最大,为路基最不利受力季节,夏季的 7 月份次之,之后为冬季的 1 月份,春季的 4 月份路基稳定性最高,路基差异沉降最小。

(2)在阴阳坡处拓宽路基,均会加速拓宽侧路基沉降发展,但阳坡拓宽对拓宽路基温度与沉降影响更加显著,阴坡拓宽后第 10 年内最大升温约为 0.6℃,而阳坡拓宽后第 10 年基底最大升温高达 1.3℃,此外阳坡拓宽路基差异沉降较阴坡大 4~6 cm,这说明阳坡拓宽对温度与沉降改变更为敏感。

(3)多年冻土区拓宽路基差异沉降较一般地区严重,且沉降造成的病害一般在路基修筑后第 1、2 年内就会显著出现,差异沉降不仅使新旧路基交界处出现严重路基病害,而且会使路面结构层出现极大的附加应力,导致路面早期病害。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 刘维正,徐林荣,左 坤,等.桩筏地基加固对紧邻既有线路基的影响[J].交通运输工程学报,2015,15(3):16-26.
LIU Wei-zheng, XU Lin-rong, ZUO Shen, et al. Influence of pile-raft foundation reinforcement on subgrade of adjacent existing railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 16-26. (in Chinese)
- [2] 傅 珍,王选仓,李宏志,等.高速公路拓宽路基差异沉降[J].交通运输工程学报,2010,10(6):25-31.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, LI Hong-zhi, et al. Differential settlement of widening subgrade for expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 25-31. (in Chinese)
- [3] 傅 珍,王选仓,陈星光,等.拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J].交通运输工程学报,2007,7(1):54-57.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57. (in Chinese)
- [4] 吴瑞麟,樊金山,颜昌清,等.拓宽路基不同沉降形态下沥青路

面结构仿真[J].华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(9):76-80.

WU Rui-lin, FAN Jin-shan, YAN Chang-qing, et al. Emulation on asphalt pavement structure of widened subgrade under different settlement patterns[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(9): 76-80. (in Chinese)

- [5] 唐朝生,刘义怀,施 斌,等.新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J].中国公路学报,2007,20(2):13-17.

TANG Chao-sheng, LIU Yi-huai, SHI Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17. (in Chinese)

- [6] 翁效林,张留俊.拓宽路基下软土地基工后沉降预测[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):17-21.

WENG Xiao-lin, ZHANG Liu-jun. Settlement prediction of soft subgrade under broaden embankment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 17-21. (in Chinese)

- [7] 黄写勤,高志伟,王选仓.高速公路拓宽路基差异沉降处治措施[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(8):71-75.

HUANG Xie-qin, GAO Zhi-wei, WANG Xuan-cang. Treatment measures for subgrade differential settlement of highway widening[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30(8): 71-75. (in Chinese)

- [8] LAI Yuan-ming, WANG Qiu-sheng, NIU Fu-jun, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in cold permafrost region[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 165-184.

- [9] LIU Zhi-qiang, LAI Yuan-ming. Numerical analysis for the ventilated embankment with thermal insulation layer in Qing-Tibetan Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(3): 177-184.

- [10] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, DONG Yuan-hong. Three-dimensional nonlinear analysis for the cooling characteristics of crushed-rock interlayer embankment with ventilated duct along the Qinghai-Tibet Expressway in permafrost regions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2010, 24(4): 126-141.

- [11] YU Qi-hao, NIU Fu-jun, PAN Xi-cai, et al. Investigation of embankment with temperature-controlled ventilation along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(2): 193-199.

- [12] MU Yan-hu, MA Wei, WU Qing-bai, et al. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 78(4): 107-114.

- [13] MA Wei, WU Qing-bai, LIU Yong-zhi, et al. Analysis of the cooling mechanism of a crushed rock embankment in warm and lower temperature permafrost regions along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Sciences in Cold and Arid Regions,

- 2008(1): 14-25.
- [14] 黄琴龙,凌建明,钱劲松.新老路基工后差异变形对路面结构的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(6):759-762.
HUANG Qin-long, LING Jian-ming, QIAN Jin-song. Influence of pavement under discrepant deformation after construction between exiting subgrade and that to be widened[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(6): 759-762. (in Chinese)
- [15] 刘志强,赖远明,张明义,等.冻土路基的随机温度场[J]. 中国科学 D辑:地球科学,2006,36(6):587-592.
LIU Zhi-qiang, LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, et al. Random temperature fields of embankment in cold regions[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(6): 587-592. (in Chinese)
- [16] 雷胜友,李肖伦,李洋,等.高速铁路路基下复合地基沉降计算方法[J]. 交通运输工程学报,2015,15(3):9-15.
LEI Sheng-you, LI Xiao-lun, LI Yang, et al. Calculation method of composite foundation settlement under high-speed railway subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 9-15. (in Chinese)
- [17] 黄志军,赖远明,李双洋,等.交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土,2012,34(2):418-426.
HUANG Zhi-jun, LAI Yuan-ming, LI Shuang-yang, et al. Dynamic response of embankment in permafrost regions under traffic load [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 418-426. (in Chinese)
- [18] 张敏静,罗强,詹学启,等.高速铁路穿透型CFG桩复合地基沉降计算修正系数分析[J]. 岩土力学,2013,34(2):519-525,545.
ZHANG Min-jing, LUO Qiang, ZHAN Xue-qi, et al. Research on settlement calculation empirical coefficient of end-bearing CFG pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 519-525, 545. (in Chinese)
- [19] HERMANSSON Å. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[J]. Transportation Research Record, 2000(1699): 134-141.
- [20] 姚济敏,谷良雷,赵林,等.多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究[J]. 气象学报,2013,71(1):176-184.
YAO Ji-min, GU Liang-lei, ZHAO Lin, et al. Comparatively observational study of the surface albedo between the permafrost region and the seasonally frozen soil region[J]. Acta Meteorological Sinica, 2013, 71(1): 176-184. (in Chinese)
- [21] GU Liang-lei, YAO Ji-min, HU Ze-yong, et al. Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2015, 153: 553-564.
- [22] CHENG Guo-dong, SUN Zhi-zhong, NIU Fu-jun. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet Railway engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 241-258.
- [23] HERMANSSON Å. Mathematical model for paved surface summer and winter temperature; comparison of calculated and measured temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 40(2): 1-17.