

文章编号:1671-8879(2006)04-0011-05

# 青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟

汪海年, 窦明健

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**根据青藏公路沿线近 30 年的气象资料,考虑太阳辐射、气温、风速、风向、蒸发等第二类、第三类边界条件,结合路线走向、路基高度、路面类型状况,对青藏公路五道梁地区路基温度场进行有限元分析。经验证,计算结果与路基温度场实测资料基本一致。有限元分析表明,在年周期内路基边界处的温度仍然可按正弦曲线较好地加以拟合;路线走向对冻土路基温度场的对称性有着重要影响,东西走向路基阴阳坡效应最为显著,南北走向路基的温度场基本对称;当路基存在坡向差异时,其阴阳坡效应的强弱与季节密切相关,夏季较弱,冬季较强。

**关键词:**道路工程; 青藏公路; 多年冻土; 路基; 温度场; 边界条件; 路线走向

**中图分类号:**U416.168

**文献标识码:**A

## Numerical simulation of thermal field in permafrost embankments of Qindhai-Tibet highway

WANG Hai-nian, DOU Ming-jian

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The 30 years' meteorological datum along the Qinghai-Tibet highway, such as the solar radiation, air temperature, wind velocity, soil moisture evaporation, were concluded as the combination of the second and third boundary condition for thermal field, and the route strike, embankment height, pavement type were also taken into account. The FEM model of embankments was set up. The calculation results have a good agreement with field measurements. The analysis results show that, in a year circulation, the embankment boundary temperatures vary as sinusoidal wave. Route strike has great influence on the thermal regime symmetry in embankment in permafrost region. The asymmetry of thermal field is the strongest in E-W strike embankment and the minorest in N-S strike embankment. The asymmetry of thermal field is closely related with season variation, which is the minorest in summer and the strongest in winter. 4 tabs, 10 figs, 7 refs.

**Key words:** road engineering; Qinhai-Tibet highway; permafrost; embankment; thermal field; boundary condition; route strike

## 0 引 言

随着全球气温的变暖,多年冻土地地区路基的热

稳定性受到了广泛的关注。多年冻土是对温度变化极其敏感的土类,研究路基热稳定性的首要问题是研究多年冻土路基的温度场状况。自 Stefan<sup>[1]</sup>首次

收稿日期:2005-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(50178010);国家西部交通建设科技项目(200231881203)

作者简介:汪海年(1977-),男,江苏涟水人,博士研究生。



提出含相变一维初值问题的动态解以来,其他学者也分别对冻土温度场及水热耦合效应展开研究<sup>[2-3]</sup>。随着对冻土路基内部温度场研究的逐步深入,冻土路基温度场边界条件的研究成为又一研究重点。朱林楠<sup>[4]</sup>经长期连续观测后提出青藏公路路基温度场计算的“附面层原理”,为路基温度场第一类边界条件的确定提供了方便。然而,随着公路所处地区的不同,路线走向的不同及路基横断面形状与几何尺寸的不同,路基边界处的温度必然随之改变,因而第一类边界条件在实际工程中不具备典型性和代表性,存在较大误差。

本文综合考虑了诸多影响路基温度场的真实因素,包括路基高度、路线走向、边坡坡度等工程特点及太阳辐射、风速风向、坡面蒸发等气象因素,建立综合边界条件,在全球气候升温条件下,对青藏公路五道梁地区(北纬 35.2°)不同路线走向的路基进行温度场有限元分析。

## 1 有限元模型概述

青藏公路五道梁地区路基高 2.5 m,边坡坡度 1:1.5,路面宽 8 m,沥青路面的路线走向分别为东西走向、北偏东 45°走向、南北走向。结合工程实际情况,模型自上而下由 3 种土类组成,为了考虑路基的修建对下伏多年冻土层及邻近区域的影响,路基下冻土计算深度取 10 m,两侧边坡以外各取 10 m。如图 1,①、③~⑧区采用四边形网格,②区采用三角形网格,整个模型共 1 493 个结点,1 394 个单元。

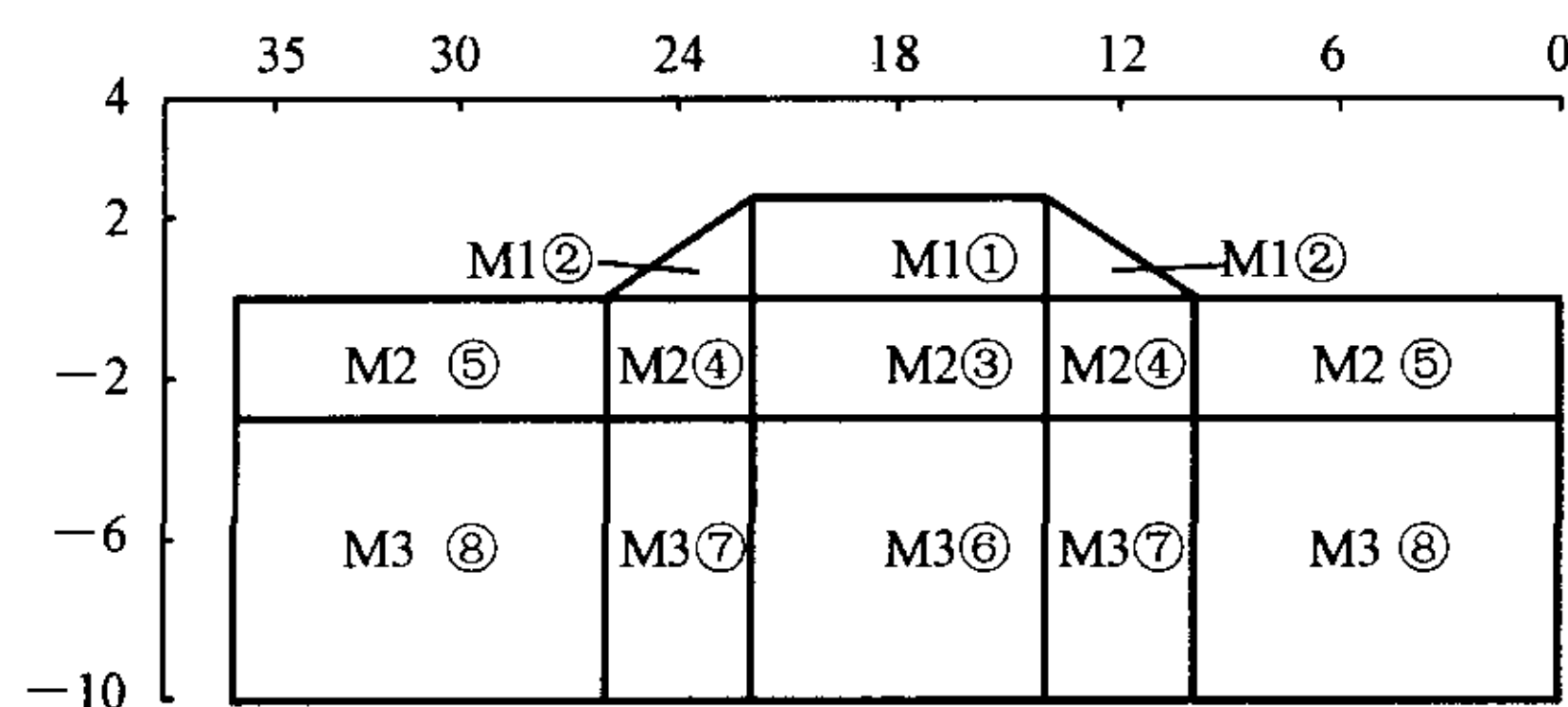


图 1 路基温度场有限元计算模型示意图

## 2 土体热物理参数的取值

结合文献<sup>[5]</sup>,考虑冻土中的未冻水含量及相变潜热对温度场的影响效应,对土体的计算热物理参数取值见表 1。

## 3 边界条件及初始条件的确定

结合青藏公路沿线气候特点,本文认为考虑太阳辐射、气温、风速、风向、蒸发耗热时的路基温度场边界条件是第二类、第三类边界条件的叠加组合。

表 1 计算用土体热参数

温度/℃		-10	-5	-2	-1	0	15
M1 天然砂砾	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870
	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{℃})^{-1})$	2.20	2.20	2.20	2.20	1.68	1.68
	$C/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{℃})^{-1})$	856.5	856.5	856.5	856.5	1 102.5	1 102.5
	$H/(10^6 \text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	0	8.88	15.59	19.53	71.13	102.06
	$W_u/\%$	0.29	0.45	0.78	1.19	10.00	10.00
M2 碎石亚粘土	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 708	1 708	1 708	1 708	1 708	1 708
	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{℃})^{-1})$	1.19	1.19	1.19	1.19	0.95	0.95
	$C/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{℃})^{-1})$	1 169.8	1 169.8	1 169.8	1 169.8	1 439.7	1 439.7
	$H/(10^6 \text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	0	16.91	38.24	59.60	148.57	185.46
	$W_u/\%$	2.70	4.18	7.46	11.60	22.00	22.00
M3 草炭亚粘土	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050
	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{℃})^{-1})$	0.56	0.56	0.56	0.56	0.39	0.39
	$C/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{℃})^{-1})$	1 465.7	1 465.7	1 465.7	1 465.7	2 063.1	2 063.1
	$H/(10^6 \text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	0	11.20	22.37	31.85	125.28	157.77
	$W_u/\%$	3.0	4.5	7.3	10.7	50.0	50.0

注: $\rho$ 为土体的密度; $\lambda$ 为土体的导热系数; $C$ 为土体的比热; $H$ 为土体的焓值; $W_u$ 为土中的未冻水含量。

### 3.1 太阳辐射

青藏高原云量少,空气洁净,日照时数长,总辐射量大,太阳辐射异常的强烈。太阳辐射是影响多年冻土及路基稳定性的重要因素,本文将边界净辐射作为边界处的热流密度输入条件,归入第二类边界条件。根据气象学原理,结合文献<sup>[6]</sup>,建立太阳净辐射计算式为

$$B = Q\epsilon(1 - A) - F$$

式中: $B$ 为边界处的太阳净辐射; $Q$ 为地区太阳总辐射; $F$ 为长波有效辐射; $A$ 为太阳辐射反射率; $\epsilon$ 为坡面系数。

对于太阳辐射反射率  $A$ ,沥青路面取 0.13,路基边坡及天然地面夏季(6月~8月)取 0.23,冬季(11月~1月)取 0.33,见表 2。

表 2 五道梁地区月均太阳辐射与有效辐射日总量

月份	1	2	3	4	5	6
总辐射/ $(10^6 \text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	10.0	11.9	17.4	20.5	22.2	22.2
有效辐射/ $(10^6 \text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	6.82	6.80	8.63	8.68	8.38	7.44
月份	7	8	9	10	11	12
总辐射/ $(10^6 \text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	23.7	21.6	18.3	15.7	12.2	10.2
有效辐射/ $(10^6 \text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	7.51	7.26	7.54	9.46	8.96	8.21

坡面系数是受到相同太阳辐射量的水平面积与边坡坡面面积之比。本文对不同路线走向的路基坡



面系数进行计算,结果如表 3 所示。

表 3 五道梁地区不同走向路基坡面系数

路线走向	位置	日期							
		06-20	07-20 05-20	08-20 04-20	09-20 03-20	10-20 02-20	11-20 01-20	12-20	
东西走向	南坡	0.95	0.97	1.04	1.22	1.47	1.74	1.87	
	北坡	0.72	0.70	0.63	0.45	0.22	0.05	0	
北偏东 45°走向	东南坡	0.87	0.89	0.97	1.07	1.18	1.29	1.35	
	西北坡	0.82	0.80	0.74	0.64	0.57	0.52	0.51	
南北走向	东坡/西坡	0.87	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90	

3.2 对流换热

路基边界对流换热按下式计算

$$q = H\Delta T \tag{2}$$

式中: $q$  为对流热交换的热流密度; $H$  为对流换热系数; $\Delta T$  为流体与边界的温差,即地气温差。

在计算时将当地的日平均气温的年变化用单正弦曲线进行拟合<sup>[7]</sup>。

$$T(t) = T_o + g(t) + S\sin\left(\frac{2\pi}{36}t + \frac{5\pi}{9}\right) \tag{3}$$

式中: $T(t)$  为日平均气温; $t$  为旬序, $t = 0,1,2,3,\dots$ (2000 年 8 月 20 日路建成时, $t = 0$ ,8 月 30 日  $t = 1$ ,9 月 10 日  $t = 2,\dots$ ); $T_o$  为当地的年平均气温,五道梁地区取  $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $g(t)$  为年平均气温逐年上升的速率,取  $0.022\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ; $S$  为日平均气温年振幅,五道梁地区取  $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

对流换热系数是影响对流换热效率的重要参数,与地气温差及流体速度有关。本文结合文献[6],并对现有的实测资料反算分析验证后,采用 Jürges-Nusselt 公式。

$$H = 2.6(\sqrt[4]{\Delta T} + 1.54V) \tag{4}$$

式中: $V$  为流体速度,即风速(m/s)。

将各月的 30 年月平均风速,按顺路基方向和横路基方向分解后吹过路基表面,得出各边界处的风速,然后再合成,就可得到各月各边界处的综合风速,计算结果见表 4。

3.3 蒸发耗热

视蒸发耗热与太阳辐射同时为热流密度边界条件,将二者进行线性叠加。路基边界的蒸发耗热根据蒸发量按下式确定。

$$P = UG \tag{5}$$

式中: $P$  为蒸发耗热; $U$  为土表面的蒸发量; $G$  为水的汽化潜热。

蒸发量与太阳辐射量、风速、气温、湿度等因素

表 4 五道梁地区典型路基各月各边界综合风速 (m/s)

月份	1	2	3	4	5	6
左边坡	3.94	4.03	4.59	3.2	3.15	3.00
路面	5.17	5.31	6.13	4.17	3.86	3.57
右边坡	4.81	4.89	5.67	3.75	3.36	3.04
天然地面	5.12	5.24	5.33	4.12	3.80	3.53
月份	7	8	9	10	11	12
左边坡	3.05	2.42	2.41	2.46	2.87	4.17
路面	3.61	2.83	2.86	3.03	3.66	5.44
右边坡	3.07	2.39	2.44	2.70	3.38	5.06
天然地面	3.16	2.8	2.84	2.97	3.65	4.65

有关。本文在路基温度场计算时采用边坡及地面的土面蒸发量,综合参考文献,采用下面的公式将水面蒸发量与土面蒸发量进行换算

$$U = (-0.1 + 0.118w - 0.0043w^2)u_w \tag{6}$$

式中: $w$  为土表面的含水量(%); $u_w$  为水面蒸发量(mm)。

3.4 初始条件的确定

本文以新建路基温度场为模拟对象,故初始时刻取路建成之日(2000 年 8 月 20 日)。路基本体土体的温度按取土场地温取值,即天然地面下 2 m 以内的平均土温,取值为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。天然地面下的初始温度按 K3016 处(五道梁附近)2000 年 8 月 20 日的实测土温取值。

4 计算结果分析

4.1 有限元计算结果的验证

为了检验有限元模型的正确性与计算所采用算法的合理性,对理论计算的结果有必要进行验证。本文对路基中线处及天然地面处一年中温度场变化最为强烈时期(8 月 20 日与 1 月 20 日)的理论计算结果与现场温度观测孔实测资料进行对比,可以看出理论计算的结果与温度观察孔实测值相差不超过  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,二者体现相同的变化规律(图 2、图 3),说明本文对温度场的数值模拟是可靠的。

4.2 路基上边界处的温度年变化过程模拟

为了便于分析第二、三类边界条件与第一类边界条件间的对应关系,本文对路基不同位置处的温度年变化过程利用数据分析软件进行优化拟合。拟合时有 3 个待定参数:均值、振幅(最高、最低温度之差)与相位,均值与振幅根据计算结果的均值与振幅确定,相位则通过反复试算加以确定,见图 4、图 5。



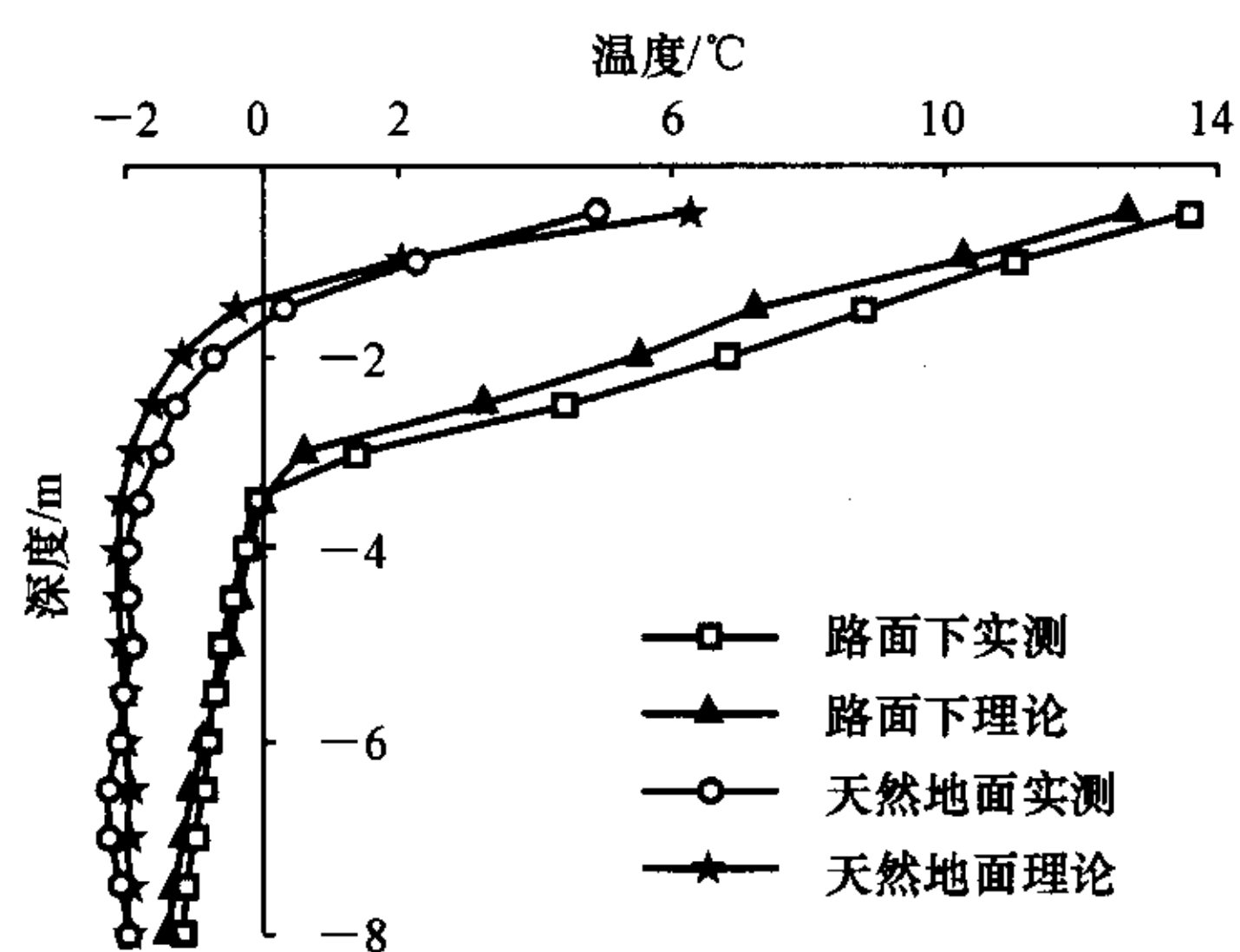


图2 8月20日天然地面孔及路中孔计算与实测结果对比

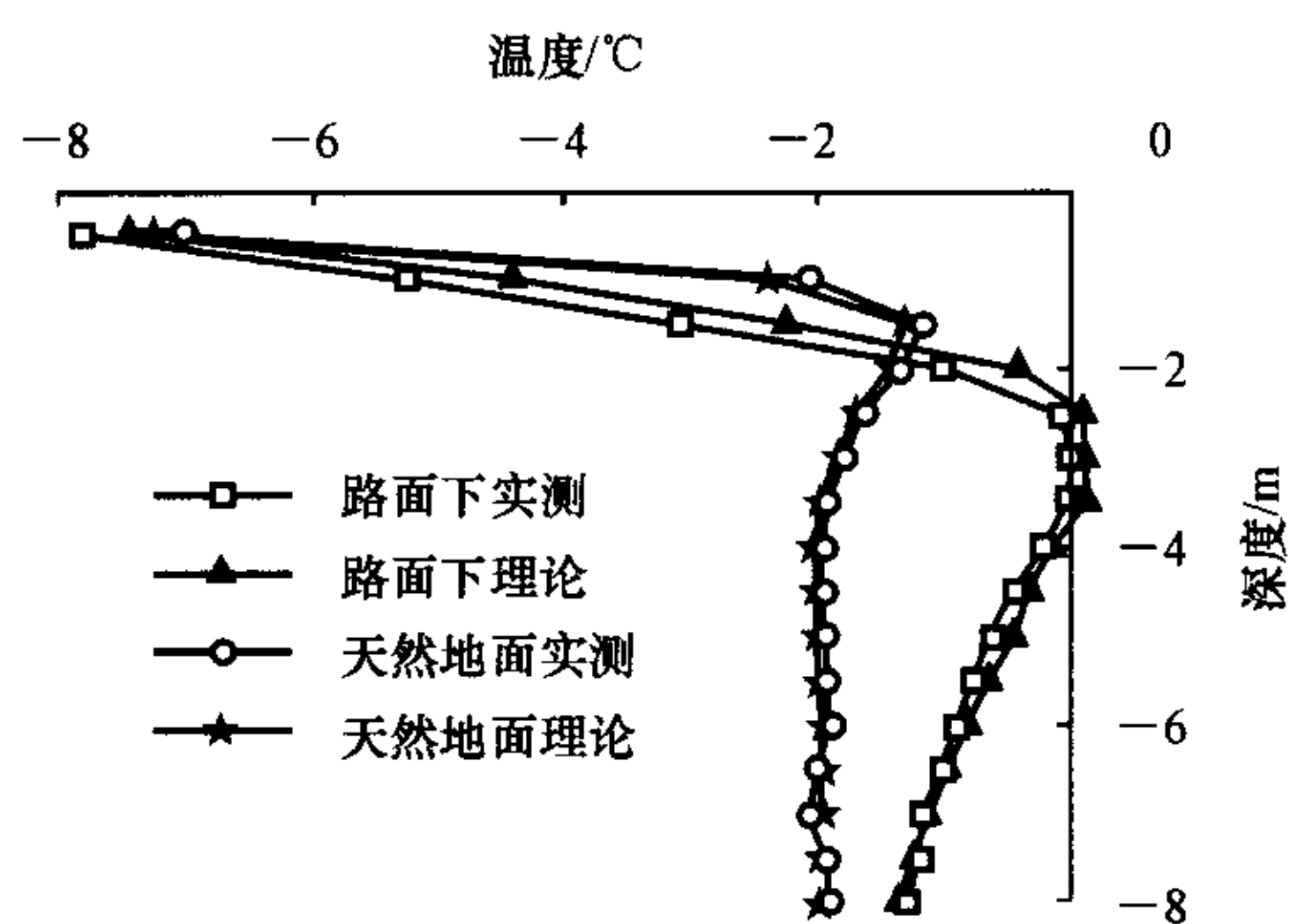


图3 1月20日天然地面孔及路中孔计算与实测结果对比

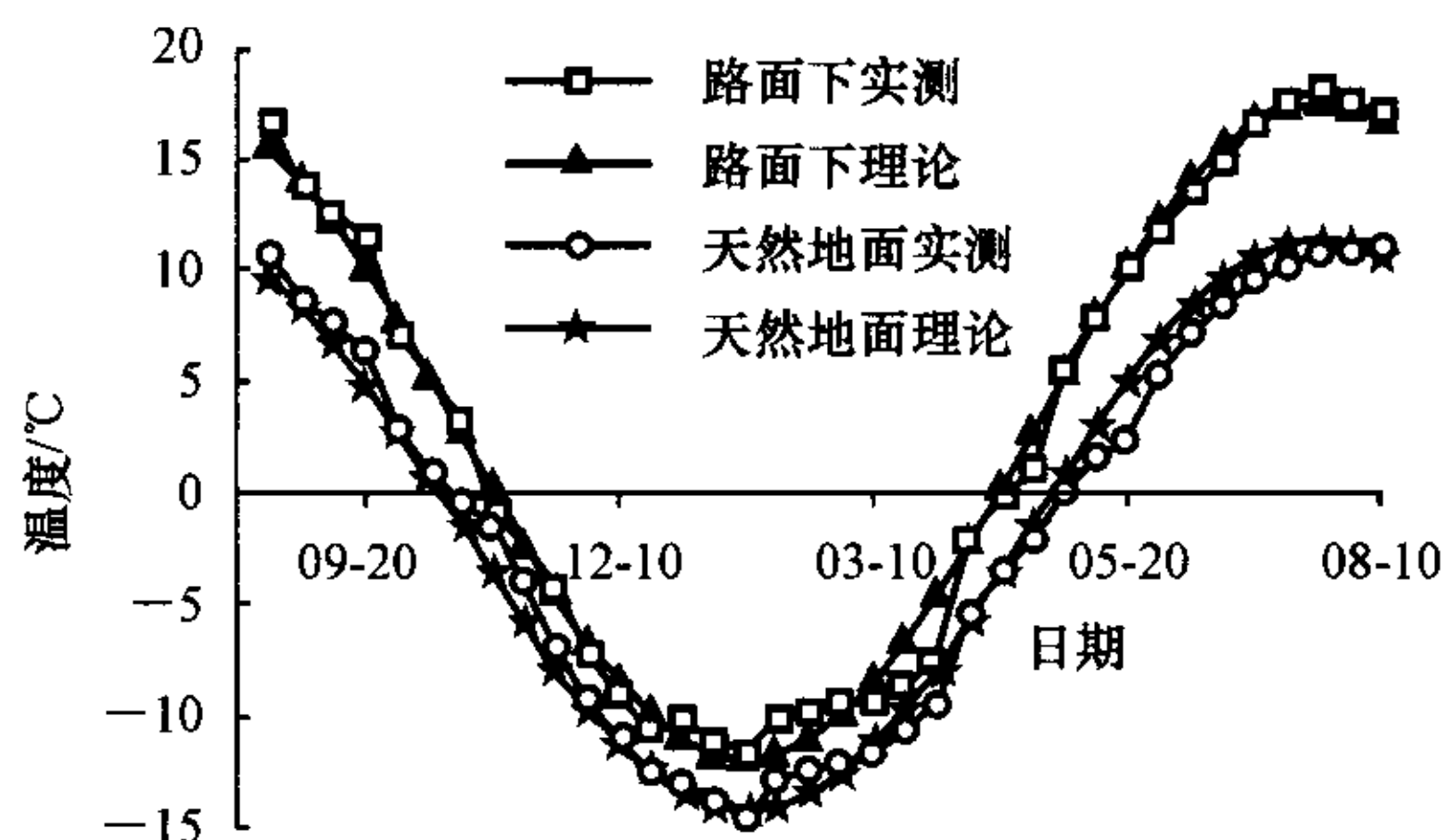
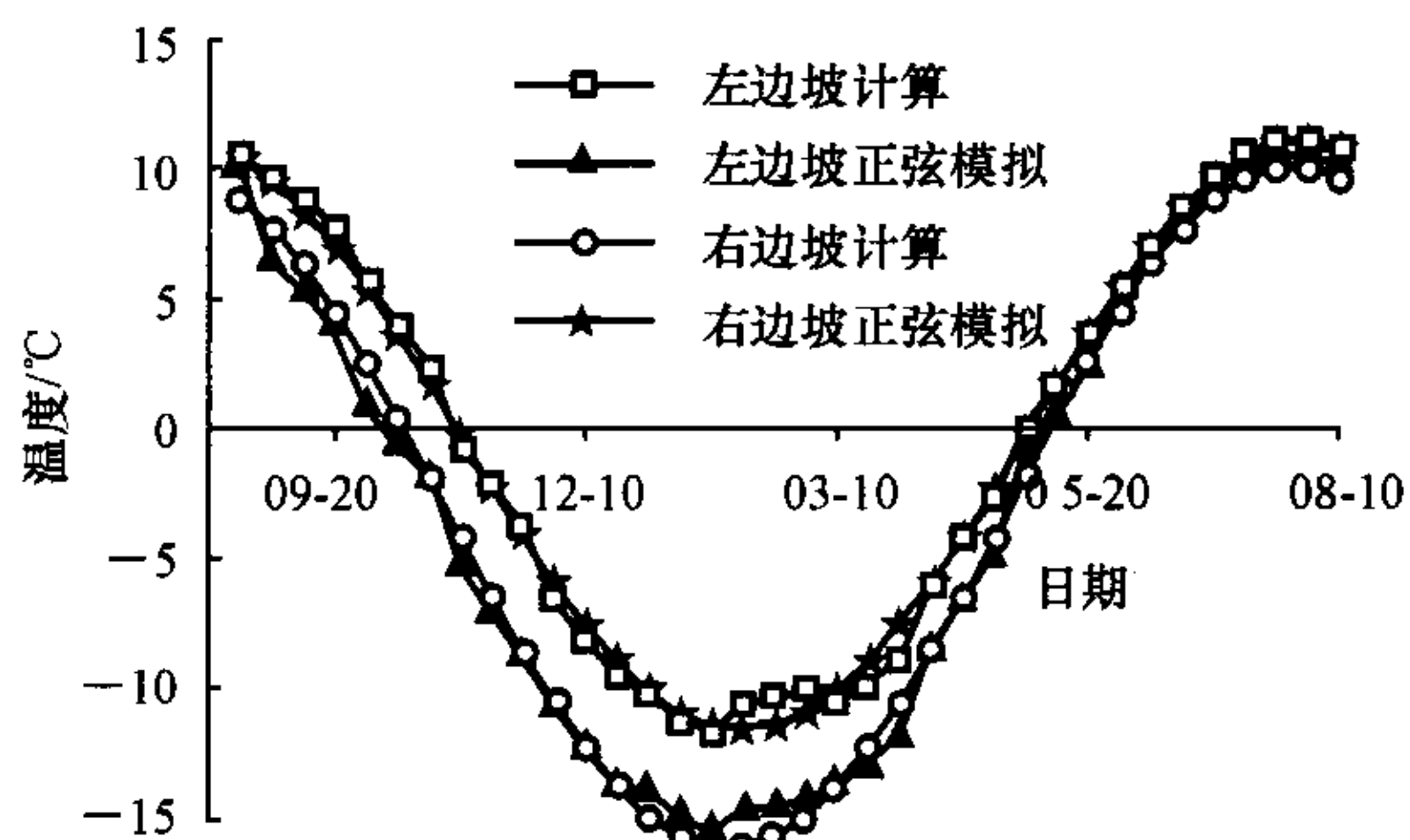


图4 路面及天然地面温度计算结果与模拟正弦波对比

图5 左右边坡温度计算结果与模拟正弦波对比  
沥青路面

$$T_{\text{pave}} = 2.629 + 14.83 \sin\left(\frac{2\pi}{36}i + \frac{11\pi}{18}\right) \quad (7)$$

天然地面

$$T_{\text{tr}} = -1.446 + 12.78 \sin\left(\frac{2\pi}{36}i + \frac{11\pi}{18}\right) \quad (8)$$

左边坡

$$T_{\text{sl}} = -0.276 + 11.33 \sin\left(\frac{2\pi}{36}i + \frac{5\pi}{9}\right) \quad (9)$$

右边坡

$$T_{\text{sr}} = -3.005 + 13.07 \sin\left(\frac{2\pi}{36}i + \frac{21\pi}{36}\right) \quad (10)$$

有限元计算表明,路基边界处的温度年变化可用单正弦曲线较好地加以拟合,就年温度振幅(最高、最低温度差)来看,各边界处的振幅均较气温变化振幅要大。其中,沥青路面的振幅最大,其次是右边坡(阴坡),左边坡(阳坡)的年温度振幅最小,与现有实测资料较为一致。就温度正弦曲线的相位来看,左边坡对气温的变化响应速度最快,与气温变化同相位。其余边界处温度对气温变化响应速度较慢,较气温的相位不同程度地有所滞后。

#### 4.3 不同路线走向的路基温度场等值线图

将有限元分析结果整理为路基温度场等值线图的形式,见图6~图8。

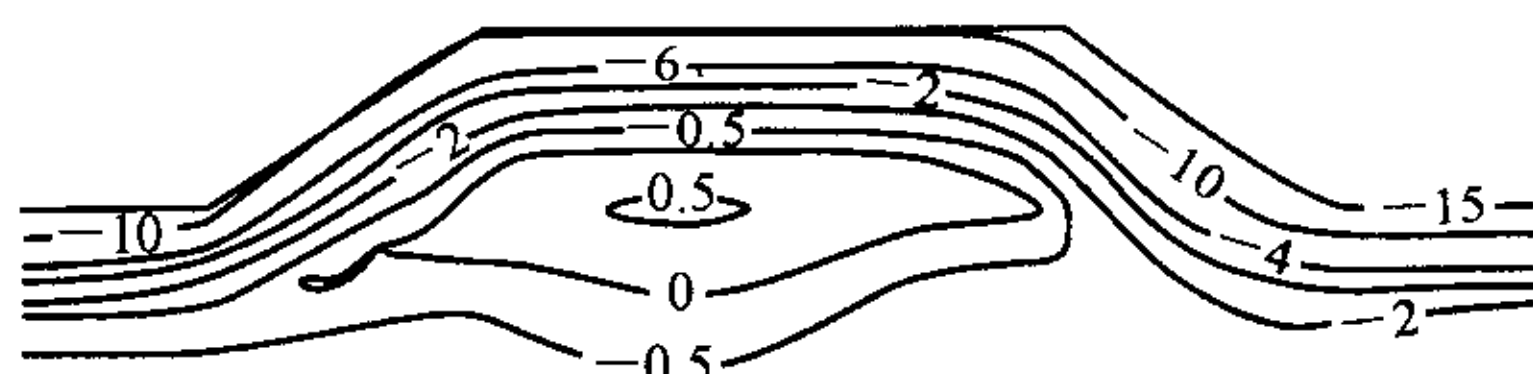


图6 东西(E-W)走向路基1月20日温度场

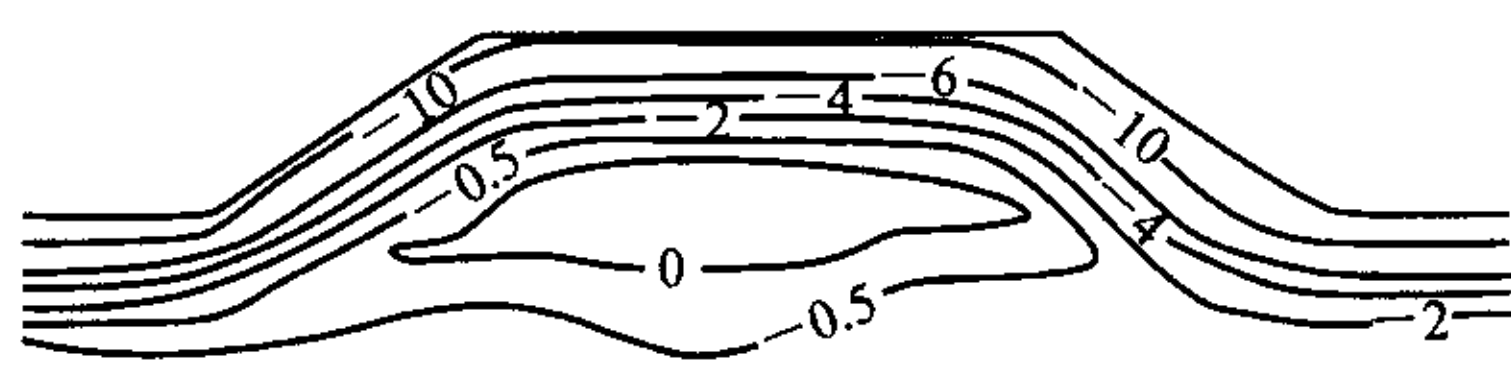


图7 北偏东45°(N45°E)走向路基1月20日温度场

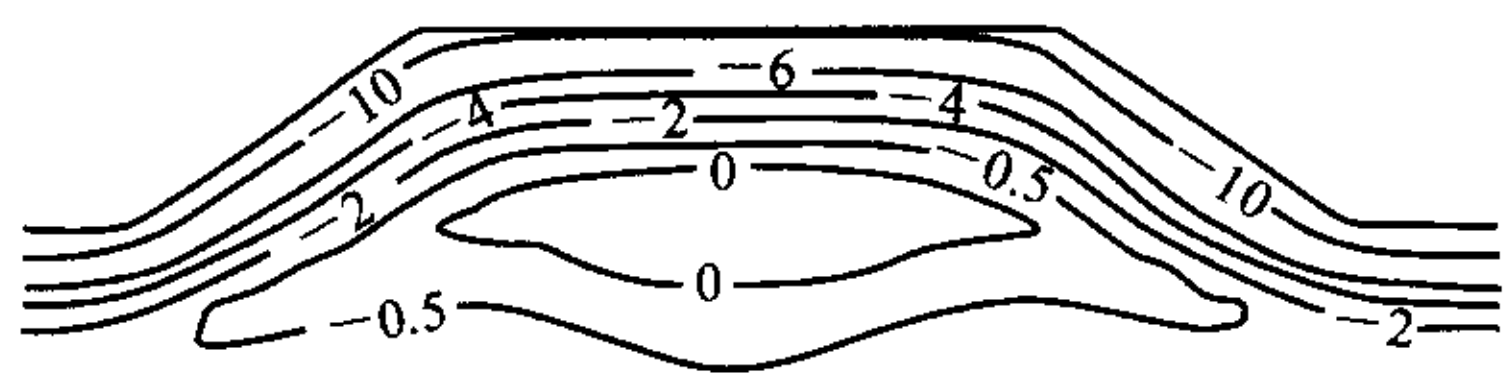


图8 南北(N-S)走向路基1月20日温度场

通过不同走向路基1月20日温度场等值图的比较,可见路线走向对路基温度场的不对称性有着重要影响。在各种路线走向中,以东西走向路基温度场的不对称性体现得最为显著。图6中路基体系内的 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 高温冻土核明显向阳坡(左侧)一侧偏移,同时其 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 高温冻土核也较图7、图8中的大,并伴有 $0.5^{\circ}\text{C}$ 融土核存在,从而其路基热稳定性也相应地较差。当路线为南北走向时,路基温度场基本对称。

#### 4.4 路堤下2 m深度处地温沿路基的横向分布

一年内不同时期路堤下2 m深度处地温的横向分布计算结果见图9、图10。

(1)对于南北走向的路基,路堤下2 m处地温沿路基横向呈对称分布。当路线为东西走向时,温度



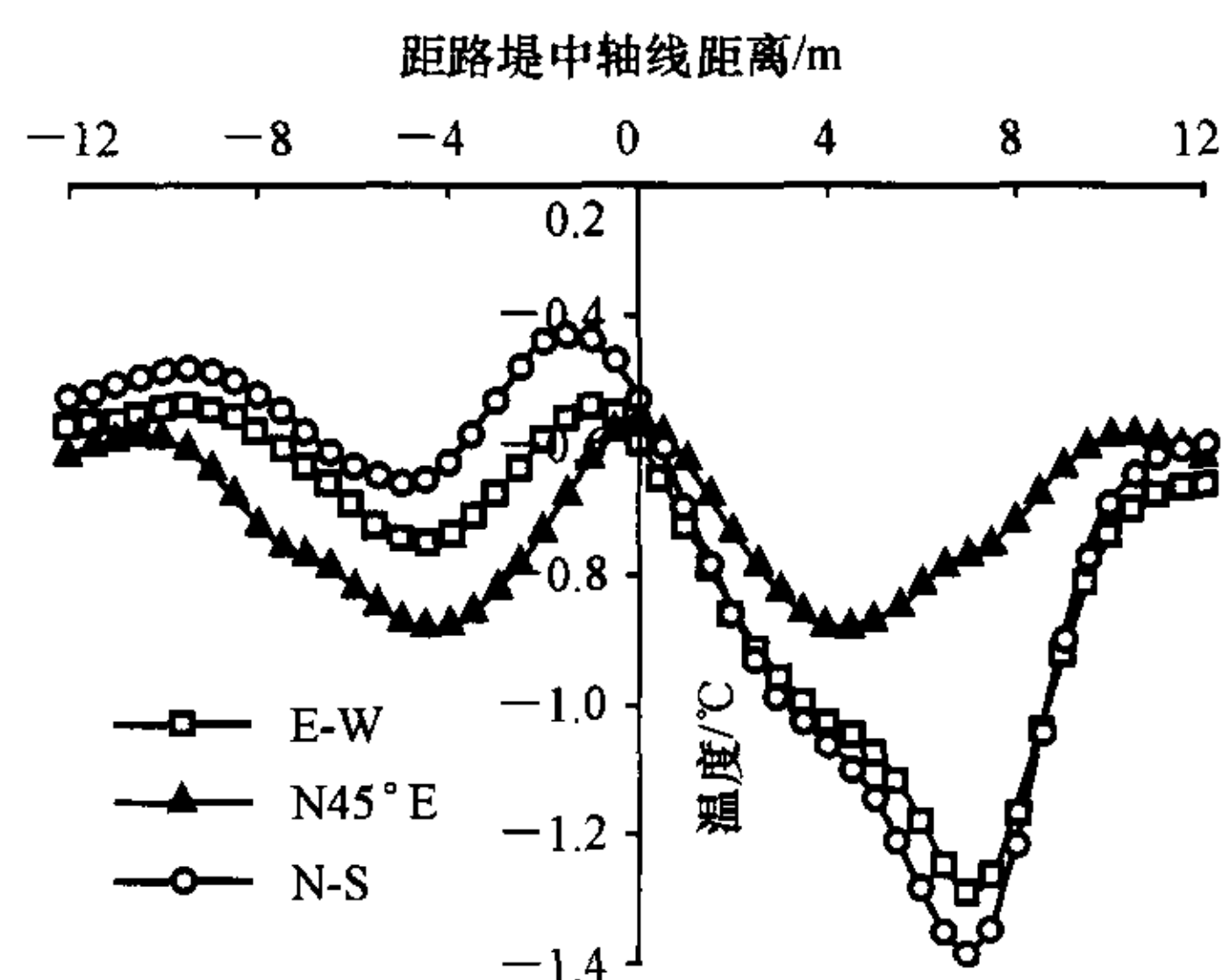


图9 1月20日路堤下2m处地温沿路基横向分布

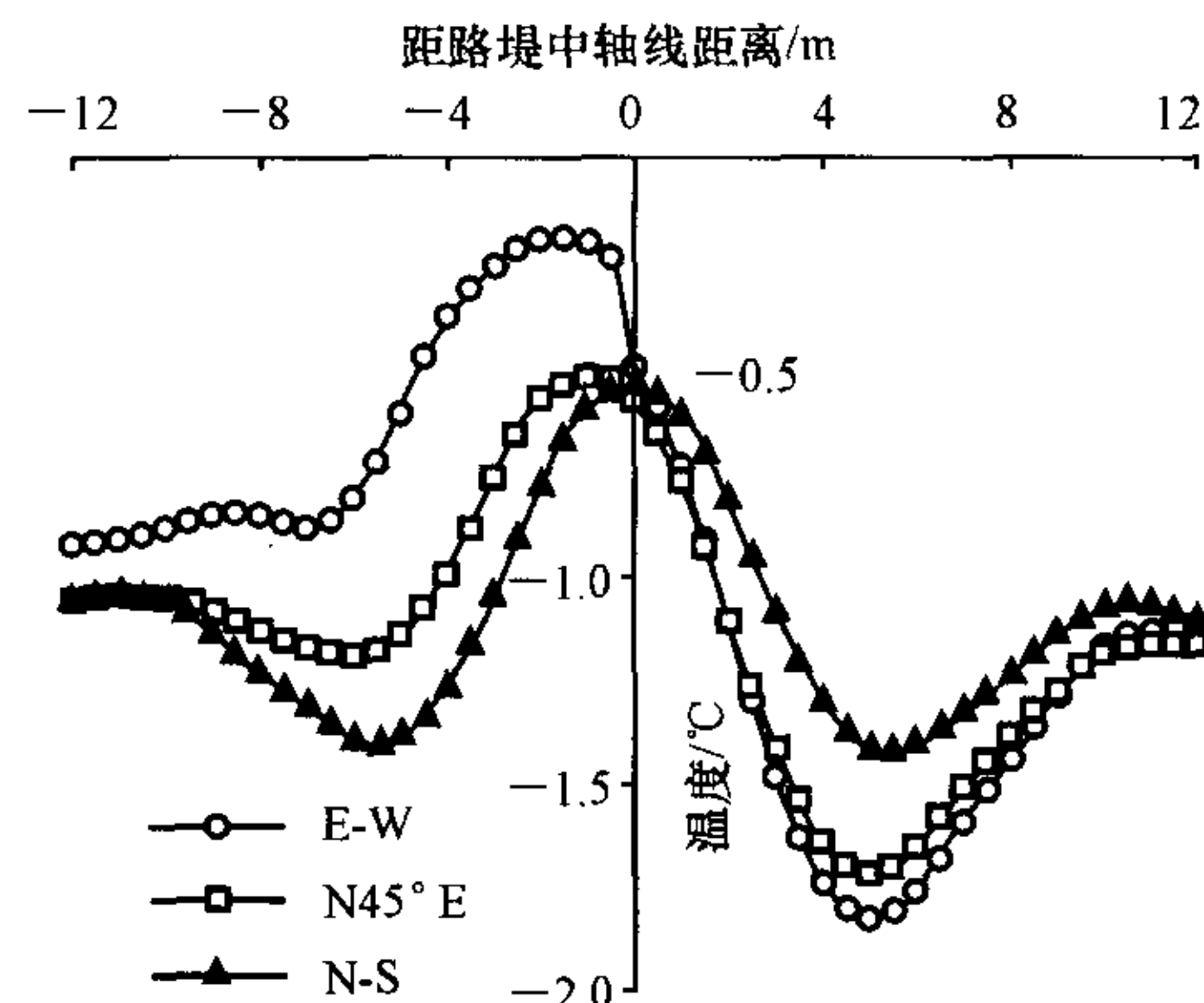


图10 8月20日路堤下2m处地温沿路基横向分布

波沿路基横向呈显著的不对称分布,波峰向左(阳坡)偏移1.6 m,左侧边坡下冻土温度较右侧明显偏高。当路线为北偏东45°走向时,路基下冻土温度横向分布亦不对称,波峰向左偏移0.8~1.0 m。

(2)受季节效应影响,对于东西走向及北偏东45°路基,1月20日时阳坡下土温与阴坡下土温的差值比8月20日时大,路基温度场的不对称性更为强烈,这也是青藏公路路基病害多在冬季发育的主要原因。

## 5 结 语

(1)考虑太阳辐射、风速、风向、气温、蒸发等气象因素,结合路基高度、路线走向、路面类型等工程特点,建立了路基温度场有限元分析模型,在方法上是合理可行的,计算结果更为准确。

(2)将气象因素归结为第二类与第三类边界条件的叠加,路基边界处的温度在年周期内仍然可用单正弦曲线较好地加以拟合。

(3)路线走向对冻土路基温度场的对称性有着严重影响。在众多路线走向中,东西走向的路基温度场不对称性最为显著,南北走向的路基温度场基本对称。

(4)当路基有坡向差异时,路基的阴阳坡效应与季节密切相关,夏季阴阳坡效应较弱,冬季阴阳坡效

应强烈。

## 参考文献:

### References:

- [1] 王劲峰. 土冻结动态温度场计算公式[J]. 科学通报, 1989, 13: 1002-1005.  
WANG Jin-feng. Calculation formula of dynamic thermal regime in freezing soil[J]. Science Bulletin, 1989, 13: 1002-1005.
- [2] 毛雪松, 胡长顺, 侯仲杰. 冻土路基温度场室内足尺模型试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 30-33.  
MAO Xue-song, HU Chang-shun, HOU Zhong-jie. Laboratory large-scale test of temperature field in permafrost subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 30-33.
- [3] 侯曙光, 汪双杰, 黄晓明. 基于相空间重构的冻土路基变形预测[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 35-37.  
HOU Shu-guang, WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming. Subgrade deformation forecast of frozen soil based on phase space reconstruction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 35-37.
- [4] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1998, 10(1): 8-14.  
ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 10(1): 8-14.
- [5] 王铁行, 胡长顺, 王秉纲. 考虑多种因素的冻土路基温度场有限元方法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 8-11.  
WANG Tie-xing, HU Chang-shun, WANG Bing-gang. A finite element method for thermal field analysis of frozen soil subgrade on the consideration of all field-factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 8-11.
- [6] 季国良, 时兴和, 高务祥. 藏北高原地面加热场的变化及其对气候的影响[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 239-244.  
JI Guo-liang, SHI Xing-he, GAO Wu-xiang. The variation of surface heating field over northern Qinghai-Tibet plateau and its effect on climate [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(3): 239-244.
- [7] 国家气象局数据中心. 五道梁、托托河、安多地区地面气象资料三十年数据汇编[G]. 北京: 国家气象局, 2003.  
Data Center of State Meteorologic Bureau. Collection of ground meteorological data in the recent 30 years in Wudaoliang, Tuotuohe and Anduo area [G]. Beijing: State Meteorologic Bureau, 2003.