

文章编号:1671-8879(2005)05-0011-04

## 路基冻结过程中温度场对变形场的影响

毛雪松<sup>1,2</sup>, 王秉纲<sup>1</sup>, 胡长顺<sup>1</sup>, 李 宁<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:**为了研究冻土路基温度场及变形场的动态变化规律,基于伴有相变的路基非稳态温度场控制方程和冻土路基变形场二维数值计算模型,对冬季冻土路基温度场和变形场进行了计算分析,得出路基深层土中的温度变化滞后于表层土和气温;对于冻胀冰锋线分布较广的路基,其破坏易在坡脚处产生;冻胀冰锋线分布范围较小的路基,破坏大致发生在竖向位移较大的路基中部。结果表明,冻胀冰锋线的范围是影响路基变形场的重要因素。

**关键词:**道路工程;冻土路基;冻胀冰锋线;非稳态温度场;变形场

**中图分类号:**U461.168

**文献标识码:**A

### Effect of temperature field on deformation field during freezing process of subgrade

MAO Xue-song<sup>1,2</sup>, WANG Bing-gang<sup>1</sup>, HU Chang-shun<sup>1</sup>, LI Ning<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Water Resources and Hydroelectric Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic drift of temperature field and deformation field in permafrost embankment, this paper calculates and analyzes the temperature field and the deformation field in winter based on non-stationary temperature field control equation with phase changing and two-dimensional numerical calculation model of deformation in subgrade. The results indicate that the temperature change of the deep soil is slower than both the surface soil and the circumstance temperature. In the broad freezing line subgrade, the damages appear at toe of slope; in narrow frost-heaving frontal line subgrade, the damages appear at the middle of subgrade with large vertical displacement. It is pointed out that the scope of frost-heaving frontal line is the key factor that affects the deformation field in the embankment. 5 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; permafrost sub-grade; frost-heaving frontal line; non-stationary temperature field; deformation field

## 0 引 言

多年冻土表面土层受到扰动或改变其地表植

被、水分、日照条件等均要引起冻土上限的变化<sup>[1]</sup>,故多年冻土地地区兴建公路会受到冻土稳定性的影响。有关资料表明<sup>[2~4]</sup>,土体中的热状况、水分状况

收稿日期:2004-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(501 780 10)

作者简介:毛雪松(1976-),女,吉林珲春人,长安大学讲师,西安理工大学博士后。



与变化规律及由此引起的应力重分布是引起冻害严重与否的主要因素。在寒冷的气候条件下,土体中的水分会冻结成冰并膨胀,同时未冻结区的水(如地下水)会源源不断地向冻结区迁移并结冰,引起更大的冻胀及破坏力,造成路基的不均匀变形或纵向裂缝的形成。传统的限于温度场和变形场单一场的研究难以更深入地揭示路基冻胀病害的规律,将单一场和影响因素的研究发展到从传热学、变形场两方面的综合统一研究,分析路基变形场的变化规律是本文的研究思路。基于问题的复杂性,本文建立了冻土路基非稳态温度场的控制方程和冻土路基变形场的二维数值计算模型,应用有限元数值方法,分析温度场的动态变化对于变形场分布规律的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 基本假设

(1)土体为均质各向同性的冻土和未冻土。

(2)土体中土颗粒、冰和未冻水是不可压缩的,土体为线弹性、小变形体。

(3)路基土体仅在重力及土体冻结产生的膨胀力作用下,发生变形。

### 1.2 伴有相变的路基非稳态温度场的控制方程

随着自然界 4 季交替变化,路基土体经历着从非冻结状态到冻结状态以及再次融化的过程,因此也必然存在着伴有相变的导热问题。本文采用显热容法(固相增量法)模型对于相变进行处理,则伴随有相变的平面非稳态导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

在非相变区内: $\partial f_s / \partial t = 0$ ,则式(1)转变为通常的导热微分方程。其中  $f_s$  为固相率,是无因次量,固相率的增加(或减小)与相变潜热的释放(或吸收)量成正比。 $f_s$  含义为

$$f_s = (T_L - T) / (T_L - T_s) \quad (2)$$

式中: $T_L, T_s$  分别为融化及冻结温度; $T$  为相变区内节点温度; $f_s$  为该节点的固相率; $L$  为土冻结或融化相变潜热( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ );导热系数  $K(\text{W}(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$  和比热  $C(\text{J}(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$  在固相和液相区分别取为  $K_s, K_L, C_s, C_L$ ;在相变区内  $K$  可根据温度  $T$  作线性插值处理; $\rho$  为材料的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $q_v$  为材料的内热源强度( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

### 1.3 应力和变形的基本方程

在自重作用下,冻土路基土体单元的应力-应变

关系为

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon^v\}) \quad (3)$$

式中: $\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}^T$ ;  $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$ ;  $[D]$  为平面应变问题的弹性矩阵; $\{\epsilon^v\}$  为由原土中的部分水和迁移来的部分水冻结成冰引起冻土的体积变化。

用结点位移表示的单元应变矩阵方程为

$$\epsilon = [B]\{\delta\}^e \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e - [D]\{\epsilon^v\}$$

根据虚位移原理,经推导得

$$\{F\}^e = [K]^e\{\delta\}^e - [B]^T[D]dA\{\epsilon^v\} \quad (5)$$

其中, $\{F\}^e$  为单元结点所受外力,这里主要指土体的自重; $[K]^e$  为单元刚度矩阵; $\{\delta\}^e$  为单元结点位移。式(5)右第二项是由于土体冻结膨胀而产生的结点力,令

$$\{R\}_v^e = [B]^T[D]\{\epsilon^v\}dA$$

其中, $[B]$  为单元应变矩阵; $[B]^T$  为单元应变矩阵的转置矩阵。又路基土体的每个结点在结点力和结点荷载作用下必须保持平衡,故有

$$[K]\{\delta\} = [F] \quad (6)$$

式中: $[K]$  为土体整体刚度矩阵。

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K]^e = \sum_{e=1}^n [B]^T[D][B]dA \quad (7)$$

采用消元法对式(6)  $2n$  阶线性代数方程组求解,得到结点位移。

## 2 计算模型与方案

路基填土为砂砾土;顶面宽度为 10 m;高度为 2 m;边坡 1:1.5;计算范围取坡角向外左右各 5 m;坡脚深度下 5 m。为了简化计算,采用路基半结构进行计算分析。根据研究问题的特点,采用平面应变力学模型计算路基的变形场,力学模型示意图如图 1。

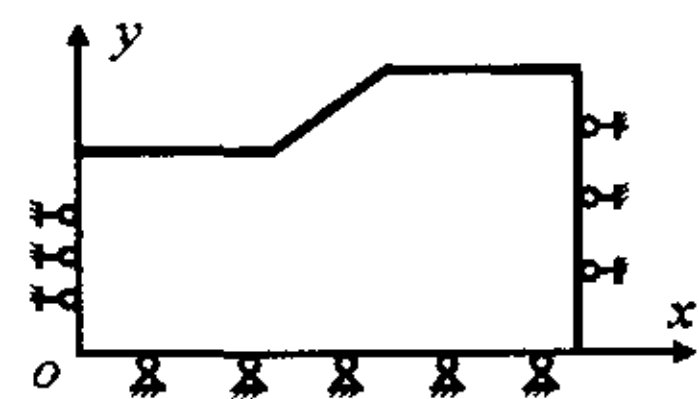


图 1 力学模型示意图

### 2.1 边界条件

在本算例中,考虑第一类边界条件下温度场的变化情况,计算的起始时间为 8 月 10 日,则初始条件及边界条件为

初始温度  $T|_{t=0} = 9^\circ\text{C}$ ;

天然地表

$$T = -9 \times 10^{-5} t^3 + 0.0025 t^2 - 0.0635 t - 8.454 \quad t \leq 180$$

$$T = 6 \times 10^{-6} (t - 180)^3 - 0.0025 (t - 180)^2 +$$



$$0.1669(t-180)+7.33, \quad t > 180$$

左边坡

$$T = -7 \times 10^{-6} t^3 + 0.0021 t^2 - 0.0594 t - 5.20 \quad t \leq 180$$

$$T = 4 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.0018 (t-180)^2 + 0.102(t-180) + 10.73, \quad t > 180$$

路表温度

$$T = 1 \times 10^{-7} t^3 + 0.0001 t^2 + 0.142 t - 12.29 \quad t \leq 180$$

$$T = 7 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.003(t-180)^2 + 0.149(t-180) + 16.23, \quad t > 180$$

下边界1,地表下5m

$$T = 6 \times 10^{-8} t^3 + 3 \times 10^{-5} t^2 - 0.0097 t - 0.443 \quad t \leq 180$$

$$T = -8 \times 10^{-8} (t-180)^3 + 2 \times 10^{-5} (t-180)^2 + 0.0008(t-180) - 0.9195, \quad t > 180$$

下边界2,地表下7m

$$T = -2 \times 10^{-8} t^3 - 3 \times 10^{-6} t^2 + 0.0009 t - 0.3385, \quad t \leq 180$$

$$T = -2 \times 10^{-7} (t-180)^3 + 4 \times 10^{-5} (t-180)^2 - 0.0021(t-180) - 0.2187, \quad t > 180$$

应力场的边界条件为

路基的模型左右边界朝水平方向位移为0,即  $\delta_x = 0$ ; 模型下边界朝水平及竖直方向位移为0,即  $\delta_x = 0, \delta_y = 0$ 。

## 2.2 参数选取

路基填土的导热系数  $K$ 、比热容  $C$  采用回归的方法确定<sup>[5]</sup>, 见式(9)~式(12)。

$$K_f = 0.162 \times 10^{-3} r_d^{1.169} + 5.72 \times 10^{-5} r_d w \quad (9)$$

$$K_u = 0.127 \times 10^{-3} r_d^{1.18} + 3.81 \times 10^{-5} r_d w \quad (10)$$

$$C_f = r_d(0.732 + 0.021 w) \quad (11)$$

$$C_u = r_d(0.795 + 0.042 w) \quad (12)$$

式中:  $r_d$  为干密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $w$  为含水量(%); 下标  $f$  为冻结土,  $u$  为未冻土。

对于相变区的导热系数和比热容采用线性差分计算。相变潜热  $L$ , 在计算中一般取  $334.56 \times 10^3$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

为了简化计算,取冻结区  $E=100$  MPa; 冻结冰锋带  $E=80$  MPa, 未冻结区  $E=60$  MPa。冻结区及冻结冰锋带泊松比  $\mu=0.5$ , 未冻结区的泊松比  $\mu=0.25$ 。

## 3 冻土路基温度场分析

多年冻土路基中的地温,是随着上部地面温度

与气温的周期性波动变化而变化的,在地温梯度的作用下,上部热量向下部不断传输,在热传导过程中,下部地温的升高或降低使热能不断散失而达到热平衡状态。

由图2和图3可以看出,路基温度场是随着季节周期的变换而变化的,但在多年冻土地区的冻土路基当中,由于路面的不透气性与吸热作用,不仅增加了地表来自太阳的辐射热量,更主要的是大大减少了地表的蒸发耗热,使路面以下的放热小于吸热,形成路堤土的蓄热状态,导致路基深层土中的温度变化滞后于表层土和气温。路基内温度随着深度的增加而升高,到达一定的深度后,又开始降低。当大气的最低温度出现在1月初时,路基土内并未完全冻结,而是在其中仍然存在着未冻(融)土核。

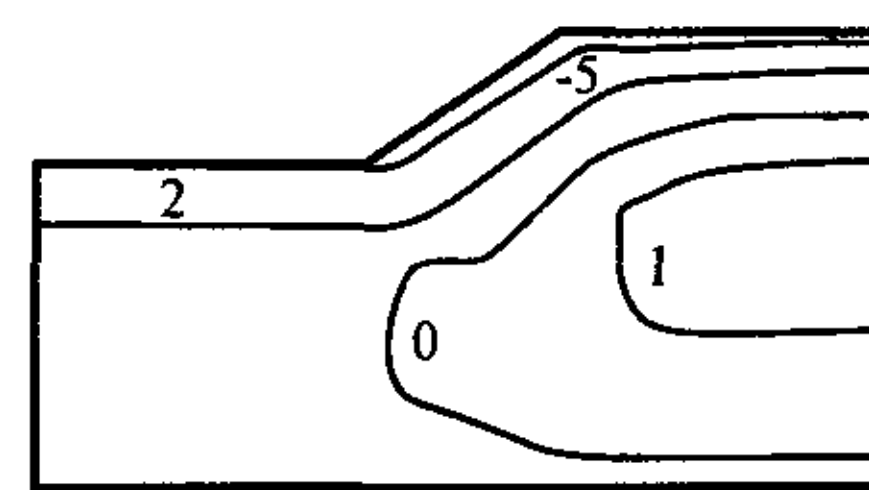


图2 12月份温度场等值温度曲线图

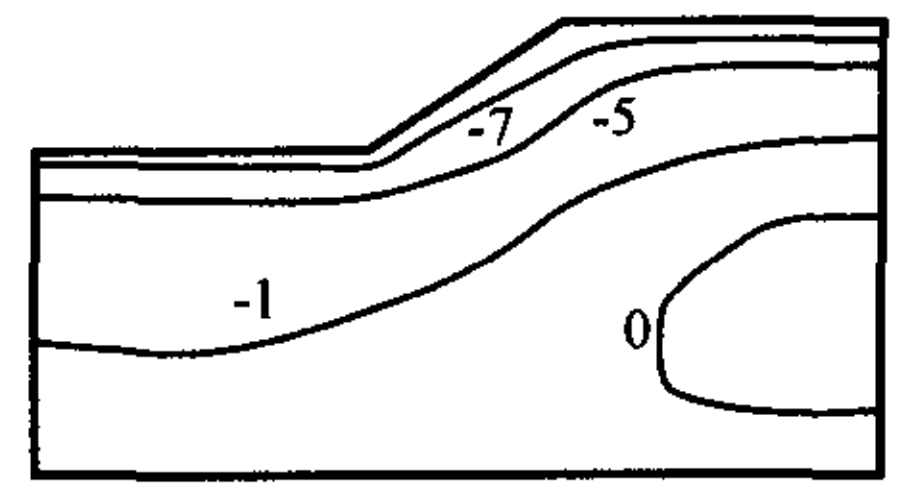


图3 1月份温度场等值温度曲线图

## 4 冻土路基温度场对变形场影响的分析

有关资料表明<sup>[6]</sup>,随着温度的降低,冻结区含冰量不断增加,未冻水含量不断减少,形成一个由未冻区指向冻结区的较大的水势梯度,使得未冻区水分不断向冻结区迁移、积累。且水分的迁移主要发生在冻结缘区。因此本文假定在冻结区土体冻胀率较小,处于冻胀等级的不冻胀及弱冻胀区,计算时可不予考虑,仅考虑在冻结冰锋带处土体的冻胀性,冻胀率  $\epsilon_v=0.05$ 。

由路基表面计算范围内竖向位移图(图4)可以看出:1月份仅在路基边坡和路基表面处发生竖向位移,路基表面的竖向位移由边坡向路中心逐渐增大,路基表面中心处,产生最大的竖向位移;12月份在天然地面、路基边坡及路基表面内均发生竖向位移,在坡脚处产生最大竖向变形,由路基边坡向路中心逐渐减小。由12月份及1月份温度场等值温度曲线图可以看出,12月的冻胀冰锋带所涉及的范围要比1月的大,1月份的冻胀冰锋线仅在路基边坡及路基表面下产生。12月份的竖向表面位移的范围与温度场中冻胀冰锋线的范围基本相同。随着冻胀冰锋线范围的逐渐减少,膨胀力的产生越趋于路中,致使1月路基中心处的竖向变形大于12月路



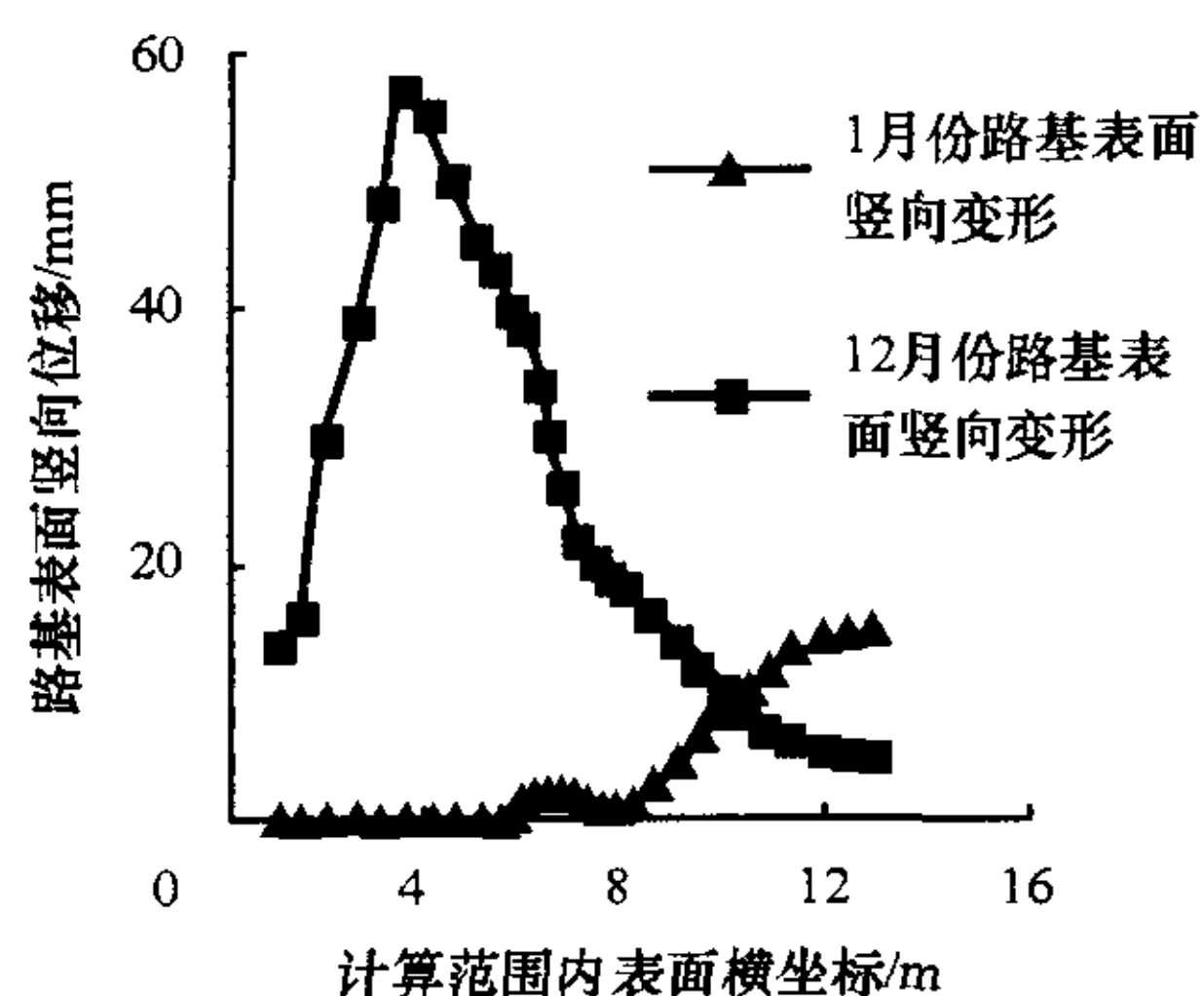


图4 路基表面计算范围内竖向位移图

基中心处的竖向变形。

由路基表面计算范围内横向位移图(图5)可以看出:1月份计算范围内表面均产生背离路中的变形,主要由于冻胀力产生的范围较小,且冻胀冰锋带靠于路基内,冻胀力与土体重力在路基中产生力矩,致使路堤表面土体产生背离路中的变形。12月份,在天然地面距坡脚1 m左右产生背离路中的变形,而其他部分边坡及路基表面均产生向路中变形,因而在变形产生的相反处有可能产生裂缝。在路基表面产生向路中的位移,主要是由于冻胀冰锋线分布较广,致使产生整体的膨胀趋势,同时受到路堤土体重力的作用,进而产生路堤两侧土体有向路中压密的现象。

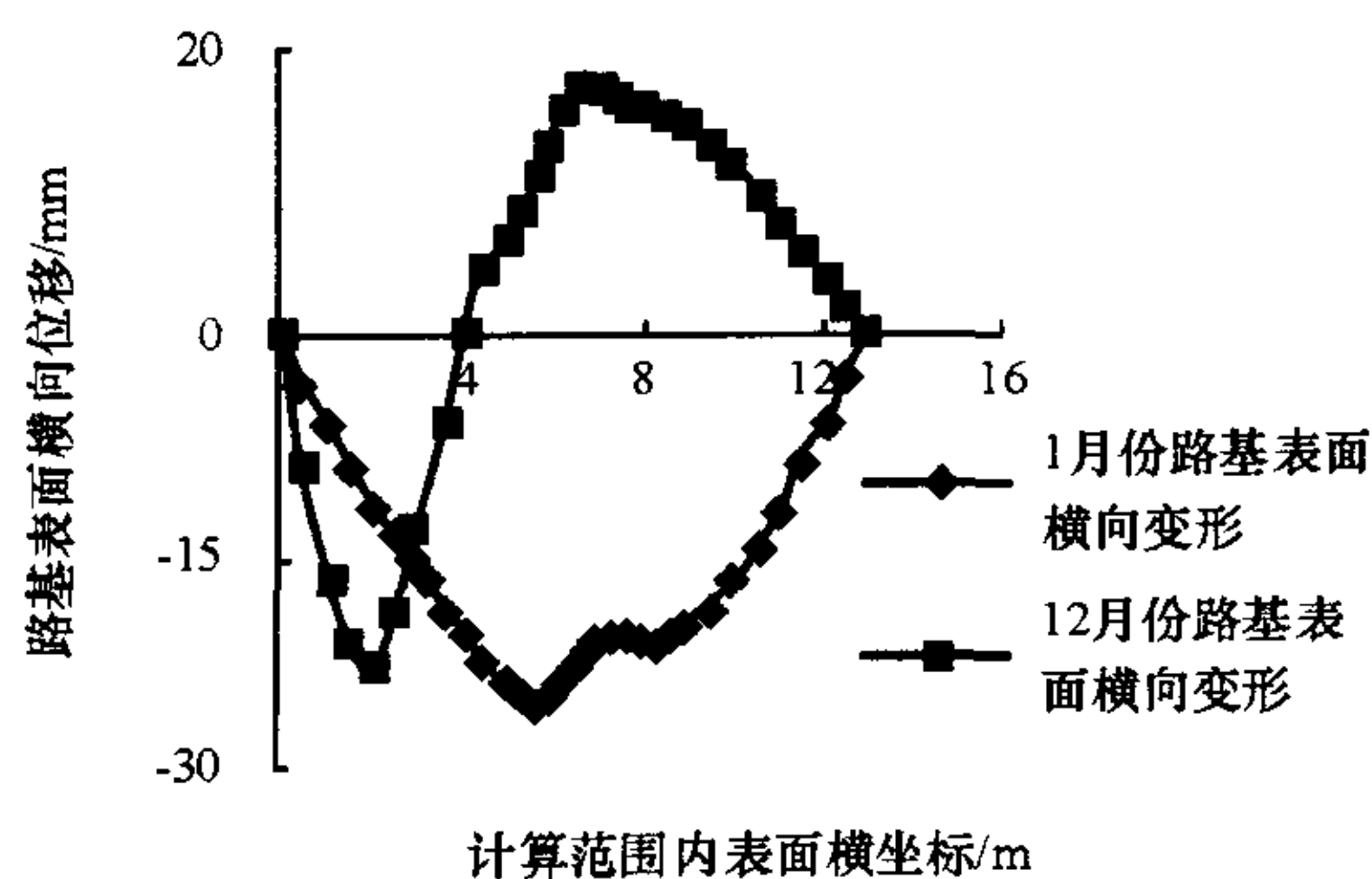


图5 路基表面计算范围内横向位移图

由图4、图5可看出,对于冻胀冰锋线分布较广的土基而言,其破坏易在坡脚的部分产生,竖向变形及反向横向变形的位置均在坡脚处;对于冻胀冰锋线分布范围较小的土基而言,破坏大致发生在竖向位移较大的路基中部。

## 5 结 语

(1)通过建立伴有相变的路基非稳态温度场的控制方程及冻土路基变形场的二维数值计算模型,来研究路基冻结过程中温度场的变化引起的路基土体变形场的变化规律。

(2)路基深层土中温度变化滞后于表层土和气温,使得1月份路基土体冻胀冰锋线的范围小于12

月份路基土体冻胀冰锋线的范围。对于冻胀冰锋线分布较广的路基而言,其破坏易在坡脚的部分产生;对于冻胀冰锋线分布范围较小的路基而言,破坏大致发生在竖向位移较大的路基中部。通过对冻土路基温度场及变形场的计算分析,得知冻胀冰锋线的范围是影响路基变形场的重要因素。

## 参考文献:

## References:

- [1] 吴紫汪,朱林楠. 青康公路多年冻土区路堤的临界高度[J]. 冰川冻土,1998,20(1):36-40.  
WU Zi-wang, ZHU Lin-nan. Critical height of the embankment in permafrost regions along the Qinghai-Kangding Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998,20(1):36-40.
- [2] 王铁行,胡长顺. 冻土路基水分迁移数值模型[J]. 中国公路学报,2001,14(4):5-8.  
WANG Tie-hang, HU Chang-shun. A numerical model of moisture migration for frozen soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(4):5-8.
- [3] 李洪升,刘增利,梁承姬. 冻土水热力耦合作用的数学模型及数值模拟[J]. 力学学报,2001,33(5):621-629.  
LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, LIANG Cheng-ji. Mathematical model for coupled moisture, heat and stress field and numerical simulation of frozen soil[J]. ACTA Mechanica Sinica,2001,33(5):621-629.
- [4] 何平,程国栋,朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土,2001,23(1):36-40.  
HE Ping, CHENG Guo-dong, ZHU Yuan-lin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001,23(1):36-40.
- [5] 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 sub-grade[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2004,24(1):30-33.
- [6] 胡和平,杨诗秀,雷志栋. 土壤冻结时水热迁移规律的数值模拟[J]. 水利学报,1992,(7):1-8.  
HU He-ping, YANG Shi-xiu, LEI Zhi-dong. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992,(7):1-8.