

文章编号:1671-8879(2006)04-0016-04

多年冻土路基水-热-力耦合理论模型及数值模拟

毛雪松^{1,2}, 李 宁¹, 王秉纲², 胡长顺²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 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:在建立多年冻土地地区路基非稳态温度场控制方程、水分迁移的有限元控制方程和路基变形场及应力场计算模型的基础上,提出水-热-力耦合模型。以青藏公路唐南段 K3393+950 的冻土路基为计算对象,得出了 1 月份路基温度场、水分场及应力场(变形场)的分布规律:路基温度场内部存在着未冻土核;水分场在温度梯度的作用下有向冻结冰锋线迁移的趋势;在负温条件下,土体的体积含冰量超过临界值时,将产生冻胀现象。研究结果表明,多年冻土地地区路基的温度场、水分场及应力场一直处于动态变化中,路基的热状况、水分状况与变化规律及由此引起的应力重分布是引起道路冻害的主要因素。

关键词:道路工程; 多年冻土路基; 温度场; 水分场; 应力场; 水-热-力耦合模型

中图分类号:U416.168 **文献标识码:**A

Coupling model and numerical simulation of moisture-heat-stress fields in permafrost embankment

MAO Xue-song^{1,2}, LI Ning¹, WANG Bing-gang², HU Chang-shun²

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

Abstract: Based on the control equation of the non-stationary temperature field, the finite element control equation of the moisture movement and the two-dimensional numerical calculation model of the deformation and stress fields in the subgrade, this paper puts forward the coupling calculation model of the heat-moisture-stress fields. By the detail calculation example with the section of Qinghai-Tibet highway K3393+950 in January, this paper further explains the coupling process of the heat-moisture-stress fields and analyzes the interacting law of the temperature, moisture and stress fields in the subgrade. It is found that there is the unfreezing soil in the subgrade, the moisture trends to the freezing line under the temperature grads, once the ice volume exceed the critical value, the freezing damage will happen. The research results indicate that the temperature field, moisture field and stress field of the permafrost subgrade change all the time, the re-distributing of stress that is caused by the change of heat and moisture is the key factor for the frost damages. 2 tabs, 7 figs, 6 refs.

收稿日期:2005-04-04

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231881203)

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

Key words: road engineering; permafrost embankment; temperature field; stress field; deformation field; coupling model of the moisture-heat-stress fields

0 引言

多年冻土地区的道路修筑一直被视为世界性难题,冻土地区路基工程不同于一般地区之处在于寻求热稳定性状态下具有足够强度的路基。土体的冻结过程是温度场、水分场及应力场相互作用的极其复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题^[1-2]。多年冻土地区路基中水分场、温度场及应力场耦合效应客观存在,其耦合效应将直接影响多年冻土的稳定性、季节活动层内的水热状况动态变化^[3-6],应力场和变形场的分布规律,也是引起路基不均匀沉陷和冻胀变形、纵向裂缝等病害的直接原因。

本文在建立多年冻土地区路基非稳态温度场控制方程、水分迁移的有限元控制方程和路基变形场及应力场的计算模型的基础上,提出水-热-力耦合模型,并结合实体工程,进一步说明水-热-力三场的耦合过程,分析了路基温度场、水分场及应力场相互作用的规律。

1 水-热-力耦合理论模型

1.1 温度场控制方程

随着自然界四季交替变化,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)模型描述相变,则伴随有相变的平面非稳态导热微分方程式为

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

式中: T 为物体的瞬态温度($^{\circ}\text{C}$); t 为过程进行的时间(s); k 为材料的导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$); ρ 为材料的密度(kg/m^3); c_p 为材料的定压比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$); q_v 为材料的内热源强度(W/m^3); f_s 为该节点的固相率; L 为土冻结或融化相变潜热(J/kg); x, y 为直角坐标(m)。

1.2 水分迁移控制方程

将质量守恒原理应用多孔介质中的流体流动得到流体连续方程,与达西定律相结合可以得出土中水分运动的基本方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) +$$

$$K - \frac{\rho_l}{\rho_w} \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2)$$

式中: θ 为未冻水体积含量; $D(\theta)$ 为土体中水分扩散系数(主要考虑由含水量的差异引起)(cm^2/s); $K(\theta)$ 为土体的导水率(cm/s)。

在冻土地区,由于温度的差值形成的温度梯度本身也会造成水分的流动,同时伴有相变,使得冻土地区水分迁移的控制方程更加复杂化。由此引入温度梯度水分扩散率 D_T 及含冰量或称为固相率的概念,在冻土路基水分迁移控制方程中考虑温度梯度和相变的影响。因此,其控制方程式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_T(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_T(\theta) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} (K(\theta)) - \frac{\rho_l}{\rho_w} \frac{\partial f_s}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon^v\}) \quad (4)$$

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; $\{\epsilon^v\}$ 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

$$\epsilon = [B]\{\delta\}^e \quad (5)$$

根据虚位移原理,经推导得

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e - [B]^T [D] dA \{\epsilon^v\} \quad (6)$$

式中: $\{F\}^e$ 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; $[B]$ 为单元应变矩阵。式(6)左第二项是由土体冻结膨胀而产生的结点力,令

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

由于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

$$[K]\{\delta\} = [F] \quad (7)$$

式中: $[K]$ 是土体所有单元刚度矩阵的总和,称为土体整体刚度矩阵。

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K]^e = \sum_{e=1}^n [B]^T [D] [B] dA \quad (8)$$

1.4 方程的求解

应用有限元法对式(1)、式(2)及式(7)求解,得

到水-热-力耦合模型的有限元方程为

$$[K]\{T\}_t + [N]\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_t = \{P\}$$

$$[K]\{\theta\}_t + [N]\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_t = \{P\}_t$$

$$[K]\{\delta\} = \{F\}$$

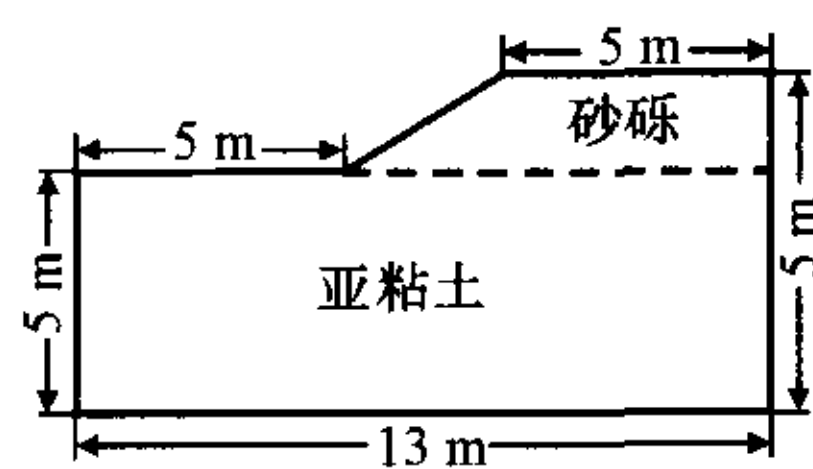
$$[K] = \sum_{e=1}^n [K]^e = \sum_{e=1}^n [B]^T [D] [B] dA$$

2 计算与分析

以青藏公路唐南段 K3393+950 的冻土路基为研究对象,通过对已有温度场观测资料的整理,建立温度场的边界条件;根据收集整理当地气象资料,得出水分场的边界条件;结合应力场的力学模型进一步分析温度场、水分场及应力场的变化规律。

2.1 边界条件及初始条件

路堤几何尺寸与土质如图 1 所示,取半幅路基



进行计算分析。计算过程中,温度场及水分场均是考虑在第一类边界条件下的变化。计算时间始于 2000

年 8 月 10 日,温度场及水分场的初始条件为

$$\text{初始温度 } T|_{t=220} = 9^\circ\text{C}$$

$$\text{初始含水量 } \theta|_{t=220} = 12\%$$

通过对 2000 年至 2001 年该断面野外观测资料的回归分析,得到温度场边界条件。

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

$$T = 1 \times 10^{-7} t^3 + 0.0001 t^2 + 0.142 t - 10.06 \quad t \leq 180$$

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

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

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

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

根据气象站所提供天然地表处的含水量资料并考虑蒸发作用,通过换算得出天然地面及路基边坡的含水量随时间的变化规律。

左边坡

$$\theta = -0.0004 t^2 + 0.1555 t - 7.95 \quad 70 \leq t \leq 180$$

$$\theta = -0.0006 (t-180)^2 + 0.0155 \cdot (t-180) + 8.7 \quad 180 \leq t < 320$$

天然地面

$$\theta = -0.0002 t^2 + 0.0913 t - 3.477 \quad 70 \leq t \leq 180$$

$$\theta = -0.0004 (t-180)^2 + 0.0058 \cdot (t-180) + 7.8186 \quad 180 \leq t < 320$$

由于从 11 月末至次年 3 月初路基处于冻结阶段,故其未冻水含量较小,在计算过程中,近似按 0 计算。

路表面为沥青面层。在计算过程中对于路基上边界以路基左边坡的水分进行折减取值。

应力场的边界条件为:

左边界 $u=0$;

右边界 $u=0$;

下边界 $u=0; v=0$ 。

2.2 土性参数

路基由两种土体填筑而成,见图 1。砂砾的干密度 $\rho_d = 1700 \text{ kg/m}^3$;亚粘土的干密度 $\rho_d = 1500 \text{ kg/m}^3$ 。土性参数是在前人试验的基础上,统计回归得到的,见表 1 和表 2。

为了简化应力场计算,取冻结区 $E=100 \text{ MPa}$,冻结冰锋带 $E=80 \text{ MPa}$,未冻结区 $E=60 \text{ MPa}$ 。冻结区及冻结冰锋带的泊松比 $\mu=0.5$,未冻结区的泊松比 $\mu=0.25$ 。

2.3 计算结果与分析讨论

每年的 12 月份到次年 3 月中旬是多年冻土地区路基水分迁移最显著、产生最大冻胀位移的时刻。对 2001 年 1 月 10 日温度场、水分场、应力场及变形场进行分析,计算结果见图 2~图 7。

表 1 土体的热物理参数

土体状态		冻土	未冻土
亚粘土	导热系数 k W/(m·℃)	$0.104 \times 10^{-3} r_d^{0.921} + 3.72 \times 10^{-5} r_d \theta$	$0.408 \times 10^{-3} r_d^{0.945} + 1.72 \times 10^{-5} r_d \theta$
	比热容 C J/(kg·℃)	$r_d(0.914 + 0.023\theta)$	$r_d(0.0865 + 0.041\theta)$
砂砾土	导热系数 k W/(m·℃)	$0.162 \times 10^{-3} r_d^{1.169} + 5.72 \times 10^{-5} r_d \theta$	$0.127 \times 10^{-3} r_d^{1.18} + 3.81 \times 10^{-5} r_d \theta$
	比热容 C J/(kg·℃)	$r_d(0.732 + 0.021\theta)$	$r_d(0.795 + 0.042\theta)$

表 2 土体的水分运动参数

项 目	导水率 k_u (cm/s)	扩散率 D_u (cm ² /s)
亚粘土	$5 \times 10^{11} \theta^{7.5498}$	$7 \times 10^{-10} \theta^{13.299}$
砂砾土	$1.6438 \theta^{10.7815}$	$0.0105 \times 10^{-5} e^{34.644\theta}$

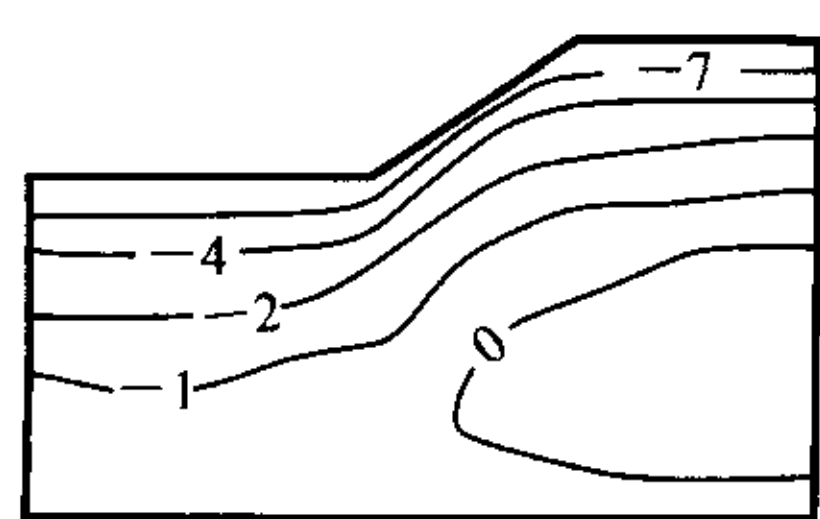


图 2 1月10日路基温度等值线图(单位:℃)

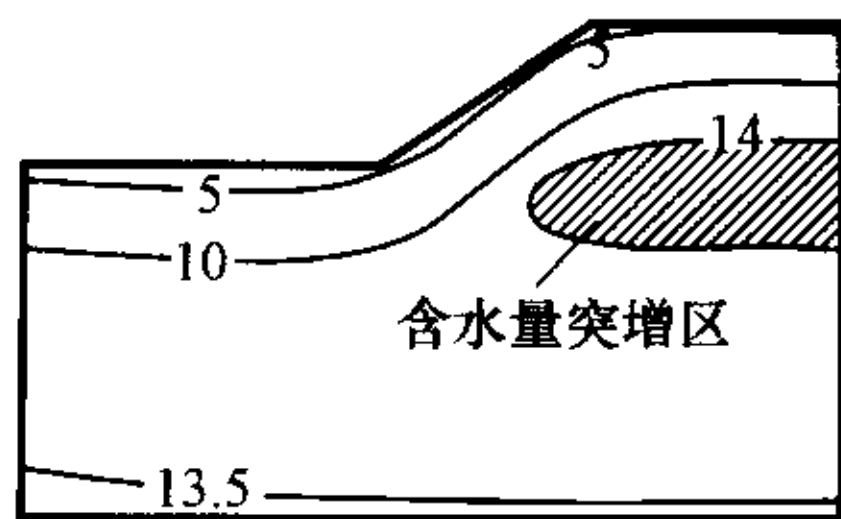


图 3 1月10日路基含水量等值线图(单位:%)

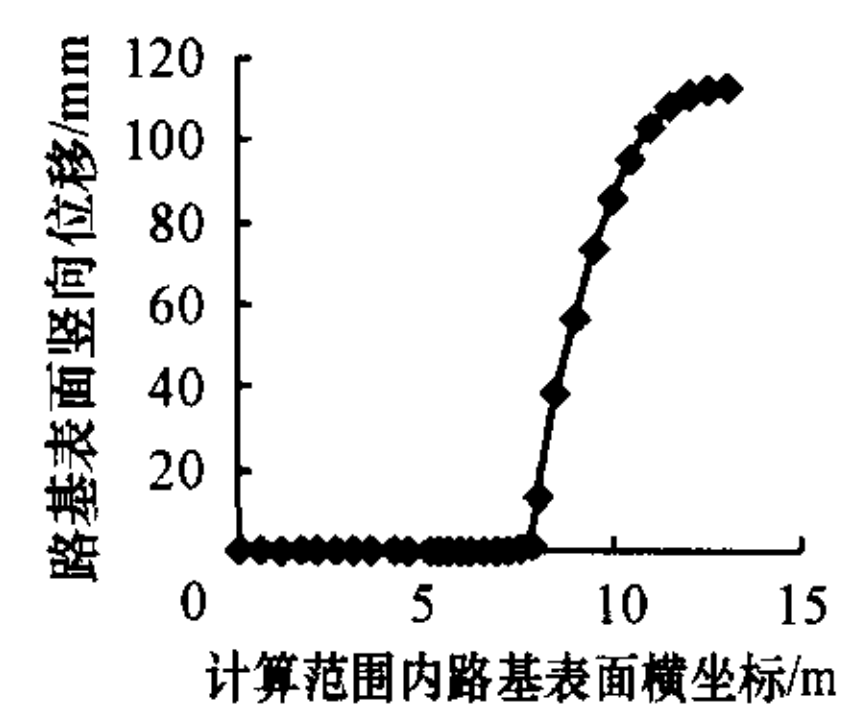


图 4 1月10日路基表面计算范围内竖向位移图

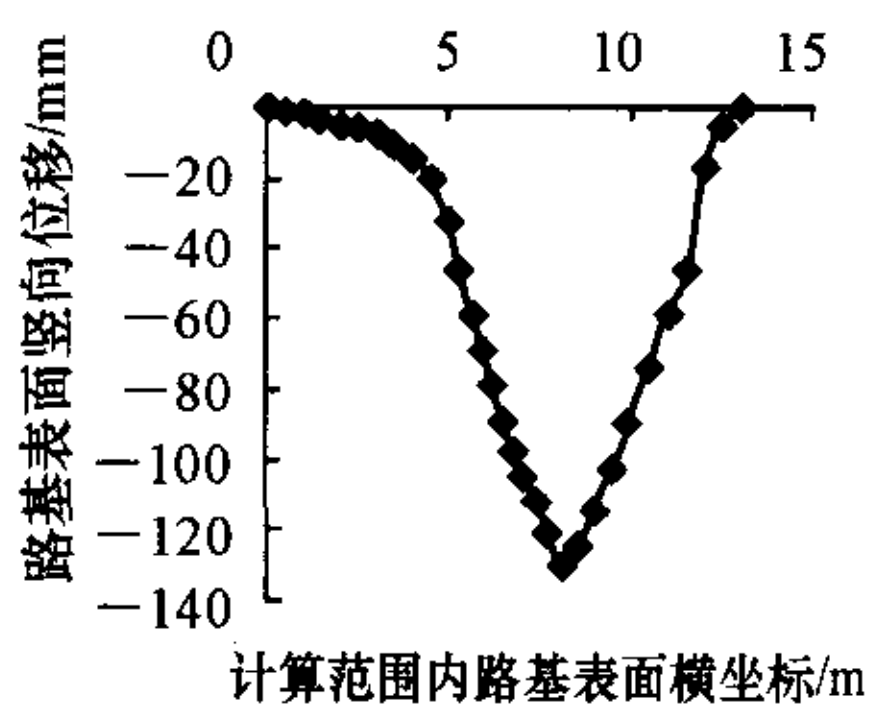


图 5 1月10日路基表面计算范围内横向位移图

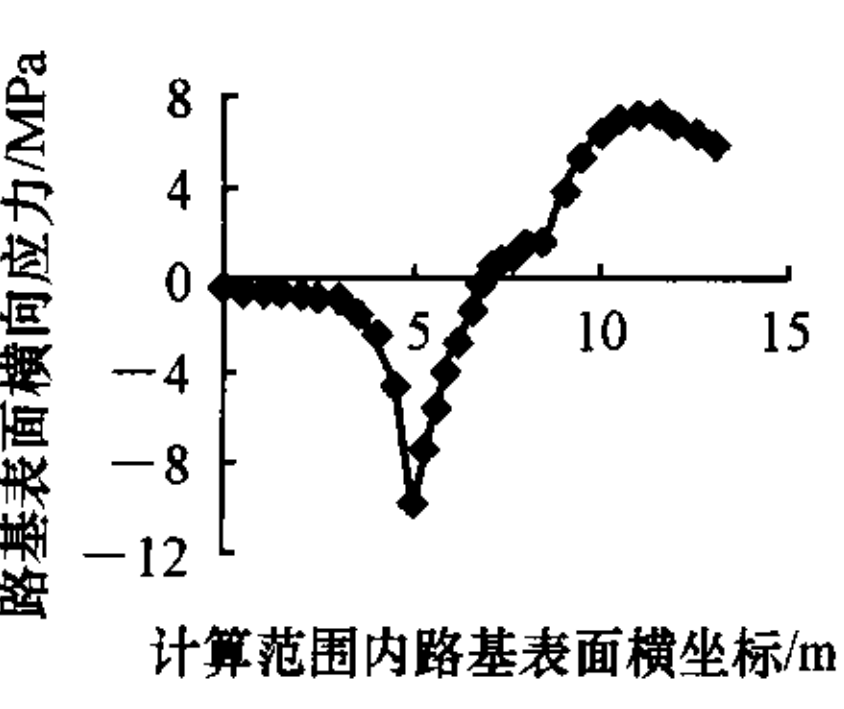


图 6 路基表面横向应力图

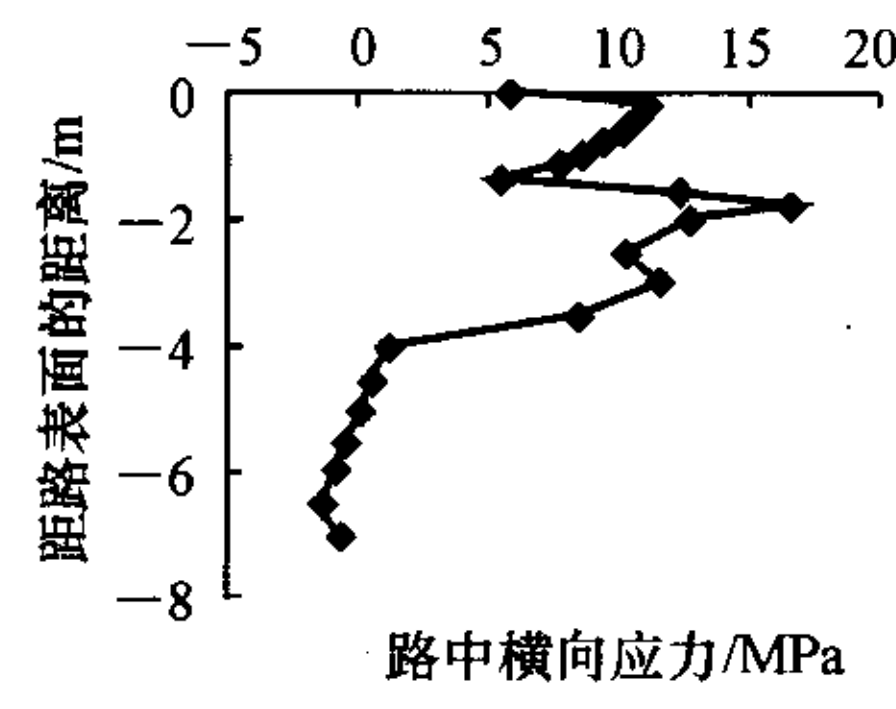


图 7 路中横向应力随深度变化曲线

由图 2 路基温度场等值线图可以看出,1 月初路基土体内部仍有未冻土核存在,这说明土体内深层的温度滞后于大气温度及地表温度,这与路基温度场观测结果相一致。

由图 3 路基水分场等值线图可以看到,路基土体内部出现了含水量突增区(阴影部分)。由计算结果可知突增区的含水量均达到 14% 以上,最大达到

17.74%,这说明土体温度的变化将产生较大的水分迁移。比较图 2 及图 3,可以看到含水量突变区与路基温度场中冻结冰锋线的上缘位置基本重合,该区域内的温度变化在 0℃~−2℃ 之间,即路基土体内部的水分有向冻结冰锋线迁移的趋势。

由图 4 路基表面计算范围内竖向位移图可以看出,路堤顶面均产生向上的竖向位移,是由水分向冻结冰锋线迁移,土体冻结产生体积膨胀所致。图 5 为路基表面计算范围内横向位移图,可以看出路基表面均产生背离路中的偏移,主要是路基土体在自身的重力与膨胀力形成的力矩综合作用的结果。在边坡处接近路肩位置产生的最大横向偏移,是受到土体膨胀区位置的影响,即极值点的位置基本与冻胀区外边缘的位置接近。

由图 6 路基表面横向应力曲线可以看出,1/2 边坡处是承受拉应力与压应力的分界点,该点以左部分承受压应力,该点以右部分承受拉应力,压应力极值在坡脚位置产生,由 1/2 边坡处至路中拉应力逐渐增大,直到最大值。

图 7 为路中横向应力随深度变化曲线,从中可以看出路基深度 5m 以下承受压应力,其余部分承受拉应力。在 2 m 左右产生最大的拉应力,结合图 3 路基水分场等值线图可以看到拉应力极值点的位置与含水量突增区的位置基本一致,即由于土体中水分迁移、冻胀而使路基中部处于受拉状态,当路中的拉应力超过土体的抗拉强度时,路基将被拉裂。

综上可以得出,路基温度场的变化将引起土体水分运动参数的变化,水分场在温度梯度的作用下,有向冻结冰锋线迁移的趋势,在该处出现水分突增现象;路基中水分的迁移,将影响土体的热物理参数,进而影响路基内部的温度变化;水分向冻结冰锋线迁移,在具有使土体中水分相变为冰的负温条件下,当土体的体积含冰量超过临界值,将产生冻胀现象,在路基土体内部产生拉应力及路基表面出现不均匀变形和裂缝等病害,导致多年冻土地区的道路出现破坏。

3 结 语

在建立多年冻土地地区路基温度场、水分场及应力场(变形场)控制方程的基础上,提出水-热-力耦合模型,并应用有限元的方法进行求解。以青藏公路唐南段 K3393+950 的冻土路基为研究对象,说明水-热-力三场耦合的计算过程,并给出相应计算

crete and prestressed concrete highway bridges and culverts[S].

- [4] TB10002-1999. 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S].

TB10002-1999. Specification for structural design of reinforced concrete and prestressed concrete railway bridges and culverts[S].

- [5] 刘来君. 大跨径桥梁施工控制温度荷载[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(2): 61 - 63.

LIU Lai-jun. Temperature load of construction controlling for long-span bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(2): 61 - 63.

- [6] 张 玥. 钢筋混凝土连续曲线箱梁桥温度变形研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.

ZHANG Yue. Research on the deforming for rein-

forced concrete continuous curved box-beam bridges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

- [7] 张元海, 李 乔. 桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 49 - 52.

ZHANG Yuan-hai, LI Qiao. Study of method for calculation of the thermal stress and secondary force of bridge structure by solar radiation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 49 - 52.

- [8] 丁汉山, 刘 华, 胡丰玲, 等. 高架桥弯梁抗扭稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 44 - 48.

DING Han-shan, LIU Hua, HU Feng-ling, et al. Overturning stability analysis of curved box girder bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 44 - 48.

(上接 19 页)

结果。分析了路基温度场、水分场及应力场的分布规律, 得出多年冻土路基的温度场、水分场及应力场(变形场)始终处在动态的变化之中。路基的热状况、水分状况与变化规律及由此引起的应力重分布是引起道路冻害的主要因素。

参考文献:

References:

- [1] 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.

- [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] 王铁行. 多年冻土地地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 1 - 85.

WANG Tie-hang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 1 - 85.

- [4] Greg P N, Ward G W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(1): 61 - 68.

- [5] Hoekstra P. Moisture movement in soil under temperature gradients with cold side temperature below freezing [J]. Water Resources Research, 1996, (2): 241 - 250.

- [6] 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.