

# 青藏铁路北麓河试验段地温分布对比分析研究

梁波<sup>1</sup>, 赵青海<sup>2</sup>, 刘德仁<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 铁道第二勘察设计院, 四川 成都 610031; 3. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 考虑相变和全球气温升高的影响, 利用数值分析方法, 对青藏铁路目前惟一的 L 型支挡结构的温度场进行了数值模拟。通过建立路基温度场有限元模型, 选取适当的边界条件、初始条件及热学计算参数, 计算北麓河试验路基断面 10 a 内的地温变化情况, 并与 2 a 的地温实际测试资料进行对比分析。冻土融化深度数值计算和实测数据吻合较好, 反映地温对气温变化的滞后响应特性, 表明计算模型是可信的, 计算结果可供参考。未来 10 a 的数值计算结果表明: 最大融深(或冻土上限)没有下降, 表明冻土已经形成新的平衡, 冻土上限稳定。可以预见该土工结构最终会达到一个稳定的热平衡状态, 表明 L 型这种柔性支挡结构应用于多年冻土地区是适宜的。

**关键词:** 土力学; 数值分析; 地温; 冻土; 融化深度

**中图分类号:** TU 411; O 241

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)07 - 1386 - 07

## STUDY ON COMPARATIVE ANALYSIS OF GROUND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF BEILU RIVER TEST SECTION IN QINGHAI—TIBET RAILWAY

LIANG Bo<sup>1</sup>, ZHAO Qinghai<sup>2</sup>, LIU Deren<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. The Second Railway Survey and Design Institute, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** Considering the phase-change and influence of the global temperature rising, the computed simulation of the temperature field of the L-typed retaining wall only in Qinghai—Tibet Railway has been carried out using numerical calculation method. Through establishing finite element model of subgrade temperature field, the suitable boundary condition, the initial condition and the heat computation parameter are selected; and the variation situations of ground temperature during the future 10 years in Beilu River test section are analyzed and they are compared with monitored two-year actual ground temperature. The calculated thawing depth and the measured data are basically consistent. The result shows that the characteristics of ground temperature response lagging to the temperature change. It also displays that the proposed model is reliable. The computed result can be adopted by other engineering practices. Future 10-year computed results indicate that the maximum thawing depth(or permafrost table) is not developed. It is explained that the frozen soil has already formed to a new balance; and permafrost table is stable. This result can be considered for Qinghai—Tibet Railway. It is forecast that the ground will finally be of stable thermal equilibrium condition. It indicates that the kind of flexible L-typed retaining wall applied to permafrost region is acceptable.

**Key words:** soil mechanics; numerical analysis; ground temperature; frozen soil; thawing depth

**收稿日期:** 2006 - 10 - 09; **修回日期:** 2007 - 01 - 27

**基金项目:** 铁道部科技开发计划资助项目(2001G001 - A - 01)

**作者简介:** 梁波(1964 -), 男, 博士, 1985年毕业于西南交通大学桥梁工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liang\_laoshi@126.com

# 1 引 言

在多年冻土地区, 路基稳定分析与一般地区的最大差别在于下伏地基土特殊的温度特性。冻土对温度极为敏感, 路基中的温度状况将直接影响多年冻土区路基的稳定状态<sup>[1, 2]</sup>。在多年冻土地区修建土工构筑物将不可避免地将对下伏多年冻土产生扰动, 改变地基土的热状况<sup>[1, 3]</sup>。多年冻土经扰动后很可能发生退化, 对多年冻土地区的土工构筑物稳定性将产生巨大影响, 所以冻土地区土工结构与温度状况密不可分<sup>[4]</sup>。基于保护冻土设计原则, 研究多年冻土地区温度场对冻土地区修建构筑物的稳定性有着重要的意义<sup>[5, 6]</sup>, 尤其对于青藏铁路工程建设、运营和维护具有一定的借鉴意义。有关青藏铁路冻土路基(路堤)的热稳定性分析已有不少研究成果<sup>[7~10]</sup>, 这些研究对于更好地把握路基的温度场并指导工程实践都有一定的参考意义。但针对多年冻土区支挡结构的热稳定分析尤其是温度场的分析还非常少。

本文利用数值计算理论和方法, 考虑相变和全球气温升高的影响<sup>[11]</sup>, 对青藏铁路多年冻土区北麓河试验段路基温度场进行数值模拟, 并与近 30 a 来青藏高原多年冻土区惟一的支挡结构地温测试资料<sup>[12]</sup>进行了对比分析, 通过评价工程措施的热稳定性及合理性, 以期分析和预测该工点的青藏铁路路基温度场的变化规律。

# 2 温度场控制微分方程及分析方法

在寒冷地区, 路基在季节活动层内的填土每年均会发生冻结和融化过程, 因此多年冻土地区的路基温度场问题应该是一个带有相变的传热问题。对于带相变的瞬态温度场问题, 其热量平衡控制微分方程<sup>[13~15]</sup>为

(1) 在  $\Omega_f$  (冻结区) 内, 设  $T = T_f$ , 则有

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \quad (1)$$

(2) 在  $\Omega_u$  (未冻结区) 内, 设  $T = T_u$ , 则有

$$C_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中: 下标“f”, “u”分别为冻、融状态;  $T_f$ ,  $C_f$

及  $\lambda_f$  分别为冻结区  $\Omega_f$  内冻土的温度、容积热容量和导热系数;  $T_u$ ,  $C_u$  及  $\lambda_u$  分别为融区  $\Omega_u$  (未冻结区) 内的温度、容积热容量和导热系数。

冻土的导热系数和比热随其温度的变化而变化<sup>[16]</sup>, 且由于冻土含有自由水, 在冻土融化、融土冻结时会放出、吸收很大的相变潜热, 这个相变潜热相对于温度变化的热量是非常显著的, 且不可忽略, 故在本问题中考虑相变潜热的影响, 且假定导热系数各向不变。

在移动相变界面  $\xi(t)$  上, 必须满足温度连续性条件和能量守恒条件, 即

$$T_u(\xi(t)) = T_f(\xi(t)) = T_m \quad (3)$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} - \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial n} = L \rho_d (w - w_u) \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (4)$$

式中:  $T_m$  为冻结温度,  $n$  为移动边的方向矢量,  $L$  为水的相变潜热(一般取 334.56 kJ/kg)<sup>[13]</sup>,  $w$  为含水量,  $w_u$  为未冻水含量,  $\rho_d$  为冻土的干密度。

固定边界上的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} T &= T_a \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n_1} &= -\alpha(T_a - T) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为常数,  $T_a$  为环境温度,  $n_1$  为固定边界的方向矢量。

初始条件为

$$\left. \begin{aligned} T_f|_{t=0} &= T_f^0 \quad (\text{在 } \Omega_f \text{ 内}) \\ T_u|_{t=0} &= T_u^0 \quad (\text{在 } \Omega_u \text{ 内}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假设相变时发生在  $T_m$  附近的一个温度范围内 ( $T_m \pm \Delta T$ ), 在构造等价热容时还必须计入  $\Delta T$  的影响, 则比热容  $C$  和导热系数  $\lambda$  的表达式分别为

$$C = \begin{cases} C_f & (T < T_m - \Delta T) \\ \frac{L(w - w_u)\rho_d}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T) \\ C_u & (T > T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_f & (T < T_m - \Delta T) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T) \\ \lambda_u & (T > T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (8)$$

利用式(7), (8), 可将式(1), (2)简化为

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

由于冻土的比热和导热系数是随温度的变化而变化, 加上两相界面的位置也不是固定的, 因此, 界面的能量守恒条件是非线性的, 所以该问题在数学上是一个强非线性问题, 也无法获得解析解, 故采用数值计算方法获得数值解。采用离散伽辽金方法可得到该问题的有限元计算公式为

$$[M] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (10)$$

式中:  $[M]$  为非稳态变温矩阵,  $[K]$  为温度刚度矩阵,  $\{T\}$  为未知温度值的列向量,  $\{F\}$  为与边界条件有关的温度荷载列向量。

$[M]$  矩阵的元素为

$$M_{ij} = \sum \int_{\Omega_e} CN_i N_j d\Omega \quad (11)$$

温度刚度矩阵  $[K]$  可表示为

$$[K] = \sum \left[ \int_{\Omega_e} \lambda \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{S_e} \alpha N_i N_j d\Gamma \right] \quad (12)$$

温度荷载列向量  $\{F\}$  矩阵的元素为

$$F_i = \sum \int_{S_e} (\alpha T_a + q_v) N_i d\Gamma \quad (13)$$

式中:  $\Omega$  为所积温度场空间域,  $S_e$  为  $\Omega$  域的边界,  $q_v$  为热流量。

### 3 试验段地温场数值分析

#### 3.1 计算模型的建立

本文认为路基在纵向是无限延伸的, 故横断面按二维平面应变问题处理。模型的左、右边界与下边界属于无限大的冻土范围。为计算的方便, 模型取在热扰动的影响范围之内即可, 将不会影响计算结果。本文路基计算模型的左右边界为挡墙处向外各延伸 20 m, 可按绝热条件处理。深度自地面向下取 20 m 作为模型的下边界。依据实测归纳出来的地温随深度变化的普遍规律, 下边界按温度梯度<sup>[1, 3]</sup>为 0.02 °C/m。现场 L 型支挡结构的断面构成及测温孔布设情况<sup>[12]</sup>见图 1 所示。在本模型的计算过程中没有考虑冻结过程和融化过程中水相变的不同, 认为

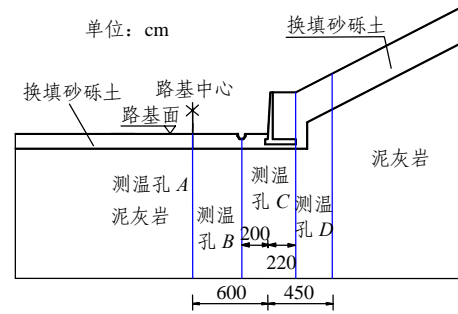


图 1 路基断面构成及测温孔布设情况示意图<sup>[12]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of structure composition and temperature-monitoring holes location of subgrade<sup>[12]</sup>

在冻结和融化过程中相变过程一致。在计算中考虑青藏高原未来 50 a 内大气温度升高 2.0 °C 左右和地温随时间滞后变化的影响<sup>[1, 11]</sup>。

#### 3.2 初始及边界条件的确定

本文计算模型及网格划分见图 2。

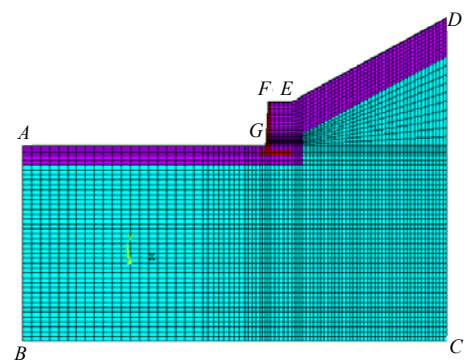


图 2 计算模型及网格划分

Fig.2 Computation model and grids

对于多年冻土区路基计算模型, 其微分方程为

(1) 在  $\Omega_f$  内, 有

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{\rho C_f} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

(2) 在  $\Omega_u$  内, 有

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\lambda_u}{\rho C_u} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

(3) 初始温度条件  
初始温度条件为

$$T(t)|_{t=0} = T_0 \quad (16)$$

式中:  $T_0$  为冻土的初始实测温度。

(4) 边界条件

①  $AB$  及  $CD$  边:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

②  $BC$  边:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -0.02 \text{ (}^\circ\text{C/m)} \quad (18)$$

(5) 模型的上边界

下附面层底初始年平均地表温度值根据测温孔全年实际观测取值, 气候变暖引起的下附面层底地温年增温率取  $0.02 \text{ }^\circ\text{C/a}$ <sup>[1, 2, 4]</sup>。

①  $AG$  边:

$$T = -0.72 + \frac{0.02t}{8760} + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (19)$$

②  $FE$  及  $ED$  边:

$$T = -0.7 + \frac{0.02t}{8760} + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (20)$$

③  $GF$  边:

$$T = -1 + \frac{0.02t}{8760} + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (21)$$

### 3.3 冻土基本热物理计算参数

由于土的成分和物理化学性质的差异, 造成冻、融土热学性质的多变性, 路基土热参数很大程度上取决于水溶液的含水量和性质, 土体中水分有使土颗粒间接触热阻抗急剧减小的作用<sup>[4, 6, 14]</sup>。确定路基土热参数是求解冻土路基温度场的前提, 也是准确求解路基温度场的关键所在。温度场计算分析中所采用的热参数有导热系数、比热容和相变潜热等, 这些参数与土质、土密度和含水量有密切关系。

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。冻土与融土的主要区别在于含有冰。试验结果表明, 土的比热具有按各物质成分的质量加权平均性质(土中气相填充物的含量及比热均很小, 可忽略不计)。因此, 冻土在冻、融状态下的比热容、导热系数和土的相变潜热可通过实测得到, 也可用通过土的干密度和含水量为参变量进行最小二乘非线性回归分析, 可参见规范<sup>[16]</sup>附录 K 汇总的有关计算热参数的公式。

表 1 和 2 分别给出通过现场实测土层特性<sup>[12]</sup>参数和由公式计算得到土体热学参数。

表 1 冻土的物理指标及相变潜热

Table 1 Physical indices and phase-change heat of frozen soils

冻土类别	天然密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	冻土总含水量 $w$ /%	完全冻结状态体积含冰量/%	相变区 / $^\circ\text{C}$	相变潜热 /( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ )
粗砾砂	2 210	6.24	11.25	-0.6~-0.1	35.91
泥灰岩	2 000	31.64	28.77	-1.2~-0.1	116.62

表 2 计算用土体热学参数及特性参数表

Table 2 Thermal parameters and characteristic parameters of soils for computation

类型	$C_u$ /( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$C_f$ /( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$\lambda_u$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )	$\lambda_f$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )
砂砾土	2 332.6	1 899.4	2.970	3.530
泥灰岩	3 380.0	2 840.0	1.906	2.897
混凝土	-	-	1.550	1.550

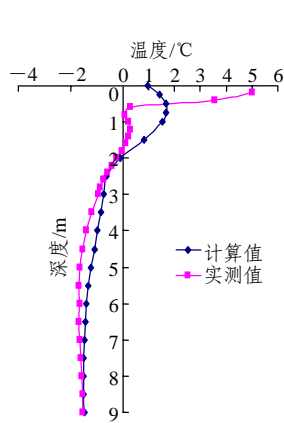
## 4 温度数值模拟与实测结果的对比

基于温度场理论即带相变的瞬态温度场热量平衡控制微分方程, 考虑初始条件, 边界条件, 在时间荷载和温度荷载(考虑相变和全球气候变暖)作用下, 利用 ANSYS 有限元程序计算未来某一时刻某一位置的温度和温度场的分布, 从而达到与实测温度场对比和预测未来温度场分布的目的。本文计算北麓河试验路基断面 10 a 内的温度场变化情况, 并取 2 a 的地温计算值与实测结果进行对比分析, 以验证模型的正确性。

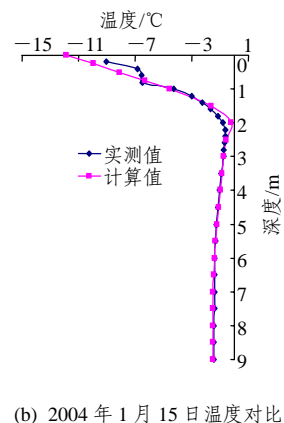
### 4.1 计算结果与实测结果在深度方向的对比分析

由于所建的有限元分析模型节点众多, 且每个节点的温度状况随时间的变化而变化, 因而计算结果的数据量较大, 对所有节点均进行验证工作量巨大、繁琐且物理意义也不太明确。根据实际测温孔所在位置, 取出相应节点在不同时刻的温度与实际温度进行对比, 本文仅仅对图 1 所示测温孔 A, B, C 处的地温计算结果与现场温度实测结果<sup>[12]</sup>进行对比, 对比结果如图 3~5 所示。

通过计算结果与实测结果的比较可看出如下规律: 计算曲线趋势基本与实测结果一致, 不同深度地温的有限元计算结果与实测结果误差有所不同。地表以及浅层土体温度的计算结果与实测结果误差较大, 深层土温的误差较小, 其主要原因是外部环境的差异性。有限元计算时, 外部边界条件根据过去该地区的平均温度考虑确定, 而路基实际地温的测试受到测试时刻、测量误差以及当时气象条件多种



(a) 2003年10月15日温度对比



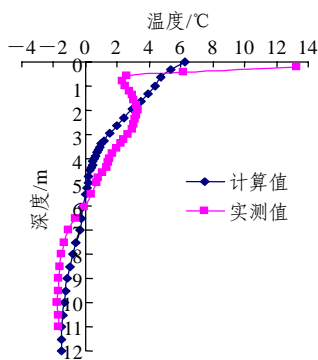
(b) 2004年1月15日温度对比

图3 不同时间测温孔A计算结果与实测结果对比  
Fig.3 Comparison of computed temperatures and actual temperatures of borehole A at different times

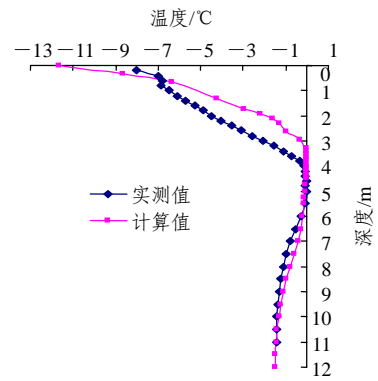
因素影响，波动较大，与有限元计算所采用的条件不可能完全一致，因而浅层土地温误差较大。深层土地温受外部条件短期波动的影响较小，主要受长期气象条件积累效应的影响，所以误差较小。

#### 4.2 计算结果与实测结果融化深度的对比分析

表3为实测值与计算值融化深度对比。图6所示为2003, 2004年路基达到最大融化深度时数值计算和实测地温最大融深线的对比图。

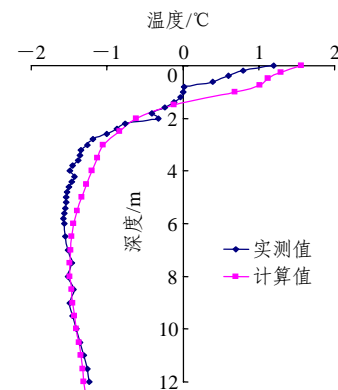


(a) 2003年10月15日温度对比

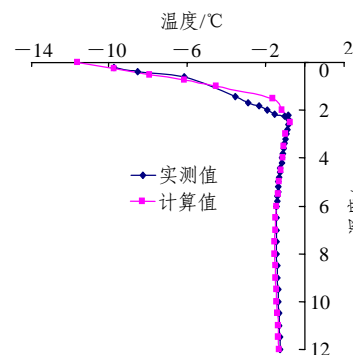


(b) 2004年1月15日温度对比

图4 不同时间测温孔B计算结果与实测结果对比  
Fig.4 Comparison of computed temperatures and actual temperatures of borehole B at different times



(a) 2003年10月15日温度对比



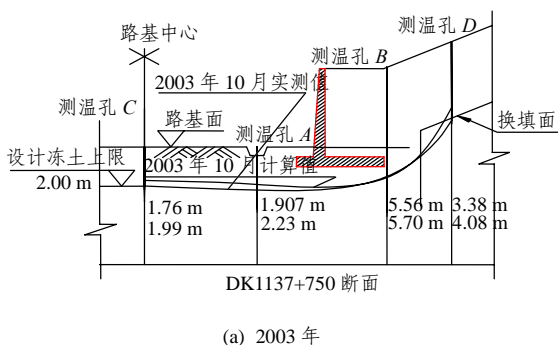
(b) 2004年1月15日温度对比

图5 不同时间测温孔C计算结果与实测结果对比  
Fig.5 Comparison of computed temperatures and actual temperatures of borehole C at different times

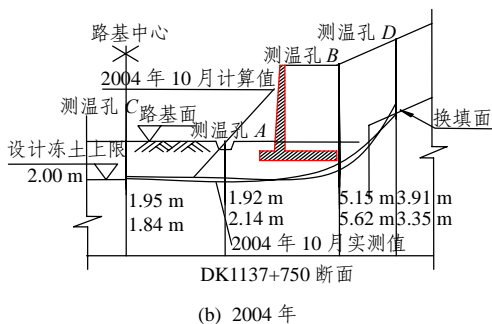
表3 实测值与计算值融化深度对比

Table 3 Comparison of actual thawing depth and computed results

时间/年-月	测温孔	实测值/m	计算值/m
2003-10	A	2.23	1.91
	B	5.56	5.70
	C	1.99	1.76
	D	4.08	3.38
2004-10	A	2.14	1.92
	B	5.15	5.62
	C	1.95	1.84
	D	3.91	3.35



(a) 2003 年



(b) 2004 年

图 6 2003, 2004 年最大融化深度的对比

Fig.6 Comparison of the maximum thawing depth in 2003 and 2004

从表 3 和图 6 可看出: 数值计算得到的最大融化深度的测温孔 A, C 和 D 要比实测值略小, 但测温孔 B 要比实测值略大, 但总体来讲, 数值计算得到的融化深度与实测结果基本一致。

### 4.3 10 a 期间计算地温在深度方向的分布

图 7 为根据数值模拟计算所得到地温场(篇幅所限, 地温场分布图略)的数据绘制地温随着深度的变化曲线。所取的数据位置为与各测试孔相对应的位置, 这里仅取测温孔 A 和 B 两个典型地温孔分析。表 4 给出 2003, 2004 和 2012 年各个测温孔融化深度的变化值。

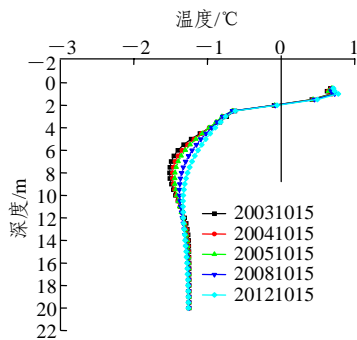
从图 7 和表 4 可看出:

(1) 最大融化深度已经稳定, 测温孔 A 和 C 最大融化深度约 2.0 m, 测温孔 B 最大融化深度约 5.7 m, 测温孔 D 最大融化深度约 4.0 m。

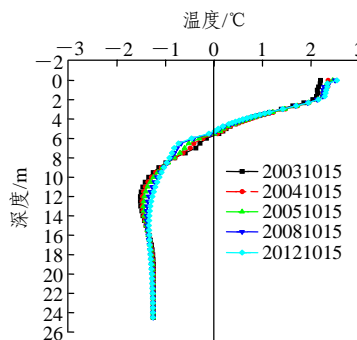
(2) 在气候变暖的条件下, 最大融化深度下测温孔 A, B, C 及 D 的温度随着年份的推移略有升高。

(3) 2003 及 2004 年计算和测试结果还较好地反映地温对气温变化的滞后响应特性。

此外, 从 10 a 后的融化计算深度来看, 融化深度与最初 2 a 比较没有下降且略有抬升, 这说明土体已经形成新的平衡状态, 趋于稳定, 这对青藏铁路是有利的。



(a) 测温孔 A 地温随着深度的变化



(b) 测温孔 B 地温随着深度的变化

图 7 测温孔处地温随着深度的变化

Fig.7 Temperature change along with depth in temperature-monitoring holes

表 4 10 a 期间融化深度的变化

Table 4 Thawing depth change during 10 years

时间/年-月	融化深度/m			
	测温孔 A	测温孔 B	测温孔 C	测温孔 D
2003 - 10	1.907	5.698	1.756	3.377
2004 - 10	1.918	5.619	1.835	3.348
2012 - 10	1.892	5.293	1.721	3.339

## 5 结 论

结合青藏铁路目前惟一的 L 型支挡结构实际工程措施和地层情况, 运用数值模拟方法研究了气候变暖条件下试验段温度场的变化规律, 并与现场实测最大融深(或冻土上限)进行对比, 这一研究工作目前还较少报道。通过数值计算与实测地温和最大融化深度的对比, 可认为本文的计算模型对模拟和预测实际地温变化规律是有意义的。通过上述研究可得到如下结论:

(1) 冻土融化深度数值计算和实测数据吻合较好, 并反映出地温对气温变化的滞后响应特性。表明本文计算模型是可信的, 计算结果可供参考。

(2) 10 a 的数值计算结果表明, 最大融深(或冻

土上限)没有下降,说明冻土已经形成新的平衡,冻土上限稳定,这对青藏铁路的稳定是有利的。

(3) 考虑全球气温升高因素,依据 10 a 的数值模拟,可以预见土体最终会达到一个稳定的热平衡状态,说明将 L 型柔性支挡结构应用于多年冻土地区是适宜的。

### 参考文献(References):

- [1] 潘卫东. 青藏高原多年冻土铁路路基热稳定性研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2002.(PAN Weidong. Research on thermal stability of railway roadbed in the permafrost area of the Qinghai—Tibet Plateau[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2002.(in Chinese))
- [2] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of frozen soils[M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese))
- [3] 喻文兵. 青藏铁路多年冻土区特殊结构路基研究[博士学位论文][D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003.(YU Wenbing. Study on special embankment in permafrost regions of Qinghai—Tibet Railway[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2003.(in Chinese))
- [4] KAY B D, PERFECT B. State of the art: heat and mass transfer in freezing soils[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988: 3 - 21.
- [5] 梁波, 陈兴冲. 青藏铁路的重要意义、技术难点及力学问题[J]. 工程力学, 2004, 22(增 1): 139 - 149.(LIANG Bo, CHEN Xingchong. The significance, the key technical problems and the mechanical problems of Qinghai—Tibet Railway[J]. Engineering Mechanics, 2004, 22(Supp.1): 139 - 149.(in Chinese))
- [6] 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): 92 - 98.(HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 92 - 98.(in Chinese))
- [7] 米隆, 赖远明, 吴紫汪. 高原冻土铁路路基温度特性的有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 62 - 67.(MI Long, LAI Yuanming, WU Ziwan. The finite element analysis of temperature property of railway embankments in cold regions[J]. Journal of China Railway Society, 2003, 25(2): 62 - 67.(in Chinese))
- [8] 田亚护, 刘建坤, 钱征宇. 多年冻土区含保温夹层路基温度场的数值模拟[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 59 - 64.(TIAN Yahu, LIU Jankun, QIAN Zhengyu. Numerical simulation for temperature field of roadbed on permafrost with insulation[J]. China Railway Science, 2002, 23(2): 59 - 64.(in Chinese))
- [9] 祁长青, 吴青柏, 施斌, 等. 青藏铁路冻土路基温度场随机有限元分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 330 - 335.(QI Changqing, WU Qingbai, SHI Bin, et al. Stochastic finite element analysis for the temperature field of frozen soil roadbed of Qinghai—Tibet Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 330 - 335.(in Chinese))
- [10] 孙增奎, 王连俊, 白明洲. 青藏铁路多年冻土路堤温度场的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459.(SUN Zengkui, WANG Lianjun, BAI Mingzhou. An experimental study on deformation of railway embankment in high temperature and fine-grained permafrost regions along the Qinghai—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459.(in Chinese))
- [11] 秦大河. 全球气候持续变暖[J]. 决策与信息, 2004, (12): 4 - 5.(QIN Dahe. The global climate continues to change warm[J]. Strategic Decision and Information, 2004, (12): 4 - 5.(in Chinese))
- [12] 铁道第一勘察设计院, 兰州交通大学. 厚层地下冰段路桥涵关键技术的研究(北麓河)—L 型挡土墙试验研究报告[R]. 西安: 铁道第一勘察设计院, 兰州交通大学, 2006.(The First Railway Survey and Design Institute, Lanzhou Jiaotong University. Research on key techniques of bridges and culverts crossing thick underground ice regions(Beilu River)—report of experimental research of L-typed retaining wall[R]. Xi'an: The First Railway Survey and Design Institute, Lanzhou Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [13] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.(ZHANG Zhengrong. Heat transference[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.(in Chinese))
- [14] KAY B D, GROENEVELT P H. On the interaction of water and heat transport in frozen and unfrozen soils: I basic theory; the vapor phase[J]. Soil Science, 1974, 38: 395 - 400.
- [15] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 1998: 116 - 123.(LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHU Yuanlin. Nonlinear analysis of the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold-region tunnels[R]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1998: 116 - 123.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 118 - 98 多年冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 118 - 98 Code of design and foundation of building in frozen soil region[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.(in Chinese))