

基于反演参数的多年冻土路基长期温度场预测

张明鸣¹ 冯玉勇² 周家文³

(1. 河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 深圳大铲湾港口开发投资有限公司 ,广东 深圳 518032 ;
3. 河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 利用青藏铁路清水河试验段路基 3 a 的现场温度场及沉降监测数据 ,采用模拟退火算法改进的 BP 神经网络算法反演了冻土路基的热力学参数 ,并在反演参数的基础上应用有限元法模拟预测了冻土路基在不同保温处理方案下的长期温度场变化情况 .结果表明 :保温材料路基阴阳坡地的温度场差异小于素填土路基 ,多年冻土季节性活动层厚度也远低于素填土路基 ;保温材料路基施工后 3 a 内仍将发生冻融变形 ,形成路基病害 ,但破坏程度低于素填土路基 ;50 a 后 ,保温材料路基将与青藏高原气候环境达到新的热平衡状态 ,施工对多年冻土造成的破坏可得到修复 ,路基稳定性良好 ,但素填土路基仍存在较厚的季节性活动层 ,这将会使路基发生严重的变形破坏 ;保温处理方案可较为有效地减少冻土路基的不均匀沉降 .

关键词 青藏铁路 ;冻土路基 ;沉降 ;温度场

中图分类号 :TU471.7 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)04-0425-05

青藏铁路格尔木—拉萨段穿越青藏高原 ,全长 1 118 km ,线路经过 550 km 连续多年冻土地段 ,其工程地质条件的特殊性和复杂性在世界上是独一无二的 .高温、高含冰量冻土在工程施工的影响下容易失去原有的热平衡状态 ,从而导致冻土上限的改变及土层融化下沉 ,这对冻土非常不利 .保持多年冻土处于冻结状态是青藏铁路路堤设计的一个重要基本原则 .本文利用清水河试验段敷设保温板和未敷设保温板的路基 3 a 的温度场及变形监测数据 ,对青藏铁路多年冻土区试验段路堤的温度场变化特征进行了数值模拟 ,并在反演参数的基础上进行了长期预测 ,比较了各种保温处理方案的效果 .

1 热力学控制微分方程

在对路基进行数值模拟^[1-3]时 ,由于铁路道碴铺层的对流换热为多孔介质的热传导问题 ,同时路基填料为含水量较低的砂砾石土 ,忽略路基中的对流和水的渗流 ,仅考虑路基和路基土中的热传导 ,利用显热容法可得到瞬态导热微分方程

$$c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \tag{1}$$

式中 : c ——材料比热容 ; θ ——土体温度 ; λ ——热导率 ; t ——时间 ; x 、 y 、 z ——坐标 .

对于冻土融化出现的相变问题 ,有

$$\lambda_f \frac{\partial \theta_f}{\partial n} - \lambda_u \frac{\partial \theta_u}{\partial n} = L \frac{ds(t)}{dt} \tag{2}$$

式中 : L ——相变潜热 ; λ_f ——冻土热导率 ; λ_u ——冻土融化后的热导率 ; θ_f ——冻土状态时的温度 ; θ_u ——冻土溶化后的温度 ; s ——体积 ; t ——时间 ; n —— x 、 y 、 z .

对于相变的热传导问题 ,由于相变界面随时间的变化曲线是间断的 ,计算中引入了焓

$$H = \int c(\theta) d\theta \tag{3}$$

因为焓 H 随时间 t 的变化是连续的 ,所以用数值方法求解焓的分布时 ,不需要跟踪两相界面 ,从而可统一处

理液相区和固相区.

2 热力学参数反演及温度场模拟

温度场的模拟,参数选取至关重要.保温板是工业化生产材料,质地比较均匀,因此试验数据随机性较小,计算时直接采用出厂检验参数: $c=7.5\times10^4\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $\lambda=0.02\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $\rho=40\text{kg}/\text{m}^3$.多年冻土地层形成于地质历史时期,影响其热工参数的因素比较复杂,空间随机性大,从少量钻孔获得的数据也容易产生偏差.人工填筑路基会受到取土地层分布随机性的影响,其颗粒级配、含水量、物质组成都有很大的随机性.由于施工碾压质量也会受到机械工作状态、施工工艺等因素的影响,填土的物理参数和热工参数具有很大的空间随机性.为了获得路基和地基的热工参数,根据原位测试数据,利用模拟退火神经网络方法反演了路基和地基热工参数.根据反演参数计算得到的冻土温度场长期稳定性将具有更高的可信度.

2.1 模拟退火神经网络方法

模拟退火算法^[4]是局部搜索算法的扩展,其基本思想是通过模拟高温物体退火过程来寻找优化问题的全局最优解^[5].基于模拟退火算法的BP网络^[6],是利用模拟退火算法来加快收敛速度和避免陷入局部最小的一种方法^[7-8].具体算法过程如下:

- 根据 Sigmoid 函数的性质将输入样本和输出样本进行归一化处理,产生 $[-1,1]$ 之间的随机数并赋给 W_i (输入层到隐含层的权值) 和 V_i (隐含层到输出层的权值),得到 W_1 和 V_1 .
 - 正向计算.(a)从输入层到隐含层,求解 $PW_1=H$,得出权值 H .(b)从隐含层到输出层,求解 $HV_1=S$,得到最后输出 S .(c)将 S 与期望输出进行比较,计算能量函数值 E 的误差,如果该误差满足精度要求则停止正向计算,若该误差不能满足精度要求,说明神经网络已经陷入局部最小,则调用模拟退火算法子程序.
 - 模拟退火算法子程序的计算过程如下 (a)设定初始温度 T_1 ,迭代次数 $n=0$.(b)输入训练的样本,计算当前的能量函数 E .(c)按照某一随机过程,产生一很小的扰动 δW_1 和 δV_1 ,并修改权值和偏差,即 $W_2=W_1+\delta W_1$, $V_2=V_1+\delta V_1$,同时计算该状态下的能量函数 E_1 .若 $E_1<E$,则接受该状态, $W_1=W_2$, $V_1=V_2$.若 $E_1\geq E$,先计算能量函数的增量 ΔE ,然后计算概率 $P=\exp(-(E_1-E)/T(t))$ ($T(t)$ 为此时的温度),产生 $[0,1]$ 区间的一随机小数 r ,再按 Boltzmann 分布确定是否接受当前的修改.若 $P>r$,则接受这次修改,若 $P\leq r$,则进入下一次迭代计算 ($n=n+1$),并按给定的冷却方程对系统进行降温,直至冷却到给定的终止温度.
 - 计算 W_1 和 V_1 的修正值, W_1 和 V_1 满足给定精度时结束训练,同时输出最后的 W, V, B .
- 上述模拟退火算法可使得 BP 神经网络快速地收敛于全局最小.

2.2 地基和路基填土热工参数的反演

DK1026+995 和 DK1027+250 断面路基成型后的几何形态基本相同,地质条件概化为保温板、路基填土和地基填土,如图 1 所示.

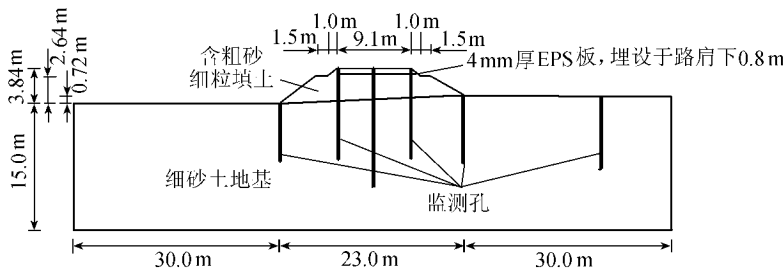


图1 路基地质条件及监测孔布置

Fig.1 Geological condition of railway subgrade and layout of monitoring points

由于 EPS 保温材料的热力学参数已知,只反演路基材料及地基材料冻融前后的比热容 c ($10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) 和热导率 λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).反分析的计算过程如下 (a)确定各参数的搜索范围,将搜索范围分为 5 级,如表 1 所示 (b)根据正交化设计原理构造输入样本(表 2),并将计算得到的 62,68,77,78,87 等 9 个节点的 2004 年 12 月平均地温(表 3)作为输出样本 (c)将输入样本和输出样本输入到模拟退火算法改进的 BP 神经网络中即可得到各参数的反演结果,如表 4 所示.

将反演参数代入原计算模型,计算得到相关点 2004 年 12 月的平均温度,计算结果与实测数据的对比如

表 5 所示.

表 1 参数分级
Table 1 Parameter grading

级号	λ_{2f}	λ_{2u}	c_{2f}	c_{2u}	λ_{3f}	λ_{3u}	c_{3f}	c_{3u}
1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
3	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

表 2 部分训练样本参数组合
Table 2 Parameter combination for part
of training samples

序号	λ_{2f}	λ_{2u}	c_{2f}	c_{2u}	λ_{3f}	λ_{3u}	c_{3f}	c_{3u}
1	1.50	2.00	1.80	2.30	2.50	1.80	1.50	2.00
2	1.80	2.30	2.00	2.50	1.50	2.00	1.80	2.30
3	2.00	2.50	2.30	1.50	1.80	2.30	2.00	2.50
4	2.30	1.50	2.50	1.80	2.00	2.50	2.30	1.50
5	2.50	1.80	1.50	2.00	2.30	1.50	2.50	1.80
6	1.50	2.50	2.00	1.80	2.30	2.00	1.50	2.50
7	1.80	1.50	2.30	2.00	2.50	2.30	1.80	1.50
8	2.00	1.80	2.50	2.30	1.50	2.50	2.00	1.80
9	2.30	2.00	1.50	2.50	1.80	1.50	2.30	2.00
10	2.50	2.30	1.80	1.50	2.00	1.80	2.50	2.30

2.3 边界条件和初始条件的确定

2.3.1 边界条件

对海拔 4 700 m 的清水河段路基计算模型来说,路基边界温度直接受气温的控制^[9-11].由观测资料可知,原地面年均温度为 -2℃,全年最大温差为 22.24℃.计算起始时刻为 2001 年 12 月 31 日,每年最高温度出现在 8 月中旬.路基表面温度边界条件根据式(4)来确定,其他边界为绝热边界^[12-13].

$$T = A + B\sin(2 \times 3.14t/365 - 2.10) + C$$
 (4)

式中:A——边界年平均气温;B——气温波动幅度;C——气温变化参数; t ——时间参数. A, B 根据 3 a 的监测数据确定, C 根据青藏高原未来 50 a 内气温的变化情况^[14-15]确定.于是可得原地面边界条件

$$T = 2.0 + 11.14\sin(2 \times 3.14t/365 - 2.10) + 2t/(50 \times 365)$$
 (5)

阳坡边界条件

$$T = 1.0 + 12.5\sin(2 \times 3.14t/365 - 2.10) + 2t/(50 \times 365)$$
 (6)

路基顶面边界条件

$$T = 0.5 + 10.5\sin(2 \times 3.14t/365 - 2.10) + 2t/(50 \times 365)$$
 (7)

阴坡边界条件

$$T = 4 + 13.5\sin(2 \times 3.14t/365 - 2.10) + 2t/(50 \times 365)$$
 (8)

2.3.2 初始温度场

由 DK1026 + 995 断面 2001 年 12 月 31 日实测温度场(图 2)插值得到各断面路基温度场.

2.3.3 计算断面的网格剖分

计算断面为 DK1026 + 995 断面和 DK1027 + 250 断面.模型选取的计算范围为沿路基坡脚处向两边延伸 30 m,下边界为原地面以下 15 m.以 PLANE55 热力学单元剖分网格.共分为 3 种材料,503 个单元,551 个节点.

表 3 实测 2004 年 12 月平均地温
Table 3 Measured data of average ground
temperature for Dec. 2004

节点编号	62	68	77	78	82	87	88	92	97
地温	-0.001	-6.294	-3.290	-6.550	-2.300	-0.400	-1.790	-0.280	-0.030

表 4 反演结果

Table 4 Result of back analysis

λ_{2f}	λ_{2u}	c_{2f}	c_{2u}	λ_{3f}	λ_{3u}	c_{3f}	c_{3u}
2.006 36	1.827 27	1.991 75	2.077 76	2.025 57	1.750 47	1.727 41	2.062 90

表 5 反演结果与实测结果的对比

Table 5 Comparison of measured data
with result of back analysis

节点 编号	实测 地温	计算 地温	节点 编号	实测 地温	计算 地温
62	-0.001	-0.001	87	-0.400	-0.562
68	-6.294	-6.296	88	-1.790	-2.112
77	-3.290	-3.309	92	-0.280	-0.241
78	-6.550	-6.476	97	-0.030	-0.031
82	-2.300	-2.610			

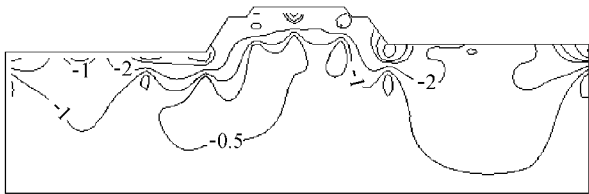


图 2 DK1026 + 995 断面 2001 年 12 月 31 日
实测温度场(单位:℃)

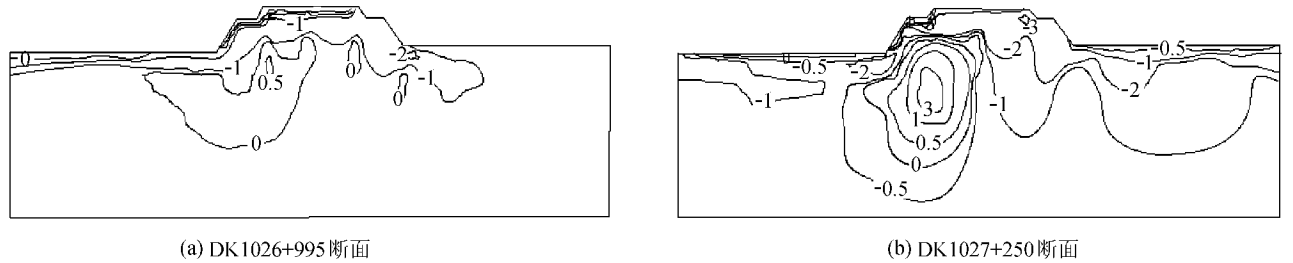
Fig.2 Measured temperature field for section
DK1026 + 995 on Dec. 31, 2001(unit :℃)

3 有限元计算结果分析和路基稳定性预测

根据反演获得的参数,模拟了50a的路基地温场变化,并对施工完成后3a和50a暖季地温场形态进行了对比分析,对路基的近期和长期稳定性进行了预测。

数值模拟获得的施工完成后3a(2004年10月31日)路基地温场形态与观测结果基本一致。路基填土蓄热3a后仍未完全释放,主要表现在暖季阳坡融化深度仍很深。铺设保温材料的DK1026+995断面阳坡融化深度接近3.0m,而没有铺设保温材料的DK1027+250断面阳坡融化深度则高达9.0m。这也意味着多年冻土季节活动层厚度分别高达3.0m和9.0m。保温材料路基虽然融化深度远低于素填土路基,但其融化深度仍低于天然上限(天然冻融线)0.5m。因此,近期路基融沉和冻胀变形仍比较突出,路基稳定性差。

路基修建后50a(2052年10月31日)暖季地温场模拟结果表明,DK1026+995断面阳坡地基融土核基本消失(图3(a)),路基中基本上不再存在融化夹层,即季节性活动层厚度与天然地面基本相同。这意味着经过长期恢复,保温材料路基与自然环境达到了新的热力学平衡状态,保温材料路基将停止季节性融沉和冻胀变形,路基稳定性良好。与此相反,DK1027+250断面阳坡有一定的融化深度(图3(b)),而且融化夹层的温度大于1℃。这说明素填土路基与自然环境仍然没有达到热力学平衡状态,路基将继续遭受融沉和冻胀变形。



(a) DK1026+995断面 (b) DK1027+250断面

图3 2052年10月31日模拟温度场(单位:℃)

Fig.3 Simulated temperature field for Oct. 31, 2052 (unit: °C)

4 结 论

数值模拟结果表明,保温材料路基阴阳坡地温场差异小于素填土路基,多年冻土季节性活动层厚度也远低于素填土路基,因此保温材料路基变形将小于素填土路基。保温材料路基施工结束后3a内仍将发生冻融变形,形成路基病害,但破坏程度低于素填土路基。这与变形监测结果一致(表6)。50a后,保温材料路基将与青藏高原气候环境重新达到新的热量平衡状态,施工对多年冻土造成的破坏得到修复,路基稳定性良好,但素填土路基仍存在较厚的季节性活动层,这将会使路基发生严重的变形破坏。

表6 两断面沉降观测数据

Table 6 Observed data of settlement of two cross-sections

桩 号	位 置	位移/mm			同比增长/%	
		2002年 12月	2003年 12月	2004年 12月	2003年 12月	2004年 12月
DK1026+995	阳坡护道	28	51	65	82	27
	阴坡护道	572	585	590	2	1
	阳坡路肩	117	145	165	24	14
	阴坡路肩	54	76	87	41	14
DK1027+250	阳坡护道	208	280	348	35	24
	阴坡护道	33	113	120	242	6
	阳坡路肩	44	91	158	107	74
	阴坡路肩	37	55	75	49	36

参考文献:

[1] 米隆, 赖远明, 吴紫汪, 等. 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.
[2] 李国玉, 李宁, 全晓娟, 等. 青藏铁路可控调通风管路路基温度场的三维非线性分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 128-133.
[3] 刘志强, 赖远明. 带隔热门的通风路基三维温度特性数值分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 134-139.
[4] 冯玉勇. 青藏铁路高温多年冻土区路基观测试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
[5] 高尚. 模拟退火算法中的退火策略研究[J]. 航空计算技术, 2002, 33(4): 20-22.
[6] 石安池, 徐卫亚, 周家文, 等. 边坡弹性模量反分析的模拟退火 BP 网络方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1):

69-73.

[7]何则干,陈胜宏.遗传模拟退火算法在边坡稳定分析中的应用[J].岩土力学,2004,25(2):316-319.

[8]杨林德.岩土工程问题的反演理论与工程实践[M].北京:科学出版社,1996.

[9]田亚护,刘建坤,钱征宇,等.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.

[10]赖远明,刘松玉,吴紫汪.寒区挡土墙温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J].土木工程学报,2003,36(2):88-95.

[11]赖远明,张鲁新,张淑娟,等.利用抛石护坡调节冻土路基阴阳坡的温度分布[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4212-4220.

[12]蒋武军,葛修润.通风路基温度特性的有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4112-4118.

[13]孙增奎,王连俊,魏庆朝,等.青藏铁路多年冻土区路基温度场的模拟与预测[J].北方交通大学学报,2004,28(1):55-59.

[14]秦大河,丁一汇.中国气候与环境演变评估(1):中国气候与环境变化及未来趋势[J].气候变化研究进展,2005,3(1):4-9.

[15]黄小铭.论高原冻土区铁路路基的设计原则及其应用[J].中国铁道科学,2001,22(1):23-31.

Long-term temperature field prediction for railway subgrade in permafrost soil zone based on parameter back analysis

ZHANG Ming-ming¹, FENG Yu-yong², ZHOU Jia-wen³

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Dachanwan Port Exploitation and Investment Ltd. of Shenzhen , Shenzhen 518032 , China ;
3. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on 3-year temperature field and settlement monitoring data of the subgrade in Qingshuihe test section on Qinghai-Tibet Railway , the thermodynamic parameters for the subgrade in permafrost soil zone were back analyzed by use of BP neural network improved by annealing simulation method , and the long-term variation of the temperature field in the railway subgrade under different heat insulation schemes was predicted by use of FEM. Some conclusions are drawn as follows : both the thickness of seasonal active layer and the temperature difference between the slope exposed to the sun and the one back faced to the sun of the heat-proof railway subgrade are smaller than those of the plain-filled subgrade ; the freeze-thaw deformation of heat-proof subgrade will occur in 3 years after construction , which will lead to the damage to the subgrade , but the damage degree is lower than that of the plain-filled subgrade. Since a new thermal balance will reach between the heat-proof railway subgrade and the climate circumstance of Qinghai-Tibet plateau after 50 years , the damage to permafrost soil zone caused by construction could be recovered , and good stability of the railway subgrade could be realized , but this circumstance doesn't occur in plain-filled railway subgrade , and the thick seasonal active layer will lead to serious deformation of such type of subgrade. Furthermore , the heat-insulation scheme can effectively decrease the non-uniform settlement of the subgrade in permafrost soil zone.

Key words :Qinghai-Tibet railway ; subgrade in permafrost soil zone ; settlement ; temperature field