

# 青藏铁路多年冻土区站场路基温度场试验研究

闵冬丽 魏庆朝 王连俊

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**【摘要】** 站场路基的宽度为单线普通路基宽度的两倍。结合青藏铁路试验工程观测数据, 分析了站场路基地温场及多年冻土人为上限的特征, 探讨了路基的冻结和融化过程的规律, 阐述了多年冻土区路基的稳定性问题。

**【关键词】** 多年冻土; 站场路基; 温度场; 人为上限

**【中图分类号】** P642.14

## the Study of Yard-and-station Roadbed's Temperature Field of Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Region

Min Dongli Wei Qingchao Wang Liangjun

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China)

**【Abstract】** The width of yard-and-station roadbed is twice over common single-track embankment. Based on the experimental data of Qinghai-Tibet railway's experimentation project, the character of yard-and-station roadbed's temperature field and artificial permafrost table are analyzed, the rule of the process of embankment's freezing and thaw is also discussed. The stability of embankment in permafrost region is also presented.

**【Key words】** permafrost; yard-and-station roadbed; temperature field; artificial permafrost table

### 0 引言

青藏铁路格尔木至拉萨段是西部大开发战略实施的四大重点工程之一, 它将结束我国只有西藏自治区没有铁路的历史。该线全长 1 118 km, 其中穿越多年冻土区的长度为 632 km, 全线海拔 4 000 m 以上的线路长度约为 965 km。在如此高海拔地区进行铁路建设, 不仅在国内尚属首次, 在国际上也无前例。

青藏高原多年冻土区修建的铁路站场路基与天然地层的区别在于以下两个方面: 第一, 由于填方挖方等人为作用, 形成了一定尺寸的几何断面, 从而改变了本体的受热条件, 使其人为上限呈现出不等量、不对称的特征, 从而影响了其局部或整体的稳定性; 第二, 基于满足工程结构强度的要求, 路基本体的介质特性(物理和热物理性质)不同于天然地层, 从而影响了它的传热性能, 使其与天然地层之间出现了新的热力平衡关系<sup>[1,2]</sup>。

站场路基的宽度为单线普通路基宽度的两倍左右, 整个路基断面形式、尺寸都和普通路基有所不同, 因此路基整体的传热性能和传热特点都和普通路基有区别。因此了解在气候变化的条件下, 站场

路基在修筑后的地温响应过程及特点是我们分析站场路基的变形特征以及站场路基的稳定性问题的基础。

### 1 清水河站场路基试验工程概况

站场路基试验段起讫里程: DK1025+000~DK1025+100, 长度 100 m, 宽度为 16 m, 高度为 5~5.5 m。位于楚玛尔河高原平原区, 地形平坦开阔。该试验段有两个监测断面, 断面里程分别为 DK1025+025 和 DK1025+77.73。

#### 1.1 试验段工程地质条件

试验工点范围内地层岩性主要为: 细砂, 圆砾土, 泥灰岩。分述如下:

①细砂: 厚 0.5~3.0 m, 浅黄色, 成分主要以长石、石英为主, 砂质不均, 含有砾石, 松散, 融化后潮湿, III级硬土,  $\sigma_0=100$  kPa, 强融沉, 弱冻胀。

②圆砾土: 厚 1.0~2.0 m, 灰黄色, III级硬土, 上限以上,  $\sigma_0=350$  kPa, 上限以下为少冰、多冰冻土,  $\sigma_0=350$  kPa, 弱融沉, 弱冻胀。

③泥灰岩: 灰黄色, 青灰色, 成岩作用差, 上限以上 VI级软石,  $\sigma_0=300$  kPa, 上限以下 V级次坚石,  $\sigma_0=800$  kPa, 弱融沉, 弱冻胀。

基金项目: 铁道部科研基金(2001QZ-26)

作者简介: 闵冬丽, 1979年生, 女, 汉族, 山西绛县人, 硕士研究生, 主要从事路基工程方面的研究。E-mail: mindl1979@163.com

地表水主要为各冲沟季节流水,由大气降水补给,水量一般不大,径流条件差;地下水主要为暖季分布的冻结层上水,对混凝土具硫酸盐弱侵蚀性,由大气降水补给,水位不稳定,水量较小。

多年冻土年平均温度为 $-0.5\sim-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属高温不稳定多年冻土,多年冻土上限埋深 $2\sim 3\text{ m}$ 。

### 1.2 试验段气候条件

本段属于青藏高原冰雪型气候区,属中纬度高原多年冻土区。平均海拔 $4\ 516\text{ m}$ ,气候寒冷干燥,气温、气压低,春秋季节短暂,冻结期为9月至次年4月,气温较低(年平均气温 $-2\sim-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、冻结期长(全年达7个月以上,即使暖季夜间也有短暂的冻结)、多年冻土平均地温低( $0\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、积雪较薄,且保存时间短等特点。根据清水河附近气象站资料,本段的年平均气温 $-6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-46.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最热月为7月,平均气温 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;最冷月为1月,平均气温 $-21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均气温较差 $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;平均气压 $61.7\text{ kPa}$ ;年平均降水量 $187.2\text{ mm}$ ,年最大降雨量为 $287.6\text{ mm}$ ,主要集中在7、8、9三个月,年最小降雨量为 $112.7\text{ mm}$ ,单月最大降雨量为 $90.5\text{ mm}$ ;该地区年平均蒸发量为 $1\ 664.5\text{ mm}$ ;年平均相对湿度为 $61\%$ ,年最大相对湿度为 $100\%$ ;平均风速为 $4.5\text{ m/s}$ ,最大风速 $31\text{ m/s}$ ,主导风向NE,每年平均有 $97\text{ d}$ 是大风天气;每年平均大雾天数最多仅 $9.1\text{ d}$ 。清水河试验段气温正积温为 $478\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,负积温为 $-2\ 760\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,二者相差悬殊,负积温是正积温的 $5.8$ 倍;该区最大积雪厚度达 $15\text{ cm}$ 。

## 2 实测数据分析与讨论

### 2.1 地温曲线的特征

温度是冻土动态特征的重要标志。一定的地温曲线不但反映着该处冻土的历史而且反映其现状,并可预示其今后的发展趋势。因为热流总是从高温向低温方向传递,在年变化深度范围内,由于热量年周转余额量值的差异,按照热流方向的不同,可以分为三种状态(即放热状态、吸热状态及零梯度状态)和三类基本地温曲线类型。多年冻土与上部活动层之间的热传导和热平衡是一个较为复杂的过程。当上部地温低于下部地温时,土体内部就形成了正梯度(热流方向向上),活动层就处于放热状态,相应地,地温就随着热量地向外释放而开始下降。当上部地温高于下部地温时,土体内部就形成了负梯度(热流方向向下),活动层就处于吸热状态,相应地,地温也就随着热量的不断进入而升高<sup>[3,4]</sup>。

站场路基的一个测试断面的阳坡路肩的地温曲线见图1。可以看出地温在接近地面处较高,随着深度的降低而缓慢降低,地温曲线呈现为吸热型。天然测温孔位于路基阳坡坡脚以外的 $20\text{ m}$ 处,其地温场不会受修建的铁路路基的影响,因此其作用就是与路基中的测温孔的地温进行比较,从而分析在修筑了路基之后,路基及地基地温场的变化特征。天然孔的地温曲线见图2,可以看出地温曲线呈现为放热型。站场路基的修筑是在冬季(2001年11月~12月)进行的,当时地基整体处于负温冻结状态,路基土的填筑带来大量的热量,而我们的观测正是从路基填筑后的一个月开始的,由于填土的热量没来的及散出,使得路基本体地温在地基表面处较高,路基地温曲线的包络线成为了吸热型。因为到目前为止才测量了一个冻融循环,吸热型的地温曲线并不能充分说明路基底部的多年冻土处于吸热而退化的状态,还需要2到3个冻融循环的监测数据才能作进一步的判断。

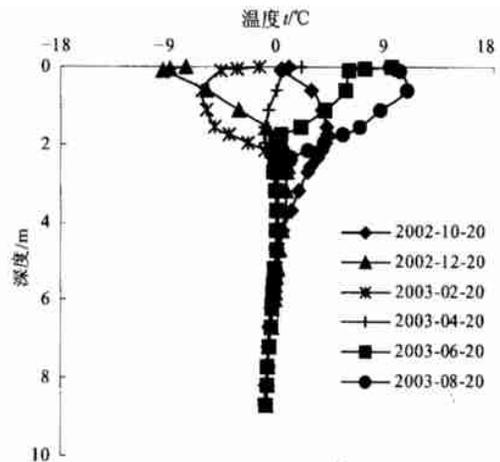


图1 站场路基阳坡路肩每月温度-深度曲线图

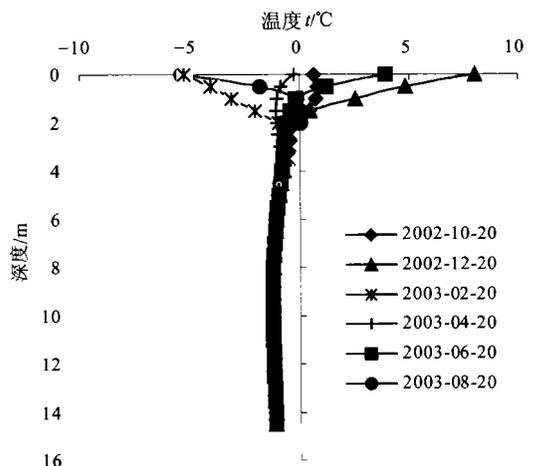


图2 站场路基天然孔每月温度-深度曲线图

### 2.2 路基表面以下不同深度的地温随时间的变化规律

对于 5 m 左右高的站场路基,路基表面以下 0.6 m 处,在八月中旬达到最大温度 12 °C 左右。该深度地温与气温波动特征相同,地温呈正弦(或余弦)波动曲线。离路基表面的深度越大,地温的年较差就越小,并且达到地温最大值的时间也是逐渐滞

后,深度每增加 1 m,地温达到最大值的时间滞后约为 10 d,直到路肩下 5 m 处,也就是路基的基底或者是原来的天然地表,地温值基本保持在 0 °C,基本不受气温变化的影响(见图 3)。这也说明,在路基填筑后,人为上限逐渐上升到了路基基底,也就是原来的天然地表<sup>[5,6]</sup>。

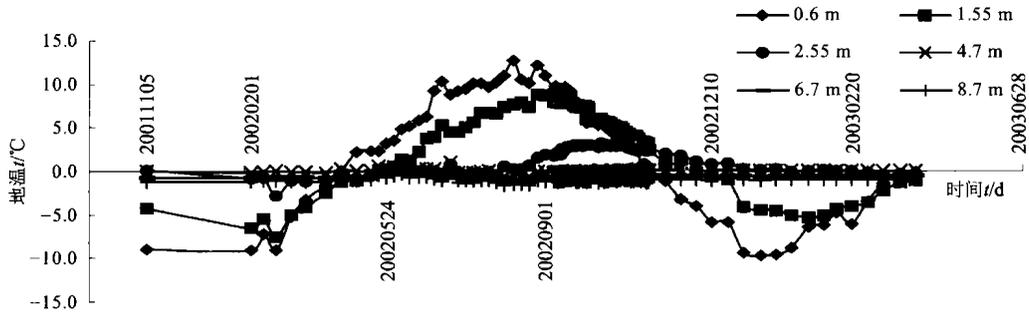


图 3 站场路基阳坡路肩下各深度温度随时间变化图

### 2.3 站场路基的冻结和融化过程的规律

站场路基填筑的时间为 2001 年的 11 月份至 12 月份,属于寒季施工。经过一个冻融循环的地温监测可以初步得出路基冻结和融化过程的规律。路基的融化和回冻的进程曲线见图 4。从 4 月下旬开始,路肩表面出现稳定的正温,冻土开始融化,随着大气升温,融化深度也在不断增加,其中 5 月份融化深度的增加比较缓慢,6、7、8 月份融化深度增加的非常迅速;9 月以后,地面开始降温,出现稳定 0 °C 的时间约 9 月下旬至 10 月上旬,此时的 0 °C 线不再

下降而保持稳定。此时地基的季节融化深度达到最大;10 月的中下旬路基表面出现稳定的回冻,并且回冻的典型特征是双向冻结,即从路基表面自上而下和多年冻土的顶板处自下而上分别开始冻结,并且自上而下冻结的速度约为自下而上冻结速度的两倍,说明冻结过程中的冷量主要来自大气的供给。在 10 月中下旬至次年 1 月下旬的冻结过程中会存在一个区域越来越小的高温的未冻核,未冻核区域的范围逐渐减小;到来年的 2 月初到 4 月中旬整个的路基和地基都处于负温冻结状态<sup>[7,8]</sup>。

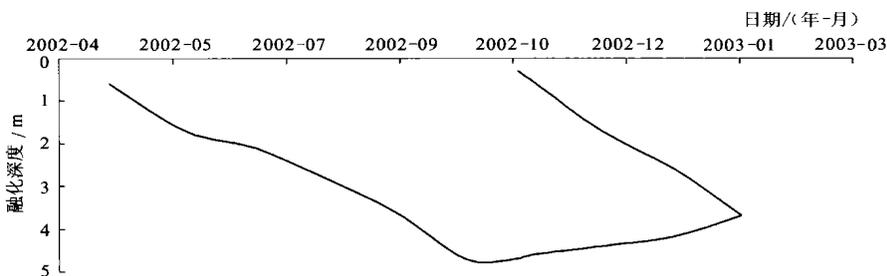


图 4 站场路基融化和回冻进程曲线

### 2.4 站场路基下多年冻土上限的变化及特征

多年冻土的天然上限是指多年冻土顶面的埋藏深度,由于天然上限是历史过程中地表与大气(太阳辐射)热量交换的结果,是地表辐射-热量平衡的产物,因此具有相对的稳定性。路基修筑后,由于改变了原天然地面地热平衡特性,即路堤本体的密度、含水量及路堤表面的蒸发特性、反射、漫反射特性以及表面的热阻等特性都与原天然地面不同,因此路堤

下的多年冻土上限位置将发生变化。试验证明,零断面或者是低路堤下的多年冻土上限均下降。当路堤高度达到一定值后,多年冻土上限位置才可以维持不变。当路堤高度再增加时,多年冻土上限则上升。工程上常常把维持多年冻土上限位置不变的路堤最小高度定义为多年冻土地区路堤的临界高度<sup>[9,10]</sup>。清水河地区路基的临界高度一般为 2.5~3.0 m,而站场路基路堤高度为 5~5.5 m,大于路堤

临界高度,属于保护多年冻土的设计原则。试验观测数据显示出站场路基的路肩下最大季节融化深度与天然上限相比上升了1.6~2.1 m(见图5),开始进入路基本体。

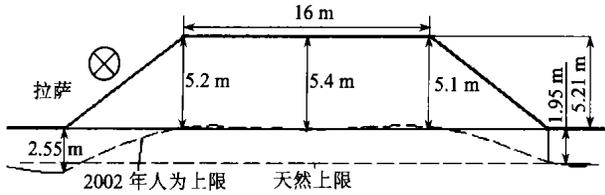


图5 站场路基2002年9月底路基人为上限示意图

由图5可以看出,由于路基断面的不规则性,上限的形状也不再是一条直线,而是呈马鞍形,路基的阳坡面和阴坡面下人为上限的埋深有差异,阳坡面人为上限埋深比阴坡面大。由于坡面热流的影响和路基顶面宽度的影响,从目前观测数据看,站场路基中心最大季节融化深度比路肩下的最大季节融化深度略大。最大季节融化深度的差异能够引起路基的不均匀沉降变形,会对路基的稳定性产生较大的影响。

### 3 结论

通过清水河段站场路基温度场试验的研究可以得出如下结论:

1) 由于站场路基是寒季填筑,填土带来大量的热量,致使地温曲线由放热型转化为吸热型地温曲线。由于目前只进行了一个冻融循环的观测,还不能判断路基下的多年冻土的状态,需要继续监测两到三个冻融循环才能得出充分的结论。

2) 由于地表能量收支的周期变化,多年冻土地区的地表温度的日际和年际变化出现了周期波动,其地温-时间曲线近似于正弦(或余弦)曲线线型。随着深度的增加温度波动逐渐衰减,离路基表面的深度越大,地温的年较差就越小,并且达到地温最大值的时间也是逐渐滞后,深度每增加1 m,地温达到最大值的时间滞后约为10 d,直到路肩下5 m处,也就是路基的基底,地温值基本保持在0℃,基本不受气温变化的影响。

3) 由于坡面热流的影响和路基顶面宽度的影

响,从目前观测数据看,站场路基中心最大季节融化深度比路肩下的最大季节融化深度略大,阳坡路肩下的最大季节融化深度比阴坡路肩下的最大季节融化深度大。最大季节融化深度的差异能够引起路基的不均匀沉降变形,会对路基的稳定性产生较大的影响。

4) 由观测数据可以看出,站场路基路肩下的人为上限与天然上限相比有了不同程度的抬升,开始进入路基本体,这说明采用加高路堤的方法,有利于维持多年冻土的稳定。

由于现场的观测时间仅有一年多的时间,因此上述的结论还有待在将来进一步的观测中进行证实和分析。

### 参考文献

- 1 王志坚,张鲁新. 青藏铁路建设中的冻土环境问题. 冰川冻土, 2002, 24(5): 588~592
- 2 潘卫东,贾海锋等. 青藏高原风火山试验路基地温场演化规律研究. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑. 青藏铁路学术研讨会论文集. 甘肃人民出版社, 2001. 35~39
- 3 刘永智,吴青柏等. 高原多年冻土地区公路路基温度场现场实验研究. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑. 青藏铁路学术研讨会论文集. 甘肃人民出版社, 2001. 48~51
- 4 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学. 北京: 科学出版社, 2001. 99~105
- 5 李东庆,马 巍,李述训. 修筑铁路路基对冻土条件变化的影响分析. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑. 青藏铁路学术研讨会论文集. 甘肃人民出版社, 2001. 22~24
- 6 吴紫汪,程国栋,朱林楠. 冻土路基工程. 兰州: 兰州大学出版社, 1988. 22~57
- 7 李述训,程国栋. 青藏高原多年冻土地区沥青路面下融化盘形成特征. 冰川冻土, 1997, 19(2): 133~140
- 8 库德里亚夫采夫 B. A. 工程地质研究中的冻土预报原理. 兰州: 兰州大学出版社, 1992. 67~131
- 9 戴竞波. 东北多年冻土地区路堤人为上限的变化规律. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑. 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983. 379~384
- 10 国家林业局. GB 50324-2001 冻土工程地质勘察规范. 北京: 中国计划出版社, 2001.

收稿日期: 2003-11-04