

文章编号:1671-8879(2007)03-0001-04

## 特殊气候条件对多年冻土地区路基的影响

毛雪松<sup>1,2</sup>, 李 宁<sup>1</sup>, 侯仲杰<sup>2</sup>, 马 焱<sup>2</sup>

(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:**为了揭示多年冻土地区路基病害发生的根源,基于青藏高原五道梁、沱沱河和安多等地的气象资料,研究了特殊气候条件对青藏公路路基的影响。从青藏高原年平均气温变化曲线及年降水变化曲线入手,考虑路基周期冻结和融化过程中水分迁移及相变作用,结合 SWS-3 型连续面波仪的路基强度测试结果,分析了青藏公路纵向裂缝、波浪扭曲变形和不均匀沉降等典型病害的发生机理。研究发现:青藏高原的低温特征使得路基常年处于冻结和融化的交替状态;雨季集中、固态降水特征致使路侧积水严重;在特殊的气候条件下路基土体的动弹性模量由最初的均匀分布逐渐过渡到不均匀状态;路基两侧的积水及土体的冻融疏松是造成路基强度不均匀分布、产生病害的直接原因。

**关键词:**道路工程;特殊气候;多年冻土地区;水分迁移;冻融疏松

**中图分类号:**U416.168

**文献标志码:**A

## Effect of special weather on road subgrade in permafrost area

MAO Xue-song<sup>1,2</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, HOU Zhong-jie<sup>2</sup>, MA Biao<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 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:** To discover the damaging mechanism of road subgrade in permafrost area, the effect of special climate condition on the subgrade was studied with the climate datum at the Wudaoliang, Tuotuohe and An'duo district along the Qinghai-Tibet highway. According to the curve of annual average temperature and precipitation of Qinghai-Tibet plateau, the reasons for the subgrade damage, such as longitude crack, torsion deformation and un-uniform settlement were studied by the law of the moisture transfer and the phase changing of the subgrade during the perildical freezing and thawing, and by the field test results of the SWS-3 continuous surface wave instrument. It is concluded that the low temperature of the plateau leads to the alternating transition of the subgrade between thawing and freezing frequently; the concentration of the wet season and the solid precipitation lead to the moisture aggregation along the subgrade; the special climate condition is crucial for the un-uniform distribution of dynamic elastic module of the soil strength; the bilateral accumulated water along the subgrade and the thawing rarefaction of the soil are the key reasons for the un-uniform distribution of the soil strength, which directly leads to the subgrade damage. 1 tab, 8 figs, 10 refs.

收稿日期:2006-05-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231881203);陕西省自然科学基金项目(2006E209)

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, E-mail: xuesongxian@yahoo. com. cn.

**Key words:** road engineering; special weather; permafrost area; moisture migration; loosen soil of freezing and thawing

## 0 引言

具有世界屋脊之称的青藏高原是世界上中低纬度海拔最高、面积最大的多年冻土区,平均海拔超过 4 000 m,冻土面积约  $147 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占中国总冻土面积的 60% 以上<sup>[1]</sup>。青藏公路由北向南穿过约 760 km 的冻土区,其中 109 国道格尔木至拉萨段途经多年冻土连续分布区约 550 km<sup>[2]</sup>。该公路常年处在低温、高辐射的环境中,特殊的地理条件、地质条件和气候,致使青藏公路路基病害较为严重,其中以路基的纵向开裂及不均匀沉降等尤为突出<sup>[3-6]</sup>。本文从青藏高原的年平均气温、日变气温及降水量等气象资料入手,考虑路基的冻结和融化过程中水分迁移及相变作用,结合路基强度测试结果,分析青藏公路路基病害发生的机理。

## 1 特殊气候条件的分析

青藏公路沿线特殊的气候条件,如年平均气温、太阳辐射和日平均气温等决定了路基所处的外部环境,使路基常年处于冻结和融化的交替状态。由于土体的水分在路基的冻结和融化过程中将产生不均匀集聚和相变作用,致使路基强度下降,发生病害<sup>[7-10]</sup>。本文根据五道梁(K3 005)、沱沱河(K3 150)和安多(K3 425)3 个气象站提供的资料,分析青藏高原的气候特征。

### 1.1 青藏高原的气温特征

气温资料统计表明(图 1~图 3),青藏沿线年平均气温为  $-2.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim -6.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,从南(安多)向北(五道梁)逐渐降低;最冷季节大致在每年的 1 月发生(五道梁在 2 月),最热季节在 7~8 月间。从居于中部的沱沱河气温日变曲线(图 4)可以看出,冬季最冷季节日气温在  $-3 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim -35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,日温差约  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最冷时间约在凌晨 6:00 左右;夏季最热季节日气温在  $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,日温差约  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最热时间在 14:00 左右;该地气温变化速率大,最大升温速率  $8 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ,最大降温速率  $5 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。可见,常年低温是青藏高原的特征;在最暖的夏季,阴雨天时夜间温度也能降到  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。

### 1.2 青藏高原的降水特征

从图 5 年降水量变化曲线可以看出:①青藏沿线降水量虽然很小,但降水季节较为集中。全年降

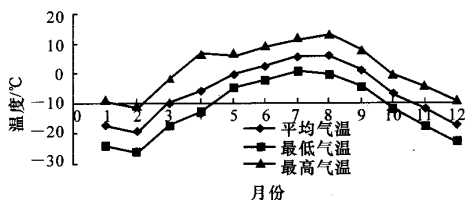


图 1 五道梁气温年变化曲线

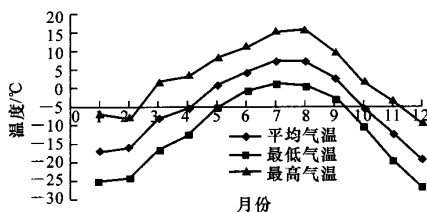


图 2 沱沱河气温年变化曲线

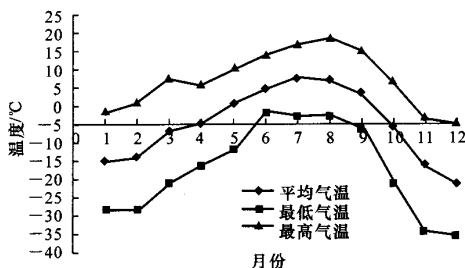


图 3 安多气温年变化曲线

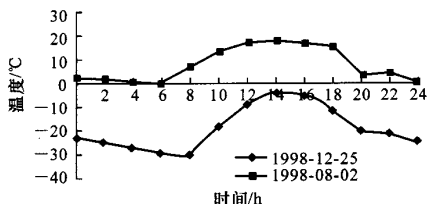


图 4 沱沱河气温日变化曲线

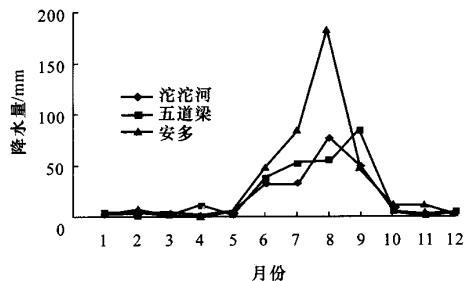


图 5 年降水量变化曲线

水量在唐古拉山北为 160~370 mm,且 7、8、9 月份降水量占全年的 90%;唐古拉山南为 345~510 mm,且 7、8、9 月份降水量占全年的 65%;②青藏沿线以固态降水为主,结合图 4 可以看出,即使是在 8 月的夜晚,气温也可以达到  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,因此其降水多

以阵雨、冰雹或雪的形式出现。

由于青藏公路的路表排水系统采用散排形式,降到路面及边坡的雨水一部分以入渗的形式进入到路基中,其余的水则汇集到路基两侧的低洼地带,在路基的一侧或两侧形成积水。正是由于水分的渗入及路基一侧或两侧的积水给路基工程带来了隐患,入渗的水分在负温的条件下可能冻结而引发土体变形;路侧的积水成为水分迁移的来源,引起土体强度发生变化。

2 特殊气候对路基的作用

2.1 路基的融化过程

气候周期变化对道路及天然地表的作用首先是从表面开始的,在气候变暖过程中(每年 3~11 月),道路逐渐由表层向路基深处开始融化,表层土体中的水分在重力势和温度势的作用下向冻融界面迁移。由于液态水在冻融界面重新结冰,导致冻融界面不透水,出现饱和或过饱和土层。土体中的水分对路基强度有弱化作用,在汽车荷载(动荷载和点荷载)的作用下,被弱化的土层就会发生变形,由于水分集聚具有不均匀性,则其变形也呈不均匀分布。在这个过程中,土体中的自由水在重力作用下也向低处流动,形成水分在冻融界面的不均匀集聚,加速了变形的进程。

2.2 路基的冻结过程

冻结与融化过程一样,也是周期气候变化的产物,多年冻土区路基的冻结过程是从季节活动层上、下边缘双向开始进行。大气层中的冷能在道路表面发生对流热交换,使路基土体逐渐冷却,当地温降到 0℃ 以下,土体中的水分由液态变成固态(冰)。若土体中的水分大于起始冻胀含水量或有足够的水分补给时,土体发生冻胀变形。由于路基土体中水分含量的不均匀和水分迁移通道的差异,致使路基土体在冻结过程中产生的冻胀变形也是不均匀的。

综上所述,冻土路基在大气温度及降水的作用下,周期性发生冻结与融化,使得土体逐渐因冻融而呈疏松状。由此说明,土体的冻结与融化是引起路基强度下降,产生破坏的直接原因。

3 路基土体强度性能测试及病害机理

为了分析特殊气候条件对路基强度性能的影响,在青藏公路典型路段,应用 SWS-3 型连续面波仪以瞬态法勘探了路基的动弹性模量,测试路段的位置及路况描述见表 1,各断面波速如图 6~图 8 所示。

表 1 典型路段位置及路况描述

测点断面	桩号	路基高度/m	路况描述
1	K2 966+300 (五道梁)	1.0	填方路堤,纵向裂缝严重,路基两侧有积水
2	K3 176+000 (沱沱河)	2.5	填方路堤,路基波浪变形,纵向裂缝出现路基左部,路基左侧暂时性积水
3	K3 411+000 (安多)	0.5	多年冻土南界,半填半挖路基,路基无明显病害

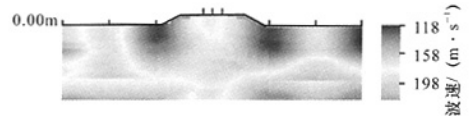


图 6 五道梁附近断面波速

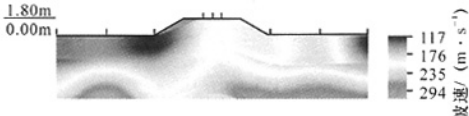


图 7 沱沱河附近断面波速

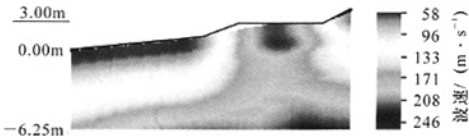


图 8 安多附近断面波速

从图 6~图 8 可以看出,路基土体的强度由施工后初始的均匀分布逐渐转化为不均匀分布,且强度均有不同程度的降低,尤其是在路侧有积水的地段(图 6、图 7),其坡脚及天然地面土体的强度大大降低,路基的病害以纵向裂缝及波浪变形为主;处于冻土南界的半填半挖路段(图 8),虽然整个断面土体的动弹性模量有较大差异,但就路基本体而言,模量差异并不大,且强度相对较高,在车辆荷载作用下,并没产生明显变形。

3.1 纵向裂缝形成机理

冻融疏松是引起路基产生纵向裂缝的主要原因。分析调查资料可知,在纵向裂缝发生的路段,路基边坡比未发生纵向裂缝的路段边坡松软。路基土体经过冻融疏松后,强度下降,当车辆荷载或土体的冻胀引起的拉应力超过了土体的容许拉应力时,就会发生断裂现象。在车辆荷载及周期性气候的反复作用下,裂缝将不断扩展和增大。

路基土体的强度不均匀也会引起纵向裂缝。从图 6 可以看出,坡脚处土体的强度相对较低,在车辆荷载的作用下,引起土体不均匀变形,进而产生的纵向裂缝较为严重。引起路基土体强度不均匀的主要原因:①水分的不均匀集聚,尤其是路侧有积水的状

况;②路基地部的融化盘形状也会影响土体的强度。当融化盘呈现“W”形时,路基两侧融化沉降量较大,而路基中心融化沉降量较小,路面呈现路拱增大现象,沉降严重时会在路中心出现纵向裂缝。路面中心的纵向裂缝随着路线走向而偏移,一般偏向阳坡一侧。

### 3.2 波浪扭曲变形及不均匀沉陷形成机理

青藏公路路基病害的另一主要形式是波浪扭曲及不均匀沉陷变形。分析其原因,周期性季节融化过程中伴有水分迁移,由于冻土的不透水性阻断了水分的迁移通道,致使融化界面出现高含水土层,该土层在外荷载作用下发生变形。又由于下冻土层的高强度具有不可变形性,致使融化界面的高含水土层产生水平位移变形,这样便形成了波浪扭曲变形即冻融翻浆的初态。加上车辆荷载的反复作用,使得路基变形扩大,导致车辆颠簸,产生冲击荷载,加大了波浪扭曲变形。

综上所述,青藏公路路基病害的形成是水、热和力综合作用的结果,水和力是路基变形病害的关键因素,热的作用加速了病害的发生和扩展。路基中只有热的作用,而无水分和力的作用,则路基不会发生变形病害。当路基中有水分的存在和迁移,在力的作用下就可能发生变形,在热的作用下发生冻胀和融沉,加速路基病害的发生和扩展。

## 4 结 语

(1)通过分析青藏沿线五道梁、沱沱河和安多等地的年平均气温变化曲线及年降水变化曲线,得出常年低温是青藏公路的气候特征,甚至在最暖的夏季,阴雨天夜间温度也能降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下;青藏高原的雨季集中,且以固态降水为主。

(2)通过分析各典型断面波速图可知,在特殊的气候条件作用下,多年冻土地区路基土体的动弹性模量由最初的均匀分布逐渐过渡到不均匀状态,路基两侧的积水及土体的冻融疏松是造成路基土体强度下降的主要原因。

(3)论述了周期性气候及特殊气候对青藏公路路基的作用,从路基的冻结与融化过程、水分的迁移等角度揭示了青藏公路典型路基病害的形成机理。

### 参考文献:

### References:

[1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科

学出版社,2001.

- [2] 藏恩穆,吴紫汪. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州:兰州大学出版社,1999.
- [3] Lai Y M, Wang Q S, Niu F J, et al. Three dimensional non-linear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions [J]. Cold Region Science and Technology, 2004, 38(2): 165-184.
- [4] 王铁行. 多年冻土地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 1-5.  
WANG Tie-hang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost region [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 1-5.
- [5] 俞祁浩,刘永智,童长江. 青藏公路路基变形分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 623-627.  
YU Qi-hao, LIU Yong-zhi, TONG Chang-jiang. Analysis of the subgrade deformation of Qinghai Tibet highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 623-627.
- [6] 毛雪松,王秉纲,胡长顺,等. 路基冻结过程中温度场对变形场的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(5): 11-14.  
MAO Xue-song, WANG Bing-gang, HU Chang-shun, et al. Effect of temperature field on deformation field during freezing process of subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 11-14.
- [7] 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.
- [8] Li N, Chen B, Chen F X. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil[J]. Cold Region Science and Technology, 2003, 31(3): 199-205.
- [9] Santander R E, Bubnovich V. Assessment of mass and heat transfer mechanism in unsaturated soil [J]. International Comment on Heat Transfer, 2002, 29(4): 513-545.
- [10] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1989.