

文章编号: 1006-4710(2014)03-0340-06

# 基于水热变化的青藏公路 路基纵向裂缝现场测试及成因分析

毛雪松, 陈燕琴, 樊宇朔, 杨锦凤

(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:** 青藏公路现场调查表明, 近年来路基纵向裂缝所占路基主要病害比例逐年上升。本文基于青藏公路五道梁段典型断面的温度和水分现场监测结果, 分析了不同季节冻土路基温度和水分空间分布特征, 揭示了冻土路基内部温度场、水分场变化的特性: 路基内部温度变化滞后于路基表面, 并且温度随深度增加呈下降趋势, 随大气温度而呈季节性周期变化, 温度梯度随深度增加而递减; 5月、9月水温分布图表明, 受大气降水及地表水重力入渗的影响, 加之温度梯度的作用, 水分向 $0^{\circ}\text{C}$ 线集聚明显, 致使距路基顶面2 m至3.5 m范围含水率增大; 随着温度降低至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下, 未冻水含量集聚减小, 2.5 m至3.5 m以内, 含水率急剧下降。研究表明, 冻土路基内部水热变化是纵向裂缝发生的关键因素, 温度的改变引起水分的迁移、冻胀与融沉, 冻融循环进一步加剧了纵向裂缝的发育。

**关键词:** 青藏公路; 纵向裂缝; 水热变化; 现场测试; 成因分析

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>6

**文献标志码:** A

## The Qinghai-Tibet highway subgrade longitudinal cracks hydrothermal field testing and cause analysis based on moisture and heat changes

MAO Xuesong, CHEN Yanqin, FAN Yushuo, YANG Jinfeng

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In recent years, The Qinghai-Tibet highway field investigations shows that the longitudinal cracks in the proportion of the major subgrade diseases are increased year by year. This paper is based on the temperature and moisture testing of Qinghai-Tibet highway five bridge segments typical section to analyse the frozen soil moisture and heat spacial distribution characteristics in the different seasons, and reveal the changing characteristics of the embankment internal temperature field and the water field. The embankment internal Moisture change lags behind the embankment surface, and decrease with increasing depth, and is a seasonal cycle change with the atmospheric temperature, the temperature gradient diminishes with increasing depth; May and September temperature distribution map shows that moisture to  $0^{\circ}\text{C}$  line concentration is significantly affected by the atmospheric precipitation and surface water gravity infiltration, and combined with the effect, whereby to an increase in moisture contents in the range of the 2~3.5 m embankment top surface; As the temperature is reduced to less than  $0^{\circ}\text{C}$ , unfrozen water content concentration decreases, and less than 2.5 m to 3.5 m, the moisture content dropped drastically. The results show that permafrost roadbed internal Moisture and Heat changes is a key factor of longitudinal cracks, heat change leads to moisture migration, frost heave and thawing settlement, freezing and thawing cycle further intensify the longitudinal cracks development.

**Key words:** Qinghai-Tibet highway; longitudinal cracks; moisture and heat changes; field test; cause analysis

收稿日期: 2013-12-26

基金项目: 交通运输部科技基金资助项目(201231879210)。

作者简介: 毛雪松, 女, 博士, 教授, 研究方向为路基稳定性。E-mail: xuesongxian@aliyun.com。

在高寒多年冻土地区修筑道路会受到多年冻土这一特殊的工程地质所限制,同时道路的修筑会使多年冻土升温与退化,使水、热成为影响路基工程稳定性及耐久性的两个重要因素。路基中温度场的改变影响着土体中热量的传递,但温度本身无法改变土体的工程性质,它必将借助于土体中的水分作为介质来引起土体性质发生改变,土体中的水分在特殊条件气候条件下,发生不均匀迁移、冻胀及融化,致使路基强度呈现不均匀分布,引起路基病害,其中纵向裂缝是多年冻土地区的典型病害形式,近年来该病害愈发严重<sup>[1]</sup>。针对冻土工程中水热变化对路基纵向裂缝的影响问题,我国学者做了大量系统的研究。毛雪松基于水热耦合效应对冻土路基稳定性进行了研究<sup>[2]</sup>。徐安花研究了路基纵向裂缝在路基横断面上的分布规律<sup>[3]</sup>。刘超对多年冻土区路基和块石路基结构的路基应力—应变场、沉降变形特征等进行了计算分析<sup>[4]</sup>。李勇认为影响路基稳定性的主要因素是冻土路基防护措施的强弱和水热影响程度<sup>[5]</sup>。马历权的研究表明路堤边坡湿度场和温度场的周期性变化是路堤边缘纵向裂缝产生的直接原因<sup>[6]</sup>。雒妞丽基于青藏公路路基现场病害调查及路基湿度测试,分析了水对冻土路基稳定的影响<sup>[7]</sup>。李明永通过对青藏铁路路基的温度及水分测试,认为土体 0℃ 趋势线的存在使水分向冻结面迁移是水分急剧增大的主因<sup>[8]</sup>。高军帅、王立乾等对路基纵向裂缝的形成原因与防治措施进行了研究<sup>[9-10]</sup>。根据上述分析,目前从热角度采用理论模型研究多年冻土路基纵向裂缝病害的较多,但是在水热综合效应对多年冻土路基纵向裂缝的影响研究方面较少。

水、热共同作用及相互影响是路基纵向裂缝产生的主要因素。本文以实体工程青藏公路为依托,通过路况调查分析青藏公路路基病害发展趋势,结合青藏公路五道梁地区的典型路段的现场测试,分析温度场、水分场变化特性,在此基础上从水、热变化综合作用的角度分析纵向裂缝的成因。

## 1 青藏公路典型路段路基病害调查

为了研究青藏公路路基病害发展趋势,探究青藏公路病害发生原因对青藏公路典型路段主要病害进行调查,得到调查统计情况如图 1 所示。由图 1 可以看出,路基主要病害为纵向裂缝、路基沉降、不均匀变形,近年来路基纵向裂缝愈发严重,其中 2000 年调查路段未出现纵向裂缝,2004、2005、2007、2009 年纵向裂缝分别占主要病害总和的 30%、31%、62%、64%。路基纵向裂缝所占比例逐

年上升,且调查表明主要有路面边缘带沉陷性弧状沉陷性裂缝、路肩沉陷性纵向裂缝、路面中间带张性纵向裂缝这三种<sup>[2]</sup>。

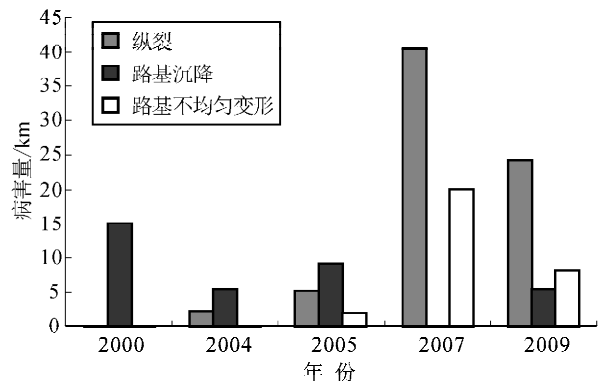


图 1 青藏公路典型路段路基病害  
Fig. 1 The Qinghai-Tibet highway  
typical sections subgrade diseases

## 2 典型路段温度场及水分场现场测试

路基内部土体湿度与温度是一个动态变化过程。因此,对路基内部水分与温度进行长期监测,是分析路基内部湿度与温度变化特性及其相互影响的基础,从而为进一步分析路基纵向裂缝形成过程提供参考。

### 2.1 试验路段自然环境

青藏公路 K3020+200 处位于连续分布多年冻土区的五道梁地区,其海拔在 4 600 m 以上,年平均气温 -5.6℃,全年冻结期是 11~12 月(翌年 1~2 月)。年降水量 265 mm,年最大积雪深度为 14 cm。公路沿线的高降雨量时段多集中于 5~9 月,其中最大降雨量为 87 mm。太阳总辐射量最大三个月为 5 月至 7 月,其中最大辐射量为 24 MJ(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>,太阳有效辐射量最大三个月为 3 月、4 月、10 月,其中最大辐射量为 10 MJ(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>。地形上处于低洼地带,道路两侧汇水面积较大,路侧常常出现季节性积水,植被稀少。多年冻土类型以连续为主,有局部融区,多年冻土厚度达 40 m 至 60 m;最大季节融化深度为 1.5 m 至 2.8 m,冻土构造为水平层状,冻土现象为冰椎、冻胀丘等。

### 2.2 典型断面观测及现场温度、水分传感器埋设

K3020+200 的道路横断面如图 2 所示,路基填土高度为 4.5 m,路基顶面宽为 10 m,边坡坡度为 1:1.5。该断面两侧自然环境基本类似,因此温度传感器和水分传感器仅埋设半幅路基内。共埋设 9 层温度传感器与水分传感器,共 75 只温度传感器和 75 只水分传感器。传感器的埋设位置如图 3 所示,其中传感器垂直间距、水平间距分别为 0.5 m、1

m。传感器最深埋设为天然地表以下 1.5 m。测温元件采用高精度热敏电阻,其测温精度为 0.01℃,标定范围为-50℃~50℃,热敏电阻采用非线性元件,其标定区间的最大值为 0.5℃。水分传感器探头为平面三叉形,长度为 5 cm,其数据测试原理为能量脉冲原理。

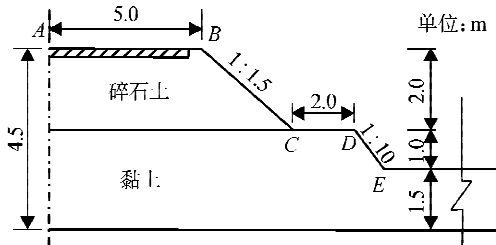


图 2 试验路段横断面示意简图

Fig. 2 The test road cross-sectional schematic diagram

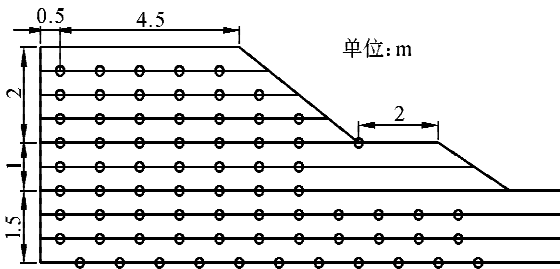


图 3 传感器布置方案图

Fig. 3 The diagram of the sensor layout

### 3 温度场变化特性分析

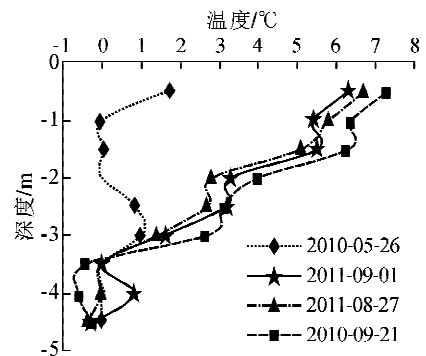
#### 3.1 路基温度随深度变化规律

从路肩和路中温度随深度变化曲线(图 4)可看出,深度在 3 m 以内的路基土体温度随时间波动大,主要受大气温度的影响;而 3 m 以下路基土体温度随时间变化波动小,受当地气候变化影响较小。5 月份时,大气温度为 0℃ 以上,路基内部温度随深度增加而基本呈下降趋势,说明其内部温度滞后于大气温度时间越长;同时路肩温度梯度变化比路中温度梯度变化小,这主要是由于路面吸收太阳辐射能向下传递使路中升温快,而路肩受风对边坡蒸发散热的影响升温慢。9 月份时,随深度增加而路基温度呈下降趋势,路肩下深度 3 m 以内土体处于融化状态,温度最高为 7℃ 左右,路中 3.5 m 以内处于融化状态,最高温度为 14℃。2010 年 9 月及 2011 年 9 月的路基内部温度随深度变化特性基本一致,即路基内部温度随大气温度而周期性变化。

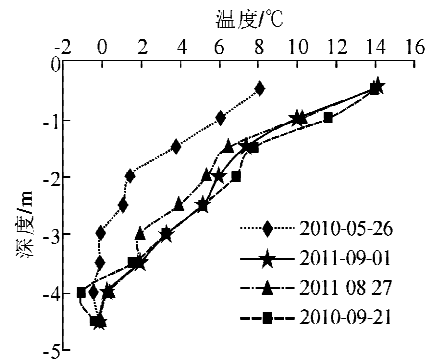
#### 3.2 路基温度横向变化特征

对比图 4(a)、(b)可以看出,5 月与 9 月的路基内部温度横向分布基本一致。5 月份时,深度为 0.5 m 至 2.5 m 以内,路中温度大于路肩温度,2.5 m 深

度以下,路肩温度高于路中温度,主要是由大气降雨或路侧积水入渗路肩带来热量所致。路基顶面以下 2.5 m 范围以内,路中与路肩的温度梯度较大,当路基深度大于 2.5 m 时,随深度的增加,路中与路肩的土体温度差呈减小趋势。主要原因:靠近路基顶面,路肩与路中受气温、太阳辐射,蒸发、大气降水及路面热量传递的影响差异较大。随深度的增加,路肩与路中受外界环境的干扰减小。9 月份时,路基顶面以下 3.5 m 以内,土体温度为正温,路中温度大于路肩温度;3.5 m 以下,土体处于冻结状态,路中温度总体大于路肩温度,路基温度梯度随深度增加呈现递减趋势,温度随深度逐渐降低。



(a) 路肩



(b) 路中

图 4 路基土体温度随深度变化曲线

Fig. 4 The curves of roadbed soil temperature variation with depth

### 4 路基水分场变化特性分析

路基中水分的变化特性指的是土体中的液态水(亦即未冻水)随季节、外界环境条件及路基深度的变化过程。

#### 4.1 路基土体含水率随深度变化特性

从含水率随深度变化曲线(图 5)可看出,路肩与路中含水率随深度变化趋势大致相同。5 月份时,气温为正值,在深度为 1.0 m 以内,路基土体开始融化,随深度增加,路肩土体含水率不断增大,深

度为 1 m 至 4.0 m 的土体基本处于冻结状态,其含水率随深度变化出现波动。相同深度下,9 月份时的土体含水率要远大于 5 月份的,这是由于:①9 月份时,路基土体处于融化状态,未冻水含量大,受温度影响,水分遵循从高势能向低势能迁移,即水分向

冻结冰峰面迁移,含水率增大;②9 月是集中降雨期,大气降水通过边坡渗入路基及路侧积水横向渗入路基所致。9 月份时,3 m 深处的路基土体含水率达到饱和状态,主要是地下水位上升及向上迁移导致的。

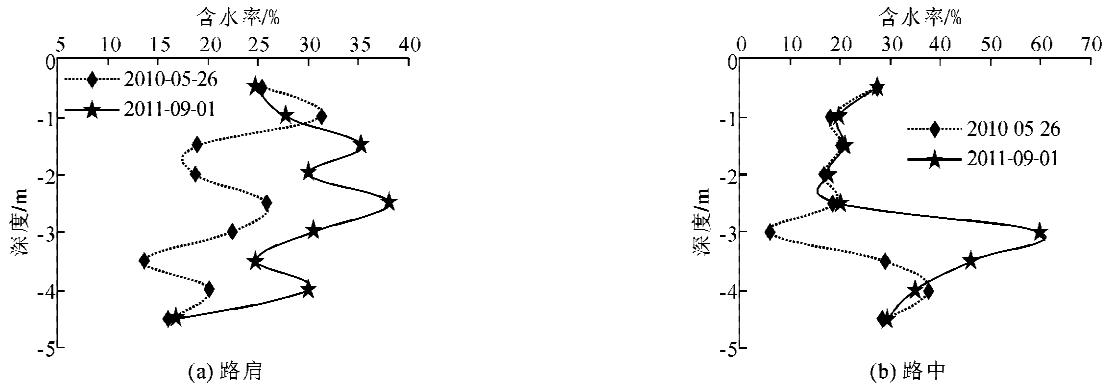


图 5 路基土体含水率随深度变化曲线  
Fig. 5 The curves of roadbed soil moisture content variation with depth

4.2 路基土体含水率横向分布特性

对比图 5(a)、(b)可看出,路基内部含水率横向差异明显,在路基深度 3 m 以内,路肩含水率明显大于路中含水率。路基内部含水率的变化会影响水分运移参数的改变,使路基土体在不同土层内发生不均匀迁移<sup>[11]</sup>。5 月份时,路基土体开始进入融化状态,由于路肩下土体受气温影响大,冻土融化速率快,使得 3 m 深度以内的路中含水率小于路肩含水率;当深度大于 3 m 时,路中含水率明显大于路肩含水率,主要原因是温度梯度使路肩水分向路中迁

移。9 月份时,该地区是集中降雨期,大气降水造成路侧积水或大气降水渗入边坡横向迁移,致使路基深度 3 m 以内的路肩含水率明显大于路中含水率;当深度大于 3 m 时,路中的含水率大于路肩的。

4.3 路基温度场对水分场的影响

温度对水分迁移的影响主要是通过改变水在土中的存在状态而实现的,水在负温条件下发生冻结,改变了土体中的水分梯度,使水从含量多的地方向含量少的地方运动。图 6 为 5 月份及 9 月份土体温度与水分分布图。

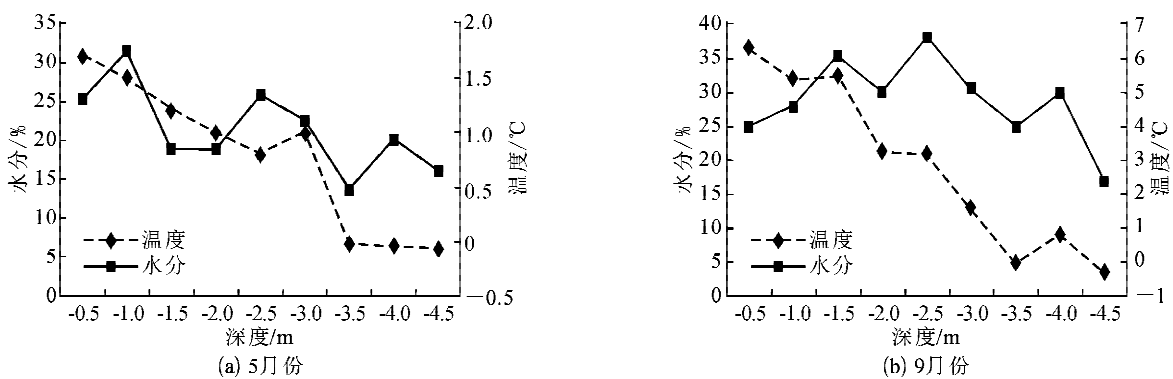


图 6 5 月份及 9 月份土体温度与水分分布图  
Fig. 6 The soil temperature and moisture distribution in May and September

由图 6 可看出,在 5 月份和 9 月份时,路基深度为 3.5 m 以内部分,土体处于正温状态,随深度增加温度降低,土中的水分向上迁移,使上层土体中水分充分富集。距路基顶面 3.5 m 范围内土体已处于正温,路基内部含水率随深度增加有增大也有

减小趋势;在 2 m 至 3.5 m 之间,受大气降水及地表水重力入渗的影响,加之温度梯度的作用,水分向 0℃线集聚明显,致使距路基顶面 2 m 至 2.5 m 范围含水率增大,在 2.5 m 处达到最大;随着温度降低至 0℃以下,未冻水含量集聚减小,2.5 m 至 3.5

m 以内,含水率急剧下降,主要原因是 3.5 m 附近存在温度 0℃ 趋势线,致使 3.5 m 以上水分不能往下迁移,3.5 m 以下水分由于土体处于冻结状态不能向上迁移,致使周围含水率降低。

综合上述分析可知,路基内部的水分与温度场是紧密相连的,路基中热量的差异和改变引起水分的迁移和转换。路基内部由于温度势(冻结)作用产生的迁移量大于融化过程中的重力势迁移量,致使路基内部水分持续增大,水分由温度高处向温度低处迁移,有向 0℃ 线迁移的趋势,致使水分在冻土上限附近集聚。

## 5 基于水、热变化的纵向裂缝成因分析

通过现场测试结果可知,水、热变化能造成路基产生纵向裂缝主要原因是:随着温度场的变化会导致水分场的变化,进而使土体水分发生不均匀迁移,从而造成路基土体产生冻胀或融沉,再加上水热变化是随季节的周期性变化,土体的冻融循环加剧及路基土体力学性质变化引起路基纵向裂缝的产生。

### 1) 冻胀与融沉

在寒季时,大气的负冷量增大,在土体含水率增大时,土体中的水分冻结成冰而体积膨胀导致冻胀作用越强,使已冻土体产生拉应力与土体自重应力之和大于土体的抗拉强度,产生拉裂破坏;在暖季时,大气温度高,太阳辐射量大,降雨量大,一方面,在太阳辐射作用下,路基内部温度升高,冻土层开始融化,路基内部含水量不断增大,造成路基整体强度降低,在自重及荷载反复作用下,路基产生沉陷,进而致使沉陷裂缝的产生。另一方面,在低洼路段或排水不畅路段路基外积水渗入路基内部,渗入将给多年冻土带入较大热能,使冻土温度升高发生融沉,造成位于其上的部分路基产生沉陷变形,路基局部沉陷变形使路基土体内产生近于垂直方向的剪切应力,剪应力达到一定程度则出现开裂破坏导致裂缝产生。

### 2) 水分的迁移

路基中单独温度场的变化是无法诱发路基病害,只有当温度场的变化引起土体水分的不均匀迁移,才会引起路基病害的产生。土体冻结时,土体结构出现变化,出现了冻结锋面及冰晶体,破坏了土中的水量平衡,导致水分产生迁移。在温度作用下,水分由温度高处向温度低处迁移,有向 0℃ 线迁移的趋势,在土体接近于范围内含水率有增大趋势,随着含水率的增大土体空隙间水分增多,增大了土体之间的润滑作用,使土体回弹模量急剧衰减,使土体强

度降低,使路基强度不均匀分布,而冻结区未冻水的继续冻结将产生冻结膨胀压力,导致土体受压变形,产生沉陷,最终导致纵向裂缝的生成。

### 3) 冻融疏松

修筑完工的路基暴露在大气环境中,在温度周期变化、大气降水、地表水和地下水的影响下,土体经历着干湿和冻融循环作用,其土颗粒内部结构与排列方式发生改变,土体冻结时,冰晶体扩大能使土颗粒破裂,解冻后,土体变得比较疏松,进而使得路基土体密度及力学特性发生了变化,路基土体变得松软,路基整体强度下降,致使路基承载能力降低。当路基土层竖向变形不均匀时,且行车荷载在路面上造成的应力大于路面抗弯拉强度时,便产生纵向裂缝。

## 6 结 语

1) 现场调查表明纵向裂缝为青藏公路典型病害类型,且主要有路面边缘带沉陷性弧状沉陷性裂缝、路肩沉陷性纵向裂缝、路面中间带张性纵向裂缝这三种。

2) 选择 K3020+200 作为典型横断面埋设温度传感器及水分传感器,动态监测了路基内部水分和温度的变化过程。揭示了冻土路基内部温度场、水分场变化的特性:路基内部温度变化滞后于路基表面,并随深度增加呈下降趋势,随大气温度而呈季节性周期变化,温度梯度随深度增加而递减;5月、9月水分分布图表明,受大气降水及地表水重力入渗的影响,加之温度梯度的作用,水分向 0℃ 线集聚明显,致使距路基顶面 2 m 至 3.5 m 范围含水率增大;随着温度降低至 0℃ 以下,未冻水含量集聚减小,2.5 m 至 3.5 m 以内,含水率急剧下降。

3) 现场测试结果表明,水、热变化能引起路基纵向裂缝产生的原因在于随着温度场的变化会导致水分场的不均匀迁移,路基产生冻胀或融沉,冻融循环引发的冻融疏松等,从而引发路基土体性能发生改变引起路基纵向裂缝产生。

### 参考文献:

- [1] 长安大学. 青藏公路纵向裂缝成因及处治对策研究总报告[R]. 西安,2003.
- [2] 毛雪松,马磊. 基于水热耦合效应的冻土路基稳定性研究[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 徐安花. 多年冻土地区公路路基纵向裂缝与路基走向关系的探讨[J]. 冰川冻土,2010,32(1):121-125.  
Xu Anhua. A discussion about the relation between longitudinal embankment cracks and road trend in perma-

- frost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,32(1):121-125.
- [4] 刘超,车爱兰,吴志坚,等. 温度及机车载荷耦合作用下多年冻土区路基稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):459-464.
- Liu Chao, Che Ailan, Wu Zhijian, et al. Stability of embankments in permafrost regions considering temperaturefield coupled with dynamic field[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(1):459-464.
- [5] 李勇,韩龙武,许国琪. 青藏铁路多年冻土路基稳定性及防治措施研究[J]. 冰川冻土,2011,33(4):880-883.
- Li Yong, Han Longwu, Xu Guoqi. Research on stability of embankment in permafrost regionsalong Qinghai-Tibet railway and its control[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011,33(4):880-883.
- [6] 马历权. 公路填方路堤纵向开裂机理的理论分析[J]. 冰川冻土,2011,33(4):855-857.
- Ma Liqun. Analysis and discussion of mechanism of longitudinal crackingon edge of filling embankment of highway[J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 2011,33(4):855-857.
- [7] 雒妞丽,毛雪松. 湿度对青藏公路多年冻土路基稳定性的影响[J]. 路基工程,2011,23(6):5-11.
- Luo Niuli, Mao Xuesong. Influence of humidity on permafrost subgrade stability in Qinghai-Tibet highway[J]. Subgrade Engineering,2011,23(6):5-11.
- [8] 李明永,吴青柏,刘永智. 青藏铁路路基下部土体水热过程变化的监测研究[J]. 冰川冻土,2011,33(3):546-550.
- Li Mingyong, Wu Qingbai, Liu Yongzhi. Monitoring the soil heat-mositure processes within an embankment in Qinghai-Tibet highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(3):546-550.
- [9] 高军帅,光明,谢广兴,等. 路基纵向裂缝的形成与防治[J]. 中外公路,2012,32(s1):22-32.
- Gao Junshuai, Guang Ming, Xie Guangxing, et al. The formation of longitudinal cracks and control [J]. Journal of Chinese and Foreign Highway, 2012, 32 (s1):22-32.
- [10] 王立乾. 多年冻土区铁路路基裂缝的调查分析[J]. 路基工程,2013,28(4):194-197.
- Wang Liqian. Investigation & analysis on cacks of subgrade of Qinghai-Tibet railway in permafrost arean[J]. Subgrade Engineering, 2013,28(4):194-197.
- [11] 任长江,白丹,程鹏,等. 求解水分运移参数的拉普拉斯-模式搜索方法[J] 西安理工大学学报,2013,29(1):57-60.
- Ren Changjiang, Bai Dan, Cheng Peng, et al. The method of Laplace-Pattern Search for solving soil moisture movement parameters[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2013,29(1):57-60.

(责任编辑 王卫勋)