

文章编号:1001-7372(2013)06-0009-06

## 季节性冻土路基防冻胀技术研究

房建宏<sup>1</sup>, 李东庆<sup>2</sup>, 周家作<sup>2,3</sup>, 张 坤<sup>4</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4. 甘肃省交通科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为了研究季节性冻土地区的防冻胀措施及其效果,在 G109 国道青海省橡皮山段铺设了垫层不同的 2 个断面,即参照断面和试验断面,并对温度、含水量及路面变形数据进行了分析。结果表明:试验断面下的最大季节冻结深度小于 1 m,小于天然地面下的季节冻结深度;在冷季期间,两试验段在冻结深度范围内的含水量较低,低于起始冻胀含水量;参照断面的变形比较稳定,路面有微小上升,而试验断面路面没有上升现象;在季节性冻土地区采用碎石路面垫层加隔水土工膜能有效减少季节冻深,并减小道路冻胀变形。

**关键词:**道路工程;季节性冻土;现场试验;冻胀;地温;含水量

**中图分类号:**U416.168 **文献标志码:**A

## Technical Study on Anti-frost Heaving in Seasonally Frozen Soil Subgrade

FANG Jian-hong<sup>1</sup>, LI Dong-qing<sup>2</sup>, ZHOU Jia-zuo<sup>2,3</sup>, ZHANG Kun<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 4. Gansu Transportation Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** In order to study the anti-frost heaving measures in the seasonally frozen soil area, two test cross-sections were set up on G109 in Qinghai Rubber Hill section and one of them was the reference section and another was the experimental section. The ground temperature, water content and deformation of road were analyzed. The results show that the maximum seasonally frozen depth in experimental section is less than 1 m, which is less than that of the natural ground. In the cold seasons both sections have less water content within the seasonally frozen depth and the water content is less than the initial water content in frost heaving. The deformation of reference section is steady and the road rises a little while the road of experimental section doesn't rise. Macadam bed course and water proof geomembrane can better decrease the frozen depth and prevent frost heaving deformation on the road.

**Key words:** road engineering; seasonally frozen soil; field test; frost heaving; ground temperature; water content

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB026102);国家自然科学基金项目(41271080);  
多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地开放基金项目(2012-12-04);  
冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201107)

作者简介:房建宏(1967-),男,陕西临潼人,研究员,工学博士研究生,E-mail:qgygls@163.com。

## 0 引言

季节性冻土地区最典型的地质灾害是冻胀。当温度降低到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,如果土中含水量到达一定值,便会产生冻胀;在负温度梯度作用下,水分发生迁移并聚集在冻结锋面附近,进一步加剧了冻土体积膨胀。冻胀使得建设在季节性冻土区的道路发生鼓包、龟裂、波浪等病害现象<sup>[1-5]</sup>。当温度回升时,季节性冻土从上、下两端向中间双向融化。如果路基排水不通畅,路基中则会产生较大含水量,土体的强度大幅降低<sup>[6]</sup>。在周期性车载作用下,可能出现道路翻浆现象,路面遭到进一步破坏。如此循环反复,道路变形及破坏加剧,危害了行车安全,也加大了道路维护修理费用。

为了研究冻结过程和冻土中的水分迁移及冻胀规律,Harlan 从能量和质量守恒出发,建立了一个考虑水分迁移及冰水相变的模型,该模型在后来不断被他人引用、发展;王铁行等<sup>[7]</sup>通过定义水分迁移驱动力的组成,给出了描述冻土路基水分迁移的二维数学模型及相应的确定方法;毛雪松等<sup>[8]</sup>利用室内试验,对正冻土路基中的水分、温度变化进行了动态监测;王铁行<sup>[9]</sup>基于冻土路基温度场随时间的变化,采用考虑拉破坏的热弹性力学方法,对冻土路基纵向裂缝的成因进行了研究;冷毅飞等<sup>[10]</sup>通过室内冻胀模型试验,分析了细粒土物理性质如含水量、饱和度以及密实度等指标对冻胀的影响;常法等<sup>[11]</sup>论述了季节性冻土区路基的各种防冻胀及翻浆的措施;Zhou 等<sup>[12]</sup>对水-热-力相互作用下的水分迁移以及冻胀发展规律进行了理论上的研究;李东庆等<sup>[13]</sup>对季节性冻土的水-热-力三场进行了数学建模,并对道路变形进行了预测;毛雪松等<sup>[14]</sup>基于温度-湿度-荷载综合模型试验测试系统,进行了室内路基模型的冻结与融化循环试验,对季节冻土路基内部温度场、水分场及应力场综合效应的变化特性进行了研究。

以上研究都说明温度和水分对于土体变形有重要影响,因而季节性冻土区的温度和水分现场监测,对于道路变形和质量控制有着重要的意义。为此,本文中修建了季节性冻土地区路基防冻胀试验工程,通过现场监测数据,分析温度和水分对路基土体变形的影响,为季节性冻土地区路基防冻胀处置提供参考。

## 1 路基试验段及气象背景

G109 国道青海省橡皮山段为季节性冻土区,该路段经常发生路面开裂、鼓包及波浪等病害,具有一定的典型性。由于影响冻胀的主要因素是温度和含水量,为了研究季节性冻土防冻胀及道路翻浆的防治措施,在 G109 国道 K2178+000~K2178+480 路段,根据不同垫层设计了 5 种道路铺设方案,路基结构剖面如图 1 所示。

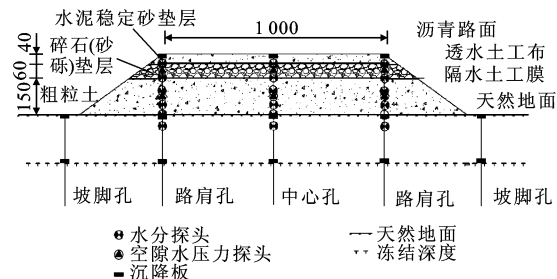


图 1 参照断面路基结构剖面(单位:cm)

Fig. 1 Profile of Subgrade of Reference Cross-section (Unit:cm)

现选取其中 2 种铺设方案的温度、含水量以及变形监测结果进行对比分析,2 种铺设方案为:

(1)参照断面。路面垫层填料采用渗水性能好的砂砾料,即砂砾垫层,路段长约 200 m,公路里程为 K2178+000~K2178+200,其中路基及天然地面下温度、含水量监测断面位于 K2178+112 处,路基高度 2.5 m。

(2)试验断面。路面垫层填料采用“级配碎石层加隔水土工膜”方式,路段长约 50 m,公路里程为 K2178+400~K2178+450,其中路基及天然地面下温度、含水量监测断面位于 K2178+425 处,路基高度 2.5 m。

铺设方案中,参照断面所在路段采用厚度为 60 cm 的砂砾垫层;而试验断面所在路段采用厚度为 60 cm 的级配碎石层加隔水土工膜;其中隔水土工膜左、右面设 3%~4% 拱度,易于排水。

试验场地气象要素观测设置于黑马河养路段后院内空旷地段,位于东经  $36.731\ 158^{\circ}$ ,北纬  $99.775\ 088^{\circ}$ ,设有一个自动气象站、一个 6 m 温度孔。试验场地海拔 3 212 m,地形较为平坦。每个试验段的监测断面有温度及含水量监测孔,在左、右路肩及道路中轴线有垂直位移监测点。水分监测采用德国 TRIME-IPH 或 TRIME-FM3 土壤剖面含水量测量系统,其可测量土壤或其他介质深达 3 m 的剖面含水量。

图 2 为黑马河地区 2 年的气温监测数据,可以看到每年的最高气温出现在七八月份,最高可达 20℃;最低气温出现在 1 月,最低约-15℃。据统计资料可知:该地区年平均气温 2.5℃,气候干燥,降水量少,年平均降水量 371.5 mm,降水多集中在 7 月和 8 月,年平均蒸发量为 1 510 mm。

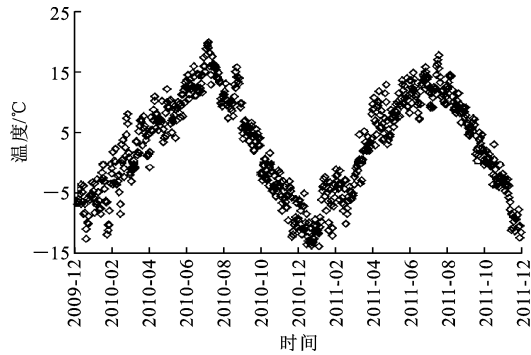


图 2 气温观测数据

Fig. 2 Monitor Data of Atmospheric Temperature

## 2 路基温度变化

图 3,4 分别为参照断面和试验断面路基中心孔温度随深度的分布曲线。从图 3,4 可以看出,按全年温度变化来看,温度梯度为负梯度型,表明热量从上到下传递,地基一年的吸热量大于散热量。而在天然地面下(黑马河养路段后院内空旷地段)的温度梯度为正梯度型(图 5),说明天然地面以下的土层一年的散热量大于吸热量。通过天然地面和道路路面下温度分布的对比,可以判断是路基改变了季节性冻土的热状况。路基改变冻土热状况的原因是多方面的:①道路的铺设破坏了地表的植被进而降低了保温效果,并且黑色沥青路面具有很强的吸热能力;②一般来说沥青路面是不透水的材料,水分不能被蒸发,无法带走热量,使得热量积聚在路基内。此外,在车辆荷载下,轮胎与路面的摩擦产生的能量被路面吸收。因此,季节性冻土区的道路工程有利于路基吸取更多热量。

为了进一步分析两断面采用不同的垫层对温度的影响,图 6,7 中给出了两断面路基中心孔温度的等值线(以 2010 年 12 月 11 日作为起始日期)。可以发现:在冷季,同一位置同一时刻的温度,试验断面温度高于参照断面的温度;在暖季,两者差别不大。由图 6,7 可知,由于温度低于 0℃范围内的土质为粗颗粒土和砂砾垫层,其冻结温度非常接近于 0℃<sup>[6]</sup>,因此可以近似以 0℃等温线作为冻结深度随时间变化的曲线。很明显,参照断面最大冻结深

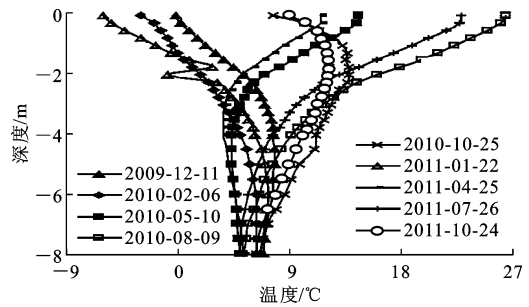


图 3 参照断面路基中心孔温度

Fig. 3 Temperatures of Reference Cross-section Center Hole

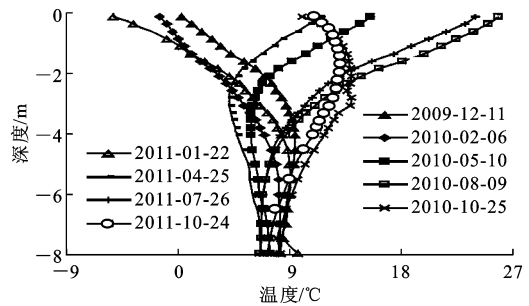


图 4 试验断面路基中心孔温度

Fig. 4 Temperatures of Experimental Cross-section Center Hole

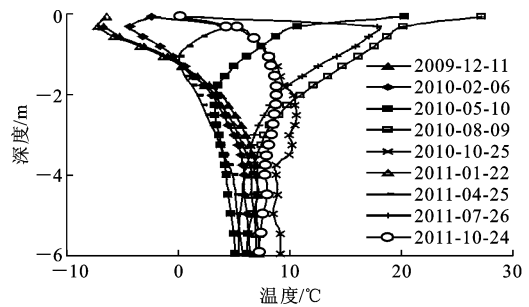


图 5 天然地面下的温度

Fig. 5 Temperatures Under Natural Ground

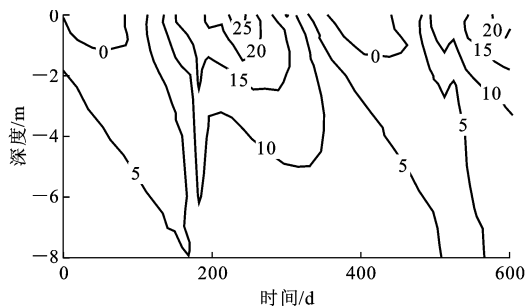


图 6 参照断面等温线(单位:℃)

Fig. 6 Temperatures Isotherms of Reference Cross-section (Unit: °C)

度大于试验断面最大冻结深度,前者为 1.1~1.3 m,后者为 0.8~1.0 m。这种冻结深度的差别

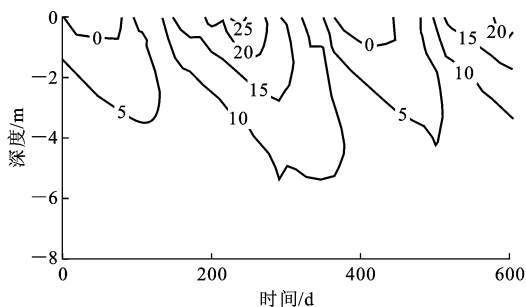


图7 试验断面等温线(单位:°C)

Fig. 7 Temperatures Isotherms of Experimental Cross-section (Unit: °C)

是由于路基填土和垫层的不同造成的,前者填土和垫层导热系数大于后者填土的导热系数。此外,在自上而下的冻结过程中,试验断面由于隔水土工膜的隔水作用,在其下积聚了大量水分,在上部降温过程中,会释放大量的热,因此,冻深相对有所减小。从冻结深度的角度看,试验断面所采用的路基材料和结构对于季节性冻土区道路工程防冻胀更有利。

### 3 路基水分变化

Taylor 等<sup>[15-16]</sup>认为冰含量达到孔隙率的85%时,开始发生冻胀。由于水变成冰体积增大9%,可以近似以含水量达到孔隙率的78%作为冻胀发生的起始含水量。本文中通过比较含水量与最大含水量的差异来判断是否发生冻胀,近似认为一年中监测到的最大含水量对应于饱和含水量。

图8,9分别为参照断面和试验断面左路肩孔的含水量随深度分布的曲线。参照断面左路肩孔在不同季节其含水量变化不大,在2.5 m深度以上的含水量基本处于5%~10%的范围。这是由于2.5 m以上为砂砾土,持水性较弱,水分下渗严重。部分含水量分布曲线在2.5 m深度以下的水分突然增大,这可能是由于观测孔内孔底有水分存在,导致实测含水量突增。由图9可见:试验断面在不同季节含水量的差别较大,暖季含水量高于冷季含水量,变化范围在10%~40%之间;冷季期间,在冻结深度附近含水量存在突变。这是因为水分探头所测的含水量是液态水含量,而在冷季,液态水会部分相变成冰,因此,上部冻结区的含水量较小,下部未冻区的含水量较大。

图10,11分别为参照断面和试验断面右路肩的含水量分布。由图10可见:参照断面含水量变化范围在5%~35%,在1~3月的含水量分布曲线中,上部含水量小,随着深度增加含水量增大,深度大于

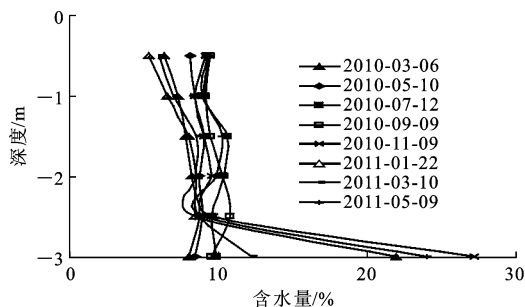


图8 参照断面左路肩孔含水量分布

Fig. 8 Water Contents at Left Side of Reference Cross-section

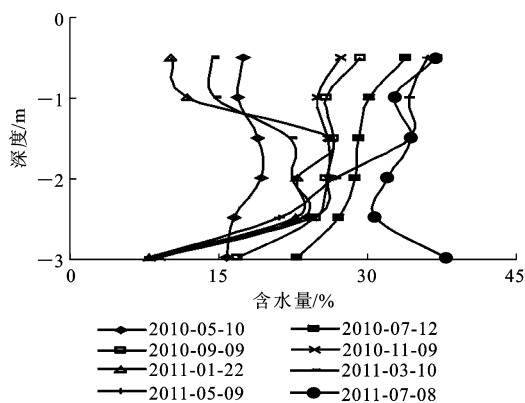


图9 试验断面左路肩孔含水量分布

Fig. 9 Water Contents at Left Side of Experimental Cross-section

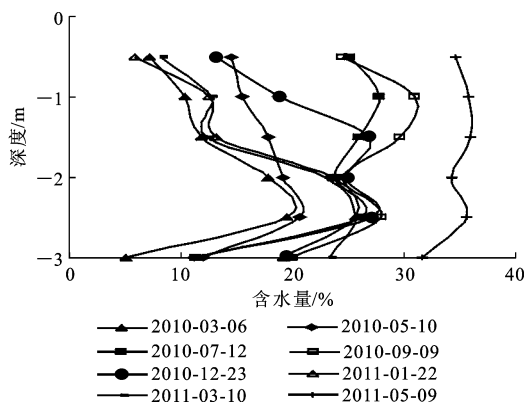


图10 参照断面右路肩孔含水量分布

Fig. 10 Water Contents at Right Side of Reference Cross-section

2.5 m之后含水量又减小,这与水分孔处的土层分布有关;约在2.5 m深度以下土质渗透性较差,因此在2.5 m深处能保持较大含水量。图8,10显示:参照断面左右路肩孔含水量分布存在差别,这是由于该断面路基填料不对称造成的,在左路肩下填料为持水性较低的粗颗粒土,右路肩下填料为持水性较高的细粒土;而且,该断面路基略有倾斜,左高右

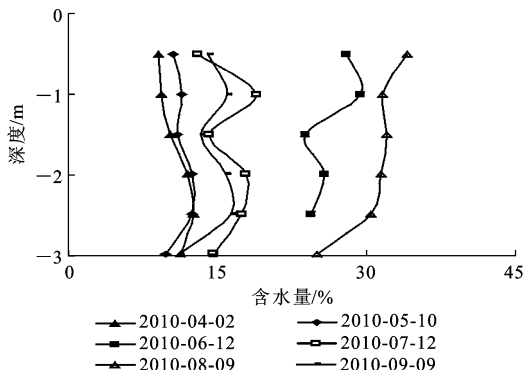


图 11 试验断面右路肩孔含水量分布

Fig. 11 Water Contents at Right Side of Experimental Cross-section

低,因此水分移动明显。试验断面右路肩的含水量检测孔由于在 2010 年 10 月 9 日被毁坏,所以水分监测数据有限,图 11 只显示了该孔在暖季的含水量变化情况,含水量变化范围为 7%~30%,由于土层渗透系数较大,保水性差,从上到下分布较为均匀。在自上往下的融化过程中,上部含水量大于下部含水量,而且,含水量大小受降水影响明显。总的来说,右路肩暖季由于雨量较多导致含水量较大。在冷季降水量少,相应的土体含水量也少。另外,因为右路肩垫层下路基土质相同,两断面在右路肩的含水量分布大致相同。

通过图 8~11 可知,冷季期间在最大冻结深度范围内的含水量都低于监测到的最大含水量的 50%,因此,参照断面和试验断面的路基形式都是有利于防冻胀的。

#### 4 路面变形

图 12,13 分别为参照断面和试验断面的路面变形曲线(补充了最新测试数据),正值表示路面沉降,负值表示路面上升。从图 12,13 可以看出:参照断面变化较为均匀,变形曲线具有一定的波动性,这是由于在冷季发生了微小的冻胀变形,所以总体的变形量较小;而试验断面在冷季路面下降,这说明该断面由于冻结深度较小,加之铺设隔水土工膜有效阻止了深部水分向冻结区域运动,因而无冻胀变形产生。在暖季,试验断面反而发生了较大的路面抬升,这可能是由于标准点的位置遭到破坏,或是测量误差导致了向上的位移。若以 2011 年 5 月的数据为参考点,可以看到,路基的主要变形是沉降,冻胀量较小。因此,可以判断试验断面的路基结构可以明显地抑制冻胀的发生。

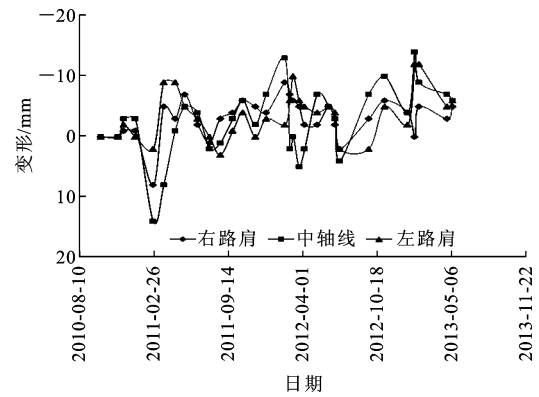


图 12 参照断面路面变形

Fig. 12 Curves of Deformation of Reference Cross-section

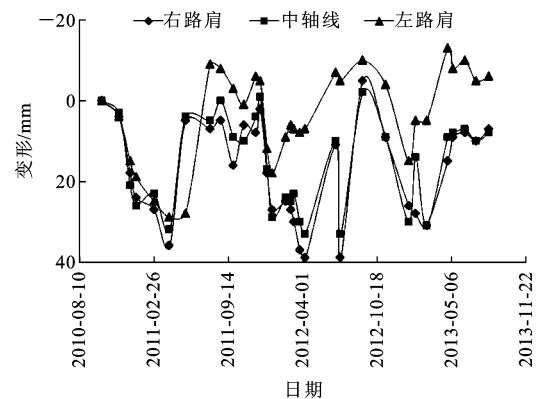


图 13 试验断面路面变形

Fig. 13 Curves of Deformation of Experimental Cross-section

#### 5 结 语

(1)试验断面与参照断面均采用了防冻效果较好的粗颗粒土作为抗冻垫层。含水量分布比较均匀,一年中的变化不大。各断面冷季降水量少、含水量较低,暖季降水量较大因而含水量较高。由于在冷季含水量低于起始冻胀含水量,且最大冻结深度都比较小,因此两断面所采用的措施都有利于防冻胀。

(2)参照断面的路面变形比较稳定且具有一定的波动性,表明有沉降也有微小程度的冻胀发生;而试验断面的路面持续沉降,并无明显冻胀。可见级配碎石层加隔水土工膜的试验断面的防冻胀效果更好。

参考文献:

References:

[1] 戴惠民,乐鹏飞,王兴隆,等.季冻区公路路基土冻胀性的研究[J].中国公路学报,1994,7(2):1-8.

- DAI Hui-min, LE Peng-fei, WANG Xing-long, et al. Frost Heave Susceptibility of Highway Subgrade Soils in Seasonal Frost Regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 7(2): 1-8.
- [2] 刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 10-15.  
LIU Yong-zhi, WU Qing-bai, ZHANG Jian-ming, et al. Deformation of Highway Roadbed in Permafrost Regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 10-15.
- [3] HAYHOE H N, BALCHIN D. Field Frost Heave Measurement and Prediction During Periods of Seasonal Frost [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(3): 393-397.
- [4] 牛富俊, 马巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.  
NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai. Thermal Stability of Roadbeds of the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions and the Main Freezing-thawing Hazards[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 196-206.
- [5] 靳德武, 牛富俊, 陈志新, 等. 冻土斜坡模型试验相似分析[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 29-32.  
JIN De-wu, NIU Fu-jun, CHEN Zhi-xin, et al. Simulation Analysis for Model Experiment of Frozen Soil Slope[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(1): 29-32.
- [6] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010.  
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of Frozen Soils[M]. 2nd ed, Beijing: Science Press, 2010.
- [7] 王铁行, 胡长顺. 冻土路基水份迁移数值模型[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 5-8.  
WANG Tie-hang, HU Chang-shun. A Numerical Model of Moisture Migration for Frozen Soil Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 5-8.
- [8] 毛雪松, 胡长顺, 窦明健, 等. 正冻土中水分场和温度场耦合过程的动态观测与分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 55-59.  
MAO Xue-song, HU Chang-shun, DOU Ming-jian, et al. Dynamic Observation and Analysis of Moisture and Temperature Field Coupling Process in Freezing Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 55-59.
- [9] 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 Regions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 1-5.
- [10] 冷毅飞, 张喜发, 张冬青. 季节冻土区公路路基细粒土冻胀敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 211-216.  
LENG Yi-fei, ZHANG Xi-fa, ZHANG Dong-qing. Study of Frost Heaving Susceptibility of Fine-grain Soil of Highway Subgrade in Seasonally Frozen Ground Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 211-216.
- [11] 常法, 李东庆, 张坤, 等. 季节冻土区路基冻胀翻浆防治措施试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(3): 147-155.  
CHANG Fa, LI Dong-qing, ZHANG Kun, et al. Experimental Study on the Treatments Against Frost Heaving and Boiling of Subgrade in Seasonal Frozen Area [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(3): 147-155.
- [12] ZHOU Jia-zuo, LI Dong-qing. Numerical Analysis of Coupled Water, Heat and Stress in Saturated Freezing Soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 72: 43-49.
- [13] 李东庆, 周家作, 张坤, 等. 季节性冻土的水-热-力建模与数值分析 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 1-7.  
LI Dong-qing, ZHOU Jia-zuo, ZHANG Kun, et al. Modelling and Numerical Analysis of Moisture, Heat and Stress in Seasonal Frozen Soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 1-7.
- [14] 毛雪松, 杨锦凤, 张正波, 等. 温度-湿度-荷载综合作用下路基冻融过程试验研究 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 427-434.  
MAO Xue-song, YANG Jin-feng, ZHANG Zheng-bo, et al. Experimental Study of Integrated Temperature-moisture-load Effect on Subgrade During Freeze-thaw Cycle [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 427-434.
- [15] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A Model for Coupled Heat and Moisture Transfer During Soil Freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 548-555.
- [16] SHEN M, LADANYI B. Modelling of Coupled Heat, Moisture and Stress Field in Freezing Soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(3): 237-246.