

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.07.004

# 季节性冰冻地区路基冻胀机理分析

王书娟, 陈志国, 秦卫军, 于丽梅  
(吉林省交通科学研究所, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为掌握季节性冰冻地区路基冻胀机理, 减少由于路基冻胀融沉而产生的路面开裂、沉陷及翻浆病害, 在重冻区路基中埋设了温度传感器, 进行冰冻期路基温度自动监测, 同时, 对季冻区典型道路冻害进行了钻探调查。结果表明: 上路床降温幅度大, 降温速率高, 路基土发生了快速原位冻结; 下路床降温幅度小, 降温速率低, 发生了充分的水分迁移及焦聚现象, 为聚冰带出现的深度; 不同路基土质中冰的存在形式不同, 且不同形式冰结构出现的深度和含水量呈现出一定的规律性; 聚冰带出现的平均深度范围为 1.08 ~ 1.65 m, 含水量平均分布范围为 14.7% ~ 23%, 含水量最大值均接近或超过了土的塑限含水量, 冰晶析出, 构成冻胀量的主体部分。在上述研究基础上, 发现季节性冰冻地区路基冻胀是一个因路基密实程度和湿度不同, 随着冷量推进和水分迁移热平衡状态不断形成和破坏, 产生不同形式冰结构构成冻胀量的过程, 建议通过排水、阻水措施控制路基湿度, 并加强路基填料的均匀性、密实性控制, 从而减少和防止路基冻害的产生。

**关键词:** 道路工程; 路基; 冻胀机理; 温度观测; 季冻区

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 07-0020-05

## Mechanism Analysis on Subgrade Frost Heaving in Seasonal Frozen Region

WANG Shujuan, CHEN Zhiguo, QIN Weijun, YU Limei  
(Jilin Provincial Communications Scientific Research Institute, Changchun Jilin 130012, China)

**Abstract:** In order to master the frost heaving mechanism of subgrade and reduce the diseases of cracking, subsidence and mudding due to subgrade frost thaw in seasonal frozen region, the temperature sensors were embedded in the subgrade in heavy frozen region to automatically monitor the temperature of subgrade in freezing period. Drilling investigation of typical road frost disease was also conducted in seasonal frozen region. The results show that (1) Cooling range in the upper subgrade was great and cooling rate was high, and situ freezing occurred in the upper subgrade. (2) Cooling range in the lower subgrade was small and cooling rate was low, and sufficient moisture transfer and accumulation phenomenon occurred. This position is also the depth of ice gathering zone. (3) Ice form was different in different subgrade soils, and the depth and moisture content of different ice forms presented some regularity. (4) The mean depth of the ice gathering zone was 1.08 - 1.65 m, and the scope of mean moisture content was 14.7% - 23%. The maximum moisture content approached or exceeded the plastic moisture content of soil. Therefore, the ice crystal separated, which formed the main component of frost heave. On the basis of the above research work, It is found that (1) Subgrade frost heave of seasonal frozen region is the course that different forms of ice structure compose the frost heave for heat balance continuously form and break with cooling impel and moisture transfer. It is suggested that drainage and water block measures should be proposed to control subgrade moisture and enhance the control for the homogeneity and density of subgrade filler so as to reduce

收稿日期: 2011-12-29

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (200731880156)

作者简介: 王书娟 (1979-), 女, 河北东光人, 硕士研究生. (wangshujuan224@163.com)

and prevent the frost disease.

**Key words:** road engineering; subgrade; frost heave mechanism; temperature observation; seasonal frozen region

## 0 前言

季节性冰冻气候对公路工程质量的影响十分显著,由于路基土体的冻结和融化,冰冻期沥青路面易产生开裂、冻胀隆起等病害;春融期路基强度降低,局部或全部失去承载力,致使路面结构出现沉降变形及翻浆等现象。从而降低路面使用质量,影响行车安全,增加养护维修成本。

随着社会经济的发展,公路设计理念不断进步,低路堤公路以其安全、占地少、环保等优点,得到推广应用。但路堤降低后,路基地下水位相对升高,路基湿度增加,季冻区路基冻胀融沉隐患增加,因此,积极开展路基冻胀破坏机理及防治技术研究是十分必要的。

早在20世纪后期,人们就已经注意到了冻胀现象,并开始研究冻胀对建筑、水利、电力、道路等工程的影响、机理及防治技术。国外在路基冻胀机理方面,主要开展了一般土体冻结过程、微观特征及参数方面的研究<sup>[1-2]</sup>。我国在路基冻胀方面的研究主要集中于野外宏观冻胀观测、室内土体冻胀特征测试方面,在土的冻胀机理与变化规律、分类及水分迁移等方面取得了很大进展<sup>[3-4]</sup>,但研究成果大多是针对多年冻土区而言的<sup>[5]</sup>,而对季节性冻土区研究的相对较少,特别是基于野外路基冻结过程、特征的冻胀机理研究还需进一步开展。

路基冻胀机理是道路冻害防治的基础,本文通过对以吉林省为代表的重冻区路基温度场自动化监测及典型路基冻害钻探调查资料,掌握了路基冻结时间、降温幅度及降温速率,分析了土质与含冰结

构的关系以及聚冰带分布,从而依据路基冻结过程的温、湿度特征,提出路基冻胀机理及路基冻害防治的建议。

## 1 重冻区路基温度场观测

为了解路基冻结过程,在长松高速农安绕越线二级公路 K15 + 460 断面埋设了温度传感器,温度传感器自路基顶面向下,每隔 30 cm 设置 1 个,共 6 个,如图 1 所示。

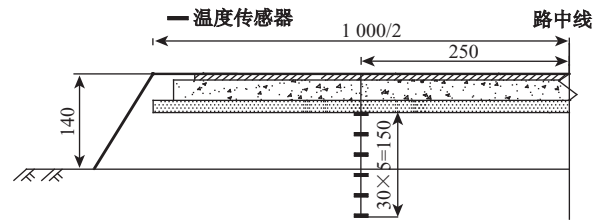


图1 路基温度观测示意图 (单位: cm)

Fig. 1 Schematic diagram of subgrade temperature observations (unit: cm)

观测断面位于重冻区,该地年平均气温  $4.5 \sim 6.8^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-36.1 \sim -39.8^{\circ}\text{C}$ ,降雪期长达6个月。观测断面处于低填路段,填方高度1.4 m,路基填料为低液限粘土掺3%石灰,地基为淤泥质土且地下水位高,冰冻春融期易产生冻胀和融沉病害。该处路面宽10 m,路肩宽0.5 m,路面结构为4 cm 细粒式沥青混凝土 AC-13 + 5 cm 中粒式沥青混凝土 AC-20 + 30 cm 石灰粉煤灰砂砾 + 18 cm 石灰粉煤灰土,为季冻区二级公路常用路面结构形式。图2为观测断面不同层位路基温度随时间变化曲线,表1是根据图2统计的路基冻结过程要素。

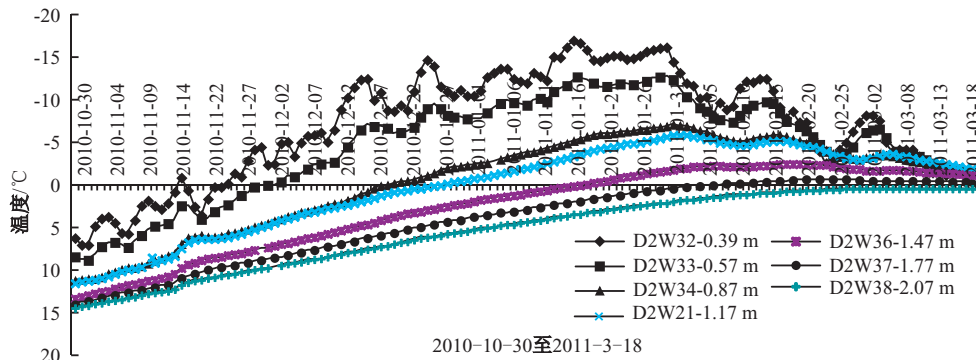


图2 路基温度观测图

Fig. 2 Observations of subgrade temperature

表 1 路基冻结过程参数  
Tab. 1 Parameters of subgrade freezing process

| 层位                     | 起止时间                               | 历时/<br>d                           | 降温幅<br>度/℃ | 降温速率/<br>[℃ · (d ·<br>30 cm) <sup>-1</sup> ] |      |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|----------------------------------------------|------|
| 上路床<br>(0.57 ~ 0.87 m) | 2010 - 12 - 18 至<br>2011 - 11 - 18 | 19                                 | 7          | 0.37                                         |      |
| 下路床                    | 上部(0.87 ~<br>1.17 m)               | 2010 - 12 - 16 至<br>2011 - 12 - 18 | 8          | 1.5                                          | 0.19 |
|                        | 下部(1.17 ~<br>1.47 m)               | 2011 - 1 - 16 至<br>2011 - 12 - 26  | 21         | 3.5                                          | 0.17 |
| 路基                     | (1.47 ~<br>1.77 m)                 | 2011 - 1 - 16 至<br>2011 - 2 - 3    | 18         | 2.3                                          | 0.13 |
|                        | (1.77 ~<br>2.07 m)                 | 2011 - 2 - 3 至<br>2011 - 2 - 26    | 23         | 0.8                                          | 0.03 |

从表 1 可看出: (1) 上路床 (0.57 ~ 0.87 m) 冻结历时 19 d, 降温幅度为 7 ℃, 降温速率明显高于下方, 说明路基土发生了快速原位冻结现象, 水分迁移聚焦差。(2) 从 0.87 m 开始, 降温幅度明显下降, 路基降温速率降低, 0.87 ~ 1.17 m 与 1.17 ~ 1.47 m 降温速率接近, 但 1.17 ~ 1.47 m 范围内降温幅度为 3.5 ℃, 冻结持续 21 d, 说明该层位发生了充分的水分迁移及聚焦现象, 为聚冰带出现的深度。如果冻深范围内土质区别比较大, 则聚冰带的分布深度会产生一定的变化。(3) 路基最大冻深线末端, 降温速率仅为 0.03 ℃ · (d · 30 cm)<sup>-1</sup>, 历时 23 d, 说明冻结末端只要有足够的水分供应, 就会发生水分聚焦现象。

## 2 路基冻害钻探调查分析

为了解广阔地域范围内路基的冻结特征, 对吉林省的国道 302 长春至白城、长吉北线、长吉南线、长清线长春至烟筒山等 7 条二级及以上公路进行了路基冻害调查, 通过 93 处路基冻害调查资料获得了土质、含水量、含冰结构等信息, 分析了路基土体含冰结构、土质与冰结构的关系、聚冰带分布等, 为季冻区路基冻胀机理分析提供了依据。

### 2.1 路基含冰结构

由于土质、含水量的不同, 路基土体中的冰主要以网状冰、层状冰、均质冰、间隙冰 4 种状态存在。网状冰的冰层在纵横方向上均有发育。层状冰以一层或数层存在于土体中, 按照厚度不同, 可分为微层状结构、层状结构。均质冰主要以肉眼可见的晶粒状冰晶和霜状冰晶形式存在, 当含水量在液限和塑限之间时, 均质冰以晶粒状分布在土中, 当

含水量在塑限之内, 均质冰呈霜状。间隙冰表现为晶粒状冰晶及霜状冰晶, 存在于风化岩石的裂隙、碎石土的石料周围及硬塑土体裂隙面中。

### 2.2 土质与冰结构

普通细粒土 (低液限粘土、低液限粉土、含砂低液限粘土)、淤泥质细粒土及含矿物成分的细粒土中的冰主要以均质和横向层状状态存在, 并且也会出现竖向层状冰及空间网状冰结构。在含水量大的情况下, 横向层状冰现象十分明显; 当含水量大且为淤泥质细粒土或种植土时, 多呈多层微层状结构; 但含有植物根茎的时候, 则沿植物根茎分布明显。

山砂、细粒土质砂中的冰以均质的状态存在, 砂夹杂的粘性土多且不均匀时, 则冰围绕细粒土分布, 当夹杂的细粒土成层状时, 会在粘性土的位置出现层状冰; 当夹杂的细粒土成团块状时, 则粘性土内结冰现象明显。

风化山皮石的层理间、泥岩和砂岩层理间会出现层状冰现象, 严重风化岩和碎石土的冰则分布于细粒土内部、聚集于碎石周围, 并且一些细粒土纵向裂隙间也存在明显的冰晶。

### 2.3 冰结构出现的深度与含水量

网状冰出现的深度为 1.2 ~ 1.4 m、1.4 ~ 1.6 m、1.4 ~ 2.0 m、1.6 ~ 1.8 m、1.6 ~ 2.0 m 几个区段; 厚度以 20 cm 居多, 也有的达到 40 ~ 60 cm; 含水量大部分在 16% 以上, 均接近或超过了塑性含水量, 有的甚至接近并超出液限含水量, 由于有肉眼可见的冰层, 因此网状冰是构成冻胀量的主要部分, 对竖向和水平方向冻胀量及冻胀力均有影响。

层状冰出现的深度分布范围比较广, 大多分布于 0.6 ~ 1.6 m 之间, 有的深达 1.8 ~ 1.9 m; 厚度以 20、40、60 cm 居多, 也有的达到 80 ~ 90 cm; 含水量多在 16% 以上, 也基本上接近或超过塑性含水量, 肉眼可见的冰层是构成竖向冻胀量的主要部分。

均质冰多以 1.4 ~ 1.6 m 开始, 结束于 1.6 ~ 1.8 m, 厚度 20 ~ 60 cm 居多, 也有的达到 100 cm 以上, 冰粒明显的含水量在 20% 以上, 不明显的含水量在 10% ~ 18% 之间, 冰粒明显的均质冰在竖向及水平方向冻胀量及冻胀力上贡献较大, 霜状冰晶对冻胀量贡献较小。

间隙冰从 1.0 m 开始的较多, 厚度在 40 ~ 100 cm 之间, 含水量在 17% ~ 20% 居多, 接近或超过塑限含水量, 由于冰晶明显, 在竖向及水平方向冻胀量及力上均有较大贡献, 并且加剧裂隙的发展, 不利于结构稳定。

2.4 压实度与冰结构

图 3 分别为农安试验路 CHB1 钻孔和长吉北线路肩 8-1 钻孔的路基土结冰现象, 取芯时试验路尚未铺筑路面, 压实程度欠缺, 路肩部位也无路面的防护, 并且压实度也较路中心低, 两者的共同特点就是路基土断面粗糙, 密实程度低, 因此便于水分迁移和赋存, 形成大量冰晶。

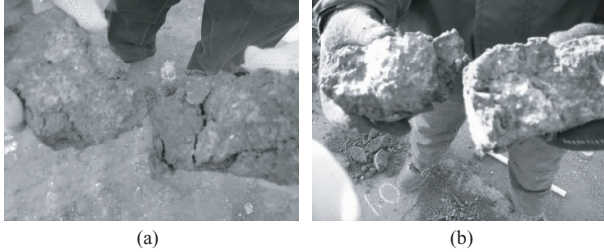


图 3 农安试验路和长吉北线路肩的路基土结冰现象

Fig. 3 Icing of subgrade soil of Nong'an test road and Changji northern line road shoulder

2.5 聚冰带分布

表 2 为钻探获取的部分孔位路基聚冰带分布情况, 可看出: (1) 聚冰带出现的深度范围因土质不同有一定的波动, 其平均深度范围为 1.08 ~ 1.65 m, 不是在路基顶部, 而是基顶下 20 ~ 40 cm, 平均厚度为 56 cm, 与路基温度场观测中聚冰带出现的位置相近。(2) 含水量平均分布范围为 14.7% ~ 23%, 含水量最大值均接近或超过了土的塑限含水量, 冰晶析出, 构成冻胀量的主体部分, 当融化时, 结构承载力将严重下降。

3 季冻区路基冻胀机理

由路基冻结过程、路基含冰结构、聚冰带分布的观测及统计结果可知路基冻胀是一个十分复杂的过程, 与外界冷量、路面结构、路基土质分布、压实度、湿度有密切的关系, 路基冻胀机理如下。

由于路面结构的防护和压实作用, 路基上路床湿度一般较小。冻结期间, 冷量穿过路面结构到达路基顶部后, 上路床开始冻结, 由于湿度较小, 发生的基本上是原位冻结, 冰晶存在于土体孔隙中, 不会出现体积膨胀现象, 此过程的特点为降温幅度大, 历时短。

随着深度的增加, 路基湿度逐渐增加, 土体孔隙水结冰放出的潜热以及下卧未冻土中传来的地热有效的阻挡了冷量的推进, 当两者平衡时, 冻结锋面便相对的稳定在上路床下方的位置, 靠着土颗粒及冰结晶的吸附力把附近的水分子吸附到自身表面,

表 2 路基聚冰带分布

Tab. 2 Distribution of ice zone of subgrade

| 地区         | 钻孔     | 土质                 | 聚冰层<br>深度/m | 聚冰层含水量/% |      |
|------------|--------|--------------------|-------------|----------|------|
|            |        |                    |             | 最小       | 最大   |
| 松原白城界      | y1     | 淤泥质粘土              | 1.3 ~ 1.6   | 15.8     | 21   |
|            | p1     | 粉质粘土               | 1.2 ~ 1.6   | 14.6     | 23.1 |
| 磐石至<br>烟筒山 | 5-2    | 粉质粘土               | 1.6 ~ 2.1   | 6.3      | 22   |
|            | 5-3    | 碎石土                | 1.8 ~ 2.0   | 6.5      | 23   |
|            | 5-4    | 碎石土                | 1.8 ~ 2.0   | 4.1      | 36   |
|            | 5-5    | 碎石土、粉质粘土           | 1.4 ~ 1.8   | 10.2     | 12.3 |
|            | 5-6    | 风化岩、粉质粘土           | 1.4 ~ 1.9   | 9.3      | 32.4 |
| 长吉北线       | 7-1    | 粉质粘土               | 1.0 ~ 1.2   | 15       | 17.5 |
|            | 7-3    | 粉质粘土               | 0.9 ~ 1.5   | 15       | 17   |
|            | 9-1    | 淤泥质粉质粘土            | 0.9 ~ 1.2   | 22       | 31.8 |
| 长吉南线       | 15-1   | 粘土                 | 1.3 ~ 1.7   | 20       | 24   |
|            | 15-2   | 粘土                 | 1.3 ~ 1.7   | 20       | 23.3 |
|            | 15-3   | 粉质粘土               | 1.4 ~ 1.6   | 20       | 26.3 |
| 松原至白城      | CHB6   | 低液限粘土              | 0.8 ~ 1.3   | 16       | 23.4 |
|            | CHB9   | 含砂低液限粘土,<br>含细粒土质砂 | 1.2 ~ 2.0   | 12       | 17.4 |
| 白城至洮南      | TB1    | 含砂低液限粘土            | 0.8 ~ 1.6   | 17       | 26   |
|            | TAT1   | 粘土质砂, 含砂低<br>液限粘土  | 1.2 ~ 1.6   | 16       | 23   |
| 四平至<br>梅河口 | G303-2 | 粘土质砾               | 0.9 ~ 1.9   | 12       | 23   |
|            | G303-3 | 低液限粘土              | 1.3 ~ 2.1   | 14       | 29   |
| 蛟河至吉林      | G202-1 | 黑色粘土               | 1.5 ~ 2.2   | 20       | 28   |
|            | S204-3 | 低液限粉土              | 1.3 ~ 2.1   | 20       | 37   |

冻结锋面上的冰晶体就不断地增长。土颗粒为了恢复水膜中的吸力和压力的平衡, 将邻近非冻结土体中的水分子拉过来, 产生向冻结锋面迁移的水分子流, 即水分迁移。在冰晶体增长引起土颗粒间距扩展与土粒位移过程中, 外界水流侵入且结晶, 产生“冰劈”作用使冻土体分成层理, 形成厚度不等的冰透镜体, 即层状冰。如果路基土体存在裂隙面或空隙较大时, 便会出现水分富集现象, 形成大量冰晶, 土体的冻胀就由此而产生, 这是土中的水分及从地下水面处迁移来的水分结晶作用的结果。冻结锋面上形成的冰透镜体和已冻结土体内未冻水结晶形成的分凝冰体所产生的冻胀量构成了土体的最大冻胀量。

当冰晶分凝作用远比土颗粒的薄膜水向冻结锋面迁移大时, 导致下卧有效水分补给区的土体含水量减小, 冻结线前缘的土体产生收缩。由于冻结锋面上得不到水分补给而破坏了其热平衡状态, 随着土体温度继续下降, 冻结线就继续下移。在到达土体中含水量较多、水分补给充裕地带又出现新的热平衡状态, 冻结线又缓慢地停止移动, 冰晶分凝作用又活跃了起来, 形成新的冰透镜体。如此继续下去, 在冰冻期适宜的条件下可形成主冻胀带和次冻胀带。

此外,在冻深线的末端,也会出现微弱的聚冰现象。

#### 4 季冻区路基冻害防治建议

本文在重冻区路基温度自动化监测及典型路基冻害钻探调查的基础上,依据路基冻结过程的温、湿度特征,分析了路基冻胀机理,并提出路基冻害防治的建议:

(1) 路基冻结过程中,由于水分迁移,均质致密的路基土也会形成层状冰,是路基冻胀量的主要构成部分,因此,路基冻害防治原则的首要任务是控制水分迁移,通过排水、阻水将路基湿度尤其是下路床湿度控制在一定范围内。

(2) 冻深范围内土质均匀的路基在冻结过程中可形成多个聚冰带,聚冰带出现的深度范围为 1.08 ~ 1.65 m,从路面向下,第一个聚冰带出现在路面结构下方 20 ~ 40 cm,平均厚度为 56 cm;含水量平均分布范围为 14.7% ~ 23%,含水量最大值均接近或超过了土的塑限含水量,冰晶析出,构成冻胀量的主体部分,当融化时,结构承载力将严重下降。

(3) 路基冻胀和土质有密切的关系,土质均匀致密时,形成层状冰结构,当有裂隙面或土体空隙大时,则积聚大量的水分和冰晶,形成网状冰结构和裂隙冰结构,融化时,承载力会明显下降,影响路基土体结构的稳定性。因此,对于路基填料来说,要控制其均匀性、密实程度。

(4) 均匀致密的低液限粘土、砂性土为良好的路基填料,对于碎石土、风化山皮石、泥岩、砂岩,应通过填筑工艺的提高控制细粒土分布的均匀性,使其碾压后成为稳定的骨架密实结构,避免细粒土聚团积聚水分,影响融化时路基土体的稳定性。

综上所述,控制路基冻胀就是要控制路基湿度、路基填料的均匀性和密实性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 程国栋. 冻土力学与工程的国际研究新进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16 (3): 293 - 299.  
CHENG Guodong. International Achievements of Study on Frozen Soil Mechanics and Engineering [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16 (3): 293 - 299.
- [2] 程国栋, 马巍. 国际冻土工程研究进展 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (3): 303 - 308.  
CHENG Guodong, MA Wei. A Research Review of International Permafrost Engineering [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25 (3): 303 - 308.

- [3] 赵安平. 季冻区路基土冻胀的微观机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
ZHAO Anping. A Study on the Mechanism of Microstructure of Frost Heaving in Subgrade Soil in Seasonal Frost Zone [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [4] 原国红. 季节冻土水分迁移的机理及数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.  
YUAN Guohong. Mechanism and Numerical Simulation of Water Transfer in Seasonal Freezing Soil [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [5] 汪双杰, 李祝龙. 中国多年冻土地区公路修筑技术研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 1 - 9.  
WANG Shuangjie, LI Zhulong. Research on Highway Construction Technology in the Permafrost Region of China [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 1 - 9.
- [6] 李萍, 徐学祖, 陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展 [J]. 冰川冻土, 2000, 22 (1): 90 - 95.  
LI Ping, XU Xuezu, CHEN Fengfeng. State and Progress of Research on the Frozen Fringe and Frost Heave Prediction Models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22 (1): 90 - 95.
- [7] 倪铁山. 季冻区铁路路基冻害原因分析与整治措施研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
NI Tieshan. Analysis and Prevention Measures to the Subgrade Freezing Damage of Railway Line in Seasonal Frozen Area [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [8] 古宪明. 季冻区道路冻胀翻浆机理及防治研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
GU Xianming. Study on Mechanism and Prevention of Road Frost Heaving and Frost Boiling in Seasonally Frozen Area [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [9] 钟敏辉, 王少斌. 季节性冻土路基冻胀性分析及治理措施 [J]. 铁道建筑, 2009 (4): 96 - 98.  
ZHONG Minhui, WANG Shaobin. Analysis of Frost Heaving for Seasonal Frost Soil Subgrade and Its Treatment Measures [J]. Railway Engineering, 2009 (4): 96 - 98.
- [10] 杜兆成, 张喜发, 辛德刚, 等. 季节冻土区高速公路路基冻胀试验观测研究 [J]. 公路, 2004 (1): 139 - 144.  
DU Zhaocheng, ZHANG Xifa, XIN Degang, et al. Experiment Research on Subgrade Frost Heaving of Expressway in Seasonally Frozen Soil Region [J]. Highway, 2004 (1): 139 - 144.
- [11] 张冬青. 季节性冰冻路基病害及防治措施研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.

(下转第 44 页)