

# 多年冻土路堤水平排水板的作用机理与试验研究

胡建华<sup>1,2</sup>, 汪稔<sup>2</sup>, 胡明鉴<sup>2</sup>, 周科平<sup>1</sup>

1. 湖南省深部金属矿开发与灾害控制重点实验室, 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉, 430071)

**摘要:**为了解决青藏高原的冻土浅层雨季雨水下渗和蒸发所产生的冻土冻胀与融沉问题,在青藏高原开展水平排水板结构性路基和普通通风路基的原位模型对比试验,并从理论上探讨水平排水板在多年冻土路基中浅层重力排水和结构加劲的作用机理,确定水平排水板的铺设参数;运用光纤监测技术对水平排水板在多年冻土路基中的变形进行监测,对比分析水平排水板铺设与否这2种条件下冻土路基变形监测结果。研究结果表明:铺设水平排水板缩短了冻胀变形的冻结期,延长了相对稳定的稳定冻结阶段,减小了冻胀变形范围和冻胀变形;在铺设水平排水板的路基段,最大融沉变形为3.7 mm,累计最大冻胀变形为5.7 mm,而在未铺设水平排水板的试验路基段,最大融沉变形为3.1 mm,累计最大冻胀变形为9.2 mm。水平排水板在冻土路基工程中,可以有效控制雨水量在路堤下的下渗,减小雨水下渗量所带来的多年冻土路基的冻胀变形。

**关键词:**多年冻土;水平排水板;光纤监测;变形

中图分类号: TU471.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)05-1451-06

## Test and mechanism of horizontal plastic drain in permafrost regions embankment

HU Jian-hua<sup>1,2</sup>, WANG Ren<sup>2</sup>, HU Ming-jian<sup>2</sup>, ZHOU Ke-ping<sup>1</sup>

1. Hunan Key Laboratory of Mineral Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to solve the frost heave and thaw settlement, the model tests were made in Tibetan Plateau. Two kinds of model were designed to horizontal drain structure embankment and the ventilation embankment in suit. The effect of horizontal plastic drain was analyzed in contrast with the ventilation embankment. The mechanisms of horizontal plastic drain were studied in permafrost, such as gravity draining in the superficial layer and structure stiffing in the embankment in the theory. According to the design theory, the parameters of horizontal plastic drain were confirmed in the embankment. The values of deformation were inspected by fiber monitor system in the permafrost embankment. The results show that the time of the frost heave is shortened, the time of relatively steady freeze is prolonged. From the deformation, the range and value of the frost heave are decreased. In the embankment of the horizontal plastic drain, the max value of thaw settlement is up to 3.7 mm, and the cumulative value of the frost heave is up to 5.7 mm. To the contrast embankment, the values are 3.1 and 9.2 mm respectively. It is indicated that the rainfall seepage is controlled to the embankment in superficial layer, the influence of precipitation and evaporation are weaken, the deformation values of the frost heave are decreased in the horizontal plastic drain embankment.

**Key words:** permafrost; horizontal plastic drain; fiber monitor; deformation

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2008-12-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX12SW204); 中南大学理科发展基金资助项目(07SDF10); 岩土力学与工程国家重点实验室基金资助项目(Z110703)

通信作者: 胡建华(1975-), 男, 湖南衡南人, 博士, 副教授, 从事采矿与岩土工程的稳定性分析研究; 电话: 0731-88879965; E-mail: hujh21@126.com

修筑青藏铁路面临的 2 个关键问题是高原和冻土。已开工建设的青藏铁路格拉段,地形相对平缓,大中桥梁和隧道的累计长度只占建筑总长度的 3.5%,绝大部分是路基工程。路基工程的关键在于如何处理冻土,青藏铁路的冻土问题体现在冻土冻胀与融沉<sup>[1]</sup>。目前,处理冻土工程的主要措施有通风管路基、热棒、片石路基、遮阳棚和人工冻结技术等。采取这些措施存在成本高、技术复杂和适用条件不足等问题<sup>[2]</sup>。因此,开展新的冻土冻胀与融沉处理技术和机理研究在冻土工程和冻土学中具有重要意义。采用水平排水板的级配改良结构性路基对冻土路基的融沉处理是一种新的技术工艺,目前,还处于试验研究阶段,特别是水平排水板在冻土路基中的作用机理有待深入研究和分析。级配改良结构性路基<sup>[3]</sup>是指对路基填土进行级配改良和粒径重组,对各级配粒径组分层填筑,以改良路基的热学性质,并在路基填筑过程中铺设水平排水板,切断外来水源,改善路基的排水,提高路基的强度,预防纵向开裂。

## 1 水平排水板作用机理

在水平排水板结构性路堤中,除进行填土的级配改良外,主要在级配改良结构性路堤中铺设水平排水板(见图 1),其在路堤中的作用机理主要表现为:重力排水,加劲作用,减小路堤结构的变形等。

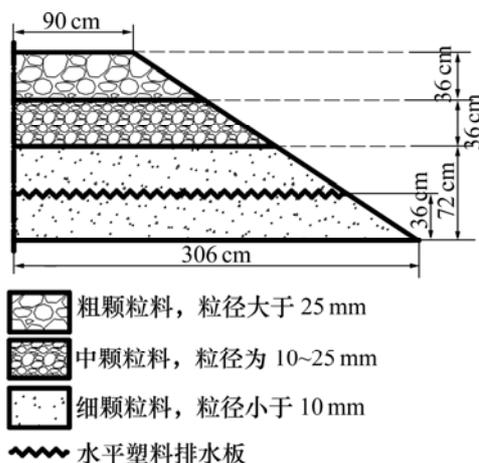


图 1 水平排水板路基结构图

Fig.1 Structure of horizontal plastic drain

### 1.1 重力排水作用

在天然条件下,多年冻土地质体组成的大系统为

一个开放系统,融化过程的水分补给主要为大气降水、融化层中的冻结层上水,以及其他形式的地表水的下渗,但活动层靠近多年冻土层一侧的含水量变化取决于具体条件下的水分补给,地表和可能存在的土壤中的蒸发以及可能存在的大气与土壤空气间交换过程在全年间的平衡<sup>[4]</sup>。当土体冻胀时,冻胀量将直接影响修建在土体上的构筑物安全,其冻胀量包括土体孔隙内水分冻结体积膨胀和外界水源向冻结前缘带迁移析冰形成冰透镜体引起的体积增量 2 部分,其中,第 2 部分所引起的体积增量为迁移水体积的 1.09 倍,是引起冻胀的主要原因<sup>[5]</sup>。

试验段的外界水源主要为大气降水和地下水的补给。由于水平排水板级配改良路堤填筑工艺要求粗颗粒位于上部,粗颗粒层孔隙度大,渗透性好,大气降水在路堤上部形成自然通道,这将使路堤细颗粒层与下部路基地质体含水量在雨季获得大量大气降水补给,以及带来的热量下渗,将对路堤稳定性产生不利影响,严重时将产生融季翻浆和冻季的大冻胀变形。在细颗粒层中铺设水平排水板,就是通过水平排水板使排水板上、下的自由水形成水平横向自由排水通道,阻断外界水源向下部迁移,减少下部土体的含水量补给。在地基中形成渗透性良好的人工水平排水减压通道,减少降水的下渗对多年冻土季节融化层的水分补给以及自由水下渗带来的热量交换。

### 1.2 加筋作用

排水板作为一种具有高抗拉强度的土工复合材料,在路堤填土中均匀铺排水平塑料排水板,使得水平排水板作为一种抗拉构件的筋材,与土体产生相互摩擦作用,限制其上下的土体侧向变形,增强土体的整体性,从而提高土体的抗剪强度,解决路堤路肩部分产生纵向裂缝的问题。通过对加筋消减冻胀的试验研究及其抗冻胀工作机制的理论分析<sup>[5]</sup>,可知加筋材料对土体施加的约束力除了可以减小土体的实际冻胀率外,还可以通过压缩未冻土,迫使冻胀向未冻土区发展,使外观表现出来的冻胀量减小。

a. 由于水平排水板增加了路堤填土间的层间摩擦阻力,在一定程度上制约了填土的横向移动,形成了一定的嵌锁作用,通过这种机械咬合作用,提高路堤土体的整体抗剪能力。

b. 水平排水板与路堤填土间形成一道不同刚度的隔离夹层,它既可充当路堤的柔性筏基,又可作为冻土路堤水分迁移的水平排水通道,使地基变形均匀,

差异沉降较小, 总沉降量减小。

c. 由于排水板具有一定的抗拉强度, 通过其将上部填料的垂直变形向水平方向扩散, 使其上部填料的抗剪切变形能力得到充分发挥, 并且通过剪切迟滞吸收剪应力, 拉伸限制地基的剪切滑动, 提高地基的抗剪能力, 从而使地基表面的承载区增加, 表面压强减小, 以达到提高承载力和路堤稳定性的目的。

## 2 多年冻土区水分迁移特性

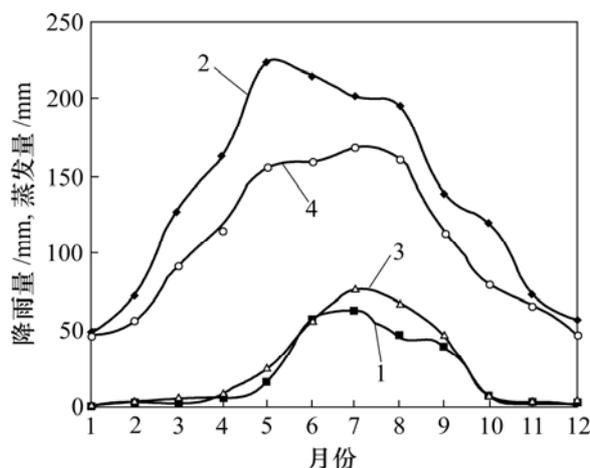
多年冻土区水分迁移能够以气态、液态和固态 3 种方式进行。但固态水的迁移是冰的一种纯塑性流动的结果, 主要在多年冻土深部饱冰层承受较大的上覆土层压力时才可能出现, 多年冻土区浅层路堤存在液态和气态水分的迁移。浅层冻土中水分迁移是在各种力的作用下进行的, 如重力、由于溶质存在造成的渗透力、由液相和固相分界面产生的吸附力、由液相和土壤空气分界面产生的溶液面力和土壤气相的水气压力等。这些力并非所有的都产生作用, 起主要作用的力决定了水分迁移的机理<sup>[6-8]</sup>。

不同的土粒成分具有不同的土水势, 特别是土颗粒的粒径级配, 即土颗粒的分散性影响明显。随着土类从砂土变到黏土, 其中细颗粒含量不断增多, 造成活性比表面积增大和平均毛细半径减少, 导致土中水所受到的束缚能增大, 土水势减少。一般地, 砂土的土水势最大, 粉土居中, 黏土最少; 对同一种土, 含水量相同, 土水势随着干密度增大而增大。

### 2.1 大气降水

降水、蒸发和冻结作用是影响路堤场地水分状况的环境因素, 土质和地貌位置即水文地质条件是其内在因素。由文献[9-10]可知, 季节融化层的含水量(参考蒸发量)与雨峰期关系密切(见图 2)。

每年 5 月份中、下旬的前期雨峰强度虽小, 但此时的季节融化深度浅, 与土层初期融化的固有含水量叠加出现薄浅层的饱和层; 7 月份中期属强度最大的雨期, 但停雨时的蒸发也强, 故上部呈现高湿度层, 而下部为低湿度层; 9 月份来临的后期雨峰与回冻和冻结期相衔接, 入渗的降雨被保存在土层中, 且受冻结过程水分迁移, 影响富集冻结锋面, 形成浅部饱和, 中段干燥, 下部增大为低温润层的“K”形水分分布剖面。砂砾土季节融化层由于冻结层上地下径流的控制, 砂砾土渗透性能强等, 浅层土始终处于干燥状态,



1—沱沱河降雨量; 2—沱沱河蒸发量;  
3—五道梁降雨量; 4—五道梁蒸发量

图 2 青藏高原降雨量、蒸发量与时间的关系  
Fig.2 Relation between rainfall or vaporize and time in Tibet

但在雨峰期及其后一段时间内, 低湿润层的厚度明显增大, 表明降水对其产生直接影响<sup>[11]</sup>。

在多年冻土活动层中, 水分在重力作用下的渗透运动是一种比较普遍存在的现象, 包括大气降水和在一定条件下来自周围地层中的冻结层上水渗入。这种下渗水构成了多年冻土地下冰的主要物质来源<sup>[8]</sup>。

### 2.2 未冻水的迁移

由于水平排水板重力排水作用, 大气降水在级配改良结构性路堤中所起的作用减弱, 从而使级配改良结构性路堤与冻土地质体水分迁移形成封闭系统。未冻水的迁移主要表现为在溶质势和压力势的作用下水分迁移, 这是在冻土体中土相态平衡被破坏和外部作用(温度、压力等)改变的一种水分迁移。

## 3 工程试验与监测

### 3.1 水平排水板的铺埋

对于塑料排水板在水平向排水作用的影响半径, 可以参照垂直塑料板排水法的等效直径进行设计。在软土工程中, 塑料板排水法按砂井地基的设计理论进行排水板地基的设计, 将排水板换算为等效直径的圆形砂井进行计算。该等效圆形砂井的直径称为塑料排水板的等效直径<sup>[12-13]</sup>。通常, 排水板等效直径  $d_w$  的换算式为

$$d_w = \alpha \frac{a+b}{2}$$

其中： $\alpha$  为排水板等效直径的换算系数； $a$  和  $b$  分别为排水板的宽度和厚度。

在 3 m 长的级配改良路堤试验场地上平铺 18 根长度为 3.6 m，间距  $d_w$  为 34 mm 的水平排水板。水平排水板施工工艺要点为：

- a. 平整基底第 1 层，细粒级配层填土。
- b. 铺放水平排水板。水平排水板长度为 3.6 m，间距  $d_w$  为 34 mm。
- c. 在水平排水板上铺土压实。

在水平排水板上按规定层厚度铺土，施工机械设备与筋材间的填土厚度最少为 15 cm；填土时应防止筋材移动；填料最佳含水量为  $w_{op} \pm 2\%$ (其中， $w_{op}$  为填料含水量)，压实度不小于 90%。

### 3.2 光纤监测系统

冻土路基是随季节融化过程产生融化下沉变形，随着季节回冻产生冻胀变形，这个过程即为冻土路基可逆变形过程。其特征是：路基融化下沉量大，回冻冻胀量就大，当路基高度、路基结构以及路基填土不同时，其变形可逆性有很大差别。根据冻土路基变形特点，路基变形可以分为 3 个阶段，即 4~11 月份的沉降变形融化阶段，11~1 月份冻胀变形的冻结阶段以及 1~3 月份变形相对稳定的稳定冻结阶段。多年冻土路基变形一般由下列 3 方面组成：路基(路堤部分)填土变形；路基基底季节融化层变形；多年冻土融胀变形<sup>[9]</sup>。为了研究水平排水板在级配改良结构性路堤的作用机理及其变形规律，采用普通通风管路堤的变形进行对比研究。文献结果表明<sup>[14-15]</sup>，通风路堤结构有利于维护冻土路基的稳定性，增大冻土的冻胀变形。在试验路堤填筑完工后，及时布置测量路堤变形的光纤多点位移计，其各点探头埋设的位置深度分别为 1.60，3.10，5.10 和 7.60 m(见图 3)。

## 4 监测结果与分析

根据分析，主要对填筑后的水平排水板级配改良结构性路堤从当年 9 月份到第 2 年 1 月份的冻结阶段变形进行监测，其沉降变形累计监测结果如图 4 所示。

路基的变形主要包括 2 个部分：其一为路基填筑后产生的工后沉降，其二为冻结阶段的冻胀变形。从

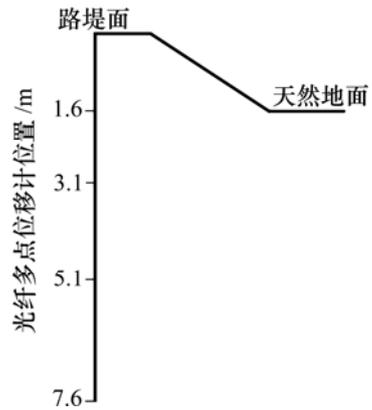
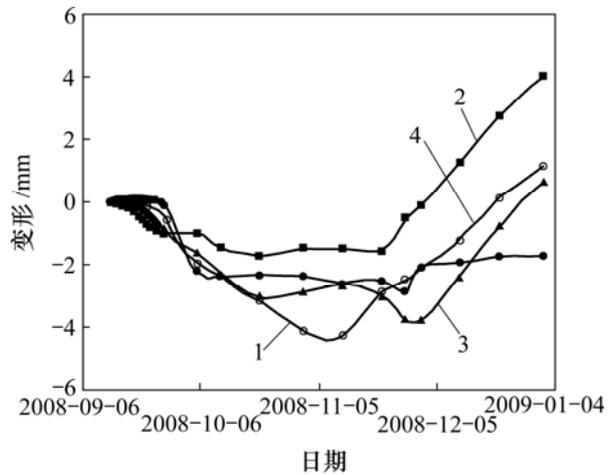


图 3 光纤多点位移计监测布设图

Fig.3 Picture of fiber probe position



深度/m：1—1.6；2—3.1；3—5.1；4—7.6

注：变形中正值为向上冻胀变形，负值为向下沉降变形

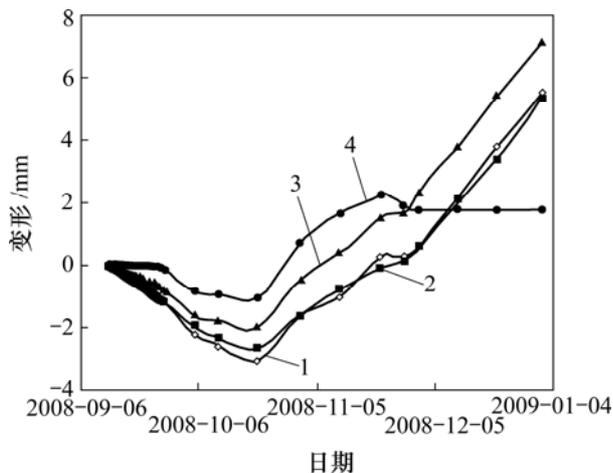
图 4 水平排水板路堤变形实测累计值

Fig.4 Distortion curves in horizontal drain embankments

图 4 可以发现，级配改良路堤在填筑完工后的工后沉降在距路面 1.6 m 处最大，累计沉降变形为 4.3 mm。这是由于路堤填筑的浅部地质体中根植土层为松散粉细砂土，其压缩性强，在路堤荷载作用下，土体被压紧形成较大的沉降变形；在距路面 2.9 m 以下，冻土属于多冰冻土，含冰量(体积分数)达 80%以上，弹性模量大，沉降变形小；在距路面 3.1 m 及以下各点，累计沉降变形最大不超过 4 mm，最大值为 3.7 mm，最小值为 1.7 mm。并且在 10 月份以后，沉降变形在 3.1 m 及以下各点，沉降变形不再增加，达到一个相对稳定阶段。从 11 月份中下旬开始，路堤及其地质体发生冻胀变形。由图 4 可知，1 月 1 号，冻胀变形在深度 3.1 m 处出现最大值，累计冻胀变形最大达到 5.7 mm，

其次,在深度 1.6 m 处累计冻胀变形达到 5.4 mm。因为冻胀变形的的水分主要向冻结缘迁移,在多年冻土区,路堤-地质体的冻结过程是一个双向冻结的过程,冻结缘的深度在 1.6~3.1 m 附近,特别在 3.1 m 附近,由于位于冻土上限以下,水分迁移发生聚冰现象,从而形成多冰冻土层,使 3.1 m 处的冻胀变形大于其他点的变形。

在通风管路堤相同的位置埋置光纤光栅探头监测变形,其监测结果见图 5。



深度/m: 1—1.6; 2—3.1; 3—5.1; 4—7.6

图 5 通风路堤变形实测累计值

Fig.5 Distortion curves in ventilation pipes embankments

由图 5 可知,其工后累计沉降变形在深度 1.6 m 处最大,达到 3.1 mm,而在 3.1, 5.1 和 7.6 m 处的累计沉降变形分别为 2.8, 2.0 和 1.1 mm。由于没有水平排水板的作用,进入 10 月下旬,路堤与地质体就进入冻胀阶段,并且在 1.6, 3.1 和 5.1 m 处,到 1 月 1 号为止,3 个测点的冻胀变形均大于 8.0 mm,最大值出现在 5.1 m,其累计的冻胀变形达到 9.2 mm。

从路堤的结构分析,由于水平排水板级配改良结构性路堤,在细粒级配层中铺设了水平排水板,对路堤结构起到了横向排水的作用,减少了路基的外来水源补给,特别是大气降水的补给。通风管路堤的最大冻胀变形(9.2 mm)接近水平排水板路堤的 2 倍(5.4 mm),并且在级配改良结构性路堤的最大值主要出现在 1.6~3.1 m 范围内,而在通风管路堤,其冻胀变形的最大值出现在 1.6~5.1 m 范围内,加大了冻胀的范围;级配改良结构性路堤缩短了冻胀变形的冻结阶段,延长了相对稳定的稳定冻结阶段,有利于减小冻

胀变形。

## 5 结 论

a. 在冻土路基工程中,路堤的冻胀和融沉变形与路堤的大气降水及浅层水分迁移正相关。

b. 水平排水板在冻土路堤中主要的作用机理表现为大气重力排水作用,有效减少浅层水分迁移引起的路基冻胀与融沉;此外,结构性加劲作用限制其上下土体的侧向变形,增强土体的整体性,从而改善路基的水平力学作用,减小不均匀沉降。

c. 在铺设水平排水板的路基段,最大融沉变形为 3.7 mm,累计最大冻胀变形为 5.7 mm;而在未铺设水平排水板的试验路基段,最大融沉变形为 3.1 mm,累计最大冻胀变形为 9.2 mm。这表明,水平排水板在冻土路基中明显改善路基的重力排水结构,减小冻土路基雨水下渗引起的冻胀,缩短了冻胀变形的冻结期,延长了相对稳定的稳定冻结阶段,减缓了冻胀变形范围和冻胀变形。

### 参考文献:

- [1] 程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(1): 21-25.  
CHENG Guo-dong. Interaction between Qinghai-Tibet railway engineering and permafrost and environmental effects[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(1): 21-25.
- [2] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579-587.  
MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 24(5): 579-587.
- [3] 胡建华, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 多年冻土区级配改良结构性路基热学机制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(3): 600-603.  
HU Jian-hua, WANG Ren, HU Mian-jian, et al. Thermo-mechanism of improved graded structural embankment in permafrost regions[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(3): 600-603.
- [4] 李述训, 程国栋. 冻融土中的水热运输问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995.  
LI Shu-xun, CHENG Guo-dong. Problem of heat and moisture transfer in freezing and thawing soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995.

- University Press, 1995.
- [5] 陈 轮, 郭瑞平, 李广信. 土工加筋抗冻胀工作机制的研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 297-305.
- CHEN Lun, GUO Rui-ping, LI Guan-xin. Study on prevention of frost heaving of reinforced soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 297-305.
- [6] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [7] ZHANG Yin-sheng, Ohata T, Kadota T. Land-surface hydrological processes in the permafrost region of the eastern tibetan plateau[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1/4): 41-56.
- [8] Simonsen E, Isacsson U. Thaw weakening of pavement structures in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(2): 135-151.
- [9] 王铁行. 多年冻土地区路基计算原理及临界高度研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2001.
- WANG Tie-hang. Study on embankment calculation principle and critical height in frozen soil zone[D]. Xi'an: Highway School of Chang'an University, 2001.
- [10] WU Qing-bai, LIU Yong-zhi. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 85-92.
- [11] 吴紫汪, 程国栋, 朱林楠, 等. 冻土路基工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998.
- WU Zi-wang, CHENG Guo-dong, ZHU Lin-nan, et al. Embankment engineering of frozen soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998.
- [12] 高长胜, 张 凌, 汪肇京, 等. 塑料排水板的等效直径[J]. 水利水运工程学报, 2002(4): 28-32.
- GAO Chang-sheng, ZHANG Ling, WANG Zhao-jing, et al. Equivalent diameter of prefabricated drains[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(4): 28-32.
- [13] 何开胜. 水平排水板振动碾压地基处理技术和工程措施[J]. 施工技术, 2002, 31(1): 41-42.
- HE Kai-sheng. Foundation treatment technique of method of vibration and roller compaction of horizontal drain board[J]. Construction Technology, 2002, 31(1): 41-42.
- [14] 喻文兵, 赖远明, 牛富俊, 等. 多年冻土区铁路通风路基室内模型试验的温度场特征[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 601-607.
- YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, LIU Fu-jun, et al. Temperature field features in the laboratory experiment of the ventilated railway embankment in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 24(5): 601-607.
- [15] 吴志坚, 马 巍, 盛 煜, 等. 通风管、抛碎石和保温材料保护冻土路堤的工程效果分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1288-1293.
- WU Zhi-jian, MA Wei, SHENG Yu, et al. Cooling effectiveness analysis of the vent-pipe, cast-detritus and heat preservation material on protecting embankment in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1288-1293.