

# 察尔汗盐湖公路地基温度场与湿度场分布特征<sup>\*</sup>

刘军勇<sup>1,2</sup>, 王晓谋<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710065)

**摘要:**为探明青藏高原察尔汗盐湖区公路地基温度场与湿度场的分布特征,以新建的G30<sub>11</sub>线大柴旦—察尔汗—格尔木高速公路为依托工程,通过现场监测和室内试验等手段,分析了公路地基温度场、湿度场随深度、季节更替的变化特征。结果表明:上部路基改变了地基与大气之间的热力交换环境,离路中心越近,温度受大气环境的影响越小;同一监测孔地基随季节更替呈现出地温梯度随深度的增加而减小;5~8月份为地基吸热阶段,8~12月份为地基放热阶段;地温随深度变化的拐点位于原地表下2.5 m深度处。探明了公路地温的年变化深度和年平均地温;年平均地温基本上不受路基高度及其覆盖作用的影响;季节的变化(气温、降水等)对地基湿度场的有效影响深度为1.5~2.0 m;有效影响深度以下,地基土含水率随季节更替变化不大,主要受地下水迁变的影响。

**关键词:** 青藏高原察尔汗盐湖区;公路地基;温度场;湿度场;分布特征

中图分类号: TU445; TU448

文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)03-0717-07

## Distribution Characteristics of Road Foundation Temperature Field and Humidity Field in the Qarham Salt Lake Area

Liu Junyong<sup>1,2</sup>, Wang Xiaomou<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China; 2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710065 P.R. China)

**Abstract:** In order to determine the distribution characteristics of road foundation temperature field and humidity field in the Qinghai-Tibet plateau Qarham Salt Lake area, based on the new national road G30<sub>11</sub> of Da-Chaidam to Golmud expressway, through filed monitoring and indoor experiments, the paper analyzed the distribution characteristics of temperature field and humidity field of road foundation with the variation of depth and seasons. The results show that the upper embankment changes the heat exchange between the foundation and atmosphere environment, the influence of atmosphere environment is getting smaller near road center. Temperature gradient is getting smaller with the increase of foundation depth with season changing. The results also manifest that the foundation absorbs heat during May to August, but releases heat from August to December. The inflection point of foundation temperature is at 2.5m depth under the earth's surface. The paper determines the annual mean ground temperature and its depth under different positions of the road, which are basically not influenced by the height of subgrade and its coverage. The humidity variation depth is 1.5~2.0 m under the change of seasons (air temperature, precipitation, etc.). Below this depth, the moisture content of foundation soil is basically affected by groundwater, while affected little by seasons changing.

**Keywords:** the Qinghai-Tibet plateau Qarham Salt Lake area; road foundation; temperature field; humidity field; distribution characteristics

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-12-21 (修改稿)

作者简介: 刘军勇 (1979-), 男, 湖北枣阳人, 博士生, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。

E-mail: liu88618@163.com

基金项目: 中国交通建设股份有限公司、中国交建寒区旱区道路工程重点实验室、中交第一公路勘察设计研究院有限公司资助科研项目 (2014-ZJKJ-PTJC07)

## 0 前言

青藏高原察尔汗盐湖区地处柴达木盆地格尔木地区,属季节性冻土区又属于内陆盐湖强盐渍土地区,青藏铁路、青藏公路和新建的 G30<sub>11</sub> 线大柴旦—察尔汗—格尔木高速公路均从该地区穿越。对于道路盐渍土地基而言,区域环境年周期性变化引起地基土温度场和湿度场的变化,从而加剧地基土易溶盐的结晶与溶解,土的组成相不断变化,如此反复,严重破坏了土体的工程性质,导致地基承载力下降、沉降量增大直至上伏路基失稳的道路病害出现。对季冻区道路地基而言,地基温度场和湿度场的变化引起含冰地基不均匀融化,地基产生较大的融沉变形,导致路基失稳。中国科学院和中交第一公路勘察设计研究院通过对青藏公路的监测和调查<sup>[1-4]</sup>指出,冻土区路基病害主要表现为沉陷、波浪、不均匀沉降,病害的主要原因是路基的填筑改变了路基下冻土的生存环境,路基的覆盖作用改变了地基的热力交换条件,造成路基下温度场的差异,最终造成地基冻土融化盆的不均匀性,导致路基随地基发生不均匀沉降。由此可见,公路地基温度场对路基的稳定性至关重要。文献[5]指出近三十年来青藏高原冻土区气温升高 0.45℃ 左右,引起冻土地温平均升高了 0.2~0.3℃,影响深度达到了 40 m。地温的升高加剧了青藏高原南、北界岛状冻土的不稳定状态。梁波、金莹等<sup>[6-7]</sup>开展了冻土路基变形规律的研究,结果表明,随着路基深度的不同,外界条件的变化对浅层地表的影响比较大。

对于盐渍土地区而言,温度对盐渍土地基和路基的物理力学性能影响较大。相关研究结果表明<sup>[8-9]</sup>,冻融试验负温循环过程中,水分和盐分向冷端迁移,易溶盐产生冻胀或盐胀,土体密实度提高。正温循环过程中,土体中的冰晶或盐晶消融,土体密实度下降,造成地基和路基路用性能显著降低。此外,冻融循环引起土体抗剪强度规律性变化与重分布,温度循环是影响盐渍土抗剪强度变化的重要因素<sup>[10-11]</sup>。

由于青藏高原地域广阔,限于人力、物力和经济等条件限制,还不能对整个区域或具有地域特色的代表性区域进行相关监测与研究,国内外学者也未对察尔汗盐湖区道路温度场和湿度场进行相关研究。因此,开展青藏高原察尔汗盐湖区公路地基

温度场与湿度场分布特征的研究,为高原季节性冻土区和盐渍土地区的道路工程建设提供必要的数据,无论是对于该地区季冻区道路的设计,还是对于该地区盐渍土地基处理和路基病害防治等,都具有重要的意义。本文以新建的 G30<sub>11</sub> 线大柴旦—察尔汗—格尔木高速公路为依托工程,对盐湖区公路地基温度场与湿度场分布特征展开研究。

## 1 工程概况与监测方法

### 1.1 工程概况

G30<sub>11</sub> 线大柴旦—察尔汗—格尔木高速公路,全长 226 km,于 2011 年 12 月全线通车。该公路全线均处于察尔汗盐湖区。察尔汗盐湖地处柴达木盆地青藏高原东北部,是青海省西北端的内陆盆地,为中亚荒漠的一个组成部分,属公路自然区划中的青藏高原寒区。由于该地区深居大陆腹部,四周高山环绕,使得西南暖湿气流难以进入,降水量稀少,气候干燥。区域内太阳辐射量大,日照时间长,热量充足,昼夜温度变化剧烈,最大日温差为 30.6℃,极端最低气温为 -33.6℃,极端最高气温为 35.5℃。本地区年降水量仅为 20~143 mm,年蒸发量达 2 000~3 000 mm,降水分布特征由四周山区向中心盆地递减,蒸发量由四周山区向盆地中心递增,从而形成典型的大陆性荒漠气候,孕育了高海拔地区盐渍土形成的极端环境<sup>[12-13]</sup>。

该段高速公路沿线均为盐渍土<sup>[14-15]</sup>,其中氯盐渍土、亚氯盐渍土分布里程约占 85%,硫酸盐渍土、亚硫酸盐渍土分布里程约占 15%。过盐渍土和强盐渍土路段占到全线里程的 80% 以上。

温度场和湿度场监测周期为 2011 年 5 月~2012 年 12 月,跨越工程建设期和公路运营期。本文仅取察尔汗盐湖中心区域部分监测结果分析,以监测断面 ZK603+250 为例,路堤填土高度为 3.1 m,分离式路基单幅宽度为 13 m。

### 1.2 监测方法

在分离式路基的路肩、路中线和护坡道处布设测温观测孔,天然孔距路堤坡脚或护坡道坡脚 10 m。由于国内外未见对盐渍土地基地温变化的相关研究报道,测温孔的深度参考多年冻土区的相关研究成果,并结合察尔汗盐湖气候特点拟定:在路基下的观测孔深度至地表下 8 m,坡脚观测孔深度至地表下 6 m,天然孔深度地表下 4 m。在观测孔

内每隔 1~2 m 放置测温探头,如图 1 所示。

地基土湿度的监测主要靠人工挖孔取样,在室内测定不同深度处地基土的含水率。取样地点位于路基断面的坡脚处,距坡脚 5 m、10 m 的天然地

基处。采用洛阳铲挖孔取样,取样最大深度结合常年地下水位深度取 4.0 m。取样位置:自地表向下,每 0.5 m 深度取土样,如图 2 所示。监测频率为一周一次。

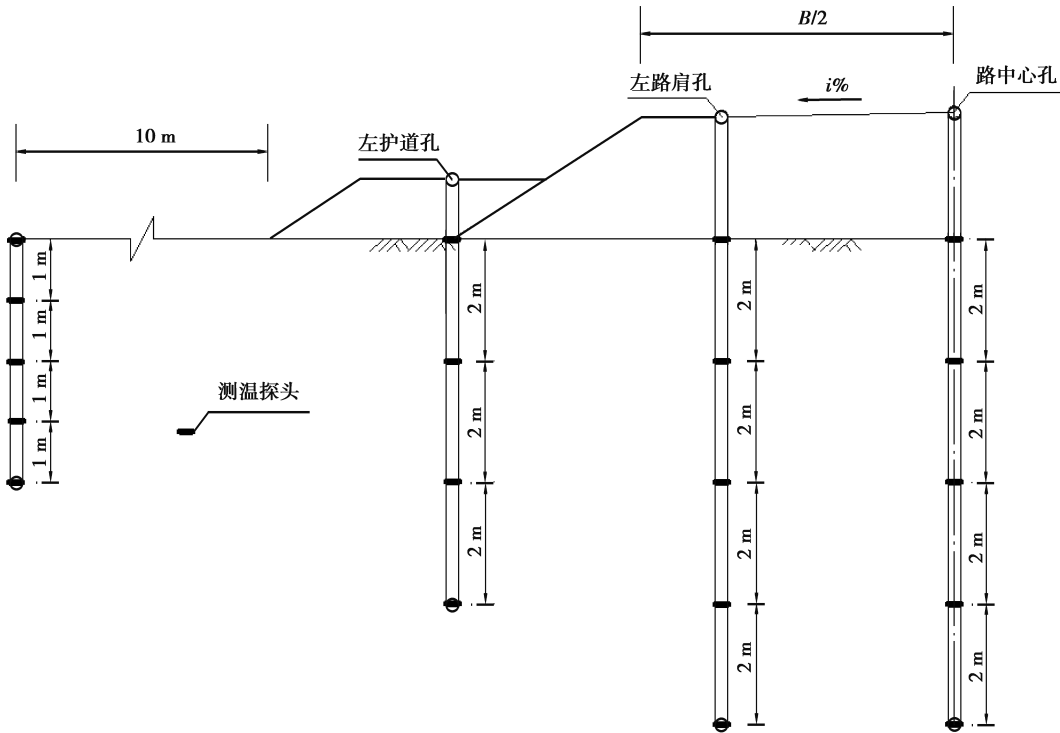


图 1 地基测温孔横断面

Fig. 1 Monitoring cross section of road foundation temperature field

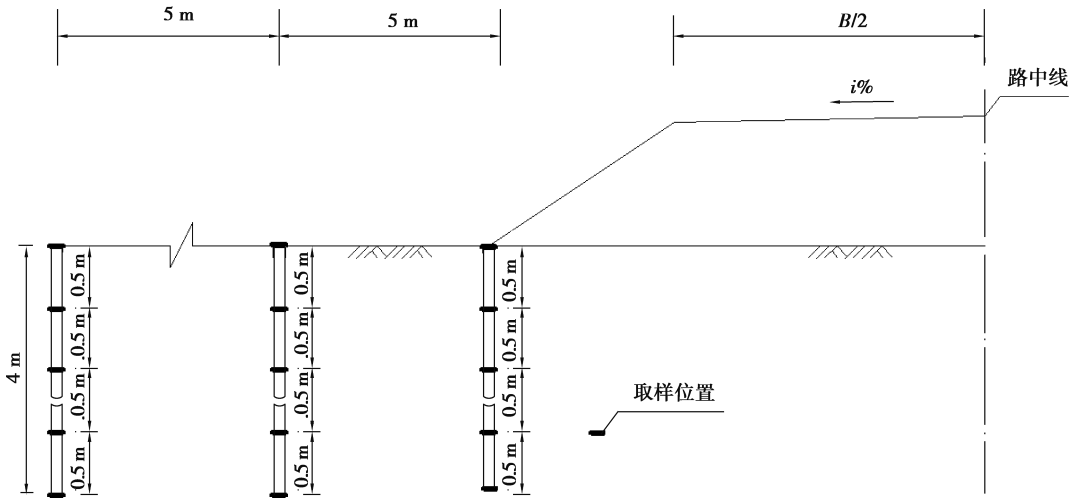


图 2 地基测湿挖探位置横断面

Fig. 2 Monitoring cross section of road foundation humidity field

## 2 监测数据分析

### 2.1 不同深度处地温随时间的变化特征

图 3 描述了 ZK603+250 断面左路肩、路中线、坡脚与自然地面温度监测孔不同深度处地温随时

间的变化特征：

(1) 受大气温度影响,同一深度处地温在不同季节的温差随深度增加而减少。深度 0 m 处地温温差最大;ZK603+250 断面 5 月份与 12 月份地温温差:自然地面孔 26 ℃、左坡脚孔 16 ℃、左路肩和

路中心孔 9℃。由于上部路基有蓄热的作用,改变了大气与地表的热交换环境,特别是在接受短波辐射和蒸发耗热方面,使盐渍土地基重新调整热平衡过程,地基的温度状况发生了明显的变化,路中及路肩的温度梯度相对于无覆盖层的天然地表而言明显减小,路基对地基具有明显的保温作用。根据

其他断面的监测结果(限于篇幅,此处不一一列举),同一深度地温温差,较高路基温差值比较低路基温差值低,如:ZK602+000 断面路基高度为 5.0 m,ZK603+250 断面路基高度为 3.1 m,前者较后者温度差略小 2.0~2.5℃。

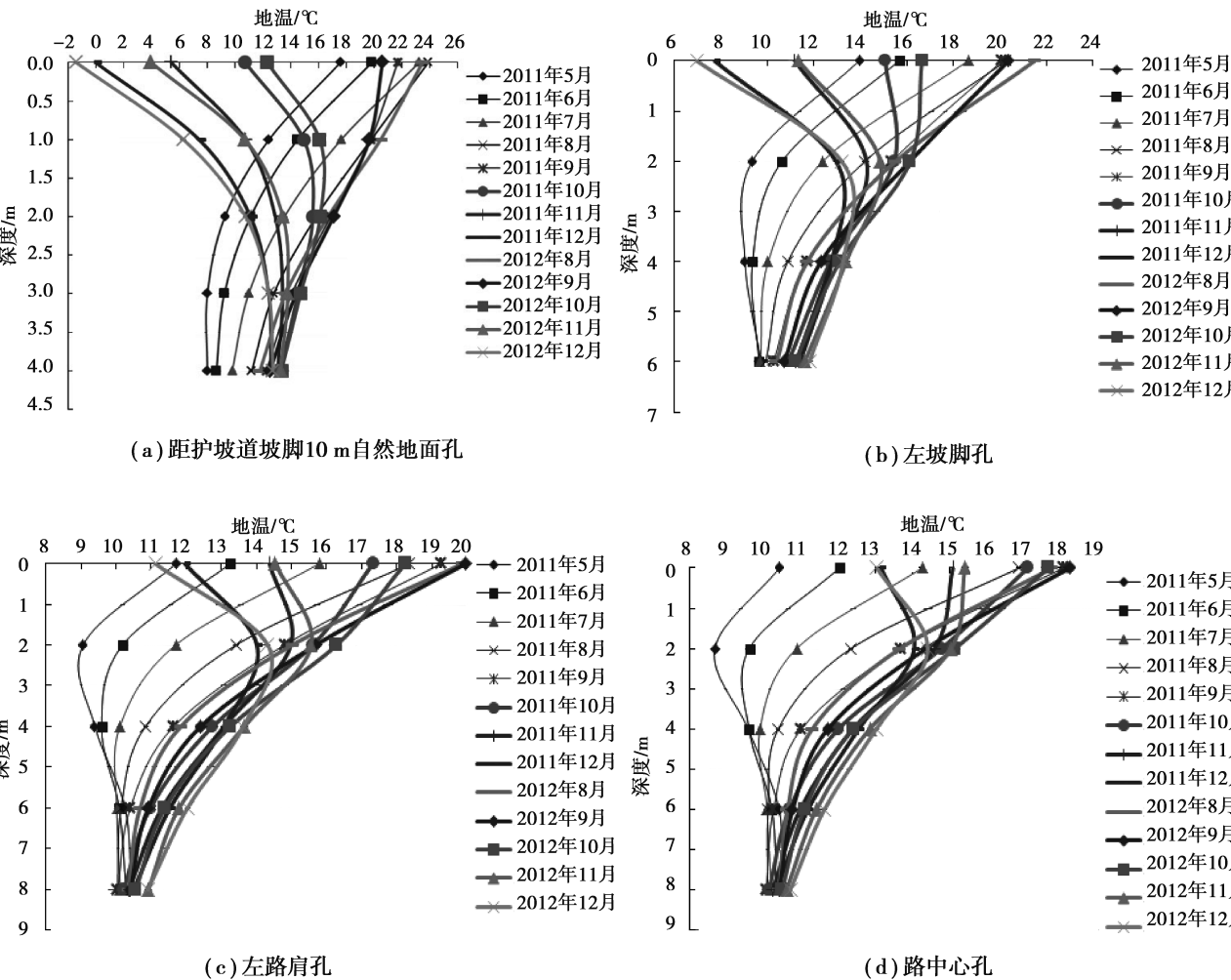


图 3 ZK603+250 断面地温随深度、时间变化曲线

Fig. 3 Curves of foundation temperature under different depth and time for section ZK603+250

(2)5~8 月份,各观测孔地温随深度的增加呈先降低后略有升高的规律;8~12 月份,各观测孔地温随深度的增加呈先升高后降低的趋势。规律表明,5~8 月份地基表现出吸热作用,且这种作用对自然地面和坡脚的影响要大于路肩和路中心;8~12 月份地基表现出放热的作用。地温随深度变化的拐点位于原地表下 2.5 m 深度处。拐点之上深度范围内的地温受气温、太阳辐射以及路堤施工时的蓄热等因素显著影响,随着土体深度的增加,这种影响逐渐减弱;拐点之下,地温随深度增加

趋于稳定,说明该深度以下,地温受气温、太阳辐射等因素的影响较小,且下层地温变化滞后于上层地温变化。

(3)地表以下温度随季节变化而变化,其变化幅度随深度增加而衰减,在某一深度以下地温在一年内相对不变,此深度称为地温年变化深度,该深度处的地温定义为年平均地温。从图 3 可以看出:断面 ZK603+250 坡脚地温年变化深度为 6.0 m,年平均地温为 10.7℃;路肩和路中心地温年变化深度为 8.0 m,年平均地温为 10.4℃。



2.2 地温在同一水平断面上随时间的变化特征

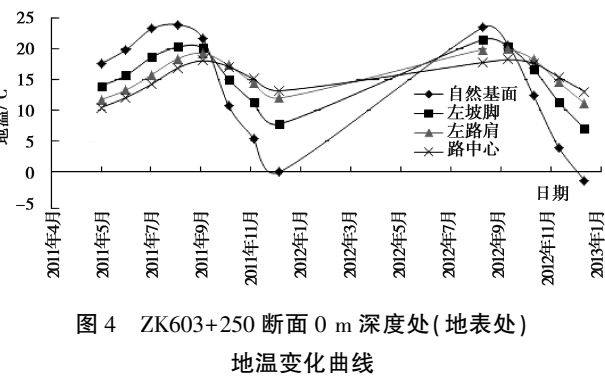


图 4 ZK603+250 断面 0 m 深度处(地表处)地温变化曲线

Fig. 4 Curves of foundation temperature at the depth of 0 m (ground surface) for section ZK603+250

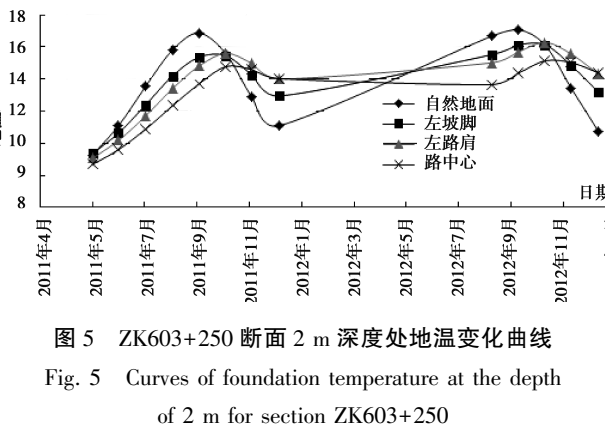


图 5 ZK603+250 断面 2 m 深度处地温变化曲线

Fig. 5 Curves of foundation temperature at the depth of 2 m for section ZK603+250

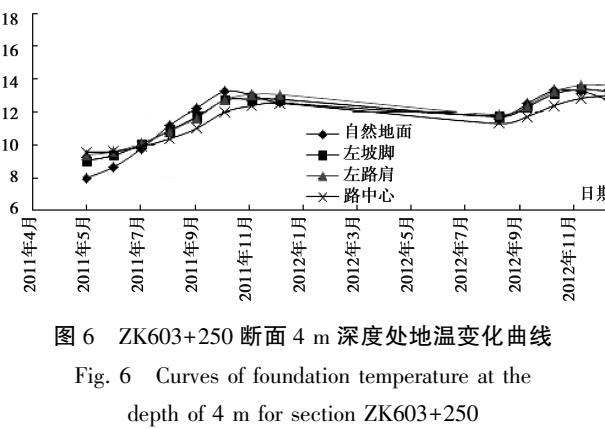


图 6 ZK603+250 断面 4 m 深度处地温变化曲线

Fig. 6 Curves of foundation temperature at the depth of 4 m for section ZK603+250

从图 4-图 8 可以看出,各监测孔地温随季节呈规律性波形变化,5~8 月份温度逐渐升高,最高温度出现在 8 月份;8~12 月份温度逐渐降低。在同一深度处,自然地面、左坡脚、左路肩与路中心地温波动幅度依次变小;随着深度的增加,地温波动幅度逐渐变小,坡脚、路肩和路中心地温波动幅度趋

于相同;在 6~8 m 深度范围内,各监测孔地温随季节变化曲线基本重合,路基的覆盖对地温已不存在影响,定义这一深度为地温年变化深度,年平均地温为 10.4~10.7℃。

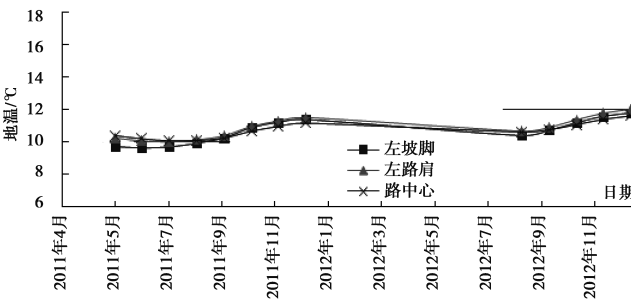


图 7 ZK603+250 断面 6 m 深度处地温变化曲线

Fig. 7 Curves of foundation temperature at the depth of 6 m for section ZK603+250

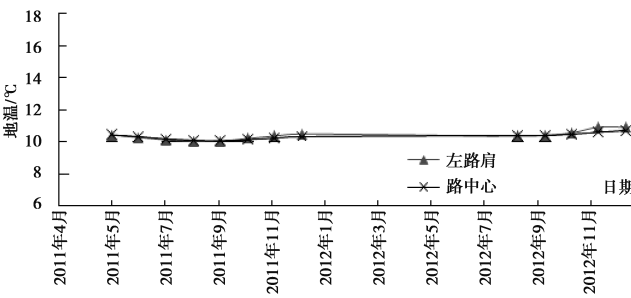


图 8 ZK603+250 断面 8 m 深度处地温变化曲线

Fig. 8 Curves of foundation temperature at the depth of 8 m for section ZK603+250

2.3 地基湿度场随时间与深度的分布特征

监测断面选择在 ZK603+250 路线左侧。监测要求:分别监测一年四个季度地基土的含水率变化;在雨季应增加监测频次,一周至少监测一组数据;雨水天气,应在当天和第二天取样测定地基土含水率。地基湿度场随时间与深度的分布特征见图 9。

2.3.1 地基土含水率随监测深度的变化规律

监测断面地表处(深度 0 m 处)含水率最低。分析其原因为:表层地基土含水率受大气环境影响较大,由于察尔汗盐湖日晒强烈,大风天气居多,空气比较干燥,造成地表处地基土含水率较低,从现场情况来看,地表覆盖一薄层盐壳。随监测深度的增加,大气造成的影响逐渐减弱,监测点地表下 0~1.0 m 深度范围内地基土含水率随深度的增加变化显著,地表下 0.5 m 深度处含水率变化出现拐

点,1.0~1.5 m 深度以后,含水率随深度的增加变化相对缓慢,趋于稳定(深度 2.0 m 处)。出现含水率变化拐点的原因是:钻探取样过程中发现,

ZK603+250 在地表 0.5 m 深度处存在 10 cm 厚密实的盐晶层,这部分盐晶层阻止了地表水和大气环境对下层地基土含水率的影响。

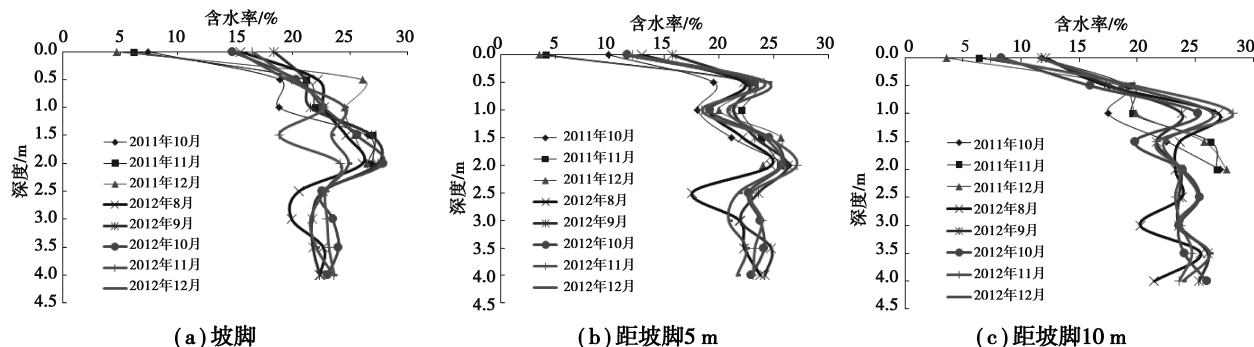


图9 ZK603+250 断面地基含水率随深度、时间变化曲线

Fig. 9 Curves of foundation moisture content under different depth and time for section ZK603+250

### 2.3.2 地基土含水率随季节的变化规律

季节的变化(气温、降水等)对地表下一定深度的地基土含水率也有着显著影响,ZK603+250 断面有效影响深度约为 2.0 m。有效影响深度以下,地基土含水率随季节变化不大,主要受地下水迁变的影响。从地下水位观测结果来看,察尔汗盐湖区地下水位高度 1.5~2.0 m。

### 2.3.3 地基土含水率与地基沉降量的关系

各月份同一监测深度处(0.5 m 深度以下)含水率变化值相对较小,未超过 3%。根据监测断面路基沉降监测结果,左路肩月沉降量一般为 0~2 mm,沉降量小,路基稳定。

## 3 结论

(1)上部路基改变了地基与大气之间的热交换环境,离路中心越近,温度受大气环境的影响越小;同一监测孔,地温梯度随季节呈现出随深度的增加而减小;

(2)5~8 月份为地基吸热过程,8~12 月份为地基放热过程。地温随深度变化的拐点位于原地表下 2.5 m 深度处,拐点以上深度地温受大气环境影响较大,拐点以下深度地温受大气环境影响较小,且随深度的增加这种影响逐渐减小;断面 ZK603+250 坡脚地温年变化深度为 6.0 m,年平均地温为 10.7℃;路肩和路中心地温年变化深度为 8.0 m,年平均地温为 10.4℃。年平均地温基本上不受路基高度的影响。

(3)季节的变化(气温、降水等)对地基土含水率的有效影响深度为 1.5~2.0 m。有效影响深度以下,地基土含水率随季节变化不大,主要受地下水迁变的影响。

### 参考文献 (References)

- [1] 中交第一公路勘察设计研究院,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,等.多年冻土地区路基稳定性技术研究[R].西安:中交第一公路勘察设计研究院,2006. (CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, et al. Research on subgrade stability technology in permafrost region[R]. Xi'an: CCCC First Highway Consultants Co. Ltd, 2006. (in Chinese))
- [2] 刘永智,吴青柏,张建民,等.高原多年冻土地区公路路基温度场现场实验研究[J].公路,2000(2):5-8. (Liu Yongzhi, Wu Qingbai, Zhang Jianmin, et al. Field experiment on temperature field for highway subgrade on plateau permafrost region[J]. Highway, 2000(2): 5-8. (in Chinese))
- [3] 汪双杰,李祝龙,章金钊,等.多年冻土地区公路修筑技术[M].北京:人民交通出版社,2008. (Wang Shuangjie, Li Zhulong, Zhang Jinzhao, et al. Highway construction technology in permafrost regions [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 章金钊,霍明,陈建兵.多年冻土地区公路路基稳定性技术问题与对策[M].北京:人民交通出版社,2008.

- (Zhang Jinzhao, Huo Ming, Chen Jianbin. Technology for highway subgrade stability in permafrost regions[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [5] 潘卫东,余绍水,贾海锋,等.青藏铁路沿线多年冻土区地温场变化规律[J].冰川冻土.2002,,24(6):774-779. (Pan Weidong, Yu Shaoshui, Jia Haifeng, et al. Variation of the ground temperature field in permafrost regions along the Qinghai-Tibetan railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2002, 24(6): 774-779. (in Chinese))
- [6] 梁波,刘德仁,张贵生.基于温度场的冻土路基变形数值分析及对比[J].地下空间与工程学报.2010,6(2):276-282. (Liang Bo, Liu Deren, Zhang Guisheng. Numerical analysis and contrast about permafrost subgrade deformation based on temperature field[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010,6(2):276-282. (in Chinese))
- [7] 金莹,刘琳.多年冻土区路基变形规律分析[J].地下空间与工程学报.2013,9(增刊1):1770-1776. (Jin Ying, Liu Lin. Analysis of embankment deformation law in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S1): 1770-1776. (in Chinese))
- [8] 陈义民,张喜发,张冬青,等.季冻区公路路基土有害毛细水上升高度综合试验研究[J].冰川冻土,2008,30(4):641-645. (Chen Yimin, Zhang Xifa, Zhang Dongqing, et al. An integrated experimental study water of highway subgrade in of harmful rising height of capillary seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008,30(4):641-645. (in Chinese))
- [9] 杨保,刘新荣,贺兴宏,等.盐渍土路基盐胀性试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):595-603. (Yang Baocun, Liu Xinrong, He Xinghong, et al. Test study on saline soil subgrade salt-frost deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(3):595-603. (in Chinese))
- [10] 包卫星,谢永利,杨晓华.天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J].工程地质学报,2006,14(03):380-384. (Bao Weixing, Xie Yongli, Yang Xiaohua. A laboratory test study on water and salt migration in natural saline soils and associated shear strength changes under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2006,14(03):380-384. (in Chinese))
- [11] 燕宪国.盐渍土水盐迁移特性与强度特征分析[J].公路工程与运输,2009,(202):93-98. (Yan Xianguo. Water and salt migration analysis of and strength characteristics saline soil[J]. Highway Engineering and Transportation, 2009,(202):93-98. (in Chinese))
- [12] 龙锦永,楚涌池.中国第一条盐湖铁路—青藏线察尔汗盐湖铁路[J].铁道工程学报,2005(增刊):167-172. (Long Jinyong, Chu Yongchi. First salt lake railway in China Qinghai to Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(Sup):167-172. (in Chinese))
- [13] 杨海容,蒋富强,王翔,等.青藏铁路察尔汗盐湖盐岩和盐溶工程地质特性及路基修筑技术[J].铁道工程学报,2005(增):373-378. (Yang Hairong, Jiang Fuqing, Wang Xiang, et al. Characteristics of salt rock and salt-dissolution engineering geology and subgrade construction in Chaerhan Salt Lake along Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(S):373-378. (in Chinese))
- [14] 隆威,刘永球,曹增国.青海察尔汗盐湖区氯(亚氯)盐渍土的工程性质分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程).2002(1):115-118. (Long Wei, Liu Yongqiu, Cao Zengguo. Analysis on the engineering properties of Chlorine or Sub Chlorine saline soil at Charhan Salt Lake in Qinghai [J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Digging Engineering). 2002(1): 115-118. (in Chinese))
- [15] 刘军勇,张留俊,张发如.察尔汗盐湖地区盐渍化软土地基处理技术研究[J].路基工程.2012,(01):115-117. (Liu Junyong, Zhang Liujun, Zhang Faru. Research on treating technology for salinized soft foundation in salt lake area in Qarhan [J]. Subgrade Engineering. 2012,(01):115-117. (in Chinese))