

准池铁路路基冻胀特性的试验研究

何宝华

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司,山西朔州 036002)

摘要:为探究准池铁路K44+970—K45+010路基的冻胀病害问题,通过现场调查、室内常规土性分析试验、毛细管上升高度试验,对该路段的冻胀发生条件进行分析。以初始含水率为变量,开展 -20°C 恒定冷端温度条件下的单向封闭系统冻胀特性试验。现场调查与室内试验结果表明:冻害路段位于高路堑地段,地下水位埋深为90 cm,路段周围汇水和下部地基蓄水条件良好,填料毛细管上升高度为70 cm,在冬季冻结锋面作用下地下水可以通过毛细水形式不断向上迁移至路基填料。冻胀特性试验表明:土样冻胀过程分为快速发展阶段、缓慢发展阶段和稳定阶段,初始含水率为10.6%和7.6%土样的最终冻胀量分别为5.6 mm和4.9 mm,冻胀率在7%左右,属于强冻胀敏感性土。冻胀量和冻胀率随初始含水率的增加而增大;而冻胀速率随初始含水率的增加而降低;水分重分布的峰值含水率与初始含水率呈正相关关系。冬季严寒天气下地下水在毛细作用下持续向路基填料补水是造成准池铁路路基冻害的主要原因。

关键词:路基;冻土;冻胀特性;冻胀量

中图分类号:U213.1⁺4

文献标识码:A

文章编号:1672—1144(2022)05—0160—06

Experimental Study on Frost Heaving Characteristics of the Embankment Filler of Jungar Banner-Shenchi Railway

HE Baohua

(National Energy Group Xinshuo Jungar Banner-Shenchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi 036002, China)

Abstract: In order to explore the frost heaving disease of K44+970—K45+010 of Jungar Banner-Shenchi Railway, the frost heaving conditions of this section were analyzed through field investigation, indoor conventional soil property analysis test and capillary rise height test. The frost heaving tests of unidirectional closed system under the condition of constant cold end temperature of -20°C was also carried out by taking the initial moisture content as the variable. The field investigation and indoor test results show that the frost damaged section is located in the high cutting section, and the buried depth of groundwater level is only 90 cm. The water catchment around the section and the water storage conditions of the lower foundation both facilitate the increase of moisture content of embankment filler, and the rising height of filler capillary is 70 cm. Under the action of freezing front in winter, groundwater can continuously migrate upward to embankment filler in the form of capillary water. The frost heaving tests show that the frost heaving process of soil samples is divided into rapid development stage, slow development stage and stable stage. The final frost heaving displacements of samples with initial moisture content of 10.6% and 7.6% were 5.6 mm and 4.9 mm respectively. The frost heaving rate is about 7%, which belongs to strong frost heaving sensitive soil. The frost heave displacement and frost rate both increase with the increase of initial moisture content, but the frost heaving rate decreases with the increase of initial moisture content. The peak water content after water redistribution is positively correlated with the initial water content. The main cause of this frost damage is the continuous replenishment of groundwater to embankment filler under the action of capillarity in severe cold weather during winter.

Keywords: embankment; frozen soil; frost heaving characteristics; frost heave displacement

土体冻胀是由于温度低于土中水冰点时部分原位水分冻结,同时未冻区水分在各种势梯度作用下向冻结前缘迁移、聚集并冻结膨胀所引起的^[1-3]。在中国寒冷与严寒气候地区,路基冻胀是铁路设计、建造及运营维护过程中需要重点预防和治理的病害之一。

对于路基填料冻胀性分类,叶阳升等^[4]提出以细粒含量、冻前含水量和冻胀高度为指标,建立包括冻胀敏感性和冻胀等级的两级分类方案,认为当块石类土、碎石类土、砾石类土等冻胀不敏感性土中的细粒含量超过30%时,对冻胀起作用的主要是细粒土。张以晨等^[5]通过封闭式冻胀模拟试验,揭示了公路路基中不同含泥量粗粒土冻胀等级的含水率界限值。土体冻胀研究还包括水热耦合迁移规律、冻胀机制、敏感性评价等内容^[6-8]。针对细粒土冻胀特性,彭丽云等^[9]、田亚护等^[10]进行了不同补水条件、冻结温度和外荷载条件对土中水迁移和冻胀的影响,认为水分迁移速率随着冷却温度的降低而逐渐增大,但冻胀率和冻结速率之间呈反比关系。对于冻胀不敏感的粗粒土,李安原等^[11]指出细粒土会增加粗粒土中薄膜水的含量和连续性,在一定的冻前含水量条件下仍会产生显著的冻胀量。上述研究逐步明确了填料的冻胀规律。

砂土中黏粒含量较少,保水性差,塑性小,其特殊之处在于毛细作用发达,在冻结过程中会表现出比其它土体更为显著的水分迁移积聚现象^[12-13]。相比常用的级配碎石填料和冻胀敏感性细粒土,目前关于砂土填料的研究相对较少。程培峰等^[14]通过观测东北某高速公路典型粉砂土填方路基的水、温状况发现,在温度梯度影响下,路基深度方向上的水分迁移积聚程度越往上层越显著。雷华阳等^[15]通过单向冻胀试验,分析了在水汽补给条件下冷端温度、干密度及初始含水率对中砂冻胀特性的影响。上述研究成果多针对粉砂和中砂,对于路基填料中常用的粗砂和砾砂冻胀特性研究还相对较少。

本文针对准池铁路某段含土砾砂路基的冻胀病害发生机理开展研究。首先通过现场勘探对路基填料、下部地基土性和地下水情况进行调查,并采集土样。然后开展路基填料的常规土性试验、毛细水上升试验,以及大尺寸单向冻胀试验,揭示含土砾砂填料的冻胀发生机理及变形特性,为准池铁路路基冻害整治提供参考。

1 准池铁路简介及路基冻害情况

1.1 冻害情况简介

准池铁路是中国内蒙古自治区和山西省之间的

一条运煤复线电气化铁路,北起大准铁路外西沟站,南至朔黄铁路神池南站,正线长度179.862 km,设计为I级双线自闭电气化重载铁路,于2015年9月15日开通运营。线路运营的区域主要在黄土高原中低山区、山前坡风积黄土高原区以及山间河谷区。准池铁路开通运营后,先后有十余处路段发生严重的路基冻害问题,影响线路安全、持续运营,成为铁路工务单位消耗很大的一项工作。

南草场工区K44+300—K45+100为双线路堑地段,两侧边坡高度约12.0 m,线间距4.0 m,路基面宽度11.7 m,路基两侧坡脚外侧1.1 m处设置0.4 m宽的排水沟和0.5 m宽电缆槽。电缆槽外侧距离堑坡坡脚3.3 m,如图1所示。其中,K44+970—K45+010的上、下行在2019年冬季的冻胀量达到20 mm以上,严重影响线路正常运营。



图1 准池铁路K44+300—K45+100双线路堑地段

1.2 路基填料基本物性条件

根据现场调查和地质勘探,病害路段处在沧头河支流的侵蚀堆积山间河谷地区。地表为第四系上更新统风积层砂质黄土,下部为白垩系上统泥质夹砂岩。由于处于堑坡底部,地表汇水和地下蓄水条件好,地下水位较浅,秋季枯水期地下水位深度约为0.9 m,含水层厚度一般为2.0 m~3.0 m,路基填料下部的补水条件好。

按照《土工试验方法标准》^[16](GB/T 50123—2019)的要求,针对现场挖取的路基填料进行室内基本土工试验测试。颗粒级配如图2所示,不均匀系数 $C_u=41.667$,曲率系数 $C_c=1.067$,最大粒径小于30 mm、大于2 mm的颗粒质量分数为44.3%,小于0.075 mm的颗粒质量分数为11.7%,为良好级配含土砾砂,属于B1组铁路路基填料。路肩表面的天然含水率为5.0%~6.0%之间。采用标准重型击实试验,击实筒直径为152 mm,试验结果如图3所示,最大干密度为2.24 g/cm³,最优含水率为7.6%,渗透系数范围为 2.6×10^{-2} cm/s~ 5.2×10^{-2} cm/s,属于中渗透性土。路基填料的冻结温度为-0.13℃。

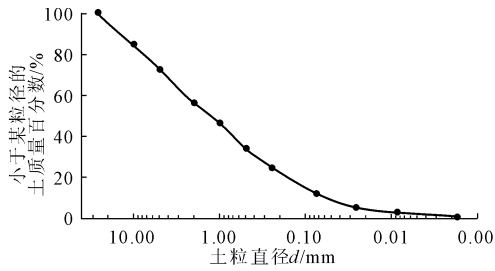


图 2 颗粒级配曲线

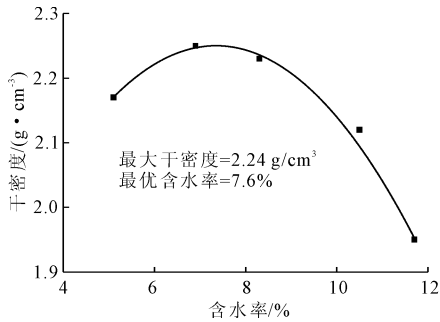


图 3 击实曲线

砂土中存在由相互贯通的微细构成的毛细管, 地下水面以上的土中水在与管壁的附着力和分子的应力作用下向反方向上升, 直到水分的重力和上升力平衡时停止, 此时水分上升高度称为毛细管上升高度。对于试样采用直接观测的方法, 试验过程如图 4 所示。试验结果如图 5 所示, 结果表明毛细管水上升高度约为 70 cm。根据现场测试, 路肩和路基中心的最大冻结深度分别达到 1.7 m 和 1.4 m。可见, 冻结锋面位于地下水毛细迁移范围以内, 交叉范围可达 0.6 m~0.9 m, 因此地下水在温度梯度和毛细水上升效应的综合作用下, 不断向上迁移至冻结区, 形成深层分凝冻胀, 这是 K44+970—K45+010 的上、下行路基冻胀的关键物源。



图 4 毛细管上升高度试验过程

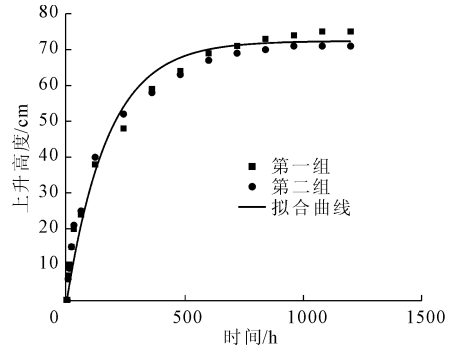
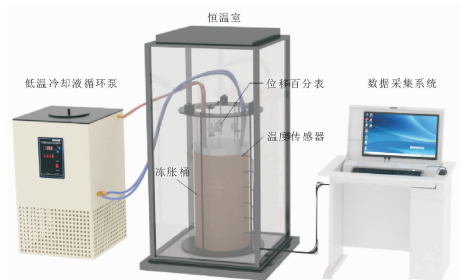


图 5 毛细管上升高度曲线

2 冻胀试验方案

2.1 试验装置

冻胀试验装置由低温冷却液循环泵、冻胀桶、冷浴盘、低温箱和监测设备组成, 各组成部分示意图如图 6 所示, 装置位于低温恒温室中。冻胀桶筒内尺寸为直径 30 cm、厚 2 cm、高 80 cm, 配套的试样顶板和底板为中空金属板, 外接低温恒温冷浴机, 金属板内部循环流通恒温冷冻液, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 用来控制试样顶端的冻结温度。低温恒温箱可以保持 0°C 左右的恒定环境温度。



(a) 试验系统示意图



(b) 实物图

图 6 冻胀试验仪器

土样温度监测系统包括 PT100 热敏铂电阻传感器和配套的 DATATAKE 数据采集仪, 传感器为 A 级精度等级, 温度监测范围为 $-200^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$, 精度为 0.15°C 。温度传感器通过测温孔插入土体中, 用

来监测土样内部变化状态。试样顶板上部设置3个电子位移表,每隔 120° 放置一个,冻胀量取三者的平均值,量程为 $0\text{ mm}\sim 50\text{ mm}$,精度为 0.001 mm 。用来监测土样在侧限和冻结、融化条件下垂直方向上的变形累积过程。试验过程中,冻胀桶外部用保温胶包裹,以减少试样和外界能量交换。

2.2 试验设计

根据现场路基填料密度测试,路基大部分深度范围内的天然压实度为 95% ,因此试样压实度设置为 95% 。根据工点基床结构设计条件,试样高度设置为 70 cm 。由于工点基床表层底部铺设了一层两布一膜复合土工膜,因此本文在假定现场施工质量可靠,对地下水封闭良好的前提下,首先开展封闭系统的冻胀试验,根据现场含水率测试情况,同时为和最优含水率形成对照组,试验变量选择最优含水率 7.6% 和 10.6% ,即增加 3% 的含水率。对于冷端温度的选取,冻害工点在冬季寒潮时地表平均温度可达 -20°C ,因此试验选取 -20°C 作为冷端温度。

2.3 试验步骤及方法

第一步:试样制备。以设计含水率为土料配制的控制指标,分别计算出试验设计方案中各试样所需填料质量和水的质量,拌和均匀后,闷料 24 h ,使水在土料中均匀分布。以压实度 95% 为试样填筑控制指标,计算所需土料的质量,分为 10 次压实,每次称取相应质量的土料并将其填筑到试样筒内,每层单独击实,达到要求高度后对接触面进行刮毛,然后继续下一层的压实,成型试样总高度 70 cm 。每组制备两个试样以进行平行试验。

第二步:试验设备安装。将试样筒连同顶部冷浴盘放置到低温恒温箱中,在试样顶部冷板上部安装电子位移传感器。将温度传感器通过试样筒侧壁的圆孔插入试样中。

第三步:土样冻胀试验。安装制备完毕的试样筒和装置各部件,关闭低温恒温箱箱门,调节试样顶板连接的低温恒温冷浴和低温恒温箱温度,检查正常无误后,开始冻胀试验。为模拟路基的单向冻结过程,冻胀试验分为恒温 and 冻结两个步骤。试样冻结开始前,先使试样在 $+1^{\circ}\text{C}$ 条件下恒温稳定,时间为 24 h 。然后,调节试样顶板温度为试验设计的负温(冷端冻结温度),底板温度保持 $+1^{\circ}\text{C}$ 不变,使土体自上而下单向冻结。实验过程中实时监测试样的温度变化和冻胀变形量,电子位移传感器和温度传感器的数据采集仪采集频率均为 5 min/次 ,冻结试验的时间为 75 h 。

第四步:试验结束后含水率分层测试。试验结束后,随即将试样分为 7 层,每层取 3 个试样,采用烘干法测定试样竖向含水率的分布情况。

3 试验结果及分析

3.1 土样冻胀量

图7为试样顶端冻胀变形量随时间的变化过程。可以看出,在 -20°C 冷端温度作用下,试样冻结过程可以分为:快速发展阶段,缓慢发展阶段,稳定阶段。原因是开始阶段试样土的温度梯度致使未冻水中形成水势梯度,土样孔隙水向冷端迁移,并在达到冻结温度时开始冻结成冰。顶部土体间孔隙中的水分结冰形成冰透镜体,试验结束时可以在土样顶部观察到明显的冰透镜体结构。冰透镜体产生膨胀变形趋势,由于下部为压实土体,遂向上临空面挤压产生冻胀现象,且冻胀量增长迅速。随着时间增加,冻结锋面下移,孔隙内形成的冰晶也会阻碍水分迁移,影响冰透镜体增加,使冻胀量增加缓慢。经过一定时间,随着试样中的未冻水分的减少,试样中水的相变热与散热形成新的动态热平衡,水分不再发生迁移,冻胀变形量也逐渐减小,最后达到稳定阶段。

初始含水率为 10.6% 和 7.6% 试样的最终冻胀量分别为 5.6 mm 和 4.9 mm ,可见冻胀量随着土样初始含水率的增加而增大。原因在于,初始含水率越高,水分在土样中的迁移量相对越大,分凝冰体积越大,最终导致形成的宏观冻胀量越大。

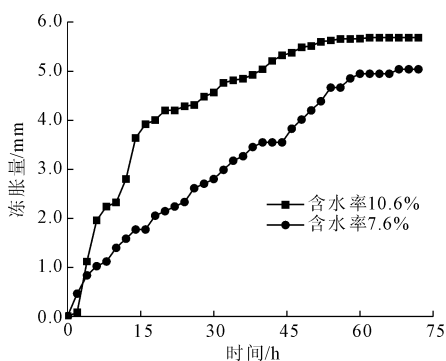


图7 不同含水率下土样的冻胀变形曲线

3.2 土样温度场及冻胀率

图8为试样不同高度处温度随时间的变化过程。可以看出,在初始时刻,经过冷浴盘和低温恒温箱的预冷处理,不同高度处的土体温度达到恒定值。试验开始后,试样上部土体温度首先开始降温,随着时间推移和冻结锋面的向下移动,土样下部温度也开始逐渐降低,温度从顶部到底部呈增加趋势。随

冻结时间增加,试样不同高度处温度均呈减小趋势。土样内部温度变化主要与水分冻结作用有关,随着冻结的发展,土样内部水分最终会达到稳态,且距离冷端越近的位置水分冻结效果越明显。同时,随着冻结的发展,同一深度处的温度降低幅度逐渐减小,最后稳定在一个温度值。此外,温度沿深度的分布还具有一定线性规律。

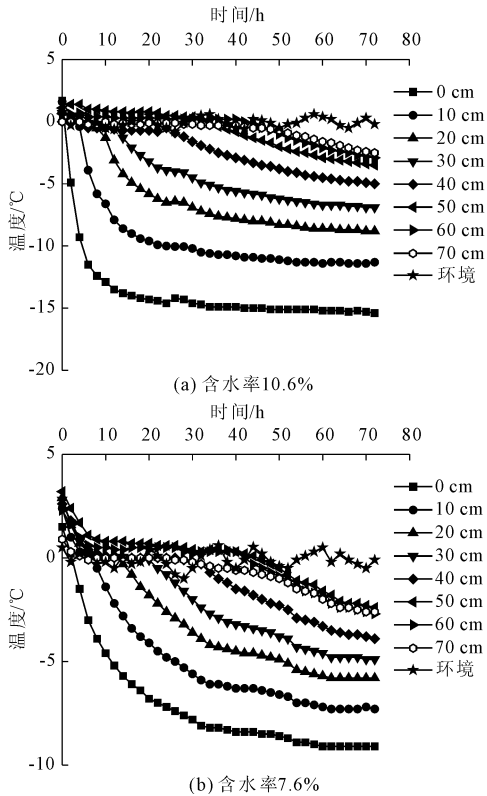


图 8 土样不同高度处温度随时间的变化

冻胀率为冻胀量与冻结高度的比值,冻胀速率为单位时间内冻胀量的增量,上述两个指标是描述土体冻胀特性的重要参数,计算方法分别为:

$$V_{\eta} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: V_{η} 为冻胀速率,mm/h; Δh 为冻胀量的变化量,mm; Δt 为时间增量,h。

$$\eta = \frac{\Delta h}{H} \quad (2)$$

式中: η 为冻胀率; Δh 为冻胀量,mm; H 为冻结高度,mm。

图 9 和图 10 为不同初始含水率土样冻胀率和冻胀速率随时间的变化过程。由图 9 可以看出,随着冻结的发展,冻胀速率均呈现先降低再稳定的趋势。土样初始含水率越低,最早达到稳定状态,原因在于土样含水率越低就越早迁移完毕。由图 10 可

以看出,由于冷端温度较低,试验开始后冻胀率很快进入到快速增长区,原因在于开始阶段冻结作用显著,冻胀量对冻胀率的影响相对较大。试验后期冻胀率曲线趋于平稳,原因在于冻胀量变化不明显,冻结高度对冻胀率的影响相对较大。综合图 9 和图 10 可见,在相同冷端温度和压实度条件下,土样冻胀率随土体初始含水率增加而增大,而冻结速率随土体初始含水率增加而降低。原因在于,土体初始含水率越高,未冻水在温度降低、释放相变潜热、冻结等过程所需的冷量越多,那么在相同的顶端冷源作用下,土体冻结速率越慢。

根据冻胀率计算结果,冻害工点路基填料的冻胀率在 7% 左右。根据《冻土工程地质勘察规范》^[17](GB 50324—2014)、《铁路特殊路基设计规范》^[18](TB 10035—2018)等规范建议,季节冻土按冻胀率分为不冻胀($\eta \leq 1\%$)、弱冻胀($1\% \leq \eta \leq 3.5\%$)、冻胀($3.5\% \leq \eta \leq 6\%$)、强冻胀($6\% \leq \eta \leq 12\%$)、特强冻胀($\eta \geq 12\%$)共 5 类。因此,本文所研究准池铁路路基冻害工点的填料为强冻胀性土。

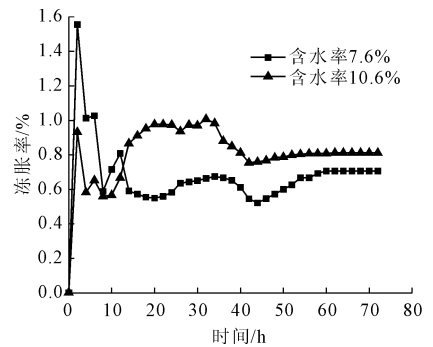


图 9 土样冻胀率随时间的变化曲线

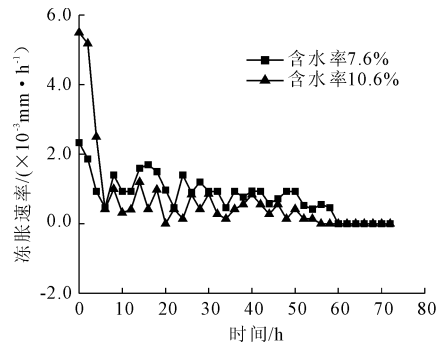


图 10 土样冻胀速率随时间的变化曲线

3.3 土样水分重分布特征

根据试验结束后的土样切割发现,在距冷端 2.0 cm~3.0 cm 高度处易产生冰透镜体,水分在此聚集相变成冰。图 11 为冻结试验结束后土样不同高度处含水率的重分布结果。可以看出,土样含水率随

着试样高度向下的增加,含水率呈现先增加、后减小的趋势。原因在于,冻结锋面处冰相的生成,使得吸力加强,促使水分向该处迁移,而土样冻结锋面形成后将阻断水分向冷端的迁移,故土样顶部在透镜体形成后,含水率变化较小。两种初始含水率土样均存在明显的含水率峰值,初始含水率为7.6%和10.6%试样的峰值含水率分别为15.9%和38.16%,相比初始含水率分别提高了2.1倍和3.6倍,可见峰值含水率增加幅度随初始含水率增加而增大。

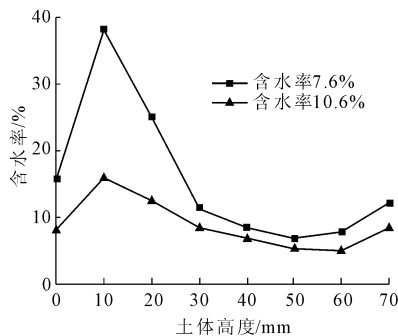


图11 土样不同高度处土体含水率重分布结果

3.4 冻害工点的冻胀发生机理分析

本文研究路基冻害工点位于淮池铁路里程K44+970—K45+010,地理位置位于山西省北部朔州市右玉县南草场村(经度112.348°,纬度40.011°)。对现场填料的测试发现,由于货运铁路路基设计标准低以及现场重载货运列车动应力对填料级配的改变,填料内部细颗粒含量逐渐增多,已变为具有较强冻胀敏感性的含土砾砂状态,这是该段路基产生冻害的第一个土质要素。该段路基属于深路堑,现场调查发现,路基两侧地表汇水条件好,每年秋季仍有可观的降水量,导致入冬时路基和下部地基均呈潮湿富水状态。钻孔勘探发现,路基下方地基为砂质黄土,本身具有较强的毛细水迁移能力,而且约2.0 m深处为一层隔水的泥质,10月份勘探时地下水位深度约为0.9 m,勘探孔壁面可见明显的微小径流,可见堑坡下方路基底部的补水条件良好,这是该段路基产生冻害的第二个水分要素。右玉县属于大陆季风气候,冬季严寒而漫长,历史最低气温在-30℃以下,现场测试发现工点路肩和路基中心的最大冻结深度可以分别达到1.7 m和1.4 m,且该地寒潮频次高、强度大,这是该段路基产生冻害的第三个温度要素。由此可见,冻害工点的冻胀发生机理为,在冬季严寒气候下路基内部冻结锋面与地下水位之间的距离保持在有效毛细水上升高度以内,冻胀敏感

性路基填料在毛细水迁移的持续补给作用下保持较高的含水率水平,水变冰的体积膨胀效应使得路基整体表现出严重的冻胀病害。

4 结论

本文针对淮池铁路存在冻胀病害的K44+970—K45+010段路段开展了现场调查、室内土性试验和冻胀特性试验,揭示路基冻胀机理,主要结论如下:

(1) 冻害路段的地下水位埋深仅0.9 m,含水层厚2.0 m~3.0 m,路基补水条件良好。路基填料为含土砾砂,属于B1组路基填料,渗透系数范围为 $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 5.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,属于中渗透性土,毛细管水上升高度约为70 cm。路肩和路基中心的最大冻结深度分别达到1.7 m和1.4 m。因此在冬季冻结锋面向下移动过程中,地下水可以通过毛细水上升作用向上不断迁移,从而在冬季造成了K44+970—K45+010的上、下行路基冻胀。

(2) 路基填料冻胀试验表明,在冷端温度-20℃恒定的条件下,土样的冻胀量、冻胀率与土体初始含水率均呈正相关关系,而冻结速率与土体初始含水率呈负相关关系。试样冻结过程可以分为快速发展阶段、缓慢发展阶段、稳定阶段。试样在冻胀过程中沿高度方向会发生水分重分布,峰值含水率增加幅度随初始含水率的增加而增大。初始含水率为10.6%和7.6%试样的最终冻胀量分别为5.6 mm和4.9 mm,属于强冻胀敏感性填料。

(3) 研究工点路基的冻胀机理为路基填料本身属于强冻胀敏感性填料,而路段位于堑坡地段,周围汇水与路基下部地基蓄水条件良好,所处地区冬季温度低且持续时间长,由此在土质、水分和温度三要素的共同作用下发生冻胀病害。

参考文献:

- [1] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等.土的冻结作用与地基[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 徐学祖.中国冻胀研究进展[J].地球科学进展,1994,9(5):13-19.
- [3] 武文娟.寒区交通工程冻土问题的研究要点与综述[J].水利与建筑工程学报,2021,19(5):92-98.
- [4] 叶阳升,王仲锦,程爱君,等.路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J].中国铁道科学,2007,28(1):1-7.
- [5] 张以晨,李欣,张喜发,等.季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性分类研究[J].岩土工程学报,2007,29(10):1522-1526.