

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0030-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.007

土体温度光纤精细化监测室内试验研究

严建强¹, 余湘娟¹, 朱少华², 罗常青³, 高磊¹, 马驷⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 江苏苏州地质工程勘察院, 江苏苏州 215129;
3. 中国能源建设集团东北电力第一工程有限公司, 辽宁沈阳 110179; 4. 捷通技术服务有限公司, 广州 510000)

摘要: 传统温度传感器在测量地下土体温度时存在耐腐蚀性差、易受电磁干扰、易被破坏等不足, 难以准确和全面地掌握土体温度的长期变化。通过对比分析常用的几种分布式光纤测温技术, 提出采用光频域反射技术来监测地下土体温度。根据光频域反射技术高精度和高空间分辨率的特征, 给出了土体温度光纤精细化监测的布设方案和监测数据的分析思路。为了验证光频域反射技术在土体温度监测方面的优势和可行性, 开展了土体温度室内模拟监测试验, 设计出了一套土体温度光纤精细化测温装置, 采用光频域反射技术对不同容器内的土体和水体温度进行监测, 掌握了土体和水体温度的变化情况, 并与传统测温方法进行了对比, 结果表明, 光纤测得的土体温度结果与传统方法得到的结果基本一致, 但光纤测温可以实现分布式测量, 相对于传统方法优势显著, 对于土体温度精细化测量而言, 取得了良好的成果。

关键词: 土体温度; 光频域反射技术; 光纤; 精细化; 温度试验

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Laboratory study on underground soil temperature monitoring based on OFDR

YAN JianQiang¹, YU Xiangjuan¹, ZHU Shaohua², LUO Changqing³, GAO Lei¹, MA Yuan⁴

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Jiang Su Suzhou Geological Engineering Investigation Institute, Suzhou, 215129;
3.China Energy Engineering Group Northeast No. 1 Electric Power Construction Co. Ltd. Shenyang, 110179;
4.GTL Technology& Service Co. Ltd)

Abstract: The traditional temperature sensor has some shortcomings in measuring the temperature of underground soil, such as poor corrosion resistance, vulnerable to electromagnetic interference and easy to be damaged. It is difficult to accurately and comprehensively obtain the long-term variation of soil temperature. In this paper, several distributed optical fiber temperature measurement techniques are compared and analyzed. It is proposed to use optical frequency domain reflection technology to monitor the temperature of underground soil. According to the characteristics of high precision and high spatial resolution of optical frequency domain reflection technology, the detailed monitoring scheme of optic fiber and the analysis of monitoring data are presented. In order to verify the advantages and feasibility of optical frequency domain reflectance technology in soil temperature monitoring, an indoor simulation monitoring test of soil temperature is carried out, and a set of fine temperature measurement device of soil temperature using optic fiber is designed. The optical frequency domain reflectance technology is used to monitor the temperature of soil and water in different containers. It shows that the result of optic fiber is basically consistent with the result obtained from the traditional method, but the distributed

收稿日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508159); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151495); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016B20214, 2016B06114)

作者简介: 严建强(1993-), 男, 福建三明人, 硕士研究生, 主要从事光纤监测方面的研究。

measurement can be realized by the optical fiber temperature measurement. It is remarkable compared with the traditional method. The good result of the soil temperature measurement is achieved.

Key words: soil temperature; optical frequency domain reflection technology; optical fiber; refinement; temperature test

土体温度作为土体的物理性质之一, 它可作为衡量地下土体含热量的指标, 参与地下土体的能量交换与传递^[1]。目前, 对于监测地下土体温度的传感器, 有热电偶、热敏电阻、水银温度计等, 但它们都是金属类传感器, 且为点式传感器, 都存在着测量精度低、现场布线困难、易受电磁干扰、易被破坏等缺陷, 不适用于大范围、长距离、大面积的地下土体温度的长期监测^[2]。

分布式光纤测温技术是一种可实时和高效监测空间温度场的新型传感监测技术, 通过光纤这一集传输与传感于一体的介质, 实现了对温度的分布式、长距离、全方位连续测量^[3-4]; 目前, 用于监测物体温度的精确测量方法有: BOTDR、ROTDR、BOFDA 以及 FBG 等光纤传感技术^[5-11]。但它们存在或测量精度较低, 或测量时间长, 或传感器单价高等缺点。因此, 本文根据光频域反射技术 (OFDR) 能够实现分布式测量、测量空间分辨率高、可对数据实时监测采集以及造价相对较低等优点, 提出应用光频域反射技术对地下土体温度进行监测, 并给出地下土体温度光纤监测布设方案和监测数据后处理思路, 最后开展了室内模拟试验, 设计了光纤测温装置, 应用光时域反射技术对地下土体温度进行监测。

1 光频域反射技术原理

光频域反射计由迈克尔逊干涉仪结构、光电探测器、线性扫频光源以及频谱仪 (或信号处理单元) 等组成, 线性扫描光源发出的光, 被分成两束光, 一束进入参考臂, 另一束进入被测光纤; 进入参考臂方向的光信号称为本振光信号, 和被测光纤中的背向瑞利散射光信号干涉, 之后由探测器接收经干涉的拍频信号。探测器接收到的拍频信号大小与被测光纤长短相关联。光频域反射技术在某个时刻通过探测器探测到的由本振光信号与背向瑞利散射光信号干涉后的光信号; 光信号的频率大小和它散射点的位置成正比关系。为了用光纤对温度实现空间分布式测量, 可根据光电探测器发出的光电频率来定位待测光纤的位置^[12]。若信号光和参考光都满足

干涉条件, 两者便在光电探测器上发生混频。信号光和参考光的光程差产生拍频信号, 最后根据光电探测器发出的光电频率来确定待测光纤的位置^[13-16]。

2 光纤布设方案

由于地下土体处于三维空间中, 具有面积和体积相对较大、距离相对较长等特点, 必须针对不同情况, 制定不同的地下土体温度光纤传感器铺设方案。在监测一维和二维方向的地下土体温度时, 光纤可按直线或网状形式光纤铺设, 一维情况下, 将光纤放入密封保护好的圆形保护管内; 二维情况下, 把密封保护好的光纤粘贴在土工网状织物上, 直立或平放入所要监测的地下土层中; 在监测三维空间立体方向的地下土体温度时, 光纤传感器的布设方案与二维相仿, 具体布设方案如图 1 所示; 但因为三维地下空间情况复杂, 光纤布设较为困难, 目前工程实例中应用的相对较少^[17]。

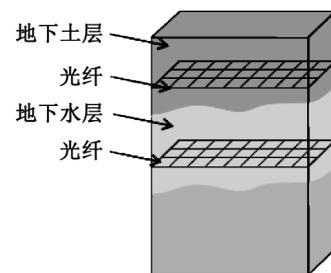


图 1 光纤传感器布设方案图

Fig. 1 Layout plan of Fiber optic sensor

3 数据分析思路

光频域反射技术拥有多测点、长测距、高动态范围、高空间分辨率以及实时采样等优点, 必然会产生巨大的监测数据量, 为了能更加有效地获取土体温度的分布, 可以把所有的光纤监测数据组成一个时空矩阵 N , 假定光纤沿线采点总数为 m , 采样总次数为 n , 则 m 行 n 列数据组成了一个二维矩阵 N , OFDR 信息采集系统在第 i 次采集数据时, 光纤上第 j 个监测点的位置的地下土体温度的数值可表

示为 b_{ij} 。在地下土体空间里分布着测温光纤传感器,其所在位置的空间坐标与地下土体的空间坐标是相互关联的,当二者空间坐标确定时,便能精确测得地下土体某一位置的土体温度;但在三维空间布设的光纤测量地下土体温度时,经常会遇见光纤交错重叠的情况,可采取以下办法来确定交错重叠处坐标和该点对应的土体温度:以水平面坐标为 $(0, 0, 0)$,则地下土体空间某点坐标可定义为 $(-x, -y, -z)$,同时可定义坐标与温度 T 、时间 S 的关系为函数 V ,则:

三维的空间立体铺设函数:

$$V = (-x, -y, -z, T, S) \quad (1)$$

在空间铺设时,光纤交错处的土体温度为:

$$T = (T_1 + T_2 + T_3) / 3 \quad (2)$$

4 室内模拟试验

为将 OFDR 技术对地下土体温度进行监测,开展了基于 OFDR 技术的室内模拟试验。

根据光频域反射技术(OFDR)具有分布式测量、测量空间分辨率高、可对数据实时监测采集等优点,本试验采用基于 OFDR 技术的 Luna OBR 4600 背光反射计,通过布设于土体中的光纤温度传感器,获取土体温度变化数据。Luna OBR 4600 具有测试精度高、便捷、容易定位等优点,同时拥有测量 30 m, 10 μm 分辨率的时间小于 7 sec,连续测量 1 m 段最高为 3 Hz,可分布式监测温度和应变分布等特性。

本次设计了一套土体温度光纤精细化测温装置,首先取 6 个相同的圆形玻璃容器,依次贴上编号 1、2、3、4、5、6,将编号为 1—5 的容器盛着相同质量的水,将编号为 6 的容器里盛着土并放入恒温箱内,调至指定温度加热一段时间,将水银温度计分别放入编号为 1—5 的容器中,用水银温度计来对每个玻璃容器的水温变化进行监测;将光纤传感器放入编号为 1—5 号盛着水的容器和 6 号盛着土的容器,并将光纤一端与 OFDR 光纤数据采集仪(OBR4600)相连,用于监测 6 个容器中的水温和土体温度;最后将水银温度计与光纤传感器所测温度进行对比,试验模拟装置如图 2。

在室内模拟试验过程中,由于用光纤传感器对 6 个容器的水温和土体温度监测数据较多,本文选取了 1—5 号容器水温变化为 46 $^{\circ}\text{C}$ 、37 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、31 $^{\circ}\text{C}$ 、42 $^{\circ}\text{C}$ 和 6 号容器土体经恒温箱第一次加热后

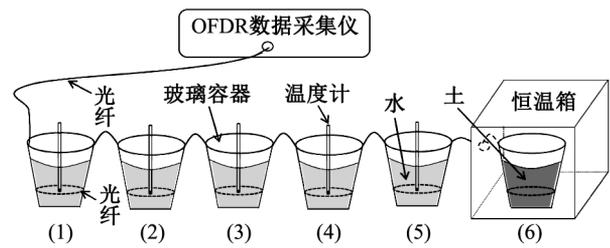


图 2 室内模拟试验装置

Fig. 2 Indoor simulation test device

的温度作为第一次测量结果;1—5 号容器水温变化为 45 $^{\circ}\text{C}$ 、36 $^{\circ}\text{C}$ 、29 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 和 6 号容器土体经恒温箱第二次加热后的温度作为第二次测量结果;以及 1—5 号容器水温变化为 37 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 、26 $^{\circ}\text{C}$ 、35 $^{\circ}\text{C}$ 和 6 号容器土体经恒温箱第三次加热后的温度作为第三次测量结果。

本试验将水银温度计测得的 1—5 号容器中水温变化,与光纤传感器测得的 1—5 号容器中的水温变化数据进行对比,同时采用光纤传感器对 6 号容器经恒温箱加热后的土体温度进行监测,以此来验证光纤传感器监测结果的可靠性及 OFDR 技术对土体和水体温度精细化监测的可行性。

图 3(a) 为上述第一次水银温度计测温结果对应的光纤第一次监测结果图,其上方 1—5 号为对应的水银温度计监测的水温。图 3(b) 为采用 OFDR 光纤数据采集仪监测到的 3 号容器温度变化曲线,曲线图由下到上对应的标识温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、29 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、33 $^{\circ}\text{C}$ 、35 $^{\circ}\text{C}$ 、38 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 为 3 号容器水银温度计监测的温度情况。由图 3(a)、(b) 可知,OFDR 光纤数据采集仪监测的温度随着实际温度的升高而逐渐增大,但 OFDR 光纤数据采集仪所测得温度高于实际温度,同时从图中可以看出,由于在容器内的光纤采用螺旋形布设,存在弯曲,影响到光纤测得温度曲线的波动。

选取位于 10.25 m 和 10.5 m 点处的测量温度,则图 3(c) 为光纤监测的温度与实际温度的变化曲线。

对图 3(c) 中所示的结果进行线性拟合,由此可得光纤监测的温度与实际温度的变化关系为:

$$T_m = 2.942 * T_a - 27.321 \quad (3)$$

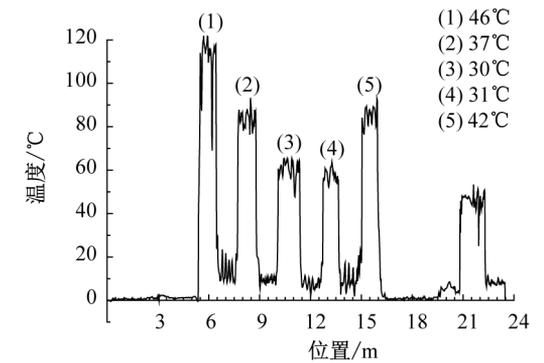
式中: T_m 为光纤监测的温度, T_a 为实际温度。

据图 3(a)、(b) 可知,OFDR 光纤数据采集仪所监测到的温度比实际温度高,但由于光纤监测的温度变化与实际温度变化呈线性关系,由此可用上式来校正 OFDR 光纤数据采集仪所监测到的温度。

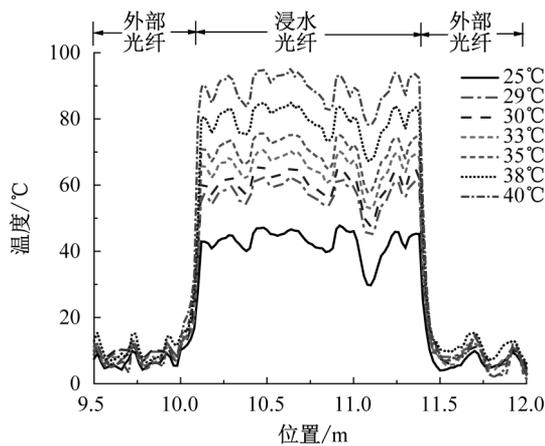
通过测试对容器内的水体温度进行调整,模拟

测试了3次温度变化，光纤传感器监测结果如图4所示。图4表示第一、二、三次监测修正后的结果，将各容器中浸没在水下的光纤全部监测数据均值作为容器内光纤的测温结果，即如图4中三次监测结果图的水平段。结果显示，光纤传感器随着土体和水体温度的改变而变化，可以准确地测量出不同容器内的水体和土体温度，其所监测到的温度大于实际温度，是因为本次采用的是OFDR技术，其测试精度较高，对温度变化非常敏感。

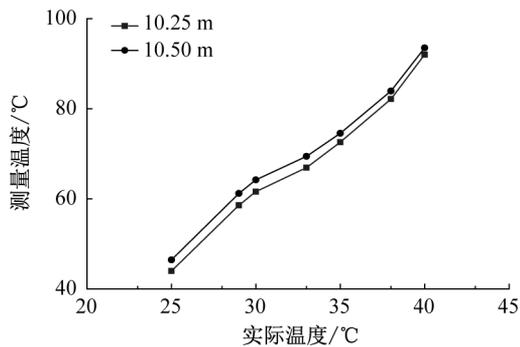
根据图3(c)知，光纤监测的温度变化与实际温



(a) 光纤第一次测温结果图



(b) 3号容器不同光纤位置所测的温度变化



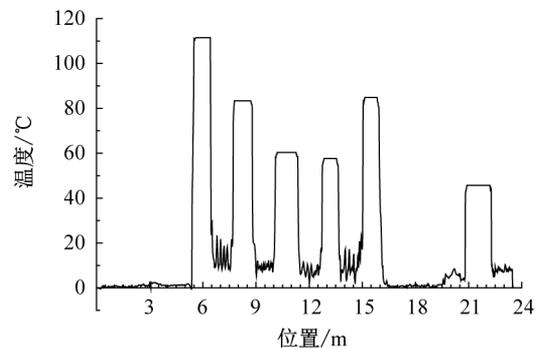
(c) 光纤位置测量温度随实际温度的变化

图3 基于OFDR的温度变化监测图

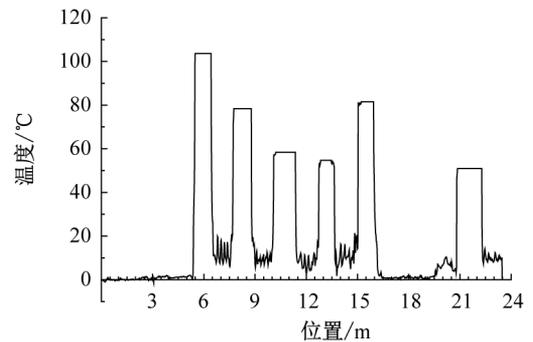
Fig.3 Temperature change measured by OFDR technology

度变化呈线性关系，因此用式(3)来校正图4所示的OFDR光纤数据采集仪所监测到的温度。图5为3次光纤温度传感器测温经式(3)校核过的结果与水银温度计测温结果对比图。

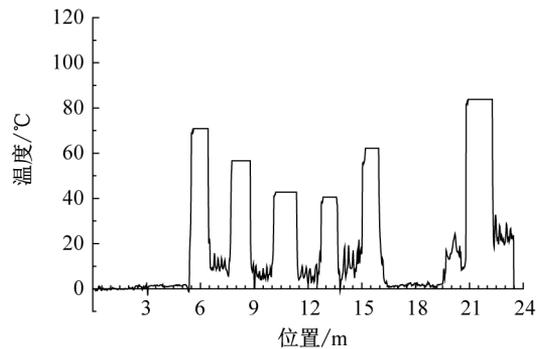
由图5可知，光纤传感器的监测温度和实际温度的变化规律基本一致，并且两种测温结果误差均在10%以内。由于土体升温慢，恒温箱的温度不可作为恒温箱内土体的温度，可以通过OFDR光纤数据采集仪所监测到的温度，应用式(3)校核来计算土体实际温度。本文将浸没在土体中光纤的全部监测数据均值作为光纤监测的土体温度结果，即如图4中三次监测结果图中第5个波峰的水平段，土体实际温度计算结果如表1。



(a) 第一次测温结果



(b) 第二次测温结果



(c) 第三次测温结果

图4 光纤测温结果图

Fig.4 Temperature measurement results of optical fiber

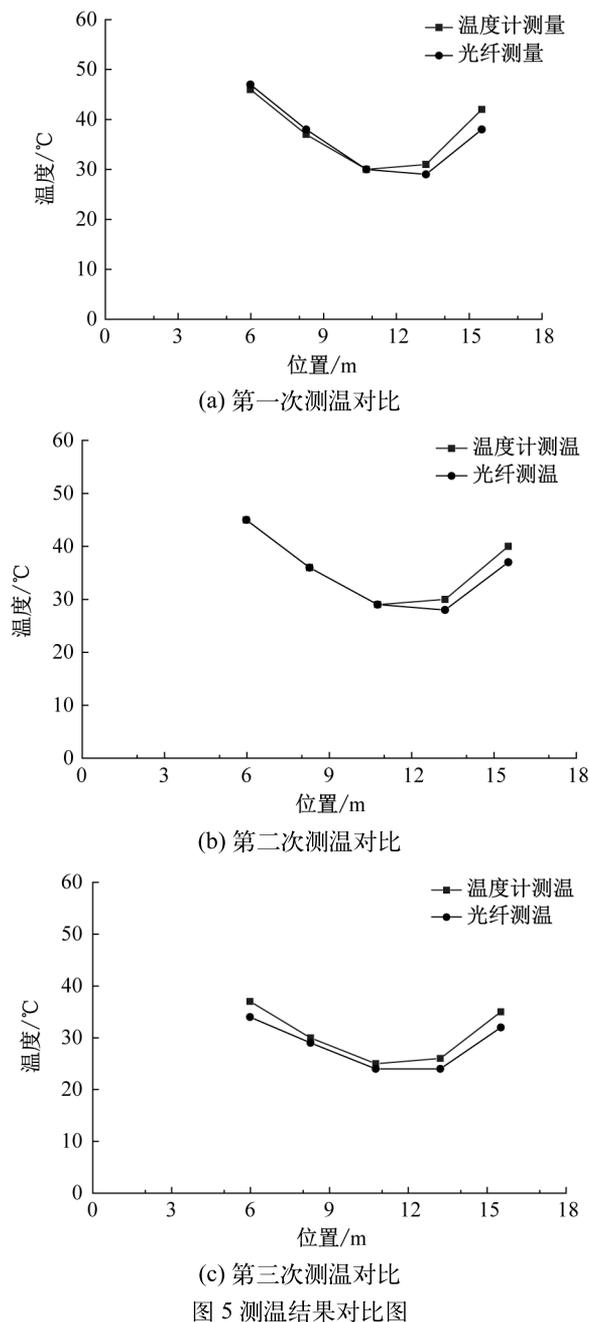


图5 测温结果对比图

Fig.5 Comparison of temperature measurement results

经过以上模拟试验结果分析可得,用光纤传感器监测6个容器水体和土体温度,能精细化地反映水体和土体温度的温度变化,说明OFDR技术能应用于地下土体温度的精细化监测。

5 结语

1) 本文通过对光纤传感器在一维、二维条件下的布设方案的研究分析,提出了光纤传感器用于监测土体温度的三维布设方案。

2) OFDR技术监测到的温度比实际温度高,通

表1 光纤监测土体温度表

Tab.1 Monitoring soil temperature by fiber optic

监测次数	光纤监测温度/°C	校核后温度/°C
第一次监测	46	25
第二次监测	51	27
第三次监测	84	38

过对光纤监测的温度与实际温度进行线性拟合,提出了温度校核公式,采用该公式校核得到的温度与实际温度间误差在10%以内,达到土体温度监测要求,验证了OFDR技术用于地下土体温度监测的可靠性。

参考文献:

- [1] 吴志伟, 宋汉周. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 733-740.
- [2] 陈立军, 李海波, 吴谦, 等. 分布式光纤测温技术研究现状及发展趋势[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(12): 1-4.
- [3] ZHAO Yong, DENG Zequn, WANG Qi. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement[J]. Sensors & Actuators: B: Chemical, 2014, 192: 229-233.
- [4] 董林翰, 曲方. 分布式光纤测温技术在浮顶储油罐火灾监测中的应用[J]. 科技通报, 2018, 34(4): 209-213.
- [5] 张勇, 魏广庆, 施斌, 等. 基于BOTDR的传感光纤温度效应研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10): 929-934.
- [6] 高磊, 龚云皓, 余彦杰, 等. 基于布里渊散射光时域反射测量技术的分布式光纤测斜管研发与应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 81-85.
- [7] 宋占璞, 张丹, 方海东, 等. 大体积混凝土水化热温度变化光纤监测技术研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 244-249.
- [8] 高磊, 陈晖东, 余湘娟, 等. 岩土与地质工程中分布式光纤传感技术研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 93-99.
- [9] 曹鼎峰, 施斌, 严珺凡, 等. BOFDA技术综述及用于岩土工程监测的可行性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33: 132-137.
- [10] 刘泉声, 王俊涛, 肖龙鹤, 等. OFDR光纤传感技术在十字岩柱暗挖法物理模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1063-1075.
- [11] VORATHIN E, HAFIZI Z M, AIZZUDDIN A M, et al. A natural rubber diaphragm based (下转第39页)

一定程度上提升石灰和水玻璃改良土的抗冲蚀性能,主要原因是,水玻璃通过自身物理脱水生成的脱水硅酸凝胶能够起到填充孔隙,胶结粉土颗粒的作用,但是脱水硅酸凝胶容易吸水膨胀甚至溶解,因此增加水玻璃掺量仅能在较小程度上提升石灰和水玻璃改良土的抗冲蚀性能。

3 结论

1) 在1%的石灰掺量时,改良土的水稳定性极差,浸水24h后完全崩解,提高石灰掺量或水玻璃掺量均能提升粉土的水稳定性,增加石灰掺量对粉土水稳定性的提高更加显著。浸水养护对石灰改良土的强度增长有抑制作用,而对于石灰和水玻璃改良土的强度增长有促进作用。

2) 石灰掺量相同时,水玻璃掺量越高,石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率越快,水玻璃掺量一定时,石灰掺量越高,石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率先减小后增大;3%石灰+1%水玻璃改良土的毛细作用略弱于5%石灰改良土。

3) 在1%的石灰掺量时,改良土的抗冲蚀性能较差,试样冲蚀4h后破坏较为严重,提高石灰掺量能有效提升土体的抗冲蚀性能;3%石灰+1%水玻璃和3%石灰+3%水玻璃改良土的抗冲蚀性能略优于5%石灰改良土。

参考文献:

[1] 朱志铎. 粉土路基稳定理论与工程应用技术研究 [D].

南京: 东南大学, 2006.

[2] 尚新鸿. 低液限粉性土作为路基填料的改良试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.

[3] 陈燕, 魏宏超, 徐鹏. 高速铁路粉土路基改良试验研究 [J]. 安全与环境工程, 2011, 18(3): 126-128.

[4] JOHN L, CHU Z Y, PETER D, et al. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009: 57-63.

[5] ALI K, ASGHAR G V, FARSHAD R. Quantitative assessment of parameters that affect strength development in alkali activated fly ash binders[J]. Construction and Building Materials, 2015(5): 869-876.

[6] JOHANNA M, MEJIA E R, RUBY M D G, et al. Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(5): 346-352.

[7] 虞跃, 陈廷方, 张俊. 水玻璃改良普格达土物理力学性质的试验研究 [J]. 路基工程, 2010, 7(2): 84-85.

[8] 姜冲. 水玻璃改良低液限粉土强度特性的试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2017.

[9] 张明. 水泥加固土工程性质的试验研究与分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2001.

[10] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 碳酸钙-酸性水玻璃注浆材料对比试验 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(6): 2305-2312.

[11] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2829-2834.

(责任编辑 王利君)

(上接第34页)

transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 8-13.

[12] 于海鹰, 李琪, 索琳, 等. 分布式光纤测温技术综述 [J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 90-94.

[13] 杜阳. 基于OFDR的分布式光纤多参量传感方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.

[14] 卢荣华. 基于OFDR的分布式光纤振动传感器的数据采集与分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.

[15] LI Jiong, GAN Jiulin, ZHANG Zhishen, et al. High spatial resolution distributed fiber strain sensor based on phase-OFDR[J]. Optics express, 2017, 25(22): 27913-27922.

[16] FAUSTOV A V, GUSAROV A V, MEGRET P, et al. Application of phosphate doped fibers for OFDR dosimetry[J]. Results in Physics, 2016(6): 86-87.

[17] 傅翼. 海底管道分布式光纤传感系统布设方案研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

(责任编辑 王利君)