

膨胀土-光纤界面力学性质试验

徐洪钟, 孙义杰, 权政, 顾鹏, 李雪红

(南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:通过室内光纤拉拔试验,分别研究不同影响因素(土体干密度、土体含水量和土体上覆压力)下膨胀土-光纤界面的力学特性。试验结果表明,各组膨胀土光纤界面的位移-拉力曲线具有相似的规律,即拉力随位移先线性增大至峰值,然后逐步降低,最后趋于稳定。基于描述光纤-膨胀土界面位移-拉力的3段式拉拔模型分析得出,在相同条件下,光纤土体界面剪切强度与土体干密度、上覆压力成正相关,与土体含水率成负相关。

关键词:光纤;膨胀土;界面力学;变形监测

中图分类号:P642.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2018)05-0048-05

Experimental study on mechanical properties of interface between expansive soil and optical fiber//XU Hongzhong, SUN Yijie, QUAN Zheng, GU Peng, LI XueHong (College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: A series of laboratory pullout tests on the sensing optical fiber embedded in expansive soil were performed to study the impacts of three factors on soil-fiber interfacial mechanical properties, including dry density of soil, water content and overburden pressure. It is found that the displacement-pullout force curves under different test conditions have the similar rules. The pullout force increases linearly with the pullout displacement to the maximum value, then decreases gradually and finally tends to the residual value. The optical-soil interfacial mechanical characteristics are analyzed based on a tri-linear pullout model. The shear strength of fiber soil interface is positively correlated with soil dry density and soil overburden pressure but is negatively related to soil moisture content. The study results will provide references for the further application of fiber optic sensing to expansive soil deformation monitoring in geotechnical engineering.

Key words: optical fiber; expansive soil; interfacial mechanics; deformation monitoring

随着我国经济的快速发展,各类基础工程建设的数量和规模都发展迅猛。但与此同时,大量工程灾害事故也频繁发生,如山体滑坡、基坑坍塌、房屋倒塌等,造成巨大的人员伤亡和经济损失^[1]。如何进行及时和有效的监测,已成为现代岩土工程领域重要的课题之一^[2]。工程监测一般由传感器系统、数据采集及分析系统、监控中心等各种软硬件组成。其中传感器系统一般指的是感知元件及其组合布置。常规的传感器包括差动电阻式、钢弦式、电感式和电阻应变计式等。尽管上述传感器已取得了广泛应用,但它们普遍存在稳定性和耐久性不足的问题,愈来愈难以符合现代岩土工程的监测要求^[3]。近些年兴起的光纤传感器作为一种新型的工程监测技

术,具有耐久性好、分布范围广和长期稳定等优点,可以有效弥补传统测量技术的不足^[4]。

国内外学者对光纤传感器在岩土工程中的应用,已开展了大量的研究工作。Miyagawa等^[5]结合光纤传感技术研发了一套边坡倒塌预报系统,并对日本某地区发生的滑坡成功进行了预报。施斌等^[6]将布里渊散射光时域反射(BOTDR)技术应用到南京鼓楼西隧道的监测中,并考虑了隧道内温度、震动等环境因素的影响。Mohamad等^[7]采用光纤传感技术进行基坑连续墙变形监测,测试结果与传统测试结果相近。张丹等^[8]基于光纤光栅技术(FBG)测量土体变形,监测了膨胀土失水开裂过程。王宏宪等^[9]基于布里渊光时域分析(BOTDA)技术,

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41702315);江苏省自然科学基金青年基金(BK20160997);江苏省高等学校自然科学基金面上项目(16KJB410001)

作者简介:徐洪钟(1974—),男,教授,博士,主要从事环境岩土工程检测与监测研究。E-mail: hzhxu@163.com

通信作者:孙义杰(1988—),男,讲师,博士,主要从事岩土工程监测研究。E-mail: 061152031@163.com

研究膨胀土在干湿循环中应变和裂缝发展情况,有效地确定了裂缝发育位置。Lienhart 等^[10]将光纤传感技术应用于奥地利南部某滑坡的长期监测中,数据与全站仪等传统方法测试结果较吻合。徐洪钟等^[11]设计了素膨胀土和纤维加筋膨胀土的干湿循环对比试验,采用 BOTDA 技术获取了土体内部应变的变化,检验了纤维加筋抑制膨胀土变形的效果。

各类工程实践和试验研究表明,光纤应变传感器与被测物间的变形协调性会对监测结果有影响^[12-15],而由于土体具有结构疏松、模量低、不均匀、大变形等特点,传感器-土体间的变形耦合性问题将尤为突出。为此部分学者已开展了相关工作,如张勇等^[16]研究了复杂变形下光纤土体间的应力应变传递规律,余骏宽等^[17]研究了不同光纤-砂土界面力学特性,Zhang 等^[18-19]建立了光纤-砂土作用力学模型。但目前对多因素影响下的光纤-土体相互作用机制和界面的应力应变传递规律等仍缺乏很好的认识。本文重点研究了膨胀土-光纤界面力学性质,基于拉伸试验数据,提出了膨胀土-光纤界面的位移-拉力模型,定量分析了土体干密度、含水量和上覆压力三因素对土-光纤界面力学性能的影响。研究成果将为光纤感测技术更好地应用于岩土体变形监测提供参考。

1 试验原理、装置和材料

1.1 试验原理

光纤测量膨胀土体变形时,如图 1 所示,在土体自重、上覆压力及膨胀力等作用下,光纤将有从中心向两端拉伸变形的趋势,这种趋势相当于在光纤的两端作用轴向拉力。在试验的初始阶段即作用于光

自重和上覆围压

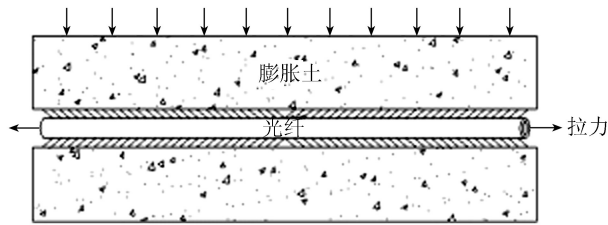


图 1 试验原理

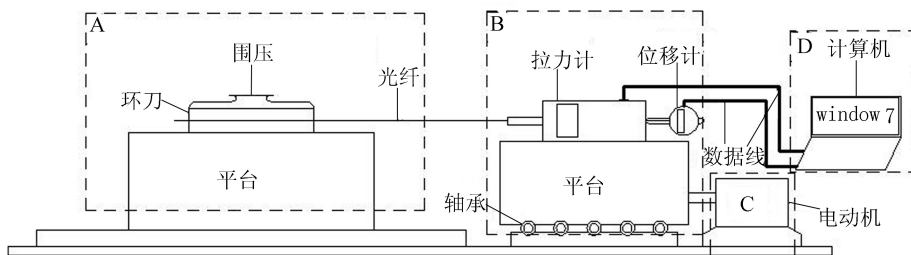


图 3 试验装置示意图

纤上的轴向拉力较小时,膨胀土和光纤可以视为一个整体,光纤测量值可以代表膨胀土的变形量。随着轴向拉力的不断增大,膨胀土-光纤界面将逐渐发生滑移和脱离,此时光纤与膨胀土间的变形量间将存在偏差,偏差超过一定程度,光纤应变测量值将不再能代表土体变形量。

1.2 试验装置

光纤与土体间的剪切强度是影响两者变形协调性能的关键。为此,设计了一套测试膨胀土-光纤界面力学性质的试验装置,如图 2 和图 3 所示。

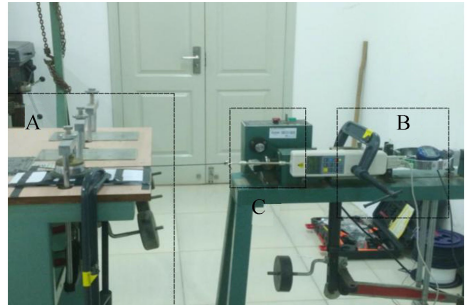


图 2 实际试验装置

结合图 2 和图 3,对试验装置中 A、B、C、D 四部分分别作简单说明:

A:由环刀、围压装置、光纤和夹具所组成。围压装置在本试验中采用的是 WG 型单杠杆固结仪(中压),通过增减砝码来控制施加于环刀上的上覆压力,夹具固定试验仪器。

B:由数显拉力计和位移计,轴承平台和夹具组成。轴承平台远离环刀方向移动时,通过位移计获取光纤拉伸位移量,拉力计测量光纤轴向拉力。拉力、位移值同步实时获取,并自动记录、保存。

C:本区域为电动机,电动机可以使 B 中轴承平台匀速水平移动。电动机与 B 中的轴承平台改装于 ZJ 型应变控制式直剪仪。

D:由笔记本电脑和数据线所组成。通过数据线将计算机和数显拉力计、数显位移计连接,方便试验数据的读取、保存和处理。

1.3 试验材料

试验选用直径 2 mm 的聚氨酯紧套应变光纤,膨胀土取自南京浦口区,其基本物理性质见表 1。试

验用环刀高为 20 mm,直径为 61.8 mm。事先于环刀壁中部对称钻孔,孔径略大于光纤直径。根据设计的压实干密度,称取对应质量土样,并将一半的土样均匀压实至环刀深度一半位置(10 mm),而后将光纤通过环刀壁上的孔,施加预拉应力后置于在土体表面,将剩余光纤的末端伸出环刀 15 cm,使得拉伸过程中光纤与膨胀土的接触面积保持不变,最后将另一半土压实至表面与环刀口齐平。图 4 为安装好光纤的环刀试样。

表 1 膨胀土的物理性质指标

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	黏土矿物质量分数/%		
				伊蒙混层 矿物	伊利石	绿泥石和 高岭石
2.7	22.9	55.5	32.6	87.4	4.3	8.3



图 4 环刀土样

2 试验结果和分析

2.1 试验结果

试验的影响因素为土体干密度、含水量和上覆压力,其中干密度分别取 $1.35 g/cm^3$ 、 $1.40 g/cm^3$ 、 $1.45 g/cm^3$ 和 $1.50 g/cm^3$,含水量分别取 16%、20%、24%、28%、32% 和 36%,土体的上覆压力分别取 12.5 kPa、25.0 kPa、37.5 kPa 和 62.5 kPa。试验采用控制变量法,例如上覆压力取 12.5 kPa、25.0 kPa、37.5 kPa 和 62.5 kPa 时,其他 2 个影响因素保持不变。不同条件下光纤位移与作用在光纤上的轴向拉力间关系曲线如图 5~7 所示。

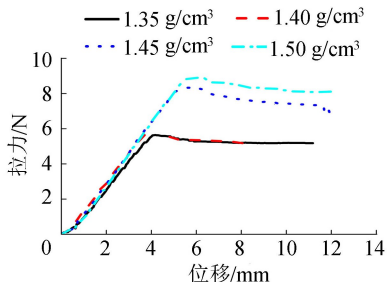


图 5 不同干密度下界面位移-拉力曲线

从图 5~7 可以看出,不同影响因素下的膨胀土-光纤界面的位移-拉力曲线变化规律有较高的相似性。以影响因素中的土体干密度(图 5)为例来说

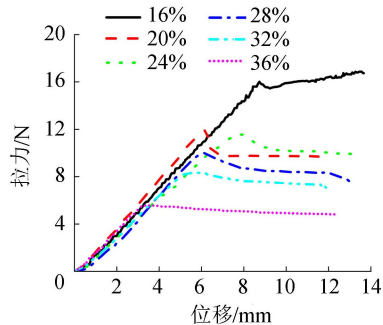


图 6 不同含水量下界面位移-拉力曲线

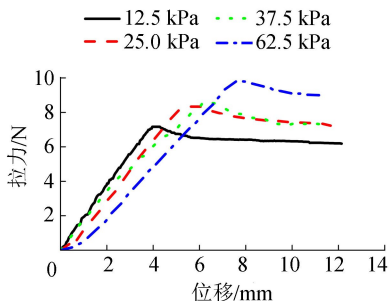


图 7 不同上覆压力下界面位移-拉力曲线

明曲线变化的相似规律:首先,在同一干密度下,随着位移的增大,界面拉力不断增大,且增大的速度基本保持不变。当位移达到一定值时,拉力达到峰值(此时拉力为峰值拉力,对应位移为峰值位移)。然后随着位移的增大,拉力逐渐减小。试验的后期,随着位移的继续增大,拉力逐渐趋于一个相对稳定的值(此时拉力为残余拉力,对应位移为残余位移);其他条件不变时,土体干密度越大,膨胀土-光纤界面的峰值拉力越大,峰值拉力对应的峰值位移也越大,残余拉力和残余位移均随土体干密度的增大而增大。

2.2 试验结果分析

土体不同干密度、含水量和上覆压力下,各膨胀土-光纤界面位移-拉力关系曲线均可以简化成一条分段曲线,符合三段式的拉拔力-拉拔位移关系模型^[17-19],如图 8 所示。

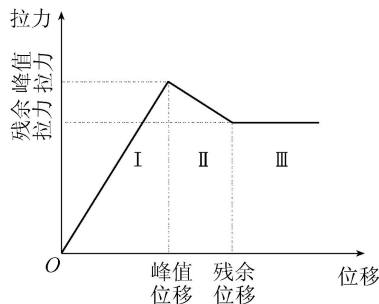


图 8 膨胀土-光纤界面位移-拉力曲线模型

图 8 中,膨胀土-光纤界面位移-拉力曲线可以分为以下 3 个阶段:

阶段 I:试验开始阶段,随着位移的增大,拉力线性增加。此阶段由于拉力较小,光纤和膨胀土界

面之间存在摩擦力和黏聚力, 光纤和膨胀土界面未发生相对滑移, 位移对应光纤的受拉伸长和膨胀土界面剪切层的剪切变形。

阶段 II: 在峰值位移点, 拉力达到峰值, 此时界面上的剪切应力已经从受拉端传递到了光纤尾端, 剪切应力达到界面的最大静摩擦力。膨胀土界面剪切层逐渐发生剪切破坏和界面剥离, 此时拉力开始下降, 峰值位移过后膨胀土-光纤界面出现相对滑移。

阶段 III: 膨胀土界面完全破坏后, 光纤和膨胀土界面发生相对移动, 界面作用力以滑动摩擦力为主, 并基本保持不变, 此时稳定值称为残余拉力。

该模型中, 主要涉及 3 个变量, 即峰值拉力、峰值位移和残余拉力。根据界面模型和光纤的实际应用可知, 当位移大于峰值位移时, 膨胀土-光纤界面出现相对滑移, 光纤测量得到的数据开始部分失效。故峰值位移越大越好(其对应峰值拉力也越大), 因为这样光纤测量得到的有效位移、拉力范围更广。而当拉力接近残余拉力时, 膨胀土-光纤界面发生滑移和脱离, 此时光纤监测得到的数据已基本完全失效。故残余拉力越小越好, 因为能更早判断出光纤监测是否完全失效。

光纤的力学性能取决于其和被监测基体之间界面应力传递能力, 而能反映传递能力大小的正是界面剪切强度^[14]。下面分析上述 3 个因素对膨胀土-光纤界面剪切强度(峰值剪切强度和残余剪切强度)的影响, 其中峰值剪切强度和残余剪切强度的定义如下:

$$u_p = \frac{F_p}{A} = \frac{F_p}{\pi d D} \quad (1)$$

$$u_r = \frac{F_r}{A} = \frac{F_r}{\pi d D} \quad (2)$$

式中: u_p 、 u_r 为峰值剪切强度和残余剪切强度; F_p 、 F_r 为峰值拉力和残余拉力; A 为膨胀土-光纤界面接触面积; d 为光纤外径; D 为环刀内直径。

图 9~11 分别为土体干密度、含水量和上覆压力 3 个因素对膨胀土-光纤界面剪切强度的影响, 图中分别对实测结果进行了线性拟合, 得出拟合段的方程(图中

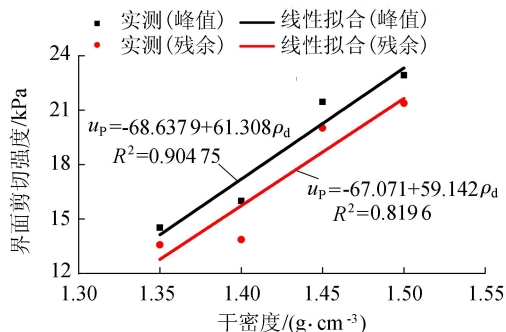


图 9 干密度-界面剪切强度关系

ρ_d 为膨胀土干密度; w 为含水量; σ_v 为上覆压力)。

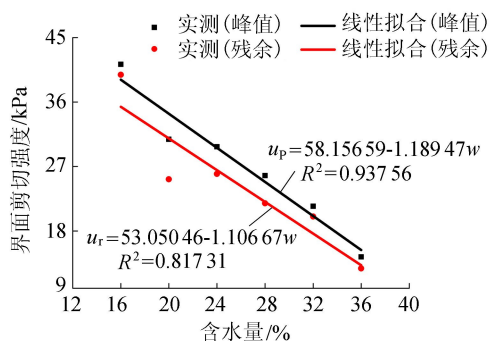


图 10 含水量-界面剪切强度关系

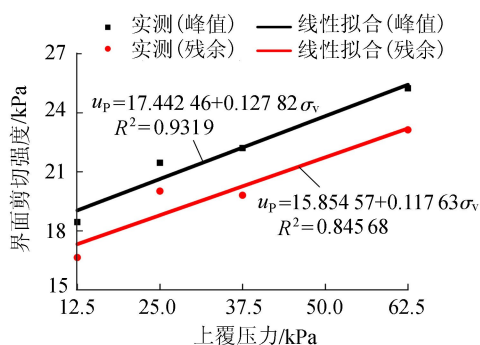


图 11 上覆压力-界面剪切强度关系

图 9 表明在其他条件不变时, 膨胀土-光纤界面剪切强度与干密度成高度线性正比关系, 土体干密度越大, 光纤与接触土体之间的咬合越紧密, 光纤越不容易从土体中拔出, 剪切强度值越大; 图 10 表明在其他条件不变时, 膨胀土-光纤界面峰值剪切强度、残余剪切强度与土体含水量成近似线性反比关系; 图 11 表明在其他条件不变时, 膨胀土-光纤剪切强度与上覆压力近似线性正相关, 这可以利用库伦公式作相应的解释——即假设界面黏聚力和界面摩擦角不变, 上覆压力(界面法向应力)越大, 界面剪切强度也越大, 且上覆压力与界面剪切强度成线性正比关系。

3 结论

- 设计的测量膨胀土-光纤界面力学的试验装置, 可有效获得不同土体干密度、含水量、上覆压力下膨胀土-光纤界面的位移-拉力变化关系曲线。
- 不同位移-拉力曲线具有相似的发展规律, 即拉力随位移先线性增大至峰值, 然后逐步降低, 最终趋于稳定值, 并据此得到了符合膨胀土-光纤界面的位移拉力变化的 3 段式曲线模型。
- 光纤-膨胀土界面剪切强度与土体干密度和上覆压力成线性正比关系, 而与土体含水量成线性反比关系。

需要指出的是, 本文研究不同因素对光纤-土界面力学特性影响时, 均是采用控制变量的方法, 即改

动单一参数的变化下的结果,关于多因素协同变化下的影响还需要做更多的试验进行研究。

参考文献:

[1] 隋海波,施斌,张丹,等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. 工程地质学报, 2008,16(1):135-143. (SUI Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Review on fiber optic sensor-based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (1): 135-143. (in Chinese))

[2] 龚晓南. 21世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000,22(2):238-242. (GONG Xiaonan. Prospects the development of geological engineering in the 21th century[J]. Journal of Geological Engineering, 2000,22(2):238-242. (in Chinese))

[3] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002,22(3):82-90. (LI Hongnan, LI Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22 (3): 82-90. (in Chinese))

[4] BARRIAS A, CASAS J R, VILLALBA S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(5):748.

[5] MIYAGAWA T, KONISHI K, HIRAKI T. Monitoring system of slopes with optical fiber sensors[C]//Photonics Asia. International Society for Optics and Photonics, 2002:544-554.

[6] 施斌,徐学军,王楠,等. 隧道健康诊断BOTDR分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(15):2622-2628. (SHI Bin, XU Xuejun, WANG Di, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(15):2622-2628. (in Chinese))

[7] MOHAMAD H, SOGA K, PELLEW A, et al. Performance monitoring of a secant-piled wall using distributed fiber optic strain sensing [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2011,137(12):1236-1243.

[8] 张丹,徐洪钟,施斌,等. 基于FBG技术的饱和膨胀土失水致裂过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2012,20(1):103-108. (ZHANG Dan, XU Hongzhong, SHI Bin, et al. FBG technology based experimental studies on cracking of expansive soil due to dehydration[J]. Journal of engineering geology, 2012, 20 (1): 103-108. (in Chinese))

[9] 王宏宪,张丹,李长圣,等. 基于PPP-BOTDA的膨胀土裂隙发育特征的分析与表征方法研究[J]. 工程地质学报, 2014,22(2):210-217. (WANG Hongxian, ZHANG Dan, LI Changsheng, et al. PPP-BOTDA based experiments on characterization and description methods for cracking of expansive soil[J]. Journal of Engineering

Geology, 2014,22(2):210-217. (in Chinese))

[10] LIENHART W, WOSCHITZ H, MOSER F. High sensitive monitoring of natural and engineered slopes [C]//5th International Forum on Opto-Electronic Sensor-Based Monitoring in Geo-Engineering. Nanjing: Nanjing University, 2014:8-14.

[11] 徐洪钟,刘阳,孙义杰. 基于BOTDA的土工格栅加筋膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 地下空间与工程学报, 2016,12(4):1077-1081. (XU Hongzhong, LIU Yang, SUN Yijie. Test of swell-shrinkage performance of geogrid reinforced expansive soil using BOTDA [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4):1077-1081. (in Chinese))

[12] ANSARI F, YUAN L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4):385-394.

[13] 周智,李冀龙,欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006,38(1):49-55. (ZHOU Zhi, LI Jilong, OU Jinping. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38 (1): 49-55. (in Chinese))

[14] BROTZU A, FELLI F, FIORI L, et al. Characterization of both adhesion and interfacial interaction between optical fiber coating and structural adhesives [J]. Smart Structures & Systems, 2008(4):439-448.

[15] LI H N, ZHOU G D, REN L, et al. Strain transfer coefficient analyses for embedded fiber bragg grating sensors in different host materials [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(12):1343-1353.

[16] 张勇,高鹏,王惠敏,等. 复杂变形条件下分布式光纤传感器应变传递特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(5):566-572. (ZHANG Yong, GAO peng, WANG Huimin, et al. Study on strain transfer characteristics of distributed optical fiber sensor under complex deformation condition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013 (5): 566-572. (in Chinese))

[17] 余骏宽,朱鸿鹄,张诚成,等. 传感光纤-砂土界面力学性质的试验研究[J]. 工程地质学报, 2014,22(5):855-860. (SHE Junkuan, ZHU Honghu, ZHANG Chengcheng, et al. Experiment study on mechanical properties of interface between sensing optical sensor fiber and sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5):855-860. (in Chinese))

[18] ZHANG C C, ZHU H H, SHI B, et al. Interfacial characterization of soil-embedded optical fiber for ground deformation measurement [J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(9):095022.

[19] ZHANG C C, ZHU H H, SHE J K, et al. Quantitative evaluation of optical fiber/soil interfacial behavior and its implications for sensing fiber selection[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(5):3059-3067.

(收稿日期:2018-05-08 编辑:郑孝宇)