DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242115

应变感测光缆—非饱和土界面耦合特性研究

程 琳,曹 阳,马春辉,孙永康

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要: 分布式光纤应变传感(DFOSS)技术为滑坡失稳的一种有效监测手段,光缆—土体变形协调性是该技术能否准确获取滑坡变形监测数据的关键,其中土体含水率对光缆—土体变形协调性的影响十分显著。因此,通过光缆—土体界面耦合特性试验仪,探究不同含水率下黄土土体试样中光缆—土界面的破坏机制。结果表明,光缆应变监测结果准确地反映出缆—土界面渐进性破坏特征,试验特征参量(拉拔力、应变、界面剪应力)随着拉拔位移的增大而增加至峰值后缓慢减小;应变软化模型能够较好地描述力—位移关系;采用考虑拉拔力的光缆—土体变形耦合系数 K 定量描述光缆—土体之间的耦合性能,当 $K=90\%\sim100\%$、$60\%\sim90\%$、$30\%\sim60\%$、$0\sim30\%$时,两者的耦合性分别为强、较强、较弱、弱。

关键词: 分布式光纤传感技术;非饱和土;光缆—土体界面;拉拔试验;含水率

中图分类号: [TV16]; TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)12-0089-05

1 引言

近年来,滑坡灾害在黄土地区频繁发生,造成严重后果。为防止黄土边坡滑坡灾害,需要精确、实时监测土体变形。分布式光纤应变传感(DFOSS)技术能够提供高精度、长距离的应变监测能力,这使得该技术成为岩土工程中实时监测、预警和管理的重要工具[1-2]。分布式光纤感测技术应用于岩土工程领域时,光缆与土体之间的相互作用和变形协调性是一个关键问题,其中土体水分是影响缆—土耦合的重要因素。余骏宽[3]通过拉拔试验证实了光纤—土体界面的耦合特性会随着含水率的增加而削弱;徐洪钟等[4]通过试验探究了不同干密度、含水率下膨胀土—光纤界面的力学特性;刘天翔等[5]探究了含水率对冻土试样光缆—土体界面的破坏机制,发现冻土的含冰率有利于提高缆—土耦合性能。已有成果多是基于环刀试样开展的砂土或冻土研究,受限于试样尺寸,难以获得光缆的应变分布状况。为了进一步分析含水率对缆—土耦合性能的影响,本文基于 DFOSS 技术进行了一系列不同含水率下应变传感光缆的拉拔试验,以探究不同含水率下光缆—土体界面的渐进性破坏机制,并讨论了光缆—土体耦合性能评价问题,结果为光纤传感技术在降雨入渗边坡变形监测中应用提供了理论依据。

2 研究方法

在土体变形监测中,纤—土界面剪应力可通过光缆监测的应变计算[6],建立图 1 所示力学模型,光缆的直径、长度分别为 D、L,光缆径向变形忽略不计。

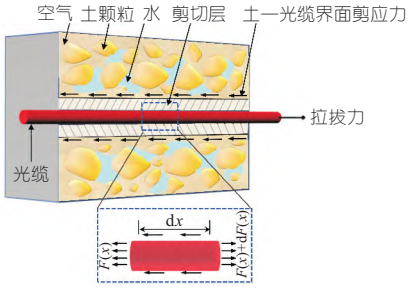

图 1 光缆在土体中拉拔受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulling force of fiber optic cable in soil body

根据图 1 中的微单元平衡条件,可推导:

$$\mathrm{d}F(x)/\mathrm{d}x=-\pi D\tau(x) \tag{1}$$

式中,$F(x)$ 为光缆轴力;$\tau(x)$ 为缆—土界面剪应力。

假设光缆为弹性杆件,则有如下关系:

收稿日期: 2024-11-11,**修回日期:** 2025-03-10

基金项目: 陕西省科技厅 2023 年陕西省自然科学基础研究计划(面上项目)(2023-JC-YB-358)

作者简介: 程琳(1986-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为智能传感与无损检测,E-mail:chenglin@xaut.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

$$F(x)=\pi D^2 E\varepsilon(x)/4 \tag{2}$$

式中，E 为光缆弹性模量；$\varepsilon(x)$ 为光缆轴向应变。

将式(1)、(2)联立，得：

$$\tau(x)=-\frac{DE}{4}\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x} \tag{3}$$

式中，$\mathrm{d}\varepsilon/\mathrm{d}x$ 为沿光缆轴向的应变梯度。

对于试验监测数据，界面剪应力表示为：

$$\tau_n=-\frac{DE}{4}\frac{\varepsilon_{n+1}-\varepsilon_n}{L_{n+1}-L_n} \tag{4}$$

式中，ε_{n+1}、ε_n 分别为光缆沿相邻 2 个测点的应变值；L_{n+1}、L_n 分别为相邻应变测点之间的距离。

式(4)可以将光缆测得的界面应变转换为界面剪切应力，这种计算界面剪应力的方法已得到验证和应用[5,7]。

分布式光纤应变监测原理基于光频域反射计(OFDR)技术。图 2 为 OFDR 的基本原理示意图。它利用连续波频率调制(FMCW)技术通过线性波长扫描的光源向光纤发送调制激光信号。信号在光纤中被分为参考臂和信号臂，并在耦合器处发生拍频干涉。由于光纤的不均匀性，光在传播过程中会产生背向瑞利散射。测量散射光特性，并利用快速傅里叶变换(FFT)将拍频信号转换为距离信息，可精准获取光纤各位置的应变或温度变化[8]。

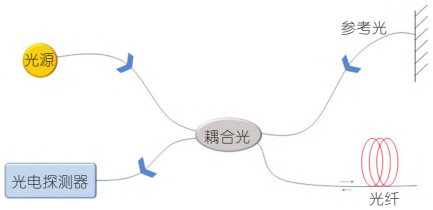

图 2 OFDR 工作原理

Fig. 2 OFDR working principle

3 试验设计

3.1 试验装置

开展了一系列应变传感光缆的拉拔试验，并设计了界面力学特性测试装置(图 3)。设置模型箱内部尺寸为 500 mm×180 mm×180 mm(长×宽×高)。该试验装置由拉拔测试系统和 OFDR 应变采集系统组成。

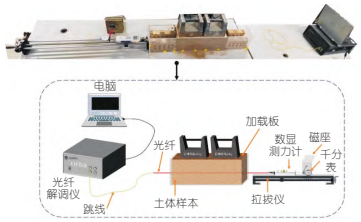

图 3 试验模型总体示意图

Fig. 3 General schematic diagram of the test model

(1)拉拔测试系统。由拉拔仪和千分表组成，拉拔仪为转轮步进式，带有前端夹具数显式拉力计。转轮带动拉拔仪下方螺杆转动从而带动夹具移动，向光缆端部施加拉拔位移。数显测力计和千分表，可采集拉拔力和拉拔位移。

(2)光纤应变监测采用 OFDR 高精度分布式光纤传感仪，其应变监测精度为 1 με，监测量程为±12 000 με，可提供 1～10 mm 的空间分辨率。将跳线端接入解调仪(型号为 OSI-S)，采集试验过程中的应变数据，空间分辨率选择 2 mm。采样间隔为拉拔仪转轮匀速转动半圈，时间约为 2 s。

3.2 试验方案与步骤

试验黄土相对密度 $G_s=2.74$，液限 $\omega_L=34.4\%$，塑限 $\omega_p=17.5\%$，最优含水率 $\omega_{opt}=18.2\%$，风干含水率=1.6%。根据《土工试验方法标准》[9]，土壤属于低液限黏土(C_L)。选用的应变光缆为紧包型护套应变感测光缆(图 4)，其具体参数见表 1。

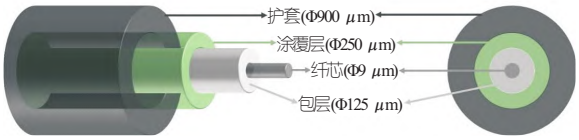

图 4 传感光缆

Fig. 4 Sensing fiber optic cable

表 1 光缆主要参数

Tab. 1 Main parameters of optical cable

纤芯类型	直径/mm	弹性模量/GPa	光缆单位质量/(kg·km^{-1})	最大拉断力/N
单模	0.9	1.04	0.8	55

试验将在以下任一情况下终止：①纤－土界面失效、光缆被拔出；②测量的应变值达到量程上限，即 12 000 με。

参考击实试验中试样的干法制备过程，配置了干密度为 1.50 g/cm^3，含水率分别为 10%、14%、18%、22%、26%、30%(饱和)的土样以探究不同含水率下的缆－土界面渐进性破坏机制，干密度通过下式控制：

$$m_0=\rho_d V(1+0.01w_0) \tag{5}$$

$$m_w=0.01m_0(w_1-w_0)/(1+0.01w_0) \tag{6}$$

式中，m_0 为试样制备所需风干含水率的土样质量，g；ρ_d 为目标干密度，1.50 g/cm^3；V 为试样体积即模型箱体积，16 200 cm^3；w_0 为风干含水率，1.6%；m_w 为试样所需要的加水量，g；w_1 为试样目标含水率，%。

中国知网 https://www.cnki.net

饱和含水率计算公式为:

$$n=1-\rho_d/(G_s\rho_w) \tag{7}$$

$$S_r=\omega\rho_d/(n\rho_w) \tag{8}$$

式中,n 为孔隙率,取 45.25%;ρ_w 为水的密度,取 1 g/cm^3;S_r 为饱和度,当 S_r 为 1 时,试样饱和;ω 为饱和含水率。

黄土地表基质层一般为 30～50 cm,在土体上覆砝码可以使光缆周围压力更加贴近实际,另一方面可以提高缆－土界面的抗剪强度[10]。

4　试验结果与分析

4.1　拉拔力—拉拔位移曲线

力－位移曲线能够有效描述光缆在土体中的运动状态。由图 5 可看出,随着拉拔位移增加,拉拔力上升到峰值后,趋于平缓,这表明土体含水率的增加削弱了缆－土界面摩擦力,导致拉力达到峰值后光缆与土体间发生滑移。ZHANG C C 等[11]提出了一种能够有效描述拉拔力和拉拔位移变化规律的力学模型。通过应变软化模型所包含的参数来描述含水率与纤－土耦合性能的关系:①拉拔力－拉拔位移曲线最高点对应的峰值拉拔力 F_p;②峰值拉拔力对应的位移,即峰值位移 u_p。含水率越大,峰值拉拔力 F_p 和峰值位移 u_p 越小,缆－土耦合性能与含水率成负相关,峰值位移的减小说明含水率也不利于光缆测量范围的扩大。最优含水率为 18%,当含水率为 22%、26%时,峰值拉拔力和峰值位移较为接近,说明当含水率超过最优含水率时,含水率的增加对纤－土耦合性能影响不再显著,这与环刀试验[3]得到的规律一致。

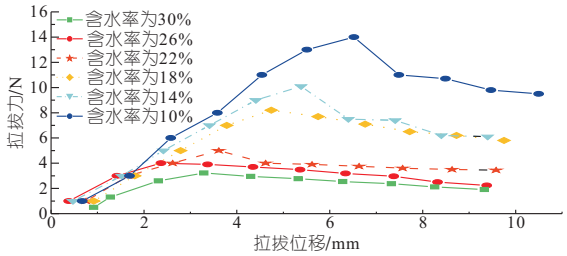

图 5　不同含水率下拉拔力－位移曲线

Fig. 5　Pullout force-displacement curves at different water contents

4.2　应变分布特征

不同含水率下光缆的轴向应变分布见图 6。图 6 中,横坐标为光缆到解调仪的距离,起始测量点定位于 2.4 m 处。由图 6 可知,试验初始阶段,缆－土界面表现为局部剪应力逐步积累,开始抵抗拉拔力,应变传递的距离有限,随着拉拔位移增加,应变向尾端拓展,界面最终贯穿破坏,应变随着拉拔位移的增加继续缓慢下降,整个过程呈渐进式破坏特征。随着含水率的增加,应变值减小,光缆最大应变值对应的拉拔位移从含水率 10%的 6.52 mm 减小到含水率 30%的 1.28 mm,并且光缆最大应变值对应的拉拔位移与峰值拉拔力对应的峰值位移 u_p 之间具有良好的一致性。这表明光缆在高含水率土体中拔出时所需的力和位移减小,光缆与土体之间的耦合变形能力降低,揭示了水分在纤－土耦合性能上起着负面作用。

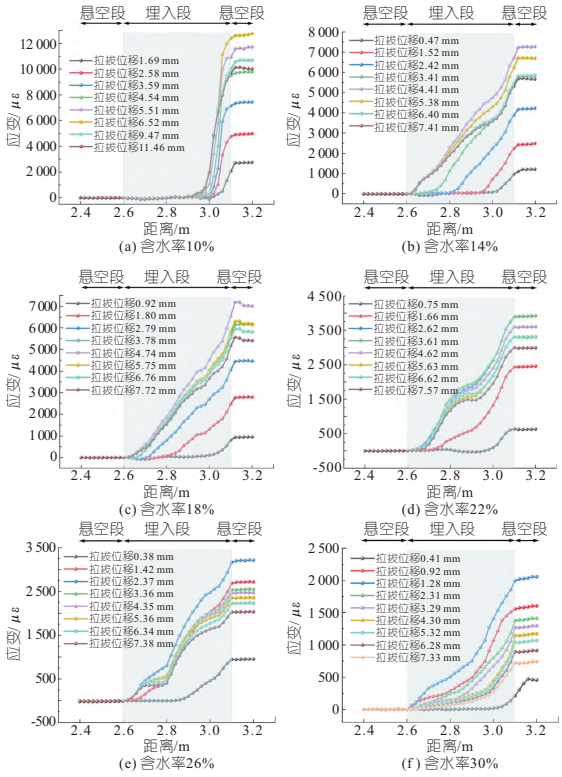

图 6　不同含水率下光缆的应变分布特征曲线

Fig. 6　Characteristic curves of strain distribution of fiber optic cable under different water contents

4.3　缆—土界面渐进性破坏历程

图 7 为最优含水率(18%)土体试样不同位置处界面破坏的时程。根据文献[5],以峰值剪应力对应的位移作为试验分界点,该分界点被定义为有效位移。基于此,将整个试验过程划分为有效状态和失效状态 2 个明确的工作状态。当位移处

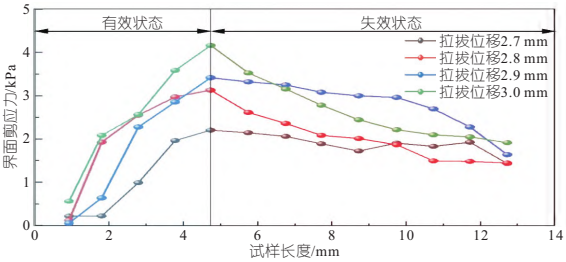

图 7　缆－土界面渐进性破坏历程图

Fig. 7　Progressive failure process of fiber-soil interface

中国知网　https://www.cnki.net

于有效状态时，光缆测得的应变与土体真实应变呈较好的对应关系。

根据式(4)将光缆应变值转换为界面剪应力。4 个界面位置对应的峰值剪应力随着距拉拔端位置的增加而减小，最大剪应力出现在 3.0 m 处，分析表明当光缆开始拉出时，在靠近拉拔端的区域，光缆与土体的摩擦力首先被激活，土体的抗剪强度在拉拔端附近被充分利用，形成较大的界面剪应力，而随着光缆的逐渐拉出，远离拉拔端的部分尚未受到拉拔力的影响，土体的抗剪强度未被完全激发，界面剪应力相对较小。不同位置处峰值剪应力对应的位移在 4.74 mm 附近，与图 7 中最大应变值对应的拉拔位移一致，当拉拔位移小于 4.74 mm 时，随着拉拔位移的增大，界面剪应力趋于界面剪应力峰值。这是由于砝码均匀地向土体施加上覆压力，使得光缆与土体界面的摩擦力沿整个光缆长度均匀分布。这不仅增加了界面的抗剪强度，而且保证了光缆与土体的变形协调，使光缆可以均匀地传递拉拔力，从而光缆在不同位置的剪应力峰值几乎同时出现。

5 光缆—土体耦合性能分析评价

为了定量评价光缆－土体变形协调性能，提出光缆－土体耦合系数 ζ_{c-s}[12]，定义为在一次拉拔试验中，单位长度光缆的轴向应变积分 $\varepsilon(x)$ 与作用于光缆端部的拉拔位移 u_0 之比，即：

$$\zeta_{c-s}=\frac{1}{u_0}\int\varepsilon(x)\mathrm{d}x \tag{9}$$

式(9)得到了验证[13-14]，但其未考虑拉拔力的影响。试验证实[14]，随着光缆上覆土体厚度的增加，某一级拉拔位移下的拉拔力也随之增大，并且拉拔位移由拉拔仪控制，一次试验中位移总是保持相同的数值，所以相对于拉拔位移，拉拔力更能反映土体与光缆的耦合性能。

本文提出了一个新参数用于表征光缆－土体耦合性能，即考虑拉拔力、拉拔位移、光缆应变的光缆－土体变形耦合系数 K 。根据文献[12,14]可以得出缆－土耦合性能与光缆－土体耦合系数 ζ_{c-s} 和拉拔力 F 成正比，所以 K 可表示为：

$$K=\frac{F}{u_0 l}\int_0^l\varepsilon(x)\mathrm{d}x \tag{10}$$

式中，F 为拉拔力；l 为埋入段光缆长度。

由量纲分析可得 K 的量纲为[MT^{-2}]，为使得 K 为一无量纲数，需将式(10)乘以一个耦合性能常数 G，其量纲为[$\mathrm{M}^{-1}\mathrm{T}^{2}$]，可定义为：

$$G=t^2/(45m) \tag{11}$$

式中，t 为一次拉拔试验所需的时间；m 为每千米光缆质量。

将式(10)修改为下式：

$$K=\frac{GF}{u_0 l}\int_0^l\varepsilon(x)\mathrm{d}x \tag{12}$$

由于 OFDR 测得的是离散点数据，所以将式(12)中的光缆埋入段应变积分修改为：

$$\int_0^l\varepsilon(x)\mathrm{d}x=b\sum_i\varepsilon_i \tag{13}$$

式中，b 为空间分辨率。

将式(12)修改为：

$$K=\frac{GFb}{u_0 l}\sum_i\varepsilon_i \tag{14}$$

对于光缆－土体变形耦合系数 K(图 8)，参考光缆－土体变形协调强弱的划分标准[15]，K = 90%～100%时，光缆－土体耦合性能强；K = 60%～90%时，光缆－土体耦合性能较强；K = 30%～60%时，光缆－土体耦合性能较弱；K = 0～30%时，光缆－土体耦合性能弱。在较小的拉拔位移下(2.5 mm)各含水率条件的光缆－土体耦合性能差异较小，因为低含水率在小拉拔位移下光缆应变和局部剪应力未充分调动，而在高含水率条件下光缆应变在较小拉拔位移时就可扩展至尾部达到峰值。随着拉拔位移的继续增大(4.5 mm)，由于高含水率下的光缆－土体界面破坏，光缆应变和拉拔力开始减小，导致变形耦合系数降低，而在低含水率下缆－土界面的局部剪应力逐步作用，抵抗拉拔力，变形耦合系数开始增加至强区间阶段，但随着拉拔位移的进一步增大(6.5、8.5 mm)，低含水率界面逐渐破坏，变形耦合系数降低。总体而言，光缆－土体变形耦合性能是随着拉拔位移和含水率的增加而减小，与试验现象相符。

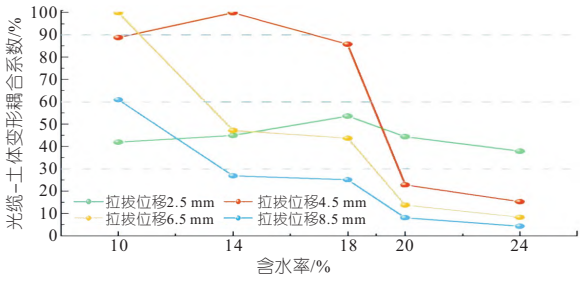

图 8 光缆－土体变形耦合系数

Fig. 8 Coupling coefficient of cable-soil deformation

6 结论

a. 光缆－土体界面呈渐进性破坏特征，含水

中国知网 https://www.cnki.net

率会显著削弱缆－土耦合性能,应变向尾端传递的距离会随着含水率的降低而被限制在一定范围内。

b. 利用试验数据综合考虑光缆应变和拉拔力,提出光缆－土体变形耦合系数 K,完善了光缆－土体耦合性能评价方法。

参考文献:

[1] 韦超, 朱鸿鹄, 高宇新, 等. 地面塌陷分布式光纤感测模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2443-2456.

[2] 侯公羽, 李子祥, 胡涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3148-3158.

[3] 佘骏宽. 分布式传感光纤与土体界面力学性质的试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.

[4] 徐洪钟,孙义杰,权政,等.膨胀土-光纤界面力学性质试验[J].水利水电科技进展,2018,38(5):48-52.

[5] 刘天翔, 朱鸿鹄, 吴冰, 等. 埋入式应变感测光缆－冻土界面渐进破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 131-140.

[6] 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.

[7] WU B, ZHU H H, LIU T X, et al. Experimental investigation of interfacial behavior of fiber optic cables embedded in frozen soil for in situ deformation monitoring[J]. Measurement, 2023, 215: 112843.

[8] 史淞戈, 施斌, 刘苏平, 等. 钻孔回填料粒径对传感光缆应变耦合性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 162-170.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[10] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 分布式光纤探测地裂缝的理论基础探讨[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1473-1482.

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

[12] 张诚成, 施斌, 刘苏平, 等. 钻孔回填料与直埋式应变传感光缆耦合性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 1959-1967.

[13] 蒋娜, 吴静红, 刘浩, 等. 锚固增强传感光缆－土体耦合性的试验研究[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 299-307.

[14] 潘鹏生. 黄土区输水管道渗漏引发地面变形的分布式光纤监测方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.

[15] 向伏林, 杨天亮, 顾凯, 等. 钻孔全断面分布式光纤监测中光缆－土体变形协调性的离散元数值模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1743-1754.

Study on Coupling Characteristics of Strain Sensing Fiber Optic Cable Unsaturated Soil Interface

CHENG Lin,CAO Yang,MA Chun-hui,SUN Yong-kang

(State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Distributed optical fiber strain sensing (DOFSS) technology is an effective tool for monitoring landslide instability. The accuracy of DOFSS in capturing landslide deformation data largely depends on the deformation coordination between the fiber optic cable and the soil, with soil moisture content playing a critical role in this coordination. This study investigates the failure mechanisms at the cable-soil interface in loess soil samples with varying moisture content, using a specialized test apparatus for evaluating the coupling characteristics of the cable-soil interface. The results indicate that strain monitoring by the fiber optic cable accurately reflects the progressive failure features at the cable-soil interface. Test parameters, including pullout force, strain, and interface shear stress, increased with pullout displacement up to a peak and then gradually decreased. The strain-softening model effectively describes the force-displacement relationship. Additionally, a deformation coupling coefficient K was introduced to quantitatively evaluate the coupling performance between the cable and the soil, considering pullout force. Based on four K values of 90%～100%, 60%～90%, 30%～60%, and 0～30%, the coupling performance was classified into four levels: strong, moderately strong, moderate, and weak.

Key words: distributed optical fiber sensing technology; unsaturated soil; cable-soil interface; pullout test; moisture content

中国知网　https://www.cnki.net