

DOI: 10.11779/CJGE20211451

钻孔回填料粒径对传感光缆应变耦合性影响研究

史淞戈, 施斌*, 刘苏平, 张诚成, 顾凯, 何健辉

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 钻孔全断面光纤监测技术已在地面沉降和矿山塌陷等地质灾害监测中不断得到推广应用, 其中钻孔回填料与直埋式传感光缆之间的应变耦合性是影响光纤监测结果准确性的关键。利用可控围压光缆-回填料耦合性测试试验装置, 探究了0~1.0 MPa围压下传感光缆与不同粒径砂土回填料(0.5~4 mm)之间的应变耦合性问题。结果表明: 在相同围压与拉拔位移下, 光缆与砂土之间的应变耦合性, 随着粒径的增大而减弱, 即0.5~1 mm砂土与应变传感光缆间的耦合性最强。将10000 $\mu\epsilon$ 作为传感光缆最大应变监测量程, 对传感光缆-砂土应变耦合性进行了评价。当光缆-砂土变形协调系数为0.9时, 0.5~1, 1~2, 2~4 mm粒径砂料的临界围压依次为0.14, 0.33, 0.52 MPa。应变传感光缆与砂土的界面剪应力先增大后减小, 随着拉拔位移的增大, 光缆-砂土界面剪应力峰值与传递深度均有增加。研究结果可为确定钻孔全断面光纤监测的临界围压深度提供科学依据。

关键词: 分布式光纤监测; 钻孔回填料; 界面剪应力; 耦合性; 粒径

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)01-0162-09

作者简介: 史淞戈(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为地面沉降光纤监测。E-mail: shisongge@smail.nju.edu.cn。

Effects of diameter of borehole backfill on strain coupling of sensing optical cable

SHI Songge, SHI Bin, LIU Suping, ZHANG Chengcheng, GU Kai, HE Jianhui

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The borehole full-section optical fiber monitoring technology has been widely applied in the monitoring of geological disasters such as ground subsidence and mine collapse. The strain coupling between the borehole backfill and the directly buried sensing cable is the key to the influence of the accuracy of optical fiber monitoring results. The strain coupling between the fiber optic cable and the backfill of sand with different particle sizes (0.5~4 mm) under the confining pressures of 0~1.0 MPa is investigated by using the coupling analysis device of controllable confining pressure cable and backfill. The results show that under the same confining pressure and pull-out displacement, the strain coupling between the optical cable and the sand decreases while the particle size increases, that is, the coupling between the sand of 0.5~1 mm and the strain sensing optical cable is the strongest. Using 10000 $\mu\epsilon$ as the maximum strain monitoring range of sensing cable, the strain coupling between the sensing cable and the sand soil is evaluated. When the deformation coordination coefficient of the fiber optic cable and the sand reaches 0.9, the critical confining pressures with particle sizes of 0.5~1, 1~2, and 2~4 mm are 0.14, 0.33, and 0.52 MPa in order. The interface shear stress between the fiber optic cable and the sand first increases and then decreases. With the increase of the pull-out displacement, the peak value and the transfer depth of the interface shear stress increase. The results provide a scientific basis for determining the depth of the critical confining pressure of the borehole full-section optical fiber monitoring.

Key words: distributed fiber-optic sensing; borehole backfill; interface shear stress; coupling; particle size

0 引言

地面变形是由地质灾害或人类活动所引起的一种地质现象。目前地面变形的主要类型有矿山塌陷、地面沉降、地裂缝等。矿山塌陷是指在自然或人为因素作用下, 矿山采空区等在竖直方向上向下塌陷, 并在地面上形成塌陷坑的一种地质现象; 地面沉降是指在自然或人为因素作用下, 由于地壳表层土体压缩而导

致区域性地面标高降低的一种环境地质现象。随着社会的发展, 地下水大量开采成为地面沉降的主要原因, 并引发一系列次生灾害, 造成人民生命财产重大损失。而对地面变形实施有效、精确的监测是掌握地面变形

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030701); 国家重大科研仪器研制项目(41427801)

收稿日期: 2021-10-28

*通信作者: (E-mail: shibin@nju.edu.cn)

机理, 预测和防治地面变形的重要途径。

目前, 地面变形的监测技术按照监测手段主要分为两大类: 一类是基于空间信息的监测技术, 主要包括 GNSS、InSAR、LiDAR、卫星重力测量等技术^[1]; 另一类是基于地面信息的监测技术, 主要包括大地水准测量、分层标和基岩标等技术。但空间监测只能测量到地面高程的损失, 无法获取土体内部变形信息; 地面监测存在成本高、操作繁琐和空间分辨率低等缺点。

分布式光纤监测技术作为一种新型监测技术, 具有分布式、长距离、耐腐蚀、抗干扰强、可远程感测等优点^[2], 已被广泛应用于地质灾害监测与防治、构筑物健康监测等领域^[3-12], 尤其在地面变形监测中具有独特的优势^[13-15]。在钻孔中布设感测光缆, 可形成分布式(包括全分布式和准分布式)的钻孔全断面多场、多参量综合监测系统, 实现地面沉降的精细化监测^[14]。

在地面变形钻孔全断面分布式光纤监测技术中, 钻孔回填料与应变传感光缆之间的变形耦合性是决定应变传感光缆监测精度的关键因素。因此, 一些学者展开了一系列试验来研究光缆与土体间的相互作用机制。余俊宽等^[16]通过拉拔试验揭示了传感光纤-砂土界面的力学特性和应力传递规律。Zhang 等^[17-18]建立了土体-传感光缆界面力学模型, 研究其渐进性破坏特性。张诚成等^[19]通过可控围压光缆-土体耦合性试验装置探究了围压对于传感光缆-土体耦合性的影响, 发现了传感光缆在回填料中的临界围压值, 并提出采用光缆-土体耦合系数 ζ_{c-s} 定量描述光缆与土体之间的耦合性。

此外, 国内外学者还提出通过改变传感光缆形态以增强传感光缆与土体之间的耦合性。卢毅等^[20]采用变直径感测光缆, Hauswirth 等^[21]在钢绞线护套上加装三维锚固点, 以提高光缆与土体之间的耦合性。张松等^[22]通过拉拔试验, 建立了锚固点传感光缆力学模型, 探究了低围压下锚固点对应变传感光缆与砂土之间耦合性的影响。

上述研究分析了围压、传感光缆形态等对传感光缆-砂土耦合性的影响, 均以单一砂或单一黏土作为回填料, 大多没有考虑回填料砂土本身的性质对于传感光缆-土体耦合性的影响。因此, 本研究通过配置不同粒径的砂性土回填料, 使用光缆-砂土耦合性试验装置, 开展了相关的光缆拉拔试验, 探究了不同砂土颗粒粒径对应变传感光缆与砂土之间耦合性的影响。

1 光纤感测原理

实验室条件下, 可使用光频域反射(optical frequency domain reflectometry, 即 OFDR)技术获得

高空间分辨率和高精度的光缆应变。该技术利用光纤中的瑞利散射来进行全分布式光纤感测的技术, 通过感测信号的频率来对信号进行空间定位。光纤某点处的应变或温度的变化会引起该处的背向瑞利散射光谱的移动, 解调仪通过监测光谱变化, 来获取该点的应变或温度信息。光谱漂移与应变、温度变化存在如下的定量关系:

$$\Delta\nu = k_s \Delta\varepsilon + k_t \Delta T \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu$ 为光谱漂移; $\Delta\varepsilon$ 为光纤应变变化量; ΔT 为光纤温度变化量; k_s , k_t 分别为光纤应变、温度的校准常数。

当光纤内某处产生应变时, 背向瑞利散射信号的光谱就会发生漂移, 温度不变时, 漂移量与应变成正比。通过对参考信号和测量信号进行运算, 可得到光谱漂移量, 最后根据式(1)计算得到光纤相对应变量。

本试验在室内进行, 并严格控制实验室的温度, 在整个试验过程中温度变化不超过 0.5°C。因此, 无需对试验数据进行温度补偿。

OFDR 技术具有高空间分辨率(1 cm)和高测量精度($\pm 1.0 \mu\varepsilon$)的特点, 最大测量长度为 100 m 满足室内试验要求, 因此本试验选用 OFDR 作为测试仪器。

2 耦合试验的基本原理

2.1 试验装置

试验利用笔者所在课题组研制的可控围压光缆-砂土耦合性测试装置进行, 如图 1 所示。试验装置主要由液压泵、压力室、测力计、夹具、OFDR 解调仪等组成。按其功能分类, 分为加压模块、拉拔模块以及感测模块三部分。

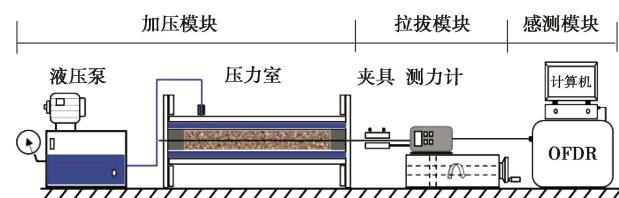


图 1 可控围压传感光缆-砂土耦合性试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of sand coupling test device for controllable confining pressure sensing optical cable

(1) 加压模块。主要包括压力室、液压泵、法兰盘等。压力室主体部分是长 1 m、内径 15 cm、厚 1 cm 的特制钢管, 最高可承受 20 MPa 的压力, 满足试验要求。

(2) 拉拔模块。主要包括测力计、拉伸平台、夹具等。其中测力计记录光缆的拉拔力, 其量程为 50 N, 精度为 0.1 N。拉伸平台控制光缆的拉拔位移, 行程为 15 cm, 精度为 0.01 mm。夹具实物参见文献[17]。

(3) 感测模块。主要包括 OFDR 解调仪、应变传感光缆、计算机等。其中 OFDR 解调仪采用的是 JUNNO 公司生产的 OSI-S 型 OFDR 解调仪, 测量范围为 $-15000 \sim +15000 \mu\epsilon$, 测量精度为 $\pm 1.0 \mu\epsilon$, 具体参数如表 1 所示。

表 1 OSI-S 型 OFDR 解调仪基本参数

Table 1 Basic parameters of OSI-S OFDR demodulator

性能参数	指标值
传感长度/m	100
空间分辨率/mm	10
采样率/Hz	4
应变测量精度/ $\mu\epsilon$	± 1.0
应变测量范围/ $\mu\epsilon$	± 15000
温度测量精度/ $^{\circ}\text{C}$	± 0.1
温度测量范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-200 \sim 1200$

2.2 试验材料与试样制备

应变传感光缆为聚氨酯低模态应变传感光缆 (NZS-DSS-C08)。在此次试验尺度下, 对应变变化具有很好的灵敏度, 光缆详细物理、力学参数见表 2。

表 2 应变传感光缆基本参数

Table 2 Basic parameters of strain sensing optical cable

性能参数	指标值
纤芯直径 d/mm	0.9
护套直径 D/mm	2
弹性模量 E/GPa	0.37
抗拉强度 σ_m/MPa	23.08
应变范围/ $\mu\epsilon$	$-10000 \sim +20000$

试验使用与文献[19]中所用砂土一致。为探究颗粒粒径对于缆-土耦合性的影响, 将回填料按颗粒粒径不同, 用标准筛筛分为 $0.5 \sim 1$, $1 \sim 2$, $2 \sim 4 \text{ mm}$ 3 类, 如图 2 所示。



图 2 不同颗粒粒径砂土

Fig. 2 Sand with different particle sizes

为保证试验的可靠性, 在进行试验前对每组砂样装样时进行称重, 保证每次装入相同质量的砂, 试验中控制砂土的密度介于 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 。物理性质指标如表 3 所示。

试样制备的方法如图 3 所示, 其制备完成的试样实物图参见文献[13]。

首先将光缆穿过试样塞和热缩管内, 一端固定不动。在另一端, 悬挂 100 g 砝码对光缆进行预拉, 预拉应变约为 $850 \mu\epsilon$ 。将筛分好的砂样 A, B, C 单独倒入 3 个热缩管中。每升高 20 cm 的砂土需用落锤将

砂土分层击实, 并使净落距保持不变, 保证砂样具有均匀密实度。当砂土填满热缩管后, 将固定一端取下, 用试样塞密封。用热烘枪对热缩管进行处理, 减小砂土与热缩管之间的空隙, 最后用防水胶带在试样塞和热缩管连接处密封隔水。

表 3 不同砂土物理性质指标

Table 3 Different physical properties of sand

砂样编号	颗粒描述	粒径/mm	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^3)$	加压/MPa
A	细砂	0.5~1	1.52	0~1
B	中砂	1~2	1.57	0~1
C	粗砂	2~4	1.64	0~1

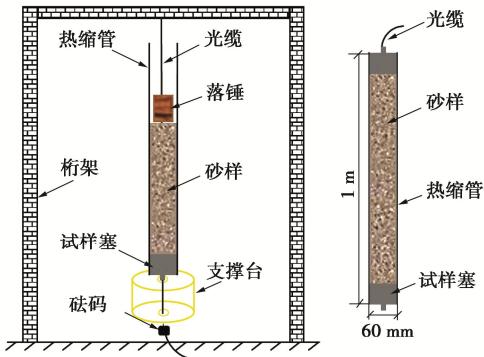


图 3 试样制备方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of sample preparation method

2.3 试验过程

试样制备完成后放入压力室内密封, 将试验装置按图 1 所示顺序依次连接。在距离砂土试样孔口 10 cm 处, 用夹具夹紧光缆, 便于后期拉拔。预留 10 cm 悬空段的主要作用是在数据处理时, 用悬空段验证试验数据的有效性。

试验时, 首先在压力室内注满清水, 通过液压水泵向试样施加均匀的围压, 在围压达到特定值时, 保持压力恒定, 进行拉拔操作。试验采用逐级拉拔的方式进行, 每级拉拔位移为 1 mm , 拉拔速率约为 0.1 mm/s 。每级拉拔都采用 OFDR 解调仪采集应变传感光缆的轴向应变分布情况。由于 OFDR 解调仪的测量范围为 $\pm 15000 \mu\epsilon$, 因此在试验过程中, 试验的终止条件: ①当应变传感光缆的应变值达到 $15000 \mu\epsilon$; ②拉拔力不再变化, 光缆-土体界面破坏、光缆被完全拉出; 二者满足其一, 则试验终止。

对 A, B, C 3 种试样而言, 笔者分别在 $0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 \text{ MPa}$ 6 种围压条件下进行试验, 共计 18 组。

3 结果分析

3.1 试验结果有效性验证

光缆的实际拉力是指本次拉拔试验中光纤的悬空

段所受的最大轴向拉力, 而在试验中由测力计所读取的拉力定义为测试拉力。由材料力学可知, 光缆的轴向力 F 为

$$F = E \varepsilon_{\max} A \quad (2)$$

式中: F 为光缆的轴向力 (N); ε_{\max} 为悬空段的轴向最大应变值; E 为聚氨酯光纤的平均弹性模量 (Pa); A 为光纤横截面的面积 (m^2)。

根据式 (2) 可得到不同砂样的实际拉力值, 与试验时测力计测试的拉力进行对比, 对比结果如图 4 所示。

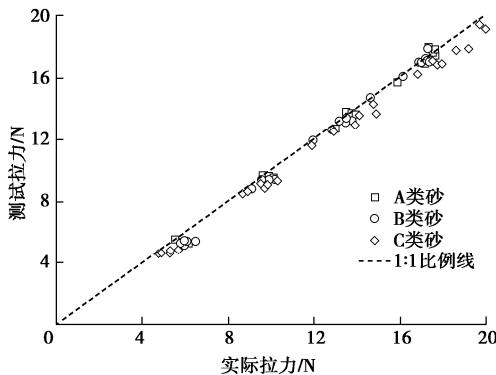


图 4 A, B, C 砂样实际拉力与测试拉力对比

Fig. 4 Comparison between actual and test tensions of sand samples A, B and C

如图 4 所示, A, B, C 3 种砂样在试验的所有围压下, 散点图均与 1:1 比例线吻合得很好, 即拉力测试值与计算所得的拉力理论值基本相等, 说明通过本试验装置测得的光缆的应变分布数据准确、有效。

3.2 拉拔力与拉拔位移曲线

图 5 给出了不同围压下 A, B, C 3 种回填料中光缆的实际拉力-拉拔位移曲线。针对单个砂样曲线图可知, 其拉拔力随着拉拔位移的增加而逐级增加, 拉拔位移每增加 1 mm, 拉拔力增加 3~5 N。而围压越大, 相同位移的拉拔力也越大。另外 A, B, C 3 种回填料在所有围压下的拉力-位移曲线均未出现明显的拐点, 均呈现应变硬化的特征。

A, B, C 3 类砂样在同一围压下的拉拔力与位移曲线如图 6 所示。仅列出 0, 1 MPa 两种围压下的曲线。相同围压下, A 砂样达到相同拉拔位移的拉拔力最大, 说明砂土颗粒粒径越小, 达到某级拉拔位移所需的拉力越大。因为颗粒粒径越小, 砂土与光缆间的接触面积更大, 两者间的摩擦力更大。而随着围压的增大, 不同粒径砂土的拉拔力间的间距在缩小。当围压增大时, 砂土与光缆间会接触更紧密, 此时颗粒粒径对耦合性的影响居于次要地位。存在某一围压, 使得大于该围压后, 围压对耦合性的影响占主导地位。

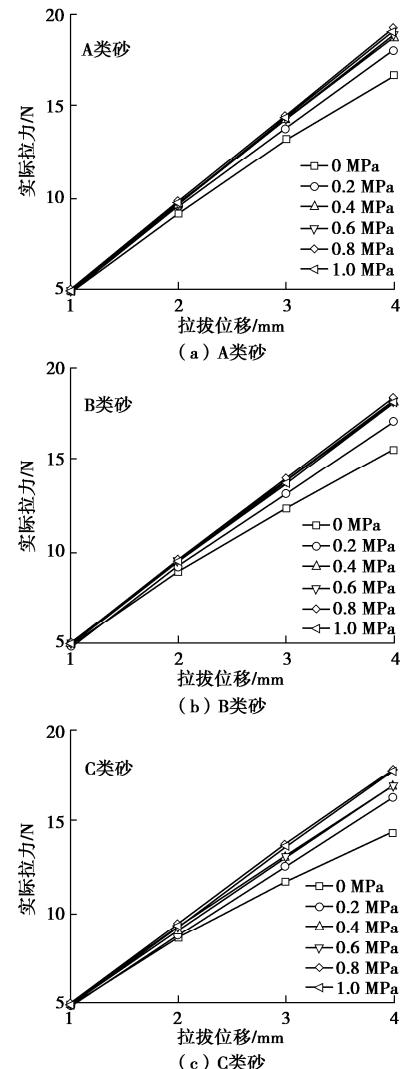


图 5 A, B, C 砂样实际拉力与拉拔位移曲线

Fig. 5 Curves of actual tension and pull-out displacement of sand samples A, B and C

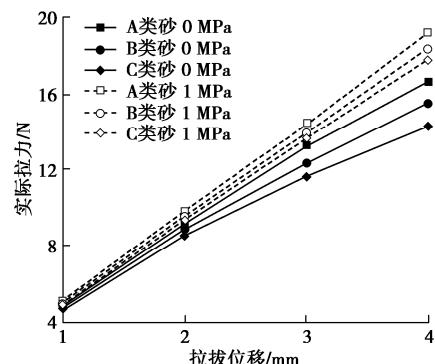


图 6 同一围压下不同砂样实际拉力与拉拔位移曲线

Fig. 6 Curves of actual tension and pull-out displacement of different sand samples under same pressure

3.3 应变分布曲线

图 7 给出了 C 砂样在 0 MPa 作用下的应变分布曲线。图 7 中悬空段的应变基本为水平线, 而当光缆进入砂土段之后, 所有曲线的应变均有明显的下降, 这是由于砂土与光缆之间界面剪应力的作用阻碍了光缆

应变的传递。与文献[19]所不同的是,本试验全部是满足 2.3 节中的条件①而终止,即使颗粒较粗的 C 砂样在 0 MPa 围压下也并未出现应变完全贯通砂土的情况,只是在局部(0.4 m 以内)出现了应变传感光缆的渐进性破坏特征。主要原因是笔者在制样时采用落锤法,提高了砂土的密实度,而文献[19]中则是松填砂样,才能在 0 MPa 围压下应变直接完全贯通。随着拉拔力的增加,光缆的应变传递深度越大。

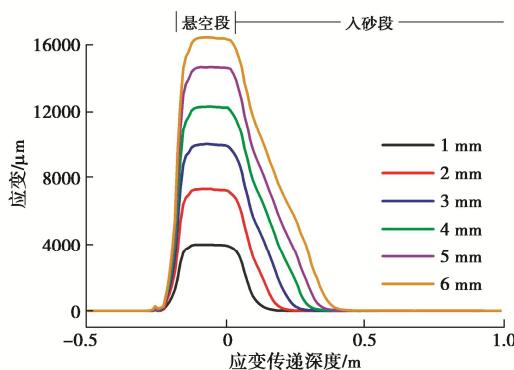


图 7 C 砂样 0 MPa 围压应变分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of strain of sand sample C under confining pressure of 0 MPa

图 8 列出了 A, B, C 3 种砂样在 0, 1 MPa 围压下光缆入砂段的应变分布曲线。所有光缆的应变均被限制 0.15~0.45 m 内。同一砂土随着围压的增大,其应变传递深度在不断减小,但达到相同拉拔位移时,光缆产生的最大应变值也增大。说明随着围压的增大,应变在土体内的传递被限制到更小的范围内,拉拔力的增加也增大了光缆的应变。所以低围压下,应变分布曲线宽而矮;高围压下应变分布曲线窄而高。

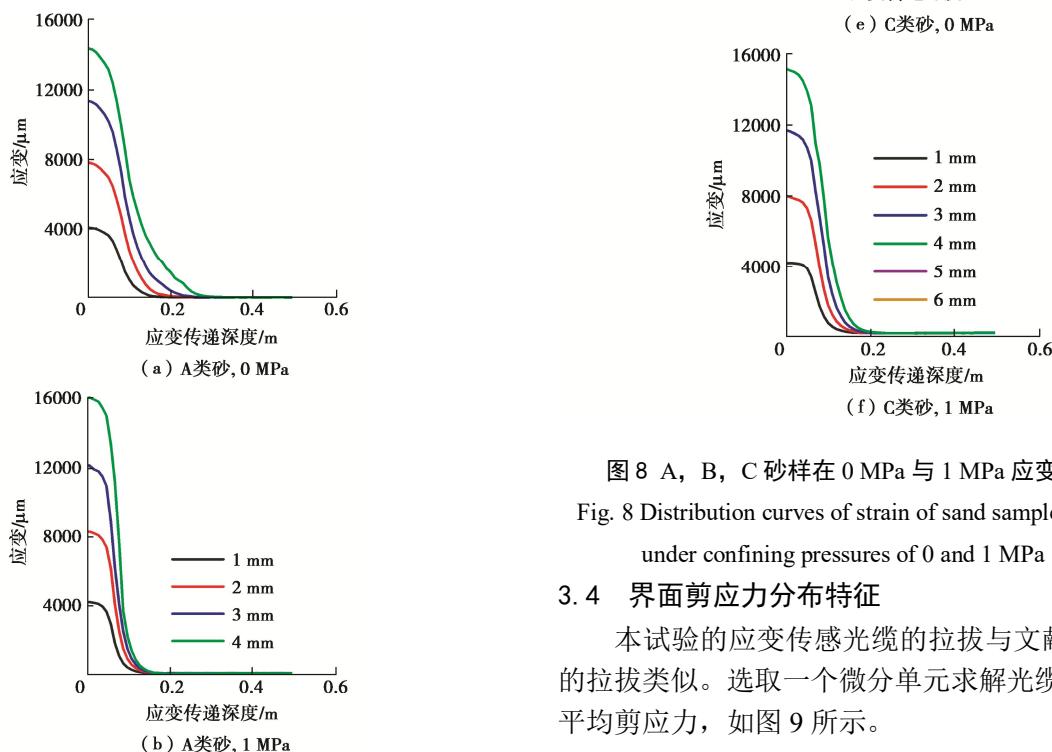


图 8 A, B, C 砂样在 0 MPa 与 1 MPa 应变分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of strain of sand samples A, B and C under confining pressures of 0 and 1 MPa

3.4 界面剪应力分布特征

本试验的应变传感光缆的拉拔与文献[23]中锚杆的拉拔类似。选取一个微分单元求解光缆与砂土界面平均剪应力,如图 9 所示。

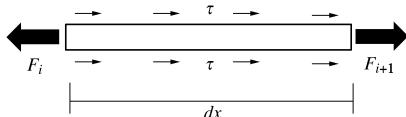


图 9 光缆微单元剪应力分布

Fig. 9 Distribution of shear stress in optical fiber microunits

由于剪应力在微单元上均匀分布, 在每级拉拔结束后, 整个系统受力平衡, 进而所选取的微单元受力平衡。建立应变传感光缆微单元沿轴向方向的力平衡方程式为

$$F_i - F_{i+1} - \tau \cdot Cdx = 0 \quad (3)$$

式中: F_i 为第 i 点处的轴力 (N); F_{i+1} 为第 $i+1$ 点处的轴力 (N); τ 为第 i 点和第 $i+1$ 点之间的平均剪应力 (Pa); C 为应变传感光缆的周长 (m)。由式 (3) 并结合微单元的受力可知

$$F_i - F_{i+1} = E\varepsilon_i A - E\varepsilon_{i+1} A \quad (4)$$

每个微单元的平均剪切应力计算公式可根据式 (3), (4) 得到

$$\tau = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1})EA}{Cdx} \quad (5)$$

根据式 (5) 并结合应变分布原始数据可得到不同砂样的界面平均剪应力分布曲线, 由于篇幅限制, 笔者仅列出 B 砂样的 0, 0.6 MPa 有代表性的界面平均剪应力分布曲线, 如图 10 所示。

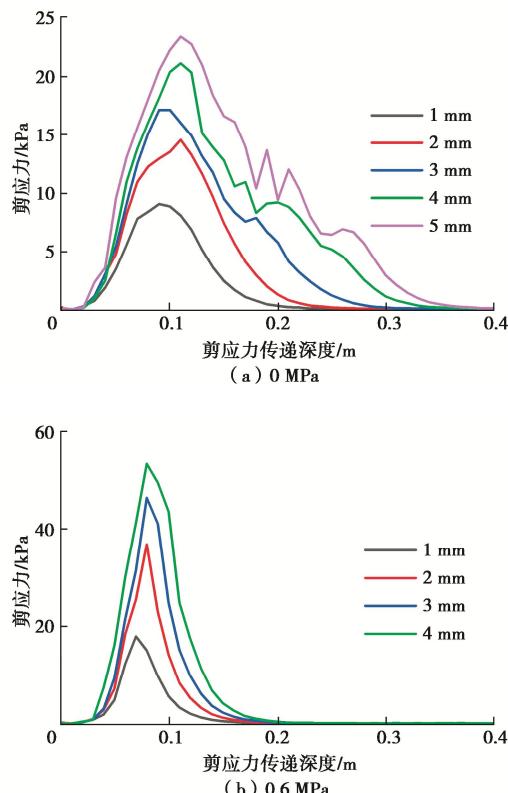


图 10 B 砂样界面平均剪应力分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of interfacial average shear stress of sand sample B

由图 10 可知: ①当光缆进入砂土内时, 剪应力均是先增大后减小。②随着拉拔位移的增大, 剪应力的传递深度及峰值均有增加。与光缆应变传递深度的增加保持一致。而与文献[24]不同的是, 剪应力峰值并未出现明显的向砂土内部传递的趋势。原因是模型的轴向尺寸一直为 1 m, 不存在模型的尺寸效应, 高围压也限制了剪应力向砂土内部的传递。③与应变分布曲线一致, 剪应力分布曲线在低围压时也是“宽而矮”, 最大峰值仅 20 kPa, 在高围压时呈现“窄而高”的特点, 最大峰值为 60 kPa。

4 回填料应变耦合性分析

4.1 粒径与应变传递深度曲线

根据图 7 可知, 光缆在拉拔过程中, 每级拉拔位移下的应变分布曲线均有明显的拐点, 将这一拐点所对应的深度定义为最大应变传递深度。从不同砂样、不同围压下的应变分布曲线上依次读取所对应最大应变传递深度, 按相同围压画出粒径与应变传递深度曲线, 如图 11 所示。

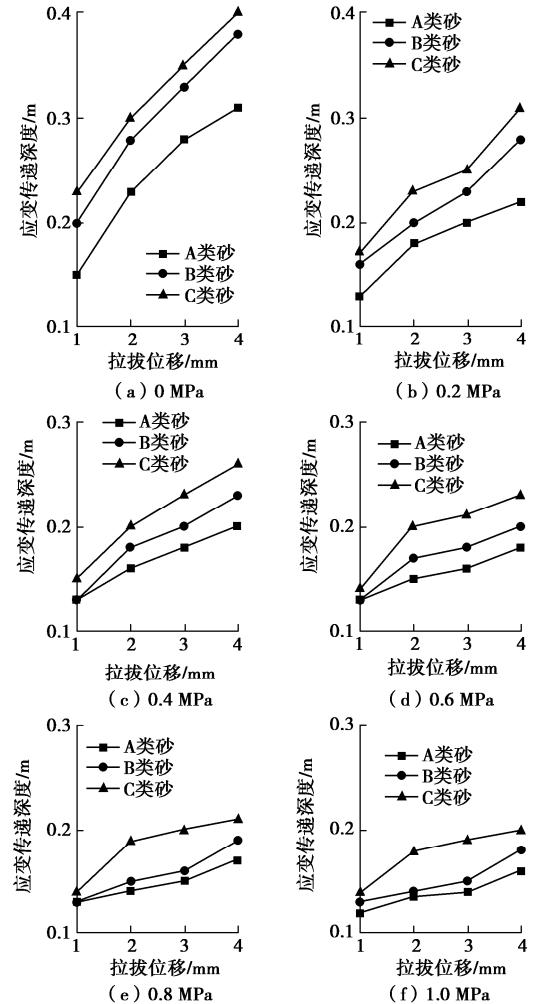


图 11 0~1 MPa 围压下粒径与应变传递深度曲线

Fig. 11 Curves of particle size and strain transfer depth under confining pressures of 0~1 MPa

从图 11 可以看出, 在相同围压下, A 砂样的应变传递深度最小, 说明 A 砂样的光缆-砂土耦合性好。A 砂样的颗粒粒径最小, 颗粒与光缆之间的接触面积更大, 能提供的剪应力更大, 因此 A 砂样的应变传递深度最小。对比不同围压下曲线, 随着围压的增大, 砂样的应变传递深度减小, 说明在高围压下, 光缆-砂土的耦合性更好。围压在 0.6 MPa 及以上时, 应变传递深度减小得很慢, 所有砂样维持在 0.1~0.2 m, 此时围压起主导作用。

4.2 耦合性评价

参考张诚成等^[21]并结合最大应变传递深度, 定义光缆-砂土变形协调系数:

$$\partial = \left(1 - \frac{d_{\max}}{L_0} \right) \times 100\% \quad . \quad (6)$$

式中: ∂ 为变形协调系数; d_{\max} 为最大应变传递深度 (m); L_0 为制样的长度, $L_0=1$ m。

图 12 给出了 0, 1 MPa 围压下 A, B, C 3 类砂的变形协调系数曲线。随着围压的增大, 三类砂的变形协调系数增加, 说明高围压下光缆-砂土耦合性更好。对比同一围压下, 不同粒径砂土的变形协调系数, A 砂样的变形协调系数最大, 即 A 砂样的光缆-砂土耦合性最好。任意围压下, 随着颗粒粒径的增大, 光缆-砂土的耦合性逐渐降低。

在低围压条件下, 砂土颗粒与光缆表面之间均是松散堆积状态, 相互依附性不强。随着颗粒粒径的增大, 砂土颗粒之间的间隙增加, 导致砂土与光缆的接触面积减小。低围压时, 缆-土之间的耦合性主要取决于接触面积, 粒径越小, 接触面积越大, 耦合性越好, 故 A 类砂与光缆的耦合性最好。随着围压的增大, 作用于砂土的力增加, 砂土被压密, 砂土与光缆接触面积增加, 所有粒径砂的耦合性均有所增强。此时不同粒径与光缆之间的接触面积相近, 颗粒粒径对耦合性的影响退为次要因素, 缆-土之间的耦合性主要取决于围压。

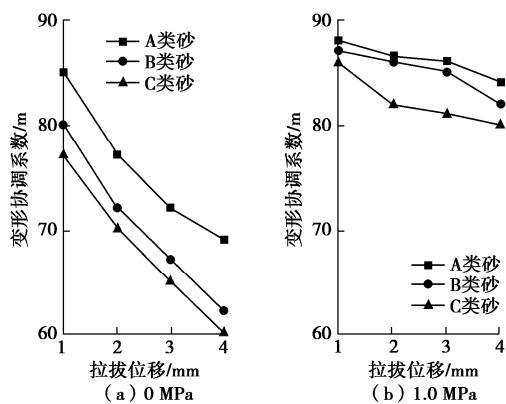


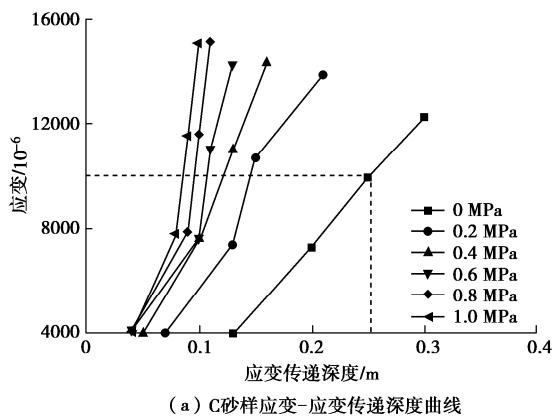
图 12 变形协调系数曲线

Fig. 12 Curves of deformation coordination coefficient

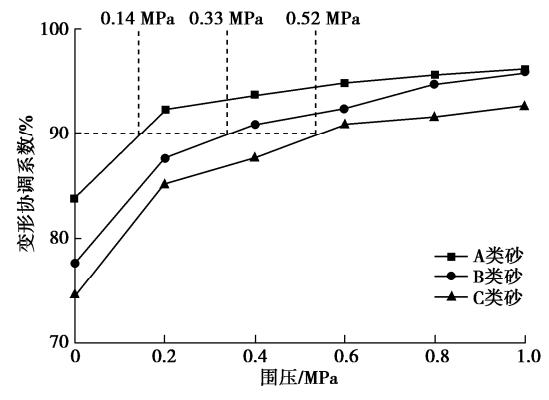
在低围压时, 随着拉拔位移的增大, 光缆对砂土的作用力也会增加, 当作用力大于砂土颗粒之间的作用力时, 部分颗粒会出现翻转、滑移等现象, 从而导致砂土颗粒与光缆之间的界面剪应力波动较大, 如图 10 (a) 所示。此时缆-土之间作用已经处于临界状态, 界面剪应力等于抗剪强度, 继续增加拉力, 光缆便会滑脱。高围压时, 砂土颗粒与光缆之间的作用力增加, 拉拔相同位移时, 界面剪应力峰值增大, 且不会出现局部增大情况, 如图 10 (b) 所示。

4.3 不同砂样的临界围压

对于野外地面沉降的光纤监测来说, 结合野外的地质条件以及应变传感光缆的工作性能等条件, 一般将 10000 $\mu\epsilon$ 作为传感光缆最大应变监测量程。因此, 不同砂样的临界围压便是在此基础上得到的。要得到不同砂样的临界围压共分为 3 个步骤: ①根据图 8 中的应变分布曲线, 得到每级光缆最大应变和传递深度共 72 组数据, 画出同种砂土应变-应变传递深度曲线, 如图 13 (a) 所示; ②根据图 13 (a) 找出 10000 $\mu\epsilon$ 不同围压对应的光缆应变传递深度, 并根据应变传递深度计算出对应的变形协调系数, 共 18 组数据; ③根据计算数据画出围压-变形协调系数曲线, 如图 13 (b) 所示。



(a) C 砂样应变-应变传递深度曲线



(b) 围压-变形协调系数曲线

图 13 求解不同砂土的临界围压

Fig. 13 The calculated critical confining pressures of different sand soils

由图 13 (b) 可知, 随着围压的增大, 应变传感光缆达到 $10000 \mu\epsilon$ 时所对应的变形协调系数也随之增大。即说明围压越大, 不同种类的砂土与光缆的耦合性均有增加。但围压-变形协调系数曲线慢慢趋于水平, 说明在围压增大到一定范围后, 再增加围压时, 砂土与光缆的耦合性上升趋于缓慢, 围压的作用效果已不明显。选取变形协调系数为 0.9 时的围压为临界围压, 当围压大于临界围压时, 说明光缆与砂土达到强耦合, 如图 13 (b) 所示。于是得到 A、B、C 三类砂的临界围压依次为 0.14, 0.33, 0.52 MPa, 参照文献[19], 本文砂土的静止侧压力系数为 0.5, 土层重度为 20 kN/m^3 , 计算得到不同粒径对应的临界深度依次为 14, 33, 52 m, 表明在临界深度以下缆-土变形协调系数可达到 0.9 以上, 两者达到强耦合, 此时应变传感光缆能够准确监测到不同地层的变形。

5 结 论

(1) 在相同围压时, 同一粒径的拉拔力和应变传递深度随拉拔位移的增大而增大, 体现了光缆-砂土的界面渐进性破坏特征。

(2) 光缆与砂土的界面剪应力先增大后减小。随着拉拔位移的增大, 光缆-砂土界面剪应力峰值与深度均有增加。剪应力分布曲线在低围压时呈现“宽而矮”的特点, 最大峰值仅 20 kPa; 在高围压时呈现“窄而长”的特点, 最大峰值为 60 kPa。

(3) 相同条件下, 光缆-砂土的耦合性, 随着颗粒粒径的增大而减弱, 即 $0.5\sim1 \text{ mm}$ 砂土与光缆的耦合性最强。围压在 0.6 MPa 及以上时, 围压对光缆-砂土的耦合起主导作用, 砂土颗粒粒径对耦合性的影响退为次要因素。

(4) 按 $10000 \mu\epsilon$ 作为光缆长期监测地面沉降时光缆-砂土耦合性的评价指标。当光缆-砂土变形协调系数为 0.9 时, $0.5\sim1, 1\sim2, 2\sim4 \text{ mm}$ 3 类砂的临界围压依次为 0.14, 0.33, 0.52 MPa。

参考文献:

- [1] 施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Honghu. Distributed Fiber Optic Sensing for Geoengineering Monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 施斌, 张丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[C]//工程地质力学创新与发展暨工程地质研究室成立 50 周年学术研讨会. 北京, 2008. (SHI Bin, ZHANG Dan, WANG Bao-jun. Distributed optical fiber monitoring technologies of geological and geotechnical engineering and its development[C]// Proceedings of the Symposium on Innovation and Development of Engineering Geomechanics And the 50th Anniversary of Engineering Geology Laboratory. Beijing, 2008. (in Chinese))
- [3] 卢毅, 施斌, 魏广庆. 基于 BOTDR 与 FBG 的地裂缝定点分布式光纤传感监测技术研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 103-109. (LU Yi, SHI Bin, WEI Guangqing. BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology for ground fissures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 103-109. (in Chinese))
- [4] 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493-499. (SHI Bin, XU Hongzhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of botdr to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 493-499. (in Chinese))
- [5] 孙义杰, 张丹, 童恒金, 等. 分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 97-102. (SUN Yijie, ZHANG Dan, TONG Hengjin, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 97-102. (in Chinese))
- [6] 吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 140-147. (WU Jinghong, LIU Hao, YANG Peng, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain ReflectometryTechnique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 140-147. (in Chinese))
- [7] 朴春德, 施斌, 朱友群, 等. 钻孔灌注桩压缩变形 BOTDR 分布式检测[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 80-83. (PIAO Chunde, SHI Bin, ZHU Youqun, et al. Distributed monitoring of bored pile compression deformation based on BOTDR[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 80-83. (in Chinese))
- [8] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125-1131. (WANG Deyang, ZHU Honghu, WU Haiying, et al. Experimental study on buried pipeline instrumented with fiber optic sensors under ground collapse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1125-1131. (in Chinese))
- [9] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 地面沉降分布式光纤监测土-缆耦合性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1670-1678. (ZHANG Chengcheng, SHI Bin, ZHU Honghu, et al.

Theoretical analysis of mechanical coupling between soil and fiber optic strain sensing cable for distributed monitoring of ground settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1670-1678. (in Chinese))

[10] 许星宇, 朱鸿鹄, 张巍, 等. 基于光纤监测的边坡应变场可视化系统研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊1): 96-100. (XU Xingyu, ZHU Honghu, ZHANG Wei, et al. Development of fiber optic monitoring-based visualization system for strain fields of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 96-100. (in Chinese))

[11] 何宁, 王国利, 何斌, 等. 高面板堆石坝内部水平位移新型监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊2): 24-29. (HE Ning, WANG Guoli, HE Bin, et al. New technology for inner horizontal displacement monitoring in high concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 24-29. (in Chinese))

[12] 张丹, 张平松, 施斌, 等. 采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 952-957. (ZHANG Dan, ZHANG Pingsong, SHI Bin, et al. Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 952-957. (in Chinese))

[13] WU J H, JIANG H T, SU J W, et al. Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, **5**(5): 587-597.

[14] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(2): 356-364. (SHI Bin, GU Kai, WEI Guangqing, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(2): 356-364. (in Chinese))

[15] 刘苏平, 施斌, 张诚成, 等. 连云港徐圩地面沉降 BOTDR 监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(5): 158-164. (LIU Suping, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Monitoring and evaluation of land subsidence based on BOTDR in Xuwei near Lianyungang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, **45**(5): 158-164. (in Chinese))

[16] 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 fiber and sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(5): 855-860. (in Chinese))

[17] 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.

[18] ZHANG C C, ZHU H H, SHI B. Role of the interface between distributed fibre optic strain sensor and soil in ground deformation measurement[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 36469.

[19] 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. (ZHANG Chengcheng, SHI Bin, LIU Suping, et al. Mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 1959-1967. (in Chinese))

[20] 卢毅, 施斌, 于军, 等. 地面变形分布式光纤监测模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(5): 896-901. (LU Yi, SHI Bin, YU Jun, et al. Model test on distributed optical fiber monitoring of land subsidence and ground fissures[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(5): 896-901. (in Chinese))

[21] HAUSWIRTH D, ITEN M, RICHLI R, et al. Fibre optic cable and micro-anchor pullout tests in sand[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010). Zurich, 2010.

[22] 张松, 施斌, 张诚成, 等. 低围压下锚固点应变传感光缆与土体变形耦合性试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(6): 1456-1463. (ZHANG Song, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Experimental study on mechanical coupling between anchored strain sensing optical cable and soil deformation under low confining pressures[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(6): 1456-1463. (in Chinese))

[23] 刘波, 胡卸文, 白凯文, 等. 基于界面本构模型的锚杆张拉受力分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(6): 77-82. (LIU Bo, HU Xiewen, BAI Kaiwen, et al. Stress analysis of anchor in tension based on interface constitutive model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(6): 77-82. (in Chinese))

[24] 姚强岭, 王伟男, 孟国胜, 等. 树脂锚杆不同锚固长度锚固段受力特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, **36**(4): 643-649. (YAO Qiangling, WANG Weinan, MENG Guosheng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of resin bolt anchoring section with different anchorage lengths[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, **36**(4): 643-649. (in Chinese))