

DOI: 10.11779/CJGE201811001

钻孔回填料与直埋式应变传感光缆耦合性研究

张诚成¹, 施斌^{*1}, 刘苏平¹, 顾凯¹, 张磊¹, 魏广庆²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 钻孔回填料与直埋式应变传感光缆之间的耦合性, 是决定分布式光纤感测 (DFOS) 技术能否利用一个钻孔精细化监测钻孔地层剖面变形分布的关键。利用自主研发的可控围压光缆-土体相互作用特性试验装置, 探究了 0~1.6 MPa 围压下传感光缆与松填砂土以及击实砂-黏混合土之间的耦合性。试验与理论分析结果表明: 在拉拔状态下, 光缆-土体界面呈现渐进性破坏特征; 在低围压下, 光缆轴向应变随拉拔位移的增大而增大, 且不断向光缆尾部传递; 在高围压下, 应变的扩展与传递被限制在很小的范围内; 理想弹-塑性拉拔模型可较好地描述光缆-土体界面的渐进性破坏特性。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, 将 10000 $\mu\epsilon$ 下的 ζ_{c-s} 值作为评价长期监测条件下两者耦合性的指标, 并根据 0.5, 0.75, 0.9 三个 ζ_{c-s} 值将两者的耦合性分为强、较强、较弱以及弱 4 类。一定围压下, 光缆与土体具有强耦合性; 对于松填砂土与击实砂-黏混合土, 该临界围压值分别为 0.55 MPa 与 0.17 MPa。以苏州盛泽地面沉降为例, 分析了钻孔回填料与传感光缆之间的耦合性, 结果表明: 距地表约 16 m 深度以内两者具有较强耦合性; 而约 16 m 深度以下两者具有强耦合性, 传感光缆的应变数据可准确反映地层的变形。这一研究成果为 DFOS 技术应用于钻孔剖面地面沉降监测提供了坚实的理论依据。

关键词: 地面沉降监测; 钻孔回填料; 传感光缆; 围压; 界面效应; 分布式光纤感测技术

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-1959-09

作者简介: 张诚成(1990-), 男, 江苏苏州人, 博士研究生, 主要从事工程地质和计算岩土力学研究。E-mail: cczhang@smail.nju.edu.cn。

Mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable

ZHANG Cheng-cheng¹, SHI Bin¹, LIU Su-ping¹, GU Kai¹, ZHANG Lei¹, WEI Guang-qing²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, China)

Abstract: The mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable is the key factor affecting distributed fiber-optic sensing (DFOS)-based land subsidence monitoring. A new pullout apparatus is designed to investigate the interaction mechanism between cable and soil under confining pressures (CPs) ranging from 0 to 1.6 MPa. The test results and analytical analyses show that the cable-soil interface fails progressively under pullout conditions. Under low CPs, the axial strain increases and propagates toward the cable toe under increasing pullout displacements. In contrast, the propagation of strain is restrained around the cable head under high CPs. The ideal elasto-plastic pullout model can reasonably describe the progressive failure behavior of the cable-soil interface. A new coefficient is proposed to characterize the cable-soil mechanical coupling for long-term monitoring purposes (the maximum axial strain of 10000 $\mu\epsilon$), together with a classification of the mechanical coupling based on this coefficient. The case of the Shengze land subsidence in Suzhou of China is presented to illustrate how these findings can be applied to the field. The analyses demonstrate the strong coupling of the cable to the borehole backfill below a depth of 16 m. It may provide a sound basis for monitoring land subsidence using the DFOS technique.

Key words: land subsidence monitoring; borehole backfill; fiber-optic sensing cable; confining pressure; interfacial effect; distributed fiber-optic sensing technique

0 引言

地面沉降是一种由地壳构造运动、新近沉积地层固结压缩、过量开采地下水/油气/矿产或建造超高层建筑等因素引起的地面标高缓慢降低的地质灾害^[1]。

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目 (41427801); 国家自然科学基金重点项目 (41230636); 国家自然科学基金青年基金项目 (41502274); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX17_0031); 国家留学基金项目 (201706190165)

收稿日期: 2017-08-29

***通讯作者** (E-mail: shibin@nju.edu.cn)

对地层变形实施有效的监测是深入理解地面沉降机理、预测以及防治地面沉降的重要途径。现有的地面沉降监测技术主要分为以下两类：以精密水准测量、全球定位系统、干涉合成孔径雷达等为代表的地表变形监测技术^[2]，以及以基岩标、分层沉降标为主的深部地层变形监测技术^[3]。这些技术可获取特定高程的地层变形，但均无法对钻孔地层剖面进行全断面、精细化的变形分布监测。

近 10 年来，分布式光纤感测 (Distributed fiber optic sensing, 简称 DFOS) 技术因具有分布式、长距离、抗电磁干扰、实时监测等优点而被应用于解决一系列地质和岩土工程问题^[4-6]。笔者所在的课题组从 2010 年起采用 DFOS 技术，通过钻孔监测苏锡常地区地面沉降取得了成功^[7]；其监测的基本思路是将应变传感光缆直接安装在数百米深的钻孔中，并采用砂-砾-黏土混合物将钻孔回填，待其固结稳定后便可进行钻孔地层剖面全断面的精细化变形分布监测 (见图 1)。与分层沉降标相比，这种技术具有极高的性价比，其分布式的测试成效是分层沉降标技术无法比拟的。

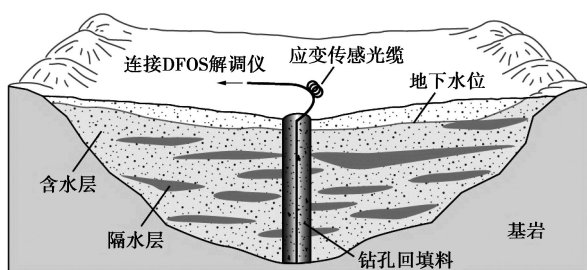


图 1 基于 DFOS 的钻孔地层剖面变形分布式监测示意图 (修改自文献[8])

Fig. 1 Schematic of distributed monitoring of stratum deformation in a borehole using DFOS technique (after Ref. [8])

在 DFOS 技术应用于钻孔地层剖面全断面的精细化变形分布监测中，钻孔中直埋布设的传感光缆与回填料之间的耦合性问题一直是科研工作者经常提出的问题^[7,9]。管振德等^[10]通过力学分析指出土体应变监测值与光缆-土体界面摩擦系数成正比。Iten^[11]、Zhang 等^[12]以及余骏宽等^[13]通过拉拔试验定量探究了低围压下光缆与土体之间的相互作用特性。最近，Zhang 等^[14]捕捉到了低围压下光缆-土体界面渐进性破坏过程中光缆的应变分布及其发展的全过程。

对于通过回填料埋入数百米深钻孔中的应变传感光缆，其承受的围压可从零变化至数兆帕。在这样的围压下，传感光缆与回填料之间的耦合关系，是决定 DFOS 技术能否有效地对钻孔地层剖面进行全断面精细化变形分布监测的关键，但目前尚未见到相关研究报道。为此，本文利用自主研制的可控围压光缆-土

体耦合性试验装置，揭示了 0~1.6 MPa 围压范围内光缆与土体的相互作用机理，提出了表征光缆与土体耦合性的新参数，论证了 DFOS 技术监测钻孔地层剖面全断面精细化变形分布的可行性和有效性。

1 光缆-土体耦合性试验

1.1 试验装置

研制了如图 2 所示的可控围压光缆-土体耦合性试验装置，主要由压力室、分布式光纤感测模块以及拉拔测试模块 3 部分组成。

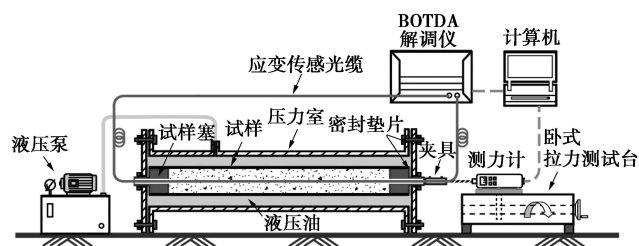


图 2 可控围压传感光缆-土体耦合性试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of confining pressure-controllable apparatus for testing fiber-optic cable-soil coupling

(1) 压力室。压力室为长 1 m、内径 15 cm 的空心圆柱体，柱身由特种钢制成，最高可承受 20 MPa 的压力。为保证压力室的密封性，在法兰盘与压力室的连接处以及固定螺帽与法兰盘的连接处均安装橡胶垫片。试验时在压力室中注满液压油，并通过液压泵向试样施加均匀的围压。

(2) 分布式光纤感测模块。将试样两端的自由段光缆接入日本 Neubrex 公司产的 NBX-6050A 型布里渊光时域分析仪 (Brillouin optical time-domain analyzer, 简称 BOTDA)。试验时，BOTDA 通过向光缆中注入短脉冲光和连续探测光，并测量光缆中背向受激布里渊散射光的频率改变量，从而实现沿光缆轴向应变的分布式测量^[11]。如无特殊说明，本文所提到的应变均指轴向应变。BOTDA 的空间分辨率和采样间隔分别设置为 0.1 m 和 0.05 m，应变测量范围为 -30000~+40000 $\mu\epsilon$ ，测量精度为 $\pm 7.5 \mu\epsilon$ 。

(3) 拉拔测试模块。采用特制夹具夹持埋入试样的光缆一端，并连接至卧式拉力测试台。测试台上安装有移动平台，其有效行程为 15 cm。通过平台的移动带动夹具前进，从而向光缆端部施加拉拔位移。测试台上安装有数显测力计，可测量试验过程中的拉拔力，其测量精度为 0.1 N。

1.2 试验材料与试样制备

试验所选用的砂土为级配不良中砂，其土粒比重 G_s 为 2.67，有效粒径 d_{10} 、平均粒径 d_{50} 和限制粒径 d_{60} 分别为 0.115, 0.331, 0.371 mm，不均匀系数 C_u 为 3.24，

曲率系数 C_c 为 1.63, 最优含水率 w_{opt} 为 8.17%, 最大干密度 ρ_{max} 为 1.83 g/cm^3 。试验所选用黏土为高岭土, 其主要化学成分为 SiO_2 与 Al_2O_3 , G_s 为 2.65, w_{opt} 为 15.5%, ρ_{max} 为 1.69 g/cm^3 , 液限 w_L 和塑限 w_P 分别为 34.6, 23.3。砂土与黏土按质量比 95:5 的配比制成砂-黏混合土。

试验所选用的光缆为聚氨酯低模态应变传感光缆, 其纤芯直径为 0.9 mm, 护套直径为 2 mm, 平均弹性模量为 0.37 GPa, 抗拉强度为 23.08 MPa, 有效刚度为 1.1 kN, 应变测试范围为 $-10000 \sim +20000 \mu\epsilon$ 。

试样的制备方法如图 3 (a) 所示。将长 1 m、直径 60 mm 的热缩管一头与试样塞连接, 并将应变传感光缆的一端穿过试样塞的小孔, 另一端则固定不动。在穿过试样塞的一端悬吊质量为 100 g 的砝码, 使光缆处于轻度拉伸状态, 预拉应变约为 $1000 \mu\epsilon$ 。对于砂-黏混合土样, 采用落锤击实法将土样分多层击实 (含水量为 8%, 密度为 1.85 g/cm^3); 对于松填砂土样, 则采用落砂法制备试样 (含水量为 0%, 密度为 1.70 g/cm^3)。制备完成的试样如图 3 (b) 所示。

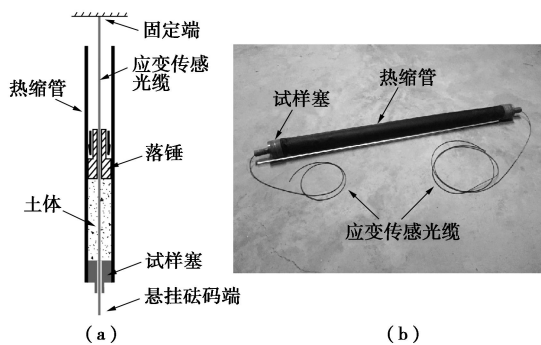


图 3 击实试样制备方法及制备完成的试样

Fig. 3 Detailed procedure for specimen preparation and a prepared specimen to be tested

1.3 试验方案与过程

采用拉拔试验对试样进行测试。试验采用逐级施加拉拔位移的方式进行, 位移增量为 0.973 mm, 拉拔速率为 0.1 mm/s。每级位移下均采用 BOTDA 采集沿光缆的应变分布。由于该光缆的应变测试范围为 $-10000 \sim +20000 \mu\epsilon$, 为保证应变测量结果的可靠性, 试验过程中应控制应变值不超过 $20000 \mu\epsilon$ (对应拉拔力为 23.2 N)。当达到以下任一条件时则该次试验终止: ①光缆-土体界面破坏、光缆被完全拔出; ②光缆应变值达到 $20000 \mu\epsilon$ 。试验在控温环境下进行, 整个试验过程中温度变化不超过 0.5°C , 因此无需对试验结果进行温度补偿。

对 1.2 节所述的两种试样 (松填砂土样与击实砂-黏混合土样) 进行试验, 探究 9 种不同围压 (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 MPa) 条件下光缆

拉拔力-拉拔位移关系以及沿光缆的应变分布及其发展过程, 总计 18 组试验。

2 试验结果

2.1 试验结果有效性验证

采用如下公式计算悬空段光缆的轴力值 F :

$$F = EA\varepsilon \quad (1)$$

式中, E , A 分别为光缆的平均弹性模量与截面积, ε 为测得的光缆轴向应变。将计算值与测力计测得的拉拔力进行对比, 结果如图 4 所示。由图可知, 两者之间吻合得很好, 这表明本文采用的试验设置是可靠的, 试验中测得的沿光缆轴向的应变分布数据是准确的。

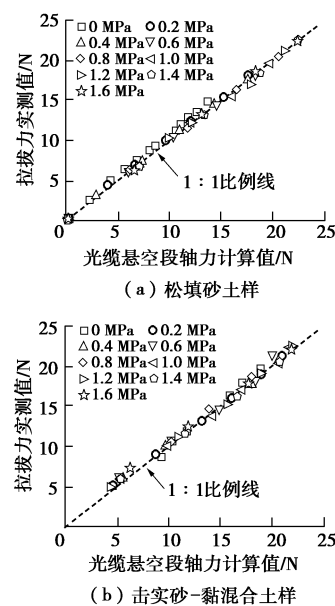


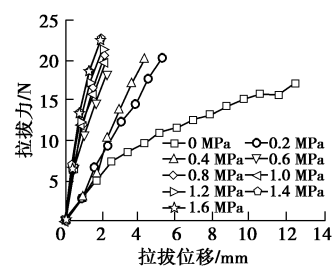
图 4 光缆悬空段轴力计算值与拉拔力实测值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured forces

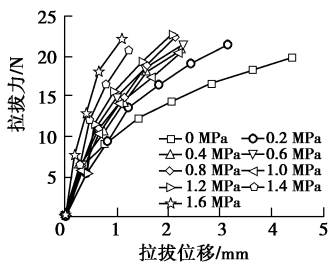
2.2 拉拔力-位移曲线与应变分布曲线

图 5 给出了不同围压下松填砂土样与击实砂-黏混合土样中光缆的拉拔力-拉拔位移曲线。由于悬空段光缆在拉拔力作用下会有一定程度的弹性拉伸, 因此图 5 给出的位移为实测位移值减去各级拉拔位移下悬空段光缆的拉伸量。各级试验中拉拔力随着拉拔位移的增大而不断增大, 且围压越大达到某级拉拔位移所需的拉拔力也越大^[12]。但与文献[12]不同的是, 拉拔力-拉拔位移曲线未出现明显的拐点, 呈应变硬化型。除零围压下的松填砂土样外, 其余各组试验均以满足 1.3 节所述的条件②而终止。

光缆在两种土样中拉拔时轴向应变的分布及其发展过程如图 6, 7 所示。因篇幅所限, 此处仅列出 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 MPa 围压下的试验曲线。对于零围压下的松填砂土, 应变随拉拔位移的增大而增大, 且不断向光缆尾部扩展, 最终完全贯通 (见图 6 (a))。这表明光缆-土体界面呈明显的渐进性破坏特征^[14]。



(a) 松填砂土样

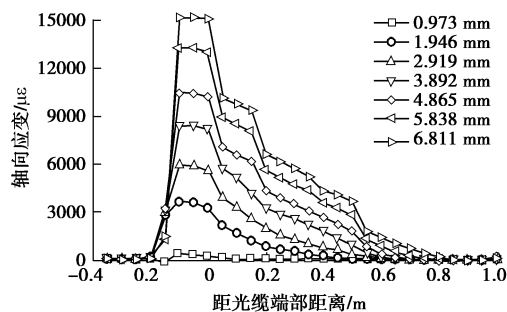


(b) 击实砂-黏混合土样

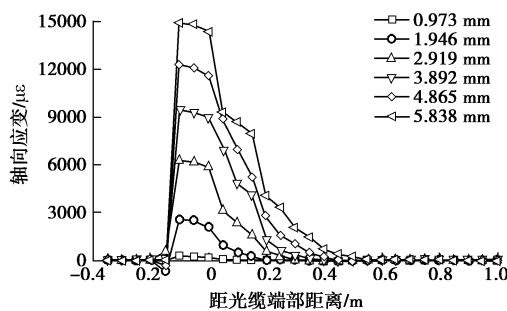
图5 不同围压作用下拉拔力-拉拔位移曲线

Fig. 5 Curves of pullout force versus pullout displacement under different confining pressures

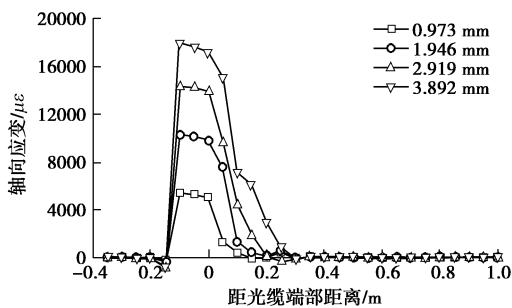
尾端的应变值不为 0, 这是由于受空间分辨率以及光缆连续性的影响, 应变会“刺入”邻近光缆段 (其影响范围约为一倍空间分辨率所对应的长度, 即 0.1 m)。在一定围压下光缆-土体界面仍服从这种渐进性破坏模式, 但应变不能传递至光缆尾部, 且最终扩展的深度随围压的增大而减小 (见图 6 ((b) ~ (e)))。在高围压下, 应变的扩展与传递被限制在很小的范围内 (0.2 m)。这说明光缆-土体界面处仅有局部剪应力被调动起来抵抗施加的拉拔力。对于击实砂-黏混合土样中的拉拔, 沿光缆的应变分布及其发展过程与上述规律相似, 不同之处在于: ①在零围压下, 光缆-土体界面呈局部化的渐进破坏特征, 应变分布没有扩展至光缆尾部 (见图 7 (a)); ②在 0.2~1.6 MPa 围压下, 应变的扩展与传递被限制在 0.1~0.15 m 的范围内。考虑到 0.1 m 的“刺入”距离, 图 7 的结果表明在 0.2~1.6 MPa 围压下, 应变几乎不向击实砂-黏混合土样内部传递。



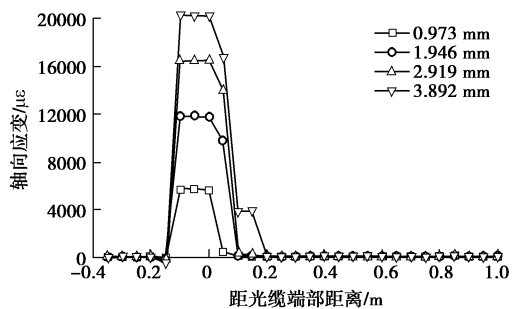
(b) 围压0.2 MPa



(c) 围压0.4 MPa



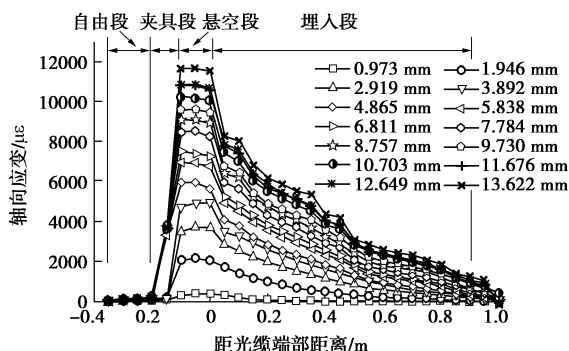
(d) 围压0.8 MPa



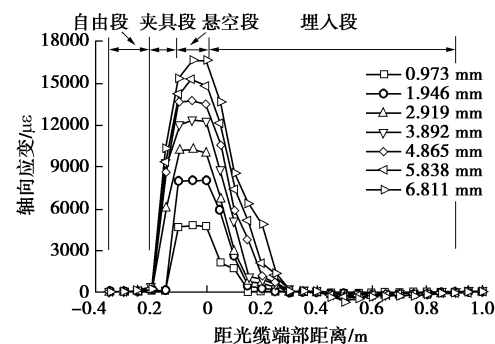
(e) 围压1.6 MPa

图6 光缆在松填砂土中拉拔时的应变分布曲线

Fig. 6 Distribution of axial strain along the fiber-optic cable during pullout in loosely filled sand



(a) 围压0 MPa



(a) 围压0 MPa

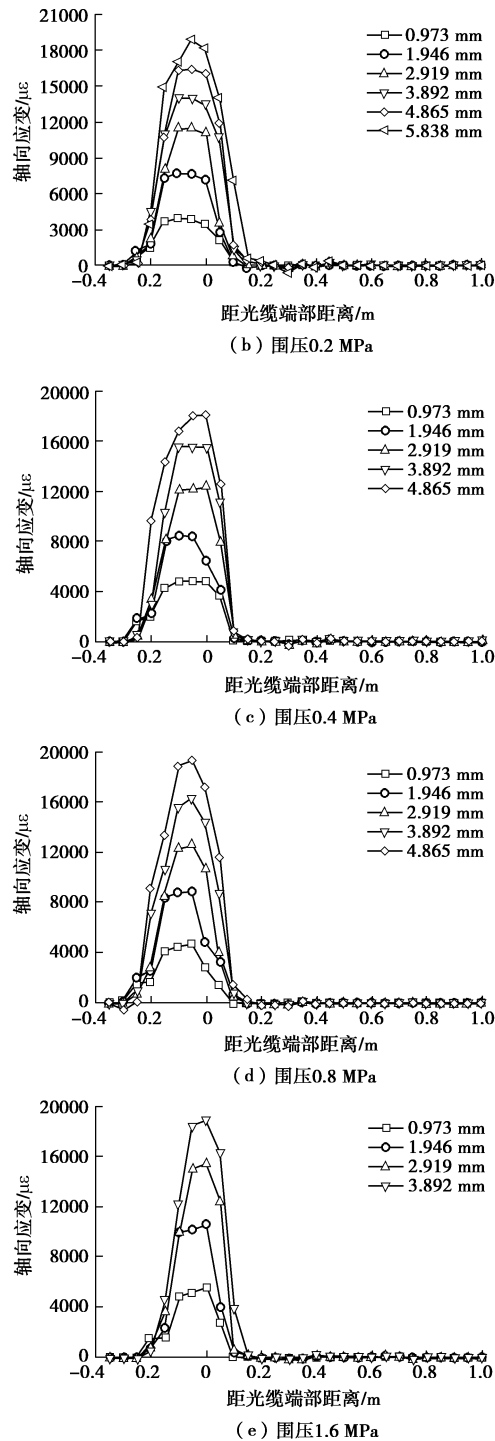


图 7 光缆在击实砂-黏混合土中拉拔时的应变分布曲线
Fig. 7 Distribution of axial strain along fiber-optic cable during pullout in compacted sand-clay mixture

3 讨 论

3.1 光缆-土体界面力学行为

拉拔力-位移曲线是土体加筋材料(如锚杆、土钉、土工格栅等)拉拔试验最基本的结果,也是描述土体加筋材料拉拔特性最直观的方式。基于拉拔试验,前人提出了一系列土体加筋材料拉拔力学模型,如弹性模型、弹-塑性模型、双曲线模型、双折线模型等。

这些模型通常由拉拔力-位移曲线所验证,或辅以应变片、钢筋应力计测得的应变、轴力数据。由于大量布置应变片、钢筋应力计会同时对土体、加筋材料的力学特性产生干扰,因此难以获取沿加筋材料轴向完整的应变分布。本文基于 BOTDA,以 10 cm 空间分辨率和 5 cm 采样间隔捕捉到了不同围压下光缆在拉拔过程的应变分布及其发展过程。因为光缆既是传感器也是拉拔构件,所以避免了安装大量应变片、钢筋应力计等量测元件带来的扰动。高分辨率的应变分布曲线有助于我们深入理解土-结构相互作用机理,也可以进一步验证前人提出的界面力学模型。

Zhang 等^[14]提出了一个可描述光缆-土体界面渐进性破坏的拉拔模型。该模型基于界面剪应力-剪应变的理想弹-塑性模型,将光缆在土体中的拉拔破坏过程分为纯弹性、弹-塑性以及纯塑性 3 个阶段,其拉拔力 P 与位移 u_0 的关系如下^[14]:

$$P = \begin{cases} \frac{\pi D G^*}{\beta} \tanh(\beta L) u_0 & (\text{纯弹性阶段}) \\ -\frac{AE}{L_p} \left(u_0 + \frac{\tau_{\max}}{G^*} \right) + \frac{\pi D}{2} L_p \tau_{\max} & (\text{弹-塑性阶段}) \\ \pi D \tau_{\max} L & (\text{纯塑性阶段}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 D 、 L 分别为光缆的直径与埋入长度; G^* 为光缆-土体界面剪切系数; τ_{\max} 为界面抗剪强度; L_p 为界面破坏过程中塑性段的长度; β 为一系数, $\beta = \sqrt{4G^*/ED}$ 。各阶段应变沿光缆分布的表达式为^[14]

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} \frac{P}{AE} \frac{\sinh \beta(L-x)}{\sinh \beta L} & (\text{纯弹性阶段}) \\ \frac{F_T}{EA} \frac{\sinh \beta(L-x)}{\sinh \beta(L-L_p)} & \left(\begin{array}{l} \text{弹-塑性阶段之} \\ \text{弹性段} \end{array} \right) \\ \frac{4\tau_{\max}}{DE} (L_p - x) + \frac{4F_T}{\pi DE} & \left(\begin{array}{l} \text{弹-塑性阶段之} \\ \text{塑性段} \end{array} \right) \\ \frac{4\tau_{\max}}{DE} (L - x) & (\text{纯塑性阶段}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 x 的取值范围为 $0 \sim L$; 弹-塑性阶段弹性、塑性段的范围分别为 $L_p \sim L$ 、 $0 \sim L_p$; F_T 定义为 $F_T = \pi D \tau_{\max} / \beta \tanh \beta(L-L_p)$, 为弹性段与塑性段转折点处的轴力。光缆-土体界面界面剪应力则可通过下式求解: $\tau = -0.25ED\dot{\varepsilon}$ 。

采用该模型对本文试验结果进行模拟。输入参数中, D 、 L 、 A 为光缆真实尺寸, 分别为 2×10^{-3} 、 9.1×10^{-1} 、 $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; E 为由单轴拉伸试验测得的光缆弹性模量, 为 0.37 GPa; 各级围压下的 G^* 与 τ_{\max} 值则列于表 1 中。其中, G^* 通过式 (2) 中纯弹性阶段拉拔力-位移关系式并结合实测曲线的初始段确定, τ_{\max} 则由拟合获得。部分模拟结果如图 8 所示。

表 1 模拟光缆在击实砂-黏混合土中拉拔时所用参数

Table 1 Parameters of cable-soil interface used in simulation

围压/MPa	$G^*/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$\tau_{\text{max}}/\text{kPa}$
0	57.84	7.20
0.2	23.02	10.70
0.4	80.26	13.90
0.6	60.70	15.70
0.8	56.90	16.96
1.0	36.48	17.82
1.2	58.90	18.98
1.4	79.98	27.56
1.6	269.34	31.02

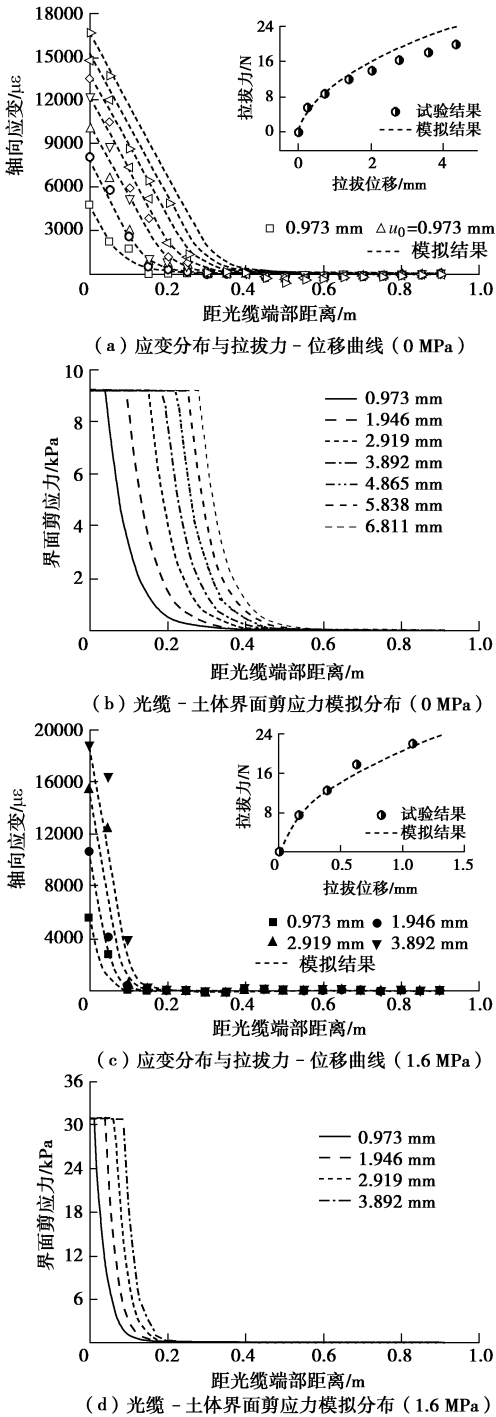


图 8 光缆在击实砂-黏混合土中拉拔的模拟结果

Fig. 8 Simulated results for pullout of fiber-optic cable in compacted sand-clay mixture

3.2 光缆-土体耦合性表征

对于抗拉强度较大的土体加筋材料,通常可通过拉拔试验得到最大拉拔力,继而求出加筋材料-土体界面的平均抗剪强度,以表征两者之间的黏结强度。但对于抗拉强度较小的光缆,一方面拉拔试验的进程会受光缆量程所限,不一定能获得光缆的极限抗拔力(见图 5);另一方面,光缆-土体界面抗剪强度难以直接用于评价土体应变监测结果的可靠性。Zhang 等^[12]提出采用有效位移(即光缆-土体界面处于弹性变形阶段时两者之间的最大相对位移)评价光缆可测土体的变形范围。但这种方法在这里并不适用,因为力-变形曲线无明显拐点(见图 5)。此外,Zhang 等^[12,14]提出了一种基于应变梯度的光缆-土体界面应力状态估算方法。当力-变形曲线呈应变软化型时,采用该方法求解界面应力状态存在多解性,因此这种方法要求对土体的变形进行实时监测。

为此,本文提出了两个表征光缆-土体耦合性的新参数:应变传递深度 d_e 和光缆-土体耦合系数 ζ_{c-s} 。应变传递深度 d_e 定义为一次拉拔试验中,光缆轴向应变从端部向尾部传递的最远距离。显然,光缆-土体耦合性越好,则应变传递深度越小。当光缆与土体间完全耦合时,光缆“固化”于土体中, d_e 达到最小值。此时,土体相当于一个夹紧埋入段光缆的长夹具,光缆在土体中的拉拔试验也转化为对 0.1 m 悬空段光缆开展的单轴拉伸试验。对于某一级围压下最大拉拔位移所对应的应变分布曲线,将曲线上出现明显拐点所对应的距离确定为该围压下的应变传递深度 d_e 。考虑到应变“刺入”效应,该值还应减去一倍空间分辨率所对应的长度(0.1 m),最终得到各级围压下的应变传递深度 d_e (见图 9)。对于松填砂土, d_e 值随着围压的增大而减小,表明松填砂土-光缆的耦合性随围压增大而提高。对于击实砂-黏混合土, d_e 值在零围压下仅为 0.2 m,且在 0.2 MPa 下便接近于 0。这表明光缆与击实砂-黏混合土具有很强的耦合性。

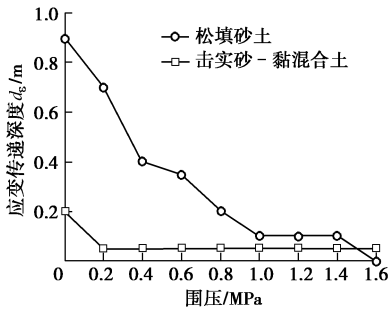


图 9 围压对应应变传递深度 d_e 的影响

Fig. 9 Effect of confining pressure on propagation length of strain

光缆-土体耦合系数 ζ_{c-s} 则定义为一次拉拔试验中,单位长度光缆(1 m)轴向应变 $\epsilon(x)$ 的积分与作用于光缆端部的拉拔位移 u_0 之比,即

$$\zeta_{c-s} = \frac{\int \varepsilon(x) dx}{u_0} \quad (4)$$

光缆 - 土体耦合性越强, 则光缆与土体之间的相对错动越小, ζ_{c-s} 值也越大。当光缆与土体完全耦合时, ζ_{c-s} 值等于 1。需要注意的是, 由于光缆应变“刺入”效应的存在, 实际计算的 ζ_{c-s} 值偏大, 存在略大于 1 的情况。采用式 (4) 计算各级围压下 ζ_{c-s} 值, 结果如图 10 所示。注意该值不仅受围压影响, 且与光缆 - 土体相对位移量有关。图 10 中每级围压下的数据点为各级拉拔位移下 ζ_{c-s} 计算值的均值, 误差棒表示 90%置信区间。对于松填砂土, 0~0.4 MPa 围压下的 ζ_{c-s} 值为 0.5 左右, 其后 ζ_{c-s} 值达到 1 并维持稳定。相较而言, 击实砂 - 黏混合土在零围压和 0.2 MPa 围压下的 ζ_{c-s} 值分别达到 0.79 和 0.88 (为松填砂土的 1.5 倍以上), 且 ζ_{c-s} 值在 0.4 MPa 下即接近 1。应注意在高围压下松填砂土样的密实度也会进一步增大, 从而大大增强其与光缆的耦合性。图 10 的结果表明土体性质对光缆 - 土体耦合性的影响主要表现在 0.6 MPa 围压范围内, 在更高围压下则无影响 (ζ_{c-s} 值接近 1)。

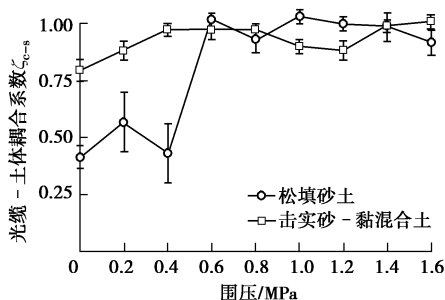


图 10 围压对各级位移下光缆 - 土体耦合系数 ζ_{c-s} 均值的影响
Fig. 10 Effect of confining pressure on mean coefficient of cable-soil coupling under different displacement steps

对于地面沉降等地层变形监测, 考虑到光缆的工作性能通常将 10000 $\mu\epsilon$ 作为长期监测的最大应变值。因此, 应将该值对应的 ζ_{c-s} 值作为评价长期监测条件下光缆 - 土体耦合性的指标 (图 11)。基于本文的分析结果, 建议采用表 2 所示的划分标准评价光缆 - 土

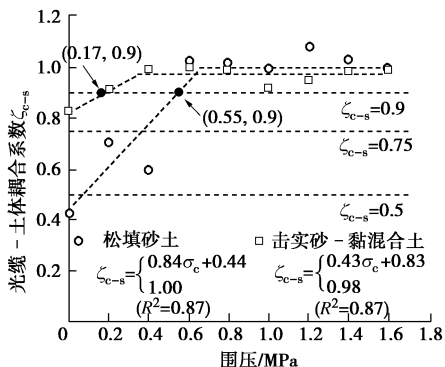


图 11 考虑长期监测的各级围压下光缆 - 土体耦合系数 ζ_{c-s}
Fig. 11 Coefficient of cable-soil coupling under each confining pressure considering long-term deformation monitoring

表 2 光缆 - 土体耦合性划分建议
Table 2 Recommendations on classification of cable-soil coupling

光缆 - 土体耦合系数 ζ_{c-s}	光缆 - 土体耦合性
0.9~1.0	强
0.75~0.9	较强
0.5~0.75	较弱
0~0.5	弱

体耦合性。图 11 的结果表明, 0.55 MPa 围压以上松填砂土 - 光缆耦合性强; 对于击实砂 - 黏混合土, 0.17 MPa 围压以下光缆 - 土体耦合性较强, 而 0.17 MPa 围压以上两者耦合性强。

3.3 对于地面沉降监测的启示

如图 1 所示, 将应变传感光缆直接埋入数百米深的钻孔中并回填适当的回填料, 待其固结稳定后便可实现地层变形的分布式、精细化监测, 其中回填料与光缆间的耦合性对监测结果具有重要影响^[7]。本文试验结果表明, 光缆与土体间的耦合性与围压水平密切相关 (图 11)。为简便起见, 这里认为作用于光缆上的水平向应力 σ_h 与土层环向自重应力相等^[15]:

$$\sigma_h = K_0 \gamma z \quad (5)$$

式中 z 为深度; γ 为土层重度; K_0 为静止侧压力系数, 对于砂土和正常固结黏土可分别由下式估算^[15]:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (6)$$

$$K_0 = 0.44 + 0.42 \left(\frac{I_p (\%) }{100} \right) \quad (7)$$

式中, φ' 为有效内摩擦角, I_p 为塑性指数。通过求解 σ_h 随深度的分布并结合 ζ_{c-s} 与围压的定量关系 (见图 11), 便可确定应变监测结果有效段的范围。

以苏州盛泽地面沉降为例, 说明本文试验与讨论结果在实际监测中的应用。苏州盛泽地面沉降为抽取地下水 (主要为图 12 (a) 中的第 II 含水层) 引起的含水层系统长期变形沉降。课题组在苏州盛泽中学 (北纬 39°53'23.96"N, 东经 120°40'47.11"E) 建立了一个地面沉降监测钻孔, 其中布设了 2 mm 直径应变传感光缆, 并回填了砂 - 砾 - 黏土混合料^[7]。待回填料充分固结变形后实施地层变形的分布式监测, 部分监测数据如图 12 (b) 所示。此外, 对钻孔所取原状样进行室内土工试验, 得到各土层的重度、塑性指数等物理、力学参数 (因篇幅所限不详细列出)。

采用式 (5) 对作用于光缆上的水平向应力 σ_h 进行估算 (见图 12 (c))。由于该钻孔在回填料经过一个月的充分固结后方采集光缆应变数据, 因此可认为回填料与光缆间的耦合性与本文击实砂 - 黏混合土样的试验结果更为接近。图 12 (c) 的结果表明距地表约 16 m 以下光缆 - 钻孔回填料耦合系数 $\zeta_{c-s} > 0.9$, 说明钻孔回填料与光缆耦合性强, 光缆应变监测数据可

准确反映地层的变形。而约 16 m 深度以内两者耦合性较强, 光缆应变监测数据可以在一定程度上反映地层的变形趋势。对于浅表地层围压较低的情况, 一方面可根据 ζ_{cs} 值对应变监测数据进行修正, 另一方面可考虑在光缆表面制作锚固点以提高光缆与钻孔回填料之间的耦合性, 从而提高应变监测数据的质量。

应注意本文试验所用土体与苏州盛泽地面沉降钻孔砂-砾-黏土混合回填料成分并不完全一致。虽然本文试验结果初步表明土体性质对光缆-土体耦合性的影响主要表现在一定围压范围内, 且本文选取与野外钻孔回填料性质更为接近的击实砂-黏混合土样试验结果进行分析, 但计算所得两者具有强耦合性的临界地层深度值仍可能有一定误差。有关土性参数(尤其是与野外钻孔相对应的砂-砾-黏土回填料)对光缆-土体耦合性的影响有待开展更多的试验研究。在野外, 通常根据地质体特点和不同地质条件选用合适的应变传感光缆进行监测。不同光缆通常具有不同的结构与刚度, 如金属基索状应变传感光缆通过多股金属加强件保护光纤, 以适应各种恶劣的工况; 定点式应变传感光缆则通过内定点设计, 实现空间非连续非均匀应变分段测量。这些特殊的结构如何影响光缆-钻孔回填料耦合性和光缆应变传递性能则有待于未来开展更为深入的研究。此外, 钻孔回填料能否与周围地层耦合变形也是一值得探究的课题。

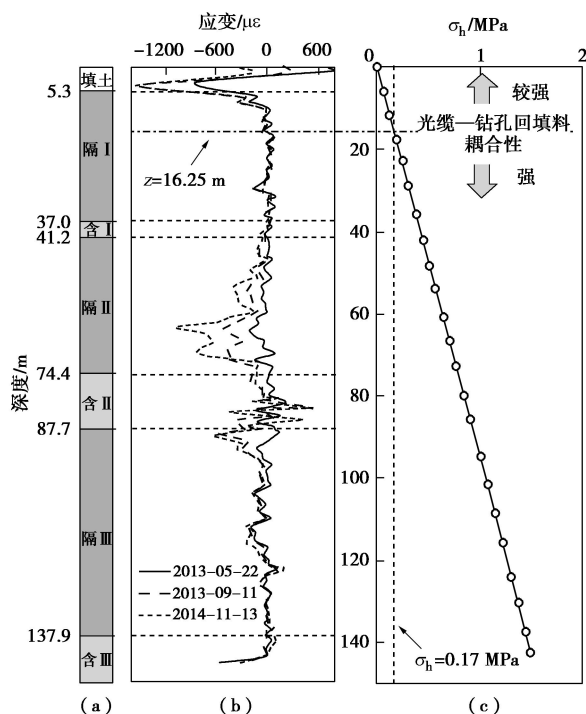


图 12 苏州盛泽地区含水层与隔水层简化分布图、地面沉降分布式监测曲线以及地层围压计算值 ((a)、(b) 修改自文献[7])
Fig. 12 Simplified stratum profile, distributed strain measurements and calculated confining pressure for Shengze land subsidence in Suzhou of China ((a) and (b) are after Ref. [7])

4 结 论

本文利用自主研发的可控围压应变传感光缆-土体相互作用特性试验装置, 探究了两种土样(松填砂土与击实砂-黏混合土)和 9 种围压(0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 MPa)下光缆与土体之间的耦合性, 得到以下 5 点结论。

(1) 在拉拔状态下, 光缆-土体界面呈现渐进性破坏特征, 且与围压水平密切相关: 在低围压下, 光缆轴向应变随拉拔位移的增大而增大, 且不断向光缆尾部传递; 随着围压的增大, 应变传递深度减小; 在高围压下, 应变的扩展与传递被限制在很小范围内。

(2) 采用理想弹-塑性拉拔模型描述光缆-土体界面的渐进性破坏特性, 模型模拟结果与试验所得拉拔力-位移曲线以及应变分布曲线均吻合得较好。

(3) 提出采用光缆-土体耦合系数 ζ_{cs} 定量描述光缆与土体间的耦合性, 建议将 10000 $\mu\epsilon$ 下的 ζ_{cs} 值作为评价长期监测条件下光缆-土体耦合性的指标, 并根据 0.5, 0.75, 0.9 三个 ζ_{cs} 值将两者的耦合性分为强、较强、较弱以及弱 4 类。

(4) 一定围压下, 光缆与土体具有强耦合性。对于松填砂土和击实砂-黏混合土, 该临界围压值分别为 0.55, 0.17 MPa。

(5) 对苏州盛泽地面沉降钻孔回填料与光缆间耦合性的分析表明, 距地表约 16 m 深度以内两者耦合性较强; 而约 16 m 深度以下两者耦合性强, 光缆的应变数据可准确反映地层的变形。

致 谢: 南京大学朱鸿鹄博士提供了部分试验仪器, 张丹博士、朱鸿鹄博士以及博士生吴静红参与了讨论并提出了宝贵的修改意见, 刘春博士、王兴博士、硕士生张松、冯晨曦以及陈嘉傲在试验过程中提供了热心的帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 薛禹群, 张 云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585 - 593. (XUE Yu-qun, ZHANG Yun, YE Shu-jun, et al. Land subsidence in China and its problems[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 585 - 593. (in Chinese))
- [2] AMELUNG F, GALLOWAY D L, BELL J W, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation[J]. Geology, 1999, 27(6): 483 - 486.
- [3] 叶淑君, 薛禹群, 张 云, 等. 上海区域地面沉降模型中土

- 层变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 140 - 147. (YE Shu-jun, XUE Yu-qun, ZHANG Yun, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 140 - 147. (in Chinese))
- [4] 刘 杰, 施 斌, 张 丹, 等. 基于 BOTDR 的基坑变形分布式监测实验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(7): 1224 - 1229. (LIU Jie, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Experimental study of foundation pit monitoring using BOTDR-based on distributed optical fiber sensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(7): 1224 - 1229. (in Chinese))
- [5] MOORE J R, GISCHIG V, BUTTON E, et al. Rockslide deformation monitoring with fiber optic strain sensors[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, **10**(2): 191 - 201.
- [6] MOHAMAD H, SOGA K, BENNETT P J, et al. Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **138**(8): 957 - 967.
- [7] WU J, JIANG H, SU J, 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.
- [8] GALLOWAY D, JONES D R, INGEBRITSEN S E. Land subsidence in the United States[M]. Denver: US Geological Survey Circular 1182, 1999.
- [9] ZHANG C C, ZHU H H, LIU S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements[J]. Engineering Geology, 2018, **234**: 83 - 96.
- [10] 管振德, 蒋小珍, 高 明. 岩溶塌陷光纤传感试验装置的标定试验[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(2): 173 - 178. (GUAN Zhen-de, JIANG Xiao-zhen, GAO Ming. A calibration test on optical fiber sensing device for karst collapse monitoring[J]. Carsologica Sinica, 2012, **31**(2): 173 - 178. (in Chinese))
- [11] ITEN M. Novel applications of distributed fiber-optic sensing in geotechnical engineering[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, 2011.
- [12] 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.
- [13] 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 Jun-kuan, ZHU Hong-hu, ZHANG Cheng-cheng, 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))
- [14] 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.
- [15] DAS B M. Principles of geotechnical engineering[M]. 7 ed. Stamford: Cengage Learning, 2010.