

DOI: 10.11779/CJGE201909011

地面沉降分布式光纤监测土-缆耦合性分析

张诚成^{1,2}, 施斌^{1*}, 朱鸿鹄¹, 魏广庆³

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 加州大学伯克利分校土木与环境工程系, 美国 伯克利 94720;

3. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215123)

摘要: 地层、钻孔回填材料和传感光缆之间的耦合性是决定地面沉降钻孔全剖面分布式光纤监测精度的关键因素。提出了地层-钻孔回填材料-传感光缆耦合性的明确定义和地层变形光纤监测数据有效性的评价方法。地层、回填材料和传感光缆达到完全耦合应满足两个条件: 地层-回填材料界面与回填材料-传感光缆界面剪应力均不能超过其抗剪强度; 地层应变能有效地传递至纤芯。提出了回填材料与传感光缆处于黏结状态的临界围压与临界深度; 传感光缆弹性模量、半径或最大应变梯度越小, 则临界围压或深度也越小; 当回填材料、传感光缆及其界面参数确定时, 临界围压或深度仅与最大应变梯度有关。基于经典应变传递模型与 Goodman 假设建立了地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递模型, 并研究了传感光缆、回填材料以及地层性质对应变传递特性的影响, 结果表明: 传感光缆半径和弹性模量、钻孔半径、地层剪切模量越小, 或回填材料剪切模量、地层-回填材料界面黏结系数越大, 则应变传递性能越好; 围压对应变传递特性的影响则取决于回填材料与地层参数之间的相对关系。最后, 采用苏州盛泽地面沉降光纤监测数据验证了该评价方法的有效性。研究结果为钻孔地层剖面的全剖面、精细化分布式光纤监测提供了理论依据。

关键词: 地层变形; 分布式光纤感测技术; 耦合性; 界面抗剪强度; 应变传递

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1670-09

作者简介: 张诚成(1990—), 男, 博士, 特任助理研究员, 主要从事地质工程监测与评价、计算岩土力学等方面的研究。E-mail: zhang@nju.edu.cn。

Theoretical analysis of mechanical coupling between soil and fiber optic strain sensing cable for distributed monitoring of ground settlement

ZHANG Cheng-cheng^{1,2}, SHI Bin¹, ZHU Hong-hu¹, WEI Guang-qing³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Civil and Environmental

Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720, USA; 3. Suzhou NanZee Sensing Technology Ltd., Suzhou 215123, China)

Abstract: The mechanical coupling between soil and fiber optic cable is vital to the validity of ground settlement data monitored using distributed fiber optic sensing (DFOS). Here a perfect stratum-backfill-cable coupling is clearly defined—the interface shear stresses do not exceed the strengths, and the strain transfers efficiently from the strata to the fiber core. The critical confining pressure and the critical depth are proposed to characterize the backfill-cable interface adhesion. The cable with a low Young's modulus or a small radius corresponds to a low critical confining pressure or depth. Given the backfill and cable properties are known, the critical confining pressure or depth is solely dependent on the maximum strain gradient. Based on the classical strain transfer model and the Goodman's hypothesis, a theoretical model is established to quantify the stratum-backfill-cable strain transfer efficiency. A comprehensive parametric analysis is carried out to investigate the influences of cable, backfill and strata properties on the strain transfer coefficient. Finally, the proposed method is validated using the field monitoring data collected from a DFOS-instrumented borehole in Shengze (Suzhou, China). This study may provide a sound basis for monitoring the ground settlement using the DFOS technique.

Key words: stratum deformation; distributed fiber optic sensing technique; coupling; interface shear strength; strain transfer

0 引言

地面沉降是由地质作用、地下资源开采或地下工程造成的地面标高降低的现象^[1]。地面沉降可造成一

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); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0031); 南京大学博士研究生创新创业研究计划项目(CXCY17-24); 国家留学基金项目(201706190165)

收稿日期: 2018-11-25

*通讯作者(E-mail: shibin@nju.edu.cn)

系列环境与经济问题^[1], 例如地面不均匀沉降易造成建筑物墙体开裂, 引发路基、隧道、桥基等基础工程不均匀下沉, 威胁火车、地铁、桥梁、地下管网等的运营安全。目前, 地面沉降监测技术主要分为基于空间的监测技术(如 InSAR、LiDAR、GNSS 等)和基于地面的监测技术(如水准测量、基岩标、分层标等)两大类^[2]。其中分层标虽能获得主要地层的变形情况, 但无法对地下变形实施分布式、精细化的监测。

分布式光纤感测(DFOS)技术是一种以光为载体、传感光缆为媒介, 对沿传感光缆长度方向的应变、温度、振动等参量进行分布式测量的新型监测技术。DFOS 技术因其长测距、分布式的优点而在地质和岩土工程领域具有广阔的应用前景^[3], 尤其在沉降监测中显示出了独特的优势^[4-9]。如图 1 所示, 将传感光缆布设于垂直钻孔中, 可对钻孔地层剖面进行全剖面、精细化的变形分布监测^[6]; 与传统分层标相比, 采用该技术可节省 70%~80% 的监测成本。

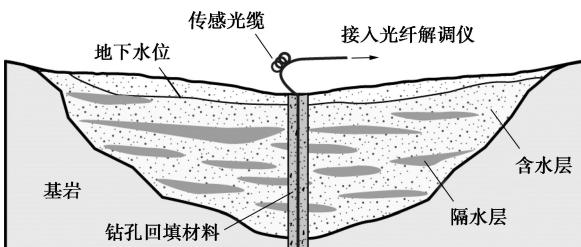


图 1 地面沉降分布式光纤监测示意图

Fig. 1 Schematic of DFOS-based ground settlement monitoring

在应用 DFOS 技术精细化监测地面沉降的过程中, 地层、钻孔回填材料和传感光缆之间的耦合性是决定钻孔全剖面变形监测精度的关键因素。从地层到传感光缆存在地层-回填材料以及回填材料-传感光缆两个界面及其界面效应(图 2), 那么地层产生的变形能否被传感光缆监测到? 文献[10~12]基于剪切滞后理论, 建立了传感光缆内部层间应变传递模型。Xiang 等^[13]基于 Goodman 假设分析了路面健康监测中沥青-保护层-光纤的应变传递特性。Zhang 等^[14-15]建立了土体-传感光缆界面力学模型, 并研究了界面的渐进性破坏特性。张丁丁等^[16]建立了准分布式光纤光栅传感器应变传递模型, 研究了钻孔半径及回填材料对松散地层至光纤光栅应变传递性能的影响。张诚成等^[17]通过试验发现了传感光缆在钻孔回填材料中拉拔耦合的临界围压值。

本文从地面沉降分布式光纤监测出发, 对地层、钻孔回填材料和传感光缆之间的耦合性进行了系统的研究。厘清了地层-回填材料-传感光缆耦合性的定义并提出了相应的光纤监测数据评价方法; 提出了决定回填材料-传感光缆界面黏结性的临界围压和临界深度, 研究了应变梯度与光缆性质对界面黏结性的影响; 基于经典应变传递模型建立了地层-回填材料-传感光

缆应变传递模型, 并分析了传感光缆、回填材料和地层性质以及地层围压对应变传递特性的影响; 最后, 将本文提出的分析方法应用于苏州盛泽沉降钻孔光纤监测数据的评价。研究结果对于地面沉降钻孔全剖面分布式光纤监测具有指导意义。

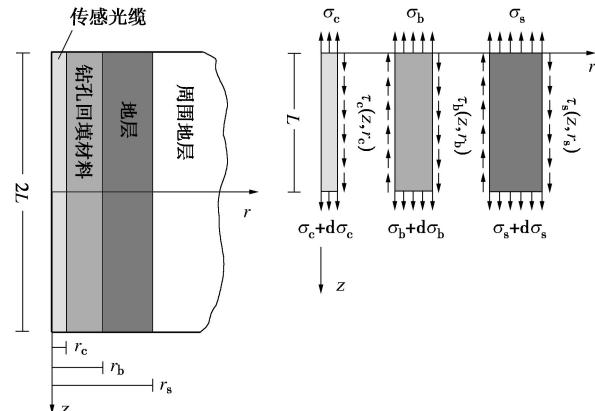


图 2 地层-钻孔回填材料-传感光缆相互作用示意图

Fig. 2 Schematic of stratum-backfill-cable interaction

1 地层-钻孔回填材料-传感光缆耦合性定义及其评价方法

在土木工程结构健康监测中, 传感光缆通常通过黏结剂粘贴于结构物表面。与结构健康监测相比, 地质和岩土体的分布式光纤监测有如下特点(以地层竖向变形监测为例):①传感光缆竖直埋入钻孔中并回填适当的回填材料, 不使用黏结剂, 其与地层压缩或回弹变形间的耦合性未知; ②地层变形不均匀且变形范围大, 当其变形量较大时, 可能导致光缆与周围土体发生滑移; ③地层围压沿深度变化很大, 如对于 200 m 深的钻孔, 围压可从零增大至几兆帕。

针对地质和岩土工程监测的特点, 在地层发生一维变形假设的前提下, 作者认为地层、钻孔回填材料和传感光缆间达到完全耦合应满足两个条件:①地层-回填材料界面与回填材料-传感光缆界面剪应力均不能超过其抗剪强度; ②地层应变能有效地传递至纤芯。基于这一认识, 地层变形光纤监测数据有效性评价也应分两步进行: 首先判断地层与回填材料以及回填材料与传感光缆间是否发生了滑移; 若两者均未发生滑移, 再计算相应的应变传递系数。第 2, 3 两节将分别对这两个问题进行分析和探讨。需要注意的是, 由于光纤的弹性极限仅为 1%~1.5%, 并不适用于监测高压缩性地层的沉降变形, 本文的分析不考虑压缩性强地层沉降等特殊工况。

2 地层-钻孔回填材料-传感光缆界面的黏结性

传感光缆的弹性模量通常在 0.3~75 GPa 之间,

与土体的模量有较大差异，两者之间容易发生滑移，因此本节主要分析传感光缆与回填材料间的黏结性。

试验结果表明，在不同土质条件下，土体–传感光缆界面具有应变软化或应变硬化特征^[14–15]。当土体–传感光缆界面的应力–应变曲线呈应变软化型时，存在峰值抗剪强度和临界状态抗剪强度两个特征强度。虽然剪应力达到峰值抗剪强度后，土体与传感光缆间仍有一定的黏结力，但光纤监测数据的可靠性无法得到保证，因此此处不考虑临界状态抗剪强度。试验结果表明钻孔回填材料–传感光缆界面服从莫尔–库仑屈服准则^[14]：

$$\tau_c^p = c_e + \sigma_h \tan \delta_e , \quad (1)$$

式中， τ_c^p 、 c_e 和 δ_e 分别为钻孔回填材料–传感光缆界面的峰值抗剪强度、黏聚力和摩擦角， σ_h 为地层围压，可采用下式估算：

$$\sigma_h = k_0 \gamma h , \quad (2)$$

式中， k_0 为静止侧压力系数， γ 为地层重度， h 为地层深度。钻孔回填材料–传感光缆界面剪应力 τ_c 可采用下式计算^[14]：

$$\tau_c = \frac{E_e A_e}{2\pi r_e} \frac{d\varepsilon}{dz} , \quad (3)$$

式中， E_e 、 A_e 和 r_e 分别为传感光缆的弹性模量、截面积和半径； ε 为光纤应变监测值； $d\varepsilon/dz$ 为应变梯度。联立式(1)~(3)，可得钻孔回填材料与传感光缆处于黏结状态的临界围压 $\sigma_{h,cr}$ 或临界深度 h_{cr} ：

$$\sigma_{h,cr} = \frac{E_e A_e}{2\pi r_e \tan \delta_e} \left[\frac{d\varepsilon}{dz} \right]_m - \frac{c_e}{\tan \delta_e} , \quad (4)$$

$$h_{cr} = \frac{E_e A_e}{2\pi r_e k_0 \gamma \tan \delta_e} \left[\frac{d\varepsilon}{dz} \right]_m - \frac{c_e}{k_0 \gamma \tan \delta_e} . \quad (5)$$

当回填材料、传感光缆及界面参数确定时，临界围压 $\sigma_{h,cr}$ 或临界深度 h_{cr} 仅与最大应变梯度 $[d\varepsilon/dz]_m$ 有关。若 $\sigma_h < \sigma_{h,cr}$ （或 $h < h_{cr}$ ），在一定应变梯度下钻孔回填材料与传感光缆间可能会发生滑移；若 $\sigma_h > \sigma_{h,cr}$ （或 $h > h_{cr}$ ），两者之间不会发生滑移。

以苏州盛泽地面沉降监测数据为例^[6]，考察应变梯度取值的一般范围。对 2012 年 12 月~2014 年 11 月间 36133 个光纤应变监测数据进行计算和统计，得到如图 3 所示结果（注意此处正、负值仅代表应变变化方向）。正态分布拟合结果表明 $\mu \pm 3\sigma$ 在 $-1.77 \times 10^{-3} \sim 1.74 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 之间，说明最大应变梯度一般不超过 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。

对 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 最大应变梯度下的临界围压值 $\sigma_{h,cr}$ 进行参数分析， $E_e r_e$ 的取值范围为 $0 \sim 100 \text{ MN/m}$ ，其他参数列于图 4 中。计算结果表明，传感光缆的弹性模量 E_e 或半径 r_e 越大，则所需的临界围压值 $\sigma_{h,cr}$ 也越

大，这与常识相符。为了降低 $\sigma_{h,cr}$ ，应尽可能选择弹性模量和半径较小的传感光缆。在实际应用中，通常会在光纤表面增设多层护套，使其能适应恶劣的地质和施工环境，但这又导致其半径或弹性模量的增加。因此，应针对具体工况兼顾传感光缆的鲁棒性及其与周围土体的黏结性。此外，图 4 的结果也表明，界面黏聚力 c_e 或摩擦角 δ_e 越大，则 $\sigma_{h,cr}$ 越低。注意与朗肯主动土压力计算时的情况相似，当 c_e 不为 0 时， $\sigma_{h,cr}$ 计算值可能为负值（图 4 中虚线）。这表明在当前应变梯度下，界面剪应力恒小于抗剪强度，因此应将这一部分计算值修正为 0。

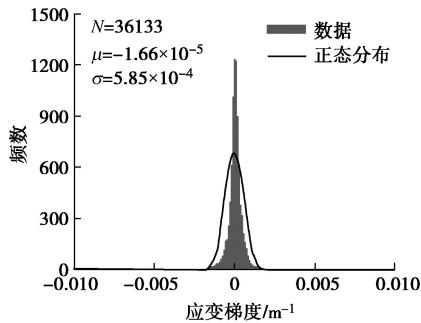


图 3 应变梯度及其正态分布拟合

Fig. 3 Strain gradient fitted with normal distribution

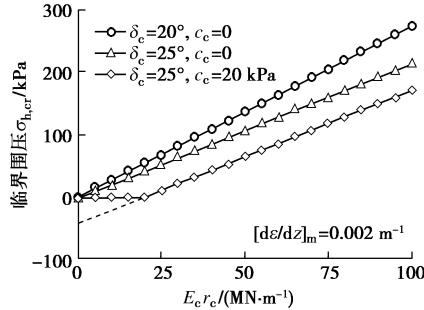


图 4 临界围压值影响因素分析

Fig. 4 Parametric analysis of critical confining pressure

进一步考察两种典型岩土体变形传感光缆的临界围压值 $\sigma_{h,cr}$ 和临界深度值 h_{cr} 。第一种为 2 mm 直径的紧包护套传感光缆 C1，其特点是弹性模量较低，易于施加预拉应变；第二种为 5 mm 直径的金属基索状传感光缆 C2，高强度金属加强件极大地提高了传感光缆的抗拉强度，使其能在恶劣的地质和施工环境中存活。式(4)、(5) 中有关传感光缆的基本参数列于表 1；针对苏州盛泽地区地层^[17]， k_0 取 0.53， γ 取 19.71 kN/m³；由于苏州盛泽钻孔回填材料以中细砂为主，据文献[14~15]报道的传感光缆在砂土中的拉拔试验， c_e 取 0， δ_e 取 24.24°。由图 5 可知，在 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 最大应变梯度下仅需对传感光缆 C1 施加 0.82 kPa 围压（对应约 0.08 m 深度）即可保证回填材料与传感光

缆之间保持黏结。而传感光缆 C2 由于模量较大, $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 最大应变梯度对应的临界围压值 $\sigma_{h,cr}$ 达 120.48 kPa (对应约 11.53 m 深度)。注意此处 c_e 取值为 0, 由图 4 参数分析所示规律可知, 本文计算结果偏于保守。对于一定强度的回填材料, c_e 一般不为零, $\sigma_{h,cr}$ 与 h_{cr} 的实际值也应比本文计算值小, 这对于 DFOS 技术的推广应用更为有利。

表 1 两种典型应变传感光缆物理力学参数

Table 1 Parameters of two typical fiber optic cables

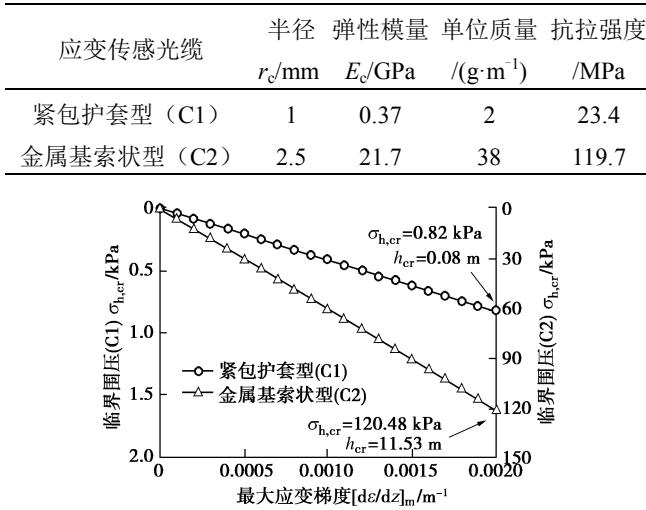


图 5 典型传感光缆临界围压值与最大应变梯度的关系

Fig. 5 Correlation between critical confining pressure and maximum strain gradient for typical fiber optic cables

3 地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递

3.1 理论模型

当地层-钻孔回填材料-传感光缆界面处于黏结状态时, 需进一步考虑其应变传递情况。由于传感光缆自身也是一多层复合体(从外到内含护套、涂敷、纤芯等), 其内部也存在应变传递^[10-13, 16]。为简化计算, 不妨设总应变传递系数 η 由地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递系数 α 以及介质-护套-涂敷-纤芯应变传递系数 β 两部分组成^[16], 即 $\eta = \alpha \times \beta$ 。其中, 介质-护套-涂敷-纤芯应变传递系数 β 通常由传感光缆生厂商提供, 并由光纤解调仪频率漂移-应变系数体现; 本文着重对地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递系数 α 进行计算和探讨。

考察一倍空间分辨率 ($2L$) 范围内的应变传递情况, 采用图 2 所示坐标系进行推导, 变量或下标的含义如下: r 和 u 分别表示半径与轴向位移; τ , σ 和 ε 分别表示剪应力、正应力和正应变; G , E 和 μ 分别表示剪切模量、弹性模量和泊松比; 变量下标 s , b 和 c 分别代表地层(stratum)、钻孔回填材料(borehole

backfill) 和传感光缆(cable)。此外, 需注意以下两点: ①以下推导中假设地层发生一维沉降, 且每一层均为线弹性体、各界面均处于完全黏结状态; ②为定量研究地层模量、泊松比等性质对应变传递特性的影响, 模型中假设存在“周围地层”和“地层”两种“地层”类型(图 2), 但模型推导中并不涉及“周围地层”的模量、泊松比等参数, 且对于一般工程应用而言, 可作简化处理, 将两者视为一整体。

由传感光缆微元段的静力平衡条件可得^[10-13, 16]

$$\frac{d\sigma_c(z)}{dz} = -\frac{2\tau_c(z, r_c)}{r_c} \quad . \quad (6)$$

考虑钻孔回填材料的静力平衡, 并联立式(6), 可得任意 r ($r_c \leq r \leq r_b$) 处的剪应力为

$$\tau_b(z, r) = -\frac{d\sigma_c(z)}{dz} \frac{r_c^2}{2r} - \frac{d\sigma_b(z)}{dz} \frac{r^2 - r_c^2}{2r} \quad . \quad (7)$$

同样地, 考虑地层的静力平衡, 并联立式(7), 可得任意 r ($r_b \leq r \leq r_s$) 处的剪应力为

$$\tau_s(z, r) = -\frac{r_c^2}{2r} \frac{d\sigma_c(z)}{dz} - \frac{d\sigma_b(z)}{dz} \frac{r_b^2 - r_c^2}{2r} - \frac{d\sigma_s(z)}{dz} \frac{r^2 - r_b^2}{2r} \quad . \quad (8)$$

忽略径向变形, 则有

$$\tau_b(z, r) = G_b \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{E_b}{2(1 + \mu_b)} \frac{\partial u}{\partial r} \quad , \quad (9)$$

$$\tau_s(z, r) = G_s \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)} \frac{\partial u}{\partial r} \quad . \quad (10)$$

经典的介质-中间层-纤芯应变传递模型通常基于剪切滞后理论, 假定中间层的弹性模量小于纤芯的十分之一且其半径与纤芯半径相差不大^[10-12]。对于本文所研究的地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递问题, 由于中间层(即钻孔回填材料)的半径可达传感光缆半径的 65 倍^[6], 因此无法直接采用经典模型进行描述, 需进行修正。参考文献[13], 采用 Goodman 假设描述界面剪应力与层间相对位移之间的关系, 并假设周围地层与地层位移之间也满足线性关系, 则有

$$\tau_b(z, r_b) = k_b \Delta u_b \quad , \quad (11)$$

$$\tau_s(z, r_s) = k_s \Delta u_s \quad , \quad (12)$$

$$u_s + \Delta u_s = \chi u_s \quad . \quad (13)$$

式中 Δu_b 为地层与钻孔回填材料之间的相对位移; Δu_s 为周围地层与地层之间的相对位移; k_b 为地层-钻孔回填材料界面黏结系数; k_s 为周围地层-地层界面黏结系数; χ 为一无量纲系数。对于一般工程应用可取 $\chi=1$, 此时 Δu_s 与 $\tau_s(z, r_s)$ 均为 0, 周围地层与地层退化为一整体。

结合式(9), (10), 将式(7), (8) 分别沿 r_c 至 r_b 以及 r_b 至 r_s 进行积分, 并联立式(11)~(13), 可

得如下控制方程^[13]:

$$\frac{1}{\lambda^2} \frac{d^2 \varepsilon_c}{dz^2} - \varepsilon_c = -\kappa \varepsilon_s , \quad (14)$$

式中, κ 与 λ 具有如下形式^[13]:

$$\begin{aligned} \kappa = 1 - & \frac{(\chi-1)k_s r_s \left(\ln \frac{r_s}{r_b} - \frac{E_s}{2k_b r_b (1+\mu_s)} \right)}{\frac{r_s^2 - r_b^2}{4} - \frac{r_s^2}{2} \ln \frac{r_s}{r_b} + \frac{(1+\mu_s)(r_s^2 - r_b^2)}{k_b r_b E_s}} \\ & \left[\frac{(1+\mu_b)(r_s^2 - r_b^2)}{E_b} \left(\frac{1}{4} - \frac{r_c^2}{2(r_b^2 - r_c^2)} \ln \frac{r_b}{r_c} \right) \right. \\ & \left. \frac{1+\mu_s}{E_s} \left(r_s^2 \ln \frac{r_s}{r_b} - \frac{r_s^2 - r_b^2}{2} \right) \right] - 2(\chi-1)k_s r_s . \end{aligned} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{E_c (1+\mu_b) r_c^2}{E_b} \left(\frac{r_b^2}{r_b^2 - r_c^2} \ln \frac{r_b}{r_c} - \frac{1}{2} \right)}} . \quad (16)$$

定义应变传递系数 α 为传感光缆所测应变 ε_c 与地层真实应变 ε_s 之比。结合边界条件 $\varepsilon_c(z=\pm L)=0$, 可得 α 为

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \kappa \left(1 - \frac{\cosh(\lambda z)}{\cosh(\lambda L)} \right) . \quad (17)$$

沿 $-L \sim L$ 对式 (17) 进行积分, 可得研究段内的平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 为

$$\bar{\alpha} = \kappa \left(1 - \frac{\sinh(\lambda L)}{\lambda L \cosh(\lambda L)} \right) . \quad (18)$$

表 2 地层至传感光缆应变传递分析输入参数

Table 2 Parameters for analyzing stratum-backfill-cable strain transfer efficiency

图	传感光缆			钻孔及回填材料			地层				
	r_c /mm	E_c /GPa	r_b /mm	E_b /MPa	μ_b	χ	r_s /mm	E_s /MPa	μ_s	k_b /(GPa·m ⁻¹)	k_s /(GPa·m ⁻¹)
6(a)	0.5~4.5	0.5, 2.5, 12.5, 62.5	60	120	0.3						
6(b)	0.5, 1, 2, 4	0~75	60	120	0.3						
7(a)			5~200	5, 15, 45, 135	0.3	1	—	—	—	—	—
7(b)			15, 30, 60, 120	5~150	0.3						
7(c)			15, 30, 60, 120	120	0.15~ 0.45						
8(a)	1	0.37	60	60, 120	0.3	1.2	120	5~150	0.2, 0.4	0.5	0.05
8(b)			60	120	0.3	1.2	120	5, 15, 45, 135	0.3	0.1~1	0.05
9(a)			60	—	—	1	120	—	—	0.5	0.05
9(b)					—	1.2	120	—	—	0.5	0.05

3.2 参数分析

本节分析传感光缆 (r_c 与 E_c)、钻孔回填材料 (r_b , E_b 和 μ_b) 以及地层性质 (E_s , μ_s 和 k_b) 对平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 的影响。为简便起见, 在分析传感光缆和钻孔回填材料特性对 $\bar{\alpha}$ 影响时, 假设 χ 为 1, 即将周围地层与地层视为一整体; 此时, 模型仅含 r_c , E_c , r_b , E_b 和 μ_b 5 个易于确定的参数。目前地质和岩土工程现场分布式光纤监测以布里渊光时域反射 (BOTDR) 技术为主, 其空间分辨率通常为 1 m, 因此考察 1 m 空间分辨率范围内的 $\bar{\alpha}$ 值 (L 取 0.5 m)。以下分析中所有参数统一列于表 2 中。

(1) 传感光缆性质的影响

前文已述及, 工程现场采用的应变传感光缆半径通常为 0.45~4.5 mm, 其弹性模量在 0.3~75 GPa 范围内。由图 6 (a), (b) 可知, 传感光缆半径 r_c 或弹性模量 E_c 越大, 则平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 越小; 但随着 r_c 或 E_c 的增大, $\bar{\alpha}$ 的变化速率减小。这一规律与第 2 节中两者对钻孔回填材料-传感光缆界面黏结性的影响一致, 说明减小 r_c 或 E_c 既能增强界面黏结性 (减小临界围压 $\sigma_{h,cr}$ 与临界深度 h_{cr}), 又能提高地层至传感光缆的应变传递率。此外, 参数变化对于鲁棒性强的传感光缆的 $\bar{\alpha}$ 值影响更大。如当 r_c 从 0.5 mm 增大至 4.5 mm 时, E_c 为 62.5 GPa 的传感光缆 $\bar{\alpha}$ 值减小了 30.01%, 而 E_c 为 0.5 GPa 的传感光缆 $\bar{\alpha}$ 值仅减小 2.57%。由于 2 mm 直径紧包护套传感光缆 C1 的 r_c 与 E_c 值均比 5 mm 直径金属基索状传感光缆 C2 小, 前

者的 $\bar{\alpha}$ 值优于后者。在实际应用中, 综合使用这两种传感光缆可达到最优效果: 传感光缆C1测得的应变值与地层应变更为接近, 而传感光缆C2则能适应恶劣的地质环境、实现长期监测。因篇幅所限, 下文将以传感光缆C1为例进行进一步的参数分析。

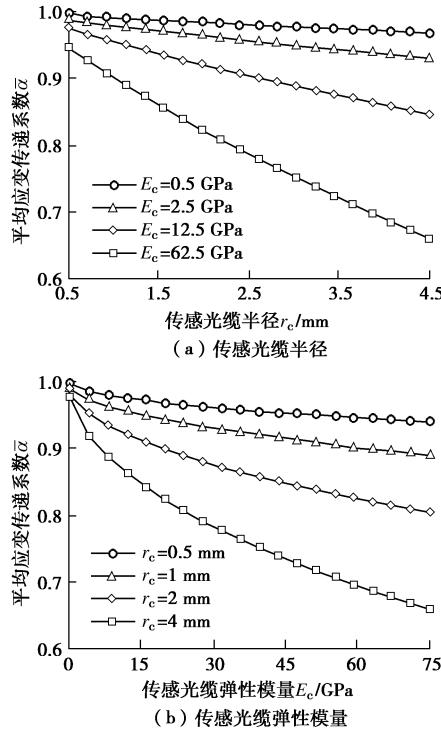


图6 传感光缆性质对地层至传感光缆应变传递的影响

Fig. 6 Influences of cable properties on stratum-backfill-cable strain transfer efficiency

(2) 钻孔半径及回填材料性质的影响

钻孔半径 r_b 若过大则会增加施工难度和回填工作量, 若过小则又不便于传感光缆埋设。苏州盛泽地面沉降光纤监测采用64.5 mm半径钻孔^[6], 取得了较好的监测效果; 此处考察5~200 mm范围内 r_b 取值对 $\bar{\alpha}$ 的影响。钻孔回填材料参数的变化范围与原位地层接近^[18]: 弹性模量 E_b 为5~150 MPa, 泊松比 μ_b 为0.15~0.45。由图7(a)~(c)可知, r_b 和 E_b 的取值对平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 有较大影响, μ_b 对 $\bar{\alpha}$ 的影响则较小。 $\bar{\alpha}$ 随着 r_b 的增大而减小、随着 E_b 的增大而增大, 但变化趋势不断减缓, 这与文献[16]的研究结果相一致。以 $r_b=60$ mm为例, 当 E_b 从5 MPa增大至35.5 MPa时, $\bar{\alpha}$ 提升了2.41%, 而当 E_b 从35.5 MPa增大至150 MPa时, $\bar{\alpha}$ 仅提升0.73%。这说明过度增大回填材料的弹性模量对 $\bar{\alpha}$ 的提升很有限。当 μ_b 从0.15增大至0.45时, $\bar{\alpha}$ 呈近线性减小的趋势, 但其整体变化幅度不大。因为 $G_b=E_b/(1+\mu_b)$, 以上结果也表明钻孔回填材料的剪切模量越大, 则地层-回填材料-传感光缆应变传递性能越好。

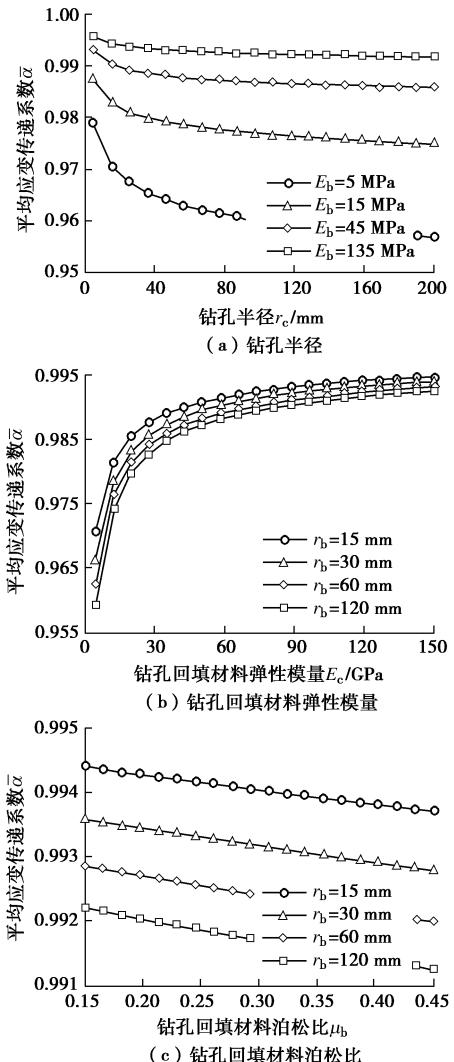


图7 钻孔及回填材料性质对地层至传感光缆应变传递的影响

Fig. 7 Influences of borehole and backfill properties on stratum-backfill-cable strain transfer efficiency

(3) 地层性质的影响

设 $\chi \neq 1$, 进一步考察地层性质对平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 的影响。以往研究^[18]认为若回填材料与地层力学性质(如无侧限抗压强度)越接近, 则耦合效果越好。本文分析结果表明, 若保持其他参数不变, $\bar{\alpha}$ 随地层弹性模量 E_s 的增大呈近线性单调递减, 当 E_s 与回填材料弹性模量 E_b 相等时未出现极大值(图8(a))。此外, 地层泊松比 μ_s 越小, 则 $\bar{\alpha}$ 也越小。同样的, 以上分析也说明若地层剪切模量 G_s 越小, 则地层-回填材料-传感光缆应变传递性能越好。注意这一分析结果并不表明软黏土地层($G_s=2.75\sim 13.75$ MPa)与传感光缆间的耦合性反而更好, 因为软黏土地层-钻孔回填材料界面的黏结系数 k_b 通常较小——这一方面增大了界面滑移的可能性, 另一方也会降低 $\bar{\alpha}$ 值(图8(b))。当地层剪切模量 G_s 较大时(如硬黏土或密砂层), 应采用剪切模量 G_b 较大、同时又与地层黏结性 k_b 较好的回填材料封孔, 从而达到较高的应变传递率。

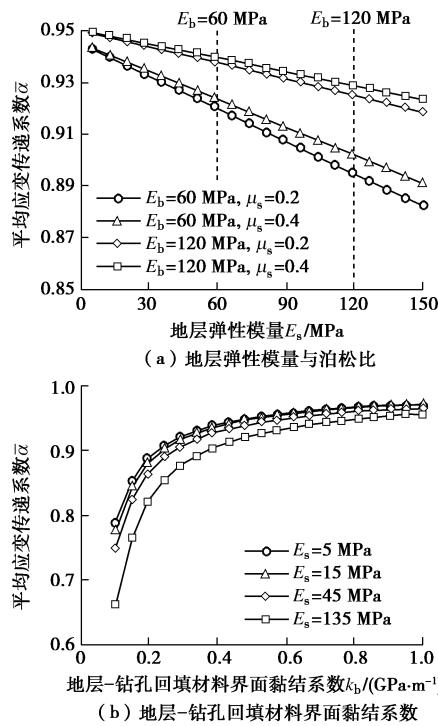


图8 地层性质对地层至传感光缆应变传递的影响

Fig. 8 Influences of stratum properties on stratum-backfill-cable strain transfer efficiency

3.3 地层围压效应对讨论

前文已述及，将传感光缆埋入竖直钻孔中监测地层变形，其承受的围压为零至若干兆帕。围压对地层—钻孔回填材料—传感光缆界面黏结性的影响已在第2节中进行分析，那么围压如何进一步影响其应变传递特性？本节主要从围压对回填材料和地层参数的影响出发，探讨平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$ 的变化规律。为简便起见，考虑围压对弹性模量和泊松比综合效应（即剪切模量）的影响。设回填材料或地层的剪切模量与围压之间满足如下关系^[19]：

$$G_i = f_i \left(\frac{\sigma_h}{P_a} \right)^{n_i} \quad (i = b, s) \quad . \quad (19)$$

式中 f_i 为与初始孔隙率、有效粒径和不均匀系数等有关的参数； P_a 为大气压力 ($P_a \approx 0.1$ MPa)； n_i 为一常数 (0.13~0.71)，随土体初始刚度的增大而减小^[19]。

结合式(18)、(19)分析围压 σ_h 对地层—钻孔回填材料—传感光缆应变传递的影响，相关参数列于表2中，其余参数如下： $n_s = 0.7$ ， $f_s = 0.4$ MPa， n_b ， f_b 则列于图9中。分 $\chi=1$ 与 $\chi \neq 1$ 两种情况进行探讨。当 $\chi=1$ 时， $\kappa=1$ ，地层参数取值对 $\bar{\alpha}$ 值无影响。此时 σ_h 越大，则 G_b 越大，因而 $\bar{\alpha}$ 值也越大（图9(a)），这与图7中所示规律相似。当 $\chi \neq 1$ 时，回填材料与地层参数同时对 $\bar{\alpha}$ 产生影响。因为回填材料与地层性质对 $\bar{\alpha}$ 的作用规律相反（图7、8），所以 σ_h 对 $\bar{\alpha}$ 的影响

取决于两者剪切模量的相对大小关系。当 n_b ， f_b 取不同值时， $\bar{\alpha}$ 随 σ_h 的增大可能出现单调递增、单调递减或先增后减3种不同情况（图9(b)）。

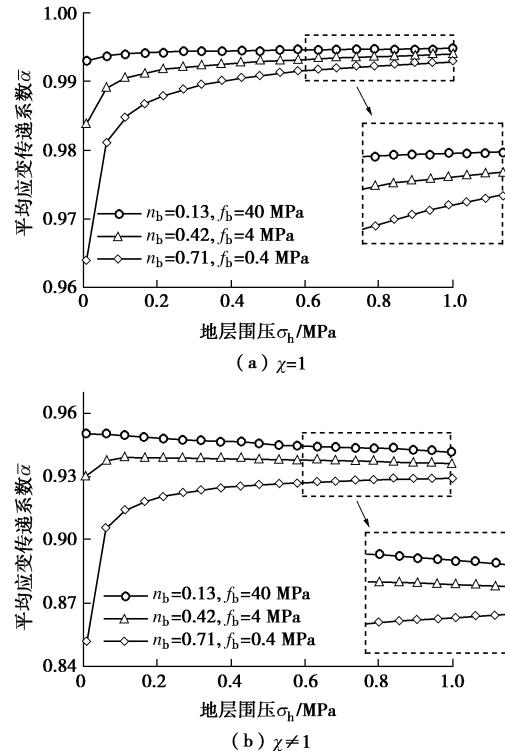


图9 地层围压效应对地层至传感光缆应变传递的影响

Fig. 9 Influences of confining pressure on stratum-backfill-cable strain transfer efficiency

4 工程实例分析

苏州盛泽地面沉降是由抽取地下水引起的第四纪沉积层长期沉降变形，截止目前沉降量已超500 mm，是苏锡常地区沉降灾害较为严重的区域。课题组于2012年11月在盛泽中学校园内建立了一地面沉降光纤监测钻孔^[6]：钻孔孔径为129 mm、孔深为200 m；钻孔中埋设有表1所列C1与C2两种传感光缆，封孔材料主要为中细砂；钻孔建成1个月后，采用BOTDR解调仪（空间分辨率为1 m）监测钻孔剖面地层变形，以2012年12月采集的数据为初值，截止2014年11月共采集13期数据。

初期监测结果显示^[6]，地层变形主要发生在主抽水含水层（距地表74.4~87.7 m）及其上（41.2~74.4 m）、下（87.7~137.9 m）两层隔水层内，因此本节的分析也围绕这一范围内的地层（41.2~137.9 m）展开。根据前文提出的土—缆耦合性评价方法，首先应考察土—缆界面的黏结性。由第2节的计算结果可知，苏州盛泽钻孔中传感光缆C1与C2对应的临界深度分别为0.08 m与11.53 m，因此研究区范围内的土、缆间

不会发生脱黏; 在此基础上进一步分析地层至传感光缆的应变传递率。首先考察 C1 与 C2 两种传感光缆监测所得应变分布曲线的特点, 此处以 2014 年 11 月的应变数据(与初值作差所得)为例进行说明。由图 10 可知, 两种传感光缆监测数据所反映的地层变形分布规律基本一致, 即在靠近主抽水含水层的上下两层隔水层中存在显著的压应变。但两种传感光缆所测应变的具体大小却并不相同, C1 监测所得应变普遍较 C2 大, 表明地层至 C1 的应变传递率较高, 这与图 6 所示规律相符。忽略地层围压效应对应变传递的影响, 采用简化计算方法(即 $\chi=1$)计算平均应变传递系数 $\bar{\alpha}$, 模型输入参数如下: 传感光缆半径 r_c 与弹性模量 E_c 列于表 1; 钻孔半径 r_b 为 64.5 mm, 回填材料弹性模量 E_b 为 60 MPa、泊松比 μ_b 为 0.25; 空间分辨率半长为 0.5 m。计算得传感光缆 C1 的 $\bar{\alpha}$ 值为 0.989, 表明地层至 2 mm 直径紧包护套传感光缆的应变传递率非常高; 而 C2 的 $\bar{\alpha}$ 值略低, 为 0.824, 说明需对 5 mm 直径金属基索状传感光缆所测数据进行一定的修正。将修正前后的地层变形量进行对比, 结果如图 11 所示。该图中横、纵坐标分别为传感光缆 C1 与 C2 应变积分所得地层变形量, 空心、实心点分别表示未修正与已修正数据。对修正前后的数据分别进行线性拟合, 得到修正前的斜率为 0.780 (R^2 为 0.975), 而修正后的斜率为 0.937 (R^2 不变)。拟合曲线斜率从 0.780 增大至 0.937, 说明修正后两种传感光缆监测数据基本一致, 从而验证了本文所提出的分析方法的有效性。

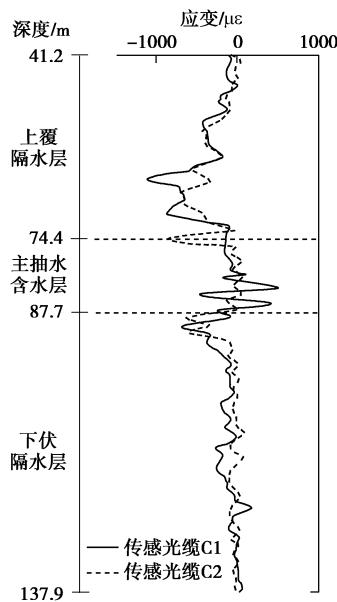


图 10 两种典型传感光缆监测所得苏州盛泽地层主变形区应变分布(2012 年 12 月至 2014 年 11 月)

Fig. 10 Distribution of strain along main deformed strata in Shengze borehole monitored by two cables from Dec. 2012 to Nov. 2014

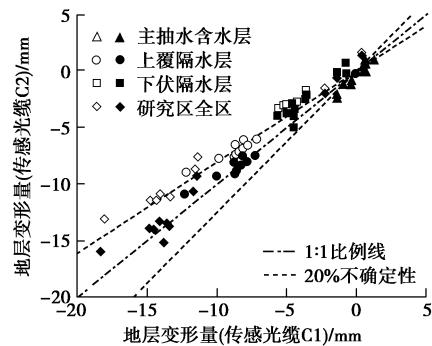


图 11 修正前后地层主变形区变形量对比

Fig. 11 Comparison between uncorrected and corrected deformations of main deformed strata

5 结 论

本文以地面沉降分布式光纤监测为出发点, 对地层-钻孔回填材料-传感光缆耦合性进行了深入分析, 主要得到以下结论:

(1) 提出了地层-钻孔回填材料-传感光缆耦合性的定义, 以及地层变形光纤监测数据有效性的评价方法。地层、回填材料和光缆间达到完全耦合应满足两个条件: 地层-回填材料界面与回填材料-光缆界面剪应力均不能超过其抗剪强度; 地层应变能有效地传递至纤芯。在对地层变形光纤监测数据进行评价时, 应优先考察界面是否发生滑移, 再考虑应变传递率。

(2) 提出了钻孔回填材料与传感光缆处于黏结状态的临界围压及临界深度。光缆弹性模量或半径越小, 则临界围压或临界深度也越小; 当回填材料、光缆及其界面参数确定时, 临界围压或临界深度仅与最大应变梯度有关。

(3) 基于经典应变传递模型与 Goodman 假设建立了地层-钻孔回填材料-传感光缆应变传递模型, 为分析地层、回填材料及光缆参数对应变传递特性的影响, 以及地层变形光纤监测数据的修正提供了理论依据。参数分析结果表明: 光缆半径和弹性模量、钻孔半径、地层剪切模量越小, 或回填材料剪切模量、地层-回填材料界面黏结系数越大, 则应变传递系数越大; 地层围压对应变传递的影响则取决于地层和回填材料参数之间的相对大小关系。

(4) 对苏州盛泽地面沉降区地层主变形区光纤监测数据进行了评价和分析, 结果表明采用本文所提出的评价方法修正后的两种传感光缆监测数据基本一致, 从而验证了这一方法的有效性。

需要指出的是, 有关溶洞、高压缩地层等不良条件, 以及传感光缆发生弯曲等特殊情况下土-缆耦合性的分析和评价则有待于进一步探究。

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] GALLOWAY D L, JONES D R, INGEBRITSEN S E. Land subsidence in the United States[M]. Virginia: US Geological Survey Circular 1182, 1999.
- [3] 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 Hong-hu. Distributed fiber optic sensing for geoengineering monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))
- [4] MOHAMAD H, BENNETT P J, SOGA K, et al. Behaviour of an old masonry tunnel due to tunnelling-induced ground settlement[J]. Géotechnique, 2010, 60(12): 927 - 938.
- [5] HAUSWIRTH D, PUZRIN A M, CARRERA A, et al. Use of fibre-optic sensors for simple assessment of ground surface displacements during tunnelling[J]. Géotechnique, 2014, 64(10): 837 - 842.
- [6] 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.
- [7] 丁勇, 王平, 何宁, 等. FBG分布式沉降管在盾构隧道沉降监测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1320 - 1325. (DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. A new method to measure the deformation of shield tunnel based on FBG[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1320 - 1325. (in Chinese))
- [8] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 用于巷道沉降变形监测的光纤锯齿状布设技术与原理[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 96 - 102. (HOU Gong-yu, XIE Bing-bing, JIANG Yu-sheng, et al. Sawtooth layout technology and principle of fiber used in deformation monitoring of roadway subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 96 - 102. (in Chinese))
- [9] ZHANG C C, SHI B, GU K, et al. Vertically distributed sensing of deformation using fiber optic sensing[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(21): 11732 - 11741.
- [10] ANSARI F, LIBO Y. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385 - 394.
- [11] LI D S, LI H, REN L, et al. Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 024402.
- [12] ZHOU Z, LI J, OU J. Interface transferring mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China, 2007, 2(1): 92 - 98.
- [13] XIANG P, WANG H. Optical fibre-based sensors for distributed strain monitoring of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(9): 842 - 850.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张丁丁, 柴敬, 李毅, 等. 松散层沉降光纤光栅监测的应变传递及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3289 - 3297. (ZHANG Ding-ding, CHAI Jing, LI Yi, et al. Strain transfer function of embedded fiber Bragg grating sensors for unconsolidated layer settlement deformation detector and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3289 - 3297. (in Chinese))
- [17] 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): 1 - 9. (ZHANG Cheng-cheng, SHI Bin, LIU Su-ping, et al. Mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 1 - 9. (in Chinese))
- [18] 杨豪, 张丹, 施斌, 等. 直埋式光纤传感钻孔注浆耦合材料配合比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(6): 714 - 719. (YANG Hao, ZHANG Dan, SHI Bin, et al. Experiments on coupling materials' proportioning of borehole grouting in directly implanted optic fiber sensing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(6): 714 - 719. (in Chinese))
- [19] CHANG T S, WOODS R D. Effect of confining pressure on shear modulus of cemented sand[C]// CAKMAK A S. Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1987: 193 - 208.