

分布式传感光纤与土体变形耦合性能测试方法研究

李 博, 张 丹*, 陈晓雪, 王嘉诚, 施 斌

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 分布式光纤传感作为新兴技术已用于岩土体的变形监测, 其中传感光纤与土体的变形耦合性能是重要的研究内容之一。文章设计了土条的三点弯曲试验, 将传感光纤预埋在土条中, 借助高空间分辨率OBR分布式光纤传感技术、激光位移传感器以及PIV摄影测量技术, 对光纤与土体的变形耦合性能进行了分析讨论。结果表明: 当土条变形较小时, 土体与光纤耦合性能良好, 传感光纤可以准确测量相应位置土体的应变分布情况; 当变形较大时, 传感光纤与土体将发生相对滑移, 土体变形难以完全传递给传感光纤, 光纤与土体的变形耦合性能随土体变形的增大逐渐降低。提出了采用应变传递系数表征纤-土的变形耦合性能。

关键词: 分布式光纤传感技术; OBR; 耦合性能; 变形; 应变传递系数

中图分类号: P642.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2017) 04-0633-07

Testing Method on Performance of Deformation Coupling between Distributed Sensing Fiber and Soil

LI Bo, ZHANG Dan*, CHEN Xiaoxue, WANG Jiacheng, SHI Bin

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

Abstract: As a new technology, distributed optical fiber sensing (DOFS) has been used for deformation monitoring on rock and soil. The deformation coupling performance between sensing fiber and soil is one of the important issues. In this paper, a bending test on a soil beam was designed. The sensor fiber was embedded in the soil directly as a sensor. By using the high precision OBR equipment, laser displacement sensor and PIV photogrammetry technology, the performance of deformation coupling between the fiber and the soil was studied. The results indicate that, when the deformation of the soil is small, the coupling performance between the soil and the fiber is good, and the sensor fiber can accurately measure the strain distribution of the soil. When the deformation is large, slippage occurs between the sensing fiber and the soil, and it is difficult to monitor the soil deformation accurately by using sensing fiber. With the increase of soil deformation, the coupling performance reduces. Strain transfer coefficient was put forward to characterize the coupling performance between sensing fiber and soil.

key words: distributed optical fiber sensing; OBR; coupling performance; deformation; transfer coefficient

Corresponding author: ZHANG Dan, Associate Professor; E-mail: zhangdan@nju.edu.cn

1 引言

在岩土工程监测与检测领域中, 分布式光纤

传感技术以其全分布、准实时、抗干扰、高耐久性等优点成为目前该领域中的一项热点技术(施斌等, 2004), 已得到广泛的应用。Sun 等

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41572271; 41272315); 江苏省自然科学基金(BK20161239)

作者简介: 李博, 男, 1992年生, 硕士研究生, 主要从事边坡体在多场作用下的数值模拟的研究工作; E-mail: 3369114188@qq.com

*通讯作者: 张丹, 男, 副教授, 博士, 主要从事工程地质和防灾减灾方面的研究工作; E-mail: zhangdan@nju.edu.cn

(2014)将分布式光纤传感技术用于三峡库区的滑坡监测,结果显示该技术可以得到滑坡的多场多参量特征信息,光纤应变数据反映的滑面位置及变形规律与实际情况相一致。宋占璞等(2014)将ROTDR与FBG测温技术相结合,用于大型混凝土水化热的监测研究,揭示了温度的变化过程与规律,为混凝土裂缝预警提供依据。Kihara等(2002)开发了一套基于BOTDR的用于河堤坍塌监测的传感系统,并通过相关实验证明了该分布式光纤传感系统能有效地对堤坝变形、透水等问题进行长期预警。

针对光纤与被测对象的耦合性能和规律,已有部分学者进行了初步的研究。高俊启等(2005)用环氧树脂将光纤粘附于钢筋上,将光纤传感技术用于钢筋混凝土梁变形监测,结果显示,光纤监测结果与钢筋的实际变形一致性较好,反映出二者耦合性能良好;Iten等(2011)为了研究光纤与锚索的耦合性能问题,将光纤传感器布于锚索中,进行了锚索的拉拔试验,分析探讨了锚索上的光纤应变分布,对光纤应变随拉拔的进行先后产生的增大与衰减进行了分析讨论。而对于分布式光纤传感技术于土体中的应用,由于土粒成分松散,土体的抗拉强度极低,其值接近于0,而光纤的抗拉强度约为500 MPa,故当土体发生张裂变形时两者易产生相互的滑移。因此,传感光纤与土体的变形耦合特性是传感光纤应用中需要解决的一个重要问题(Lanticq et al., 2009)。目前,关于分布式光纤与土体耦合性能的研究仍较少。Zhang等(2016b)对FBG与土体的耦合性能进行了简单的讨论,其分析结果显示,在应变较小时,FBG与土体的变形一致性较好,但当应变大于某一临界值时,土体传递至FBG的应变将出现衰减,其衰减幅度随土体应变增大而增大。由于光纤与土体间易相互滑移,故在将分布式光纤传感技术应用于土体中时需采取一些措施,如改进护套、添加粘合剂、注浆等,以减少因纤-土滑移带来的误差(Zhang et al., 2016a; Ansari and Yuan, 1998; 杨豪等, 2012; Ding et al., 2006)。

本文针对传感光纤与土体的耦合性能问题,选取了粘性土作为研究介质,设计了位移控制式土条弯曲试验,将一定含水率的粘性土压制成土条,并在土条中埋设了多条传感光纤。利用高空

间分辨率OBR分布式光纤传感设备测量并记录土条在弯曲过程中传感光纤的应变分布,根据梁的弯曲理论将光纤应变转化为土条的挠度,结合激光测距仪技术、PIV分析技术等辅助手段得出土条的实际挠度分布,通过将两者进行对比分析,得到纤-土的变形耦合性能。

2 试验原理

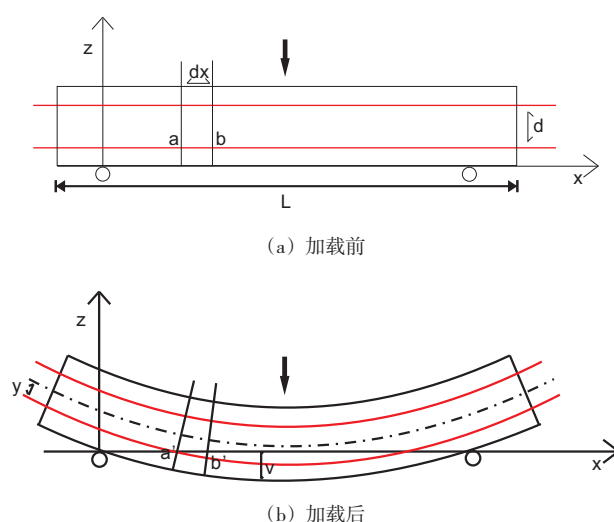
当土条在荷载作用下发生弯曲时,依据梁的变形理论,土条的一侧产生拉应变,另一侧则产生压应变(凌道盛等, 2015; Thusyanthan et al., 2007)。通过光纤监测技术可测得土条两侧的应变分布,若建立应变与变形的换算关系,将测得应变转换为土条的变形,并与土条的实际变形进行对比,便可分析探讨光纤纤-土的变形耦合情况。

图1为土条在三点弯条件下,加载前后的形态变化。

根据材料力学理论,土条挠度与土条的应变满足如下关系:

$$v(x) = \iint \left(-\frac{\varepsilon(x)}{y} \right) dx dx \quad (1)$$

其中, $v(x)$ 为土条的挠度, $\varepsilon(x)$ 为土条传感光纤所在位置的应变分布,即 $\varepsilon(x) = \frac{a'b' - ab}{ab}$; y 为传感光纤到土条弯曲中性轴的距离。



红色曲线为预埋光纤;点画线为中性面
the red curve is the embedded fiber; the point line is the neutral surface

图1 土条加载前后形态

Fig. 1 The form change of the soil beam under load

对该式进行两次积分, 并根据土条的边界条件确定积分常数, 得:

$$v(x) = -\frac{1}{y} \left\{ \frac{-\int_0^x \int_0^x \varepsilon(x) dx dx}{L} \Big|_{x=L} + \int_0^x \int_0^x \varepsilon(x) dx dx \right\} \quad (2)$$

将其改写为累加求和的形式, 得:

$$v(x) = -\frac{1}{y} \left\{ \frac{-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon(x_i) \Delta x \Delta x}{L} x_n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon(x_i) \Delta x \Delta x \right\} \quad (3)$$

其中, Δx 为应变采集设备的采样间隔; x_i 为应变 $\varepsilon(x_i)$ 的空间坐标, 且 $x_i = n \cdot \Delta x$; L 为土条的长度。

由于土条在实际弯曲过程中弯曲中性轴的位置难以准确判断, 故可将上式改写为:

$$v(x) = -\frac{1}{d} \left\{ \frac{-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Delta \varepsilon(x_i) \Delta x \Delta x}{L} x_n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta \varepsilon(x_i) \Delta x \Delta x \right\} \quad (4)$$

其中, d 为土条拉伸侧与压缩侧传感光纤之间的距离; $\Delta \varepsilon(x_i)$ 为 x_i 处光纤拉伸侧与压缩侧的应变之差, 即弯曲应变。

依据该式可由 OBR 测得的光纤应变计算土条挠度。由于土体为弹塑性材料, 在实际发生弯曲过程中, 不同位置的挠度会因裂缝等因素的影响而存在差异。式 (4) 计算所得挠度为一介于拉伸侧实际挠度与压缩侧实际挠度的中间值。本文通过 PIV 的测量结果计算土条的平均挠度, 以减小由土体开裂带来的挠度误差。通过平均挠度与式 (4) 计算挠度进行对比, 可以对光纤与土体的变形耦合性能进行分析。

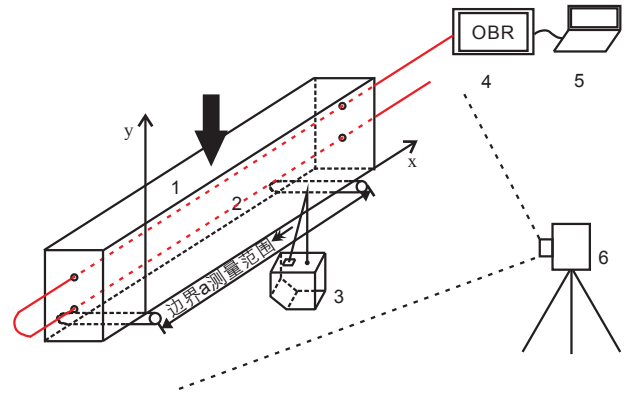
对于不同土体、不同含水率与密实度以及不同类型光纤的情形, 可依据该理论, 进行简单的土梁弯曲试验, 以测试光纤与土体的变形耦合情况。

3 土条三点弯试验方案

3.1 试验装置

土条弯曲试验装置如图 2 所示, 该装置主要由加载系统和测量系统两部分组成。

加载系统为千斤顶推动装置, 采用位移控制



1, 土条; 2, 传感光纤; 3, 激光位移传感器; 4, OBR4600;
5, 电脑终端; 6, 相机与三脚架
1, soil beam; 2, sensor fiber; 3, laser displacement sensor; 4, OBR4600;
5, computer terminal; 6, camera and tripod

图2 土条三点弯试验装置示意图

Fig. 2 Apparatus for three-point bending test on soil beams

式, 分级推动土条使其发生弯曲变形直至破坏。通过千斤顶前端安装的百分表控制每级加载的位移量。

测量系统包括激光位移传感器、OBR 以及照相机三部分。

(1) OBR

光背向散射反射计 (Optical Backscatter Reflectometer, OBR) 是由 Luna 公司开发的基于瑞利散射的光学传感仪器。其基本原理是通过捕捉光纤中背向散射光与前向散射光的差异, 测量因散射、吸收等原因产生的光纤传输损耗和各种结构缺陷引起的结构性损耗。当光纤中某一点受温度或应力作用时, 该点的散射特性将发生变化。因此, 可通过显示损耗与光纤长度的对应关系反映外界信号于光纤上的扰动信息。可通过式 (5) 求得光纤的应变变量:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(t_{str} - t_{ref}) \cdot (\frac{c}{N}) \cdot (\frac{1}{k})}{L} \quad (5)$$

其中, ε 为光纤应变; ΔL 为光纤的变形量; L 为光纤的原长; t_{str} 为光纤变形后的延迟时间; t_{ref} 为光纤应变前的延迟时间; c 为光速; N 为光纤折射率; k 为应力光学校正因子, 该值需在每次测试前通过预加应变进行标定。

表 1 为 OBR 与常见光纤传感技术部分性能参数的对比。通过对比可知, OBR 具有相当高的空间分辨率和应变测量精度, 完全能够满足本次的

表1 常见光学传感技术部分性能参数指标

Table 1 Partial performance parameters of common optical

sensing technologies				
传感技术	应变测量范围	最小空间分辨率/m	测量精度/ $\mu\epsilon$	是否分布式
FBG	-1%~1%	无	± 2	否
BOTDA	-3%~4%	0.05	± 25	是
BOTDR	-1.5%~1.5%	1	± 30	是
OBR	-3%~3%	0.01	± 1	是

试验要求。

在土条分层压制过程中,依据设计方案将传感光纤预埋在土条中,采用OBR技术测量土条弯曲变形过程中光纤的应变分布及其变化情况。

(2) PIV

粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV),是一种通过图像测量位移的摄影测量技术。其基本原理是对初始图片选取一小块搜索区域,根据其图像的灰度、纹理等特征,在后续图片中依据相关性算法进行区域的搜索并计算相关系数,并将相关系数为峰值的区域判定为变形后的区域(White et al., 2003)。与传统的点式位移测量技术相比,PIV技术具有高精度、无接触、全面性等优点,只需通过图片即可获得目标的位移矢量分布。本文利用PIV技术获取土条变形过程中的土条位移的分布及其变化情况,计算其平均挠度,通过与根据光纤应变计算位移的对比,反映光纤与土体的变形耦合性能。

(3) 激光位移传感器

激光位移传感器采用基恩士公司所制造的LK-G85型传感头。其基本原理为由传感头向目标发射激光,并使用三角形测量法检测RS-CMOS反射光的位置,通过检测反射光位置的变化,便可获取传感头与目标间的距离变化。该传感头在激光探测范围内精度达到 $\pm 40 \mu\text{m}$,其检测结果信赖可靠。

通过直线数控位移滑台带动激光位移传感器沿土条长度方向扫描,通过与初始数据的对比即可得到土条沿长度方向的弯曲变形,进而对PIV测量结果的准确性进行对比验证。

3.2 土条制备

土条通过定制的制样模具压制而成,其尺寸为 $250 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。试验土体采用长江中下游地区常见的下蜀土,其基本物理性质见表2。

表2 下蜀土的基本物理性质指标

Table 2 Physical properties of Xiashu soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	比重 G_s
30.5	20.5	10	2.72

考虑土条的成型、承重等问题,本次试验土体含水率为17%,干密度为 1.7 g/cm^3 。土条的制备过程如下:

(1) 将试验土体碾细、自然风干,按设计含水率和干密度称取适量的土料和水,将水与土料充分混合搅拌,装入密封袋在干燥皿中静置24h以上,使水土充分均匀。

(2) 在制样模具内部涂抹凡士林,称取一半配制好的土料,采用千斤顶压至模具的1/2深处(土条高度的1/2)。如图1所示,沿土条长度布设两根传感光纤,拉直后在模具内装入余下的土料,压至设计高度。

(3) 将制好的土条用保鲜膜包裹密封,静置2h以消除土条制作过程中产生的残余应力。

为对比不同传感光纤与土体的耦合性能,试验中分别采用了直径0.9 mm聚酯护套传感光纤OF1和直径0.25 mm无护套传感光纤OF2,其结构如图3,4所示:

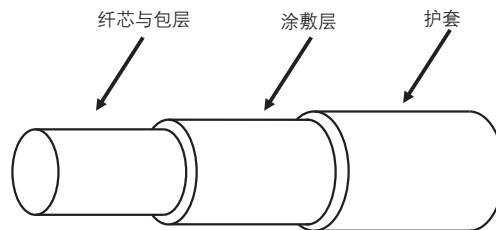


图3 OF1结构示意图

Fig. 3 Schematic of OF1

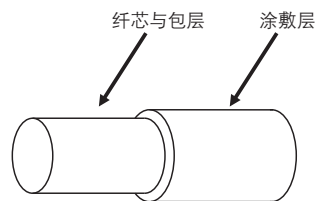


图4 OF2结构示意图

Fig. 4 Schematic of OF2

4 试验结果及分析

4.1 PIV与激光位移传感器测量结果的对比

图5为由激光位移传感器所测得的在试验过程

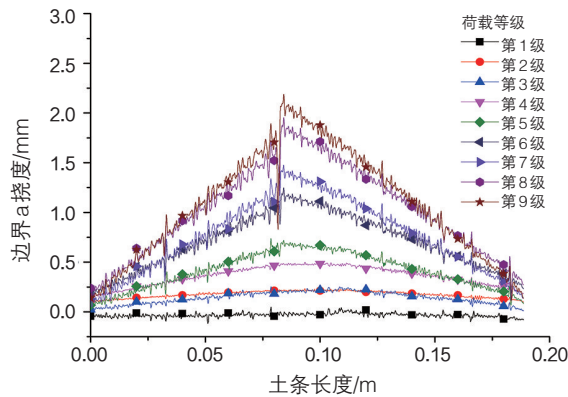


图5 激光位移传感器得到的土条变形

Fig. 5 Deformation of the soil beam from laser displacement sensor

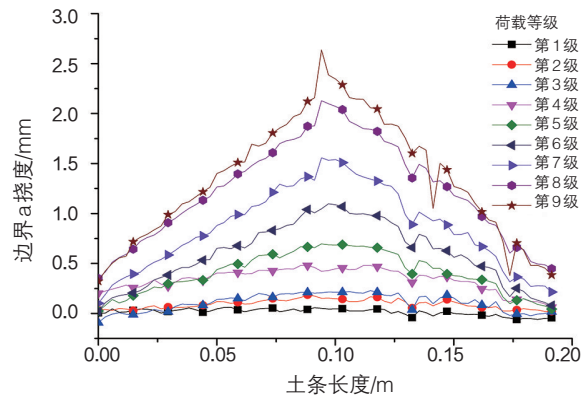


图6 PIV计算所得的土条变形

Fig. 6 Deformation of the soil beam from PIV

中土条拉伸侧的边界a(图2)产生的位移,图6为基于PIV技术对试验图片进行处理后获得的同一边界上的位移。通过对比可以发现:在小变形时PIV计算结果与激光测距仪测得的结果基本一致,证明了PIV技术具有相当高的可靠性与准确性。而当变形较大时,土体产生开裂,原有的土体表面灰度区域产生变化甚至破坏,干扰了PIV的计算结果,故此时PIV的计算结果与激光位移传感器测量结果存在一定偏差。综上,当变形较小时,利用PIV技术可以准确获取土条整体的挠曲变形,可与根据光纤应变计算的变形进行比对分析。

4.2 根据光纤应变计算土条挠曲变形

根据式(4)利用OBR实测的光纤应变计算的土条挠曲变形,如图7和图8所示:

通过图7、图8的对比可知:

(1) 直径0.9 mm 聚酯护套OF1传感光纤较无护套的直径0.25 mm OF2传感光纤,推算的土条位

移更大。证明了适当增加护套结构可以有效地增强光纤与土体之间应变的传递效率,很好地提高了纤-土的变形耦合性能;而无护套的情况下,光纤与土体就较易产生相互滑移,使计算结果的准确性受到一些影响。

(2) 当土条位移大于1.5 mm时,由应变计算所得挠度出现减小的情况。根据对应变数据与实际土条裂缝发育情况的比较分析可以认为,随着张裂缝的逐步扩大增长,土条的中性面发生偏移,进而导致了计算挠度的减小。

由PIV技术计算所得土条平均挠度分布如图9所示:通过对图7和图9的对比分析,可依据光纤与土体的耦合程度将土条的弯曲变形分为两个变化阶段。

(1) 紧密耦合阶段:土条弯曲过程的初始阶段,土条的最大弯曲变形小于1.5 mm,光纤的最大拉伸应变小于 $3000 \mu\epsilon$ 时,土体结构较为完整。

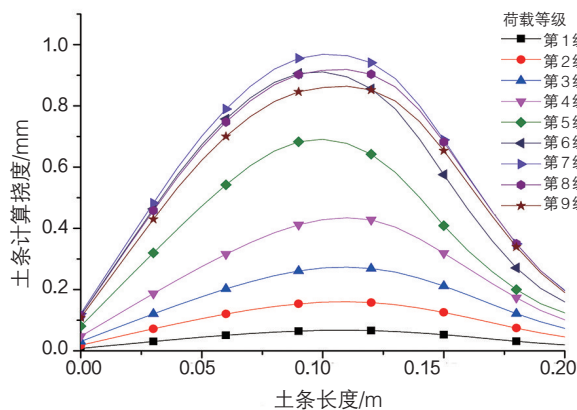


图7 根据OF1弯曲应变计算的挠度

Fig. 7 Deflection calculated from bending strain of OF1

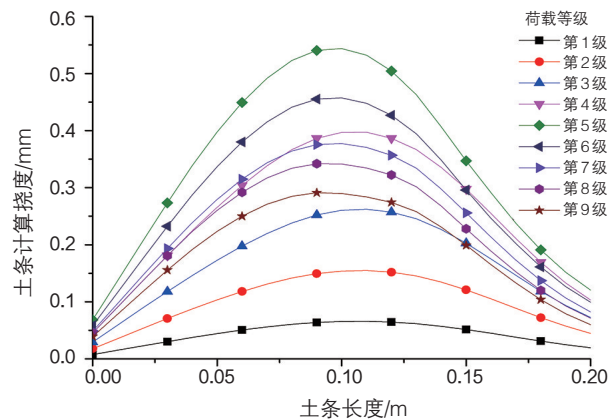


图8 根据OF2弯曲应变计算的挠度

Fig. 8 Deflection calculated from bending strain of OF2

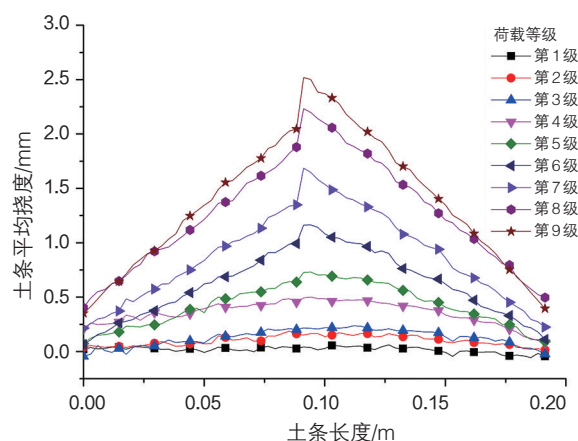


图9 PIV计算所得的土条挠度分布

Fig. 9 Deflection calculated from PIV data

此时, PIV 计算挠度与应变推算挠度较为吻合一致, 说明在低应变条件下, 光纤与土体的耦合性能良好, 光纤能够较为准确地反映土体的变形情况。

(2) 相对滑移阶段: 当土条的最大弯曲变形大于 1.5 mm, 光纤的最大拉伸应变大于 $3000 \mu\epsilon$ 时, 随着变形的增大, 土条沿边界 a 出现了张裂缝。随着弯曲变形的增大, 裂缝的逐步扩展, 光纤与土体出现相对滑移, 土体应变传递至光纤的效率逐渐降低。由应变得到的计算挠度逐渐小于 PIV 的实测挠度, 且二者差距随变形的增大而逐步增大。当变形增大到一定程度, 由应变推算挠度的增速减小, 并逐步趋于一个固定值。

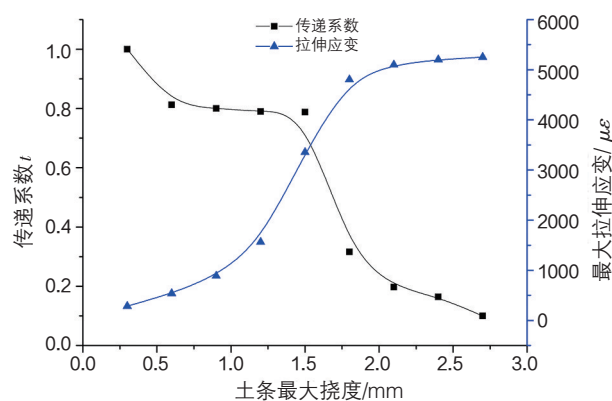
4.3 变形传递系数

为了表征土体应变与光纤实测应变之间的关系, 引入变形传递系数 t , 用于描述土体应变传递至光纤的传递效率, 即纤-土变形耦合性能。其定义为:

$$t = \frac{\varepsilon_{f\max}}{\varepsilon_{s\max}} = \frac{(v_{f\max})''}{(v_{s\max})''} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon_{f\max}$ 为光纤在一次测量中测得的土条最大应变值; $\varepsilon_{s\max}$ 为与光纤所在位置土体实际最大应变; $v_{f\max}$ 为应变推算挠度的峰值; $v_{s\max}$ 为土体实际挠度峰值。根据挠度与应变的关系, 应变之比应为挠度的二阶导数之比。分别对计算挠度与 PIV 挠度进行二次求导计算, 取二阶导数的峰值得到变形传递系数 t , 如图 10 所示。

由图 10 可发现, 传递系数 t 在变形增大过程

图10 变形传递系数 t 与最大拉伸应变随变形增大变化趋势图Fig. 10 Trend of transfer coefficient t and maximum tensile strain while the deformation increases

中主要经历两个不同阶段: 第一阶段, t 经历一个小的骤降, 在 0.8 附近平稳缓慢下降, 对应土条变形较小阶段, 最大拉伸微应变小于 $3000 \mu\epsilon$, 此时土体与光纤耦合较好; 第二阶段, t 随变形增大而大幅度下降, 对应土条裂缝产生、扩展阶段, 拉伸应变大于 $3000 \mu\epsilon$, 土体与光纤发生相对滑移, 并且滑移幅度随变形逐渐增大。随着土条弯曲变形的增大, 传递系数下降趋势放缓, 并缓慢趋向于 0。

5 结论

本文通过土条的三点弯曲试验, 研究了光纤与土体的耦合性能随土体变形的变化情况, 提出了采用变形传递系数表征纤-土的耦合性能。研究结果表明:

(1) 在变形较小时, 土体与光纤耦合性能良好, 光纤测得的应变真实可靠, 可视作土体的真实应变。

(2) 在变形较大时, 由于土体结构的破坏与裂缝的产生, 土体与光纤将发生相对滑移, 且土体的应变传递至光纤的效率随滑移的增大而逐渐减小。此时, 光纤应变无法直接用于土体实际变形的计算。

(3) 本文提出的光纤与土体变形耦合测试方法是可行的, 采用的应变传递系数可以准确地描述光纤与土体的变形耦合性能, 可以将光纤应变按变形传递系数放大后表征土体的实际变形情况。对于其他具有一定黏聚力的土体, 可以按土

体实际的含水率与密实度压制土条进行三点弯试验, 测试光纤与土体的变形耦合情况, 得到相应的变形传递系数。

参考文献(References):

- 高俊启, 施斌, 张巍, 等. 2005. BOTDR检测钢筋混凝土梁分布式应变的试验研究[J]. 土木工程学报, 38(9): 74–79.
- 凌道盛, 徐泽龙, 蔡武军, 等. 2015. 压实黏土梁弯曲开裂性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 37(7): 1165–1172.
- 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. 2004. 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, 3: 493–499.
- 宋占璞, 张丹, 方海东, 等. 2014. 大体积混凝土水化热温度变化光纤监测技术研究[J]. 工程地质学报, 22(2): 244–249.
- 杨豪, 张丹, 施斌, 等. 2012. 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, 32(6): 714–719.
- Ansari F and Yuan L. 1998. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 124(4): 385–394.
- Ding Y, Shi B, Bao X, et al. 2006. Jacket effect on strain measurement accuracy for distributed strain sensors based on Brillouin scattering [J]. Optica Applicata, 36(1): 57–67.
- Iten M. 2011. Novel applications of distributed fiber-optic sensing in geotechnical engineering [D]. Thesis Swiss Federal Institute of

Technology in Zurich.

- Kihara M, Hiramatsu K, Shima M, et al. 2002. Distributed optical fiber strain sensor for detecting river embankment collapse (special issue on optical fibers and devices) [J]. IEEE Transactions on Electronics, E85C(4): 952–960.
- Lanticq V, Bourgeois E, Magnien P, et al. 2009. Soil-embedded optical fiber sensing cable interrogated by Brillouin optical time-domain reflectometry (B-OTDR) and optical frequency-domain reflectometry (OFDR) for embedded cavity detection and sinkhole warning system [J]. Measurement Science & Technology, 20(3): 034018.
- Sun Y J, Zhang D, Shi B, et al. 2014. Distributed acquisition, characterization and process analysis of multi-field information in slopes [J]. Engineering Geology, 182: 49–62.
- Thusyanthan N I, Take W A, Madabhushi S P G, et al. 2007. Crack initiation in clay observed in beam bending [J]. Géotechnique, 57(7): 581–594.
- White D J, Take W A and Bolton M D. 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. Géotechnique, 53(7): 619–631.
- Zhang D, Wang J, Zhang P, et al. 2016a. Internal strain monitoring for coal mining similarity model based on distributed fiber optical sensing [J]. Measurement, 97(2017): 234–241.
- Zhang D, Xu Q, Bezuijen A, et al. 2016b. Internal deformation monitoring for centrifuge slope model with embedded FBG arrays [J]. Landslides, 2016: 1–11.