

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221204002

## 砂土含水率对 DAS 振幅响应影响的试验研究\*

李俊鹏, 张诚成, 施 斌, 陈 卓, 谢 涛, 郭君仪

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 利用分布式声波传感(DAS)技术和地下通讯光纤网进行周界安防(入侵)监控、管道泄漏监测、交通状况评估等是城市安全动态监测的新方向。为探究 DAS 监测过程中暗光纤周围岩土介质含水率变化对 DAS 振幅响应特性的影响,设计了小球撞击圆盘与小球直接撞击砂土面二种激振方式下五种质量含水率 0%、5%、10%、15% 和 20% 砂土的 DAS 振幅响应试验。试验结果表明:(1)小球自由下落撞击砂土面激发的振动信号和传感光纤圆环布设可提高 DAS 信噪比,试验装置可靠性高、试验结果重复性好;(2)受砂土似黏聚力和声波传播衰减两个因素共同影响,DAS 信号振幅随砂土含水率变化存在一个临界含水率。当砂土含水率小于临界含水率时,DAS 信号振幅随含水率增大而减小,而当砂土含水率大于临界含水率时,DAS 信号振幅随含水率增大而增大;(3)因砂土似黏聚力作用和小球撞击时能量转化的差异,小球与砂土的接触形式对 DAS 振幅响应有显著影响。研究结果为城市地下工程安全动态 DAS 精细监测提供理论依据。

**关键词:** DAS; 砂土; 含水率; 振幅响应特性; 似黏聚力; 声波衰减

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0434-08

## Experimental Study on Impact of Moisture Content in Sandy Soil on DAS Amplitude Response

LI Junpeng, ZHANG Chengcheng, SHI Bin, CHEN Zhuo, XIE Tao, GUO Junyi

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

**Abstract:** Using distributed acoustic sensing (DAS) technology in conjunction with underground telecommunication fiber networks for dynamic urban security monitoring, including perimeter security (intrusion) monitoring, pipeline leakage detection, and traffic condition assessment, represents a new approach. This research aimed to investigate the influence of moisture content variations in geotechnical mediums around unlit fibers on DAS amplitude response characteristics. To achieve this, the paper designed DAS amplitude response tests using sandy soils with varying moisture contents (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) and two excitation modes: a small ball impacting a disc and directly on sandy surface. The test results revealed that: (1) Vibration signals generated by a free-falling ball impacting the sandy surface, coupled with the setup of a ring sensing optic fiber, could enhance the DAS signal-to-noise ratio, thereby increasing the reliability of the testing apparatus and the reproducibility of the

\* 收稿日期:2022-12-04;修回日期:2023-03-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42030701)、国家自然科学基金青年科学基金项目(42107153)资助

作者简介:李俊鹏(1998—),男,硕士研究生。主要从事光纤测振应用基础理论方面的研究。

E-mail: mg20290066@smail.nju.edu.cn

通讯作者:张诚成(1990—),男,副教授,博士。主要从事震动工程地质方面的研究。E-mail: zhang@nju.edu.cn

results. (2) This study also identified a critical moisture content level that affected the DAS signal amplitude, which was caused by the combined effects of the sand's pseudo-cohesion and the attenuation of the acoustic wave propagation. Below this critical level, the DAS signal amplitude decreased with increasing moisture content, whereas above it, the amplitude increased with higher moisture levels. (3) The contact method between the balls and the sand had a significant impact on DAS amplitude response due to the differences in sand's pseudo-cohesion and the energy conversion upon impact. The findings provide a theoretical basis for the application of DAS technology in precise monitoring of urban underground engineering safety.

**Keywords:** DAS; sandy soil; moisture content; amplitude response characteristic; pseudo-cohesion; acoustic wave attenuation

## 0 引言

近年来,城市地下空间的开发和利用飞速发展,由城市地下工程引发的地面沉降、地裂缝、地面塌陷等地质灾害问题呈现不断上升的趋势<sup>[1-2]</sup>,严重威胁城市生命线工程如供水供气管网、电力管线、地铁交通等的安全运营<sup>[3-4]</sup>。因此,对城市地下生命线基础设施安全监测是城市可持续发展的需要,也是国家重大需求。由于城市地下环境具有极高的隐蔽性和极强的不确定性,传统的地球物理探测技术和点式的传感技术难以满足地下生命线工程长距离和分布式的时空连续的监测要求,严重影响灾害的风险评估和预测预警的准确性,亟需探索和研发新的监测技术来解决这些瓶颈问题。

分布式声波传感(Distributed Acoustic Sensing, 简称 DAS)技术是一种可以实现连续分布式声波/振动测量的新兴感测技术<sup>[5-6]</sup>。该技术利用脉冲光在光纤中产生的后向瑞利散射(Rayleigh Backscattering, 简称 RBS)光,将光纤转变为密集的声波/振动传感单元,具有探测距离长、环境适应性强、抗电磁干扰、可重复探测等优势。DAS技术的一大特点在于可利用城市中已布设的冗余通讯光缆,简称暗光纤,进行长距离、大规模的分布式监测<sup>[7-8]</sup>,无需专门布设光缆,既节约了布设光缆的时间和成本,又具备构建城市感知神经网络的功能,因此DAS在实现城市安全动态精细化监测方面具有极大的应用潜力<sup>[9]</sup>,已成功应用于城市管道泄漏、周界安防(入侵)、地下结构成像、城市地质灾害等安全监测<sup>[8,10-14]</sup>。

由于城市中的暗光纤大多通过沟槽布设,在利用暗光纤网进行DAS监测时,降雨、地下水位波动

等水文要素的变化会改变暗光纤周围填土的含水率与分布,进而影响DAS的振幅响应特性。然而,目前对于砂土含水率对DAS振幅响应特性的影响规律研究还未见报道。本文设计了专门的试验装置,开展了砂土含水率对埋入式光纤DAS振幅响应特性影响的试验研究,揭示了DAS信号振幅随砂土含水率的变化规律,分析了砂土似黏聚力、声波传播衰减等影响DAS振幅响应的机理,为城市地下工程安全动态DAS精细监测提供理论依据。

## 1 DAS感测基本原理

### 1.1 DAS技术

DAS技术是一种利用光纤后向瑞利散射干涉效应实现声波/振动信号连续分布式感测的新型光纤传感技术<sup>[5]</sup>。当声波/振动信号作用于光纤时,会引起微小形变,改变光纤长度和折射率,从而使光波信号的相位和散射光干涉图样发生变化。DAS技术通过监测光波信号相位和散射光干涉图样的变化,能够对光纤沿线环境物理量(振动、声音等)进行空间连续和实时动态感知。通过监测光波返回的时间,DAS技术能够实现定位,从而得到光纤沿线任意一点的被测量变化与分布。

在光纤上固定长度的两点之间,瑞利后向散射相位延迟 $\Phi$ 是可预测的,相位延迟变化 $\Delta\Phi$ 与扰动引起的光纤轴向应变率 $\dot{\epsilon}_{xx}$ 之间具有如下线性关系<sup>[5]</sup>:

$$\dot{\epsilon}_{xx}(x,t) = \frac{\lambda f_s}{4\pi n L_g \psi} \Delta\Phi \quad (1)$$

式中, $x$ 为沿光纤轴向的坐标位置; $t$ 为时间; $\lambda$ 为入射脉冲光波长; $f_s$ 为采样率; $n$ 为光纤折射率; $L_g$ 为标距长度; $\psi$ 为波克尔系数。由公式(1)可知,在给定

参数条件下,外部扰动越大,则引起的光纤轴向应变率 $\dot{\epsilon}_{xx}$ 越大,DAS信号振幅也越大,且两者呈线性关系,因而能够定量感测外界扰动的强度。

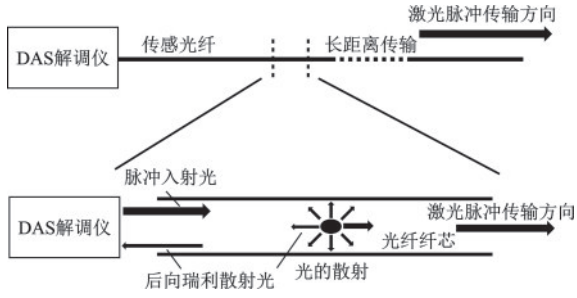


图1 DAS测量原理  
Fig.1 Diagram of DAS measurement

## 1.2 声波衰减原理

声波在介质中传播时会因媒质的黏滞吸收性、媒质的热传导声吸收性、分子弛豫吸收过程等原因而发生衰减。声波衰减系数可定量表征声波能量的衰减情况,并能反映媒质的黏滞、反射、散射及弛豫效应等。声波衰减系数越大,能量衰减越快,传递到光纤处的能量越小,DAS振幅越小。杜功煊等<sup>[15]</sup>给出了如下声波衰减系数公式:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[ \frac{4}{3} \eta' + \chi \left( \frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\eta''_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (2)$$

式中, $\omega$ 为声波频率; $\rho_0$ 为媒质的密度; $c$ 为压缩波波速; $\eta'$ 为切变黏滞系数; $\chi$ 为热传导系数; $C_V$ 为定容比热容; $C_P$ 为定压比热容; $\eta''$ 为容变黏滞系数; $\tau$ 为弛豫时间。

如在页岩中,压缩波(声波)速度随含水率的增加会先减小后增大,而压缩波(声波)衰减系数则反之;横波速度在含水率较低时会有所减小,但在含水率较高时基本保持不变,而横波衰减系数与含水率的关系并不明显<sup>[16]</sup>。而在砂土中,含水率越大,表面声导纳越小<sup>[17-19]</sup>,声阻抗越大,声波能量损耗也越大,即砂土含水率越大,声波能量的损耗越大,导致DAS振幅越小。

当砂土的含水率一定时,其声波衰减系数不变。因此,对于同一振动信号,传递到光纤处的能量不变,光纤产生的形变一致,故DAS振幅大小相同。但是,若改变砂土的含水率,则其声波衰减系数就会发生相应变化,导致振动信号传递到光纤处的能量发生改变,从而影响DAS振幅响应。因此,

可根据声波衰减等原理来建立砂土含水率与DAS振幅之间的关系。

## 2 试验方案设计

### 2.1 试验装置与材料

为了探究砂土含水率对DAS振幅响应的影响,本文设计了如图2所示的试验装置。试验装置主要由光纤试验模块、激振装置和DAS解调仪三部分组成。

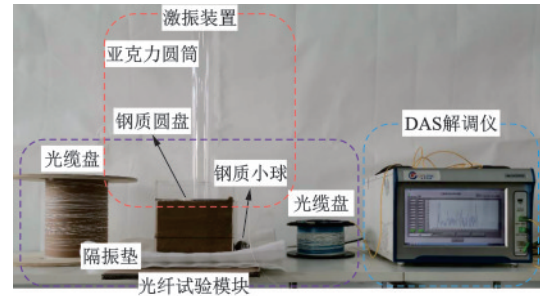


图2 试验装置示意  
Fig.2 Schematic diagram of test setup

(1) 光纤试验模块。该模块由20 cm×20 cm×20 cm的模型箱、砂土和埋入式0.9 mm紧包单模光纤所组成。为避免端部效应影响,选用120 m长的光纤作为测试光纤,将其两端分别固定在光缆盘上,并选用中间段作为测试段光纤。为增强DAS信号信噪比,在光纤中间位置取4 m并盘成一直径约为15 cm的圆环用于感测振动信号。

(2) 激振装置。使直径36.5 mm、质量200 g的钢质小球自由下落撞击砂土或厚度为5 mm的钢质圆盘产生振动信号。为保证每次试验小球的下落高度和落点一致,采用高度为50 cm、内径为5 cm的空心亚克力圆筒引导小球下落。

(3) DAS解调仪。DAS解调仪的标距长度和道间距均设置为1 m,采样率为2 kHz。解调仪连接测试光纤一端,采集测试段光纤沿线的振动信号。

试验所用砂土为级配不良粗砂土(颗粒级配曲线如图3所示),其有效粒径 $d_{10}$ 、中间粒径 $d_{30}$ 和限制粒径 $d_{60}$ 分别为0.27 mm、0.37 mm和0.56 mm;不均匀系数 $C_u$ 为2.07;曲率系数 $C_c$ 为0.91。试验时,将砂土分层填入模型箱内。

### 2.2 试验方案与过程

将上述砂土样在105℃的干燥箱中烘10 h,以

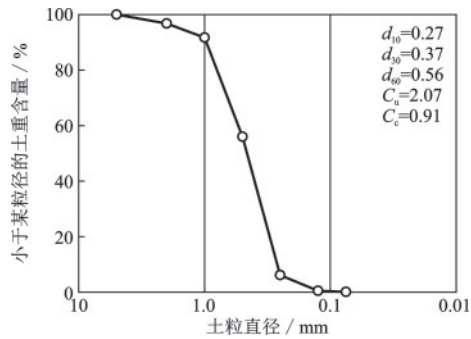


图3 砂土的粒度分布曲线

Fig.3 Grain size distribution curves of sandy soil

确保水分被完全烘干,并配置0%、5%、10%、15%和20%五种质量含水率的砂土样。为避免箱体振动对光纤的影响,填筑时将待测段光纤埋设在砂土柱的1/3高度处,即先将砂土填入模型箱底部使其均匀平铺5 cm高,然后将光纤环放置在砂土面上(图4),最后将剩余的三分之二的砂土填入亚克力箱中。模型填筑方式为分层压实,试验过程控制砂土的干密度为 $1.48 \text{ g/cm}^3$ 。

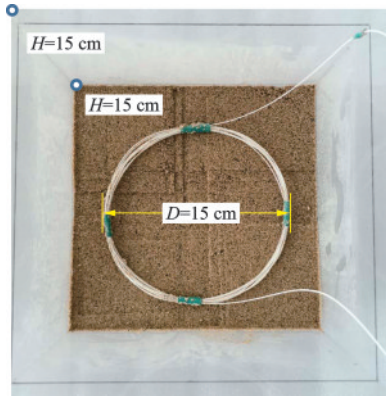


图4 感测光纤布设形式

Fig.4 Setup of sensing optical fiber

采用小球自由下落撞击模型的方式进行试验。为了探究砂土与小球接触方式对试验结果的影响,本文设计了以下两种试验:

(1) 钢质小球撞击钢质圆盘。将5 mm厚的钢质圆盘放置于砂土面正中央,并将空心亚克力圆筒垂直放置于钢质圆盘正中央上方。试验时,使钢质小球从空心亚克力圆筒顶部自由落下并撞击在钢质圆盘中心处。

(2) 钢质小球直接撞击砂土面。将空心亚克力圆筒垂直放置于砂土正中央上方,试验时,使钢质小球从空心亚克力圆筒顶部自由落下并撞击在钢质圆盘中心处。

试验过程中采用DAS解调仪实时记录光纤沿线振动信号。每组试验结束后,取代表性砂土样测量含水率。

本次试验探究了小球撞击圆盘与小球直接撞击砂土面二种激振方式下五种质量含水率0%、5%、10%、15%和20%砂土的DAS振幅响应。为了减少试验的随机误差,每种工况开展七次重复试验,总计70组试验。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 单元信号与振幅拾取

当小球撞击圆盘与小球直接撞击在砂土面时,DAS所记录的振动信号的持续时间均为0.4~0.8 s(图5)。故进行数据预处理时,每个信号截取时间为1 s的片段进行处理分析。

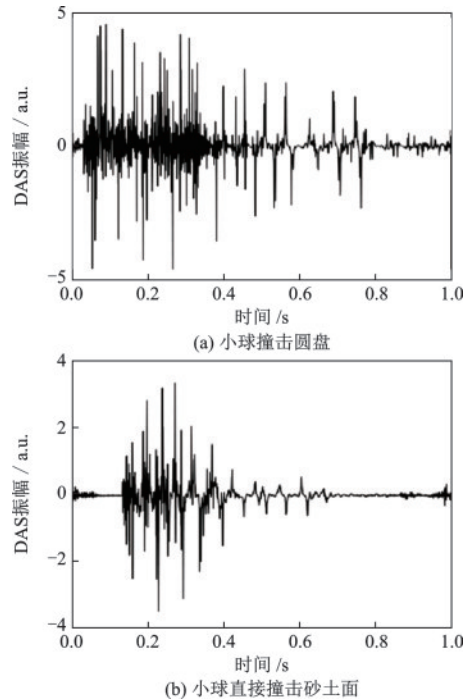


图5 小球下落撞击砂土面的DAS波形示意

Fig.5 DAS waveform induced by ball falling and impacting on sandy soil surface

由于光纤盘为4 m,道间距为1 m,故有效信号道数为4道左右。在计算DAS信号振幅时,先截取有效信号段,而后选取信号质量最好的有效道并提取信号振幅最大值,最后取多次重复试验平均值,得到单次撞击的DAS信号振幅。

需要注意的是,由于本试验尺度较小,纵波、横波等震相叠加,因此文中未对纵波和横波的振幅进行区分,统称为DAS振幅。

### 3.2 试验可靠性验证

为了验证激振装置的可靠性,绘制同一含水率砂土样下小球撞击圆盘的DAS信号振幅示意图,如图6所示。对于同一试样同一撞击形式,不同次撞击下DAS振幅基本相同( $3.83 \pm 0.09$ ),表明试验激振模块具有很好的可靠性。

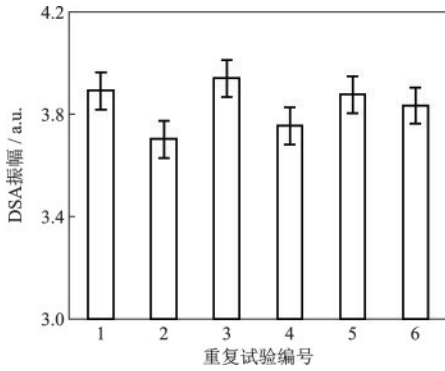


图6 激振装置可靠性

Fig.6 Reliability of excitation device

为了检验制样过程的质量控制,绘制多次制样下小球撞击圆盘的DAS信号振幅示意图,如图7所示。由该图可知,对于相同含水率相同撞击形式的不同砂土试,制样误差对DAS振幅的影响很小( $4.67 \pm 0.07$ ),表明样品制备过程质量控制满足要求。

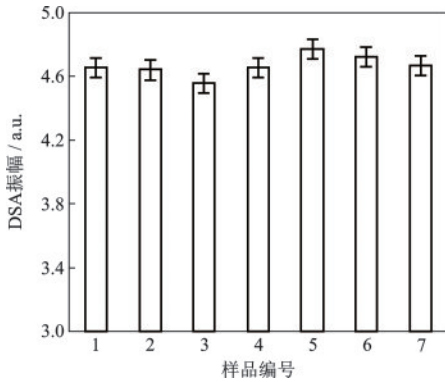


图7 制样可重复性

Fig.7 Repeatability of sample preparation

综上,本文所采用的试验方法是可靠的,试验中测得的DAS数据是准确的。

### 3.3 砂土含水率对DAS振幅响应的影响

不同接触方式下砂土质量含水率-DAS最大振幅曲线如图8所示。无论是小球撞击在钢质圆盘上还是直接撞击在砂土上,DAS最大振幅随砂土含水

率的变化趋势基本一致,即:砂土含水率为零时,DAS振幅最大;在0~10%范围内时,DAS振幅随着砂土含水率的增加而减小;而在10~20%范围内时,DAS振幅随着砂土含水率的增加而有不同程度的回升。对数据点进行拟合,可得小球撞击在钢质圆盘上的曲线拟合公式为:

$$A = 0.002w^2 - 0.060w + 4.899; R^2 = 0.972 \quad (3)$$

小球撞击在砂土面上的曲线拟合公式为:

$$A = 0.006w^2 - 0.134w + 4.304; R^2 = 0.950 \quad (4)$$

据M.H.A.Mohamed等<sup>[17]</sup>给出的声导纳与砂土体积含水率公式,换算成质量含水率为:

$$\beta = e^{\frac{w\gamma_d - b}{a}} \quad (5)$$

式中, $\beta$ 为声导纳实部; $w$ 为质量含水率; $\gamma_d$ 为干容重; $a$ 与 $b$ 为系数;其中 $a$ 与不均匀系数 $C_u$ 有关:

$$a = 0.0284 C_u + 0.0892 \quad (6)$$

依据公式(6)计算得到系数 $a$ 为-0.148,查表后得到系数 $b$ 为-0.3603,代入式(5)中绘制声导纳理论曲线,如图8中黑色点线所示。

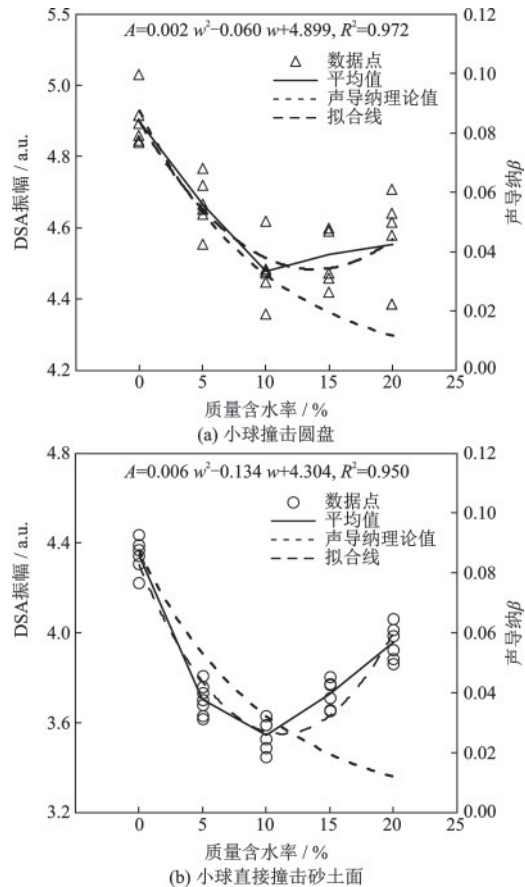


图8 DAS信号振幅和声导纳理论值随砂土质量含水率变化关系

Fig.8 Relationship between DAS signal amplitudes and theoretical acoustic admittance with varying sandy soil moisture contents

当小球撞击在钢质圆盘上时,DAS信号最大振幅随砂土含水率的增大先减小后微弱回升,且前半段与声导纳理论值吻合性较好。这是因为:砂土表面导纳会随着含水率的增加,先急剧下降,而后趋于稳定。故DAS信号最大振幅随砂土含水率的增大而减小。但由于砂土湿水后,光纤与砂土的耦合性增强,因此当砂土含水率超过10%时,尽管砂土表面导纳会随着含水率的增加而呈现减弱趋势,但最终的DAS信号振幅仍呈递增规律。

当小球直接撞击在砂土面上时,DAS信号最大振幅随着砂土含水率的增大先减小后明显回升,该现象与砂土的似黏聚力(基质吸力)有关。砂土的似黏聚力(基质吸力)是指砂土在非饱和状态下表现出类似于黏性土黏聚力的性状。对于干密度为 $1.51\text{ g/cm}^3$ 的砂土,当含水率在6~9%范围内时,似黏聚力达到最大值<sup>[20]</sup>;而白琴琴等<sup>[21]</sup>认为砂土在含水率9~10%时似黏聚力达到峰值。本文试验结果显示,DAS信号振幅在砂土含水率为10%时达到最小值,表明DAS信号振幅与砂土的似黏聚力之间存在相关关系。

具体而言,DAS信号振幅与砂土的似黏聚力呈负相关性。当小球从固定高度下落并接触砂土时,每次接触所具有的能量相同。但是,砂土的似黏聚力越大,就需要越多的能量克服似黏聚力做功。而似黏聚力随砂土含水率的增加会先快速增加,而后缓慢增加,到达一个峰值后减小。这种变化与DAS信号振幅的变化呈现出负相关关系:当小球撞击砂土表面时,DAS信号振幅先快速下降,而后缓慢下降并达到最小值。当砂土含水率继续增加时,DAS信号振幅则会明显回升。

上述分析表明,DAS的振幅响应特性受声波传播衰减和砂土似黏聚力两个因素共同控制。图8(b)显示,DAS信号振幅随砂土含水率变化的过程中明显存在一个临界含水率,即砂土含水率为10%时,DAS信号振幅最小。这主要是因为:当砂土的含水率为0%时,其声阻抗最小,且砂土的似黏聚力为零,小球无需克服似黏聚力做功,有更多的能量传递到光纤处,故DAS信号振幅最大。不仅声阻抗会随着砂土含水率的增加而增加,而且砂土的似黏聚力也随着含水率的增加而快速增加,并在含水率为10%左右时,达到最大似黏聚力。当砂土含水率为10%时,其声阻抗接近最大值,且砂土的似

黏聚力达到最大,小球需要更多的能量去克服似黏聚力做功,故DAS信号振幅最小。当砂土含水率超过10%后,继续增加含水率,其声阻抗已趋于稳定,而似黏聚力会急速下降并最终消失,故DAS振幅在砂土含水率超过10%后会有明显回升。

以小球直接撞击砂土面为例(图9),当砂土含水率在0~5%时,DAS信号振幅随砂土含水率的增加迅速减小,这是由于此时声导纳值下降较快且砂土似黏聚力快速增加两者叠加所致;当砂土含水率在5~10%时,DAS信号振幅随砂土含水率增加而下降速度明显放缓,这是由于此时砂土似黏聚力达到最大值附近,且声导纳值下降速度放缓;当砂土含水率在10~20%时,DAS振幅随砂土含水率增加而增加,这是由于此时砂土似黏聚力开始迅速减小直至消失,而声导纳值减小速度开始放缓。这表明,砂土似黏聚力和声波传播衰减会对DAS信号振幅产生较强的影响。

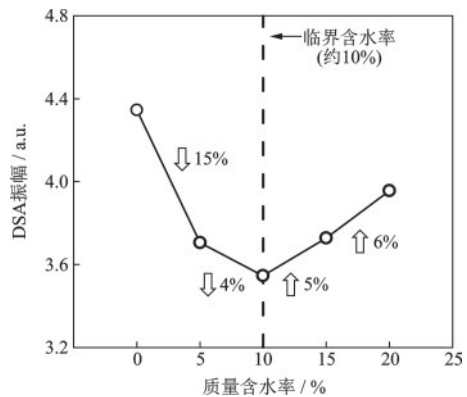


图9 不同砂土含水率区间下DAS信号振幅变化的幅度  
Fig.9 Variations of DAS signal amplitudes under different ranges of sandy soil moisture content

此外,似黏聚力也直接影响了小球与不同含水率砂土的接触过程:当砂土含水率为0~10%时,含水率越大,小球冲击砂面时砸出的土坑越浅;砂土含水率为10~20%时,变化不明显。这主要是因为:干砂土颗粒呈现散体状,没有似黏聚力,故小球冲击砸出的坑较大;当砂土含水率在10%以下时,含水率越大,砂土的似黏聚力越大,小球与砂土接触所受阻力越大,故小球冲击砸出的坑越浅;当砂土含水率为10~20%时,含水率越大,砂土的似黏聚力越小,但砂土颗粒间的孔隙逐渐被自由水填充,故小球与砂土接触时,虽然受到似黏聚力的作用在减小,但因为砂土难以在瞬间完成排水固结,

所以小球冲击砸出的坑变化不明显。

在工程实际中,可能会发生砂土含水率越大,DAS振幅越大的情况,主要原因是:一开始光纤与砂土的耦合性较差,甚至部分悬空无接触,含水率增大后,改善了其耦合条件;二是密实度较低的砂土湿水后,体积上会有不同程度的缩小,减小了能量传递过程中的衰减。

### 3.4 小球-砂土接触形式对 DAS 振幅响应的影响

图 10 对比了钢质小球撞击钢质圆盘与直接撞击砂土面时 DAS 的振幅响应情况。由图可知,在任意砂土含水率下,小球撞击圆盘所产生的 DAS 信号振幅,均大于小球直接撞击砂土面所产生的 DAS 信号振幅,且小球撞击圆盘产生的 DAS 信号振幅变化幅度小于钢质小球直接撞击在砂土表面产生的 DAS 信号振幅变化幅度。

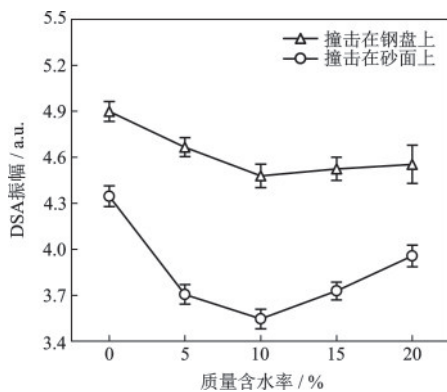


图 10 钢质小球撞击钢质圆盘与直接撞击在砂土表面 DAS 信号振幅对比

Fig.10 Comparison of DAS signal amplitudes for a steel ball impacting a disc versus directly impacting on sandy soil surface

小球撞击圆盘产生的 DAS 振幅,均大于小球直接撞击在砂土表面产生的 DAS 振幅是因为:小球撞击圆盘时,由于两者均较为光滑且刚度较大,故小球的重力势能多转化为圆盘的振动以及由于圆盘振动产生的声能;而小球直接撞击在砂土面时,由于砂土的刚度很小,小球需要克服与砂土子间的摩擦力做功,故小球直接撞击在砂土面时,其重力势能不仅会转化为与砂土颗粒的振动及其振动产生的声能,还会有相当部分能量转化为小球和砂土的内能。

小球撞击圆盘产生的 DAS 振幅变化幅度小于

小球直接撞击砂土面产生的 DAS 振幅变化幅度,这是因为:小球撞击砂土面时,小球直接与砂土接触,更容易受到似黏聚力的作用,并将克服似黏聚力做功,进而损失一部分能量,而小球撞击圆盘时未直接接触砂土,不会直接受到似黏聚力的作用。故小球直接撞击在砂土表面时 DAS 振幅的变化幅度与似黏聚力和砂土含水率变化的负相关性更强,表现为小球撞击圆盘产生的 DAS 振幅变化幅度小于小球直接撞击砂土面产生的 DAS 振幅。

## 4 结 论

探究了小球撞击圆盘与小球直接撞击砂土面二种激振方式下五种质量含水率 0%、5%、10%、15%和 20%砂土的 DAS 振幅响应及其原因,得到以下结论:

(1) 设计了一套砂土含水率对 DAS 振幅响应影响的试验装置及其测试方法。通过小球自由下落撞击砂土面的方式激发振动信号,通过将埋入式传感光纤盘成圆环以提高 DAS 信号信噪比。多次重复试验验证了该试验装置及其测试方法的可靠性。

(2) DAS 振幅响应特性受砂土似黏聚力和声波传播衰减两个因素共同控制。砂土的声导纳随含水率增加呈指数衰减,而似黏聚力则随含水率增加呈先增大后减小的趋势,因此 DAS 信号振幅随砂土含水率变化过程中存在一临界含水率(约 10%),即当砂土含水率小于临界含水率时,DAS 信号振幅随含水率增大而减小;当砂土含水率为临界含水率时,DAS 信号振幅达到最小值;当砂土含水率大于临界含水率时,DAS 信号振幅随含水率增大而增大。

(3) 小球-砂土接触形式对 DAS 振幅响应特性有显著影响。在任意砂土含水率下,小球撞击圆盘产生的 DAS 信号振幅,均大于小球直接撞击砂土面产生的 DAS 信号振幅,且前者产生的 DAS 信号振幅变化幅度小于后者产生的 DAS 信号振幅变化幅度,这与小球撞击时发生的能量转化和砂土似黏聚力作用有关。

致谢:硕士研究生方锦辉在试验过程中给予了帮助,南智传感产学研平台提供了试验场地和部分试验材料,在此一并表示感谢!

## 参考文献:

- [1] 杨天亮,许言. 国际地面沉降与城市安全研究动态——第一届国际城市地质学术研讨会综述[J]. 上海国土资源, 2017, 38(2): 1-3.  
Yang T L, Xu Y. Research trends of international land subsidence and urban safety — A summary of the first international symposium on urban geology[J]. Shanghai Land Resources, 2017, 38(2): 1-3. (in Chinese)
- [2] 刘江龙,刘会平,刘文剑. 广州市主城区地面塌陷灾害危险性评价研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 488-492.  
Liu J L, Liu H P, Liu W J. Study on risk assessment of ground collapse disaster in the main urban area of Guangzhou City[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2007, 27(4): 488-492. (in Chinese)
- [3] 白超宇,刘聪,徐强,等. 地裂缝活动作用下城市立交桥地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 79-85.  
Bai C Y, Liu C, Xu Q, et al. Seismic vulnerability analysis of urban overpass underground fissure activity [J]. Journal of Seismic Engineering, 2022, 44(1): 79-85. (in Chinese)
- [4] 李豪杰,朱鸿鹄,朱宝,等. 基于光纤监测的埋地管线沉降模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增2): 3645-3654.  
Li H J, Zhu H H, Zhu B, et al. Model test research on settlement of buried pipeline based on optical fiber monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup2): 3645-3654. (in Chinese)
- [5] Lindsey N J, Martin E R. Fiber-optic seismology [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2021, 49: 309-336.
- [6] 刘德明,贺韬,许志杰,等. 新型微结构光纤分布式声波传感技术及应用[J]. 应用科学学报, 2020, 38(2): 296-309.  
Liu D M, He T, Xu Z J, et al. New micro structure optical fiber distributed acoustic wave sensing technology and its application[J]. Journal of Applied Science, 2020, 38(2): 296-309. (in Chinese)
- [7] Ajo-Franklin J B, Dou S, Lindsey N J, et al. Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-14.
- [8] Zhang C-C, Shi B, Yin J, et al. Seismic wavefield and strain recordings on a 20-kilometer dark fiber allow detecting mass movement events and anthropogenic activities threatening a natural gas pipeline [C]//AGU Fall Meeting Abstracts. New Orleans, LA, United States: American Geophysical Union, 2021: NS21-A06.
- [9] Martin E R, Huot F, Ma Y, et al. A seismic shift in scalable acquisition demands new processing: Fiber-optic seismic signal retrieval in urban areas with unsupervised learning for coherent noise removal [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(2): 31-40.
- [10] Yin J, Li Z W, Liu Y, et al. Toward establishing a multi-parameter approach for monitoring pipeline geohazards via accompanying telecommunications dark fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 68: 102765.
- [11] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, et al. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber—optic distributed acoustic sensing[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2841.
- [12] 王宝善,曾祥方,宋政宏,等. 利用城市通信光缆进行地震观测和地下结构探测[J]. 科学通报, 2021, 66(20): 2590-2595.  
Wang B S, Zeng X F, Song Z H, et al. Seismic observation and underground structure detection using urban communication optical cable[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2590-2595. (in Chinese)
- [13] 曹卫平,黄旭日,姚海,等. 分布式光纤声波传感系统记录的交通噪声的干涉处理分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(7): 2530-2539.  
Cao W P, Huang X R, Yao H, et al. Interference processing analysis of traffic noise recorded by distributed optical fiber acoustic wave sensing system [J]. Journal of Geophysics, 2021, 64(7): 2530-2539. (in Chinese)
- [14] Fang G, Li Y E, Zhao Y M, et al. Urban near-surface seismic monitoring using distributed acoustic sensing [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(6): e2019GL086115.
- [15] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.  
Du G H, Zhu Z M, Gong X F. Fundamentals of Acoustics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 范翔宇,段美恒,张千贵,等. 页岩层理与含水率对声波传播影响的实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 53-61.  
Fan X Y, Duan M H, Zhang Q G, et al. Experimental study on the influence of shale bedding and water content on acoustic wave propagation[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2017, 39(2): 53-61. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)

(下转第 458 页)