

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241203002

岩土振动信号分布式光纤监测的离散元建模研究*

王艺澄¹, 闵寅通¹, 刘春^{1,2}, 李万翀¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要: 分布式光纤传感(DAS)可获取实时的工程事件振动信号, 识别这些信号的特征有利于预警和规避工程灾变风险。为系统地探究不同条件下的DAS信号特征, 基于高性能离散元软件MatDEM, 建立了岩土体振动信号DAS监测模型, 采用弹性Clump模型构建光纤结构体并实时记录相对应变数据, 并结合外场重锤下落试验的DAS振动信号数据, 从信号的时域特征、频域特征以及信号在振源参数影响下的变化规律三个方面验证了模型的合理性和有效性。研究表明, 模拟和试验的信号特征具有一致性: 信号波形都呈现出单个峰值并快速衰减的特征; 信号频率集中, 并随着频率增加, 振幅逐渐降低; 随着重锤下落高度、质量的增加, 信号的振幅提高, 相应的信噪比增强。模型可用于振动特性机理研究和振动信号大数据生成, 有利于进一步的DAS信号解译和人工智能识别。

关键词: 离散元法; 数值模拟; 分布式监测; 振动信号; 时域分析; 频域分析

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0307-10

Research on Discrete Element Modeling of Distributed Optical Fiber Monitoring of Geotechnical Vibration Signals

WANG Yicheng¹, MIN Yintong¹, LIU Chun^{1,2}, LI Wanchong¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. High-Tech Research Institute(Suzhou) of Nanjing University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Distributed acoustic sensing (DAS) can obtain real-time vibration signals from engineering events, and identifying these signal characteristics facilitates early warning and prevention of engineering disasters. To systematically investigate the characteristics of DAS signals under different conditions, a DAS monitoring model for geotechnical vibration signals was established using the high-performance discrete element method (DEM) software, MatDEM. The elastic Clump model was employed to construct optical fiber structures and record relative strain data in real time. By integrating DAS vibration signal data from field drop-weight impact tests, the model's validity and effectiveness were verified from three aspects: time-domain characteristics, frequency-domain characteristics, and variation patterns of signals influenced by vibration source parameters. The results demonstrated consistency between simulated and experimental signal characteristics. The signal waveforms consistently exhibited a single-peak pattern with rapid attenuation. Signal frequencies were concentrated, and amplitudes gradually decreased with increasing frequency. As the drop height and mass of the impact

* 收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 省级大学生创新创业训练计划支持项目(202410284190Y)、国家自然科学基金项目(4222707, 42477211)资助

作者简介: 王艺澄(2004—), 女, 本科。主要从事工程地质数值模拟研究。E-mail: 221830150@smail.nju.edu.cn

通信作者: 刘春(1984—), 男, 教授, 博士。主要从事计算工程地质教学科研工作。E-mail: chunliu@nju.edu.cn

weight increased, the signal amplitudes and corresponding signal-to-noise ratios increased. This model can be used for research on vibration mechanism characteristics and for generating large-scale datasets of vibration signals, thereby facilitating further interpretation of DAS signals and their recognition through artificial intelligence technology.

Keywords: discrete element method; numerical simulation; distributed monitoring; vibration signal; time-domain analysis; frequency-domain analysis

0 引言

随着中国城市化进程的加速,地下工程的规模和密度不断扩大。由于地下管线密度较高,城市内的施工会对其造成影响。违规施工则会损害管线,进而对人民的生命财产安全构成重大威胁。例如运输管线作为城市重要基础设置,挖掘、夯击等都会对其产生较大影响^[1-2];城市内的隧道交通,同样也受到外部施工的威胁,65%的隧道因人工损坏,需要消耗大量财力维护^[3-4]。通过监测、识别管线附近振动信号,有助于建立预警机制,提前判别和规避工程风险。

分布式光纤声波传感技术(Distributed Acoustic Sensing, DAS)作为光纤监测手段的一种,其特点是采样频率高,能够对施工振动信号和构造地震信号进行实时连续监测^[5-6]。同时,光纤监测相比其他手段具有体积小、抗电磁干扰、耐久性强等优势^[7]。基于DAS监测振动信号建立管线等预警机制,具有非常好的应用前景。然而,工程事件振动信号受岩土体类型、强度、不均匀性等复杂条件作用,其特征识别和影响因素分析需要大量的信号数据。通过外场DAS试验来获取数据成本高,时间周期长。数值模拟具有周期短、成本低、可重复等优势,可快速生成大量复杂条件下的振动信号数据。

前人基于有限元法建立振动作用模型^[8-10],探究振动参数对土体压实程度的影响。如Z.Xu等^[9]通过有限元建立振动压实二维模型,基于机器学习提取压实后土壤的刚度,并探究了振幅与频率对地层土壤压实度和信号传导的作用。R.Y.Zhang等^[10]基于有限元模拟,提出新的弹性模量数值模型,并探讨了有效接触面积对振动压实效果的影响。这些模拟研究表明,振动作用与其振动频率、质量和振幅等相关。但是土体具有不均匀性和不连续性,工程事件也常常涉及到较大变形破坏,常规连续介质方法难以考虑这些因素。

离散元法(DEM, discrete element method)^[11]为复杂岩土工程事件的振动分析提供了新的解决方

案。如朱遥等^[12]对砂土的直剪试验进行了离散元模拟,探究不规则颗粒对抗剪强度的影响,并给出颗粒配位数和剪应力的正相关关系。顾颖凡等^[13]基于岩体的微观结构系统提出了离散元水力压裂数值模拟方法,探究了岩石的各向异性,水压力大小和水压力增加速率影响等因素对水力压裂裂隙的数量和方向的影响。朱晨光等^[14]结合实测地温数据模拟了边坡温度场演变过程,探究了温度场中不同土体密度和含水量对土体粘聚力控制的边坡稳定性的影响。也有学者基于离散元法,开展了振动相关模拟。如王慧强^[15]通过离散元软件EDEM对振动压实进行模拟,得出土体压实度与压实遍数、转速等因素的关系。J.Van der Linde^[16]通过PCF3D软件建立振动农具和土壤的接触模型,探究不同单元直径、不同粘接模型和阻尼模型对振动模拟结果的影响,并优化了振动农具的地盘形状设计。X.Zhang等^[17]建立了二维离散元模型来探究高速铁路和轨道之间的动态关系:道碴单元的振动振幅随着车速的增加而增大,单元位移和速度的主要频率都低于100 Hz。近年离散元分析软件计算效率不断提升,实现了工程尺度的大规模振动模拟,例如刘春等^[18]基于MatDEM软件建立三维大型滑坡模型,并被成功应用于滑坡振动信号的模拟分析^[19]。这一系列研究为进一步开展DAS监测离散元建模和高精度的振动信号离散元模拟奠定了理论和技术基础。

本文基于离散元模拟软件MatDEM,建立了岩土体振动信号DAS监测离散元模型,采用Clump模型构建光纤结构体并实时记录相对应变数据,结合外场试验实测数据,从时域特征和频域特征两个方面对比模拟和试验结果,验证了模型的合理性和有效性,并进一步探讨了模拟振动信号的特征。

1 分布式光纤振动信号场外监测

1.1 试验设备与材料

试验采用的监测光纤为紧包式单模光纤(图1

(a)), 直径为 2 mm。试验设备包括型号为 MS-DAS2000 的 DAS 解调仪(图 1(b)), 支持单模光纤连续监测和数据保存, 其相关参数见表 1, 采样频率为 2 000 Hz, 道间距为 1 m; 同时采用三分量地震仪来记录振动信号(图 1(c))。

试验施加的振源信号为铁球下落信号, 模拟了施工过程中最常见的间断性夯击信号, 铁球质量分别为 2、5、10 kg, 对应的直径分别为 8、12、15 cm (图 1(d))。

表 1 DAS 系统参数

Table 1 Parameters of DAS system

DAS 采集参数	参数值
采样率/Hz	2 000
道间距/m	1
标距 GL/m	1.02
传感道数	92
脉冲宽度/ns	20
保存时间间隔/s	15

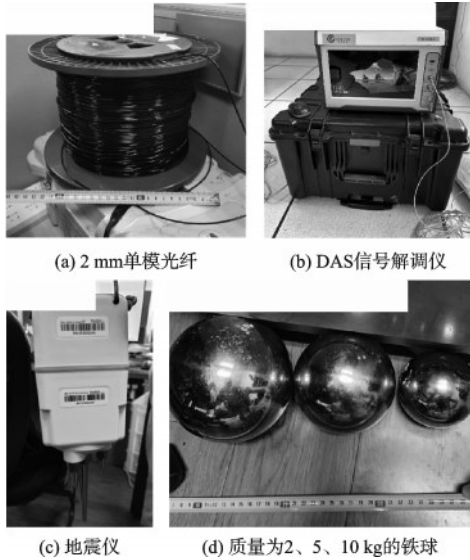


图 1 试验设备与材料

Fig.1 Testing equipment and materials

1.2 试验过程

分布式光纤振动外场试验装置布置如图 2 所示。经测量, 光纤总长为 92 m, 地下耦合部分埋深 0.5 m, 采用 OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)探测得到该部分的长度为 46 m。经信号测试确定光纤中心通道为通道 77。试验区域的岩土体为下蜀土, 由于光纤埋深浅, 可视均为均匀土体。

试验分别探究重锤质量、下落高度以及距光纤水平距离三个因素对光纤振动信号的影响, 具体参

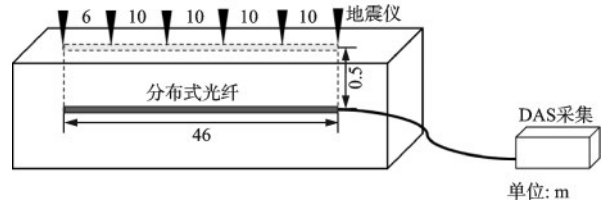


图 2 DAS 振动信号试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of DAS vibration signal test

数如表 2 所示。试验时, 根据重锤距光纤水平距离在地下耦合部分光纤的中垂线上选定相应的落点, 将铁球置于指定的标尺竖直高度处, 使其自由落体至落点, 记录下铁球锤击地表的时间节点, 并计时 15 s 左右继续进行下一组试验。遍历三类参数, 共计试验 45 组, 每组进行三次重复试验。

表 2 重锤下落试验参数

Table 2 Parameters of drop-weight impact tests

重锤质量/kg	下落高度/m	距光纤水平距离/m
2	0.5	0
5	1.0	1
10	2.0	2
		5
		10

1.3 试验结果与分析

1.3.1 试验成果与处理

根据记录的时间节点和对应的振动事件, 将所有 DAS 数据进行选取和切片。DAS 保存的数据为二进制文件, 通过 Matlab 将数据导入进行转化。转化后的数据分为两个部分, 一部分是 DAS 的参数设置(表 1), 另一部分是记录的光纤振动信号, 为连续时间 10 s 内通道 1~92 的相变率 $d\Phi/dt$, 选取与土体耦合部分的通道信号(通道 55~92)为研究对象(图 3)。

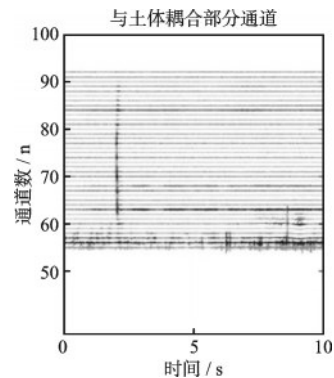


图 3 与土体耦合部分通道的信号

Fig.3 Signals from soil-coupled channels

离散元模拟中的信号数据处理得到的是光纤相对应应变率 $\Delta\epsilon/\Delta t$, 根据光纤应变率与相变率的关系^[20]:

$$\frac{\Delta\epsilon}{\Delta t} = \frac{\lambda}{4\pi x_{ij}(n + C_\epsilon)} \cdot \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, λ 是激光中心波长, m; x_{ij} 为光纤上两点之间的距离, m; n 为光纤有效折射率; C_ϵ 是折射率应变系数^[21-23]。代入试验参数: $\lambda = 1550 \cdot 10^{-9}$ m; x_{ij} 为标距 (GL) 1 m; $n = 1.445$; $C_\epsilon = -0.327$ 。得到试验中相对应应变率和相变率的理论关系:

$$\frac{\Delta\epsilon}{\Delta t} = 110.37 \times 10^{-9} \cdot \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\Delta t} \quad (2)$$

通过式(2)将试验中的相变率信号转换为模拟中的应变率信号, 统一量纲, 从而能够对比验证模型的合理性。

试验中, DAS的标距参数为 1 m, 在后续提取振动信号幅值时, 取标距为 4 m, 即以 74~77 四个通道信号幅值的均值代替中心通道信号的幅值, 从而减小重锤下落位置的误差对信号幅值的干扰。

除通道信号数据外, 本次试验将采用两个时域上的指标来评价 DAS 振动信号的强度和: 信噪比 (SNR) 和衰减时间, 其中信噪比公式为:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3)$$

式中, P_s 是信号强度, W; P_n 是噪声强度, W。计算时 P_s 为事件信号幅值, 而 P_n 是删去振动信号发生区域后的信号强度均方差。

1.3.2 试验成果分析

(1) 规律分析

① 不同重锤质量: 选取振源水平距离为 0 m, 下落高度为 1 m, 铁球质量分别为 2、5、10 kg 的工况, 取振动信号幅值并计算其信噪比, 得到图 4(a): 随着重锤质量增加, 由于其下落至地表的动能增大, 振动信号幅值提高, 且信噪比增强。三次试验从振动信号峰值降至背景噪声的时间大致都在 0.25~0.3 s 内, 表明信号幅值的大小对于振动信号的衰减时间影响较低。

② 不同下落高度: 选取铁球质量为 5 kg, 振源水平距离为 0 m, 下落高度分别为 0.5、1、2 m 的工况, 取振动信号幅值并计算其信噪比, 得到图 4(b): 随着重锤下落高度增加, 重锤动能增大, 振动信号幅值增加, 相应信噪比也增强。

③ 不同振源水平距离: 选取重锤质量为 5 kg, 下落高度为 2 m, 振源水平距离为 0、1、2、5、10 m 的

工况, 取振动信号幅值并计算其信噪比, 得到图 4(c): 随着振源距离增加, 振源信号在介质中传播消耗的能量增加, 到达光纤的应力减小, 对光纤的变形作用减弱, 冲击振动信号减弱。

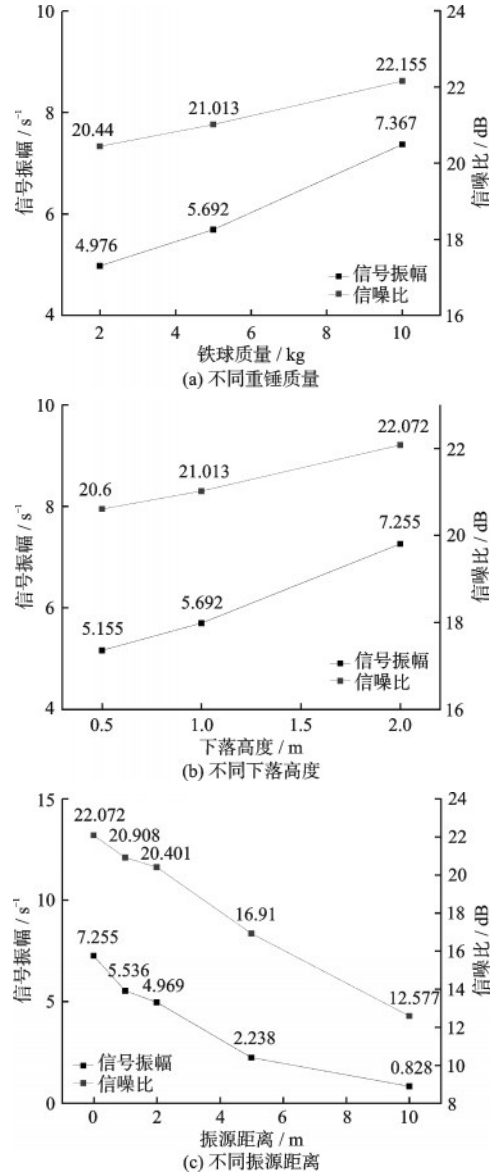


图4 中心通道信号幅值与信噪比

Fig.4 Signal amplitude and signal-to-noise ratios of central channel

(2) 机理探究

铁球下落至地表的能量与铁球质量和下落高度成正比。若铁球与地表的碰撞视为弹性碰撞, 改变铁球质量或下落高度将线性改变振源的能量。弹性介质中机械波能量体的密度的公式为^[24]:

$$W = W_e + W_k = \mu k^2 A^2 e^{i2(\omega t - kx + \frac{\pi}{2})} \propto A^2 \quad (4)$$

式中, μ 为泊松比; k 为波数, m⁻¹; A 为振幅, m; ω 为

波的频率, Hz。式4表明, 机械波的能量正比于机械波振幅的平方 A^2 。通过计算得到振源参数变化引起的振幅理论比值和实际比值, 如图5所示。

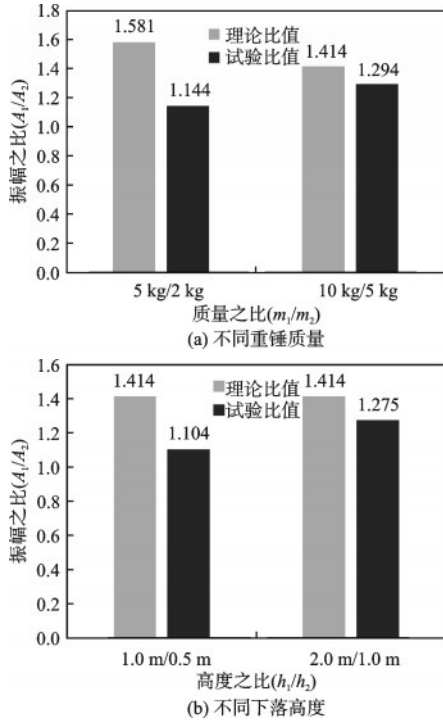


图5 振幅理论比值与实际比值

Fig.5 Theoretical and actual amplitude ratios

实际试验中铁球与土体的碰撞为非弹性碰撞, 部分动能由于接触面摩擦等因素损失, 且铁球会产生反弹等现象, 使得传递给土体的能量减小。随着铁球质量或下落高度的增加, 损失的能量增加, 因此振幅的试验比值均小于理论比值。

对比同一参数, 随着铁球质量或下落高度的增大, 振幅的试验比值逐渐接近理论比值, 表明随着铁球动能的增大, 损失的能量趋于一个稳定值, 在总能量中的占比逐渐减小; 对比不同参数, 对于振源水平距离 0 m, 重锤质量为 5 kg, 下落高度为 1 m 的铁球, 质量翻倍对振幅的增大作用比下落高度翻倍更大, 表明在铁球动能相同的情况下, 质量增加造成的能量损失小于高度增加造成的能量损失。

2 离散元法与数值建模

2.1 离散元法的接触模型

在离散元模型中, 岩土体由一系列遵循牛顿运动定律的单元堆积组成, 并通过时间迭代算法完成

数值模拟。如图6所示, 单元由可断裂弹簧相连接, 并产生法向作用力 F_n 和切向作用力 F_s ^[25]。其中, 单元间法向力 F_n 可表示为:

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n, X_n < X_b, \text{法向弹簧连接完整 (a)} \\ K_n X_n, X_n < 0, \text{法向弹簧断裂 (b)} \\ 0, X_n \geq 0, \text{法向弹簧断裂 (c)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, K_n 为法向刚度系数, N/m; X_n 为法向相对位移, m; X_b 为断裂位移, m。当单元间的法向相对位移 X_n 小于断裂位移 X_b , 单元受到拉力或者压力(式5(a))。当单元间相对位移 X_n 大于断裂位移 X_b , 弹簧连接断裂。此时若单元相对位移 $X_n > 0$, 则单元间不存在拉力(式5(c))。若单元再次恢复挤压接触, 则产生压力作用(式5(b))。

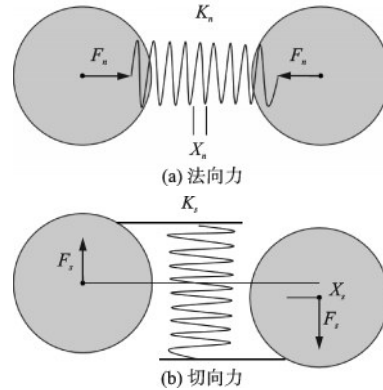


图6 单元间作用力模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of inter-unit force model

当单元间产生相对滑动或相对滑动的趋势时, 单元间产生切向力 F_s 为:

$$F_s = K_s X_s \quad (6)$$

式中, K_s 为切向刚度系数, N/m; X_s 为切向相对位移, m。

当单元间存在完整连接时, 根据库伦准则计算的最大切向力 F_{smax} 为:

$$F_{smax} = F_{s0} - \mu_p F_n \quad (7)$$

式中, F_{s0} 为不施加任何法向压力时单元间的初始抗剪强度, N; μ_p 为单元间摩擦系数; F_n 为法向压力, N。当切向力 $F_s > F_{smax}$, 则单元间连接断裂, 单元间只存在滑动摩擦力 $-\mu_p F_n$ 。

2.2 离散元法的弹性 Clump 模型

为模拟弹性和平滑的光纤, 引入离散元弹性 Clump 模型^[26]。其基本思路为将球体的单元小球进行部分重叠, 从而构建其不规则模型。

如图7, 在 Clump 模型中, 两个直径为 d 的单元

相互重叠,重叠量为 l_0 ,球心距为 r 。设定其平衡距离为 $d-l_0$,则相对位移定义为 $X_n=r-(d-l_0)$,图7(a)中两单元的相对位移 X_n 为0。当两单元间距离增加后, $r>d-l_0$, X_n 增加,单元间产生拉力 F_n (图7(b)),当相对位移 X_n 达到断裂位移时,连接断裂;当两单元间距离减小后, X_n 减小,单元间产生压力 F_n (图7(c))。当团簇单元发生切向移动时,单元间切向力仍由式6和式7定义。

在此基础上 Clump 可以由多个单元重叠而成,如图7(d)所示,三个单元相互重叠,可以构建表面较为光滑的团簇模型。在本文后续的模型中,会用到该功能去组建振源信号体以及光纤模型等。

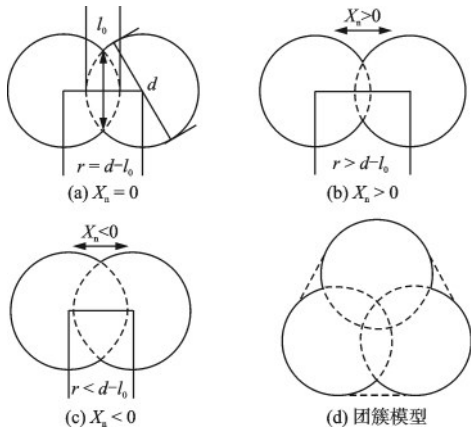


图7 弹性 Clump 模型示意图^[27]

Fig.7 Schematic diagram of elastic Clump model^[27]

2.3 分布式光纤振动信号离散元建模

基于以上原理,团队自主研发了高性能离散元 MatDEM^[28],采用创新的矩阵离散元计算法和三维接触算法,实现了数百万单元的高效离散元数值模拟。该软件包括了前期处理、求解计算、后处理和二次开发,可快速构建各类数值模型,并模拟复杂的大变形破坏和多场耦合作用过程^[27]。基于 MatDEM 软件建立分布式光纤振动信号离散元模型。由于三维模型所需单元达数千万,计算量极其巨大,故建立二维模型。具体过程如下:

(1)堆积土层。如图8(a)所示,二维土层模型的尺寸为 60×5 m,单元平均半径为0.02 m,单元总数为19.80万。单元生成后施加重力进行堆积,平衡单元间的作用力。在土体上表面增加压力板,避免因瞬时外力过强而导致颗粒飞溅,影响计算效率。

(2)材料赋值。在完成土体模型堆积后需要构建 DAS 模型的重锤振源和光纤。试验中所用重锤的直径分别为80、120、150 mm,对应质量分别为2、

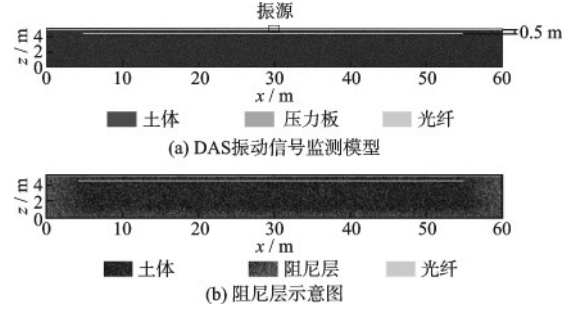


图8 二维离散元模型

Fig.8 Two-dimensional discrete element model

5、10 kg。在二维模型中的振源由三维转化为二维,须对质量进行折算,得到二维模拟下的质量 m_{2d} :

$$m_{2d} = \frac{V_{2d}}{V_{3d}} \times m_{3d} \quad (8)$$

式中, V_{2d} 是二维圆盘的体积, m^3 ; V_{3d} 是三维球体的体积, m^3 ; m_{3d} 是三维振源的质量,kg。

为实现与试验相同尺寸的模拟,建立50 m长,埋深0.5 m的光纤模型。使用半径为0.01 m的弹性 Clump 模型来组成光纤。将单元用弹性 Clump 的方式聚合到一起,其单元的重叠度为0.5,此时单元的间距为0.01 m。光纤位于土体埋深0.5 m位置,位于模型中间,删去模型中光纤位置处的单元让土层在重力作用下与光纤单元紧密接触。

(3)边界阻尼层构建。在外场试验中,土体可以视作半无限空间体。为削弱离散元模型箱的边界反射,在其底部、左侧和右侧设置阻尼层(图8(b)),其阻尼系数设为最优阻尼的3倍^[26,29]。

(4)振动信号模拟。模拟中需要实现重锤下落的振动信号。为减少计算量,将重锤直接与地面接触,计算一定高度重锤下落至地面时的速度,并赋给重锤单元。模拟得到整条光纤上所有单元在10 s内,2 000 Hz采样频率下的轴向相对应变数据。然后,根据式2给出的 DAS 相位差信号与应变率随时间的变化来反映模拟的振动信号。

在试验中,DAS的标距为1 m,但是在上述建模过程中记录光纤的分辨率为0.01 m,因此需要对1 m长度上同时刻的100个数据进行积分,最终得到和试验一致的通道应变率数据。

3 试验和数值模拟的对比分析

3.1 模拟与试验信号时域对比

取下落高度为1 m,重锤质量为5 kg,振源距离

为 0 m 的模拟信号与试验对比,如图 9(a)、图 9(b) 所示:通道信号的模拟结果与试验结果相似,通道信号振幅从中心向两边衰减。

取该工况下中心通道的数据(图 9(c),图 9(d)):二者波形都呈现出单个峰值信号并快速衰减的特征。对比相同工况下,模拟信号的振幅要远

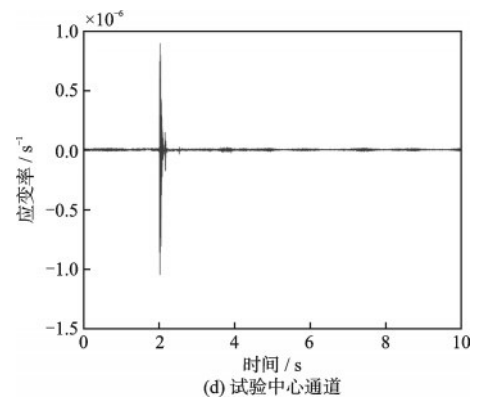
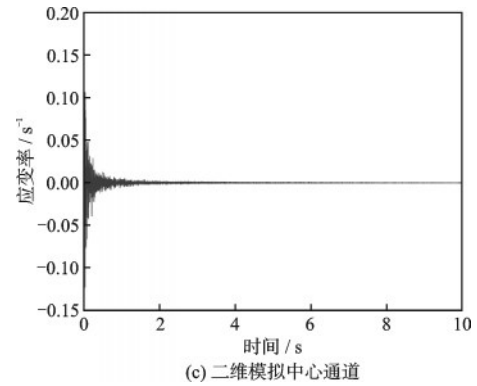
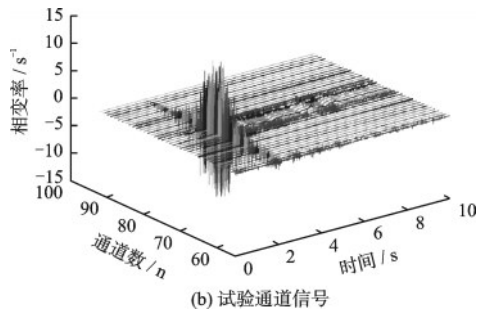
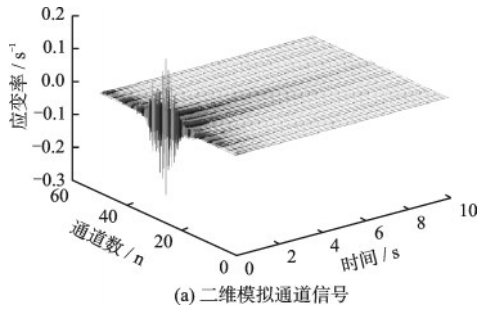


图 9 时域信号对比

Fig.9 Comparison of time-domain signals

大于试验(约 1.6×10^5 倍),这主要与模拟中光纤杨氏模量设置相关(图 9(c),图 9(d)):试验中光纤的半径 0.001 m,且包括从外到内的紧包套、衬套、涂层和纤芯四个部分。纤芯的杨氏模量较大,无法与周围材料和土层耦合变形。而本文建立的弹性 Clump 光纤模型的单元半径为 0.01 m,代表的是光纤和周边土体的综合性质,并采用较小的杨氏模量 80 MPa。其模拟记录了光纤周边土体的应变率,比试验中测量的光纤应变率更大。另外,在二维平面应变模拟中,应变也会相对增大。因此,可以对模拟的振动信号适当折减,并与试验结果量级匹配。

3.2 模拟与试验信号频域对比

通过快速傅立叶分析法,对试验与模拟的振动信号进行频谱分析,选取振源距离 0 m,重锤质量为 5 kg,下落高度为 1 m 时的工况,其试验与模拟的信号频谱如图 10 所示。试验和模拟的信号频率均主要集中在 50 Hz 附近,并随着频率增加,振幅逐渐降低,二者频谱特征具有很高的 consistency,验证了 DAS 振动信号模拟的有效性。

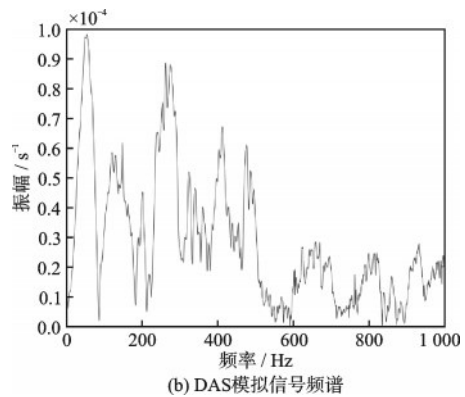
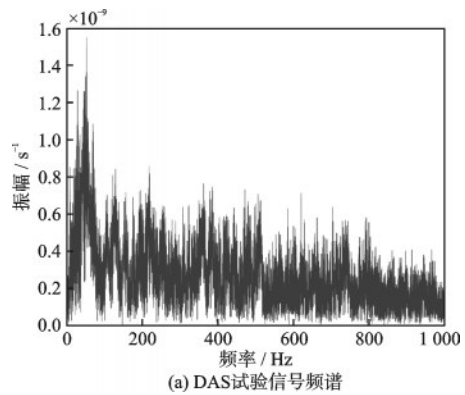


图 10 频域信号对比

Fig.10 Comparison of frequency-domain signals

3.3 振动信号的影响因素

(1)不同重锤质量:取重锤质量为2、5、10 kg,下落高度为1 m时的工况,模拟中心通道信号振幅、信噪比和同工况的试验信噪比如图 11(a)所示:随着重锤质量增加,模拟振动信号的振幅增大,相应信噪比增加,该变化趋势与试验结果一致。相较于试验,二维模拟的信噪比较高,这是因为在离散元模拟中背景噪声低且稳定,但试验场存在一定噪音干扰。

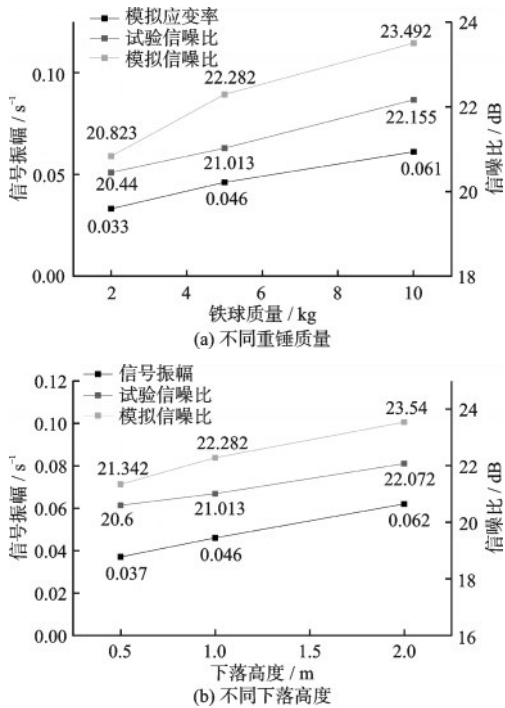


图 11 模拟信号中心通道振幅,试验信噪比及模拟信噪比
Fig.11 Simulated signal amplitude in central channel, experimental signal-to-noise ratios, and simulated signal-to-noise ratios

(2)不同下落高度:取下落高度为0.5、1.0、2.0 m,重锤质量为5 kg时的工况,模拟中心通道信号振幅,信噪比和同工况的试验信噪比如图 11(b)所示:随着下落高度增加,振动信号的振幅增大,也呈现出与试验一致的趋势。

与试验相同,计算动能增大对振幅的影响,当重锤质量和下落高度增加后,其理论比值与模拟比值如图 12 所示。在模拟中,质量增加或高度增加引起的振幅增加比值小于理论比值,是因为铁球仍有一部分能量以热量的方式消耗。但是相较于试验,

模拟比值更大,是因为在模拟中铁球与土体的弹性碰撞特征更为明显,动能损耗更少。

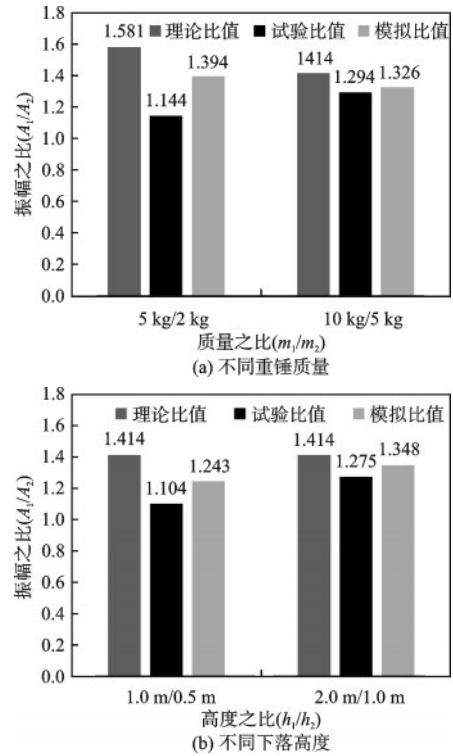


图 12 振幅理论比值、试验比值与模拟比值

Fig.12 Theoretical, experimental, and simulated ratios of amplitude

4 结论与讨论

本文结合分布式光纤场外监测试验,基于离散元软件 MatDEM,建立了岩土体振动信号 DAS 监测模型并验证了其有效性。所得结果如下:

(1)开展了重锤下落的分布式光纤场外监测试验,模拟了工程振动中最常见的间断性夯击信号。在试验过程中,通过人工施加不同参数振动信号,深入分析了各参数对振动信号振幅的影响。试验结果表明,随着重锤下落高度或重锤质量的增加,振动信号的幅值提高,相应的信噪比增强,振源能量与信号振幅的平方成正比,但由于碰撞会产生一定损失;随着振源距离的增加,振动信号的幅值减弱,相应的信噪比减弱。

(2)在试验结果的基础上,基于 MatDEM 建立二维岩土体振动信号 DAS 监测模型,采用弹性 Clump 模型构建光纤结构体,并采用离散元阻尼边界来消减边界振动波反射,实时记录相对应变数

据。时域和频域两个方面的特征都验证了模型的合理性,模拟结果呈现的变化规律也与试验一致。相较于试验,二维模拟信号的信噪比更高,重锤与土体的弹性碰撞特征更为明显;模拟信号与试验信号的振幅在数值上存在一定差异,是因为二维模拟构建模型存在局限性,可以对模拟的振动信号适当折减,从而与试验结果量级匹配,或进一步优化光纤模型。

本文所建立的振动信号 DAS 监测模型具有合理性和有效性,可用于振动特性机理研究和振动信号大数据生成,有利于进一步的 DAS 信号解译、灾害事件振动信号 AI 数据构建和智能识别。

参考文献:

- [1] 么惠全,冯伟.西气东输管道第三方破坏风险与防控措施[J].油气储运,2010,29(5):390-392,395,317.
Yao H Q, Feng W. Risk and prevention measures of third-party damage in the West-East Natural Gas Pipeline Project [J]. Oil&Gas Storage and Transportation, 2010, 29(5): 390-392, 395, 317. (in Chinese)
- [2] 何莎,冯强,张兰,等.油气管道应力监测方法对比分析[J].化学工程与装备,2023,(5):47-49.
He S, Feng Q, Zhang L, et al. Comparative analysis of stress monitoring methods for oil and gas pipelines [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023, (5): 47-49. (in Chinese)
- [3] 李彬,雷明锋,李文华.运营公路隧道病害对衬砌结构安全性的影响[J].铁道科学与工程学报,2011,8(5):40-45.
Li B, Lei M F, Li W H. Safety influence of operating highway tunnel caused by structure disease [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 40-45. (in Chinese)
- [4] 冯夏庭,陈炳瑞,明华军,等.深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:即时型岩爆[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):433-444.
Feng X T, Chen B R, Ming H J, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433-444. (in Chinese)
- [5] 施斌,王镝,王霆,等.隧道健康诊断BOTDR分布式光纤应变监测技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,(15):2622-2628.
Shi B, Wang D, Wang T, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (15): 2622-2628. (in Chinese)
- [6] 毛江鸿.分布式光纤传感技术在结构应变及开裂监测中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2012.
Mao J H. Research on application of distributed optical fiber sensor in structural strain and cracking monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [7] 朱鸿鹄,施斌,严珺凡,等.基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):821-828.
Zhu H H, Shi B, Yan J F, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828. (in Chinese)
- [8] Kenneally B, Musimbi O M, Wang J, et al. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 67: 73-82.
- [9] Xu Z, Khabbaz H, Fatahi B, et al. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1609-1625.
- [10] Zhang R Y, Dai H L, Wang Y D. Vibratory compaction response based on the contact model of roller-subgrade system [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128798.
- [11] Cundall P A, Strack O D. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [12] 朱遥,刘春,刘辉,等.颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟[J].工程地质学报,2020,28(3):490-499.
Zhu Y, Liu C, Liu H, et al. Experiment and discrete element numerical simulation for influence of particle morphology on shear strength of sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 490-499. (in Chinese)
- [13] 顾颖凡,卢毅,刘兵,等.基于离散元法的水力压裂数值模拟[J].高校地质学报,2016,22(1):194-199.
Gu Y F, Lu Y, Liu B, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing based on discrete element method [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(1): 194-199. (in Chinese)
- [14] 朱晨光,刘春,施斌,等.边坡稳定性温度效应数值模拟研究[J].高校地质学报,2018,24(1):122-127.
Zhu C G, Liu C, Shi B, et al. Numerical simulation of

- the influence of temperature field on slope stability[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(1): 122-127.(in Chinese)
- [15] 王慧强. 基于离散元法的振动压实过程仿真及其试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Wang H Q. DEM simulation of drum-soil interaction of vibratory roller during the static rolling [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.(in Chinese)
- [16] Van der Linde J. Discrete element modeling of a vibratory subsoiler [D]. Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2007.
- [17] Zhang X, Zhao C, Zhai W. Dynamic behavior analysis of high-speed railway ballast under moving vehicle loads using discrete element method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(7): 04016157.
- [18] 刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1362-1370.
Liu C, Fan X M, Zhu C G, et al. Discrete element modeling and simulation of 3-Dimensional large-scale landslide—Taking Xinmocun landslide as an example[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1362-1370. (in Chinese)
- [19] Yan Y, Cui Y F, Huang X H. Combining seismic signal dynamic inversion and numerical modeling improves landslide process reconstruction[J]. Earth Surface Dynamics, 2022, 10: 1233-1252.
- [20] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing [J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [21] Hartog A, Conduit A, Payne D. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and jacketed optical fibres [J]. Optical and Quantum Electronics, 1979, 11: 265-273.
- [22] Carr J, Saikkonen S, Williams D. Refractive index measurements on single-mode fiber as functions of product parameters, tensile stress, and temperature [J]. Fiber & Integrated Optics, 1990, 9(4): 393-396.
- [23] 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. 光学学报, 1997, (12): 114-118.
Yuan L B. Influence of temperature and strain on the refractive index of optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 1997, (12): 114-118.(in Chinese)
- [24] 周仕勇, 许忠淮. 现代地震学教程(第一版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [25] Mora P, Place D. A lattice solid model for the nonlinear dynamics of earthquakes [J]. International Journal of Modern Physics C, 1993, 4(6): 1059-1074.
- [26] Qin Y, Liu C, Zhang X, et al. A three-dimensional discrete element model of triaxial tests based on a new flexible membrane boundary [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 4753.
- [27] Liu C. Matrix discrete element analysis of geological and geotechnical engineering [M]. Beijing: Science Press Beijing, 2021.
- [28] 刘春, 施斌, 顾凯, 等. 岩土体大型三维离散元模拟系统的研发与应用[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增1): 551-557.
Liu C, Shi B, Gu K, et al. Development and application of large-scale discrete element simulation system for rock and soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(Sup1): 551-557.(in Chinese)
- [29] Liu C, Xu Q, Shi B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks [J]. Computers & Geosciences, 2017, 103: 12-20.

(本文编辑: 周小潭)