

强夯加固效果实时评估方法探讨

葛忻声, 李沛轩*, 孙静苑

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 本次研究在室外场地开展了多组不同设计参数组合下的强夯模型试验。通过落锤顶面安置的加速度传感器对落锤的冲击行程进行了记录, 并引入峰度、偏度等时域特征参数对落锤加速度时程曲线的形态进行了定量的描述。研究得出: 落锤加速度时程曲线的形态与施工工况之间存在对应关系, 可通过分析落锤加速度时程曲线的形态来对夯击过程进行评价; 落锤加速度时程曲线的时域特征值会随着夯击次数的增加呈现出规律性变化, 可以通过观察时域特征值的变化趋势是否达到稳定来判断是否止夯。本文提出了一种强夯加固效果实时评估方法, 并设计了使用流程。本文研究成果可用于指导后续强夯加固效果实时评估方法的工程应用。

关键词: 强夯; 落锤加速度; 加固效果; 实时监测; 模型试验

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0075-09

Discussion on real-time monitoring method of soil reinforcement effect in dynamic compaction

GE Xin-sheng, LI Pei-xuan*, SUN Jing-yuan

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In this study, we conducted dynamic compaction model tests at outdoor sites under various combinations of design parameters. An acceleration sensor was strategically positioned atop the falling weight to capture the characteristics of impact stroke. Subsequently, time domain characteristic parameters, including kurtosis and skewness, were employed to provide a quantitative description of the acceleration time history curve of the falling weight. The results reveal a significant correlation between the shape of the falling weight acceleration time history curve and the construction condition, and the compaction process can be evaluated by analysing the falling weight acceleration time history curve. Notably, the time domain eigenvalue of the falling weight acceleration time history curve will change regularly with the increase of compaction times. Therefore, the stability of the changing trend of the time domain eigenvalue serves as a reliable criterion for determining the appropriate moment to conclude the compaction process. A real-time evaluation method of dynamic compaction effect is presented, and its application flow is designed. The results presented herein serve as valuable guidance for the subsequent implementation of real-time monitoring techniques for assessing soil reinforcement effects during dynamic compaction in engineering applications.

Key words: dynamic compaction; falling weight acceleration; reinforcement effect; real-time monitoring; model test

0 引言

强夯法作为一种处理地基的物理方法最初被梅纳技术公司^[1]提出, 因其具有高效、节能、环保等特点, 已被广泛地应用于地基处理与路基加固等领域^[2-4]。为了提高强夯法的施工质量, 越来越多的

学者对强夯加固效果的评估方法进行了研究。目前的强夯法施工中, 对土体加固效果的评价通常是采用现场原位试验和室内土工试验等方法综合确定^[5-9]。但是强夯法加固土体是一个动态的过程, 土体的物理力学性质随着夯击次数的增加在不断改变。上述评价方法不适合于对强夯施工过程中的土

收稿日期: 2023-07-07

作者简介: 葛忻声 (1966—), 男, 山西宁武人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、地铁盾构等研究工作。E-mail: gexs1@aliyun.com。

*通信作者: 李沛轩 (1999—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事地基处理等研究工作。E-mail: 969854079@qq.com。

体加固效果实时评价。

为了实现强夯加固效果的实时评价,前人尝试建立了单击夯沉量与土体物理力学性质之间的联系,通过单击夯沉量的大小来反映土体的加固程度。孔令伟等^[10]通过建立反分析模型,得到了夯沉量与变形模量的关系曲线,即通过单击夯沉量来确定土体的变形模量。吴帅峰等^[11]构建了3参数强夯沉降模型,用于指导强夯法加固地基设计与辅助强夯施工效果的检测。在大多数的强夯施工中,夯沉量的测量仍然依赖于水准测量^[12]。如果在施工条件较差的情况下,这种测量方式可能会造成较高的人力成本并受到无法避免的主观因素的影响,故亟需寻找一种自动且高效的方法来代替基于人工测量的评价方法。随着监测设备与监测方法的发展,许多先进的监测方法已经在岩土工程中得到广泛的应用^[13-14]。ZHANG等^[15]提出了基于机器视觉与模式识别技术的夯击次数全自动测量方法。贾敏才等^[16]实现了通过图像跟踪拍摄与处理技术来获取土体位移等值线图与动接触应力时程曲线。CUI^[17]发现可通过孔隙压力与动土应力对路基的压实状态进行实时监测。从工程实践的角度出发,无论以图像采集为基础的非接触测量方法或通过土体内部埋设传感器的直接测量方法都由于设备成本投入较大而存在一定的局限性,难以进行推广普及。针对这一情况,又有一些学者提出通过分析落锤的冲击行程来判定土体的加固程度。在对落锤冲击行程的研究中,MAYNE等^[18]通过加速度传感器测得锤土碰撞接触过程的落锤加速度时程曲线,认为落锤冲击力可以视作三角形脉冲载荷。郑凌透等^[19]对落锤加速度时程曲线进行了分析,并对冲击行程进行了阶段的划分。韩云山等^[20]通过落锤冲击黄土行程试验研究得到落锤加速度峰值会随着夯击次数的增加而增加,落锤姿态会对加速度峰值产生影响。基于对落锤冲击行程的研究成果,研究人员提出了用落锤加速度峰值来代替夯沉量的加固效果实时评估思路。夏东超等^[21]通过模型试验得到了单击夯沉量与落锤加速度峰值的相对百分比之间的变化关系,认为可以通过测量加速度峰值相对变化的百分比来实时判断强夯的加固效果。胡江洋等^[22]通过室内足尺模型试验研究确定了落锤加速度峰值与路基分层压实度之间的关系。

虽然落锤加速度的时程曲线形态呈单峰状已得到广泛的认同,以落锤加速度峰值为依据的强夯

加固效果实施评估方法也已具备了一定的理论基础,但在实际的监测与研究过程中振荡波形或其他形式波形依然会频繁出现,落锤加速度峰值也难以避免地会受到落锤下落姿态、下落高度、坑壁塌落等因素的影响。基于上述原因,本文对不同施工工况下的落锤加速度时程曲线波形进行了识别,并采用时域分析法对不同夯击次数下的落锤加速度时程曲线进行了分析,引入了除落锤加速度峰值外与落锤加速度时程曲线形态相关的特征参数作为加固程度的判断依据,提出了一种强夯加固效果实时评估方法。研究成果可用于提高强夯加固效果实时评估方法的准确性,并作为强夯智能化施工的理论依据。

1 模型试验

1.1 试验用土

试验用土为山西忻州砂,砂土含水量13%,填筑密度 1780 kg/m^3 ,颗粒级配曲线如图1所示。

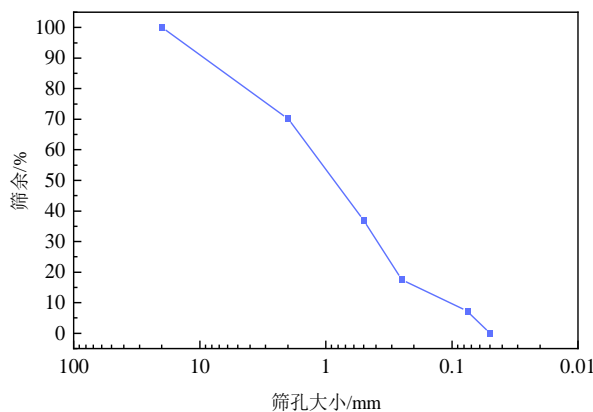


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

1.2 试验装置设计

现有的强夯模型试验通常在模型箱中进行,试验结果容易受到模型箱尺寸效应的影响,因此本次研究采用大型室外土坑进行试验,试验坑尺寸为 $1.3\text{ m}\times 1.3\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 深)。

为获得强夯过程中的落锤加速度时程曲线,在落锤顶面安设有最大量程为 1000 g 的IEPE型加速度传感器,传感器频响范围 $1\sim 15000\text{ Hz}$,分辨率 10 mg 。数据采集系统使用的是HP-DS16通道动态信号测试分析系统。模型试验装置如图2所示。

1.3 采样频率确定

在落锤加速度信号的采集过程中,为了避免出

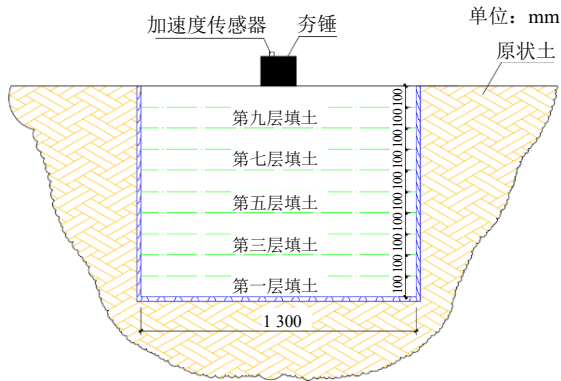


图 2 模型试验装置
Fig. 2 Model test device

现高、低频混淆现象, 本次研究在预实验中采用不同量级的采样频率对所采集波形进行分析, 认为将采样频率设定为 10 kHz 可以完整地记录出落锤冲击过程中加速度的连续变化过程。

1.4 试验方案设计

本次试验依据相似定理设定模型试验的几何相似比 $C_L=1:12$ 。为研究不同施工参数组合下的落锤冲击行程, 本次试验设计了不同夯击能级、落锤质量、落锤锤径组合下的强夯模型试验, 具体试验参数及试验方案如表 1 所示。

表 1 强夯模型试验参数及试验方案

Table 1 Dynamic compaction model test parameters and test scheme

试验组号	能级		锤重		落距		锤径	
	原型/(kN·m)	模型/(N·m)	原型/t	模型/kg	原型/m	模型/m	原型/m	模型/cm
1	4 000	192.9	40	23.15	10.000	0.833	2.0	16.7
2	4 000	192.9	30	17.36	13.333	1.111	2.0	16.7
3	4 000	192.9	20	11.57	20.000	1.667	2.0	16.7
4	4 000	192.9	40	23.15	10.000	0.833	2.5	20.8
5	4 000	192.9	30	17.36	13.333	1.111	2.5	20.8
6	4 000	192.9	20	11.57	20.000	1.667	2.5	20.8
7	6 000	289.4	40	23.15	15.000	1.250	2.0	16.7
8	6 000	289.4	30	17.36	20.000	1.667	2.0	16.7
9	6 000	289.4	20	11.57	30.000	2.500	2.0	16.7
10	6 000	289.4	40	23.15	15.000	1.250	2.5	20.8
11	6 000	289.4	30	17.36	20.000	1.667	2.5	20.8
12	6 000	289.4	20	11.57	30.000	2.500	2.5	20.8
13	8 000	385.8	40	23.15	20.000	1.667	2.0	16.7
14	8 000	385.8	30	17.36	26.667	2.222	2.0	16.7
15	8 000	385.8	40	23.15	20.000	1.667	2.5	20.8
16	8 000	385.8	30	17.36	26.667	2.222	2.5	20.8

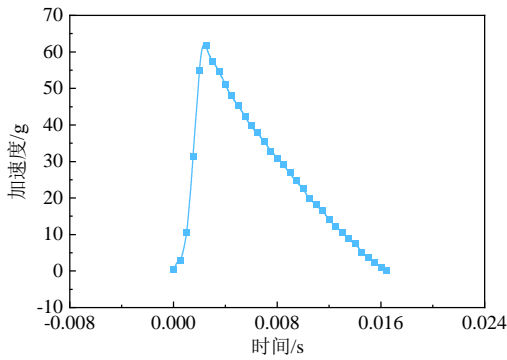
2 落锤加速度时程曲线分析

2.1 单击落锤加速度时程曲线分析

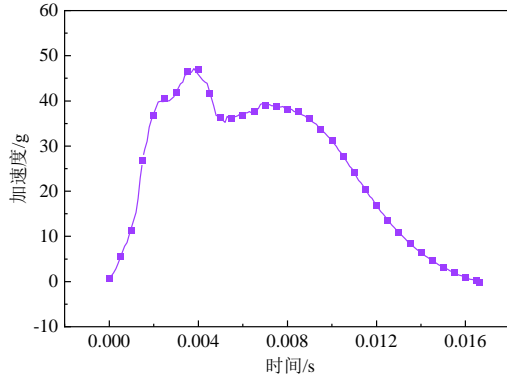
图 3 为不同工况下所测得的典型落锤加速度时程曲线。从图 3 (a) 中可以看出, 在正常的强夯施工工况下, 落锤加速度时程曲线呈单峰状, 无明显的第二波峰出现。从图 3 (b) 中可以看出, 与正常夯击工况下的落锤加速度时程曲线波形相比, 落锤下落姿态异常时会在峰值点附近产生一定时长的波动, 波形整体形态也会出现明显的差异。当此类波形出现时, 还可以观测到夯击中“跳锤”, 夯后“歪锤”的现象。从图 3 (a) 与图 3 (b) 中还可以看出,

当落锤加速度传感器处于正常工作状态时, 无需对所测的数据进行降噪或滤波处理, 时程曲线整体已较为平滑。

图 4 为落锤与传感器连接刚度不足时所测得的落锤加速度时程曲线。由图 4 可得, 在夯击过程中, 当落锤加速度传感器磁吸座不能提供足够的接触刚度时, 落锤加速度传感器会与落锤在冲击过程中发生多次相互碰撞, 导致落锤加速度时程曲线出现明显的振荡波形。为了保证所测得数据的有效性, 在试验中按照图 5 所示的方式使用液体胶水对落锤加速度传感器磁吸座与落锤顶的连接位置加固, 并在锤顶用胶带进行固定。



(a) 正常工况下的落锤加速度时程曲线



(b) 下落姿态异常时的落锤加速度时程曲线

图3 典型落锤加速度时程曲线

Fig. 3 Typical falling weight acceleration time history curve

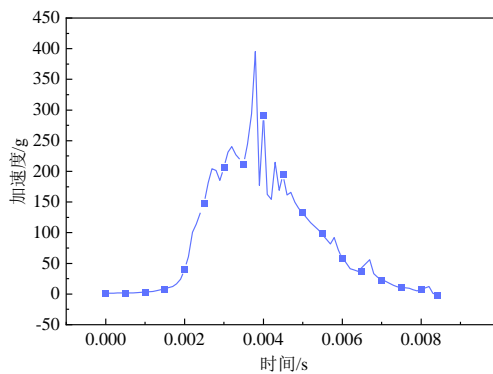


图4 传感器连接刚度不足时的落锤加速度时程曲线

Fig. 4 Time history curve of the falling weight acceleration with insufficient contact stiffness



图5 落锤加速度传感器安装方式

Fig. 5 Installation method of falling weight acceleration sensor

2.2 落锤加速度时程曲线对比分析

(1) 不同击数下的落锤加速度时程曲线对比分析

在本次模型试验中, 各组试验落锤加速度时程曲线形态随击数增加的变化规律较为相似, 文中以第2组试验结果为例对此进行分析。图6为第2组试验中不同击数下的落锤加速度时程曲线。从图6中可以看出, 随着夯击次数的增加, 落锤冲击作用时间逐渐减少, 落锤加速度峰值逐渐增大, 落锤加速度时程曲线的形态逐渐变得“尖锐”且变化趋势趋缓。通过分析落锤加速度时程曲线形态的变化还可以看出, 在试验初期阶段(第1~2击), 落锤加速度时程曲线形态近似于“右偏分布”, 随着夯击次数的增加(第3~16击), 落锤加速度时程曲线的形态逐渐接近于“正态分布”。

图7为坑底存在未夯实土的落锤加速度时程曲线。由于第7次夯击后坑壁土体塌落, 因此在第8次夯击时所测得的冲击作用时间、加速度峰值以及曲线形态呈现出与图6相反的变化规律, 在第8次夯击后通过清孔与坑底平整处理, 落锤加速度时程曲线形态的变化规律逐渐恢复正常。

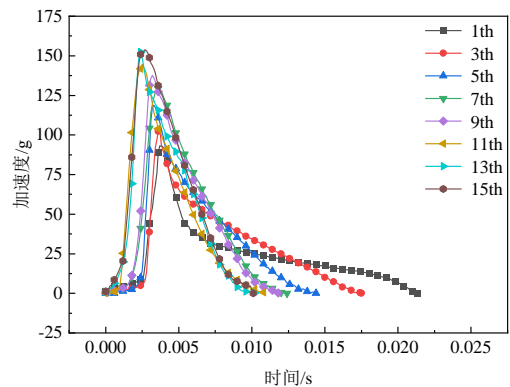


图6 第2组试验中不同击数下的落锤加速度时程曲线

Fig. 6 Time history curves of the falling weight acceleration with different compaction times in group 2

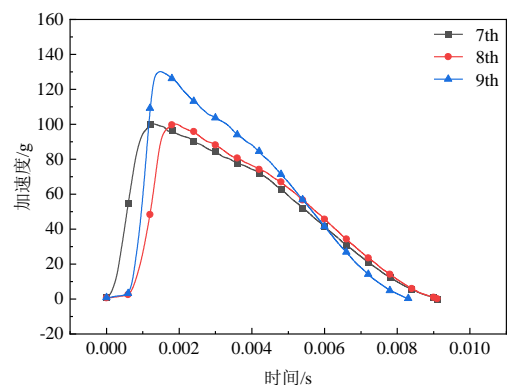
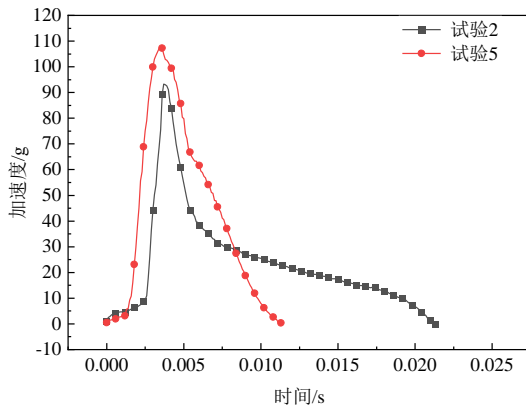


图7 坑底存在未夯实土的落锤加速度时程曲线

Fig. 7 Time history curves of the falling weight acceleration with uncompacted soil at the bottom of the pit

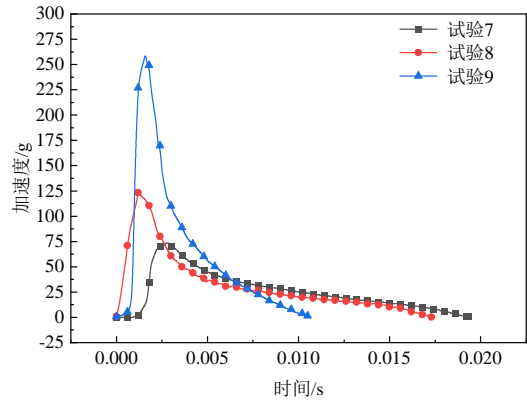
(2) 不同强夯设计参数组合下的落锤加速度时程曲线分析

各组试验中第 1 击的土质条件最为接近, 因此, 对第一次夯击时所记录的落锤加速度时程曲线进行对比研究可以更加直观地分析不同施工参数组合与落锤冲击行程之间的关系。图 8 (a) 给出了第 2 和第 5 组试验中第 1 击落锤加速度时程曲线。从图 8 (a) 中可以看出, 试验 5 的加速度峰值与落锤冲击作用时间分别为试验 2 的 1.16 倍和 0.53 倍, 说明在能级与锤重相同的情况下, 锤径越大, 落锤冲击作用时间越短, 落锤加速度峰值越大。图 8 (b)

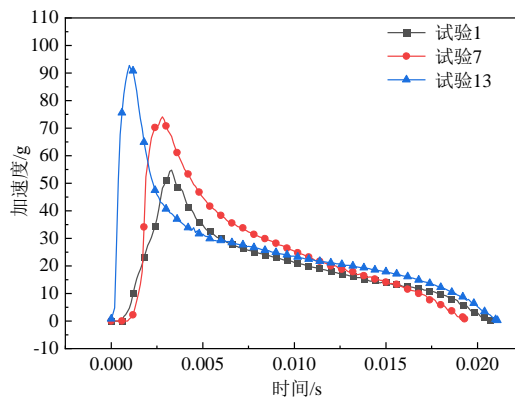


(a) 同能级强夯中锤径的影响

给出了第 7、8、9 组试验中第 1 击落锤加速度时程曲线。从图 8 (b) 中可以看出, 试验 9 所测得的落锤加速度峰值与落锤冲击作用时间分别为试验 7 的 3.55 倍和 0.54 倍。说明在能级与锤径相同的情况下, 锤重越小, 落锤加速度峰值越大, 落锤冲击作用时间越短, 从图 8 (b) 中还可以看出, 随着锤重的不断减小, 这种变化趋势逐渐明显。图 8 (c) 为同一落锤在不同能级夯击作用下的落锤加速度时程曲线, 从图 8 (c) 中可以看出, 落锤相同能级不同时, 落锤冲击作用时间较为接近, 夯击能级越高, 落锤加速度峰值越大。



(b) 同能级强夯中锤重的影响



(c) 相同落锤强夯中能级的影响

图 8 不同施工参数对落锤加速度的影响

Fig. 8 Influence of different construction parameters on falling weight acceleration

3 强夯加固土体实时评估方法提出及验证

由单击落锤加速度时程曲线分析结果可以看出, 不同夯击工况下的落锤加速度波形形态存在着显著的差异, 通过对落锤加速度时程曲线进行分析, 可以建立落锤加速度时程曲线形态与夯击工况之间的联系。由落锤加速度时程曲线对比分析结果可知, 落锤加速度时程曲线形态会随落锤几何尺寸与土体加固程度的改变呈现出规律性变化。基于上

述分析, 本文提出通过对落锤加速度时程曲线进行时域分析来评估强夯土体加固程度的设想, 并引入了偏度 β_s 、峰度 β_k 、加速度峰值 \bar{u} , 冲击作用的时间 t 等参数对同组强夯试验中不同击数下的落锤加速度时程曲线形态进行定量的描述。其中, 偏度^[23]是描述图形偏离对称性程度的特征数, 其表达式为:

$$\beta_s = \frac{E(X - EX)^2}{\sqrt{[Var(X)]^3}} \quad (1)$$

峰度是描述图形尖锐程度或尾部粗细的特征数,

其表达式为:

$$\beta_k = \frac{E(X - EX)^4}{[Var(X)]^2} - 3 \quad (2)$$

图 9 与图 10 分别为落锤加速度时程曲线时域特征值与夯沉量随夯击次数增加的变化曲线。如图 9 所示, 落锤加速度时程曲线时域特征值随夯击次数的变化趋势与图 6 中所直观观察到的图形变化趋势相符合, 即随着夯击次数的增加, 峰度、偏度、落锤冲击作用时间逐渐减小, 落锤加速度峰值逐渐增大。从图 9 (a) 与图 9 (b) 中可以看出, 峰度与偏度在前两击中的变化幅度最大, 与第 1 击相比,

第 2 击的峰度与偏度分别降低了 2.435 与 0.76。从图 9~10 中还可以看出, 峰度、偏度、落锤冲击作用时间与单击夯沉量的变化趋势相近, 落锤加速度峰值与累计夯沉量的变化趋势相近, 在夯沉量接近稳定时, 落锤加速度时程曲线的时域特征值均达到收敛。

综上所述, 可以得出落锤加速度时程曲线的时域特征值与土体的加固程度紧密相关。在强夯法施工过程中, 可以对不同夯击次数下的落锤加速度时程曲线进行监测, 并对其相对应的时域特征值进行提取分析, 通过时域特征值的变化趋势与相对大小来确定是否止夯和止夯时土体的加固程度。

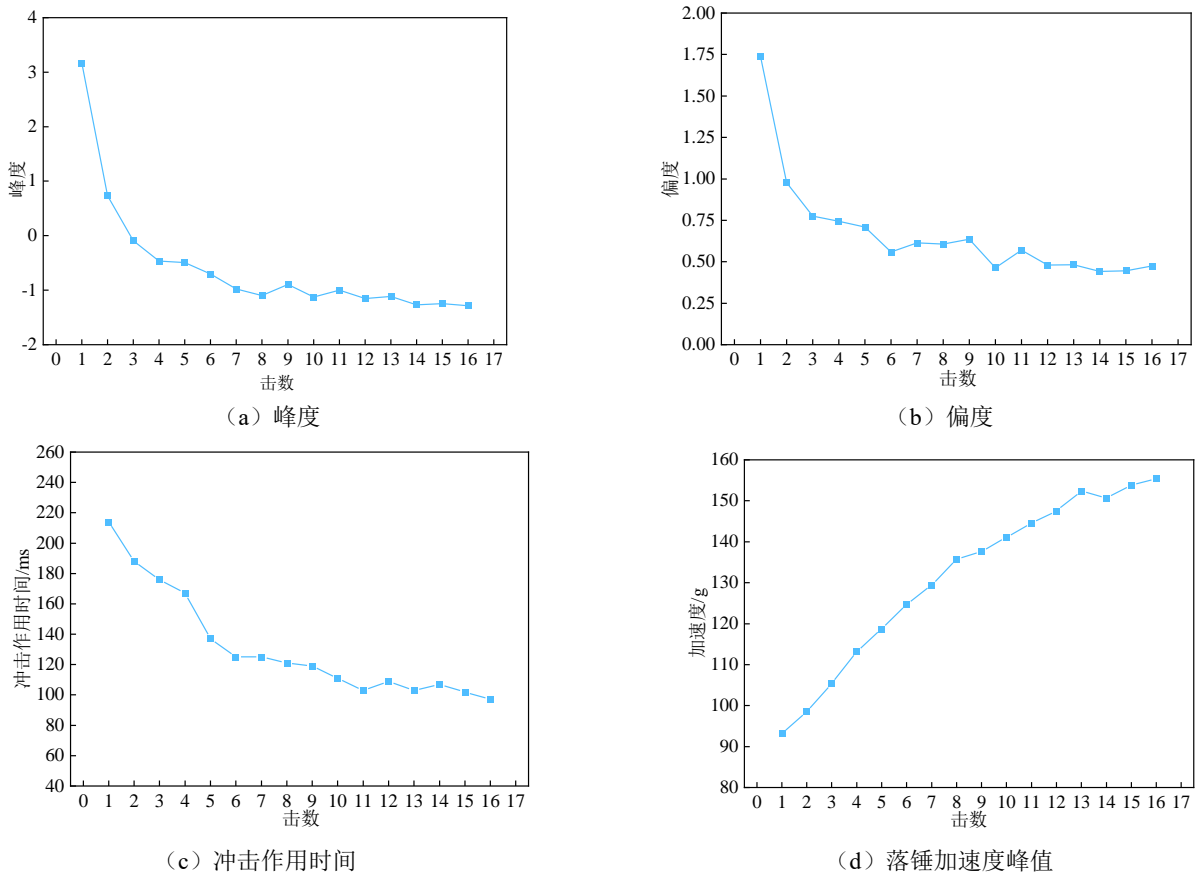


图 9 时域特征值

Fig. 9 Time domain eigenvalue

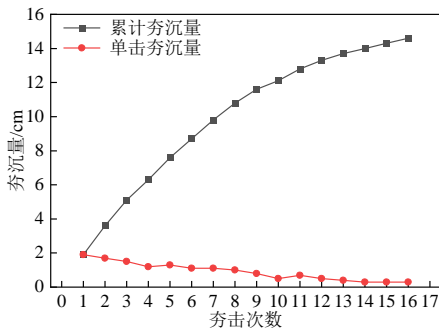


图 10 夯沉量

Fig. 10 Compaction settlement

4 强夯加固土体实时评估方法流程

从上述分析中可得, 在进行强夯施工前, 可以在试夯阶段标定不同加固程度下标准落锤加速度时程曲线及对应的时域特征参数。在施工中, 可以通过比较落锤加速度时程曲线时域特征值的相对大小关系, 对强夯土体加固程度进行实时判别。具体的强夯加固效果实时评估方法流程见图 11。

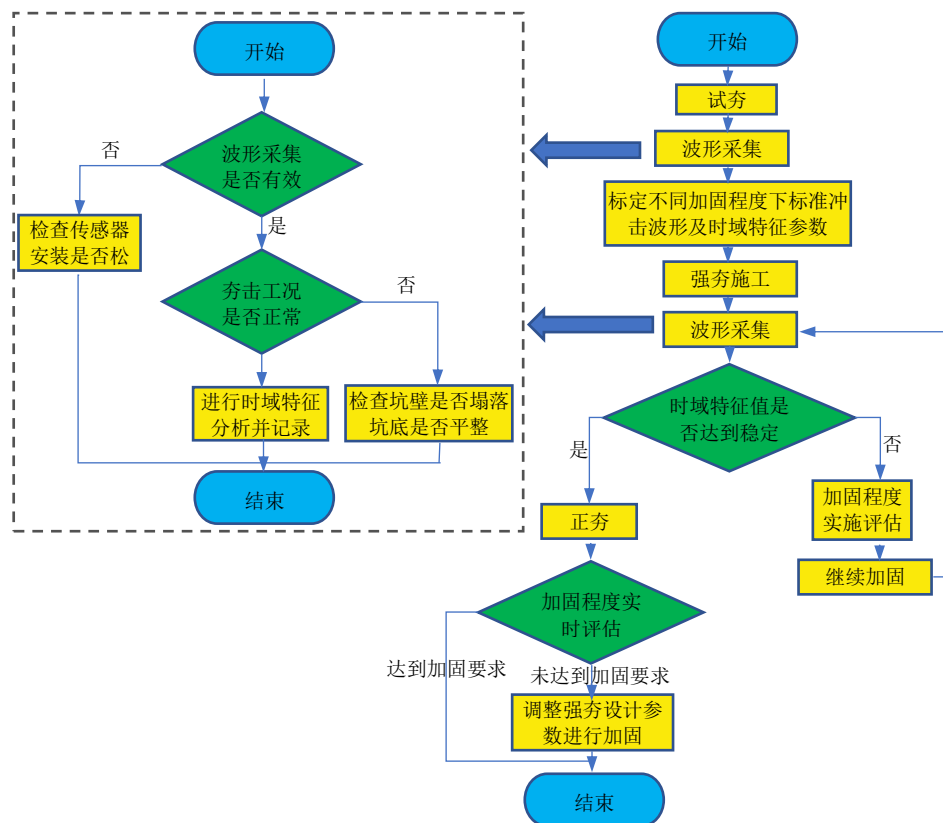


图 11 强夯加固效果实时评估方法流程

Fig. 11 Process for real-time monitoring method of soil reinforcement effect in dynamic compaction

5 与现有强夯土体加固效果评估方法对比

5.1 与通过夯沉量或加速度峰值为依据的土体加固评价方法对比

与传统的土体加固实时评估方法相比, 本文所提出的实时评估方法, 引入了偏度 β_s 、峰度 β_k 等多个特征参数作为土体加固程度的判别条件, 提高了土体加固实时评估的精度和效率。另外, 通过波形分析还可对监测数据出现的异常波动进行溯源。

5.2 与原位测试方法对比

动力触探、静载荷试验等原位测试方法已经广泛地应用于对强夯后土体加固程度的检测中。其中静载荷试验最为可靠, 但试验周期较长, 监测效率较低, 静力触探与静载荷试验相比在效率上有所提高, 但是不适用于砾石以及很密实的砂层。动力触探使用范围较广, 但随着被检测土体颗粒粒径的增加, 动力触探所用的检测锤质量也需要不断增大, 当土体中出现过大粒径颗粒时, 检测结果也会受到明显的干扰。除此之外, 静力触探与动力触探在测试时都会产生一定的破坏性, 只能划分试验段

进行试验。本文所提出的土体加固实时评估方法是 将强夯重锤既作为加固落锤, 又作为检测重锤进行使用, 这样不仅可以对所有夯点每一击的土体强度进行实时检测, 同时利用了强夯落锤质量以及能级大的优势, 一定程度上降低了大粒径土或摩擦等因素对检测结果的影响。

6 结 论

由落锤加速度时程曲线波形与时域特征值的分析结果可以得到以下结论:

(1) 不同夯击工况下落锤加速度时程曲线的分析结果表明, 落锤加速度时程曲线形态能够反映出夯击工况的差异, 通过分析落锤加速度时程曲线形态, 可以对夯击过程进行评价。

(2) 不同落锤加速度时程曲线的时域分析结果表明, 随着土体加固的完成, 落锤加速度时程曲线的峰度、偏度、冲击作用时间、落锤加速度峰值均呈现出规律性变化且变化速率都逐渐趋缓。施工中可通过观察落锤加速度时程曲线的峰度、偏度、落锤加速度峰值及冲击作用时间是否达到稳定来判断是否止夯。

(3) 基于落锤加速度时程曲线波形与时域特征值的分析结果提出了一种强夯加固土体实时评估方法, 并设计了使用流程。

参考文献

- [1] MÉNARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation[J]. Géotechnique, 1975, 25(1): 3-18.
- [2] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903-2909.
HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Experimental research on dynamic compaction parameters of collapsible loess foundation in Lishi region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [3] 吕秀杰, 龚晓南, 李建国. 强夯法施工参数的分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1628-1632.
LÜ Xiu-jie, GONG Xiao-nan, LI Jian-guo. Research on parameters of construction with dynamic compaction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1628-1632.
- [4] 翁效林, 李林涛, 张留俊. 拓宽黄土路基湿化破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1075-1080.
WENG Xiao-lin, LI Lin-tao, ZHANG Liu-jun. Model experimental research on wetting damage mechanism of widening loess roadbed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1075-1080.
- [5] BALLY R J, CULITZA C. Discussion of "Dynamic compaction in friable loess" by Alan J. Lutenegeger (June, 1986, vol. 112, No. 6)[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(11): 1416-1418.
- [6] FENG S J, DU F L, SHI Z M, et al. Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction[J]. Engineering Geology, 2015, 185: 105-115.
- [7] FENG S J, SHUI W H, TAN K, et al. Field evaluation of dynamic compaction on granular deposits[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 25(3): 241-249.
- [8] FENG S J, TAN K, SHUI W H, et al. Densification of desert sands by high energy dynamic compaction[J]. Engineering Geology, 2013, 157: 48-54.
- [9] CHOW Y K, YONG D M, YONG K Y, et al. Dynamic compaction of loose sand deposits[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4): 93-106.
- [10] 孔令伟, 袁建新. 强夯后地基土变形模量与承载力的反演计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 153-157.
KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Back calculation of modulus of deformation and bearing capacity for foundation after dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 153-157.
- [11] 吴帅峰, 蔡红, 严俊, 等. 强夯沉降模型及参数特征分析研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 112-118.
WU Shuai-feng, CAI Hong, YAN Jun, et al. Dynamic compaction settlement model and parameter characteristic analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 112-118.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础工程施工质量验收标准: GB 50202—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Acceptance of Construction Quality of Building Foundation: GB 50202—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [13] PISTROL J, ADAM D. Fundamentals of roller integrated compaction control for oscillatory rollers and comparison with conventional testing methods[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17: 75-84.
- [14] XU T Y, ZHOU Z J, YAN R P, et al. Real-time monitoring method for layered compaction quality of loess subgrade based on hydraulic compactor reinforcement[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4288.
- [15] ZHANG H Y, JIN Y L, LIU Q, et al. Intelligent monitoring method for tamping times during dynamic compaction construction using machine vision and pattern recognition[J]. Measurement, 2022, 193: 110835.
- [16] 贾敏才, 王磊, 周健. 砂性土宏观强夯加固机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3282-3290.
JIA Min-cai, WANG Lei, ZHOU Jian. Experimental research on macro-meso consolidation mechanism of sandy soil with dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3282-3290.
- [17] CUI X Z. Real-time diagnosis method of compaction state

