

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.03.007

基于 DIC 技术的地下软土内部激振影响区试验

殷德顺,赵义东,白鹏翔,谢晶鹏

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 211100)

摘要: 针对列车运行产生的振动荷载对位于地下软土层中的隧道产生沉降影响问题,设计软土内部激振试验新装置,开发了基于数字图像相关(DIC)技术的软土内部振动响应瞬时光学测量系统,研究土体振幅与距振源距离、振动频率、围压之间的关系。试验结果表明:土体振幅随着距振源距离增大而减小,并以幂函数形式拟合振幅衰减曲线,效果良好;基于 DIC 技术的内部激振影响区能够直观、准确地表征出内部激振的影响区域和影响程度,振动频率的增加能够增大影响区域,围压的增加能够明显减小影响区域。

关键词: 软土;数字图像相关技术;内部激振试验;衰减规律;振动影响区

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2020)03-0231-07

Experimental research on internal excitation affected zone of underground soft soil based on DIC technology

YIN Deshun, ZHAO Yidong, BAI Pengxiang, XIE Jingpeng

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this study, a new device for the internal excitation test of soft soil was designed, and an instantaneous optical measurement system for the internal excitation response of soft soil based on digital image correlation (DIC) technology was developed. The relationship between the soil amplitude and the distance from the source, vibration frequency and confining pressure was studied. The results show that the soil amplitude decreases with the increasing distance from the source, and the amplitude attenuation curve is fitted in the form of power function. The affected range and degree of internal excitation can be visually and accurately represented by the affected zone of internal excitation based on DIC technology. The affected zone increases with the increasing vibration frequency, and significantly decreases with the increase of confining pressure.

Key words: soft soil; digital image correlation technology; internal excitation test; attenuation law; vibration affected zone

1978年改革开放以来,中国交通基础设施建设取得巨大成就,但要注意到其中很多已建成的地铁隧道、高铁隧道和桥梁都被长期沉降灾害所困扰^[1-2]。总结分析相关长期沉降灾害能够发现:(a)灾害多发生于地下软土层;(b)长期沉降多由列车运行产生的振动荷载引起^[3]。列车振动影响范围内各部位土体的动力响应不同,力学行为变化情况也不同,探究内部激振在地下软土中的传播行为具有重要意义。

目前,许多学者针对软土在振动条件下的复杂力学特性进行了大量研究。Wang^[4]、程学磊等^[5]运用振动台试验模拟研究地震作用下软土的动力响应和特性变化,Yang等^[6]运用振动台试验研究了在剪切和机械振动荷载作用下砂质和黏性床层沉积物的流变特性,黄珏皓等^[7]运用动三轴试验仪模拟研究循环荷载下软黏土的孔压变化情况,殷德顺等^[8]利用拖球试验探究不同条件下的地下软土流变特性。可以发现室内试验多数

基金项目:国家自然科学基金(11872173)

作者简介:殷德顺(1972—),男,教授,博士,主要从事软土力学及工程特性研究。E-mail:yindeshun@hhu.edu.cn

引用本文:殷德顺,赵义东,白鹏翔,等.基于 DIC 技术的地下软土内部激振影响区试验[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):231-237.

YIN Deshun, ZHAO YiDong, BAI Pengxiang, et al. Experimental research on internal excitation affected zone of underground soft soil based on DIC technology[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(3): 231-237.

关注整体振动或某一土体单元的力学行为,对于地下软土的内部激振行为研究较少。而相对于整体振动,研究内部激振时缺乏相应的试验装置,有必要针对地下软土内部激振设计新型试验装置来探究其具体行为。

潘昌实等^[9]利用有限元法对黄土隧道进行了列车振动响应数值分析,Sheng等^[10]、王铁生等^[11]建立了预测模型计算地铁隧道的动力响应和沉降问题,曾晨等^[12-13]以解析方法研究了饱和土体中隧道在列车振动荷载作用下的动力响应。马险峰等^[14]采用数值模拟的方法研究了地铁列车运行时盾构隧道及其周围土体的动力响应问题。刘涛^[15]、袁金秀等^[16]通过现场实测对交通荷载下地面振动的传播与衰减特性进行研究。上述是针对列车运行时的振动响应进行模拟研究,但由于理论解析、数值模拟对于复杂的地下软土只能简化处理,现场实测受技术水平和工程环境所限,多研究地表振动规律,仍难以准确反映地下软土中的振动传播规律。地下软土较为复杂,振动行为受所处理深、土壤含水率、振动频率等因素的影响,而对内部激振在地下软土中的传播规律和影响区域尚无明确的结论。

随着科技的发展,数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术已渐渐进入岩土力学学者的视线。数字图像相关技术通过比较物体表面变形前后的数字图像,直接获取位移和应变,可以从多方面展现细观变化信息。近年来,数字图像相关技术已被应用于观察土体受外荷载时颗粒的运动变化和应变场演变规律^[17-22]。因此,用DIC技术观测模拟环境中地下软土的振动变形情况不失为一种有效的研究手段。

本文引入DIC技术开发地下软土内部激振响应瞬时光学测量系统,以不同围压、不同振动频率模拟内部激振条件下的地下软土环境,并观测土颗粒运动情况。土颗粒运动的幅度既是土体力学行为的反映,也是振动衰减的反映,以此刻画内部激振影响区和振动衰减规律。

1 试验装置与试验安排

1.1 试验装置

为了观测地下软土的内部激振行为,特设计内部激振试验装置模拟地下软土的振动环境,并引进二维数字散斑相关测量系统全场细观测量,开发了基于数字图像技术的地下软土内部激振响应瞬时光学测量系统,装置示意图如图1所示。装置主要由试验容器、加压气囊、土压力计、可调频振动电机、高速相机、相机固定架、白光光源、电脑等构成。

设计试验容器时,为便于相机采集软土动态变形图像,添加透明玻璃窗口进行可视化改装改造(图1),实现与图像采集系统进行合理衔接。容器内部尺寸418 mm×418 mm×571 mm,观测窗口尺寸250 mm×250 mm。加压气囊用来给土体加压,模拟不同埋深的地下环境。可调频振动电机和高速相机如图2所示。可调频振动电机用来模拟不同的振动情况,振动频率可调范围为0~60 Hz,不同振动频率对应不同的振动力,60 Hz时对应激振力为250 N,最大功率为40 W。相机为AOS高速相机。试验过程中,采用高速相机记录振动过程中软土的细观运动状态。

1.2 试验安排

试验用土是在南京市江宁区牛首河河床采集到的土样,其力学性质较符合软土的要求。铲出的淤泥,经过暴晒风干、烘干、粉碎、过筛、加水搅拌等处理,得到均匀无固结的44%含水率土样。测定并记录土样的基本物理指标,具体如下:液限为31.3%,塑限为20.1%,塑性指数为11.2,干密度为1.52 g/cm³,最大动弹性模量为35.5 MPa,阻尼比为16%。

本试验采用黑白喷漆人工喷制散斑对软土进行处理,便于数字图像测量系统根据试

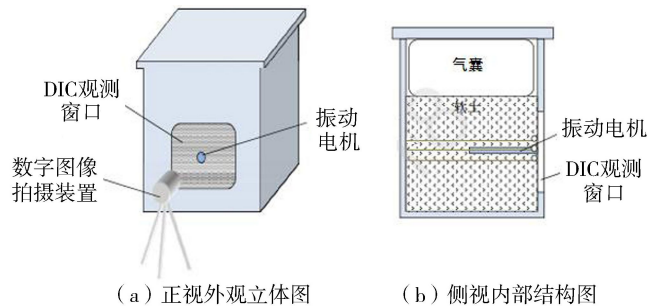


图1 内部激振试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of internal excitation test device



(a) 可调频振动电机

(b) 高速相机

图2 可调频振动电机和高速相机

Fig. 2 FM vibration motor and high-speed camera

样表面的光强变化跟踪并获取颗粒的变形信息。试验时,放置好土样和振动电机后,用气泵调节土压力,打开 DIC 图像采集系统,启动振动电机,进行试验数据采集。分别在土压力为 1 kPa、25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa、125 kPa 时进行试验,每一围压下将振动电机频率调节到 5 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz,进行共计 30 组试验。相机采样频率为 500 帧/s,实时观测并采集振动过程中土颗粒的运动变化。

本试验拍摄时选择玻璃窗右下方 1/4 区域,实际采集区域大小为 130 mm×130 mm。由获得振动过程的连续数字图像,通过数字图像相关分析软件处理,可得到试样在内部激振过程中不同时刻的位移场、应变场和速度场等信息。

为了衡量内部激振对地下软土的影响程度,选取土颗粒的振动幅度来讨论衰减规律和影响区。对位移图进行标记取点、数据提取。以观测窗口中心为原点,在水平向右、竖直向下、斜下 45°方向上等距取点,并提取点位的位移数据,分析具体点位的运动规律。图 3 给出了某一条件下振动过程中一点处的位移随时间变化曲线,可以看到土颗粒在振动电机激励作用下做简谐运动。以点位的位移数据中稳定有效的位移最大值减去位移最小值,即得到该点位处的振幅。

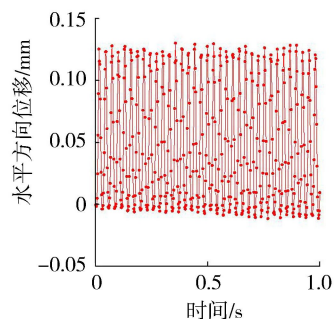


图 3 某一条件下振动过程中一点处的位移随时间变化曲线

Fig. 3 Relationship between displacement and time at a point in the process of vibration under a certain condition

2 试验结果

2.1 振幅与距振源距离的关系

众所周知,振幅会随着距振源距离的增大而衰减,但在不同情况下的具体衰减规律尚不明确。选取不同情况下的振幅随距振源距离变化曲线,对它们之间的关系进行探究。图 4 给出了围压为 1 kPa 时,振动频率分别为 20 Hz 水平向右方向和振动频率 40 Hz 竖直向下方向的振幅。图 5 给出了围压为 125 kPa,振动频率分别为 5 Hz、40 Hz 时竖直向下方向的水平方向振幅和竖直方向振幅。

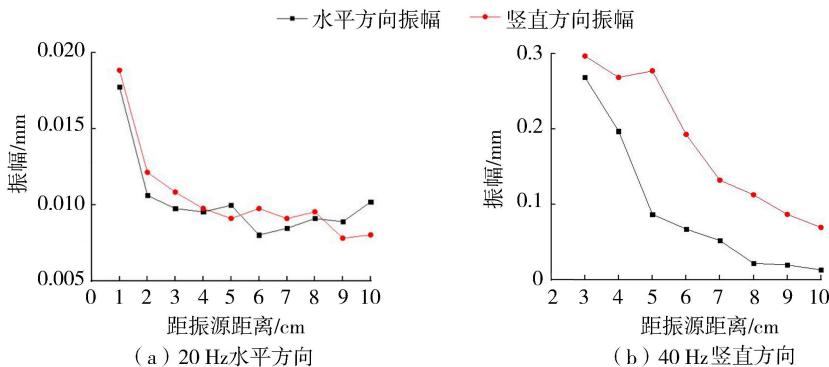


图 4 围压为 1 kPa 时水平和竖直方向振幅

Fig. 4 Horizontal and vertical amplitude under confining pressure of 1 kPa

从图 4、图 5 可以看出:在振源近处振幅最大,受振动频率影响,振幅最大值相差较大;而随着距离的增大,振幅迅速减小。以图 5(b)为例,到达距振源距离为 5 cm 处,振幅衰减幅度超过 80%,超过这一距离后振幅衰减变得缓慢。试验结果显示,随着距振源距离的增大,水平和竖直方向振幅均先迅速减小,到一定距离后振幅缓慢减小。即随着距离增大,受土体几何阻尼和材料阻尼影响^[23],能量迅速衰减,表现为土体振幅的迅速减小。

2.2 振幅与振动频率的关系

从 2.1 节可以发现振动频率对于振幅有着很大影响,具体表现为低振动频率和高振动频率下的振幅表现有很大不同。对不同振动频率下的某一指定距离或区域处的振幅进行比较,分析振幅和振动频率之间的关系。图 6 为围压 125 kPa 时 3 个点在不同振动频率下的水平方向振幅。为了抵消计算单个点位振幅带来的不稳定性,特地选取某一指定区域内振幅平均值来进行比较。图 7 给出了不同围压、不同振动频率下一指

定圆形区域内的竖直方向振幅平均值,该区域是以斜下 45°方向距振源 6.4 cm 处为圆心,半径为 15 mm 的圆形区域。

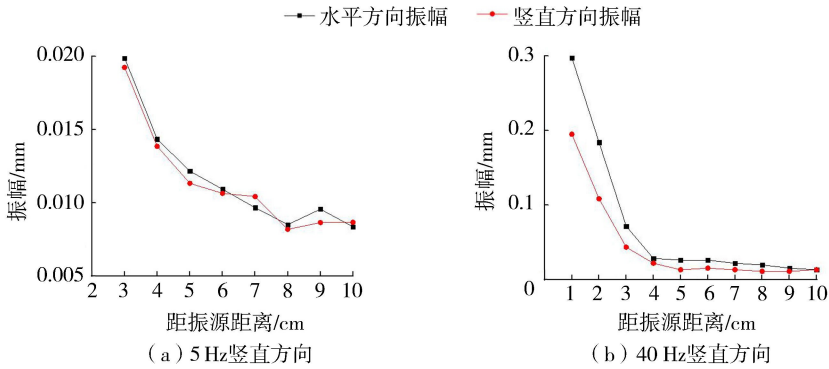


图 5 围压为 125 kPa 时水平和竖直方向振幅

Fig. 5 Horizontal and vertical amplitude under confining pressure of 125 kPa

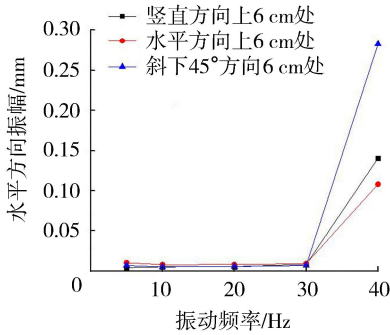


图 6 125 kPa 时 3 个点的水平方向振幅

Fig. 6 Horizontal amplitude of three points under confining pressure of 125 kPa

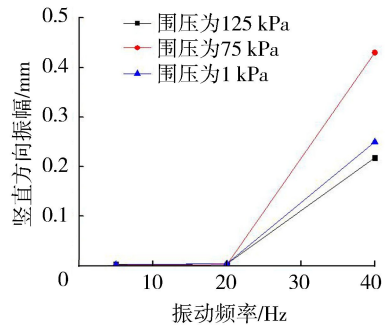


图 7 不同围压时一指定区域处的竖直方向振幅

Fig. 7 Vertical amplitude at a specified area under different confining pressures

从图 6、图 7 可以看出:125 kPa 围压下,3 个方向上距振源 6 cm 处的振幅均随着振动频率增大而增大,在 5 ~ 30 Hz 时振幅增大缓慢,到 40 Hz 时振幅增大迅速;在 1 kPa、75 kPa 围压下,也存在类似情况。总结发现,随着振动频率增大,振幅在中低频率时缓慢增大,超过一临界振动频率时振幅迅速增大,该临界值在 30 ~ 40 Hz 之间。本试验中振动电机的振动力随着振动频率的增大而增大,即振动力增大到一临界值时,土体在激振作用下产生较大响应,这一临界是土体状态发生变化,由固向流转变的标志。

2.3 振幅与围压的关系

在实际工程中,土体埋深对土体特性的影响很大,本试验选用不同围压来模拟不同埋深,观测围压对于软土内部激振行为的影响。经过计算,单一点位和某一指定区域的振幅与围压的关系无明显规律,考虑用不同围压下振幅在某一方向上的变化曲线探究围压对于振幅的影响。图 8 给出了围压为 125 kPa 和 1 kPa、振动频率为 40 Hz 时,斜下 45°方向上点位的竖直方向振幅。

从图 8 可以看出,在距振源 3 ~ 6 cm 处,125 kPa 时的振幅略小于 1 kPa 时的振幅;距振源 7 cm 处,125 kPa 时的振幅迅速降到 0.020 mm,而 1 kPa 时的振幅仍保持在 0.225 mm,并在距振源 10 cm 处才减小到 0.037 mm,即 1 kPa 时振动引起的振幅区域更大。结果表明,随着围压的增大,振源近处的振幅轻微减小,而受内部激振影响较大即振幅较大的区域显著减小。

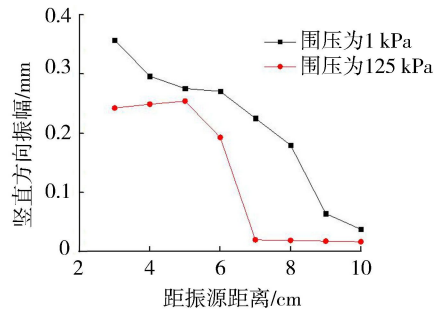


图 8 40 Hz 不同围压时斜下 45° 方向点位的竖直方向振幅

Fig. 8 Vertical amplitude in the obliquely downward 45° direction at 40 Hz under different confining pressures

3 内部激振影响区分析

影响区域受围压影响,但全场受到的影响尚不明确。为了更加直观地了解内部激振对于地下软土的影响范围和影响程度,基于 DIC 技术,在已知全场振幅的基础上引入内部激振影响区。将某一处的水平方向振幅和竖直方向振幅的平方和的算术平方根作为衡量振动对于该处土体振幅的影响量 s ,即

$$s = \sqrt{A_u^2 + A_v^2} \quad (1)$$

式中: A_u ——水平方向振幅; A_v ——竖直方向振幅。

在图像采集区域内取点,计算每个点位的 s 值,绘制出土体内部激振影响区。图 9 给出了不同围压和振动频率下的土体内部激振影响区域。从图 9 可以看出:(a) 振动频率为 5 Hz 时,在整个影响区域内振幅很小,衰减缓慢甚至有所波动;振动频率为 40 Hz 时,影响区域内振幅较大且衰减迅速。(b) 当振动频率为 40 Hz 时,1 kPa 围压下 $s \geq 0.340$ mm 的区域面积约为 5 500 mm²,125 kPa 围压下此面积约为 2 100 mm²,前者远大于后者(以 $s \geq 0.34$ mm 计算受振动影响较大的区域)。此外,1 kPa 围压下的振动影响区中约有 1 400 mm² 的区域的 $s \geq 0.433$ mm,而 125 kPa 围压下没有 $s \geq 0.433$ mm 的区域。试验结果表明:随着振动频率的增大,土体所受的影响程度显著提升;随着围压的增大,土体所受的影响程度减小,受振动影响较大的区域显著减小。

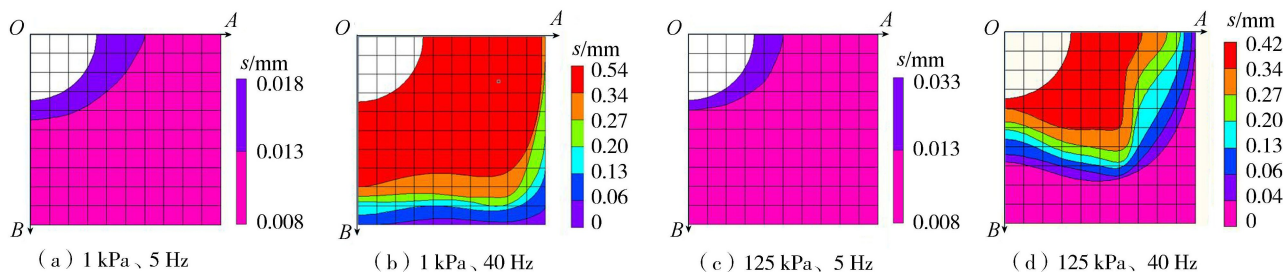


图 9 不同情况下的土体内部激振影响区域

Fig. 9 Schematic diagram of the local vibration affected zone of soil under different conditions

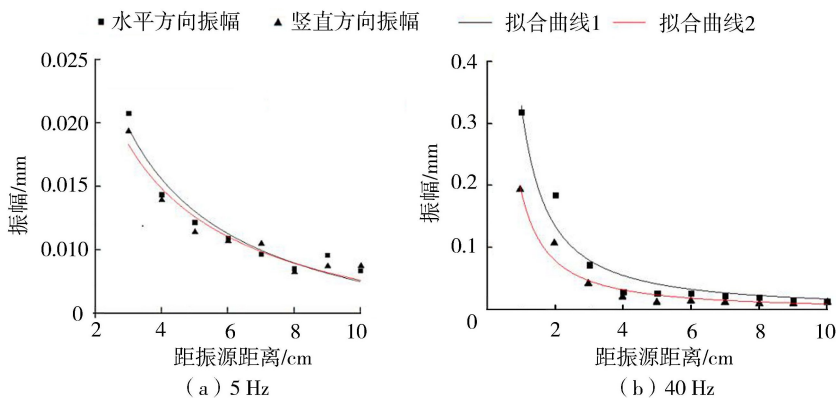


图 10 围压为 125 kPa,不同振动频率下竖直向下方向振幅曲线

Fig. 10 Horizontal and vertical amplitude in the vertical downward direction under different vibration frequencies under confining pressure of 125 kPa

内部激振影响区给出可以更加直观地表述内部激振对于土体的影响,从中得出的结论可以和前面总结的相印证。从图 9(b)、图 9(d) 可以看到,在斜下 45° 方向上,振幅等值线有一个凸出部分,即内部激振对此区域的影响大于其他方向上等距离的区域,振动传递存在方向差异性。

4 振幅衰减曲线分析

在 2.1 节指出振幅衰减多为先迅速衰减,后缓慢衰减,对振幅衰减的具体形式进行了深入分析。图 10 给出了围压 125 kPa,不同振动频率下竖直向下方向上水平、竖直方向振幅曲线,并对变化曲线进行多种函数的拟合,经比较幂函数 $y = ax^b$ 拟合效果较好。围压 125 kPa、振动频率 5 Hz 时,水平方向振幅曲线拟合为 $y_1 = 0.0410x^{-0.7970}$, $R^2 = 0.9342$, 竖直方向振幅曲线拟合为 $y_2 = 0.0407x^{-0.7319}$, $R^2 = 0.9283$ 。同样,振动频率为

40 Hz 时,水平方向振幅曲线拟合为 $y_1 = 0.3293x^{-1.2972}$, $R^2 = 0.9545$, 竖直方向振幅曲线拟合为 $y_2 = 0.2007x^{-1.2999}$, $R^2 = 0.9633$ 。

从以上拟合结果可以看出,幂函数 $y = ax^b$ 对于振幅衰减曲线拟合效果较好。对更多实验数据进行拟合,探究参数 a 、 b 的取值情况,汇总不同情况下竖直向下方向振幅衰减曲线,结果见表 1。由表 1 可知,参数 a 、 b 与围压和振动频率满足以下关系:中低频率时, a 和 b 的值都较小,随着振动频率增大, a 和 b 的值都增大;在高频率时,随着围压增大, a 值减小。因此,振幅衰减曲线可以用如下形式拟合:

表 1 以 $y = ax^b$ 拟合竖直向下方向的振幅衰减曲线得到的参数 a 、 b

Table 1 Parameters a , b and R^2 of vertical amplitude attenuation curve in vertical downward direction under different conditions

振动频率/Hz	围压 1 kPa			围压 125 kPa		
	a	b	R^2	a	b	R^2
5	0.0206	-0.5437	0.9482	0.0407	-0.7319	0.9283
20	0.0185	-0.3914	0.9634	0.0157	-0.2869	0.9288
40	1.0115	-1.0342	0.8199	0.2006	-1.2999	0.9632

$$A = ax^b \quad (2)$$

式中: A ——振幅; x ——距振动源距离; a 、 b ——参数,与振动频率、围压等因素有关。

5 结 论

a. 把基于数字图像相关方法的光学测量技术与软土内部激振试验相结合,通过可视化改造,开发了基于数字图像的软土变形细观测量系统,实现了对软土土体全场实时测量。对全场振幅的准确测量,表明了该测试方法的合理性和有效性。

b. 随着距振源距离的增大,水平和竖直方向振幅均先迅速减小,到一定距离后,振幅缓慢减小。随着振动频率增大,振幅在中低频率时缓慢增大,超过一临界振动频率时,振幅迅速增大,该临界值在 30 ~ 40 Hz 之间。随着围压的增大,振源近处的振幅轻微减小,而受内部激振影响较大即振幅较大的区域显著减小。

c. 通过全场测量得到的内部激振影响区更加直观、准确,可以表征出影响区域和影响程度。随着振动频率增大,土体所受的影响程度显著提升;随着围压增大,土体所受的影响程度减小,受振动影响较大的区域显著减小。

d. 振幅衰减曲线较符合幂函数 $y = ax^b$ 形式, a 和 b 与振动频率、围压等因素关系密切:中低频率时, a 和 b 的值都较小,随着振动频率增大, a 和 b 的值都增大;在高频率时,随着围压增大, a 的值减小。

参考文献:

- [1] 狄宏规,周顺华,宫全美,等. 软土地区地铁隧道不均匀沉降特征及分区控制[J]. 岩土工程学报, 2015,37(增刊2): 74-79. (DI Honggui, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Differential settlement of metro tunnels and its zonal control in soft deposits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (Sup2): 74-79. (in Chinese))
- [2] 张峰,刘莹,许兆义,等. 武广高铁 CFG 桩复合地基后沉降影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2015,50(5):783-788. (ZHANG Feng, LIU Ying, XU Zhaoyi, et al. Factors influencing subgrade post-construction settlement of CFG pile composite foundation in Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50 (5): 783-788. (in Chinese))
- [3] 葛世平,姚湘静,叶斌,等. 列车振动荷载作用下隧道周边软黏土长期沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(11):2359-2368. (GE Shiping, YAO Xiangjing, YE Bin, et al. Analysis of long-term settlement of soft clay under train vibration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (11): 2359-2368. (in Chinese))
- [4] WANG Liping. Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions [J]. Landslides, 2014,11(2):213-223.
- [5] 程学磊,崔春义,孙宗光. 饱和软土自由场地地震反应特性振动台试验[J]. 地震工程学报, 2019,41(1):108-116. (CHENG Xuelei, CUI Chunyi, SUN Zongguang. Shaking table tests on the seismic response characteristics of a free field in saturated soft soil [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41 (1): 108-116. (in Chinese))
- [6] YANG Wenyu, TAN S K, WANG Huakun, et al. Rheological properties of bed sediments subjected to shear and vibration loads [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, 2014,140(1):109-113.

- [7] 黄珏皓, 陈健, 柯文汇, 等. 双向激振循环荷载和振动频率共同作用下饱和软黏土孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(增刊2):71-74. (HUNAG Juehao, CHEN Jian, KE Wenhui, et al. Coupling effects of bidirectional cyclic loading and loading frequency on pore water pressure of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (Sup2):71-74. (in Chinese))
- [8] 殷德顺, 颜庆梅, 马誉鑫. 局部振动作用下地下软黏土流动特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019,47(4): 366-373. (YIN Deshun, YAN Qingmei, MA Yuxin. Experimental study on flow characteristics of underground soft clay under localized vibration[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4):366-373. (in Chinese))
- [9] 潘昌实, PANDE G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984,17(4):19-28,18. (PAN Changshi, PANDE G N. Preliminary numerical analysis of dynamic load response of train in Loess Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(4): 19-28, 18. (in Chinese))
- [10] SHENG X, JONES C J C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. Journal of Sound & Vibration, 1999, 228(1):129-156.
- [11] 王铁生, 张利平, 华锡生, 等. 隧道地表沉降预测的时变参数灰序模型 TGM-AR[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 655-658. (WANG Tiesheng, ZHANG Liping, HUA Xisheng, et al. Time-dependent parameter gray model TGM-AR for prediction of surface settlement of tunnels[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(6): 655-658. (in Chinese))
- [12] 曾晨, 孙宏磊, 蔡袁强, 等. 简谐荷载作用下饱和土体中圆形衬砌隧道三维动力响应分析[J]. 岩土力学, 2014,35(4): 1147-1156. (ZENG Chen, SUN Honglei, CAI Yuanqiang, et al. Analysis of three-dimensional dynamic response of a circular lining tunnel in saturated soil to harmonic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):1147-1156. (in Chinese))
- [13] 曾晨, 孙宏磊, 蔡袁强, 等. 饱和土体中衬砌隧道在移动荷载下的动力响应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015,49(3): 511-521. (ZENG Chen, SUN Honglei, CAI Yuanqiang, et al. Dynamic response of lined tunnel in saturated soil due to moving load[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(3): 511-521. (in Chinese))
- [14] 马险峰, 张宝民, 方旭, 等. 类矩形隧道地铁振动在软土地层中传播衰减数值模拟研究[J]. 路基工程, 2018(5):133-138. (MA Xianfeng, ZHANG Baomin, FANG Xu, et al. Numerical simulation study on propagation attenuation of quasi-rectangular tunnel metro vibration in soft ground[J]. Subgrade Engineering, 2018(5):133-138. (in Chinese))
- [15] 刘涛. 地下轨道交通影响的地表振动实测分析与数值模拟[D]. 北京: 华北水利水电大学, 2019.
- [16] 袁金秀, 叶茂, 崔海龙, 等. 交通荷载诱发环境振动传播规律实测研究[J]. 国防交通工程与技术, 2019,17(2):33-36, 15. (YUAN Jinxiu, YE Mao, CUI Hailong, et al. An experimental study of the spreading law of the traffic-load-induced environmental vibration[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2019, 17(2): 33-36, 15. (in Chinese))
- [17] BAI Pengxiang, ZHU Feipeng, HE Xiaoyuan. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015,65:28-37.
- [18] SALVATORE E, ANDO E, MODONI G, et al. Micromechanical study of cyclically loaded sands with x-ray microtomography and digital image correlation[J]. Procedia Engineering, 2016,158:92-97.
- [19] TAKE W A. Thirty-sixth canadian geotechnical colloquium: advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015,52(9):1199-1220.
- [20] 孔亮, 陈凡秀, 李杰. 基于数字图像相关法的砂土细观直剪试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2013,34(10): 238-245. (KONG Liang, CHEN Fanxiu, LI Jie. Meso-direct-shear test of sand based on digital image correlation method and its PFC numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 238-245. (in Chinese))
- [21] 刘定操, 尚展垒. 利用遥感图像对震损建筑结构变形检测的识别研究[J]. 地震工程学报, 2019,41(5):1380-1384. (LIU Dingcao, SHANG Zhanlei. Recognition of deformation detection of earthquake-damaged building structures using remote sensing images[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5):1380-1384. (in Chinese))
- [22] 马中军, 王晓威, 王智楠. 综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法[J]. 地震工程学报, 2019,41(4):1079-1085. (MA Zhongjun, WANG Xiaowei, WANG Zhinan. Nondestructive testing method for steel structures based on BIM and surface image analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4):1079-1085. (in Chinese))
- [23] AMICK H. Frequency-dependent soil propagation model[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 1999,3786:72-80.