

李盼盼,王家鼎,谷天峰,等.强夯振动加速度的量测及现场试验研究[J].地震工程学报,2018,40(1):166-170.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.166
LI Panpan, WANG Jiading, GU Tianfeng, et al. Measurement and Field Test Research on Vibration Acceleration of Dynamic Compaction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 166-170. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.166

强夯振动加速度的量测及现场试验研究^①

李盼盼, 王家鼎, 谷天峰, 刘亚明

(西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:结合延安新区强夯加固地基工程,进行强夯振动加速度测试现场试验。选取填方区场地,结合地形设计监测方案,以测试强夯波沿水平方向和斜坡的传播规律。在选定试验段的某级填方场地上布置多组加速度传感器,运用多个8通道24位高速采集卡记录强夯振动加速度在平面和斜坡的传播和衰减过程,探讨强夯振动波沿水平面和斜坡的传播规律以及能级对振动加速度的影响。结果表明:径向和竖向加速度值均随与夯点距离的增大而减小;在与夯击点距离相同处,强夯振动波沿水平方向传播的径向和竖向加速度值要大于沿斜坡方向;随着能级的增大,强夯产生的夯击波增强,在与夯击点相同距离处产生的径向和竖向加速度均明显增大。

关键词:延安;强夯;振动加速度

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0166-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.166

Measurement and Field Test Research on Vibration Acceleration of Dynamic Compaction

LI Panpan, WANG Jiading, GU Tianfeng, LIU Yaming

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: As a kind of foundation treatment method, dynamic compaction can quickly improve the bearing capacity and compressive modulus of foundations, with characteristics such as short duration, good effect, and low cost. However, the huge vibration waves caused by dynamic compaction tend to affect the stability of surrounding buildings and slopes. Therefore, it is of great theoretical and practical significance to study the propagation law of dynamic compaction vibration waves. In this study, combined with the monitoring scheme of a terrain design used in a dynamic compaction foundation project in the Yan'an New Area, we selected a site in the filling area in order to conduct field tests on the vibration acceleration of dynamic compaction. Based on these field tests, the propagation law of dynamic compaction vibration waves along the horizontal and the slope directions, respectively, were analyzed, and the effect of the energy level on the vibra-

① 收稿日期:2016-09-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41372269);中国地质调查局地质调查项目(121201011000150022);陕西省科技统筹创新工程计划课题(2012KTDZ03-02)

作者简介:李盼盼(1992—),女,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为工程地质。E-mail:972820276@qq.com。

通信作者:王家鼎(1962—),男,陕西蓝田人,教授,博士生导师,研究方向为地质灾害。E-mail:wangjd@nwu.edu.cn。

tion acceleration was discussed. The results show that both the radial and vertical acceleration values of the vibration waves decrease with the increase of distance from the tamping point. At the same distance from the tamping point, the vertical and radial acceleration values along the horizontal direction were greater to those along the direction of the ramp. With the increase of energy level, the dynamic compaction waves were enhanced, and then both the radial and vertical accelerations at the same distance from the tamping point increased significantly.

Key words: Yan'an; dynamic compaction; vibration acceleration

0 引言

强夯法是 1969 年由法国 Menard 技术公司首创的一种地基加固方法,具有效果显著、经济易行、设备简单、施工便捷、节省材料、施工周期短、适用范围广等优点。自 1975 年强夯技术引进我国之后,得到迅速推广和应用,目前已成为我国最常用、最经济的深层地基处理方法之一。强夯法是将夯锤从高处自由落下对地基加以冲击和振动,使土中出现冲击波和冲击应力,迫使土体孔隙压缩,土体局部液化,在夯击点周围产生裂隙,形成良好的排水通道,孔隙水和气体逸出,使土粒重新排列,经时效压密达到固结,从而提高地基承载力,降低其压缩性。

强夯振动是一种冲击式的点源振动,在落锤与土体接触的瞬间会产生强大的冲击力,强夯产生的振动会对周围建筑物和边坡产生极大的影响,因此对强夯振动的传播规律进行研究十分必要。

高宏兴等^[1]研究了强夯振动对库岸边坡稳定性的影响;水伟厚等^[2]对 10 000 kN·m 高能级强夯的振动加速度传播与衰减规律进行了研究;刘吉敏等^[3]对强夯振动加速度进行了实测,并探讨了其衰减规律;孔令伟等^[4]、蒋鹏等^[5]对公路路基强夯时土体中的动应力分布进行了研究,得出了其动应力分布图;李润等^[6]对强夯振动的夯击数对振动加速度和速度的传播进行了研究;张北战等^[7]通过量纲分析得到强夯加固深度和累积夯沉量的计算公式,并结合工程对公式进行了验证;吕耀志等^[8]对天津滨海新区某软土地基强夯加固工程进行了 Rayleigh 面波量化评价。

前人对强夯进行了大量的研究,但在强夯振动波传播方面主要研究了强夯振动波在水平面上的传播规律,并未对其沿斜坡传播规律进行研究。本文以延安新区填方区强夯为例,制定监测方案,对强夯振动加速度沿平面和斜坡的传播规律进行深入研究与对比分析,并研究能级对振动加速度传播和衰减

规律的影响。

1 工程概况

延安新区建设是延安市平山造地、上山建城,拓展城市发展空间,实施“中疏外扩”城市发展战略的重大举措。试验场地为延安新区一期综合开发工程的黄土沟壑区,填方土主要为黄土,填方后已对场地进行碾压,试验区场地情况如图 1 所示。



图 1 监测现场

Fig.1 Monitoring site

2 试验方案

在填土地基中埋设 MPS-ACC01X 型加速度传感器,然后利用多个 8 通道 24 位采集卡记录强夯振动加速度沿水平面和斜坡的传播和衰减规律,进而总结不同夯击能量下(夯锤重 165 kN,底面直径 2 m,夯锤的落距 H 可选择 18.3、5 及 10 m)振动加速度在填土地基中的水平向传播和衰减规律。

本次试验选用性能稳定、质量可靠的加速度传感器。加速度传感器在出厂时进行 mV-g 的标定,使用前对其进行复核,并绘制标定曲线。

本次监测根据现场情况布置了两条测线:一条是沿夯击点径向的水平面测线,沿该测线选取不同距离布置了 8 组加速度传感器[布置图如图 2(a)所示];另一条是沿夯击点径向的斜坡测线,沿该测线

在夯击点所在平面及上、下两个斜坡平台共布置 7 组加速度传感器[布置图如图 2(b)所示]。

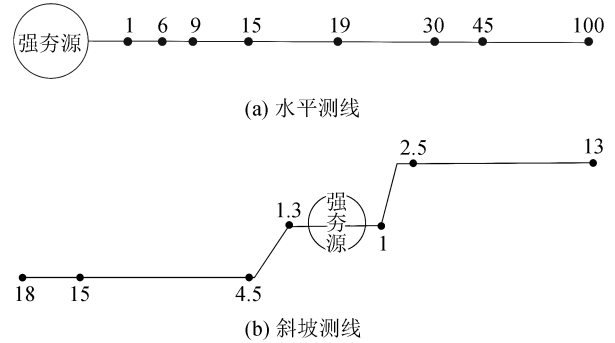


图 2 水平及斜坡测线传感器布置图(单位:m)

Fig.2 Horizontal line sensor layout (Unit:m)

3 测试结果与分析

3.1 平面传播规律

本次试验场地进行强夯地基处理设计的夯锤重 16.5 t、落距为 18.3 m。

由图 3 可以看出,在水平面上,沿强夯点的径向方向,加速度在径向和竖向上变化规律相似,其相同时刻的加速度值均随距夯点的距离增大而减小。这是由于土体内部阻尼的作用导致强夯振动在向外传播的过程中,随着传播距离的增加振幅逐渐减小,表现为强夯振动随传播距离增加的空间衰减过程。

就同一点的两个方向上来说,同一时刻该点径向加速度值较大,竖向加速度值较小,前者约为后者的几倍至数十倍。在距夯击点 1 m 的位置,径向及竖向加速度峰值分别为 1.46g 及 0.09g。

径向和竖向加速度均近似按与夯击点距离的负幂函数形式衰减,表现为夯击产生的加速度按距离的负幂函数衰减,即:

$$a = k \times r^{-\beta} \tag{1}$$

式中: β 为衰减指数; k 为当量系数; a 为测点最大振动速度(cm/s); r 为测点距夯击点距离(m)。

对图 3 的数据曲线按式(1)进行拟合,可以发现沿水平方向布置测线监测到的径向及竖向加速度峰值 a 随距夯击点距离 r 的变化规律分别为: $a = 1.885\ 3 \times r^{-1.435}$ 及 $a = 0.074\ 8 \times r^{-1.06}$ 。

3.2 斜坡传播规律

由图 4 可以看出,强夯振动产生的径向和竖向加速度均沿斜坡以夯击点为中心向两侧随距离增加而减小。与水平面测线上加速度的变化规律相似,在沿斜坡传播时,同一点相同时刻的径向加速度值

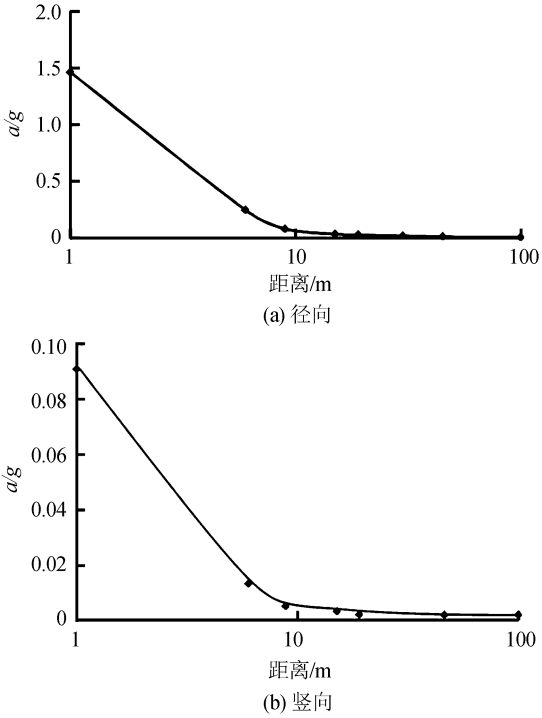


图 3 径向及竖向加速度随距离变化关系(平面)
Fig.3 Radial acceleration varies with distance increasing (Plane)

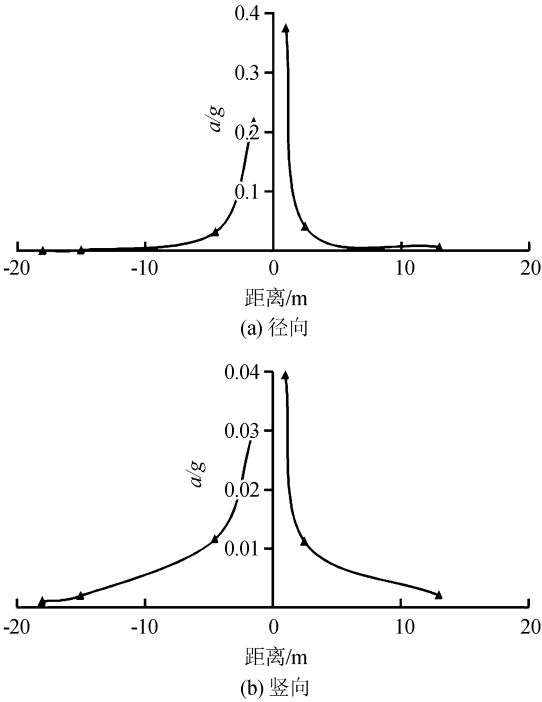


图 4 径向及竖向加速度随距离变化关系(斜坡)
Fig.4 Radial acceleration varies with distance increasing (Slope)

也远大于竖向加速度值。同样在距夯击点 1 m 的位置,径向加速度峰值为 0.38g,竖向加速度峰值为 0.04g。

在垂直方向上,由于上部斜坡平台已被夯实,土

体密实,阻尼作用较小,振动波向上传播衰减较慢;而下部黄土相对松散,阻尼作用较强,振动波向下传播衰减较快。因此在距夯击点相同水平距离处,上斜坡平台处的径向和竖向加速度值均要大于下斜坡平台。可见,场地土体的密实度是影响强夯振动波传播的主要因素。

用式(1)对图 4 的数据进行拟合,可以发现沿斜坡方向布置测线监测到的径向及竖向加速度峰值 a 随距夯击点距离 r 的变化规律分别为 $a=0.274\ 5g\times r^{-1.56}$ 及 $a=0.036\ 2g\times r^{-1.143}$ 。

由图 3、4 可知,在距夯击点相同距离处,强夯振动波沿水平方向传播产生的加速度峰值要大于沿斜坡方向。这是由于填方场地由于前期经受过

碾压,土层具有一定的密实度,而碾压只能加固较浅深度范围内的土层,土层由上至下密实度降低;近地表土层水平方向上密度相对比较均匀,密实度较大;垂直方向上密度差异较大,由上至下递减。夯击时,夯击波在接近地表的水平面上随距离衰减较小;而在垂直方向上,由于土质不均,夯击波随距离衰减较大。

3.3 能级影响

为测试夯击产生的加速度值随能级的变化规律,在夯锤质量不变的情况下拟设计落距分别为 18.3 m、10 m 及 5 m,即能级分别为 3 019.5 kN·m、1 650 kN·m 及 825 kN·m,得到图 5 所示变化曲线图。

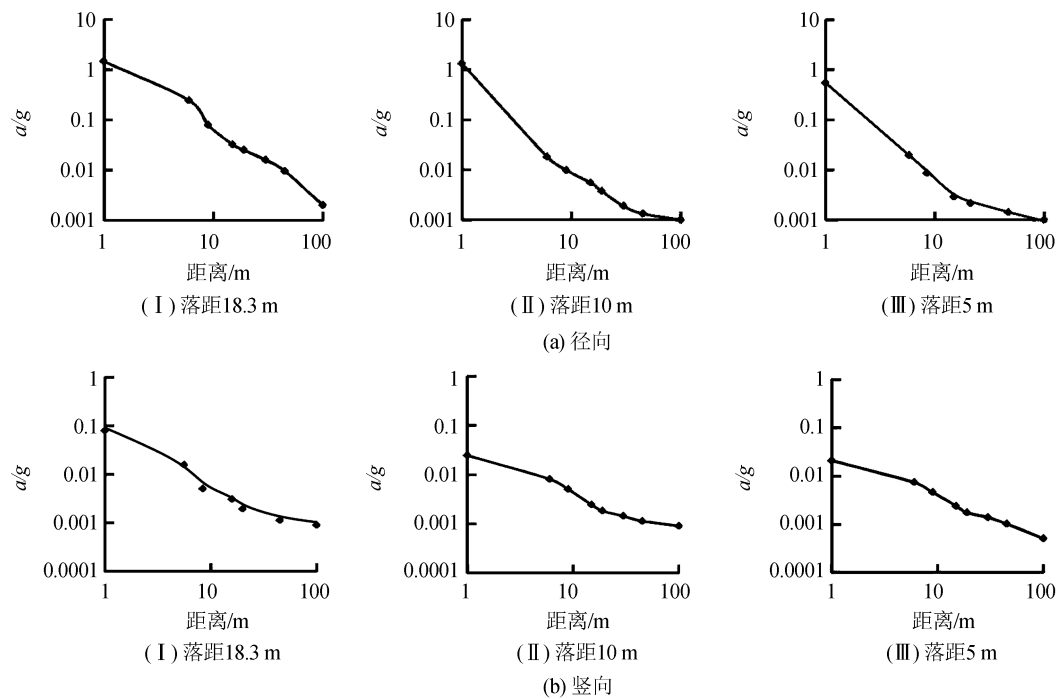


图 5 不同能级下径向及竖向加速度随距离变化关系

Fig.5 The relationship between radial acceleration and distance variation at different energy levels

由图 5 可以看出,随着夯击能的减小产生的夯击波变弱,在与夯击点相同距离处产生的径向和竖向加速度均明显减小。在距夯击点 1 m 位置处,夯击能为 3 019.5 kN·m 时,径向加速度峰值为 1.46g,竖向为 0.09g;夯击能为 1 650 kN·m 时,径向加速度峰值为 1.32g,竖向为 0.025g;夯击能为 825 kN·m 时,径向加速度峰值为 0.65g,竖向为 0.02g。

对强夯能级与相应加速度峰值曲线进行回归分析,可以发现在与夯击点距离一定的情况下,加速度峰值随着强夯能级的减小也呈负幂函数衰减,可表

示为:

a=k×Q^{-α} (2)

式中: a 为测点处强夯引起的最大振动速度(cm/s); Q 为夯击能(kN·m); k 、 α 均为振动衰减规律参数,可通过实测数据回归分析得到(表 1)。

4 结论

本文选取延安新区强夯现场,采用 MPS-ACC01X 型加速度传感器和 8 通道 24 位高速采集卡对振动加速度沿水平面和斜坡的传播和衰减规律进行了研究,得出以下结论:

表 1 强夯振动加速度峰值随夯击能衰减规律回归分析

Table 1 Regression Analysis of the Peak of Vibratory Acceleration of Dynamic Compaction								
加速度 方向	振动衰减 规律参数	距夯击点距离/m						
		1	6	9	15	19	45	100
X	k	1E-02	2E-08	6E-08	1E-08	6E-09	6E-08	3E-05
	α	0.634 7	2.008 2	1.721 3	1.807 7	1.868 1	1.442	0.521 2
Z	k	1E-05	2E-04	1.1E-03	4E-04	6E-04	4E-04	2E-05
	α	1.104 7	0.543 9	0.207 9	0.268 8	0.161 7	0.125 8	0.462 6

- (1) 径向和竖向加速度值均随与夯点距离的增大而减小。
- (2) 在与夯击点距离相同处,强夯振动波沿水平方向传播的径向和竖向加速度值要大于沿斜坡方向。
- (3) 随着能级的增大,强夯产生的夯击波增强,在与夯击点相同距离处产生的径向加速度和竖向加速度均明显增大。

参考文献(References)

[1] 高宏兴,洪武铮,翁慧勤.强夯振动对岸坡稳定的影响及其分析[J].水运工程,1982(5):13-16.
GAO Hongxing, HONG Wuzheng, WENG Huiqin. Dynamic Compaction Vibration on Slope Stability and Its Analysis[J]. Water Transport Engineering, 1982(5):13-16.

[2] 水伟厚,朱建锋.10 000 kN·m 高能级强夯振动加速度实测分析[J].工业建筑,2006,36(1):37-39.
SHUI Weihou, ZHU Jianfeng. Experimental Analysis of the Influence of Vibration During 10 000 kN·m High Energy Level Dynamic Compaction[J]. Industrial Construction, 2006, 36(1): 37-39.

[3] 刘吉敏,王长柏.强夯振动监测及衰减规律研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2012,32(3):67-70.
LIU Jimin, WANG Changbo. Study on Vibration Monitoring and Attenuation Caused by Dynamic Compaction[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 32(3): 67-70.

[4] 孔令伟,袁建新.强夯时地基土的应力场分布特征及应用[J].

岩土力学,1999,20(3):13-19,23.
KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Stress Field Distribution Characteristics of Foundation During Dynamic Consolidation and Its Application[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 13-19, 23.

[5] 蒋鹏,李荣强,孔德坊.强夯振动影响的数值分析[J].地下空间,2001,21(5):544-548.
JIANG Peng, LI Rongqiang, KONG Defang. Numerical Analysis on Effect of Vibration from Dynamic Compaction[J]. Underground Space, 2001, 21(5): 544-548.

[6] 李润,简文彬,康荣涛.强夯加固填土地基振动衰减规律研究[J].岩土工程学报,2011,33(增刊):253-257.
LI Run, JIAN Wenbin, KANG Rongtao. Vibration Attenuation Laws for Reinforcing Filled Ground by Dynamic Compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Supp): 253-257.

[7] 张北战,姚仰平,方雨菲.填土地基强夯加固效果研究[J].地震工程学报,2015,37(增刊1):30-34.
ZHANG Beizhan, YAO Yangping, FAMG Yufei. Reinforcement Effect of Dynamic Compaction on a Backfilled Foundation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37 (Supp1): 30-34.

[8] 吕耀志,谭儒蛟,张建根,等.Rayleigh 波评价强夯加固效果量化分析研究[J].地震工程学报,2015,37(增刊2):218-222.
LÜ Yaozhi, TAN Rujiao, ZHANG Jiagen, et al. Quantitative Analysis of the Evaluation of the Reinforcement Effect of Dynamic Compaction Using a Rayleigh Surface Wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(Supp2): 218-222.