

深厚粉细砂场地 8 000 kN · m 能级强夯振动 衰减规律研究

时 伟¹, 邵琪琳¹, 董炳寅², 胡瑞庚³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中华岩土集团股份有限公司, 北京 100026;

3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 为研究砂土地强夯振动规律, 减少强夯对周边环境的影响, 在某深厚粉细砂场地进行 8 000 kN · m 强夯试验, 并进行强夯振动监测, 分析强夯振动随测点距离的衰减变化规律和随楼层的衰减变化规律, 确定了 8 000 kN · m 能级强夯安全施工距离, 并对隔振沟隔振效果进行振动监测. 根据试验数据进行非线性拟合, 得到三向合振速随距离、楼层的变化规律, 在夯点处, 垂向振速最大, 随着距夯点距离的增加, 环向振速最大, 在该深厚粉细砂场地 8 000 kN · m 能级强夯振动下的安全施工距离为 220 m; 在不同楼层处, 环向振速最大, 在安全施工距离内, 相比于框架结构, 强夯振动对砖混结构的影响较大.

关键词: 强夯; 振动监测; 深厚粉细砂; 衰减规律; 安全距离

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0309-06

Research on vibration decay law of 8 000 kN · m energy level dynamic compaction in deep silty sand site

SHI Wei¹, SHAO Qilin¹, DONG Bingyin², HU Ruigeng³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technological, Qingdao 266033, China;

2. China Zhong-hua Geotechnical Engineering Co. Ltd, Keyuan Road 13, Beijing 102600, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: In order to study the law of dynamic compaction vibration in sandy soil site and reduce the impact of dynamic compaction on the surrounding environment, dynamic compaction test of 8 000 kN · m was conducted in deep silty sand site, and dynamic compaction vibration data was monitored. Analyze the variation regularity with the distance of measuring point under the dynamic compaction vibration and the variation regularity with the floor, determine the safe construction distance. According to the experimental data, the nonlinear fitting was carried out, test the effect of the vibration isolation. The nonlinear fitting is performed to get the change rule of three-way combined vibration with distance and floor. The results show that when the vibration velocity changes with the distance, the initial maximum vibration velocity is largest vertically, the safety distance of this deep silty sand site under dynamic compaction vibration of 8 000 kN · m is 220 m; when the distance is farther, the ring vibration speed is the largest. At different floors, the circumferential vibration velocity is the largest. In the safe construction distance, the strong vibration has a greater influence on the brick-concrete structure than the frame structure.

Key words: dynamic compaction; vibration monitoring; deep silty sand; attenuation law; safe distance

强夯是一种常用的地基处理方法, 但是其产生的巨大夯击能会引起周围土体的振动, 使得地基的压缩性降低, 地基的强度提高, 特别是对于深厚细砂土地区, 可利用高能级强夯振动减少工后沉降. 但是, 国内外许多研究学者都认为强夯振动对周边建筑物的影响不可忽视^[1-3], 随着时代发展也愈加得到重视, MENG Qingjuan^[4]对强夯振动的两个影响因素拟合进行模型试验. 陈向阳等^[5]对砂土地基强夯的影响因素进行了研究, 得出地

下水位对强夯效果有明显影响. 另外, 为了减少强夯振动对周围产生的影响, 王斯海^[6]研究了强夯振动对不同土层结构的效应影响. 黄瑛^[7]分析了强夯法加固地基时, 夯击能、夯点距离等因素对周围已建建筑物的安全影响, 通过监测振动速度、振动加速度、建筑物的变形等确定周围建筑物的安全距离. 杭的平^[8]对比了强夯振动在有无隔振沟情况下对周围建筑的影响. 强夯振动关于距离的衰减规律, 与土质有关. J. H. Hwang

收稿日期: 2018-04-11

修改稿日期: 2019-05-05

基金项目: 山东省住房和城乡建设厅研究开发基金项目(2016-02-1)

第一作者: 时 伟(1964—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事地基处理与基础工程研究. E-mail: susan.sw@163.com

等^[9]通过一系列地面振动测量,得到不同冲击能量和隔振沟对地面振动的影响.王鹏程^[10]研究了强夯振动下安全距离的主要影响因素.本文对某粉细砂场地地基强夯施工产生的振动进行现场监测,得出具体的振动衰减规律以及施工时的安全距离.

1 试夯场地概况

强夯振动监测场地为风成砂丘地貌,砂丘以半固定或活动砂丘为主.本场地 40 m 勘察深度内未见地下水.场地附近区域的土层情况及土层物理力学指标见表 1.

表 1 试验场地各土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of various soil layers in the test site

层号	①	①1	②	③	④	⑤	⑥	⑥1	⑦
岩土名称	素填土	细砂	细砂	细砂	细砂	细砂	粉土	细砂	粉质粘土
层厚/m	0.3~	0.60~	11.4~	1.00~	6.70~	7.2~	2.30~	2.00~	2.20~
	16.2	7.00	13.50	9.00	21.00	22.00	13.50	≥18.50	13.00
层底标高/m	0.3~	0.60~	12.50~	1.90~	10.6~	28.50~	34.70~	43.00~	36.60~
	16.2	15.00	15.30	20.00	30.00	≥50.00	41.5	≥60.00	42.70
c/kPa	28	0	0	0	0	0	18	0	20
f_{sk}/kPa	/	100~	250	170~	230~	280~	180~	200~	190~
		130		190	260	320	200	220	220
E_s/MPa	/	5.5~	7.5	13.0~	16.0~	23.0~	8.0~	15.0~	7.0~
		7.5		16.0	19.0	26.0	10.0	18.0	9.0

2 试验方案

2.1 试验仪器设备

振动监测设备为加拿大 Instantel 的 BlastmateIII 型振动监测仪. Instantel 生产的 Blast 系列振动监测仪具有灵敏度高、可靠性强、功能强大等特点,在全球应用广泛,是全球最先进的爆破振动设备之一.

表 2 BlastmateIII 振动监测仪技术参数

Tab. 2 BlastmateIII vibration monitor technical parameters

振动监视(带有标准三向地震检波器)	
量程	高达 254 mm/s
分辨率	0.127 mm/s 或 0.015 9 mm/s, 带有内置式前置放大器
精度	+/-5% 或 0.5 mm/s, 取较大值, 4~125 Hz/DIN 45669-1 标准
变频器密度	2.13 g/cc
频率范围	2~250 Hz, 理想平滑: 0~3 dB, /1~315 Hz

BlastmateIII 振动监测仪技术参数见表 2, 监测设备图片见图 1.



图 1 BlastmateIII 振动监测仪

Fig. 1 BlastmateIII vibration detector

2.2 监测点布置

本次监测点以夯点为振源,强夯采用 8 000 kN·m 能级.选择在距夯点边缘沿径向处,距离为 50 m、150 m、180 m、190 m、220 m、350 m,分别设置振动监测点,记录强夯振动在各监测点引起的三向振速、三向位移.监测点布置示意图见图 2.

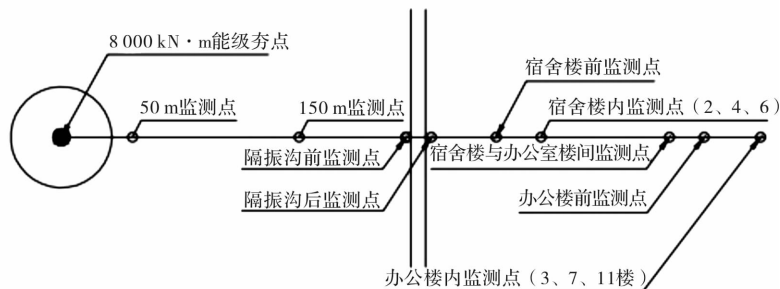


图 2 监测点布置示意图

Fig. 2 Monitoring point layout diagram

3 试验方案

本次强夯振动监测试验主要寻求在粉细砂场地内, 三向振速、三向位移随距离的变化规律^[11-14], 从而预估粉细砂场地内的强夯振动安全距离. 振动监测试验的安全评判标准选用《爆破安全规程》(GB6722-2014)^[15].

3.1 监测点布置

(1) 振速随距离的衰减规律

试验采集距离夯点的振动数据, 选择在距夯点边缘沿径向处, 振动监测点最近距离为 50 m, 最远距离为 350 m. 对多组夯击振动作用下的监测点数据进行记录. 三向振速随距离的变化曲线如图 3 所示.

由图 3 可以看出, 随着距振源距离的增大, 垂向、径向、环向振速均减小. 其中, 垂向和径向振速初始振速较大, 环向振速初始振速较小. 在距振源距离小于 220 m 时, 随着距振源距离的增大, 三向振速衰减较快; 当距振源距离大于 220 m 时, 三向振速随距振源距离的衰减基本不变.

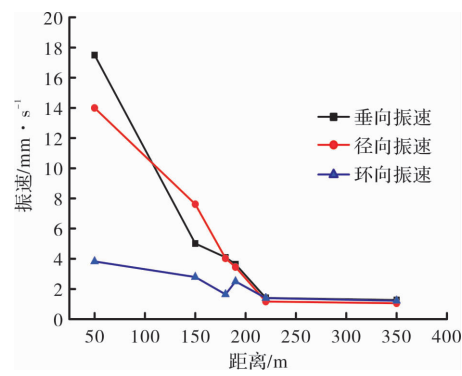


图 3 三向振速随距离的变化曲线图

Fig. 3 Three-dimensional vibration velocity curve with the distance

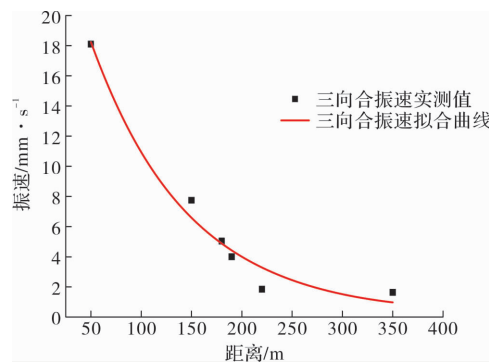


图 4 三向合振速实测值及拟合曲线

Fig. 4 Three-way combined velocity of the measured value and fitting curve

各监测点三向合振速实测值及拟合曲线如图 4. 当距夯点距离小于 220 m 时, 三向合振速随距

夯点距离的增大衰减速度较快, 当距夯点距离大于 220 m 时, 三向合振速随距夯点距离的增大衰减速度明显减小. 采用负指数函数对三向合振速与距离的关系进行拟合, 振动监测拟合结果公式.

$$v = Ae^{-\frac{x}{t}} + B \tag{1}$$

式中: v 为测点三向振速 (mm/s); x 为测点距夯点距离 (m); A 、 B 、 t 为拟合参数, 取值见表 3.

表 3 式(1)拟合参数取值

Tab. 3 Formula (1) fitting parameter values				
拟合参数	A	B	t	相关系数 R^2
拟合值	30.31	0.16	96.79	0.964

根据监测数据拟合结果和爆破振动安全允许振速规范, 针对本工程 8 000 kN·m 强夯能级作用下, 土窑洞、土坯房、毛石房屋安全距离为 200 m, 一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物安全距离为 90 m, 新浇大体积混凝土安全距离为 70 m. 因此, 为满足安全施工要求, 安全施工距离可取 220 m.

根据《爆破安全规程》规范, 振动速度为三个分量中的最大值, 各监测点的最大振速随夯点距离变化曲线如图 5 所示. 在距振源距离小于 220 m 时, 随着距振源距离的增大, 最大振速衰减较快, 并且初始监测点垂向振速最大; 当距振源距离大于 220 m 时, 最大振速随距振源距离的增大稍有回升, 但增幅不大, 监测点环向振速最大.

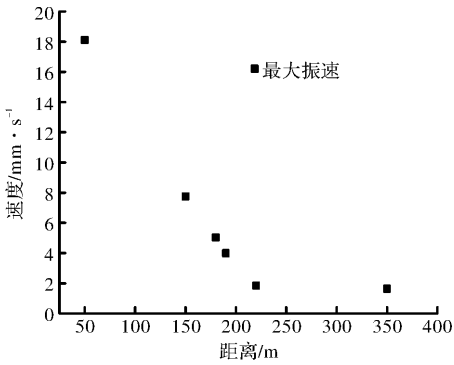


图 5 最大振速随距离变化曲线图

Fig. 5 The maximum vibration velocity curve with the distance

(2) 位移随距离的衰减规律

振动监测过程中通过试验监测器对各个监测点的位移监测, 可以得到垂向和径向位移的数据. 三向振速随距离的变化曲线如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 垂向、径向位移随着距离增大而减小. 在距振源距离小于 220 m 时, 随着距振源距离的增大, 垂向、径向位移衰减较快; 当距振源距离大于 220 m 时, 垂向、径向位移随距振源距离的增大衰减速度明显减小. 试验结果表明, 在距夯点

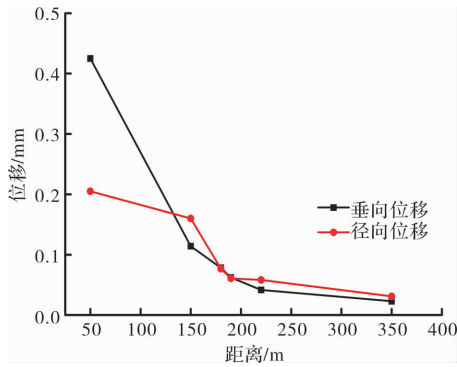


图 6 三向位移随距离的变化曲线

Fig. 6 Three-dimensional displacement with distance curve

220 m 范围内, 距振源的距离对垂向和径向位移的影响明显; 当距振源距离大于 220 m 时, 距离对垂向、径向位移的影响程度明显减弱。

3.2 高能级强夯振动随楼层高度衰减规律

试验现场宿舍楼为砖混结构, 办公楼为框架结构, 为分析强夯振动对不同楼层的影响, 在距离夯点 220 m、350 m 的两栋楼的不同楼层上分别进行振动监测。其中在距离夯点 220 m 的宿舍楼前的地面及第 2、4 层设置振动监测点, 在距离夯点 350 m 的办公楼前的地面及第 3、5、8、9、11 层设置振动监测点。

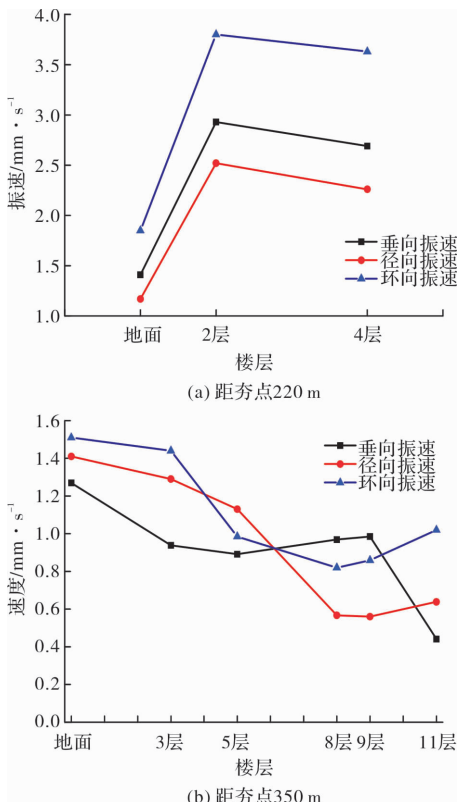


图 7 三向振速随楼层的变化曲线

Fig. 7 Three-dimensional vibration velocity curve with the floor

(1) 振速随楼层的衰减规律

三向振速随楼层的变化曲线如图 7 所示。三向振速随楼层的不同而变化, 且变化规律与距夯点的距离有关。当距夯点距离 220 m 时, 地面三向平均振速约为 1.48 mm/s, 第 2 层三向振速约为 3.08 mm/s, 第 4 层三向平均振速约为 2.86 mm/s, 第 2、4 层三向平均振速分别为地面三向平均振速的 2.08、1.93 倍, 说明在距夯点 220 m 时, 楼层(楼层数>1)对地面三向平均振速有放大作用, 放大系数随楼层而变化。当距夯点 350 m 时, 三向振速随楼层的增加而呈减小趋势, 地面三向振速大于各楼层三向振速, 说明在距夯点 350 m 时, 楼层(楼层>1)对地面三向振速有减弱作用, 随楼层的变化缩减系数没有呈现明显的规律性; 根据爆破振动安全允许振速规范, 距夯点 350 m 各楼层振动速度都在允许范围内。

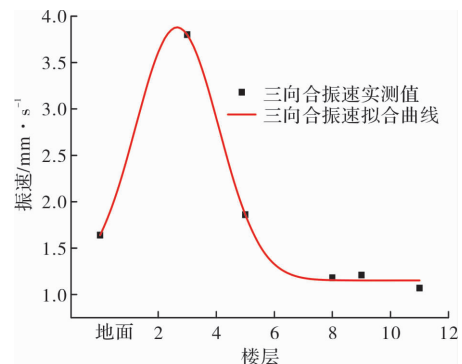


图 8 三向振速实测值及拟合曲线

Fig. 8 Three-dimensional vibration actual measured value and fitting curve

距夯点 350 m 处办公楼各监测点三向合振速实测值及拟合曲线如图 8。在距夯点 350 m 处, 相对地面三向合振速, 随着楼层的增加, 三向合振速呈现先增大后减小的规律。当楼层数在 3 层以下时, 三向合振速随楼层的增加而增大, 第 3 层三向合振速是地面合振速的 2.32 倍; 当楼层在 3 层以上时, 三向合振速随楼层的增加而减小, 第 8 层三向合振速是地面合振速的 0.72 倍。采用 GUASS 函数对三向振动实测值与楼层的关系进行拟合, 拟合结果公式:

$$v = Ae^{-\frac{(x-c)^2}{t}} + B \quad (2)$$

式中: v 为测点三向振速(mm/s); x_i 为第 i 楼层; A 、 B 、 t 、 c 为拟合参数, 取值见表 4。

表 4 式(2)拟合参数取值

Tab. 4 Formula (2) fitting parameter values

拟合参数	A	B	t	c	相关系数 R^2
拟合值	2.73	1.15	4.09	2.65	0.995

(2) 位移随楼层的衰减规律

垂向、径向位移随楼层的变化曲线如图9所示。在距夯点220m处,随楼层的增加,垂向、径向位移均较地面位移增大,在第2层垂向、径向位移最大,当楼层在2层以上时,位移呈减小趋势。在距夯点350m处,各楼层测得的垂向位移与地面垂向位移基本无变化,即楼层对垂向位移的影响较小。随着楼层的增加,径向位移呈现先增大后减小的变化规律,第9层测得的径向位移最大,约是地面径向位移的4.97倍。

4 隔振沟测试效果

针对本次试验,依据已经得出的安全施工距离,对距离夯点180m,3m深、3m宽的隔振沟的隔振效果进行了测试工作。设置了两个监测点:JC5、JC6,分别位于隔振沟两侧,监测点位置示意图如图10,振动测试结果见表5。

由表5可知,隔振沟前后监测点峰值加速度均是径向最大,垂向次之,环向最小;隔振沟阻碍强夯振动作用明显,经过隔振沟减振后,三向合振速PVC从5.04mm/s衰减至4.00mm/s,衰减率达20.6%。

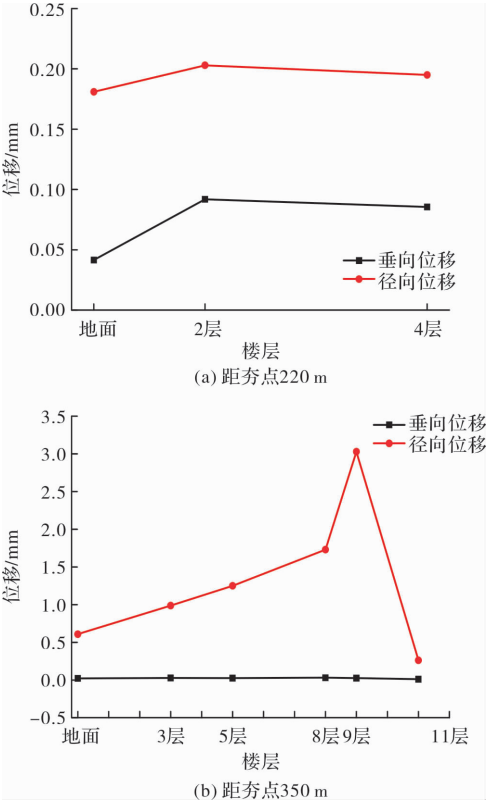


图9 三向位移随楼层的变化曲线
Fig.9 Vertical and radial displacement curve with the floor

表5 隔振沟隔振测试结果
Tab.5 Vibration isolation vibration test results

点号	分量	振速/mm·s ⁻¹	峰值加速度/g	峰值位移/mm	三向合振速 PVC/mm·s ⁻¹
JC6	环向 tran	1.64	0.014 0	8.21	5.04
	垂向 vert	4.09	0.020 6	0.078 3	
	径向 long	4.03	0.026 3	0.266	
JC5	环向 tran	2.50	0.018 9	7.68	4.00
	垂向 vert	3.64	0.029 6	0.092 2	
	径向 long	3.45	0.039 5	0.107	

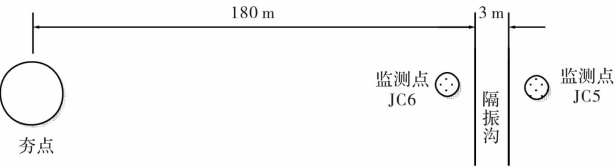


图10 隔振沟作用测试监测点位置示意图
Fig.10 Vibration isolation groove effect test monitoring point position diagram

5 结论

通过对8000kN·m强夯能级下粉细砂场地上强夯振动试验及其规律的研究,得到以下结论:

(1)在距振源距离小于220m时,随着距振源

距离的增大,振速衰减较快;在距振源距离大于220m时,振速随距振源的衰减速度减小并趋于稳定。

(2)在距夯点220m范围内,距离对垂向、径向位移的影响明显;当距夯点距离大于220m时,影响程度明显减弱,在粉细砂场地上8000kN·m下安全距离可取220m。

(3)在不同楼层处,环向振速最大,在安全施工距离内,相比于框架结构,强夯振动对砖混结构的影响较大。

(4)现场已挖隔振沟的隔振效果明显,在8000kN·m强夯能级作用下,隔振沟两侧振动衰减达20.6%。若未达到安全距离,可采取挖隔振沟

减小振动带来的影响。

参考文献 References

- [1] 张涛,吕淑然,杨凯. 强夯振动对周边环境的影响研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(11):127-132.
ZHANG Tao, LÜ Shuran, YANG Kai. Effect of dynamic compaction vibration on surrounding environment. [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 127-132.
- [2] TSAI R H, CHANG T S. Effects of open trench sliding on vibration-screening effectiveness using the two-dimensional boundary element method [J]. Soil Dynamics and earthquake engineering, 2009 (29): 865-873.
- [3] 李俊如,高建光,邵蔚,等. 砂土中的强夯振动对周边环境的影响研究[J]. 岩土力学, 2002, 23 (S1): 198-200.
LI Junru, GAO Jianguang, SHAO Wei, et al. Research on influence of dynamic compaction vibration of sand-soil on surroundings Li. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S1):198-200.
- [4] MENG Qingjuan, QIAO Jingsheng, WANG Lin. Model test study on transfer law of dynamic stress produced by dynamic compaction [J]. Systems Engineering Procedia, 2011, 1: 74-79.
- [5] 陈向阳,郭冰鑫,谢玲霞,等. 砂土地基强夯影响因素及振动规律的现场试验研究[J]. 石油工程建设, 2016, 42(3): 64-68.
CHEN Xiangyang, GUO Bingxin, XIE Lingxia, et al. Field test on influencing factors and vibration law of dynamic compaction for sand foundation[J]. Petroleum Engineering Construction, 2016, 42(3): 64-68.
- [6] 王斯海,陈海军,王世坚. 不同土层结构场地强夯振动效应研究[J]. 施工技术, 2016, 45(S1): 15-19.
WANG Sihai, CHEN Haijun, WANG Shijian. Study on vibration effect by dynamic compaction in different site condition of soil layer [J]. Construction Technology, 2016, 45(S1): 15-19.
- [7] 黄瑛. 强夯对周围已建建筑物的影响[J]. 中国港湾建设, 2007(3): 24-26.
HUANG Ying. Analysis of impact of dynamic compaction upon existing surrounding structures[J]. China Harbour Engineering, 2007(3): 24-26.
- [8] 杭的平,韩云山. 强夯振动影响的研究[J]. 四川建筑, 2014, 34(1): 71-72.
- [9] HWANG J H, TU T Y. Ground vibration due to dynamic compaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006(26): 337-34.
- [10] 王鹏程,刘建坤,冯瑞玲. 强夯振动主控因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1282-1288.
WANG Pengcheng, LIU Jiankun, FENG Ruiling. Research on the primary controlling factors of vibration of dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1282-1288.
- [11] JESMANI M, FALLAHI A M, KASHANI H E. Effects of geometrical properties of rectangular trenches intended for passive isolation in sandy soils [J]. Earth Science Research, 2012, 1(2): 137-151.
- [12] 林红,黄自武,陈应波,等. 基于场地实测的强夯冲击对毗邻建筑影响评估[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(10): 101-105.
LIN Hong, HUANG Ziwu, CHEN Yingbo, et al. Effect assessment of adjacent buildings subjected to dynamic compaction based on field measurement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10): 101-105.
- [13] 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(S1): 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(S1): 253-257.
- [14] XU M Q, XU B. The influence of velocity for a moving load on the vibration isolation using pile group [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012: 210-214.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程: GB6722-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety regulation for blasting: GB6722-2014 [S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2015.

(编辑 吴海西 沈波)