

超重型液压快速夯实技术对周边环境的 振动影响分析

方正¹, 卜发东¹, 张占奎², 陈崇欣²

(1. 山东省建筑科学研究院有限公司, 山东 济南 250031; 2. 山东省机械施工有限公司, 山东 济南 250021)

摘要: 液压快速夯实技术在地基处理中适用范围广、加固效果好, 但关于超重型液压快速夯实技术对周边环境的振动影响及有效加固深度仍需进一步探讨。本文以济南国际机场二期改扩建项目为研究背景, 场地浅层分布 2~7 m 的难压实、可液化粉土地层, 极易在机场运营期间产生液化危害, 因此在机场项目正式施工前, 设计 6 种不同夯击能级的强夯、液压夯地基处理现场试验, 对比研究 150 kJ 超重型液压快速夯实技术对周边环境的振动影响, 并在 150 kJ 超重型液压夯试验前后分别进行标准贯入试验, 分析 150 kJ 超重型液压夯的有效加固深度。研究表明: 150 kJ 超重型液压夯在距发振点 10 m 时满足小于等于 24 mm/s 的容许振动值要求, 在距发振点 15 m 时满足小于等于 12 mm/s 的容许振动值要求, 在距发振点超过 15 m 时, 70 kJ、110 kJ 及 150 kJ 液压夯均对周边环境产生的振动影响较小; 150 kJ 超重型液压夯在 2~8 m 范围内加固效果明显, 在 10 m 时有一定的加固效果; 在距发振点超过 15 m 时, 采用 150 kJ 超重型液压夯既能满足对居住建筑容许振动值的要求, 又能增大加固深度, 提高经济效益。

关键词: 液压快速夯实技术; 超重型; 强夯; 振动影响; 有效加固深度

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0046-06

Analysis of vibration impact of ultra-heavy rapid hydraulic compaction technology on surrounding environment

FANG Zheng¹, BU Fa-dong¹, ZHANG Zhan-kui², CHEN Chong-xin²

(1. Shandong Academy of Building Research Co., Ltd., Jinan 250031, Shandong, China;

2. Shandong Machinery Construction Co., Ltd., Jinan 250021, Shandong, China)

Abstract: Rapid hydraulic compaction technology has wide application range and good reinforcement effect in foundation treatment, but the vibration impact of ultra-heavy technology on the surrounding environment and the effective reinforcement depth still needs to be further discussed. This paper takes Jinan International Airport Phase II renovation and expansion project as research background. In the shallow layer of the site, 2-7 m silt is difficult to be compacted and can be liquefied, which is easy to cause liquefaction hazards during airport operation. Therefore, before the formal construction of the airport project, six different levels of compaction energy were designed for on-site trials, with special attention on the vibration impact on the surrounding environment of the 150 kJ ultra-heavy rapid hydraulic compaction technology (150 kJ compaction for short). The standard penetration test was carried out before and after 150 kJ compaction test, and the effective strengthening depth of 150 kJ compaction was analyzed. The research shows that 150 kJ compaction meets the requirements of peak vibration 24 mm/s at a distance of 10 m from the vibration point, and 12 mm/s at a distance of 15 m. When the distance from the vibration point is greater than 15 m, 70 kJ, 110 kJ and 150 kJ hydraulic compaction all have small vibration effects on the surrounding environment. 150 kJ compaction has obvious reinforcement effect in the depth of 2-8 m, and has a certain reinforcement effect at depth of 10 m. When the distance from the vibration point is greater than 15 m, 150 kJ compaction can not only meet the permissible vibration value of residential buildings, but also increase the reinforcement depth and improve economic benefits.

Key words: rapid hydraulic compaction technology; ultra-heavy; dynamic compaction; vibration impact; effective reinforcement depth

0 引言

液压快速夯实技术基于锤重小、落距低的优点, 大大降低了对周边环境的振动影响, 且因液压夯实机型较小、机动灵活、移动便捷, 更适用于在室内、狭小场地或靠近建筑物位置施工, 因此, 当强夯施工振动对周边环境影响较大或施工空间被限制时, 可采用液压快速夯实技术进行浅层处理^[1-3]。

目前, 众多学者^[4-6]对强夯处理的施工振动开展了大量研究, 对液压快速夯实技术的研究多集中于 36~108 kJ 的夯击能级范围, 而 150 kJ 超重型液压夯对周边的振动影响及有效加固深度仍有待深入探讨。李建诚^[7]利用 PFC^{2D} 软件模拟夯实回填过程, 以 57 kJ 夯击能对土体模型夯击 20 次的有效压实深度为 1.5 m, 冲击力传递的最大深度为 2.5 m。袁求武等^[8]在苏丹港新集装箱码头后方堆场项目设置 52~70 kJ 共 6 种不同夯击能的液压夯对比试验, 试验表明 70 kJ 夯击能下 RIC9 夯实机在 0~6 m 范围内的加固效果明显, 6~10 m 范围内标准贯入击数也有一定的提高。徐继文等^[9]在香港国际机场项目进行现场试验, 研究表明夯击能小于 84 kJ 时, 与临时建筑物的安全距离约为 15 m。《液压快速夯实地基技术标准》(T/SDCEAS 10006—2021)^[10]通过某黄土地层工程实例, 分析夯击能为 108 kJ 时, 以工业和公共建筑容许振动值 24 mm/s 为标准, 振动安全距离可按 4 m 控制, 以居民建筑容许振动值

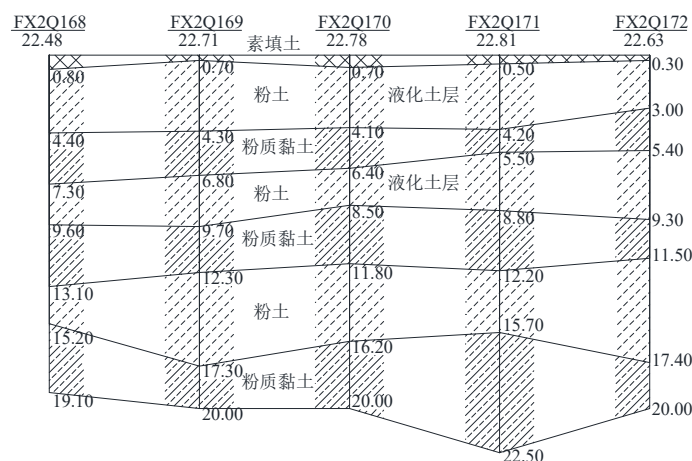
12 mm/s 为标准, 安全距离可定位为 10 m。

在土质类别和夯机参数一定的条件下, 轻型、中型及重型液压夯实技术对土体的有效加固深度是有限的, 处理深层地基往往无法一步到位, 要增大加固深度就必须提高夯击能。本文基于济南国际机场二期改扩建项目, 通过设置不同夯击能级的地基处理现场试验, 根据不同振动频率条件下的质点安全允许振动峰值, 分析 150 kJ 超重型液压快速夯实技术对周边环境的振动影响, 研究 150 kJ 超重型液压夯在工程中的安全振动距离, 并提出超重型液压夯的有效加固深度, 为类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

济南国际机场二期改扩建项目场区地貌单元为黄河冲积平原, 场地内上部地层为黄河冲积漫滩相新近堆积土, 以黏性土、粉土为主; 下部地层为第四系全新统冲积土, 以黏性土及粉土为主。典型工程地质剖面图如图 1 所示。经计算判定浅部粉土为可液化土, 液化等级为轻微-中等, 液化土层厚约 2.0~7.0 m。

粉土比表面积较小, 毛细现象突出, 结构性较差, 在机场运营期间, 浅部粉土层需承担道面荷载和飞机动荷载, 同时面临水-热-力多场耦合作用下的长期变形和强度劣化问题, 极易发生液化导致地基承载力降低, 因此本工程对浅层粉土进行有效夯实是很有必要的。



单位: m

图 1 典型工程地质剖面图

Fig. 1 Typical engineering geological profile

2 现场试验设计

为改善粉土抗液化能力, 解决济南国际机场浅

层粉土液化病害的工程问题, 充分对比研究 150 kJ 超重型液压快速夯与传统强夯技术、常用能级液压夯的夯实效果及振动影响, 本文设计 2 000 kN·m、

3 000 kN·m、4 000 kN·m 强夯及 70 kJ、110 kJ、150 kJ 液压夯共 6 种地基处理试验, 强夯试验设计参数如表 1 所示, 液压快速夯试验设计参数如表 2 所示。

表 1 强夯试验设计参数

强夯分区	夯型	夯点间距	夯点布置	单点击数	遍数
2 000 kN·m	点夯	4.0 m	正方形	8	2
3 000 kN·m	点夯	4.0 m	正方形	8	2
4 000 kN·m	点夯	4.0 m	正方形	8	2

表 2 液压快速夯试验设计参数

分区	夯型	夯点间距	夯点布置	单点击数	遍数
70 kJ	点夯	3.2 m	正方形	80	2
110 kJ	点夯	3.2 m	正方形	60	2
150 kJ	点夯	3.2 m	正方形	40	2

本次试验位置在济南国际机场南侧农田区域, 长约 210 m, 宽约 100 m, 现场试验区域位置示意图如图 2 所示, 6 种不同工况现场试验范围如图 3 所示。试验研究超前于全场施工, 试验开展前期首先进行清表处理。



图 2 现场试验区域位置示意图
Fig. 2 Location of field test area

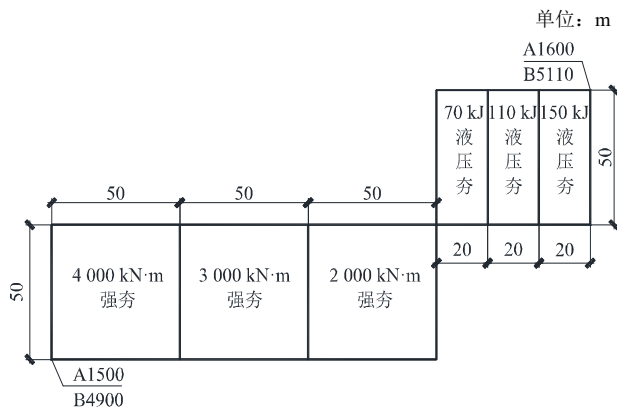


图 3 6 种不同工况的现场试验范围

Fig. 3 Six different working conditions in field test area

为保证不同夯击能级的试验间互不干扰, 振动测试结果真实可靠, 任一工况进行试验时, 其他工况不能同时开展。不同工况试验时间顺序表如表 3 所示, 150 kJ 超重型液压夯现场试验如图 4 所示。

表 3 不同工况试验时间顺序表

试验名称	试验开始时间
150 kJ 液压夯	2022-05-23
110 kJ 液压夯	2022-05-26
70 kJ 液压夯	2022-05-29
2 000 kN·m 强夯	2022-06-25
3 000 kN·m 强夯	2022-07-09
4 000 kN·m 强夯	2022-07-18



图 4 150 kJ 超重型液压夯现场试验

Fig. 4 150 kJ ultra-heavy hydraulic compaction field test

3 试验分析

3.1 强夯试验与 150 kJ 超重型液压夯的振动影响对比分析

采用 L20-S 爆破测振仪对试验过程中的施工振动进行实时监测, 用固定发振点、移动监测点的方式, 由近及远的顺序, 记录距离夯点分别为 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、15 m、25 m、50 m、100 m 及 150 m 位置的振动峰值, 每个距离采集 10~40 s 连续数据。

(1) 试验结果

2 000 kN·m、3 000 kN·m、4 000 kN·m 强夯及 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值监测数据如表 4 所示, 其振动峰值变化曲线如图 5 所示。

(2) 对比分析

根据《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013) [11], 强夯施工对工业建筑、公共建筑的容许振动值为 24.0 mm/s, 对居住建筑的容许振动值为 12.0 mm/s。

表 4 强夯试验及 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值监测数据表

Table 4 Peak vibration data for dynamic compaction test and 150 kJ ultra-heavy rapid hydraulic compaction

距发振点/m	不同能级强夯振动峰值/(mm/s)			150 kJ 超重型 液压夯/ (mm/s)
	2 000 kN·m	3 000 kN·m	4 000 kN·m	
2	259.06	280.23	342.17	123.02
4	164.35	249.84	254.44	63.24
6	103.28	198.01	207.49	38.41
8	74.46	130.96	158.63	26.74
10	44.92	62.35	67.04	17.45
15	22.46	17.71	19.91	9.17
25	7.29	9.80	11.98	4.75
50	1.61	3.77	5.86	1.73
100	0.87	1.89	2.23	1.21
150	0.24	0.32	0.80	0.70

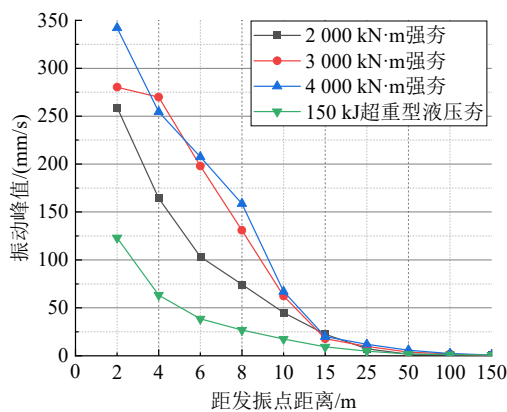


图 5 强夯试验及 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值变化曲线
Fig. 5 Peak vibration curves for dynamic compaction test and 150 kJ ultra-heavy rapid hydraulic compaction

由图 5 可知: a) 2 000 kN·m、3 000 kN·m、4 000 kN·m 强夯的振动峰值均在距离发振点 15 m 时满足对工业建筑、公共建筑的容许振动值要求, 150 kJ 超重型液压夯在 10 m 时满足要求。b) 2 000 kN·m、3 000 kN·m、4 000 kN·m 强夯的振动峰值均在距离发振点 25 m 时满足对居住建筑的容许振动值要求, 150 kJ 超重型液压夯在 15 m 时满足要求。c) 在距发振点小于 50 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值为 2 000 kN·m 强夯的 35.91%~65.16%; 在距离小于 100 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值为 3 000 kN·m 强夯的 19.40%~64.02%; 在距离小于 150 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值为 4 000 kN·m 强夯的 18.51%~83.33%。d) 150 kJ 超重型液压夯对周边环境的振动影响明显小于强夯施工, 在周边环境对振

动影响要求严格并施工空间受限的情况下, 可选择 150 kJ 超重型液压夯进行地基处理。

3.2 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯振动影响对比分析

(1) 试验结果

70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯的振动峰值监测数据如表 5 所示, 其振动峰值变化曲线如图 6 所示。

表 5 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯振动峰值监测数据表
Table 5 Peak vibration data for 70 kJ, 110 kJ and 150 kJ hydraulic compaction

距发振点/m	70 kJ 液压夯/ (mm/s)	110 kJ 液压夯/ (mm/s)	150 kJ 超重型液 压夯/(mm/s)
2	99.73	104.40	123.02
4	42.86	47.30	63.24
6	29.46	33.84	38.41
8	22.10	24.65	26.74
10	14.83	16.94	17.45
15	7.27	8.03	9.17
25	4.67	4.81	4.75
50	1.75	1.77	1.73
100	2.26	1.17	1.21
150	0.82	0.83	0.70

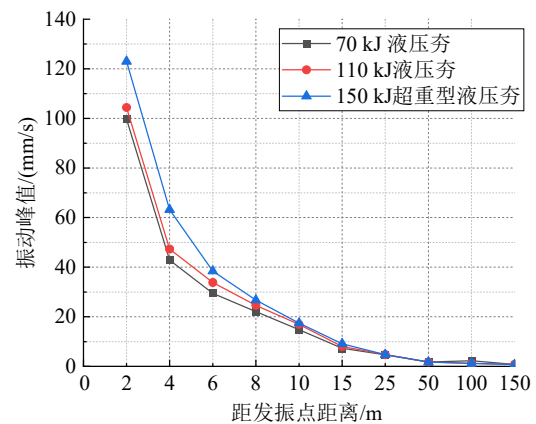


图 6 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯振动峰值变化曲线
Fig. 6 Peak vibration curves for 70 kJ, 110 kJ and 150 kJ hydraulic compaction

(2) 对比分析

由图 6 可知: a) 70 kJ 液压夯的振动峰值在距离发振点 8 m 时满足对工业建筑、公共建筑的容许振动值要求; 110 kJ、150 kJ 液压夯在距离 10 m 时满足要求。b) 70 kJ、110 kJ 及 150 kJ 液压夯的振动峰值均在距离发振点 15 m 时满足对居住建筑的容许振动值要求。c) 在距发振点小于 50 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值为 70 kJ 液压夯的 1.02~1.48 倍; 在距发振点小于 25 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的振动峰值为 110 kJ 液压夯的 1.03~1.34 倍。

d) 在距发振点大于 15 m 时, 70 kJ、110 kJ 及 150 kJ 液压夯的振动峰值差距较小, 均对周边环境产生较小的振动影响。

3.3 150 kJ 超重型液压夯的有效加固深度

在液压快速夯实前后对 70 kJ、110 kJ 及 150 kJ 试验区分别进行 3 组标准贯入试验, 试验深度为 20 m, 地基处理前后 2 次试验点间隔 1 m。70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯地基处理前后标准贯入击数平均值如表 6 所示, 150 kJ 超重型液压夯地基处理前后标准贯入试验对比曲线如图 7 所示, 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯地基处理后标准贯入击数平均值对比曲线如图 8 所示。

由表 6 可知, 在本次研究中, 70 kJ 液压夯的有效加固深度约为 4.0 m, 110 kJ 液压夯的有效加固深度约为 6.0 m, 150 kJ 超重型液压夯可加固至 8.0 m。因此在距发振点大于 15 m 时, 采用 150 kJ 超重型液压夯既能满足对居住建筑的容许振动值要求, 又能相比 70 kJ、110 kJ 液压夯增大加固深度, 提高经济效益。

表 6 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯地基处理前后标准贯入击数平均值

Table 6 Average value of standard penetration blow count before and after foundation treatment with 70 kJ, 110 kJ and 150 kJ hydraulic compaction

深度/ m	70 kJ 液压夯		110 kJ 液压夯		150 kJ 液压夯	
	地基处 理前	地基处 理后	地基处 理前	地基处 理后	地基处 理前	地基处 理后
2	7.9	9.2	7.5	10.8	8.3	13.3
4	5.0	5.8	5.0	6.6	6.1	10.1
6	3.9	4.1	4.8	5.0	4.7	6.3
8	6.5	6.6	7.2	6.8	6.7	8.3
10	8.5	8.5	8.6	8.7	8.7	9.5
12	11.3	12.5	13.7	13.2	11.7	11.5
14	14.0	13.7	15.3	14.8	15.3	14.7
16	13.7	13.6	15.3	17.0	16.7	17.1
18	25.0	25.2	29.0	28.5	28.5	27.7
20	37.5	38.6	36.7	35.9	40.7	36.7

由图 7 可知, 150 kJ 超重型液压夯试验区在 2~8 m 范围内夯后密实度整体提高, 加固效果明显, 标贯击数是地基处理前的 1.24~1.66 倍; 深度 10 m 处, 加固效果有一定的提高; 当深度大于 10 m 时, 150 kJ 超重型液压夯的夯实效果不明显。

根据图 8 对比分析, 在 2~8 m 的范围内, 150 kJ 超重型液压夯相较于 70 kJ 液压夯, 标贯击

数提高 26%~74%; 相较于 110 kJ 液压夯, 标贯击数提高 22%~53%。夯击能级的提高, 使得有效加固深度明显增大。

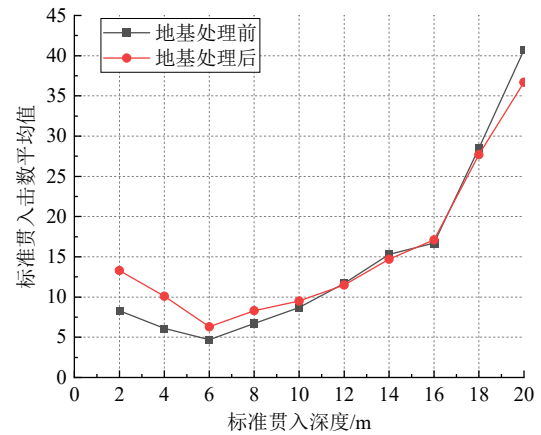


图 7 150 kJ 超重型液压夯地基处理前后标准贯入试验对比曲线图

Fig. 7 Comparison of standard penetration test before and after foundation treatment with 150 kJ ultra-heavy hydraulic compaction

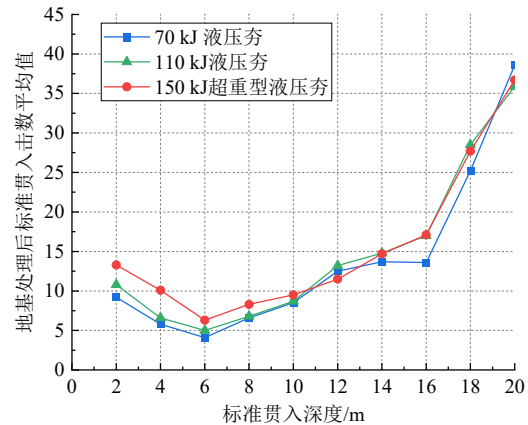


图 8 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯地基处理后标准贯入击数平均值对比曲线图

Fig. 8 Comparison of average value of standard penetration blow count after foundation treatment with 70 kJ, 110 kJ and 150 kJ hydraulic compaction

4 结论

本文通过粉土、粉质黏土土层中不同工况的现场试验, 对比分析 150 kJ 超重型液压快速夯实技术对周边环境的振动影响, 并研究了 150 kJ 超重型液压夯的有效加固深度, 主要结论如下:

(1) 对强夯试验与 150 kJ 超重型液压夯振动影响进行对比分析, 150 kJ 超重型液压夯在距发振点 10 m 时满足小于等于 24 mm/s 的容许振动值要求, 在距发振点 15 m 时满足小于等于 12 mm/s 的容许振动值要求。

(2) 对 70 kJ、110 kJ 与 150 kJ 液压夯对周边环境的振动影响进行对比分析, 在距发振点大于 15 m 时, 均对周边环境产生较小的振动影响, 此时采用 150 kJ 超重型液压夯既能满足对居住建筑的容许振动值要求, 又能增大加固深度, 提高经济效益。

(3) 150 kJ 超重型液压夯在 2~8 m 范围内加固效果明显; 在 10 m 时, 加固效果有一定的提高; 当深度超过 10 m 时, 加固效果不明显。

参考文献

- [1] 张占奎, 陈崇欣, 侯忠成, 等. 液压快速夯实技术及其施工参数的确定方法[J]. 地基处理, 2023, 5(增刊 2): 48-53.
ZHANG Zhan-kui, CHEN Chong-xin, HOU Zhong-cheng, et al. Rapid hydraulic compaction technology and determination method of its construction parameters[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(S2): 48-53.
- [2] 蔡宗锬. 快速液压夯实地基处理技术的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
CAI Zong-kun. Application research of rapid hydraulic compaction foundation treatment technology[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [3] 司癸卯, 张燕飞, 张成. 快速液压夯实机在地基处理中的应用分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(2): 175-178.
SI Gui-mao, ZHANG Yan-fei, ZHANG Cheng. Applicable analysis on high-speed hydraulic compactors during foundation treatment[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013, 11(2): 175-178.
- [4] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1027-1035.
LIANG Yong-hui, WANG Wei-dong, FENG Shi-jin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035.
- [5] 施微丹. 强夯施工对邻近建筑物振动影响的测试分析[J]. 河南建材, 2019(4): 57-58.
SHI Wei-dan. Test and analysis of the influence of dynamic compaction construction on the vibration of adjacent buildings[J]. Henan Building Materials, 2019(4): 57-58.
- [6] 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 Zi-wu, CHEN Ying-bo, 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.
- [7] 李建诚. 快速夯实机冲压土体的动力响应颗粒离散元仿真及试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LI Jian-cheng. PFC dynamic response simulation and test on impacting subgrade with rapid impact compactor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [8] 袁求武, 王锐劲, 李晓辉, 等. 快速夯实机在某工程地基处理中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(7): 28-30.
YUAN Qiu-wu, WANG Rui-jin, LI Xiao-hui, et al. Application of RIC used in foundation treatment of some project[J]. Construction Technology, 2012, 41(7): 28-30.
- [9] 徐继文, 黄志文, 李书璜. 快速液压夯施工工艺振动对监测仪器及临近建筑物影响[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(2): 70-73.
XU Ji-wen, HUANG Zhi-wen, LI Shu-tang. Influence of construction vibration by rapid impact compaction on monitoring instrument and adjacent buildings[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(2): 70-73.
- [10] 山东土木建筑学会. 液压快速夯实地基技术标准: T/SDCEAS 10006—2021[S]. 济南: 中国建材工业出版社, 2021.
Shandong Civil Engineering and Architecture Society. Technical Standard for Rapid Hydraulic Compaction of Foundation: T/SDCEAS 10006—2021[S]. Jinan: China Building Materials Press, 2021.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
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 Allowable Vibration of Building Engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.