

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022071223121994

文章编号:1674-599X(2023)06-0075-08

引用格式:江圣泽, 邓小峰, 姚志刚. 某机场强夯加固土基模拟与现场试验研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 75-82.

Citation: JIANG Shengze, DENG Xiaofeng, YAO Zhigang. Simulation and field test of soil foundation reinforced by dynamic compaction in an airport[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 75-82.

## 某机场强夯加固土基模拟与现场试验研究

江圣泽<sup>1</sup>, 邓小峰<sup>1</sup>, 姚志刚<sup>2</sup>

(1. 民航机场建设工程有限公司, 天津 300456;

2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 为确定某机场三期扩建工程用强夯法加固土基时需要的最佳夯击次数, 并评估强夯法对填料的加固效果。该研究通过建立有限元模型来模拟强夯夯击土体的过程, 分析得到点夯和满夯时各个点位的夯沉数值和累计夯沉数值, 并根据模拟结果确定了两种夯击作业时夯沉率随夯击次数的变化规律。在选定场地开展了强夯试验, 根据制定的现场试验方案, 利用试验数据对数值模拟结果进行验证, 并对夯沉率的函数表达式进行二次修正, 确定修正后的函数表达式。研究结果表明: 数值模拟与现场试验所得规律与结论一致, 参照设计方案对土基进行强夯加固时, 第一遍和第二遍点夯时夯锤的夯击次数应控制在8~9次, 第三遍满夯时夯锤的夯击次数应控制在5~6次, 保证夯击对夯沉量的贡献率, 使得土基具有良好的加固效果, 为相关工程提供借鉴。

**关键词:** 机场; 土基; 强夯; 模拟; 试验

中图分类号: U416.03

文献标志码: A

## Simulation and field test of soil foundation reinforced by dynamic compaction in an airport

JIANG Shengze<sup>1</sup>, DENG Xiaofeng<sup>1</sup>, YAO Zhigang<sup>2</sup>

(1. Airport Construction Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To determine the optimal number of dynamic compaction for reinforcing the soil foundation in the third phase expansion project of a certain airport, and evaluate the reinforcement effect of dynamic compaction method for the filling, this study simulated the process of dynamic compaction by establishing a finite element model. After analysis, the numerical and cumulative settlement values for each point during point compaction and full compaction were obtained. Based on the simulation results, the variation pattern of settlement rate with the number of compaction for both compaction methods was determined. According to the field test plan, the dynamic compaction test was carried out at the selected site. The experimental data were used to validate the numerical simulation results. The function expression of settlement rate was revised twice, and the modified functional relationship was determined. Numerical simulations and field test results indicate that the patterns and conclusions obtained from the two methods are consistent. Therefore, reference to the design plan for the dynamic compaction reinforcement of soil foundation, the number of compaction for the first and second point

收稿日期: 2022-07-12

作者简介: 江圣泽(1994—), 男, 民航机场建设工程有限公司助理工程师。Email: 3059304735@qq.com

compactions should be controlled at 8 to 9 times, and the number of compaction for the third full compaction should be controlled at 5 to 6 times. This ensures the contribution rate of the ramming to the compaction in the process of dynamic compaction, resulting in a well-reinforced soil foundation, and provides reference for future related projects.

**Key words:** airport; soil base; dynamic compaction; simulation; test

强夯法,又称动力固结法或动力加密法,是利用起重设备提升夯锤,再使其自由下落,进行竖向夯击地基的施工方法。该方法通过夯锤对土体产生冲击力来加固土体,以达到提高地基的承载力和降低沉降的目的<sup>[1]</sup>。强夯法在国内外工程中得到了广泛应用,具有效果明显、设备简单、施工方便、节省材料等优点<sup>[2]</sup>。朱彦鹏等<sup>[3]</sup>依托某民用机场工程试验区域,进行了不同强夯能级分区试夯的比较,得到了最优夯击次数,并发现经过强夯处理后,地基土的压实系数得到较大幅度的提高。王程亮<sup>[4]</sup>在某山区机场已填筑高填方地基处理方面展开了研究,证实了强夯法是高填方机场地基处理中常用、有效的手段。罗玮<sup>[5]</sup>通过数值模拟研究了强夯作用下填土地基的动力特性,得到了强夯过程中土体的应力、应变、振动速度,以及振动加速度的分布和变化规律,结果表明强夯法对机场不良地基的加固具有良好的效果。张丽娟<sup>[6]</sup>采用数值模拟法并结合各实例对强夯法地基处理展开分析,得出了强夯法可有效提高土层的压缩模量和地基承载力的结论,并提出了适合的夯击能获得良好地基加固效果的观点。ABDIZADEH等<sup>[7]</sup>使用ABAQUS软件,模拟边坡横向强夯过程,分析了冲击位置、冲击速度和夯锤重量对三种不同边坡土体的影响。通过研究发现,在陡坡上增加夯击能,提高冲击速度,可明显提高土体的夯实效果。JIA等<sup>[8]</sup>采用PFC/FLAC耦合方法同时揭示了颗粒土在强夯过程中的宏观和微观机理,得出了强夯过程在土体瞬态冲击作用和土体颗粒振动作用下的压实效果。文献<sup>[9]</sup>采用耦合离散元-有限差分法建立二维模型,从宏观和微观两个层次揭示了土体在强夯作用下的动态响应,得出土体在强夯作用下的夯实效果显著。BAKHTIARI等<sup>[10]</sup>结合阿巴丹市某工程项目中的土基参数,采用FLAC二维软件对强夯加固土体进行数值模拟分析,指出强

夯是进行土体加固的最佳方法。

2021年,某机场三期扩建工程正式开工建设。为确保土基压实效果,提高施工效率,采用强夯法对施工区域内的软弱土基进行夯实处理。根据要求正式强夯作业前,应选定试验场区进行模拟试验,确定夯锤夯击土体的最佳夯击次数,评估土体的加固效果。因此,试验开展前,采用有限元法,结合地层填料的力学参数,对强夯过程进行数值模拟。再结合模拟结果,选定适宜的试验场地,使用强夯机对填料进行强夯试验,并将记录下的实测值与数值模拟结果进行对比分析。最后,确定夯击次数,评判土体加固效果。

## 1 工程概况

地质勘察报告显示,试验场地表层填土主要由粉土、粉细砂以及碎石等组成,其主要表现为松散软弱,均匀性差,强度低,高压缩性,不宜直接作为道槽槽底土基层。因此,需要对土基进行夯实加固。

除表层杂填土、素填土外,本场地的原地基土层的分布及性质,与该机场二期扩建工程类似。本区域需要处理对象主要是D288钻孔揭露的厚度为9.0 m的杂填土,因受限于强夯处理深度,强夯处理前开挖1.0 m杂填土,在开挖后的土层表面铺设0.5 m厚的碎石垫层,再强夯施工。

根据设计方案,需对土基进行三次强夯加固。第一遍和第二遍点夯时,夯击能为3 000 kN·m,夯击点位按夯锤直径的2.5~3.5倍间距方格跳夯,夯点间距以4.5 m正方形进行布置。每完成一遍全部夯点的夯击后平整场地,再进行下一遍夯击,单点夯击8~9击。第三遍全幅满夯时,夯击能为1 000 kN·m,互相搭夯且夯痕不小于1/4。

强夯平面布置如图1~2所示。

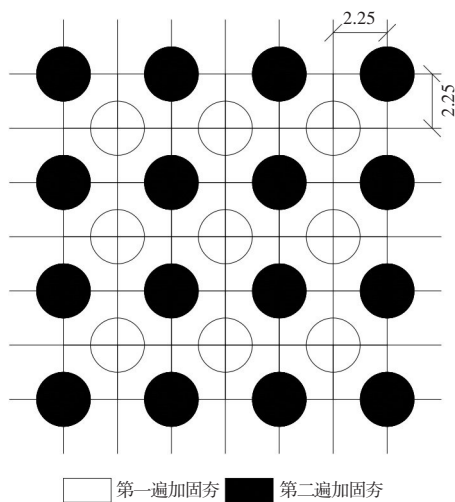


图1 3 000 kN·m强夯平面布置示意(单位:m)

Fig. 1 Arrangement diagram of the 3 000 kN·m dynamic compaction plane(unit:m)

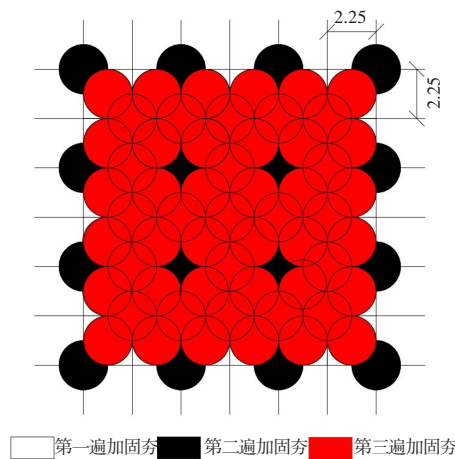


图2 1 000 kN·m强夯平面布置示意(单位:m)

Fig. 2 Arrangement diagram of the 1 000 kN·m dynamic compaction plane(unit:m)

2 模拟分析

2.1 模型建立

假定模型材料各向同性,忽略夯锤冲击过程中土体之间产生的能量损失<sup>[11]</sup>,参考文献[6]的研究结果,设置模型尺寸大小为25.00 m×25.00 m×10.00 m的立方体,整体模型土体分为3个土层。夯锤直径为2.25 m,高0.50 m,质量为17.64 t。因此,在土层上表面中心位置处,参照实际体积设置夯锤尺寸大小。考虑计算机的计算效率及精确度<sup>[12-14]</sup>,模型

划分为六面体网格<sup>[15]</sup>。其中,夯锤网格尺寸大小为0.20 m,夯锤下方土层网格划分时的尺寸大小为1.00 m,土层2和土层3的网格尺寸大小均为2.00 m,整体模型如图3所示。

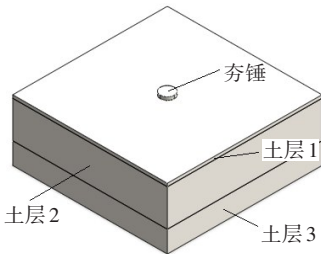


图3 强夯有限元模型示意

Fig. 3 Schematic of the dynamic compaction finite element model

强夯可以使土体在冲击荷载作用下达到加固效果,为了模拟土体受夯锤冲击下应力、位移的变化过程,采用Mohr-Coulomb模型。该模型可反映土体在动力荷载作用下产生的变化规律<sup>[16]</sup>。结合地质勘察报告,各土层材料力学参数见表1。

表1 数值模拟各土层材料参数

Table 1 Numerical simulation of material parameters for each soil layer

类型	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-2</sup> )	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
土层1	30.0	0.30	25.0	330.00	36.0
土层2	11.6	0.37	18.7	11.60	21.5
土层3	15.5	0.35	20.0	12.39	23.4

2.2 荷载及边界条件

模拟的初始阶段,由于没有夯锤作用,整个模型只考虑土体的自重。根据目前国内外的研究成果,在强夯过程中,夯锤撞击体表面的作用时间为0.04 ~ 0.10 s,冲击荷载的时程曲线为三角形状,其计算结果与实际监测结果相近<sup>[17]</sup>。因此,将强夯荷载设置为三角形冲击时程曲线,如图4所示。其中, $t_N$ 表示锤底接触动应力的作用时间, $t_R$ 表示锤底接触动应力出现峰值的时间。强夯数值模拟可采用模

型四边约束水平位移,底部进行固定约束<sup>[18]</sup>。

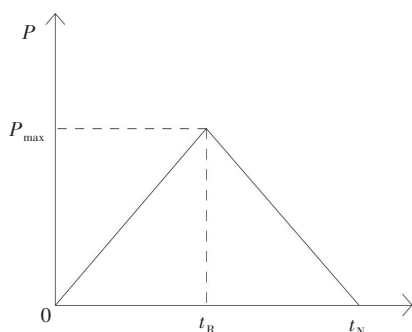
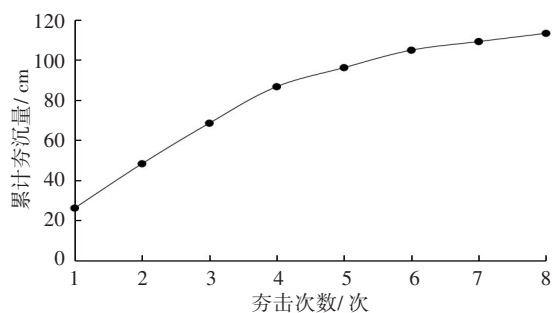


图4 时程曲线示意图

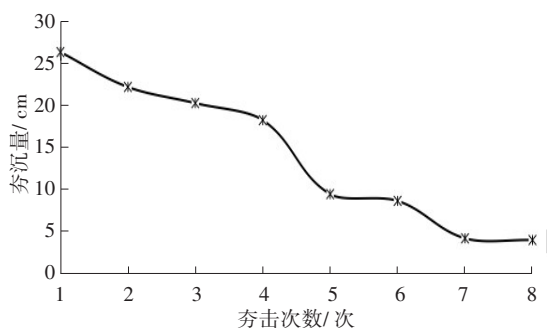
Fig. 4 Schematic diagram of time-history curve

### 2.3 计算结果

模拟点夯作业时的数值模拟结果如图5所示。从图5(a)可以看出,夯锤在第1~5次夯击时的土体随冲击作用产生的整体变形较大,第6次之后开始变缓。从图5(b)可以看出,夯锤第1次夯击时,夯沉量为27 cm;第7次和第8次夯击时,夯沉量分别为4.3 cm和4.1 cm,两击平均夯沉量为4.2 cm,小于5.0 cm,达到设计要求。



(a) 模拟点夯各点位累计夯沉量



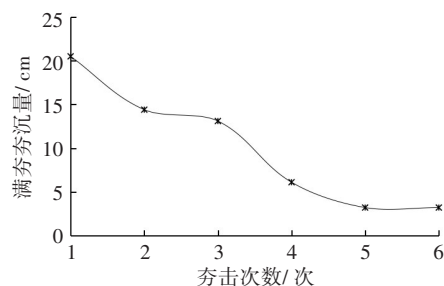
(b) 模拟点夯各点位夯沉量

图5 点夯数值模拟结果

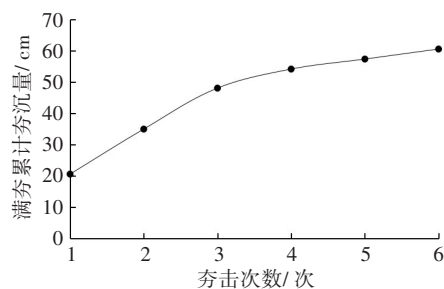
Fig. 5 Numerical simulation results of point compaction

模拟满夯作业时的数值模拟结果如图6所示。从

图6可以看出,夯锤第1次夯击时,夯沉值为20.5 cm,并随夯击次数逐渐累加,累计夯沉量在第5次夯击时逐渐趋于平缓,土体夯锤在第5和第6次夯击下土体夯沉量均为3.1 cm,两击平均值不大于5.0 cm,达到了设计要求。



(a) 满夯各点位累计夯沉量



(b) 满夯各点位夯沉量

图6 满夯数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of full compaction

结合数值模拟结果和李希等<sup>[19]</sup>的研究结论,采用修正单次夯沉率的方法,确定强夯施工的最佳夯击次数。强夯作业产生的夯沉率考虑了夯沉量和冲击能,体现了强夯效能。在夯锤冲击土体,克服阻力做功的总冲击历程中,夯锤冲击地基发生塑性变形对应的夯沉量,有效反映了强夯能量转换为土体的塑性变形能力。每击冲击效能的计算方法见式(1)。

$$\lambda_i = (s_i/S_i) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\lambda_i$ 为第*i*次单次夯沉率, $i=1,2,\dots,10$ ;

$s_i$ 为第*i*次夯击所得单次夯沉量;

$S_i$ 为第*i*次夯击后的累计夯沉量,结果见表2。

点夯和满夯时夯沉率随夯击次数变化的规律见式(2)~(3),夯沉率随夯击次数的变化为幂乘关系。

$$\lambda_{i,1} = 1.322 4i^{-1.610} \quad (2)$$

$$\lambda_{i,2} = 1.240 5i^{-1.777} \quad (3)$$



式中: $\lambda_{i,1}$ 为点夯时第*i*次单次夯沉率;  
 $\lambda_{i,2}$ 为满夯时第*i*次单次夯沉率。

表2 夯沉率计算结果

Table 2 Calculation results of settlement rate %

类型	夯击次数	点夯夯沉量模拟结果/cm	夯沉率/%
点夯	1	26.2	100
	2	22.1	46
	3	20.2	29
	4	18.2	21
	5	9.5	10
	6	8.7	8
	7	4.3	4
	8	4.1	4
满夯	1	20.5	100
	2	14.4	41
	3	13.1	27
	4	6.1	11
	5	3.1	5
	6	3.1	5

由表2可知,第6次点夯时的夯沉率为8%,第7次和第8次的为4%;满夯作业时,第4次夯击时的夯沉率为11%,第5次和第6次的均为5%。这表明点夯时的夯沉率从第7次开始收敛,满夯时的夯沉率从第5次开始收敛,填料已达到加固要求,所以点夯和满夯时夯沉率小于5%时对应的夯击次数为最佳夯击次数,故点夯时夯击次数应该不少于8次,满夯时夯击次数控制在5~6次。

3 强夯现场试验

结合模拟结果,在扩建施工区域内选择场地进行强夯试验。首先,场地进行平整,按照设计要求开挖1 m的杂填土,并挖除局部软土层。再使用测量仪器对夯击点进行放线定位,并用白灰进行点位标注。场地准备完成后,强夯机进场,开始进行强夯作业,如图7所示。点夯与满夯时的夯击能与数

值模拟值相近,分别为3 000、1 000 kN·m。通过检测夯锤顶部的高程,确定每次夯击后的土体夯沉量。

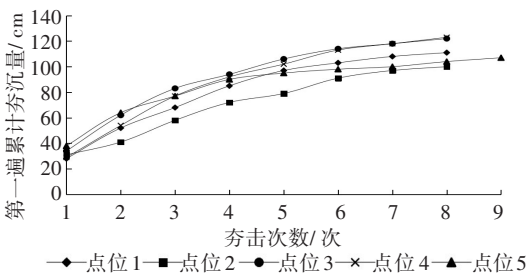


图7 强夯机准备

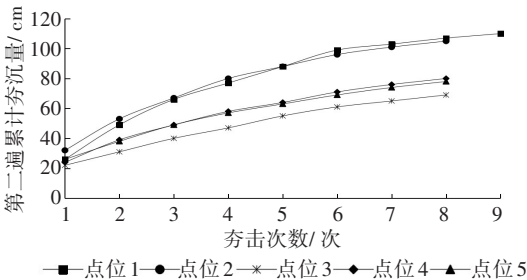
Fig. 7 Preparation of compaction equipment

三次夯击时各点位的累计夯沉曲线,如图8所示。第一遍点夯时,4号点位累计沉降量最大,为123 cm;2号点位累计沉降量最小,为100 cm;第1、3、5号点位累计沉降量分别为111、122、107 cm。第二遍点夯时,1号点位累计沉降量最大,为110 cm;3号点位累计沉降量最小,为69 cm;第2、4、5号点位累计沉降量分别为105、80、78 cm。第三遍点夯时,3号点位累计沉降量最大,为67 cm;4号点位累计沉降量最小,为30 cm;第1、2、5号点位累计沉降量分别为46、41、65 cm。

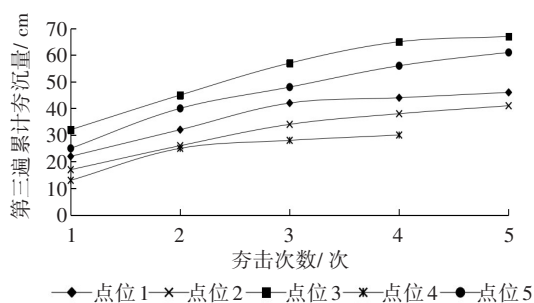
根据第一、第二次的点夯和第三次满夯时的三次高程实际测量结果,绘制所对应的各个点位夯沉率的变化曲线,如图9所示。



(a) 第一遍点夯累计夯沉曲线



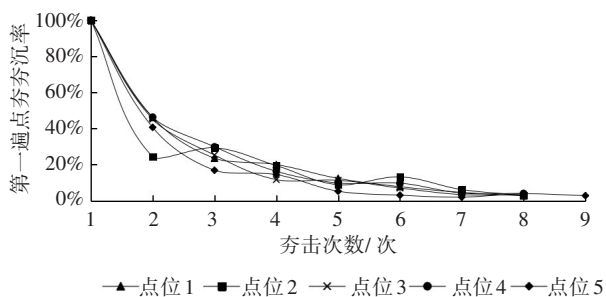
(b) 第二遍点夯累计夯沉曲线



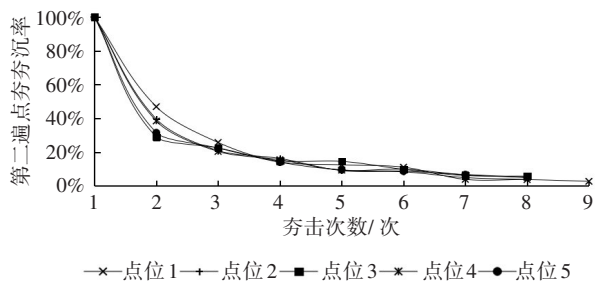
(c) 第三遍满夯累计夯沉曲线

图8 累计夯沉曲线

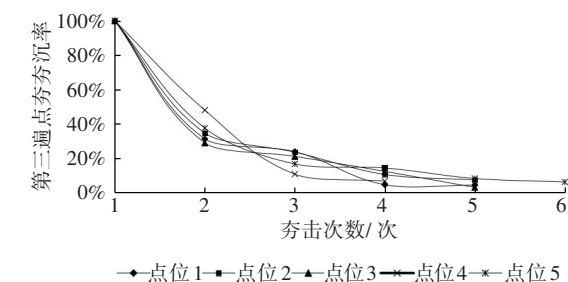
Fig. 8 The curve of accumulated settlement



(a) 第一遍点夯各点位夯沉率



(b) 第二遍点夯各点位夯沉率



(c) 第三遍满夯各点位夯沉率

图9 夯沉率变化曲线

Fig. 9 The variation curve of Settlement rate

第一遍点夯时,点位1~4各夯击8次。各点位最后两击的平均夯沉量分别为4.0、4.5、4.0、5.0 cm。点位5在现场实际夯击了9次,其中,第7次和第8

次的平均夯沉量为3.0 cm,因此,在第8次夯击结束时已达到加固效果。

第二遍点夯时,点位2~5各夯击了8次,各点位最后两击的平均夯沉量分别为4.5、4.0、4.5、4.5 cm;点位1夯击了9次,第7次和第8次的平均夯沉量为4.0 cm,夯点土体在第8次夯击结束时已达到加固效果。

第三遍满夯时,点位1~3夯击了5次,最后两击的平均夯沉量为2.0、3.5、5.0 cm;点位4夯击了4次,最后两击的平均夯沉量为2.5 cm;点位5夯击了6次,最后两击的平均夯沉量为4.5 cm。各点位最后两击的平均夯沉量均达到规范要求。

## 4 讨论

通过分析数值模拟结果与实测结果可知,进行点夯作业时的最佳夯击次数为8次,而为了达到夯实效果,在点夯作业时,各夯击点位夯击次数应控制在8~9次。满夯作业时,各点位夯击次数应控制在5~6次,现场试验结果与数值模拟结果一致。夯前,土体承载力测试值为240 kPa;夯后,槽底土体承载力测试值达到400 kPa,大于夯前的测试结果,土体经评估达到了加固效果,满足设计要求。

对比三次各点位夯沉率的计算值与数值模拟结果,发现部分点位的实际夯值与计算值存在误差。因此,根据试验场地的实测结果,对式(2)~(3)进行修正。结合图10~11,第一遍点夯时,点位5夯击了9次。由第7和第8次的实测数值可知,强夯对土体的加固已达到规范要求,且数值之间相差较小。因此,将该点位第9次夯击时的夯沉率舍去,并取各点位第1~8次夯沉率的平均值为第一遍点夯的代表值。第二遍点夯时,由于点位1共夯击9次,而第7和第8次的数值已达到要求,故与第一遍点夯时的取值方法相同,取各点位前八次夯沉率的平均值为第二遍点夯的代表值。以这两次点夯代表值的平均值对式(2)进行修正。

第三次满夯时,夯点5夯击6次可达到规范要求,夯点4夯击4次可达到要求,这里舍弃夯点5和夯点4的数值,取夯点1至夯点3前5次的夯沉率,并以满夯代表值的平均值对式(3)进行修正。具体取值见表3。

表3 夯沉率取值

Table 3 Values of settlement rate

夯击次数	点夯代表值	满夯代表值
1	100	100
2	39	32
3	24	23
4	16	9
5	10	5
6	9	—
7	5	—
8	4	—

修正后的函数表达式如公式(4)~(5)所示。

$$\lambda'_{i11} = 1.005i^{-1.61} + 0.010 \quad (4)$$

$$\lambda_{i12} = 0.983i^{-1.777} + 0.005 \quad (5)$$

经对比分析,修正后的式(4)~(5)利用夯击次数计算所得的夯沉率与实测值的差值较小。因此,这两种函数表达式可充分反映强夯施工过程中夯沉率随夯击次数的变化规律。同时,根据试验区域填料参照设计要求进行设置,当夯点最后两次的夯沉率小于5%时,即可认为达到了加固效果。

## 5 结论

为了确定某机场三期扩建工程中使用强夯法加固土基所需的夯击次数,并评估加固效果。根据设计要求,使用Midas软件,建立了三维有限元模型,并在选定场地开展了强夯试验,所得结论如下:

1) 数值模拟结果表明,点夯作业时,夯击点位的夯击次数应控制在8~9次;满夯作业时,夯击次数应控制在5~6次。按照此方式进行强夯施工,最后两次夯击产生的平均夯沉值不超过5.0 cm,达到了规范要求。根据制定的现场试验方案,在选定场地开展强夯试验,并利用试验数据对数值模拟结果进行验证,发现实测结果与数值模拟得到的规律一致。

2) 从模拟中得到夯沉量和累计夯沉量,并以此得到点夯和满夯两种夯击方式下夯沉率随夯击次数变化的函数表达式。同时,通过实测数据分别对这两个函数表达式进行了二次修正。经对比分析,发现在强夯施工过程中,修正后的两个函数表达式能充分反映夯沉率的变化规律。

3) 当夯点最后两次夯沉率小于5%时,土体可达到加固效果。

## 参考文献(References):

- [1] 常锦. 山区含砾黏土地基强夯加固试验研究及数值模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.  
CHANG Jin. Experimental study and numerical simulation on the dynamic consolidation of the gravelly clay foundation in mountainous area [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [2] 徐尧, 刘媛, 王延祥, 等. 某机场强夯工程试验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2002, 16(3): 280-282, 288. DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.2002.03.023.  
XU Yao, LIU Yuan, WANG Yanxiang, et al. Dynamic consolidation studied in the experiment of one airfield engineering [J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 2002, 16(3): 280-282, 288. DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.2002.03.023.
- [3] 朱彦鹏, 师占宾, 杨校辉. 强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 120-125. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2018.05.022.  
ZHU Yanpeng, SHI Zhanbin, YANG Xiaohui. Experiment on high-filled foundation treatment of airport in mountainous area with dynamic compaction method [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 120-125. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2018.05.022.
- [4] 王程亮. 山区机场已填筑高填方地基再处理方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
WANG Chengliang. Study on retreatment method for high-fill foundation of airports in mountainous regions [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [5] 罗玮. 强夯作用下填土地基的动力特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
LUO Wei. The research of dynamic characteristics of fill foundation after dynamic compaction [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [6] 张丽娟. 强夯法地基加固数值模拟及工程案例分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
ZHANG Lijuan. Numerical simulation and engineering case analysis of dynamic consolidation method for reinforcing foundations [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

- [7] ABDIZADEH D, PAKBAZ M S, NADI B. Numerical modeling of lateral dynamic compaction on the slope in dry sand[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(2): 398-403. DOI: 10.1007/s12205-020-2344-8.
- [8] JIA M C, YANG Y, LIU B, et al. PFC/FLAC coupled simulation of dynamic compaction in granular soils[J]. Granular Matter, 2018, 20(4): 76. DOI: 10.1007/s10035-018-0841-y.
- [9] JIA M C, YANG Y, LIU B, et al. Densification mechanism of granular soil under dynamic compaction of proceeding impacts[J]. Granular Matter, 2021, 23(3): 72. DOI: 10.1007/s10035-021-01136-z.
- [10] BAKHTIARI M, KAMAL POUR ASL E, AHADIYAN J. Investigation of the effect of Hammer radius parameters and number of impact on soil improvement by dynamic density method in line with the construction of offshore structures[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 18(4): 75-90.
- [11] 白玉婧. 强夯法加固湿陷性黄土地基的应用研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- BAI Yujing. Based on the dynamic consolidation of collapsible loess foundation application [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.
- [12] 张芮瑜. 土工动力接触问题的物质点法研究及碎石料强夯模拟[D]. 北京: 清华大学, 2020. DOI: 10.27266/d.cnki.gqhau.2020.000012.
- ZHANG Ruiyu. Research on the application of material point method in geotechnical dynamic contact problems and the simulation of dynamic compaction of rockfill [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. DOI: 10.27266/d.cnki.gqhau.2020.000012.
- [13] 陈伏彬, 范翔, 张轩浪, 等. 角钢塔典型节点受力性能有限元分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 45-52. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.006.
- CHEN Fubin, FAN Xiang, ZHANG Xuanlang, et al. Mechanical performance of typical joints of angle steel tower based on finite element analysis [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology. (Natural Science), 2022, 19(1): 45-52. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.006.
- [14] 江圣泽, 盛昀, 方学东. 贵州某机场沥青道面反“Z”型隆起成因分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 20-23, 58. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.003..
- JIANG Shengze, SHENG Yun, FANG Xuedong. Aanti-Z type uplift mechanism analysis of asphalt pavement of an airport in Guizhou [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 20-23, 58. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.003.
- [15] 谭德柱, 张留俊, 李炜, 等. 山区高填路堤强夯快速施工效果研究[J]. 路基工程, 2021(3): 115-121. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202009038.
- TAN Dezhu, ZHANG Liujun, LI Wei, et al. Study on the effects of rapid construction of dynamic compaction for high-filled embankment in mountainous areas [J]. Subgrade Engineering, 2021(3): 115-121. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202009038.
- [16] 白建方, 董士欣. 常用岩土本构模型的选择及对场地动力反应分析结果的影响[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(3): 635-645. DOI: 10.11899/zzfy20170319.
- BAI Jianfang, DONG Shixin. Influence of selection of constitutive models of soil on the site dynamic analysis [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(3): 635-645. DOI: 10.11899/zzfy20170319.
- [17] 梁爽. 强夯法处理粗颗粒填土地基的数值分析及应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2013.
- LIANG Shuang. Numerical analysis and application research on dynamic compaction used in coarse-grained and backfilled foundation treatment [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013.
- [18] 王钹承. 高填方路堤强夯法施工数值模拟及力学分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000072.
- WANG Nyucheng. Numerical simulation and mechanical analysis of high filling embankment construction method [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000072.
- [19] 李希, 张勋, 马新岩, 等. 土石混合填料强夯过程三维离散元模拟[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 88-92, 108. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20190002.
- LI Xi, ZHANG Xun, MA Xinyan, et al. Three-dimensional simulation of dynamic compaction for earth-rock fill by discrete element method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 88-92, 108. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20190002.

(责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:杜明瑞)