

吕文龙, 沈仁良, 王凯. 孔内深层强夯法施工参数对珠江三角洲地区地基处理效果影响的试验研究[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 125-131. [LYU Wenlong, SHEN Renliang, WANG Kai. Experimental Study on the Influence of Construction Parameters of Down-hole Dynamic Compaction on the Foundation Treatment Effect in the Pearl River Delta Region [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 125-131]

# 孔内深层强夯法施工参数对珠江三角洲地区地基处理效果影响的试验研究

吕文龙, 沈仁良, 王 凯

(广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510000)

**摘要:** 为了解珠江三角洲地区孔内深层强夯施工参数对地基处理效果的影响, 结合现场试验, 通过改变地基处理时孔内深层强夯的夯击次数、夯击能和持力层情况, 研究了不同施工参数的影响情况, 结果表明: 适当增加夯击次数, 能有效提高孔内深层强夯对地基的处理效果, 在 300 kPa 试验荷载下, 夯击次数为 5 次的测点沉降量比夯击次数为 4 次的减小了 31.5%, 夯击次数为 6 次的测点沉降量比夯击次数为 4 次的减小了 55.2%; 当夯击能超过一定数值后, 工后沉降量不一定显著减小, 在 300 kPa 试验荷载下, 夯击能为 1000 kN·m 的测点沉降量比夯击能为 800 kN·m 的增大了 55.7%; 孔内深层强夯桩体的持力层力学性质越好, 工后沉降量越小, 在 300 kPa 试验荷载下, 持力层为全风化花岗岩的测点沉降量比持力层为淤泥层的减小 55%。

**关键词:** 孔内深层强夯法; 地基处理; 平板载荷试验; 试验研究

中图分类号: TU751+4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0125-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.14

## Experimental Study on the Influence of Construction Parameters of Down-hole Dynamic Compaction on the Foundation Treatment Effect in the Pearl River Delta Region

LYU Wenlong, SHEN Renliang, WANG Kai

(Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In order to understand the influence of construction parameters of down-hole dynamic compaction on the foundation treatment effect in the Pearl River Delta region, combined with field tests, this paper studies the influence of different construction parameters by changing the tamping times, tamping energy and bearing stratum of down-hole dynamic compaction during foundation treatment. The results show that appropriately increasing tampering times can effectively improve the treatment effect of the down-hole dynamic compaction on foundation.

收稿日期: 2022-10-15

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目(2017-k10-006)

作者简介: 吕文龙(1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础方面的研究。

E-mail: midworm@163.com

Under the test load of 300 kPa, the settlement of the measuring point with 5 times of tamping is 31.5 % lower than that with 4 times of tamping, and the settlement of the measuring point with 6 times of tamping is 55.2 % lower than that with 4 times of tamping. Not the greater the tamping energy is, the better the settlement is. When the tamping energy exceeds a certain value, the post-construction settlement does not necessarily decrease significantly. Under the test load of 300 kPa, the settlement of the measuring point with the tamping energy of 1000 kN · m is 55.7 % higher than that with the tamping energy of 800 kN · m. The better the mechanical properties of the bearing stratum of the deep dynamic compaction pile in the hole, the smaller the post-construction settlement. Under the test load of 300 kPa, the settlement of the measuring point of the fully weathered granite is 55 % lower than that of the silt layer.

**Keywords:** Down-hole dynamic compaction method; Foundation treatment; Plate loading test; Experimental study

0 引言

孔内深层强夯法，是传统强夯法的创新发展，该方法先成孔后，然后在孔内填料，用重锤在孔内进行夯击，使填料向孔周侧挤压以达到加固地基的目的<sup>[1-4]</sup>。以往文献对孔内深层强夯法做了大量的应用及研究，主要手段有数值模拟和工程试验等。陈方明<sup>[5]</sup>等结合某大厚度自重湿陷性黄土地区地基处理实例，进行了垫层法、强夯法、预浸水法和挤密法等多种地基处理方案的比较，详细地阐述了孔内深层强夯法的作用机理、设计方法、施工工艺及其在大厚度自重湿陷性黄土场地中的应用；李清火<sup>[6]</sup>等结合某综合住院楼工程，对孔内深层强夯法的技术特点、设计方案、施工工艺及质量检测等进行了重点论述，同时该方法在湿陷性黄土地区取得良好的处理效果；孙青娟<sup>[7]</sup>等基于圆孔扩张理论细致地分析了孔内深层强夯法侧向挤密效应，对侧向影响范围和扩孔半径进行了理论推导，并结合工程实例，利用大型有限元软件 ANSYS 对孔内深层强夯法形成的渣土桩复合地基进行了数值模拟分析，得到了其复合地基承载特性、渣土单桩承载特性、

桩侧阻力分布规律和桩间土承载特性。

孔内深层强夯的对地基的加固机理为：通过在地基中预先成孔内自下而上边填料边强夯，形成高承载力的密实桩体和强力挤密的桩间土<sup>[1-4]</sup>。孔内深层强夯施工对侧摩阻力和端阻力的提高影响因素较多，如施工工艺、填料、地质情况，夯击能量等<sup>[1-4]</sup>，但孔内深层强夯法施工参数对珠江三角洲地区地基处理效果影响目前未见研究，本文挑选夯击次数、夯击能及桩体持力层 3 种影响因素，结合现场试验，通过改变地基处理时孔内深层强夯的夯击次数、夯击能和持力层情况，初步研究其对地基处理效果的影响。

1 试验场地概况

试验所处场区位于肇庆市某产业园，属北江冲积平原，地势低平，水网、水塘密布。场地自上而下分别为人工填土层( $Q_4^{ml}$ )、冲积层( $Q_4^{al}$ )、残积层( $Q_e^1$ )及石炭系下统测水组( $C_1dc$ )石灰岩、燕山期花岗岩( $\gamma_5^{2(3)}$ )。各测区地质情况如表 1~3 所示，其对应钻孔柱状图见图 1~3。

表 1 测区 1 地质情况  
Table 1 Geological conditions of survey area 1

土/岩性	层厚/m	孔隙比	含水率/(%)	状态
素填土( $Q_4^{ml}$ )	0.8	1.16	41.04	松散-稍压实
砂质粘性土( $Q_e^1$ )	4.5	0.88	34.61	硬塑
全风化花岗岩 $\gamma_5^{2(3)}$	14.3	0.79	25.35	原岩结构基本被破坏

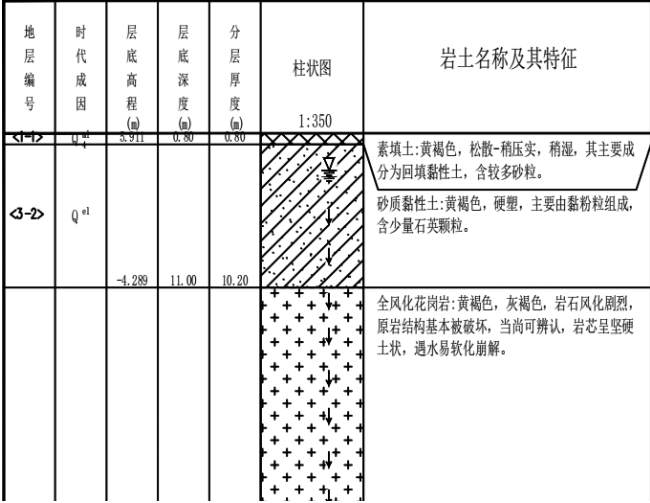


图1 测区1钻孔柱状图

Fig.1 Borehole histogram of survey area 1

表2 测区2地质情况

Table 2 Geological conditions of survey area 2

土/岩性	层厚/m	孔隙比	含水率/(%)	状态
素填土(Q <sub>4</sub> <sup>ml</sup> )	5.0	1.16	41.04	松散-稍压实
淤泥(Q <sub>4</sub> <sup>al</sup> )	5.6	2.42	91.91	饱和-软塑
粉质黏土(Q <sub>4</sub> <sup>al</sup> )	7.0	0.88	30.75	可塑

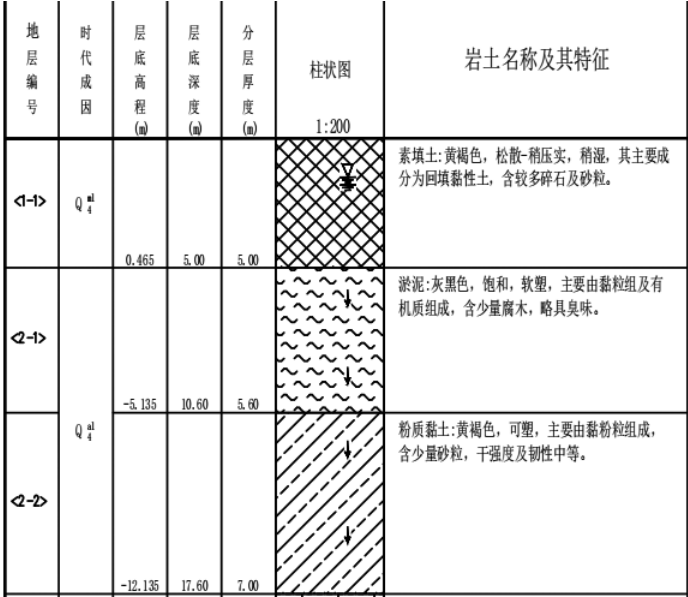


图2 测区2钻孔柱状图

Fig.2 Borehole histogram of survey area 2

表3 测区3地质情况

Table 3 Geological conditions of survey area 3

土/岩性	层厚/m	孔隙比	含水率/(%)	状态
素填土(Q <sub>4</sub> <sup>ml</sup> )	4.5	1.16	41.04	松散-稍压实
淤泥(Q <sub>4</sub> <sup>al</sup> )	6.5	2.42	91.91	饱和-软塑
粉质黏土(Q <sub>4</sub> <sup>al</sup> )	13	0.88	30.75	可塑

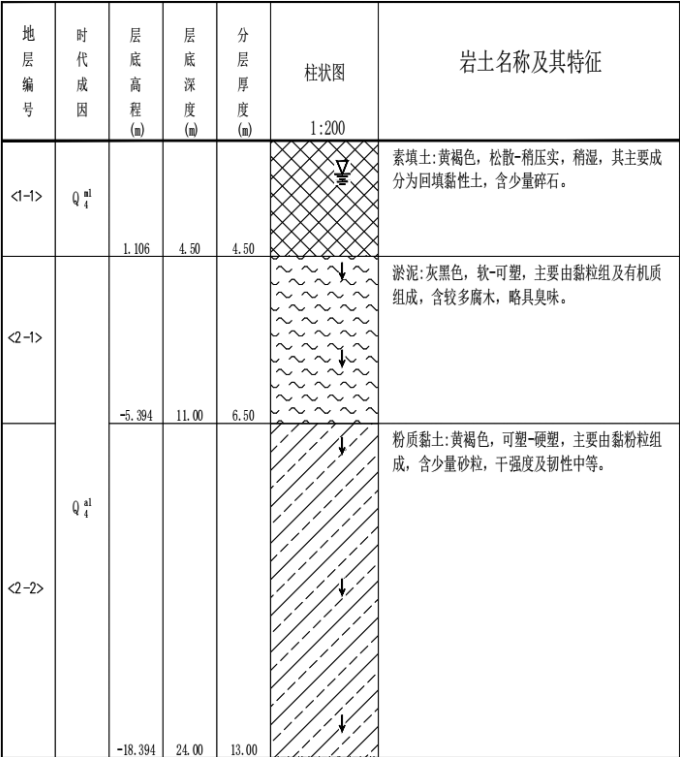


图3 测区3钻孔柱状图

Fig.3 Borehole histogram of survey area 3

试验场区内孔内深层强夯桩采用矩形布置,桩距3米,桩成孔直径1.2 m,夯后桩径2.0 m,成孔深度8 m,采用旋挖机成孔。桩体材料为5:5渣土(碎砖瓦等硬骨料占50%,土占50%),其颗粒不大于250 mm,填料分层夯实。试验采用重型触探进行桩身质量检测,复合地基承载力采用平板载荷试验测试。

2 试验方案

为了分析不同参数对地基处理效果的影响,试验采用控制变量法,在改变夯击次数、夯击能或持力层情况时,严格控制其余施工参数,以免造成试

验误差。各试验测区严格按照规范《孔内深层强夯法技术规程》<sup>[4]</sup>要求进行施工。

在测区1内进行不同夯击次数和夯击能试验,试验选用锤重为10T,试验测点共有5个,为保证同一参数控制的测点地质条件没有太大差异,各测点距离相互较近,测点1-a~1-c比较相同夯击能下改变夯击次数对基础处理效果的影响,测点1-a、1-d比较相同夯击次数下改变夯击能对基础处理效果的影响,夯击能通过锤高控制,在测区2内设测点2-a,控制与测点1-a相同的夯击次数和夯击能,比较不同持力层对地基处理效果的影响,在测区3内进行重型动力触探试验,以检验桩身质量。具体施工参数控制见表4。

表4 各测点施工参数表

Table 4 Construction parameters of each measuring point

测点	锤重	夯击次数	锤高	测区
1-a	10T	4次	8 m	测区 1
1-b		5次		
1-c		6次		
1-d		4次		
2-a		4次	8 m	测区 2
3-a ~ 3-l		重型动力触探试验		测区 3

为推定强夯置换桩体的密实度情况,在测区3内挑选12根桩进行了重型动力触探试验,试验按照《建筑地基基础检测规范》<sup>[8]</sup>进行,并根据该规范对桩体密实度进行判定,判定标准见表5所示。

地基处理后地基承载力提高效果根据平板载荷试验结果分析,平板载荷试验按照《建筑地基基础检测规范》<sup>[8]</sup>进行。本次平板载荷试验采用压重平台反力装置,在试验开始前将不小于1.2倍最大试验荷载的堆载量一次性加上平台,试验时用油压千斤顶分级加载,压板面积为9 m<sup>2</sup>(3 m×3 m),并选取300 kPa荷载下的沉降量进行比较,以确定地基处理的效果。

3 试验结果及分析

3.1 不同夯击次数对地基处理效果的影响

测点1-a、1-b、1-c的试验数据如表6所示,试验荷载-沉降曲线见图4。在相同地质条件下,

当夯击能均为800 kN·m时,夯击次数为4次、5次和6次的测点在平板载荷试验为300 kPa下所得沉降量分别为52.29 mm、35.84 mm和23.40 mm。可以看出,当夯击次数为5次的测点沉降量比夯击次数为4次的减小31.5%,当夯击次数为6次的沉降量比夯击次数为4次的减小55.2%。由此可知,适当增加夯击次数能有效提高地基处理效果,但随着夯击次数的增加,其提高效果逐渐减弱。

3.2 不同夯击能对地基处理效果的影响

测点1-a、1-d试验数据如表7所示,试验荷载-沉降曲线见图5,在相同地质条件下,当夯击次数均为4次时,锤高为8 m(夯击能为800 kN·m)的测点和10 m(夯击能为1000 kN·m)的测点在平板载荷试验为300 kPa下所得沉降量分别为52.29 mm和93.32 mm,后者的沉降量比前者增大55.7%。由此可知,夯击能并不是越大越好,当夯击能超过一定数值后,工后沉降量不一定显著减小,应根据工程地质条件选用适当的夯击能。

表5 碎石桩密实度按N63.5分类表  
Table 5 Lithotripsy pile density classified according to N63.5

N63.5	小于4	4~5	5~7	大于7
密实度	松散	稍密	中密	密实

表6 不同夯击次数与其在300 kPa试验荷载下的沉降量  
Table 6 Different tamping times and their settlement under test load of 300 kPa

测点	夯击次数	沉降量/mm
1-a	4	52.29
1-b	5	35.84
1-c	6	23.40

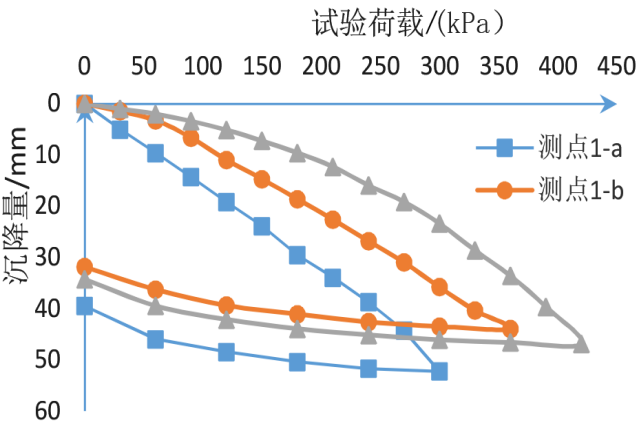


图4 测点1-a、1-b、1-c荷载-沉降曲线  
Fig. 4 Load-settlement curves of measuring points 1-a, 1-b, 1-c

表 7 不同夯击能与其在 300 kPa 试验荷载下的沉降量  
Table 7 Different tamping energy and their settlement under test load of 300 kPa

测点	夯击能/(kN.m)	沉降量/mm
1-a	800	52.29
1-d	1000	93.32

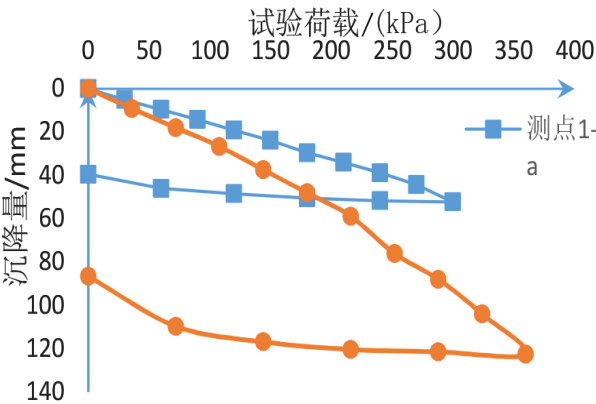


图 5 测点 1-a, 1-d 荷载-沉降曲线  
Fig.5 Load-settlement curve of measuring points 1-a, 1-d

3.3 不同持力层对地基处理效果的影响

根据钻孔柱状图及相关施工设计资料，测点 1-a、2-a 持力层分别为全风化花岗岩( $\gamma_5^{2(3)}$ )和淤泥( $Q_4^{al}$ )，试验数据如表 8 所示，试验荷载-沉降曲线见图 6，当夯击次数均为 4 次，锤高为 8 m (夯击

能为 800 kN · m)时，持力层为全风化花岗岩( $\gamma_5^{2(3)}$ )和淤泥( $Q_4^{al}$ )在平板载荷试验为 300kPa 下所得沉降量分别为 52.29 mm 和 81.39 mm，后者比前者增大 55%。由此可见，孔内深层强夯桩体持力层力学性质越好，工后沉降量越小。

表 8 不同持力层与其在 300 kPa 试验荷载下的沉降量  
Table 8 Different bearing layers and their settlement under test load of 300 kPa

测点	持力层	沉降量/mm
1-a	全风化花岗岩( $\gamma_5^{2(3)}$ )	52.29
2-a	淤泥( $Q_4^{al}$ )	81.39

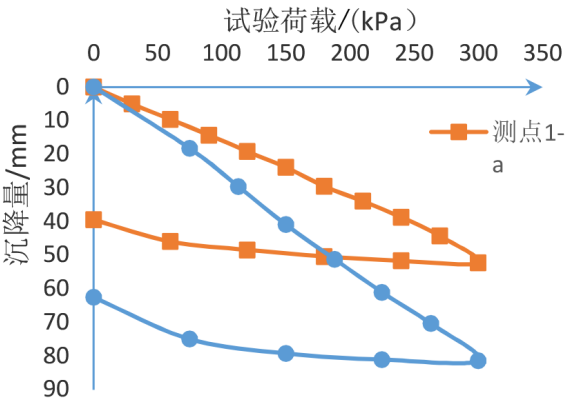


图 6 测点 1-a, 2-a 荷载-沉降曲线  
Fig.6 Load-settlement curve of measuring points 1-a, 2-a

3.4 重型动力触探试验结果

本次试验共完成 12 个孔内深层强夯桩体的重

型动力触探原位试验，其结果见表 9 所示。12 个检测的孔内深层强夯桩体情况均为密实，桩身质量满足设计要求。

表 9 强夯置换桩重型动力触探检测结果  
Table 9 Heavy dynamic penetration test results of dynamic compaction replacement pile

检测孔	N <sub>63.5</sub> 平均值	桩体密实度情况
3-a	20.9	密实
3-b	23.9	密实
3-c	22.4	密实
3-d	22.5	密实
3-e	24.0	密实
3-f	23.3	密实
3-g	22.3	密实
3-h	22.6	密实
3-i	24.9	密实
3-j	23.7	密实
3-k	22.0	密实
3-l	22.9	密实

4 结论

根据试验结果及分析，对珠江三角洲地区采用孔内深层强夯法处理的地基，可得出以下初步结论：

- (1)适当增加夯击次数，能有效提高孔内深层强夯法对地基的处理效果，在 300 kPa 试验荷载下，夯击次数为 5 次的测点沉降量比夯击次数为 4 次的减小 31.5%，夯击次数为 6 次的测点沉降量比夯击次数为 4 次的减小 55.2%。
- (2)当夯击能超过一定数值后，工后沉降量不一定显著减小，在 300 kPa 试验荷载下，夯击能为 1000 kN·m 的测点沉降量比夯击能为 800 kN·m 的增大 55.7%。
- (3)孔内深层强夯桩体的持力层力学性质越好，工后沉降量越小，在 300 kPa 试验荷载下，持力层为全风化花岗岩的测点沉降量比持力层为淤泥层的减小 55%。

参考文献

[1] 顾欣,邹立华,马文祥. 孔内深层强夯(孔内深层强夯法) 振动试验研究[J]. 兰州铁道学院学报,2000,19(1):17 - 20.

[2] 司炳文,唐业清. 孔内深层强夯技术的机理与工程实践 [J]. 施工技术,1999,28(5):48 - 49.

[3] 徐至均. 强夯技术的新发展—孔内深层强夯[J]. 石油工程建设,1999 (5):7 - 10.

[4] 北京交通大学. 孔内深层强夯法技术规程:CECS197-2006 [S]. 北京:中国计划出版社,2006.

[5] 陈方明,关立军,刘晓华. 大厚度自重湿陷性黄土场地孔内深层强夯法的应用月开究[J]. 兰州铁道学院学报, 2007,23(5):49 - 52.

[6] 李清火,张浩杰. 孔内深层强夯法在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 建筑科学,2011,27(1):103 - 105.

[7] 孙青娟. 孔内深层强夯法及其多桩型复合地基的加固机理及应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.

[8] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础检测规程:DBJ/T 15-60-2019[S]. 广州:广东省建筑科学研究院,2019.