

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.04.008

【工程应用】

# 强夯法处理吹填海砂地基现场试验研究

吴民晖<sup>1,2</sup>, 刘海旺<sup>3</sup>

(1. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100011; 2. 机场工程安全与长期性能交通运输行业野外科学观测研究基地, 北京 100011; 3. 福建兆翔机场建设有限公司, 福建 厦门 361000)

**摘要:** 近些年随着我国国民经济的发展, 东部沿海地区可利用的土地资源越来越少。吹填海砂造陆已经成为沿海工程建设的重要组成部分。填海造陆工程一般具有面积大、软弱土层深厚和填筑材料多样等特点, 地基处理难度大。为了研究强夯在吹填海砂地基的加固效果, 在某吹填海砂场地开展 2 000、3 000 和 4 000 kN·m 能级强夯加固试验。试验分别采用标准贯入试验、重型动力触探试验、波速试验和平板载荷试验进行现场检测。检测数据对比分析发现: 强夯处理后标准贯入试验击数、重型动力触探击数和波速均明显提高, 有效加固深度明显超过经验值; 通过平板载荷试验  $p-s$  曲线, 得到夯后砂土地基承载力特征值大于 150 kPa, 结果表明强夯法处理吹填海砂地基能有效提高其强度, 证明了强夯法在吹填海砂地基的适用性。

**关键词:** 吹填海砂; 强夯处理; 标准贯入试验; 重型动力触探; 波速; 载荷试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0322-07

## Field test on the treatment of hydraulic reclamation sand foundation by dynamic compaction

WU Min-Hui<sup>1,2</sup>, LIU Hai-wang<sup>3</sup>

(1. China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. Observation and Research Base of Transport Industry of Airport Engineering Safety and Long-term Performance, Beijing 100011, China;

3. Fujian Zhaoxiang Airport Construction Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China)

**Abstract:** In recent years, with the development of national economy of China, there are less land available in east coastal areas. Reclamation with sea sand has become an important part of coastal engineering construction. Land reclamation from the sea generally has the characteristics of large area, deep soft soil layer and various filling materials, and the foundation treatment is difficult. In order to study the reinforcement effect of dynamic compaction on hydraulic reclamation sea sand foundation, 2 000, 3 000 and 4 000 kN·m dynamic compaction reinforcement tests were carried out in a hydraulic reclamation sea sand site. Standard penetration tests, heavy dynamic penetration tests, wave velocity tests and plate load tests were used for site inspection. By comparing and analyzing the test datas found that the blow count of standard penetration test, blow count of heavy dynamic penetration test and wave velocity are significantly improved after dynamic compaction, and the effective reinforcement depth is significantly higher than the empirical value. Through the  $p-s$  curves of plate load test, the characteristic value of bearing capacity of compacted sand foundation is above 150 kPa. The results show that the strength of hydraulic reclamation sea sand foundation treated by dynamic compaction method can be effectively improved and proves the applicability of dynamic compaction method in hydraulic reclamation sea sand foundation.

**Key words:** sea sand; dynamic compaction treatment; standard penetration test; heavy dynamic penetration test; wave velocity test; load test

## 0 引言

强夯法是20世纪60年代末由法国Menard技术

公司首先创造的, 我国于1978年9月引进这项技术后, 很快推广到全国很多地方, 并且都取得了良好的技术经济效果<sup>[1-2]</sup>。经过几十年的发展, 国内的专

收稿日期: 2022-03-10

作者简介: 吴民晖 (1988—), 男, 硕士, 主要从事机场工程地基处理、高填方工程沉降分析及综合交通安全评估等方面的研究。E-mail: wuminhui2008@126.com。

家学者开展研究,取得了大量的研究成果。例如水伟厚<sup>[3]</sup>在通过高能级强夯试验和阅读大量文献的基础上,总结了强夯有效加固深度经验公式(即“梅纳公式”)  $D=\alpha\sqrt{WH}$ 中的修正系数 $\alpha$ 的取值情况,见表1所示。

孙田磊等<sup>[4]</sup>对某10 000 kN·m的高能级强夯试验区进行试验,通过对深层土体水平位移监测后发现,强夯施工完成后的土体,其最大水平位移出现在地表处,地下却没有明显变化。宋朝阳等<sup>[5]</sup>运用高密度电阻率法以及运用数值模拟和预埋土压力盒的方法研究回填地基后发现,可以利用夯实后地基电阻率的变化来判断地基的夯实效果,并计算出有效加固深度。张兴元等<sup>[6]</sup>自行设计了室内模拟试验装置,对低能级到高能级的不同强夯试验组进行了室内试验。实验结果表明,低能级强夯和高能级强夯试验之间存在着动应力衰减速度的差别,并且

这个衰减速度还跟击数相关。安春秀等<sup>[7]</sup>在某碎石土回填强夯工程项目中,利用瑞雷波试验(RWT)、动力触探试验(DPT)和静力载荷试验(PLT),把瑞利波试验和动力触探试验的试验结果用来验证静力载荷试验的试验结果。韩云山等<sup>[8]</sup>针对黄土地基开展了强夯模型试验,提出利用夯沉比判定夯击效能和最佳夯击次数。贾敏才等<sup>[9]</sup>开展了强夯模型试验,研究了强夯加固砂性土机制。

大量研究表明强夯法在我国取得大量成果并广泛应用<sup>[10-12]</sup>。但受强夯处理土体类型、地下水位等因素影响,强夯工程理论研究仍落后于实践,目前强夯法尚未形成十分完善的理论体系,对强夯加固机理尚不清晰,强夯法应用于吹填海砂地基的情况较为少见。因此本文基于吹填海砂地基开展不同能级的强夯试验,并通过多种检测手段验证其处理效果。

表1 有效加固深度经验公式修正系数 $\alpha$ 的取值

Table 1 Correction coefficient  $\alpha$  in empirical formula of effective reinforcement depth

编号	研究者	系数 $\alpha$ 值	编号	研究者	系数 $\alpha$ 值
1	LENOARD G A	$\alpha=0.50$	6	王成华	$\alpha=0.40\sim 0.95$
2	LUKAS R G	$\alpha=0.65\sim 0.80$	7	嵇转平	$\alpha=0.29\sim 0.32$
3	MAYNE P W	$\alpha=0.30\sim 1.00$	8	吴达人	$\alpha=0.50\sim 0.60$
4	GAMBIN M P	$\alpha=0.50\sim 1.00$	9	刘惠珊	$\alpha=0.52$
		$\alpha=0.60\sim 0.80$	10	ROLLINS & KIRN	$\alpha=0.40$
5	范维垣	$\alpha=0.45\sim 0.60$	11	WILLIAM F V	$\alpha=0.35\sim 0.65$
		$\alpha=0.35\sim 0.50$	12	苏冰	$\alpha=0.50\sim 0.51$

## 1 工程概况

吹填海砂地基强夯试验区位于东南沿海某陆域形成吹填场地,场地毗邻东海,抗震设防烈度为7度,

场地基本地震动加速度反应谱特征周期值 $T_g$ 为0.45 s,基本地震动峰值加速度值为0.15 g,所属设计地震分组为第三组。吹填海砂层厚度11~12 m,根据吹填砂源地调查研究报告,其主要物理力学性质如表2所示。

表2 海砂物理力学性质汇总表

Table 2 Physical and mechanical properties of sea sand

土体 编号	深度/m	颗粒分析组成/%					自然坡脚		工程 分类
		>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	0.075~0.25 mm	<0.075 mm	水上	水下	
土样1	1.65	6.5	46.3	35.5	3.9	7.8	35.6	26.5	粗砂
土样2	3.65	7.2	52.5	32.2	4.1	4.0	35.5	25.8	粗砂
土样3	5.65	5.8	51.2	31.8	8.2	3.0	35.2	26.2	粗砂
土样4	7.65	4.1	48.8	37.1	5.5	4.5	36.0	26.8	粗砂
土样5	9.65	5.3	46.3	35.2	6.9	6.3	35.8	27.0	粗砂
土样6	10.65	7.1	49.5	30.8	7.2	5.4	35.5	26.4	粗砂
土样7	11.25	12.5	22.0	35.5	12.7	17.3	36.4	27.5	中砂

## 2 强夯试验方案

强夯试验根据能级不同,共分为3个试验区(分别为2 000 kN·m、3 000 kN·m和4 000 kN·m),每个试验区面积均为2 000 m<sup>2</sup>。强夯设计参数见表3,试验示意图见图1~2。

强夯收敛采用双标准控制:单点击数和最后两击夯沉量均不小于设计要求。具体要求为单点击数≥8击要求,最后两击平均夯沉量≤50 mm。

表3 强夯设计参数

Table 3 Design parameters of dynamic compaction

强夯能级/(kN·m)	夯点布置间距/m	遍数	夯击数
2 000	4×4	2	8~12
3 000	4.5×4.5	2	8~12
4 000	4.5×4.5	2	8~12

注:其中强夯夯锤质量为20 t,夯锤直径为2.5 m。

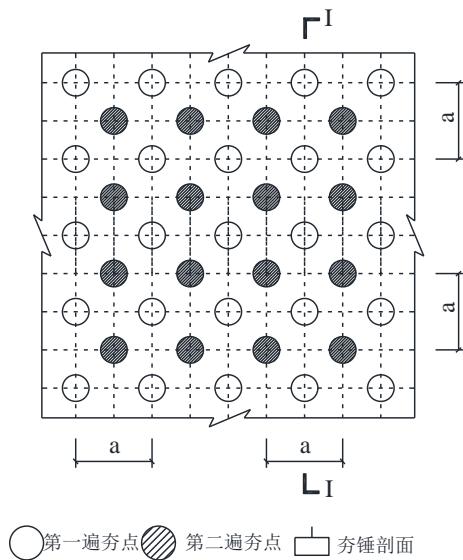


图1 强夯夯点平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic compaction points

(注:a为夯点布置间距;I为截面。)

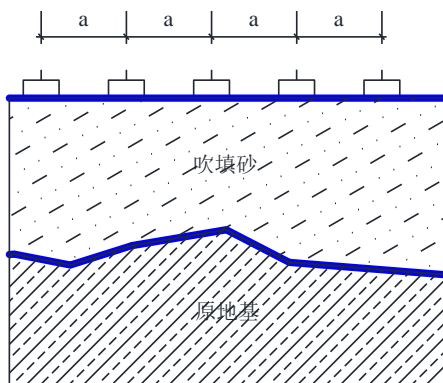


图2 强夯试验 I-I 剖面示意图

Fig. 2 I-I section of dynamic compaction

为便于对比不同能级强夯处理效果及影响深度,在不同试验区强夯处理前后全深度进行标准贯入试验、重型动力触探试验和波速测试点检测。强夯处理后,在吹填海砂地基顶面进行载荷试验。

## 3 强夯加固效果

吹填海砂地基采用强夯能级为2 000、3 000和4 000 kN·m进行处理,点夯两遍、夯后推平,满夯(能级为1 000 kN·m)补强一遍。现就检测和测量所取得成果叙述如下。

### 3.1 强夯夯沉量

强夯施工过程中分别进行了原地面高程、第一遍点夯后高程、第二遍点夯后高程和满夯补强后高程测量。不同强夯能级处理后平均夯沉量如表4所示。

表4 平均沉降量汇总表

Table 4 Summary of average settlement

夯击能/ (kN·m)	平均夯沉量/mm			合计
	第一遍点夯	第二遍点夯	满夯补强	
2 000	271.93	125.47	92.33	489.73
3 000	308.60	95.13	88.40	492.13
4 000	324.53	86.33	84.80	495.66

表4中夯沉量结果表明:2 000 kN·m能级强夯后,平均沉降量为489.73 mm;3 000 kN·m能级强夯后,平均沉降量为492.13 mm;4 000 kN·m能级强夯后,平均沉降量为495.66 mm。说明强夯能级2 000~4 000 kN·m时,吹填海砂地基均发生了明显的沉降,但是不同强夯能级处理沉降量差异较小。

### 3.2 标准贯入试验结果

不同强夯能级处理前后标贯试验曲线(统计值)对比如图3~5所示。

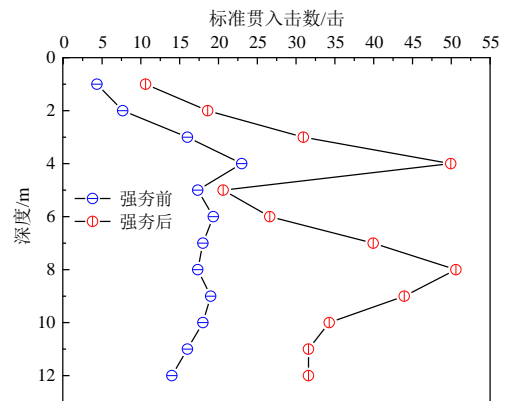


图3 2 000 kN·m 强夯处理前后标贯曲线

Fig. 3 Standard penetration curves before and after dynamic compaction (2 000 kN·m)

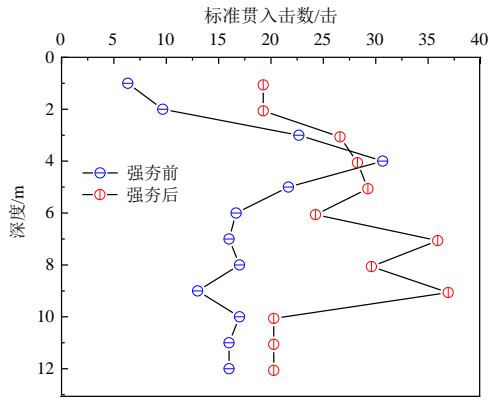


图4 3 000 kN·m 强夯处理前后标贯曲线

Fig. 4 Standard penetration curves before and after dynamic compaction (3 000 kN·m)

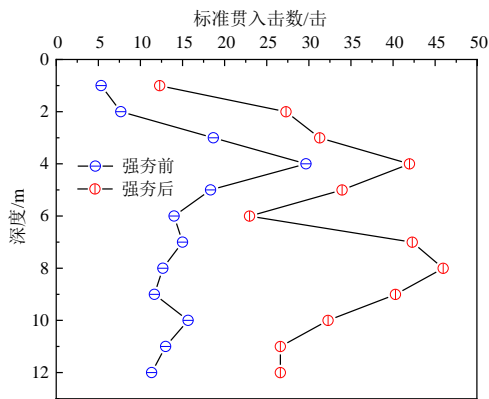


图5 4 000 kN·m 强夯处理前后标贯曲线

Fig. 5 Standard penetration curves before and after dynamic compaction (4 000 kN·m)

图3~5中标贯试验结果表明：当强夯能级为 2 000 kN·m时，强夯前原地地基全深度标贯击数当量值为15.83击，强夯后吹填海砂全深度标贯击数当达到32.5击，相对于处理前增长105%；当强夯能级为 3 000 kN·m时，强夯前原地地基全深度标贯击数当量值为16.8击，强夯后吹填海砂全深度标贯击数当达到25.9击，相对于处理前增长53%；当强夯能级为 4 000 kN·m时，强夯前原地地基全深度标贯击数当量值为14.2击，强夯后吹填海砂全深度标贯击数当达到32.03击，相对于处理前增长122%。说明强夯能级2 000~4 000 kN·m时，强夯能有效提高吹填海砂地基密实度且强夯能级越大时效果越好。

### 3.3 重型动力触探结果

不同强夯能级处理前后重型动力触探检测曲线（统计值）对比如图6~8所示。

图6~8中重探试验结果表明：受重型动力触探检测手段限制，强夯处理后无法开展吹填海砂地基全深度检测，强夯能级为 2 000~4 000 kN·m 时，检测深度分别为 5.8 m、3.4 m 和 8.3 m。当强夯能

级为 2 000 kN·m 时，强夯前原地地基全深度重探击数当量值为 5.8 击，强夯后 5.8 m 深度范围重探击数当量值为 16.6 击，相对于处理前增长 186%；当强夯能级为 3 000 kN·m 时，强夯前原地地基全深度重探

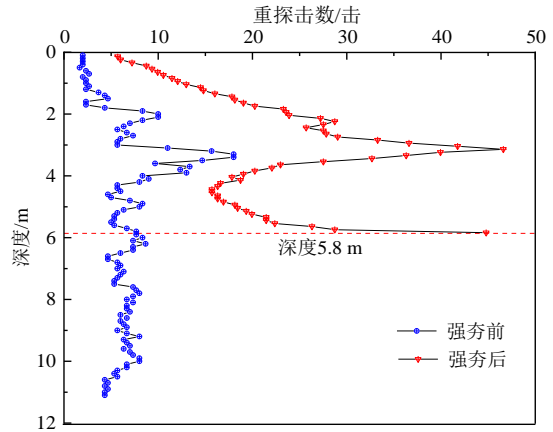


图6 2 000 kN·m 强夯处理前后重探试验曲线

Fig. 6 Heavy dynamic penetration curves before and after dynamic compaction (2 000 kN·m)

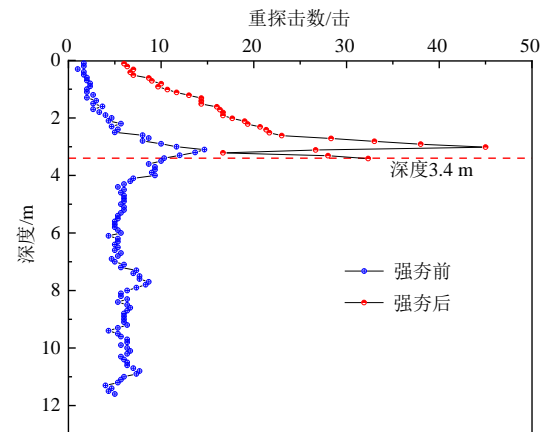


图7 3 000 kN·m 强夯处理前后重探试验曲线

Fig. 7 Heavy dynamic penetration curves before and after dynamic compaction (3 000 kN·m)

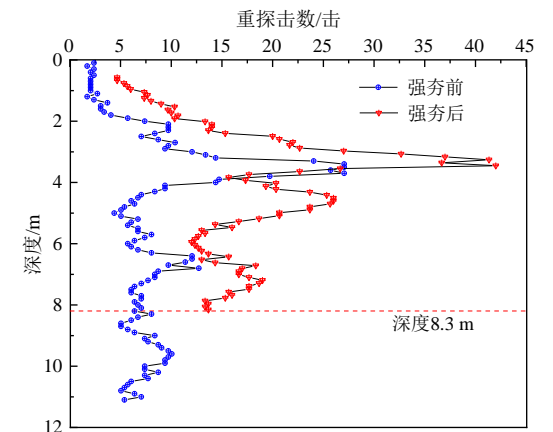


图8 4 000 kN·m 强夯处理前后重探试验曲线

Fig. 8 Heavy dynamic penetration curves before and after dynamic compaction (4 000 kN·m)

击数当量值为 7.91 击, 强夯后 3.4 m 深度范围重探击数当量值为 17.3 击, 相对于处理前增长 117%; 当强夯能级为 4 000 kN·m 时, 强夯前原地基全深度重探击数当量值为 6.49 击, 强夯后 8.3 m 深度范围重探击数当量值为 18.75 击, 相对于处理前增长 189%, 说明强夯能有效提高吹填海砂地基密实度。

### 3.4 波速结果

强夯处理前后波速值对比如表5所示。

表 5 吹填地基强夯处理前后波速值对比表

Fig. 5 Comparison of wave velocity before and after dynamic compaction of hydraulic filling foundation

能级/(kN·m)	波速/(m/s)		增幅/%
	处理前	处理后	
2 000	194	246	27
3 000	190	242	27
4 000	209	244	17

表5中波速测试结果表明: 吹填海砂原地基波速为190~209 m/s, 平均值为198 m/s。2 000 kN·m 能级强夯后, 吹填海砂地基波速平均值为246 m/s, 相对于处理前增长27%; 3 000 kN·m 能级强夯后, 吹填海砂地基波速平均值为242 m/s, 相对于处理前增长27%; 4 000 kN·m 能级强夯后, 吹填海砂地基波速平均值为244 m/s, 相对于处理前增长17%。说明强夯能有效提高吹填海砂地基密实度, 且强夯能级2 000~4 000 kN·m 时, 不同能级对吹填海砂地基影响较小。

### 3.5 平板载荷试验结果

不同强夯能级处理后载荷试验  $p$ - $s$  曲线如图9~11所示。

图9~11中载荷试验结果表明: 强夯能级2 000~4 000 kN·m 时, 在最大荷载(315 kPa)作用下,  $p$ - $s$  曲线呈现相似的变化规律, 即  $p$ - $s$  曲线平缓无

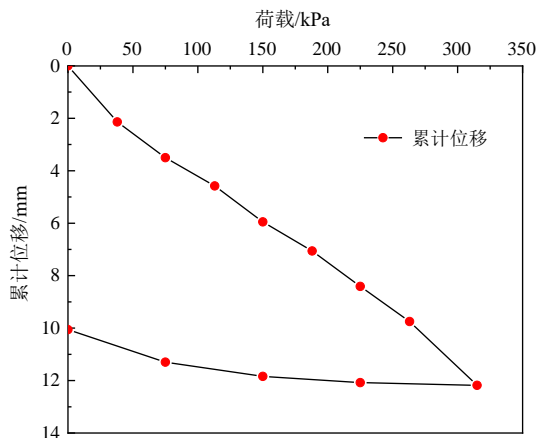


图 9 2 000 kN·m 强夯处理后载荷试验曲线

Fig. 9  $p$ - $s$  curve after dynamic compaction (2 000 kN·m)

明显陡降段,  $s$ - $\lg t$  曲线呈平行规则排列。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011), 参加统计的试验点结果, 当满足其极差不超过平均值的 30% 时, 取其平均值为该地层的地基承载力特征值, 因此各试验点地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 150$  kPa。

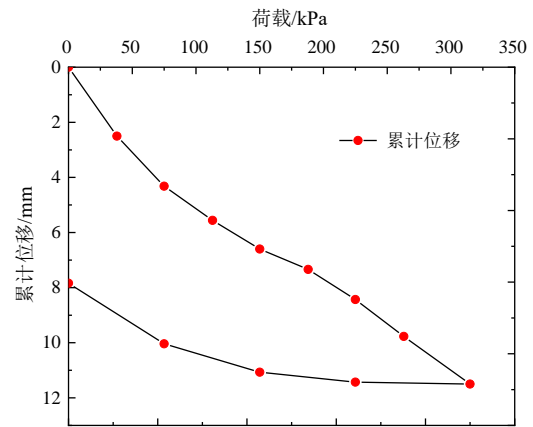


图 10 3 000 kN·m 强夯处理后载荷试验曲线

Fig. 10  $p$ - $s$  curve after dynamic compaction (3 000 kN·m)

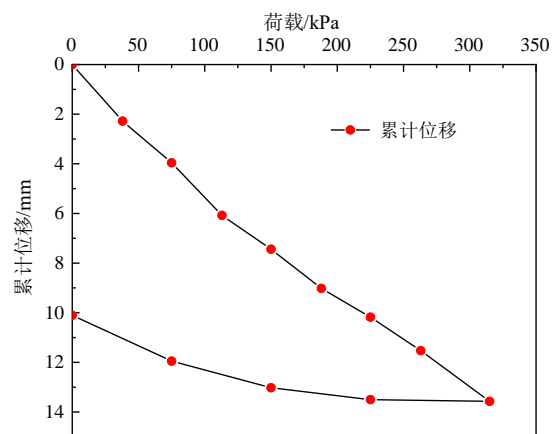


图 11 4 000 kN·m 强夯处理后载荷试验  $p$ - $s$  曲线

Fig. 11  $p$ - $s$  curve after dynamic compaction (4 000 kN·m)

## 4 结 论

根据以上强夯效果评价(夯沉量、标准贯入试验、重型动力触探试验、波速测试和承载力检测)、场地适用性及施工便利性, 本文对强夯处理吹填海砂地基的研究得到主要结论如下:

(1) 有效加固深度: 根据有效加固深度经验公式, 当能级2 000~4 000 kN·m 时, 有效加固深度约5~7 m。本文试验检测结果表明, 吹填海砂地基有效加固深度可达到9~11 m, 与经验值存在较大的偏差。针对吹填砂地基, 强夯对吹填海砂地基的影响分为两个部分: a) 冲击压缩影响, 即为吹填砂表面在夯锤作用下发生塑性变形, 冲击应力在土体

内传播和扩散引起颗粒相对移动和颗粒间介质的排出最终夯锤趋于稳定; b) 振动液化自密实影响, 即位于地下水位(本场地地下水位为原地面以下6 m)以下的吹填海砂在强夯振冲影响下发生局部液化, 土体颗粒重新排列密实。

(2) 强夯能级影响: 强夯能级为2 000~4 000 kN·m时, 平均夯沉量、标准贯入试验击数、重型动力触探击数整体上呈现随着强夯能级增加而增大的变化趋势, 但是不同强夯能级差别较小。

(3) 检测方法比选: 标准贯入试验、重型动力触探试验和波速测试均具有检测速度快、经济性高的特点。强夯处理后, 由于地基密实度增加, 重型动力触探试验不能进行全深度检测(最大检测深度约8.3 m), 不能满足吹填砂全深度检测的要求。承载力检测可准确反映原地基强度, 但是, 承载力检测效率低、费用高且针对吹填砂地基强夯处理后很难加载至极限荷载。因此, 建议后续强夯地基检测采用标准贯入试验和波速测试试验检测方法。

## 参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. 3rd Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Building Foundation Treatment: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [3] 水伟厚. 冲击应力与10 000 kN·m高能级强夯系列试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
SHUI Wei-hou. Research on impact stress and 10 000 kN·m high energy level dynamic compaction series test[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [4] 孙田磊, 刘叔灼, 王永平, 等. 高能级强夯加固软基现场试验研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2014, 47(6): 789-793.  
SUN Tian-lei, LIU Shu-zhuo, WANG Yong-ping, et al. Field test research of high-energy-level dynamic compaction strengthening of soft foundation[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Science, 2014, 47(6): 789-793.
- [5] 宋朝阳, 纪洪广, 张月征, 等. 碎石地基强夯加固机制与加固效果试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(6): 69-77.  
SONG Chao-yang, JI Hong-guang, ZHANG Yue-zheng, et al. Test on the reinforcement mechanism and reinforcement effect of gravel foundation dynamic compaction[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(6): 69-77.
- [6] 张兴元, 张豫川, 张可, 等. 高能级强夯室内模型试验研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(9): 9-13.  
ZHANG Xing-yuan, ZHANG Yu-chuan, ZHANG Ke, et al. Indoor model test research of high energy level dynamic compaction[J]. Engineering Investigation, 2011, 39(9): 9-13.
- [7] 安春秀, 黄磊, 黄达余, 等. 强夯处理碎石回填土地基相关性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 273-278.  
AN Chun-xiu, HUANG Lei, HUANG Da-yu, et al. Experimental study on the correlation between dynamic compaction treatment of crushed stone backfill soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 273-278.
- [8] 韩云山, 董彦莉, 白晓红, 等. 夯锤冲击黄土行程试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2015, 34(3): 631-638.  
HAN Yun-shan, DONG Yan-li, BAI Xiao-hong, et al. Experimental study on the impact of rammer on loess[J]. Chinese Journal of Geomechanics and Engineering, 2015, 34(3): 631-638.
- [9] 贾敏才, 王磊, 周健, 等. 砂性土宏观强夯加固机制的试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28(1): 3282-3290.  
JIA Min-cai, WANG Lei, ZHOU Jian, et al. Experimental study on the reinforcement mechanism of sandy soil macro and mesoscopic dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geomechanics and Engineering, 2009, 28(1): 3282-3290.
- [10] 苏亮, 时伟, 水伟厚, 等. 高能级强夯法处理深厚吹填砂地基现场试验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2021, 51(5): 1560-1569.  
SU Liang, SHI Wei, SHUI Wei-hou, et al. Field test of high-energy-level dynamic compaction for deep filling sand foundation[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2021, 51(5): 1560-1569.
- [11] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 2005(3): 27-38.  
WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al.

The definite method and decision criterion on effective depth of dynamic compaction improvement[J]. Standardization of Engineering Construction, 2005(3): 27-38.

[12] 张凯敏, 周健, 贾敏才. 低能量强夯法加固浅层吹填土

地基试验研究[J]. 施工技术, 2009, 38(9): 98-99.

ZHANG Kai-min, ZHOU Jian, JIA Min-cai. Experimental study on reinforcement of shallow reclaimed soil foundation by low-energy dynamic compaction method[J]. Construction Technology, 2009, 38(9): 98-99.

## 关于举办优秀论文评选的通知

为提高《地基处理》期刊的学术水平和论文质量, 鼓励和培育优秀作者, 本刊自 2022 年 1 月开始开展优秀论文评选活动, 评选活动每两年一次, 对评选出的优秀论文将给予表彰, 现将首次优秀论文评选的有关事项通知如下:

### 一、评选范围

2022—2023 年在《地基处理》期刊上刊发的论文。

### 二、评选程序

参考科学计量指标定量(引用量、下载量等), 经专家推选, 由《地基处理》编辑委员会评选优秀论文 10 篇。评选结果在地基处理网站上进行公示, 并在 2024 年第十八届全国地基处理学术讨论会上颁发证书和奖金。

《地基处理》编辑部  
2022 年 1 月 12 日