



普通强夯与高速液压夯实工艺用于 吹填砂层地基处理对比分析

赵国权¹, 孙文博², 陈少军¹, 冯 波²

(1. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200136; 2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201208)

摘要: 依托大小嵛造地陆域形成及地基处理工程, 通过试验区普通强夯与高速液压夯实工艺的现场试验对比研究, 对2种施工工艺施工过程中夯坑沉降量、超静孔隙水压力和加固前后土层标准贯入击数进行检测。结果表明, 采用2种工艺对吹填砂层加固后标贯值均满足不小于15击的要求, 且液压强夯在4~6 m处中浅深度土层超静孔隙水压力值大于普通强夯, 但普通强夯影响深度大于高速液压夯实工艺。高速液压夯实工艺适用于加固中浅深度吹填砂。

关键词: 普通强夯; 高速液压夯实工艺; 地基处理; 超静孔隙水压力

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0155-05

Comparative analysis of common dynamic tamping and high-speed hydraulic tamping process used in foundation treatment of reclaimed sand layer

ZHAO Guo-quan¹, SUN Wen-bo², CHEN Shao-jun¹, FENG Bo²

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China;

2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: Based on the Daxiaodeng land formation and foundation treatment project, we carry out the field-test comparative study on ordinary dynamic ramming and high-speed hydraulic ramming technology and test the standard penetration number of soil layers before and after reinforcement. The results show that the two processes can meet the design requirements of no less than 15 strokes after the blown sand layer is strengthened, and the ultra-static pore water pressure value at 4~6 m at mid-shallow depths by the hydraulic static tamping is greater than that by ordinary dynamic ramming. However, the impact of ordinary dynamic compaction is greater than that of high-speed hydraulic compaction. The high-speed hydraulic tamping process can be applied to the consolidation of the filled sand of mid-shallow depths.

Keywords: ordinary dynamic compaction; high-speed hydraulic compaction process; foundation treatment; ultra-static pore water pressure

大小嵛造地陆域形成及地基处理面积约15 km²。根据设计要求, 部分区域主要采用普通强夯法进行吹填砂地基处理。试验区堆载料采用海砂, 卸载至指定高程进行强夯处理。高速液压夯实机在施工中机动灵活, 夯击面最大角度可达45°, 适用于施工空间狭小场地的路基填筑、追密夯实、基

坑回填、浅层地基压实等各种工况^[1]。高速液压夯实工艺用于高铁路基土加固, 对砂质板岩路基建议每填高1.75 m, 采用夯击能36 kJ, 累计作用9击对其进行加固^[2]。高速液压夯实工艺多用于高速公路、铁路、基坑工程施工, 而用于吹填砂层地基处理的研究较少。本研究以卸载后试夯区为

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 赵国权(1978—), 男, 高级工程师, 从事港口航道施工技术研究和项目管理。

通讯作者: 孙文博(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事淤泥脱水干化和港口施工技术研究。E-mail: sunwenbo@cccc-drc.com。

试验场地，选取 2 000 m²施工区域进行典型施工试验。试验区划分为若干区域分别进行普通强夯与高速液压夯实工艺试验研究，探究高速液压夯实工艺加固吹填砂的施工工艺参数，并对 2 种工艺加固前后效果和施工效率进行对比分析，进一步对场区大面积强夯工艺选取提供可靠的技术依据。

1 工程概况

试验区位于堆、卸载区，场地较平坦，场区卸载后高程一般为 7.0~7.5 m。场地表层广泛分布一层黄色吹填砂，厚 5~8 m。其下是淤泥及淤泥混砂，厚度分界不明显，平均层厚 3.59 m，局部含粉质黏土和粉土夹层，灰黑色，流塑，饱和，混砂不均，含云母，成份主要由黏、粉粒及大量石英砂颗粒、贝壳碎屑等构成，含砂量 15%~25%，局部含砂量较大，成为淤泥混砂；其下为粉质黏土，厚度约 3.2 m。正常地下水位高程约为 2.5 m。普通强夯与高速液压夯实工艺主要针对表层吹填砂进行加固。图 1 给出吹填区砂样粒径曲线。根据 JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》中砂的分类标准，该砂为粗砂。

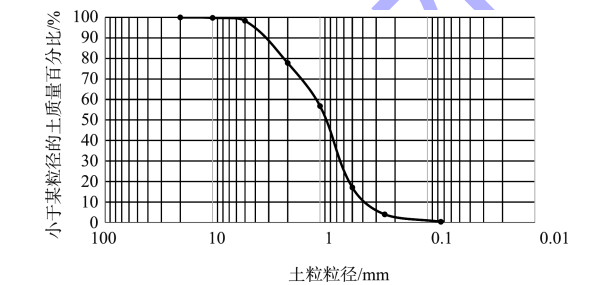


图 1 砂样级配曲线

2 普通强夯施工工艺

2.1 履带式强夯机

试验区普通强夯采用履带式强夯机进行试夯。点夯夯锤重 22~28 t，直径 2.6~2.9 m，落锤高度 14~18 m。夯锤因材质不同，锤体主要为圆柱体或扁平柱体 2 种。履带式强夯机采用自动脱钩和自动套锤装置^[3]。部分履带式强夯机带有龙门架，提高了设备提锤过程的稳定性和安全性^[4]，但带有龙门架履带式强夯机夯点移位所需时间较长。

2.2 普通强夯试验方案

选择面积 900 m²的区域(30 m×30 m)进行试夯。点夯夯击能约为 4 000 kJ，满夯夯击能约 1 000 kJ，试验区采用 2 遍点夯、2 遍满夯的夯实工艺。每遍夯击结束后，平整场地后再进行下一次夯击，最后 2 遍满夯后进行场地碾压找平至交工高程。普通强夯夯点采用正方形布置，见图 2。点夯夯点间距初步设计为 5.0 m，每个夯点 8~10 击，具体夯击数应根据试夯结果定取，即夯击能 4 000 kJ 作用下，最后 2 次夯击后沉降量均值不大于 10 cm，以此确定单点夯击次数。满夯要求夯印搭接，且搭接部分不小于夯锤底面积的 1/4，见图 3。

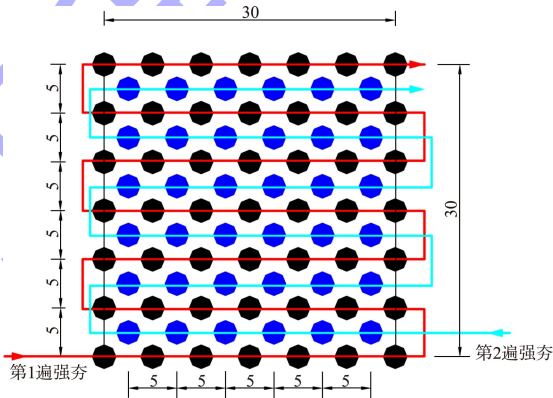


图 2 点夯夯点平面布置 (单位: m。下同)

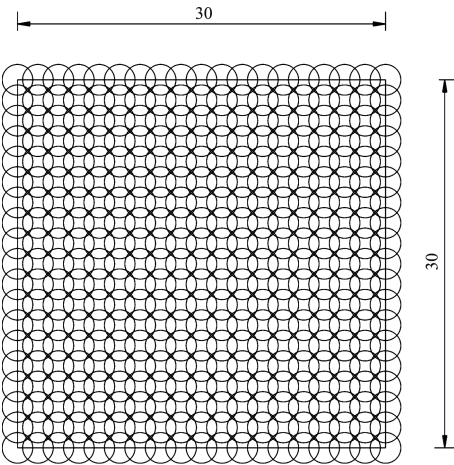


图 3 满夯搭接布置

3 高速液压夯实工艺

3.1 高速液压夯实设备

高速液压夯实工艺又称液压强夯，液压强夯设备通过装载机或者挖掘机提供提升冲击锤的液

压动力，将夯锤提升至一定高度后释放^[5]。本试验液压强夯设备参数选用冲击锤芯质量为 7 t，落高 1.2 m，单点夯击能 84 kJ，液压强夯设备每分钟夯击 20~30 次。夯锤在重力和液压蓄能器的共同作用下加速下落，先是击打在缓冲垫，缓冲垫将作用力传递至钢锤脚，钢锤脚底部安装有扩大直径的钢板，并最终通过夯板将作用力传递至地面，从而夯击能量最终传递给地基^[6]。液压强夯影响深度一般可达 4~8 m，最大可达地面下 10 m。

液压强夯设备配备先进的监控系统，可通过控制面板预先设定单点夯击次数，自动工作至设定夯击次数，减少了人工操作错误率。液压强夯设备技术特点主要是机动性强、可控性高、安全性好^[7]。

试验用液压强夯夯板直径为 1.25 m 或 1 m。单点夯击次数暂定为 50 次，夯锤行程为 1.2 m，液压设备单次夯锤行程时间约 2 s。液压强夯设备由夯头和液压锤体装置组成。夯头由夯板和钢锤脚组成，钢锤脚高度约 1.2 m，夯击过程中钢锤脚一般打入土体中，便于深部土体强夯密实。

3.2 液压强夯试验方案

液压强夯采用 3 遍点夯加固方案，单点夯击能均为 84 kJ。在试验区域采用不同夯板直径或夯击次数进行地基加固处理，分析夯板直径和夯击次数对地基强夯加固效果的影响。每遍夯击结束后，平整场地后再进行下一次夯击，最后 1 遍满夯后进行场地碾压整平。液压强夯夯点平面布置如图 4 所示。由图 4 可知，第 1 遍和第 2 遍点夯采用梅花形布置，夯点间距暂定为 5 m，第 3 遍点夯采用矩形布置，夯点间距为 2.5 m。

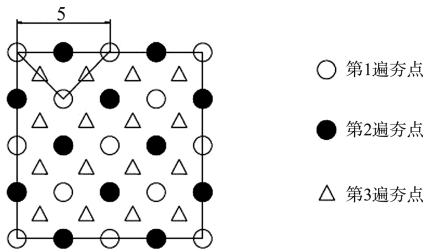


图 4 液压强夯夯点平面布置

根据液压强夯夯击过程中夯板直径和夯击次数的参数设定不同，强夯液压试验区划分为不同

试验区域，试验区均为正方形，面积均为 100 m²。表 1 给出不同试验区液压强夯工艺方案。

表 1 不同试验区液压强夯工艺方案

试验区	夯板直径/m	夯击次数/次
A	1.00	50
D	1.25	50
E	1.25	60
F	第 1 遍点夯:1.25 第 2 遍点夯:1.00 第 3 遍点夯:1.00	50
G	第 1 遍点夯:1.25 第 2 遍点夯:1.00 第 3 遍点夯:1.00	60

4 2 种强夯工艺加固效果对比分析

4.1 夯点沉降

4.1.1 普通强夯

普通强夯点夯夯击能 4 000 kJ，单点夯击 8 次后，夯坑直径范围为 3.6~4.3 m。

图 5 为夯击次数与沉降量之间的关系。由图 5 可知，初次夯击单击夯沉量最大，约为 58 cm，后 7 次单击夯沉量逐渐减小，点夯 8 次后夯坑沉降累计值约为 171cm，且最后 1 锤夯沉量小于 10 cm，满足收锤标准。

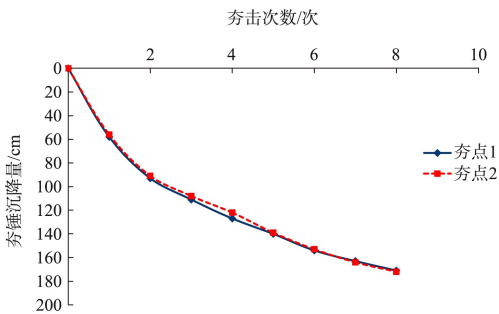


图 5 夯击次数与沉降量关系曲线

4.1.2 液压强夯

根据现场液压强夯辅助设备上拔难易程度，试验过程中单点夯击数均不大于 60 次。液压强夯设备每夯击一次即测量一次沉降值，图 6 为液压不同夯板在 84 kJ 夯击能作用下夯击 50 次的沉降量。由图 6 可知，1.25 m 直径夯板夯击 50 次后沉降量为 76.3 cm，而 1.0 m 直径夯板夯击 50 次后沉降量为 131.9 cm，为 1.25 m 直径夯板沉降量的 1.72 倍。说明夯板直径小，同一夯击能作用下夯

沉量明显增大。

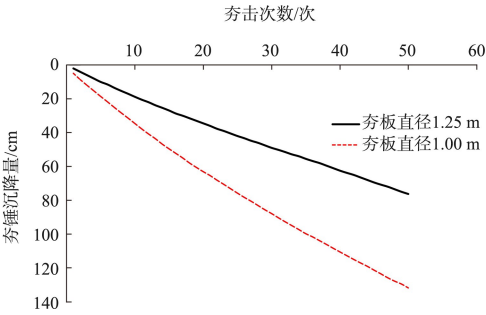


图 6 液压夯击沉降量

4.2 标准贯入试验

在强夯试验区加固前，以及在 2 种工艺强夯完成后 7~10 d 从夯击终止时的夯面起至吹填砂深度内进行标贯试验，通过对比普通强夯与液压强夯夯后标贯数据，探讨 2 种工艺的强夯加固效果(图 7)。

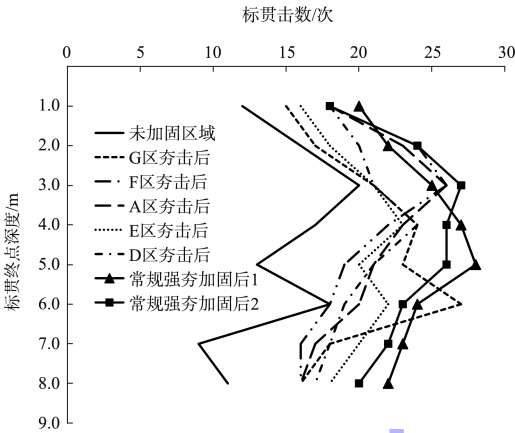


图 7 高速液压强夯加固前后标贯数据

由图 7 可知，普通强夯与液压强夯加固后地表下 9 m 内砂层强度均有不同程度增强，且液压强夯和普通强夯加固后土体不同深度处标贯值均大于 15 击的设计要求。在液压强夯夯板直径相同的条件下，G 区液压强夯 60 次后土体深部标贯值明显大于 F 区 50 击土体被夯击后的标贯值，说明土体强度随着液压强夯夯击次数增加而增加。对比 A 区和 D 区加固后的标准贯入值可知，在夯击次数相同的条件下，夯板直径越小，4 m 深度内浅层土体加固后强度越大，而大于 4 m 深度土体加固后强度差别不大。说明夯板直径变化，对浅层土体强度的影响较大。由图 7 可知，普通强夯加固后同一深度砂土强度明显大于液压夯加固效果。

4.3 孔隙水压力监测

为探究普通强夯点夯和液压强夯点夯夯击后土体不同深度超静孔压力值变化情况以及超静孔压力消散时间，试验选用振弦式孔压计进行超静孔隙水压力监测。6[#]、9[#]、12[#]孔按竖向等距离在地基不同深度(深度分别为 5.45、6.45、8.45、10.45 m)处埋设孔压计。普通强夯与液压强夯夯锤边缘距离孔压计水平向埋设距离均为 1 m。

现场孔压监测装置能够将孔压数据无线传输至云端，实现自动监测。试验过程中设定每 5 min/次进行孔压数据采集。

图 8 为 6[#]孔普通强夯点夯 8 次后土体不同深度处超静孔压消散曲线。由图 8 可知，普通强夯夯击后地下水位以下至深度 10.45 m 内均有超静孔压，超静孔压最大值为埋深 5.45 m 处，最大值为 4.3 kPa，夯击约 25 min 后超静孔压消散完毕。因此，普通强夯 2 遍点夯时间间隔大于 25 min 即可。

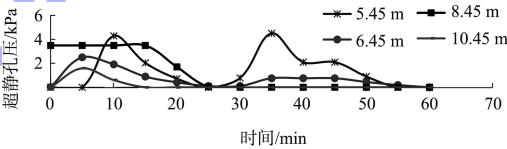
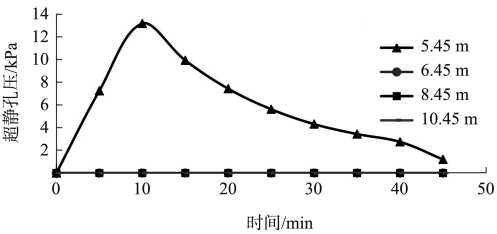
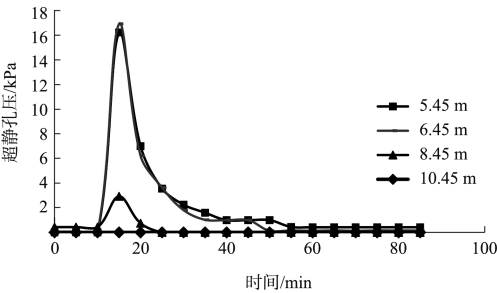


图 8 普通强夯点夯 6[#] 孔不同深度超静孔压曲线

9[#]、12[#]孔在不同夯板直径、不同深度液压强夯 50 次后超静孔压曲线见图 9。



a) 9[#]孔，夯板直径 1.25 m



b) 12[#]孔，夯板直径 1.00 m

图 9 液压强夯 50 次后超静孔压曲线

由图 9a) 可知, 液压强夯 1.25 m 夯板夯击 50 次后埋深 5.45 m 处超静孔压力最大值为 13.2 kPa, 5.45 m 以下土层无超静孔压力值。说明液压强夯夯板 1.25 m、夯击能为 84 kJ 条件下, 夯击有效加固深度约为 5.45 m。由图 9b) 可知, 液压强夯夯击后地下水位以下至深度 8.45 m 内均有超静孔压, 超静孔压最大值在埋深 6.45 m 处, 为 16.92 kPa, 大于普通强夯夯击后同一深度处超静孔压值, 且液压强夯后约 50 min 后超静孔压消散完毕, 即液压强夯 2 遍夯击间隔时间应大于 50 min。对比图 8 和图 9b) 可知, 普通强夯在 10.45 m 处有超静孔隙水压力值, 而液压强夯在该深度处无超静孔隙水压力值, 然而液压强夯在 5.45、6.45、8.45 m 处超静孔隙水压力值明显大于普通强夯。说明普通强夯较液压强夯影响深度大, 但液压强夯在对 6 m 处中等深度土层影响程度优于普通强夯。对比图 9a)、b) 可知, 在相同夯击次数条件下, 液压强夯 1.00 m 直径夯板 5.45、6.45、8.45 m 处均有超静孔隙水压力值, 而直径 1.25 m 夯板夯击后只有 5.45 m 处有超静孔隙水压力值, 说明液压夯板直径小向深部土体夯击作用力的传递效果更好。

5 结论

1) 液压强夯与普通强夯相比, 单点累计夯沉量小于普通强夯; 液压强夯单点夯击次数应大于 50 次, 建议采用直径大于 1.25 m 夯板进行第 1 遍夯击。

2) 液压强夯与普通强夯相比, 普通强夯加固后同一深度标准贯入强度明显大于液压强夯加固效果。

3) 普通强夯较液压强夯影响深度大, 但液压强夯在对 6 m 处中等深度土层超静孔隙水压力值大于普通强夯。

4) 液压强夯对 4~6 m 处中浅深度土层强夯加固效果优于或接近普通强夯, 且液压夯板直径小更有利于提高深部土体加固效果。

参考文献:

[1] 庄仲欣. 高速液压夯实技术在高速铁路路基工程中的应用研究[J]. 路基工程, 2018(3): 153-156.

[2] 周荣, 宋晓东. 高铁高填方路基高速液压夯实施工参数研究[J]. 路基工程, 2015(5): 56-59, 65.

[3] 司癸卯, 李峙峰, 李辉, 等. 一种履带式强夯机动态稳定性判定方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(8): 103-106.

[4] 任卫涛. 液压履带式强夯机关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.

[5] 朱家剑, 高文泽, 王选仓, 等. 台背回填高速液压夯实机补强路基质量控制标准研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2019(4): 18-23.

[6] 刘明华, 王吉庆. 高速液压夯实机补强台背路基的施工工艺及工程应用[J]. 公路与汽运, 2016(4): 217-219.

[7] 曹斌, 刘岩. 高速液压夯实机在高速公路路基填筑中的应用[J]. 公路, 2016, 61(11): 71-75.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 130 页)

参考文献:

[1] 江浔, 余育速, 冯景伟, 等. 城市河道传统护坡生态化改造方案研究[J]. 人民珠江, 2017, 38(2): 53-57.

[2] 王远明, 张桂荣, 李登华, 等. 石笼网垫护坡结构抗冲刷性能水槽模型试验[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 94-98.

[3] 吴春澍, 李雅萍, 李四静, 等. 魏桥水库围坝护坡设计研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 118-119, 124.

[4] 李连胜, 黄玉忠. 三维土工网垫喷播植草护坡技术应用分析[J]. 中国水土保持, 2004(8): 39-40.

[5] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 水库消落带串珠式柔性护岸技术及其应用[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(1): 1-4.

[6] 苏彬. 雷诺护垫在护坡中的应用及施工质量控制[J]. 吉林农业, 2017(23): 71.

[7] 邓彩云, 李凌云, 朱勇辉. 河岸稳定性评估指标体系初探[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 127-130.

(本文编辑 王璁)