

文章编号: 1000-7598 (2012) 04-1129-05

吹填粉细砂的无填料振冲密实试验与工程应用

何开胜¹, 过兴发²

(1. 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 南通港口集团有限公司, 江苏 南通 226006)

摘 要: 对长江下游河漫滩地新吹填的松散粉细砂, 通过原位监测仪器和跟踪检测, 进行了无填料振冲试验、施工技术开发和设计应用。研究了无填料振冲过程中桩周土的超静孔压变化与振冲有效范围, 比较了振冲密实前、后桩周土强度变化。针对施工跟踪检测中发现的桩身土局部欠密实问题, 分析了缺陷产生原因, 提出了解决措施。结果表明, 目前规范认为应加填料振冲处理的各种松散粉细砂, 只要试验方法得当, 及时发现振冲中可能出现的问题并予以解决, 吹填粉细砂的无填料振冲密实法是可以大面积应用的。工程试验后提出的振冲设计参数、施工工艺参数和质量控制方法, 最终检测显示, 工程桩各项指标达到堆场使用要求。

关 键 词: 无填料振冲密实; 吹填; 粉细砂; 地基处理

中图分类号: TU 441+8

文献标识码: A

Test and application of vibro-compaction of dredging silty fine sands without additional backfill materials

HE Kai-sheng¹, GUO Xing-fa²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Nantong Port Group Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226006, China)

Abstract: For the silty fine sands of 3 to 5 m thickness justly formed by dredging at the material yard of a bulk cargo wharf, based on the instrumented monitoring results of a testing area improved by vibro-compaction without additional backfill materials and trace inspection in the project, the change of excess pore water pressure and range of validity of vibroflotation is analyzed. The strengths are compared before and after vibroflotation. The design parameters, construction techniques and quality control method of vibro-compaction are proposed for the large-scale practice. In the first inspection, the problem of local poor compaction inside the vibroflotation column is found; the resulting reasons are analyzed and resolving measures are put forward. The final inspection results of large-scale practice indicate that the proposed parameters are feasible; the quality of improving ground satisfies the design requirements. The testing and application of this project indicates that vibro-compaction method without additional backfill materials for silty fine sands can be used for large-scale practice after the scientific testing methods quality tracking and solving measures of defects carried out.

Key words: vibro-compaction without additional backfill materials; dredging; silty fine sands; ground treatment

1 前 言

振冲法是用振冲器插入砂土中将其振密的一种地基处理方法, 分振冲置换法和振冲密实法两类。振冲法加固深度通常在 3~15 m, 最深已达 26 m^[1]。Thorburn^[2]给出了振冲法适用土粒级配的一个较广范围; Mitchell^[3]进一步提出了振冲法的土粒级配范围和最适宜范围, 如图 1 所示。国外一般认为, 处

理图 1 中阴影以左的 C、D 区应加入粗粒料来代替砂料^[4]。国内学者认为, 当级配曲线全部位于 C 区时, 用振冲密实法加固有困难; 当曲线主要位于 B 区、部分位于 C 区时, 用振冲密实法加固是可以的; 但当级配曲线位于 A 区的砾、紧砂、胶结砂或者地下水位较深时, 将会大大降低振冲器的贯入速率, 以致用振冲挤密法加固在经济上是不合算的^[5-6]。

因此, 我国规范^[7]规定, 振冲置换法适用于处

理不排水抗剪强度不小于 20 kPa 的饱和黏性土、粉土、饱和黄土和人工填土;振冲密实法适用于处理砂土、粉土,而不加填料的振冲密实法仅适用于处理黏粒含量(<0.005 mm)不大于 10%的粗砂、中砂。对于粉细砂地基,一般认为,不宜采用或不能采用不加填料的振冲法,故国内工程基本都采用加填料振冲。少数粉细砂工程采用无填料振冲成功后,发挥了该法施工简便、工期短和造价低的优点^[8-10]。但也有粉细砂无填料振冲工程失败的例子,原因是砂颗粒越细,振冲挤密效果越差,其加密机制还有待深入研究^[11],如粉细砂级配、渗透系数、初始密度、应力、颗粒大小、形状与振冲器的振动力、振动频率、振幅、振动历时以及粉细砂受振液化排水与致密效果等。本文介绍交通部“十五”水运工程技术创新成果中的一个处理实例^[12],供类似工程借鉴。

2 地质条件和设计方案

长江口某码头堆场通过在江滩上吹填粉细砂形成,陆域总面积为 4.46×10^4 m²,吹填陆域形成后立即进行堆场施工。地基土为表层 3~5 m 的吹填砂 I₀、局部为杂填土 I₁,其下为厚 0.3~1.9 m 的淤泥质粉质黏土 II₁,再下大部分区域为厚约 17 m 的粉细砂 II₂。要求加固后地基承载力大于 110 kPa,残余沉降 ≤ 50 cm,差异沉降 $\leq 1.5\%$ 。需处理的吹填砂颗粒组成见图 1,颗粒粒径全部小于 0.25 mm,级配不佳,按传统不宜采用无填料振冲。

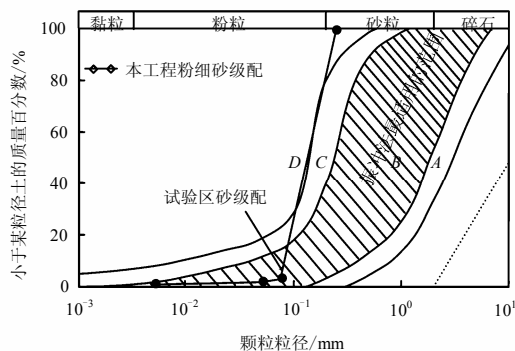


图 1 振冲法适用的颗粒范围和本工程粉细砂级配
Fig.1 Range of effective particle dimension for vibro-compaction and sand grading of testing area

考虑以往采用的强夯法对附近建筑和环境有较大影响,施工很难正常开展,设计采用振冲密实法加固,初步拟定振冲挤密桩直径为 0.8 m,桩间距为 2.0 m,桩长为 8 m。施工时平面上采用双点共振,立面上采用 3 个上下往返振冲。具体待现场试验后

确定。

3 振冲过程中的超静孔压与振冲有效范围

先在场内选择代表性的 16 m×20 m 试验区进行无填料振冲密实试验,试验区靠近临江侧大袋装砂吹填围堤。采用 ZCQ-30 型振冲器,施工 8 排、10 列共 80 根桩。

图 2 为振冲密实试验区内孔压计布置图。图 3 为振冲过程中实测的超静孔隙水压力 u 产生和消散过程。

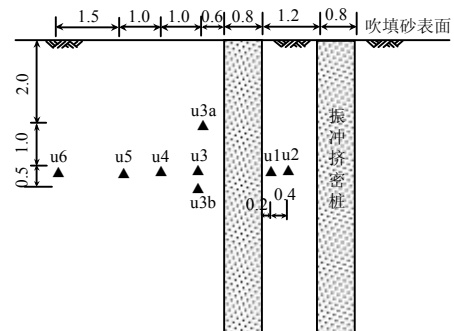


图 2 孔压计位置剖面图

Fig.2 Instrument arrange of excess pore water pressure

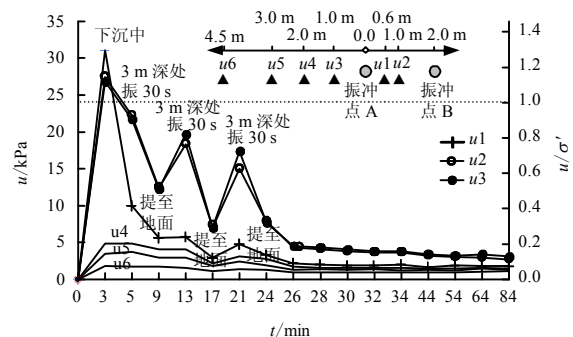


图 3 振冲过程中产生的超静孔隙水压力和消散过程
Fig.3 Excess pore water pressure during vibro-compaction and its dissipation process

(1) 振冲孔压变化规律

振冲器在第 1 次下沉过程中产生的超静孔隙水压力最大,并且大于振冲器上提至孔压埋设深度处原位振动 30 s 后产生的超静孔压,同孔后续几次上下振冲时产生的孔压呈锯齿型变化,且依次递减,振冲完毕后 1 h 孔压消散了 87%~95%。可见,松散砂土受振后很容易液化,但液化区的孔压在振冲器上提后消散很快,因为流态的砂土大多回填了振冲器下降或上提后留下的空隙,使液化区颗粒重整,砂土的密实度提高,抗液化能力增强。

(2) 单点振冲液化区域和振冲有效范围

振冲过程中砂土距振冲器越近,产生的超静孔压越大。本处新吹填的粉细砂,饱和重度为 18 kN/m^3 , 3 m 深处上覆有效应力为 24 kPa 。对 ZCQ30 型振冲器,距振冲中心点 1 m 以内砂土,超静孔压 (u_1, u_2, u_3) 已达到 $27 \sim 32 \text{ kPa}$,说明已处于完全液化状态,其中超出有效应力的孔压应为振冲动水压力所致。在双点振冲器正中间的孔压 (u_2) 与单点振冲器外侧等距点的孔压 (u_3) 基本相等,说明双点振冲器距振冲点 1 m 处,内侧与外侧产生的超静孔压无异。距振冲中心点 2 m 处的超静孔压 (u_4) 仅有 5 kPa ,振冲已不能引起砂土液化,加固效果可忽略; 2 m 外 (u_5, u_6) 更是如此。因此,本工程的单点振冲有效半径大于 1 m 而小于 2 m 。

(3) 多个上下往返振冲对砂土液化与密实效果的影响

将图 3 中超静孔压 u 转换为其与上覆有效应力 σ' 之比,如图中右轴所示。可见,在振冲器第 1 次下沉与上提过程中 $u/\sigma' \geq 1$,砂土完全液化。随后的往返振冲中 $u/\sigma' < 1$ 且越来越小,不能使砂土再达到液化。3 个上下往返振冲后,距振冲器 1 m 处的 u/σ' 最大值已降至 0.8 以下。这表明砂土在振动液化后,诱发增加了的抗液化阻力,需用能量更高的振冲器才能使其再次液化。因此,平面上的一个振冲点,振冲器上下往返升降振冲次数不宜超 3 次。

(4) 二次振冲产生的超静孔隙水压力

振冲器在 $0 \sim 4 \text{ m}$ 段经过第 1 阶段(8 个上下反复)振冲后,再进行第 2 次上下振动反插产生的超静孔隙水压力,结果如图 4 所示。由图可见,经过第 1 阶段振冲后,再次振冲时 u/σ' 比第 1 阶段小很多,只有 0.35 以下。因此,二次振冲的砂土在原振冲功率下已难以再次液化。 u_3 点孔压与 u_{3a} 、 u_{3b} 点很相近,表明振冲器长度范围内各点的孔压基本相同。

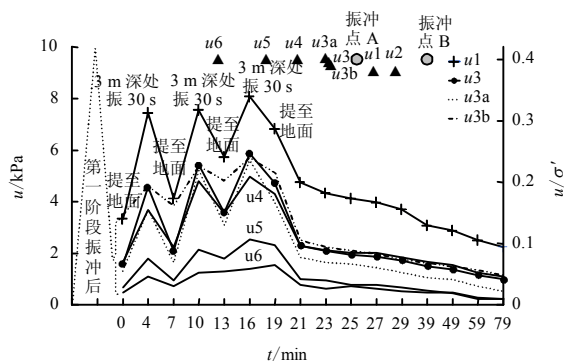


图 4 二次振冲产生的超静孔隙水压力

Fig.4 Excess pore water pressure in the course of the 2nd vibro-compaction

4 振冲密实前后土强度和沉降

振冲前进行了 4 个孔标准贯入试验和 5 个孔静力触探试验。吹填砂层中标准贯入击数(SPT-N)为 $3 \sim 9$ 击,平均 5.9 击。静力触探在 $0.1 \sim 2.8 \text{ m}$ 段锥头阻力平均为 2.77 MPa ,在 $3.2 \sim 3.5 \text{ m}$ 深度处出现一个高强度处,为吹填围堤时在江滩上铺设的编织袋所致。

图 5(a)是振冲前与振冲后 15、21 d 时地基土标贯击数比较。对吹填砂、淤泥质粉质黏土和粉细砂层振冲后标贯击数分别提高了 9.4 、 1.8 、 3.7 击,达到 15.3 、 3.8 、 23.3 击。此外还发现,无论是桩身土还是桩间土,振冲后 15、21 d 时地基土的标贯击数基本无变化。试验区静力触探试验结果也是如此。因此,可认为本工程吹填砂强度在振冲施工后 15 d 已基本增长到位,复合地基静载试验和堆场上部结构工程可以在振冲施工后 15 d 时进行。

图 5(b)为振冲前后桩间土静力触探锥头阻力 q_c 比较。在剔除地表 50 cm 较松散层后,吹填砂、淤泥质粉质黏土和粉细砂层振冲后锥头阻力分别提高了 1.52 、 0.16 、 0.79 MPa ,达到 4.21 、 0.54 、 7.40 MPa 。

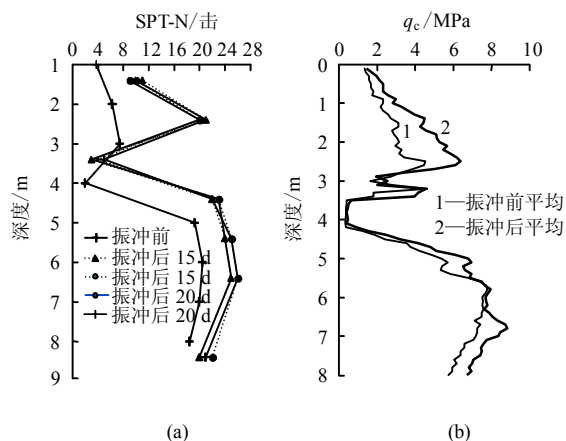


图 5 振冲前后桩间土标贯击数和锥头阻力

Fig.5 SPTN value and q_c value of the soils between piles before and after vibro-compaction

对 II_1 淤泥质粉质黏土,振冲的作用只是使其产生超静孔隙水压力,通过上下透水砂层排水固结来增加强度,但从试验结果看,其强度增加很有限。对 II_2 粉细砂,其天然强度已较高,振冲虽能进一步提高其密实度和强度,但提高值较小,结合设计要求的 110 kPa 地基承载力,认为此土层可不作加固处理。

振冲前地面平均高程为 5.41 m ,振冲后平均为 5.09 m ,振冲施工引起地面沉降为 32 cm 。

5 桩身土的局部欠密与改进措施

在工程桩首批检测时,发现同一振冲点中,有些点位振冲器贯入处桩身土的锥头阻力反而低于桩间土的锥头阻力甚至低于天然地基土,图6为2个典型示例。

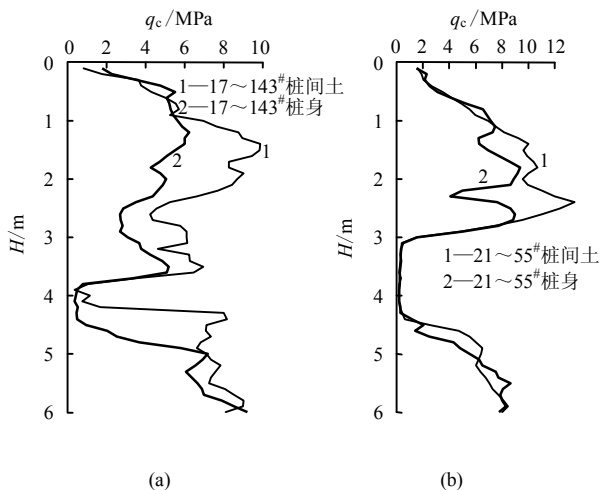


图6 局部桩身土密度低于桩间土示例

Fig.6 Example of low strength improved soil in the vibro-compaction shaft

产生这一现象的原因,笔者认为,根据地基处理技术规范,对黏粒含量小于10%的中粗砂地基,振冲器下沉至设计处理深度后开始上提时,由于孔壁极易坍塌,能自行填满下方的孔洞,故可不加填料。但对粉细砂地基,由于振冲器上提后,若不加填料填充,则振冲头留下的孔洞可能不能自动淤合,或淤合不密实,或振冲水流将细颗粒带走后在砂层中产生较松散的孔隙,从而造成桩身强度低于桩间土或天然地基土。

针对这一现象,笔者建议,在不加填料的粉细砂层中振冲时,在振冲器上提过程中(特别是最后一次上提中)要不停地向振冲孔内投入原地的粉细砂材料,以减少空洞产生,减少振冲水流带走振冲器周围的细颗粒,并使用不超过100 kPa的低压水,同时将振冲上提间距由50 cm减至30 cm,以增加桩身连续性。这可能是规范中建议粉细砂层中振冲法只有采用加填料的施工方法才能获得较好处理效果的内在原因。

6 承载力、质量控制和工程桩评价

试验区振冲施工后15 d,进行单桩复合地基荷载试验。根据规范,对以粉土或砂土为主的地基,可取 $s/b = 0.015$ 所对应的荷载,由此得到2处试验

的复合地基承载力基本值分别为146、158 kPa,均大于设计要求的110 kPa。

根据图3中孔压可将本工程的双点振冲间距由2.0 m增大至2.2 m,完全能够使距振冲点1.1 m处的砂土振冲液化,这样可节省地基处理费21%。因此,工程桩最终设计参数为桩径0.8 m,间距2.2 m,桩长以穿过II₁淤泥质粉质黏土层,进入II₂粉细砂层50 cm为宜,平均桩长7 m。施工工艺和参数如下:水压为100 kPa,水量为80~150 L/min,密实电流为22~27 A,留振时间为8~10 s,上提间距为30 cm,上提速率为0.8 m/min,下沉速率为1~2 m/min,采用3个上下振冲的工艺流程。对II₁淤泥质粉质黏土层,考虑其厚度多只有30~50 cm,振冲目的也不是加固该土层,仅要求施工中第1、2次往返振冲到此层时,加大水压至250~300 kPa,适当冲洗出部分淤泥,置换成砂土,并在地表振冲口处人工回填场地上的粉细砂;对局部软土较厚的区域,适当添加砂石料。对II₂粉细砂,其天然强度已较高,此土层可不作加固处理。对江边新围堤内侧5~10 m范围内,若遇到吹填施工的大袋装砂围堰,则振冲深度以达到此围堰土工布、振冲头停止下沉时即可终止。

工程桩据此施工后,15 d时进行单桩复合地基试验,确定的承载力基本值为120 kPa和130 kPa,均满足设计要求。图7选择了吹填砂厚在3.5~4.0 m的5根工程桩检测结果的平均值,各桩的强度要求均满足设计要求。

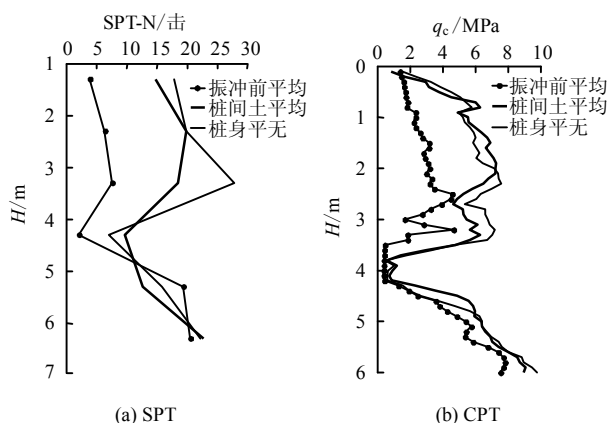


图7 工程桩 SPT 和 CPT 试验

Fig.7 Inspecting tests of SPTs and CPTs for the project

7 结 论

(1) 通过振冲密实试验区的成桩试验和效果检测,确定了工程桩设计和施工参数。将桩间距由

2.0 m 增加至 2.2 m; 桩长由 8 m 减至 7 m; 当振冲到淤泥质粉质黏土时,可加大水压至 250~300 kPa, 洗出部分淤泥以置换流砂。工程桩施工与检测表明, 这些工艺是可行的, 能将松散吹填砂振至中密程度。

(2) 振冲器在第 1 次下沉过程中产生的超静孔隙水压力最大, 后续几次上下振冲时产生的孔压呈锯齿型变化, 且依次递减, 振冲完毕后 1 h 孔压消散了 87%~95%。

(3) 对 ZCQ30 型振冲器, 距振冲中心点 1 m 内砂土处于完全液化状态, 且双点振冲的内侧点和外侧等距点超静孔压大小无异; 但 2 m 及以上已无液化, 密实效果甚微。

(4) 平面上的一个振冲点, 振冲器上下往返升降振冲次数以 3 次为宜, 再增加作用不大。

(5) 吹填砂强度在振冲施工后 15 d 已基本增长到位, 工程桩的质量检测、静载试验和上部结构可在振冲施工后 15 d 进行。振冲施工引起地面沉降为 32 cm。

(6) 对粉细砂层中无填料振冲法, 建议在振冲器上提过程中(特别是最后一次上提中)要不停地向振冲孔内投入原地的粉细砂, 使用不超过 100 kPa 低压水, 将振冲上提间距减至 30 cm, 以减少振冲器上提后可能留下的孔隙或孔洞, 以增加桩身连续性。

参考文献

- [1] SCHAEFER V R. Ground improvement, ground reinforcement, ground treatment: Developments 1987—1997, Geotechnical Special Publication No.69[M]. [S. l.]: ASCE, 1997.
- [2] THORBURN S. Building structures supported by stabilized ground[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(1): 83—94.
- [3] MITCHELL J K. Soil improvement: state-of the art report[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: Publications Committee of X. ICSMEE, 1981, 4: 509—565.
- [4] ULRICH S. Geotechnical Engineering Handbook[M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2002.
- [5] 地基处理手册编写委员. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [6] 南京水利科学研究院. 软基加固新技术——振动水冲法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [7] 中华人民共和国行业标准. JGJ79—91 建筑地基处理技术规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2000.
- [8] 周健, 贾敏才, 池永. 无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1350—1355.
ZHOU Jian, JIA Min-cai, CHI Yong. Vibroflotation compaction of silty sandy without additional backfill materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(8): 350—1355.
- [9] 周健, 姚浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1685—1688.
ZHOU Jian, YAO Hao, JIA Min-cai. Research on technology for shallow treatment of large-area soft soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1685—1688.
- [10] 苏荣臻, 范文涛. 振冲法在粉细砂地基加固中应用的探讨[J]. 西部探矿工程, 2005, 3: 8—10.
SU Rong-zhen, FANG Wen-tao. Application and discussion of vibro-compaction method in the improvement of the silty sand[J]. *West China Exploration Engineering*, 2005, 3: 8—10.
- [11] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通振动下南京片状细砂的有效应力路径及破坏模式[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 719—726.
LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing. Effective stress path and failure pattern of Nanjing fine sand with flake-shape structure under vibrating load of rail transit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 719—726.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程技术创新文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2007.