



# 高含泥量水力冲填粉细砂地基强夯处理效果

谢万东, 陈建宇, 何汉艺

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 在高含泥量的粉细砂地基中, 强夯法的处理效果存在较大的不确定性; 在水力冲填砂土地基和天然砂土地基中强夯法的有效加固深度也不同。结合具体工程研究水力冲填粉细砂的工程性质, 进行  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  能量的强夯试验性施工, 对全场地强夯后的标准贯入试验、静力触探试验和载荷板试验等检测结果进行分析。结果显示: 强夯法适用于平均含泥量为 22.7% 的水力冲填粉细砂地基,  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  能量强夯的有效加固深度约为 11 m, 大于规范 JGJ 120—2012 建议的 8.0~8.5 m。强夯后的粉细砂地基满足地基承载力特征值不低于 150 kPa、压缩模量不低于 10 MPa 的要求, 并达到 7 度抗震设防烈度的抗液化标准。当砂性冲填土上部覆盖薄层黏性冲填土时, 采用夯坑内回填砂的方法减小上覆软弱层对处理效果的不利影响。在高含泥量的水力冲填粉细砂中进行强夯加固效果良好, 强夯有效加固深度修正系数取 0.49。

**关键词:** 水力冲填粉细砂; 强夯; 含泥量; 有效加固深度

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0223-06

## Effect of dynamic compaction on hydraulic filled silty to fine sand with high fines content

XIE Wandong, CHEN Jianyu, HE Hanyi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Effect of dynamic compaction method in silty fine sand ground with high fines content is uncertain. The effective reinforcement depth of dynamic compaction in hydraulic filled sand and natural sand is also different. The characteristics of hydraulic filled silty to fine sand are studied in a typical project, and in-situ trial construction is carried out for compaction energy of  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$ . Verification results including standard penetration test, cone penetration test and plate loading test of the whole site after dynamic compaction are analyzed. The results show that dynamic compaction is applicable in hydraulic filled silty to fine sand with average fines content of 22.7%. The effective reinforcement depth of  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  dynamic compaction is about 11 m, which is much larger than that proposed in standard JGJ 120—2012. Requirements for characteristic bearing capacity of  $\geq 150 \text{ kPa}$ , compression modulus of  $\geq 10 \text{ MPa}$  can be satisfied after dynamic compaction, and also the standard for liquefaction resistance under seismic fortification intensity of 7 degrees can be met. When thin layers of cohesive hydraulic fills existing above sandy hydraulic fills, the adverse impact on treatment effect can be minimized by filling the craters with sands during compaction. Good effect can be achieved by dynamic compaction in hydraulic filled silty to fine sand with high fines content. The correction factor of effective reinforcement depth of dynamic compaction can be taken as 0.49.

**Keywords:** hydraulic filled silty to fine sand; dynamic compaction; fines content; effective reinforcement depth

收稿日期: 2023-01-26

作者简介: 谢万东 (1984—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程设计和研究。

在港口等填海造地工程中,场地回填高程一般略高于海平面,大部分填料淹没在水位以下。采用砂料进行回填时,需限制其含泥量(粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量)<sup>[1]</sup>,防止在回填过程中出现遇水软化、局部淤泥包等问题。砂土含泥量对地基处理方法的选择和处理效果影响显著。当含泥量低于 10% 时<sup>[2]</sup>,可采用振冲法或强夯法进行处理;对于含泥量更高的砂土,则采用强夯法或复合地基法等进行处理。随着含泥量的增大,砂土的密实效果逐渐下降,工程不确定性也逐渐增大。

目前在填海工程中采用强夯法处理时,对回填砂的含泥量限值没有规定。在相关的技术指南中,美国联邦公路局 FHWA-SA-957-037<sup>[3]</sup>认为塑性指数为 0、渗透系数大于  $1 \times 10^{-5}$  m/s、含泥量低于 28% 的砂土采用强夯处理可取得良好的加固效果;HAN<sup>[4]</sup>则指出强夯法在含泥量不大于 15% 的松散半饱和砂土中加固效果最好。国内亦有部分学者研究了含泥量对砂土强夯效果的影响。贾敏才等<sup>[5]</sup>对滨海粉细砂天然地基采用不同能级强夯的加固效果进行了研究,得出相应的有效加固深度修正系数;张璟泓等<sup>[6]</sup>通过室内模型试验得出砂土的含泥量大于 10% 后,含泥量的影响逐渐增大,含泥量越高,强夯处理效果越差;李富春等<sup>[7]</sup>根据室内模型试验得到当含泥量小于 10% 且黏粒含量小于 5% 时,强夯加固效果较好,当含泥量从 10% 增大到 20% 时,强夯的有效加固深度减小 36.7%;王彭生等<sup>[8]</sup>对西非某集装箱码头陆域水力冲填砂强夯处理结果进行统计分析,得出含泥量不超过 15% 的吹填砂经强夯处理后可满足二次变形模量  $E_{v2}$  不低于 80 MPa 和加州承载比 (CBR) 不低于 10% 的要求。

已有的设计指南和研究成果缺乏工程实例进行验证,某些工程案例缺少含泥量或强夯有效加固深度等重要信息。本文根据广东揭阳某码头后方陆域在回填和地基处理施工期间较为完整的工程数据,分析高含泥量水力冲填粉细砂地基采用强夯法处理的效果,旨在为工程积累经验。

## 1 工程概况

项目位于顺岸重力式码头(长约 525 m)后方填海形成的约 35 万  $\text{m}^2$  陆域,海床面高程 -4.7 ~ 0.0 m,场地设计高程 7.0 m,交工高程约 6.3 m,回填厚度 6.3 ~ 11.0 m。采用港池航道内疏浚开挖的粉细砂和粉质黏土形成陆域填料,其中粉细砂在原位状态下的含泥量为 0.1% ~ 32.5%,平均 6.9%,标准贯入试验击数平均值为 14.2 击;粉质黏土在原位状态下的平均含水率 44%,标准贯入试验击数平均值为 9.3 击。

场地吹填疏浚土成陆时,采用绞吸船对粉细砂和粉质黏土进行混合吹填。吹填完成后对陆域按 30 m × 30 m 的间距进行勘察,结果显示:

1) 场地内约 14.6 万  $\text{m}^2$  的区域出现砂性和黏性冲填土同时分布的情况,且黏性冲填土一般位于吹填区表面,厚 0.4 ~ 7.0 m,其余约 20.4 万  $\text{m}^2$  区域主要填料为砂性冲填土。

2) 砂性冲填土以粉细砂为主,局部为中砂、砾砂,含贝壳碎片,部分夹黏性土。在吹填施工过程中混入较多细颗粒,含泥量 7.8% ~ 50.7%,平均 22.7%。实测标准贯入试验击数 3 ~ 15 击,平均 7.9 击;静力触探锥尖阻力 1.27 ~ 8.90 MPa,平均 5.32 MPa。

3) 黏性冲填土主要是港池航道内疏浚的粉质黏土,含大量砂,可见贝壳碎片。实测标准贯入试验击数 2 ~ 7 击,平均 4.7 击;静力触探锥尖阻力 0.28 ~ 2.87 MPa,平均 1.08 MPa;渗透系数  $6.0 \times 10^{-8} \sim 7.5 \times 10^{-8}$  m/s。

4) 原海床面以下的土层主要为工程性质较好的粉细砂、中细砂、粉质黏土等。

场地三面临海,海域设计高水位 1.87 m,设计低水位 0.30 m。勘察期间部分区域尚在进行吹填施工,测得地下水位偏高约 0.78 ~ 3.52 m,但在吹填完成后,随着吹填尾水的逐渐排出,预计地下水位将逐渐回落至设计高水位和设计低水位之间。

设计要求加固处理后的黏性冲填土地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 100$  kPa,压缩模量  $E_s \geq 6$  MPa;砂

性冲填土地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 150$  kPa, 压缩模量  $E_s \geq 10$  MPa。此外, 场地所在区域抗震设防烈度为7度, 设计基本地震加速度为  $0.1g$ , 设计地震分组为第二组, 加固后的砂土地基应满足抗液化要求。

根据场地地质条件和使用要求判断, 需对黏性和砂性冲填土进行处理, 而原海床面以下的土层工程性质较好, 满足使用要求, 无需处理。

## 2 地基处理技术方案

### 2.1 强夯适用性判断

以砂性冲填土为主的地基最经济合理的加固方法为强夯。施工勘察对砂性冲填土进行了大量颗分试验, 参照文献[3]关于强夯法适用土类的划分, 砂性冲填土强夯的适用性见图1。砂性冲填土的颗分曲线大部分位于透水性良好的1区范围内, 少部分颗分曲线位于透水性良好的1区和半透水的2区之间。粉细砂的含泥量虽然偏高, 但预计强夯法可取得较好的加固效果。

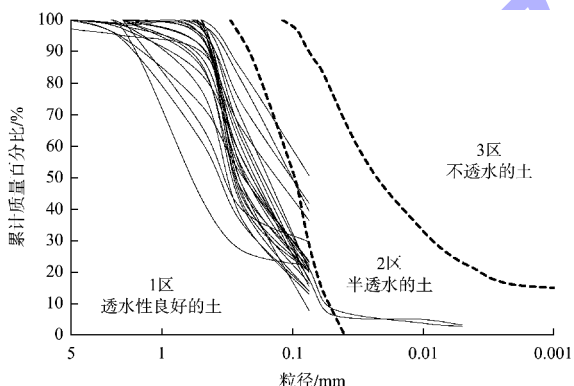


图1 砂性冲填土的颗分曲线及强夯适用性

### 2.2 夯击能的确定

不同规范关于强夯有效加固深度的建议值差别较大。以  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$  能量为例, 对于砂土地基, JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》<sup>[9]</sup> 建议的有效加固深度为  $8.0 \sim 8.5$  m, DBJ 15-31—2016《建筑地基基础设计规范》<sup>[10]</sup> 和 SJG 04—2015《深圳市地基处理技术规范》<sup>[11]</sup> 则认为人工回填粗粒土地基的强夯有效加固深度大于天然地基, 有效加固深度分别可达  $10.0 \sim 11.5$  m 和  $9.5 \sim 11.0$  m。此外,

文献[5]认为在滨海粉细砂天然地基中,  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$  能量强夯的有效加固深度为  $7.5$  m,  $15 \text{ MN} \cdot \text{m}$  能量强夯的有效加固深度为  $10.0$  m。

场地内回填料厚度大部分在  $9$  m 以上, 最大约  $11$  m。因此, 选择合适的强夯能量是地基处理的关键, 对工程费用和能耗具有显著影响。

根据广东省和深圳市规范, 地基处理拟采用  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$  的能量进行强夯, 但效果存疑, 需进行试验性施工。试夯区面积  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ , 所在位置的回填层厚  $11.2 \sim 12.0$  m, 以砂性冲填土为主, 表层局部分布黏性冲填土。强夯按2遍点夯和1遍满夯进行施工, 点夯能量  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 。第1遍夯点间距  $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ , 每点夯击数12击; 第2遍夯点在第1遍夯点中间插档布置, 间距也为  $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ , 每点夯击数12击; 满夯能量  $1 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 按  $1/4$  锤印搭接, 每点夯击数2~3击。由于表层黏性冲填土的渗透性低, 强夯产生的孔隙水压力消散缓慢, 两遍点夯及满夯的间隔时间需21 d。

试夯期间地下水位距离地表  $5.5 \sim 6.2$  m。对于表层有黏性冲填土的情况, 当夯坑深度偏大或提锤困难时, 采用周边场地的干砂进行回填。试夯后的主要检测结果及结论如下:

1) 试验区布置3个孔隙水压力观测点, 埋设深度分别为  $3$ 、 $5$ 、 $9$  m, 均在砂性冲填土中。观测结果显示, 每次点夯后的孔隙水压力都有所上升, 经过  $12 \text{ h}$  后超孔隙水压力已基本消散。

2) 强夯后布置6个静力触探试验点, 其中夯点3个, 夯点间3个。夯点位置砂性冲填土锥尖阻力在深度  $7$  m 以内平均为  $18.86 \text{ MPa}$ , 深度  $7$  m 以下平均为  $13.98 \text{ MPa}$ ; 夯点间砂性冲填土锥尖阻力在深度  $7$  m 以内平均为  $17.20 \text{ MPa}$ , 深度  $7$  m 以下平均为  $11.85 \text{ MPa}$ 。按静力触探结果判断, 强夯后砂性冲填土已达密实状态, 锥尖阻力为夯前的  $2.2 \sim 3.5$  倍。强夯后黏性冲填土的锥尖阻力为  $2.43 \sim 3.70 \text{ MPa}$ , 是夯前的  $2.3 \sim 3.4$  倍。

3) 强夯后布置6个标准贯入试验点, 其中夯点3个, 夯点间3个。夯前、夯后和抗液化要求最小标贯击数的对比见图2。可知强夯在上部约  $7$  m

深度范围内的加固效果最好,在 7 m 以下的加固效果逐渐下降,但除个别数据以外,绝大部分仍满足抗液化要求。强夯后黏性冲填土的标贯击数为 6.7~8.4 击。经换算,砂性冲填土和黏性冲填土的压缩模量均满足设计要求。

4) 强夯后在试夯区进行浅层载荷板试验。根据文献[10]和 JTS 133—2013《水运工程岩土勘察规范》<sup>[12]</sup>中的规定,当  $p-s$  曲线上无明显直线段时,对于一般黏性土和软土,可取相对沉降  $s/b=0.02$  对应的压力为地基承载力特征值。结果显示:场地表层夯后为含砂量较大的黏性冲填土,地基承载力特征值满足不低于 150 kPa 的要求。

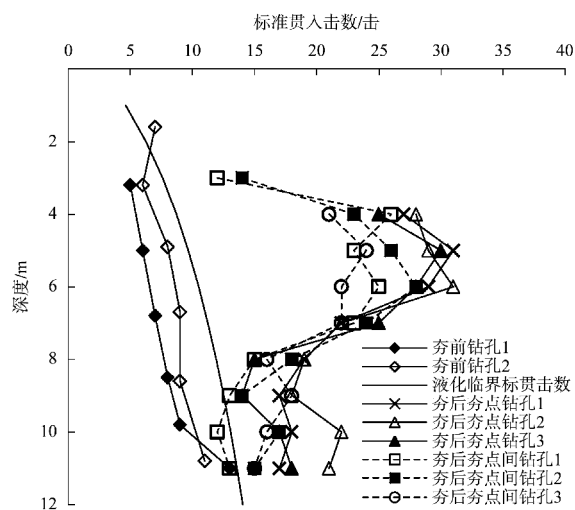


图2 试夯区夯前、夯后和抗液化要求标贯击数对比

综上,在本项目以砂性冲填土为主、局部分布黏性冲填土的地基中 5 MN·m 能量强夯是适用的,最大处理深度可达 11 m。按照 Menard 公式估算,5 MN·m 强夯的有效加固深度修正系数为 0.49,远大于文献[5]中的 0.32,说明同一能级强夯在人工回填粉细砂地基中的有效加固深度明显大于在天然粉细砂地基中的深度。

### 3 全场地强夯处理效果分析

#### 3.1 全场地地基处理和检测方案

在进行全场地大面积施工时,除靠近边界的局部区域采用 1.5 和 3 MN·m 的能量进行强夯外,其余区域的强夯能量均为 5 MN·m。夯点布置与试夯区相同,点夯收锤标准为最后 2 击的平均夯沉

量不大于 50 mm,满夯的夯击数增加为 4 击。在只有砂性冲填土的区域,遍夯间隔时间为 3~5 d;在表层有黏性冲填土的区域,视具体情况确定是否采用周边场地的砂料进行夯坑回填,遍夯间隔时间适当延长。

强夯结束后,在场地内每 400 m<sup>2</sup> 布置 1 个载荷板试验点,共计 71 个,所有试验点均加载至设计承载力特征值的 2 倍;布置 169 个标准贯入试验孔和 363 个静力触探孔,全部贯穿回填土层。

#### 3.2 检测结果对比

##### 3.2.1 标准贯入试验

强夯后在砂性冲填土中的不同深度处共有 1 023 个标准贯入试验点,实测击数为 4~58 击,平均 22.3 击,为夯前标贯平均值 7.9 击的 2.8 倍。夯后除 3 个标准贯入试验点显示场地属于轻微液化以外,其余均为不液化。

强夯前后砂性冲填土层标准贯入试验击数沿深度的变化情况见图 3。夯后土层标准贯入试验击数较夯前大幅提高,且全部深度范围内加固效果明显,经统计在各个深度处的击数提高比例为 2.7~2.8 倍,较为均一。与图 2 相比,场地大面积强夯施工后的密实效果优于试夯区,在深层强夯处理效果良好,更加证实了在水力冲填粉细砂地基中,5 MN·m 强夯有效加固深度可达 11 m。

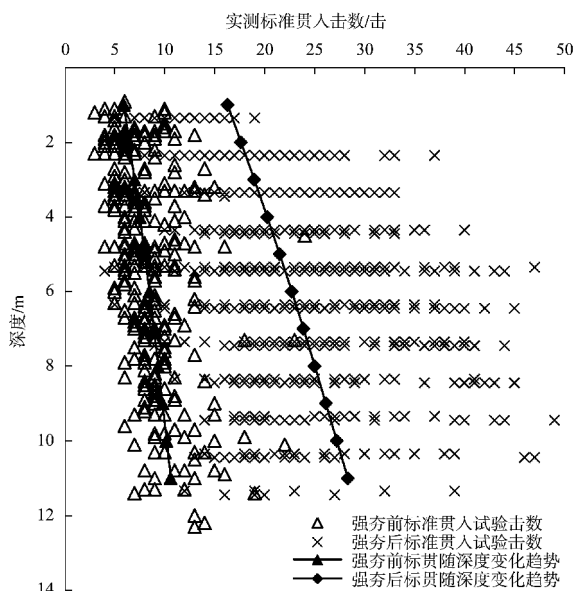


图3 强夯前后砂性冲填土标准贯入试验击数对比



### 3.2.2 静力触探试验

强夯前后砂性冲填土厚度大的区域具有代表性的静力触探结果见图4。对比可知,强夯后砂性冲填土的静力触探锥尖阻力明显增大。强夯前砂性冲填土的锥尖阻力为1.27~8.90 MPa,平均5.32 MPa;强夯后锥尖阻力为0.01~43.87 MPa,平均11.04 MPa,为夯前的2.1倍。在11 m深度处,砂性冲填土的锥尖阻力仍明显增长,且满足设计要求,也说明5 MN·m强夯在水力冲填粉细砂地基中的有效加固深度可达11 m。

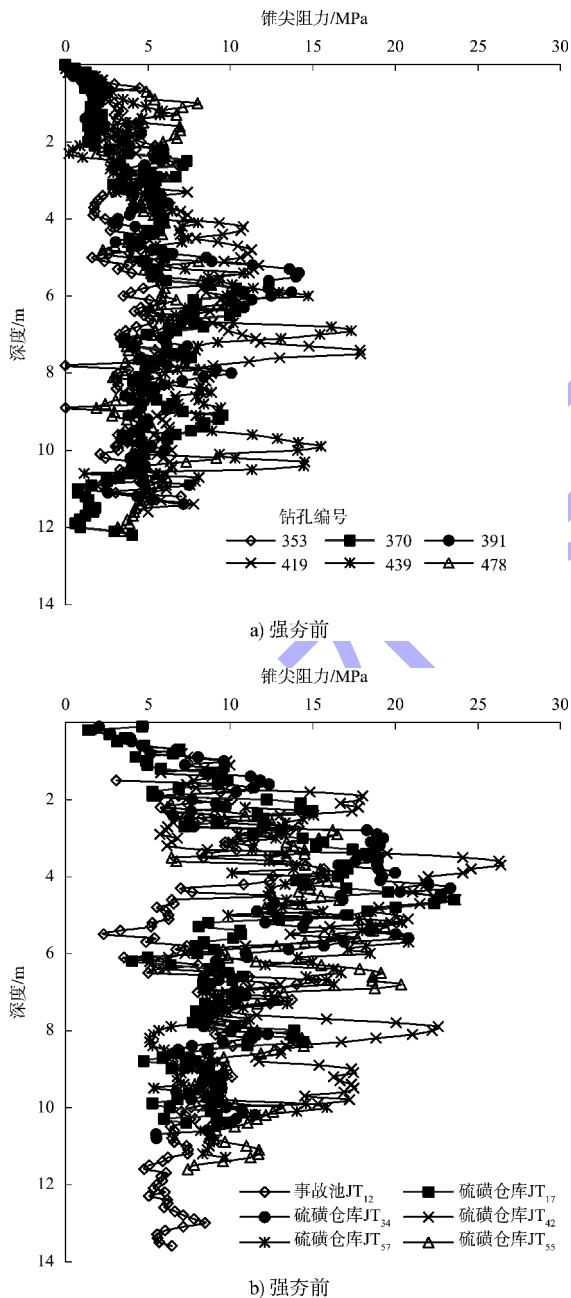


图4 强夯前后冲填砂性土静力触探锥尖阻力典型曲线

### 3.2.3 载荷板试验

强夯后场地内71个载荷板试验点加载至300 kPa时均未达到破坏标准,且曲线平滑,未出现明显拐点。对于砂性和黏性冲填土,取相对变形 $s/b=0.01$ 对应的压力且不超过最大加载量的一半作为地基承载力特征值,所有载荷板试验点的地基承载力特征值 $f_{ak}$ 均不小于150 kPa。

根据标准贯入试验、静力触探试验和载荷板试验结果综合判定,砂性和黏性冲填土的压缩模量 $E_s$ 平均值分别为21和6 MPa,满足设计不低于10和6 MPa的要求。

### 3.3 特殊条件下的强夯处理效果

场地内约42%的区域表层为含有大量砂的黏性冲填土,对下部砂性冲填土的处理效果可能有不利影响。将上部为黏性冲填土、下部为砂性冲填土的情况与全部为冲填砂性土的情况进行对比,强夯后的实测标准贯入试验结果见图5。

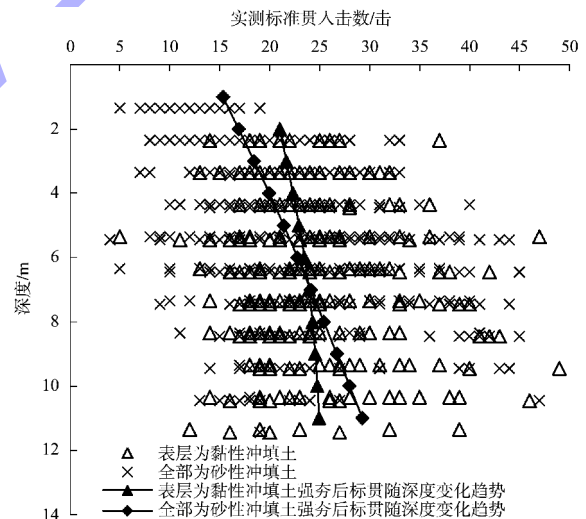


图5 在不同情况下砂性冲填土强夯后标贯击数对比

由于上部为黏性冲填土的区域在强夯期间采用周边的砂土进行夯坑回填,未发现表层冲填黏性土的存在对下部砂层的处理效果有明显不利影响。在强夯后,按照深度进行统计,全部为砂性冲填土区域的标贯击数标准值是上部为黏性冲填土、下部为砂性冲填土区域的标贯击数标准值的0.8~1.2倍,沿深度的变化规律不明显。

#### 4 结论

1) 强夯法适用于平均含泥量约 22.7% 的冲填粉细砂地基, 加固效果良好。

2) 强夯法在砂性冲填土地基中的有效加固深度大于天然砂土地基。5 MN·m 能量的有效加固深度达 11 m, 有效加固深度修正系数可取 0.49。

3) 表层黏性冲填土在采用砂土进行夯坑回填等措施时, 对下部砂性冲填土的加固效果无明显影响。

#### 参考文献:

- [1] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程塑料排水板应用技术规程: JTS 206-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] British Standards Institution. Execution of special geotechnical works - Ground treatment by deep vibration: BS EN 14731-2005 [S]. London: BSI Standards Publication, 2005.
- [3] U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Geotechnical engineering circular No. 1 - Dynamic compaction ( FHWA-SA-957-037 ) [M]. Washington: Federal Highway Administration, 1995: 10-11.

- [4] HAN J. Principles and practices of ground improvement[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015: 89-93.
- [5] 贾敏才, 刘波, 周训军. 滨海含软土夹层粉细砂地基高能级强夯加固试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 240-246.
- [6] 张璟泓, 周红星, 王婧, 等. 细粒含量对强夯加固粉细砂效果的影响[J]. 水运工程, 2021(9): 194-200.
- [7] 李富春, 张璟泓, 周红星, 等. 粉粒及黏粒含量对强夯加固粉细砂土层效果的影响[J]. 人民长江, 2022, 53(8): 186-191.
- [8] 王彭生, 熊建波, 陈明杰, 等. 基于统计分析的吹填材料粒径分布对强夯地基处理效果影响[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1): 204-210.
- [9] 中国建筑科学研究院. 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.
- [10] 广州市建筑科学研究院有限公司, 华南理工大学建筑设计研究院. 建筑地基基础设计规范: DBJ 15-31—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [11] 深圳市勘察设计院有限公司, 深圳市工勘岩土工程有限公司. 深圳市地基处理技术规范: SJG 04—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [12] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 215 页)

3) 针对灌注桩钢护筒施打, 可在钢平台上先用旋挖钻机引孔, 再植入钢护筒, 以达到护筒底与岩层之间的密实效果。工程采用引孔植桩新工艺, 解决了深水裸岩环境下的灌注桩施工难题, 缩短工期, 并积累了较丰富的施工经验, 可为类似地质条件的灌注桩实施提供参考借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京:

人民交通出版社股份有限公司, 2018.

- [2] 杨胜生, 杨建冲. 大直径植入式钢管嵌岩桩施工技术[J]. 水运工程, 2022(4): 197-202.
- [3] 张志超. 浅谈深水裸岩钢栈桥搭设施工技术[J]. 江西建材, 2021(5): 79-80.
- [4] 曾治平. 深水裸岩及斜面岩河床钻孔灌注桩钢护筒施工[J]. 山西建筑, 2017, 43(12): 78-79.
- [5] 柯灵, 徐继忠, 郑体. 植入法沉桩技术在基桩工程中的应用[J]. 四川建筑, 2019, 39(3): 214-215, 218.
- [6] 贺家树. 钻孔植桩施工技术在高桩码头中的应用[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 85-89.

(本文编辑 赵娟)