

空心方桩和钉型双向粉喷桩复合结构在旗台的首次应用

倪思琦

连云港港口工程设计研究院有限公司, 江苏 连云港 222000

[摘要]一种适用于沿海深厚吹填土地基处理的复合桩型结构, 包括预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩及上部褥垫层; 预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩沿横向和纵向依次交替间隔布置, 预应力混凝土薄壁空心方桩的底部打入地基持力层; 预应力混凝土薄壁空心方桩的上部设置钢筋混凝土承台, 钢筋混凝土承台顶面与钉型双向搅拌粉喷桩顶面处于同一高程, 褥垫层铺设在预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩的顶部, 褥垫层中间铺设钢塑格栅。

[关键词]搅拌粉喷桩; 地基处理; 方桩; 复合桩型

DOI: 10.33142/sca.v4i5.4900

中图分类号: TU7

文献标识码: A

The First Application of Composite Structure of Hollow Square Pile and Nail Type Two-way Powder Jet Grouting Pile in Flag Platform

NI Siqu

Lianyungang Port Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract: A composite pile structure suitable for coastal deep dredger fill foundation treatment, including prestressed concrete thin-walled hollow square pile, nail type bidirectional mixing powder jet pile and upper cushion layer; Prestressed concrete thin-walled hollow square pile and nail type bidirectional mixing powder jet pile are arranged alternately along the transverse and longitudinal directions, and the bottom of prestressed concrete thin-walled hollow square pile is driven into the foundation bearing layer; The upper part of the prestressed concrete thin-walled hollow square pile is provided with a reinforced concrete bearing platform, the top surface of the reinforced concrete bearing platform is at the same elevation as the top surface of the nail type bidirectional mixing powder spraying pile, the cushion layer is laid on the top of the prestressed concrete thin-walled hollow square pile and the nail type bidirectional mixing powder spraying pile, and the steel plastic grid is laid in the middle of the cushion layer.

Keywords: mixing powder jet grouting pile; foundation treatment; square pile; composite pile type

1 研究的目的与意义

我国拥有 18000km 的海岸线, 沿海有辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、广西和海南等 12 个省、市、自治区, 海涂非常发育, 开发潜力大。同时, 随着我国沿海城市经济建设的迅猛发展, 沿海地区人口越来越多, 对土地的需求量也越来越大, 而利用沿海潮间带淤泥滩地填海造陆则是缓解土地资源紧张局面的有效途径。据初步统计, 新中国成立以来我国已围海造地约 1.2 万公顷, 相当于现有滩涂面积的 55%, 用吹填淤泥填海造陆已成为沿海城市土地开发的重要手段。特别是在港口建设中, 一方面, 港口后方陆域的形成需要大量的工程填料, 另一方面, 航道与港池的扩建又需要挖除大量的海底淤泥, 若将挖除的淤泥用于填海造陆, 不仅能大大降低近海抛泥弃淤对海洋环境的污染, 还能够节约造陆工程成本。

围海造陆通常采用吹填方式形成, 首先建造围堰工程, 将浅海进行合围, 形成固定的吹填区域, 然后, 将疏浚航道底泥或浅海淤泥与海水以一定的比例混合成泥浆, 并用吹管将其输送至吹填区域, 经落淤、泌水、固结后形成陆域, 因此, 吹填淤泥具有特殊的工程性质——高含水率、高压缩性、高孔隙比、高灵敏度、结构性差、固结程度低等。吹填土地基一般不能满足工程需要, 必须经过加固处理才能使用。

对于吹填土地基, 为满足地基承载力和变形控制的要求, 目前一般可采用堆载预压法、真空联合堆载预压法、强夯法、水泥搅拌桩、挤密碎石桩、预制管桩、低强度桩复合地基法等, 这些工法在吹填土地基中都起到一定的作用, 但都有其适用范围, 存在着一定的局限性。堆载预压受到工期限制, 深层水泥土搅拌桩则受到搅拌处理深度和工后沉降等限制, 预应力钢筋混凝土管桩则易受后期地基沉降诱发的桩侧负摩擦力作用而出现承载力降低, 且受其工程造价的限制, 所以常用的地基处理方法并不能同时满足承载力、变形控制和节约造价的要求。

根据连云港港连云港旗台作业区液体散货区总平面布置及工艺要求, 研究内部专用铁路地基处理方案。通过研究适合本地区吹填土的搅拌桩、预制桩地基处理工艺, 充分发挥该该工艺工程造价低, 污染小等优点; 连云港旗台

作业区液体散货泊位内部专用铁路工程路基工程施工区域地基土层主要为新近吹填土、海相沉积的淤泥质土、含水量高、压塑性高、后期铁路整体道床设计要求较高，对施工过程中地基处理质量控制提出了更高的要求。

针对上述情况，结合现有技术条件，提供一种适用于沿海深厚吹填土地基处理的复合桩型结构及施工方法，即可满足承载力和变形控制的要求，又能缩短工期，必然会为连云港港后续同类施工带来较大的经济效益，突破连云港软土地基二次处理技术发展的瓶颈。

2 工程概况

连云港港旗台作业区液体散货泊位内部专用铁路工程路基工程位于连云港港旗台作业区，北侧为 30 万吨航道及相应码头泊位，南侧为旗台山与南防波堤。本工程由西向东依次经过海军营地陆域、25 万吨级矿石码头后方堆场区域、25 万吨矿石码头堆场铁路装卸线东延伸段区域、液体化工罐区陆域与旗台吹填区 2-1 区。本工程 D 区为整体道床段，D 区采用预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩加固。方桩尺寸 0.45×0.45m，内径 0.25m，长 35m~40m，桩间距为 3.4m，进入持力层不小于 1m，桩顶设 1.6×1.6m，厚 0.35m 的 C40 钢筋混凝土桩帽（承台）；钉形桩扩大头直径为 0.9m、扩大头高 4.0m，钉形桩桩径 0.5m、桩长 11m、桩间距为 1.7m。

用于沿海深厚型吹填土地基处理的新型复合桩型，包括预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩及上部褥垫层。预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩桩位依次纵横等间距间隔设置，隔排设预应力混凝土薄壁空心方桩，且同排的预应力混凝土薄壁空心方桩与钉型双向搅拌粉喷桩相互间隔设置。横向或纵向成排的钉型双向搅拌粉喷桩中，相邻的两个钉型双向搅拌粉喷桩的中间位置还设加设有一个钉型双向搅拌粉喷桩，并使得复合桩型结构的外层均为钉型双向搅拌粉喷桩，如图 1 所示。

钉型双向搅拌粉喷桩的长度为吹填土地基厚度的 1/3~1/2。预应力混凝土薄壁空心方桩的边长为 0.45~0.6m，内径为 0.25~0.35m，桩间距为 3.0~3.6m；钉型双向搅拌粉喷桩的上部扩大头桩径为 0.8~1.0m，扩大头高度 4~6m，钉型双向搅拌粉喷桩的下部桩径为 0.5~0.6m，桩间距为 1.5~1.8m。预应力混凝土薄壁空心方桩上部的钢筋混凝土承台边长为 1.6~1.8m，厚度 0.4~0.5m；褥垫层的厚度不少于 50cm。如图 2 所示。（其中 1、钢筋混凝土承台 2、钉型双向搅拌粉喷桩扩大头 3、混凝土薄壁空心方桩 4、钉型双向搅拌粉喷桩下部桩身 5、褥垫层 6、基床）

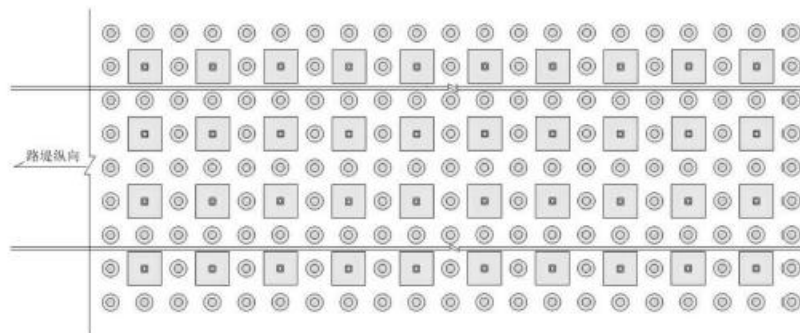


图 1 方桩和钉型双向搅拌粉喷桩平面布置示意图

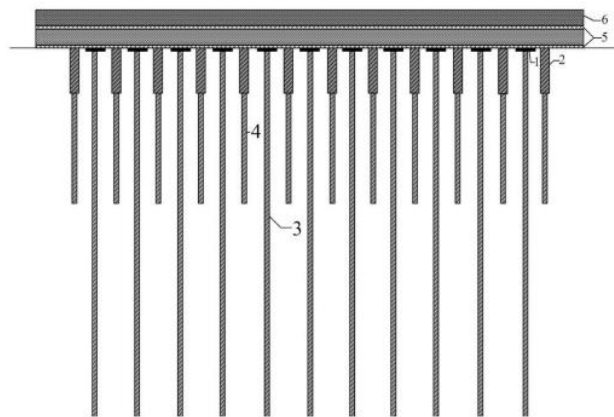


图 2 复合桩型结构断面图

连云港港旗台作业区液体散货泊位内部专用铁路工程路基工程中, 预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩在平面上呈正方形布置, 桩间距为 1.7m, 预应力混凝土薄壁空心方桩桩间距为 3.4m。预应力薄壁方桩尺寸为 0.45×0.45m, 内径为 0.25m, 混凝土强度等级 C80, 桩长为 35~40m。预应力混凝土薄壁空心方桩顶部采用尺寸为 160×160×40cm 的现浇钢筋混凝土承台, 混凝土等级为 C30。钉型双向搅拌粉喷桩桩长为 15m, 上部扩大头桩径为 0.9m, 高 5m, 下部桩径为 0.5m, 桩长 11m。钢筋混凝土承台顶面与钉型双向搅拌粉喷桩顶面处于同一高程。预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩顶部设置褥垫层。预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩上部铺设 50cm 的碎石垫层, 分两层进行铺设, 中间层铺设一层钢塑格栅。复合桩型结构地基的施工工艺流程, 包括如下步骤:

步骤 1, 在沿海深厚吹填土地基区域确定预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩的桩位, 预应力混凝土薄壁空心方桩的桩位和钉型双向搅拌粉喷桩的桩位沿横向和纵向依次交替间隔布置, 并使得复合桩型结构的外层均为钉型双向搅拌粉喷桩。

步骤 2, 预应力混凝土薄壁空心方桩的施工: 预应力混凝土薄壁空心方桩施工从加固区中心向两侧布桩, 接桩均采用钢端板焊接法焊接, 焊好的桩接头在自然冷却采用静压法或者锤击法开始施打, 施工过程中桩身垂直度偏差不大于 0.5%, 预应力混凝土薄壁空心方桩的底部打入地基持力层, 所有预应力混凝土薄壁空心方桩施工完毕后, 桩顶高差应控制在 15cm 以内。

步骤 3, 钉型双向搅拌粉喷桩的施工: 钉型双向搅拌粉喷桩施工从加固区中心向两侧布桩, 钉型双向搅拌粉喷桩上部扩大头采用四搅两喷施工工艺, 下部桩体采用二搅一喷施工工艺。其中, 施工工艺参数为: 水泥采用 42.5 矿渣水泥, 水泥掺入量为被加固湿土质量的 12%~20%, 钻进速度 1.0~1.2m/min, 提升速度 0.5~0.8m/min, 旋转速度 30~50 转/min, 钻进时喷灰压力 0.4~0.7MPa, 内钻杆电流为 20~30A, 外钻杆电流为 60~100A。具体施工过程:

- (1) 粉喷桩机定位;
- (2) 切土下沉, 同时开启送灰泵向土体喷水泥粉, 两组叶片同时正、反向旋转下沉, 直到扩大头设计深度;
- (3) 收缩叶片, 两组叶片同时正、反向旋转, 搅拌机持续下沉, 直到设计深度;
- (4) 提升搅拌, 关闭送灰泵, 两组叶片同时正反向旋转搅拌水泥土, 至扩大头底面标高;
- (5) 伸展叶片, 改变内外钻杆的旋转方向, 将搅拌叶片伸展到直径 900mm; 搅拌机提升, 两组叶片同时正反向旋转搅拌水泥土, 直到地表或设计桩顶标高以上 50cm;
- (6) 切土下沉, 同时开启送灰泵, 向土体喷水泥灰, 两组叶片同时正、反向旋转切割、搅拌土体, 直到扩大头设计深度;
- (7) 提升搅拌, 关闭送灰泵, 两组叶片同时正反向旋转搅拌水泥土, 直到地表或设计桩顶标高以上 50cm, 完成单桩施工。

步骤 4, 在每个预应力混凝土薄壁空心方桩顶部采用现浇方法设置钢筋混凝土承台。具体施工过程为: 先在桩顶绑扎钢筋笼, 设置现浇模板, 再进行混凝土浇筑, 待混凝土凝固后拆除模板。

步骤 5, 褥垫层的施工: 在钢筋混凝土承台养护 7 天后, 在桩顶铺设碎石垫层, 碎石垫层共分两层进行铺设, 先铺设一层 25cm 的碎石垫层, 经压路机碾压后铺设第二层钢塑格栅, 再铺设一层 25cm 的碎石垫层, 经碾压后即完成碎石垫层的铺设。

3 监测(检测)结果

3.1 取芯试验

本工程采用预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌桩处理的 D 区, 钉形水泥搅拌桩取芯共计 21 根, 龄期为 28~52 天, 芯样无侧限抗压强度最小值为 0.60MPa, 芯样无侧限抗压强度最大值为 13.19MPa, 平均值 3.13MPa。钉形水泥搅拌桩取芯检测均满足设计要求。

3.2 钉形水泥搅拌桩载荷试验

本工程采用预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌桩处理的 D 区, 钉型双向搅拌桩复合地基单桩载荷试验共计 14 个。复合地基单桩载荷试验荷载板尺寸为桩的截面积(直径 D=0.9m), 并按照《铁路工程地基处理技术规程》(TB10106-2010)实施。通过对现场载荷试验 P~S 曲线分析结果可以看出复合地基单桩载荷试验均满足设计要求。

本工程采用预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌桩处理的 D 区, 钉型双向搅拌桩复合地基载荷试验为 14 个。

复合地基载荷试验根据单桩有效处理面积确定载面板尺寸, 并按照《铁路工程地基处理技术规程》(TB10106-2010) 实施。通过对现场载荷试验 P~S 曲线分析结果可以看出复合地基载荷试验均满足设计要求。

3.3 预制桩低应变、高应变及承载力试验

本工程采用预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩处理的 D 区, 方桩低应变共计检测 1915 根, 其中 I 类桩 1907 根、II 类桩 8 根。

D 区方桩高应变共计检测 96 根桩, 检测情况如下: 桩长为 35m 桩高应变共计检测 43 根, 检测单桩承载力为 1501 kN~1614 kN, 单桩承载力满足设计要求。

D 区方桩承载力试验 20 根, 方桩单桩静载试验 20 根桩, 其中桩长 35m 为 8 根, 桩长 40m 为 12 根, 单桩承载力均满足设计要求。

4 经济效益、社会效益及推广前景

4.1 经济效益

钉型双向搅拌粉喷桩基于复合地基应力传递与承载优化原理, 提高上部桩体置换率, 重点加固上部附加应力大的软土层。和普通等截面水泥土粉喷桩相比, 钉型双向搅拌粉喷桩可以增加桩土锚固效果, 在保证承载力的前提下, 增大桩间距, 节约工程造价。本工程复合桩型地基处理区域搅拌桩共 5684 根, 采用钉型双向搅拌粉喷桩单价约为 1220 元/根, 若采用传统非变径同截面搅拌粉喷桩(桩长 15m, 桩径 0.9m) 单价约为 2490 元/根, $5684 \times (2490 - 1220) = 7218680$ 元, 即本工程复合桩型地基处理节约工程造价约 720 万元。

4.2 社会效益

预应力混凝土薄壁空心方桩处理深度大, 能够加固深层的软土, 从而大幅度地减小地基变形; 和预应力管桩相比, 相同体积混凝土形成的方桩外表面积大, 且由于外形呈方形或多边角型, 在土层中桩体与土的休止角比圆形的表面大的多, 使得在同等地质条件下, 方桩能获得更大的承载力。预应力混凝土薄壁空心方桩内部形成的土塞可以进一步提高桩体承载力。在预应力混凝土薄壁空心方桩顶部设置的钢筋混凝土承台可以调整桩土荷载分担比, 充分发挥预应力混凝土薄壁空心方桩的高承载力性能。

4.3 推广前景

钉型双向搅拌粉喷桩基于复合地基应力传递与承载优化原理, 提高上部桩体置换率, 重点加固上部附加应力大的软土层。和普通等截面水泥土粉喷桩相比, 钉型双向搅拌粉喷桩可以增加桩土锚固效果, 在保证承载力的前提下, 增大桩间距, 节约工程造价。预应力混凝土薄壁空心方桩处理深度大, 能够加固深层的软土, 从而大幅度地减小地基变形; 和预应力管桩相比, 相同体积混凝土形成的方桩外表面积大, 且由于外形呈方形或多边角型, 在土层中桩体与土的休止角比圆形的表面大的多, 使得在同等地质条件下, 方桩能获得更大的承载力。预应力混凝土薄壁空心方桩内部形成的土塞可以进一步提高桩体承载力。预应力混凝土薄壁空心方桩和钉型双向搅拌粉喷桩的复合桩型结构, 可满足承载力和变形控制的要求, 节约工程造价, 又能缩短工期, 必然会为连云港港后续同类施工带来较大的经济效益, 突破连云港软土地基二次处理技术发展的瓶颈, 适合处理对承载力、变形控制要求高的围海造陆、铁路路基等工程, 具有良好的推广应用价值。钉型双向搅拌粉喷桩计划在上合组织国际物流园铁路专用线工程中推广应用。

[参考文献]

- [1] 毛忠良. NG 改良土桩在铁路软土地基处理工程中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2012(1): 111-115.
- [2] 龚晓楠. 高速公路软弱地基处理理论和实践[M]. 上海: 上海大学出版社, 1998.
- [3] 刘松玉. 粉喷桩复合地基理论和工程应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [4] 卞保宽. 铁路软土铁路路基钉型搅拌桩加固设计方法探讨[J]. 铁道建筑技术, 2016(4): 80-83.
- [5] 席培胜, 刘松玉. 钉形水泥搅拌桩荷载传递规律[J]. 建筑结构, 2014(14): 96-99.
- [6] 贺微, 杜广印, 易耀林. 变截面搅拌桩加固双层软弱地基承载特性[J]. 公路交通科技, 2014(6): 63-66.
- [7] 刘锋. 水泥搅拌桩加固软土路基沉降分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.

作者简介: 倪思琦(1990.4-) 女, 毕业院校: 淮海工学院, 所学专业: 港口航道与海岸工程, 当前工作单位: 连云港港口工程设计研究院有限公司, 职务: 设计员, 职称级别: 中级工程师。