



海域人工岛深厚抛石层下的旋喷桩施工技术 *

侯禹辰，祝阿龙，刘坤，赵永才，匡隆川
(中铁隧道集团三处有限公司，广东深圳 518000)

摘要：针对海域人工岛环境以及深厚抛石层叠加情况下旋喷桩成桩质量差的问题，结合深中通道东人工岛实际工程，基于工艺试验对旋喷桩施工技术展开两阶段研究，通过抽水及回水试验验证其止水效果，并优化后续围护结构形式。结果表明：采用旋挖换填+旋喷注浆结合并基于理论计算公式的喷浆提升速度动态调控的旋喷桩施工方法成桩效果显著，可有效解决抛石层浆液流失的施工难题；灌注桩+桩间止水旋喷桩的围护结构形式能够满足基坑开挖的止水需求，可取消外排止水帷幕的施工。

关键词：深中通道；旋喷桩；抛石层；海域人工岛；施工技术

中图分类号：U445.55+1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)08-0213-06

Construction technology of rotary jet piles under deep riprap layer of artificial island in sea area

HOU Yuchen, ZHU Along, LIU Kun, ZHAO Yongcui, KUANG Longchuan
(China Railway Tunnel Group Sanchu Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: For the poor quality of rotary jet piles in the sea artificial island environment and the superposition of deep riprap layer, combined with an actual project of the east artificial island of the Shenzhen-Zhongshan Bridge, we carry out a two-stage study on the construction technology of rotary jet piles based on the process test to verify the water stopping effect by water pumping and recovery tests and optimize the subsequent enclosure structure form. The results show that the rotary jet pile construction method combining rotary excavation for filling and rotary spray grouting combined and adopting dynamic control of slurry lifting speed based on theoretical calculation formula is effective, which can effectively solve the construction problems of slurry loss in the riprap layer. The enclosure structure form combining infill pile and inter-pile water stop rotary jet pile can meet the water stop demand of the pit excavation and can eliminate constructing the external waterproof curtain.

Keywords: Shenzhen-Zhongshan Bridge; rotary jet pile; riprap layer; artificial island in sea area; construction technology

高压旋喷技术是以旋转的喷头喷出高压射流切削土体，然后水泥浆与切削下来的部分土体混合形成水泥土混合物，经过一段时间的固化之后，形成旋喷加固体(称为高压旋喷桩)^[1-2]。该工艺对于淤泥、淤泥质土等软土地层加固效果较为显著^[3]，已在各个领域得到了广泛的运用，但对于

抛石、块石、石渣层等透水性高的地质环境因浆液流失严重而导致成桩质量差，无法达到地基加固、围护止水的效果^[4-5]，将会对后续基坑开挖等工序的施工埋下严重的安全隐患。深中通道东人工岛 E 匝道穿越福永码头抛石斜坡堤，海域人工岛区域地质条件复杂且存在深厚抛石层(厚度达

收稿日期：2022-11-08

*基金项目：中铁股份公司重大科研课题项目（20190703）；中铁隧道局重大科研课题（201824）

作者简介：侯禹辰（1996—），男，硕士，助理工程师，从事地下及市政工程施工与研究。

5.6~16.2 m), 旋喷桩施工存在一系列技术难题, 并且目前该领域的研究较少、可参考资料局限性大。本文以实际工程施工为依托, 对海域人工岛深厚抛石层的旋喷桩施工进行研究, 对施工方法以及相关参数进行分析总结, 提出了关键施工技术, 可有效保证海域复杂地质环境的旋喷桩成桩质量, 并通过抽水试验验证止水效果, 可为类似工程提供参考。

1 工程概况

深中通道工程建设条件复杂、工程规模宏大、综合技术难度非常高, 是世界级的集“桥-岛-隧-水下枢纽互通”于一体的超大型跨海交通基础设施工程^[6]。其中东人工岛及主线堰筑段隧道工程位于深圳侧岸滩, 东侧与机荷高速枢纽衔接, 西接沉管隧道, 南北向与沿江高速机场衔接。E匝道岛上段隧道位于人工岛北侧, 东侧紧临广深沿江高速, 西侧穿越福永码头抛石斜坡堤, 全长365 m, 宽11.65~23.8 m, 开挖深度0~14 m, 共15个结构段。工程平面见图1。



图1 东人工岛平面图

E匝道隧道围护结构为φ800 mm@1 000 mm钻孔灌注桩+φ800 mm@1 000 mm桩间止水+φ800 mm@600 mm后排旋喷桩止水帷幕, 旋喷桩桩长为24 m, 加固区域地层自上而下主要为回填砂层、抛石层、淤泥层、砂质黏土层、全风化花岗岩层等。回填砂层为中粗砂(粒径在0.25~0.50 mm的颗粒质量超过总质量的50%); 抛石层由1~500 kg的堤心石、200~300 kg的护面块石组成; 淤泥层具有含水量高、孔隙比大、高压缩性、低强度、低渗透性、易触变和流变等特点, 稳定

性极差, 在荷载作用下易侧向滑移、挤出及不均匀沉降。围护结构及地层见图2。

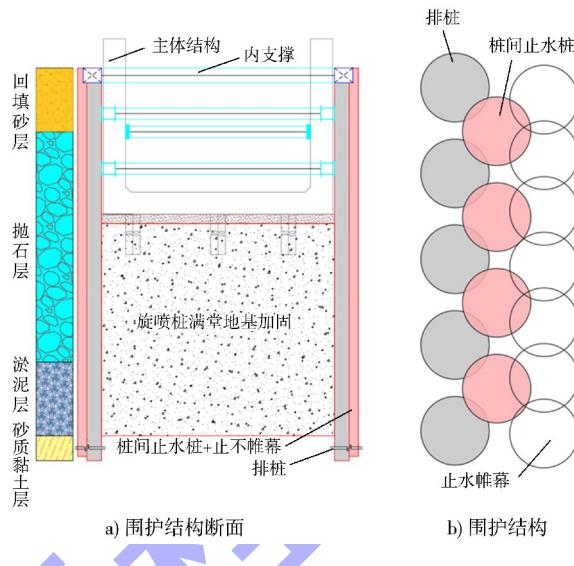


图2 围护结构及地层

2 施工方案的确定

选择E匝道第8结构段做三重管旋喷桩试桩研究, 分2个阶段进行实施: 第1阶段采用抛石层引孔+旋喷注浆进行施工, 共施工12根, 其中水泥掺量为30%的7根、25%的5根, 选定的试桩包括灌注桩桩间之水以及后排止水帷幕; 第2阶段采用旋挖换填+旋喷注浆进行施工, 共施工3根, 水泥掺量为25%, 选定的试桩仅为桩间止水桩。旋喷桩施工参数为: 水灰比1.0, 泥浆密度1 540 kg/m³, 水泥掺量25%、30%, 对应的每延米水泥用量200、241 kg/m, 气压0.6、0.8 MPa, 水压25~30 MPa, 水泥浆喷浆压力0.6~1.0 MPa, 水泥浆流量37~43 L/min(25%掺量)、45~51 L/min(30%掺量), 旋转速度11~14 r/min, 提升速度14~16 cm/min。

试桩施工采用流量计、后台自动拌浆系统等设备对相关施工参数进行严格把控, 利用总结出的提速计算公式对喷浆提升速度进行动态调控, 及时纠偏, 保证试验桩的水泥用量满足相关要求。公式为:

$$v_t = \frac{100v_1\gamma}{\pi r^2 \rho S (1+m_w/m_c)} \quad (1)$$

式中: v_t 为喷浆提升速度, cm/min; v_1 为流量计显示的注浆流速, L/min; γ 为自动拌浆后台系统

的泥浆密度, kg/m^3 ; ρ 为加固土层的密度, kg/m^3 ; S 为水泥掺量百分比; m_w/m_c 为水灰比; r 为加固旋喷桩半径, m 。

2.1 抛石层引孔+旋喷注浆试验

原定第1阶段的施工方法是首先直接采用潜孔钻机引孔至抛石层底部, 再用旋喷桩桩机下钻至设计桩底工程进行喷浆提升作业, 但在实际施工时存在以下问题: 上部为人工回填砂层, 较为松散, 未等旋喷桩桩机下钻便发生了严重塌孔; 抛石层透水性强, 存在串浆现象, 相邻桩位的引孔被破坏。

针对以上问题, 改进了第1阶段试验的施工方法, 最终采取的工艺流程为: ①首先对回填砂层进行旋喷桩加固施工; ②等待3 d以上, 已加固的旋喷桩具有了一定的强度, 再采用潜孔钻机进行引孔作业, 穿透抛石层直至淤泥层顶部, 引孔钻头直径比旋喷桩钻杆大20 mm, 垂直度偏差不超过1/200, 并在原桩位埋设标记聚氯乙烯套管, 防止堵孔; ③最后再将旋喷桩桩机就位至引孔处, 下钻至设计桩底喷浆提升。关键施工流程见图3。

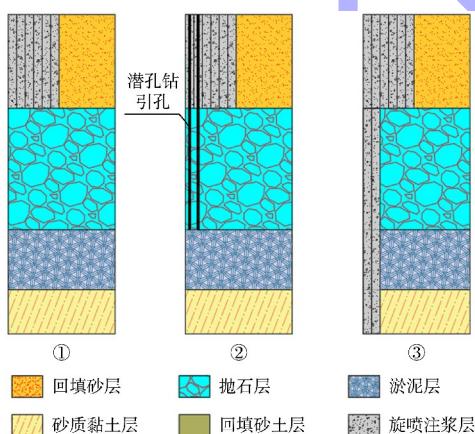


图3 第1阶段试验施工流程

2.2 旋挖换填+旋喷注浆试验

第2阶段试桩主要思路为对桩位旋挖开孔后再进行换填处理, 以此解决抛石层成桩困难的问题, 其关键施工流程为: ①采用履带吊配合振动锤, 下放φ900 mm钢护筒至抛石层顶部; ②利用φ800 mm旋挖钻头挖除土石, 需要钻入淤泥层2 m,

钢护筒跟进下放嵌入抛石层0.5 m; ③孔内回填砂土, 并进行压实处理; ④待回填孔具有一定密实度后, 拔出护筒; ⑤对换填孔进行旋喷注浆施工。关键施工流程见图4。

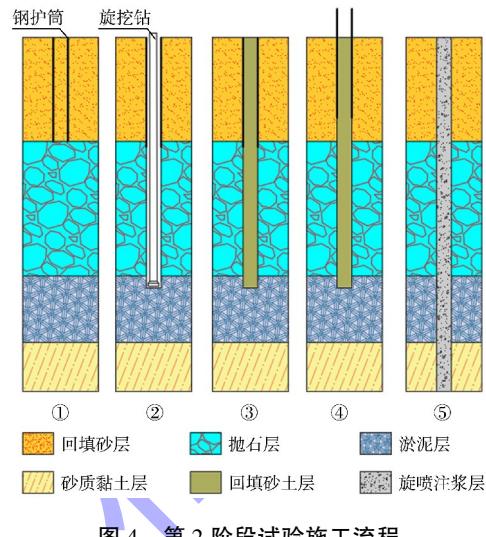


图4 第2阶段试验施工流程

2.3 施工情况及功效分析

第1阶段旋喷桩试验施工完成后将流量计的相关施工数据收集整理, 并计算单桩水泥用量, 如图5所示。根据注浆施工记录, 第1阶段12根试验桩的实际水泥用量为4.902~5.864 t, 与设计水泥用量4.421 t相比, 超耗水泥量较大, 这是因为潜孔钻引孔作业时需要破坏回填砂层桩径范围内的部分旋喷桩, 待引孔至抛石层底部后再下钻杆进行整根旋喷注浆, 导致回填砂层部分区域注浆施工2次, 但根据数据可以看出试桩水泥用量均满足设计用量要求。通过施工过程记录得出引孔功效为4.8 h/根, 注浆功效为2.3 h/根, 但该施工方法在回填砂层加固完成后需要等待3 d, 综合来看单根旋喷桩施工需要3 d以上的时间。

第2阶段旋喷桩试验施工完成后通过流量计数据计算出3根试桩单桩实际用量分别为4.809、4.810、5.098 t, 满足设计用量要求, 与第1阶段相比超耗量明显降低。通过施工过程记录得出旋挖钻进功效为14 h/根, 注浆功效为2.8 h/根, 回填砂土及压实功效7 h/根, 综合来看第2阶段单根旋喷桩施工需要1 d时间。

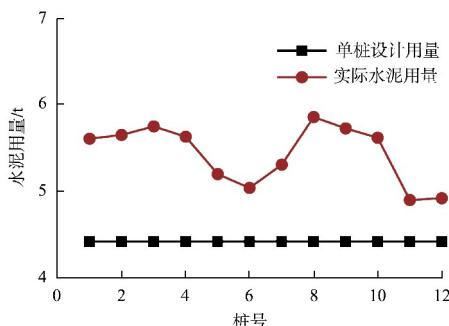


图 5 水泥用量对比

2.4 取芯结果

2 个阶段试桩施工完成后,于 2021-01-18 对施工部位钻孔取芯验证,并且对桩身整体性、外观质量、成桩直径等进行检测^[7]。其中第 1 阶段共施工 12 根,取芯验证 6 根;第 2 阶段共施工 3 根,取芯验证 2 根。取芯芯样见图 6。



a) 第1阶段



b) 第2阶段

图 6 取芯芯样

由图 6 可以看出:1) 第 1 阶段采用抛石层引孔+旋喷注浆的施工方法仅在回填砂层部分成桩,抛石层基本未成桩,桩身多成碎块状、不连续,单根成桩率远低于 85%,无法满足相关要求;2) 第 2 阶段采用旋挖换填+旋喷注浆的施工方法成桩效果好,所取芯样均为连续、完整、坚硬,搅拌均匀,呈现柱状,在抛石层也实现了高质量连续成桩,单根成桩率达到 94.2%~95.7%,满足单根成桩率大于 85% 的要求。选取部分芯样作无侧限抗压强度试验,结果见表 1。可以看出,所检旋喷桩芯样抗压强度在 1.23~1.67 MPa,满足设计要求。

表 1 芯样无侧限抗压强度

孔号	取样深度/m	芯样直径/mm	芯样高度/mm	无侧限抗压强度/MPa
01	6.0~6.4	82.5	82	1.67
		82.0	83	1.25
		83.0	82	1.47
	13.1~13.5	81.5	83	1.52
		82.0	83	1.44
		82.5	82	1.28
	22.5~22.9	82.0	83	1.38
		82.5	82	1.30
		81.5	83	1.49
	4.6~5.0	82.5	82	1.42
		82.0	83	1.63
		82.5	82	1.50
03	14.3~14.7	82.5	83	1.40
		81.5	82	1.32
	23.5~23.9	82.0	83	1.27
		82.0	82	1.23
		81.5	82	1.47
		81.5	83	1.39

2.5 工艺分析

第 1 阶段的抛石层引孔+旋喷注浆试验在采用改进措施后,解决了回填砂层在引孔时易塌孔以及相邻孔位串浆等问题,但改进后的措施需要等待 3 d 让回填砂层的旋喷桩桩身具备一定的强度,才能继续引孔作业,旋喷桩施工工期被严重拉长。另外,虽然从注浆数据上来看该阶段的所有试桩单桩水泥用量均超过了设计用量,但从取芯情况下来看成桩质量极差,分析后认为主要是抛石层

透水性强, 大部分浆液沿着抛石层的缝隙流失, 加上施工区域位于海域人工岛, 潮汐落差大, 旋喷桩浆液受到潮汐动水影响加速流失。基于此, 在施工过程中无法通过喷浆量判定水泥用量是否满足要求, 可控性差。

第2阶段采用的旋挖换填+旋喷注浆的施工方法, 旋挖引孔后回填的堆载料及砂土有效解决了抛石层透水性强、浆液流失等问题, 并且回填料均为堰筑段基坑开挖的出土料, 无新增成本, 1 d 即可完成1根桩间止水旋喷桩施工, 远高于第1阶段的施工功效, 通过取芯结果进一步验证了该阶段的施工方法、参数可以满足现场施工要求。在试桩阶段存在旋挖钻进时抛石层石块挤入到相邻已回填桩位的现象, 导致桩机下钻较为困难, 在后续决定采取跳孔施工。

通过2个阶段的试验研究, 最终决定采用第2阶段的旋挖换填+旋喷注浆方法进行后续试验段的大规模桩间止水施工, 施工顺序为1→2→3→4, 试验段暂不进行后排止水帷幕旋喷桩施工, 见图7。

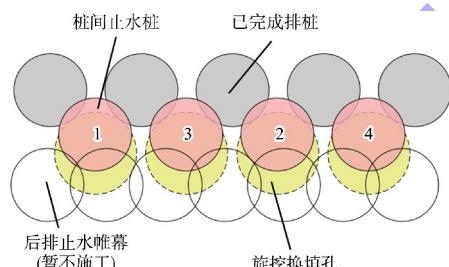


图7 后续旋喷桩施工

3 止水效果验证

3.1 抽水及回水试验方案

为了验证试验段采用旋挖换填+旋喷注浆方法大规模施工的效果, 采用局部抽水试验的方法验证试验段桩间止水旋喷桩的止水效果^[8]。降水井采用直径273 mm、壁厚3 mm钢管, 底部设置长1 m沉淀管, 中部为滤管, 外包单层60目锦纶滤网, 滤料回填至开挖面, 其上回填黏土, 埋设深度为基坑底下5 m。局部抽水试验选定在E匝道6~8结构段(图1), 共计4口井(其中ESG6、8为抽水井, ESG7、G3为观测井), 抽水持续1 d, 每

隔1 h记录1次水位, 再用1 d时间进行回水试验, 每隔2 h记录1次水位, 平面布置见图8。

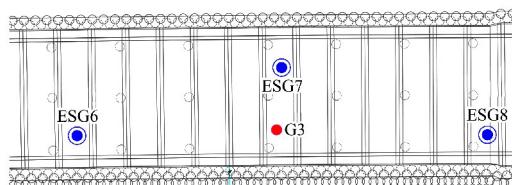


图8 降水井平面布置

3.2 试验结果

将抽水试验及回水试验的相关数据收集整理, 水位变化曲线见图9, 试验数据见表2。由图9可看出, 在刚开始抽水试验时, 降水井水位下降较快, ESG6、8抽水井由初始水位1.74、1.62 m分别降至-6.79、-6.85 m, 初始流量在2.08~3.87 m³/h, 持续抽水后减少并逐渐趋于稳定, 考虑受地层加固后地层透水能力减弱, 补给缓慢, 总抽水量21.34 m³, 试验抽水后水位均在基底以下, 观测井水位在缓慢下降, ESG7和G3观测井分别由初始水位1.32、0.37降低至-0.98、-1.09 m。回水试验完成后抽水井的水位均低于初始水位, 并且观测井回水后水位分别为0.92、-0.19 m, 抽水高程差2.30、1.46 m, 回水高程差1.90、0.90 m。在此期间考虑受潮汐影响特选择低潮为平缓期进行基坑外水位数据观测采集, 且对坑内观测井数据进行采集, 水头差为0.06 m, 根据数据分析, 基坑外水位变动小于0.1 m, 因此可以看出桩间止水桩的止水效果良好, 满足基坑开挖的止水要求。

表2 试验结果数据

井编号	初始水位高程/m	初始流量/(m ³ ·h ⁻¹)	抽水24 h后水位高程/m	稳定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	停抽24 h后水位高程/m
ESG6	1.74	3.87	-6.79	0.42	-1.85
ESG8	1.62	2.08	-6.85	0.39	-0.62
ESG7	1.32	-	-0.98	-	0.92
G3	0.37	-	-1.09	-	-0.19

经过局部抽水及回水试验验证了旋挖换填+旋喷注浆施工的桩间止水效果, 在并未施工后排止水帷幕的情况下, E匝道基坑仅靠灌注桩+桩间止水旋喷桩便可满足基坑开挖止水需求。因此, 在

剩余结构段抛石层区域均采用该项施工技术进行桩间旋喷桩施工，并且推动了设计变更，优化了围护结构形式：即取消了该区域内的后排止水帷幕施工，进一步降低施工成本，缩短工期。后续在 E匝道基坑开挖施工过程中进行了全程跟踪调查，并未发现渗漏水现象，止水效果与试验研究得出的结论一致。

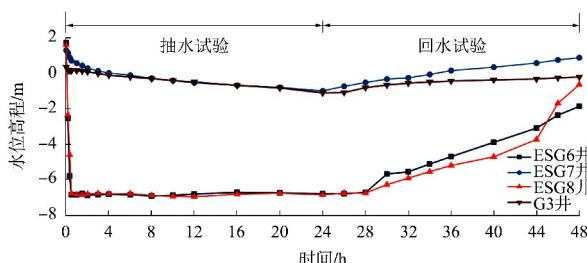


图 9 水位变化曲线

4 结论

1) 通过 2 种施工方法的对比研究，得出旋挖换填+旋喷注浆的方式功效更高、成桩质量显著，采用桩间旋挖换填降低抛石层的透水性，可大幅减少旋喷注浆过程中浆液的流失，换填材料可采用堆载料及砂土，有效解决了在深厚抛石层以及海域潮汐动水影响下旋喷桩成桩质量差的问题。

2) 后续可参考本文总结的相关施工参数，基于理论计算公式对喷浆提升速度进行动态调控，可确保水泥用量满足要求，进而保证成桩质量。

3) 通过局部抽水及回水试验验证了桩间止水旋喷桩的止水效果可以满足基坑开挖需求，根据基坑大规模开挖现场探查中并无渗漏水的现象，

(上接第 212 页)

5 结论

1) 全回转打桩船可有效进行斜度、平面扭角变化大的钢管桩沉桩施工。

2) 长臂勾机浇筑墩台混凝土效率稳定且受海况影响较小。

3) 悬吊工艺搭设底模效率高、工序少、质量有保证。

4) 履带吊固定在施工平台进行吊装作业，有效避免了波浪对吊装作业的影响，显著提高施工效率，工效、安全性大幅度提升。

进一步验证了其止水效果。类似工程若采用本文所述的旋喷桩施工技术，在经过抽水回水试验的前提下，可取消外排止水帷幕施工，仅灌注桩+桩间止水的围护结构形式即可满足相关要求，对围护形式的优化有较大的借鉴意义。

参考文献：

- [1] SHEN S L, XU Y S, HAN J, et al. State of the practice of grouting and deep mixing in China-a recent ten-year review [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Reston: ASCE, 2012: 343-356.
- [2] BURKE G K. The state of practice of jet grouting [C]// American Society of Civil Engineers. Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Reston: ASCE, 2012: 74-88.
- [3] 史本宁, 焦学尧. 基于高压旋喷桩试桩的滨海滩涂淤泥层软基处理[J]. 水运工程, 2020(S1): 35-39.
- [4] 黄正. 高压旋喷桩在石渣层施工中漏浆问题的解决[J]. 水运工程, 2019(3): 133-135.
- [5] 许兆勇, 孙耀奎. 基于沿海潮汐作用下高压旋喷桩在地基加固施工中的成桩方法[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(6): 105-107.
- [6] 宋神友, 陈伟乐, 金文良, 等. 深中通道工程关键技术及挑战[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 143-152.
- [7] 胡奇凡, 张继清. 超高压旋喷注浆法在卵石地层的应用试验研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 13-17.
- [8] 宋兵, 徐明江. 局部抽水试验在止水帷幕止水效果评价中的应用[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(1): 93-97.

(本文编辑 王璁)

参考文献：

- [1] 王永东, 杨胜龙. 全旋转打桩船“海力 801”超长超重钢管桩沉桩技术[J]. 中国港湾建设, 2011(2): 42-46, 75.
- [2] 交通部第一航务工程局. 港口工程施工手册(上册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994: 565-566.
- [3] 郑华. 塑料模板的性能及其应用施工技术[J]. 建筑技术, 2012, 43(8): 684-686.
- [4] 诸炳强, 张磊. 一种用于海上沉箱上部结构施工的吊机平台: 0740479. 2[P]. 2022-09-13.

(本文编辑 王传瑜)