

后注浆灌注桩在吹填场地的适用性研究

张春刚¹ 周思广¹ 申海鹏²

1 中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司, 河北保定 071069

2 北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京 100053

[摘要] 沿海地区吹填场地经过预处理后进行桩基施工, 施工前需进行试验以确定工程桩桩型及设计参数。通过竖向抗压静载试验、水平承载力静载试验并结合桩身应力监测数据, 分析可得达到相同竖向承载力时, 后注浆灌注桩桩长较普通钻孔灌注桩短, 而水平受力状态并没有显著差异, 这不仅可缩短工期, 并可节约成本, 验证了后注浆灌注桩在本吹填场地的适用性。

[关键词] 吹填场地; 后注浆灌注桩; 静载试验

Abstract: After pre-treatment, pile foundation construction is carried out on the blow-filled sites in coastal areas. Before the construction, tests should be carried out to determine the pile type and design parameters of the project. Static loading test of vertical compression resistance and horizontal bearing capacity should be carried out. Meanwhile, stress monitoring data of pile should be obtained. It can be concluded from the analysis that when the same vertical bearing capacity is achieved, the length of the post-grouting pile is shorter than that of the ordinary bored pile, while the horizontal stress state is not significantly different. The post-grouting bored pile can not only shorten the construction period, but also save the cost. This paper has verified the applicability of post-grouting grouting pile in this blow-in site.

Key words: blow-filled sites; post-grouting bored pile; static loading test

1 序言

随着我国工业的快速发展, 港口、工业园区等在沿海地区的建设用地需求急剧增长, 导致土地资源出现严重不足, 因此填海造陆工程发展迅猛。某临海项目储罐区场地为新近吹填场地, 经过排水法预处理后需要进行桩基施工。本工程采取试桩对桩型进行优化选择, 桩型采用后注浆灌注桩和普通钻孔灌注桩。

相对普通钻孔灌注桩而言, 后注浆灌注桩是将浆液经注浆装置注入桩侧桩端, 通过浆液的渗扩、劈裂、填充、压实和固结作用, 消除桩身泥皮和桩端沉渣, 增大桩侧阻力和桩端承载力, 从而大幅度提高单桩极限承载力并减少桩基沉降。

本文通过对后注浆灌注桩的加固机理、施工工艺进行介绍, 对后注浆灌注桩和普通钻孔灌注桩的竖向抗压静载试验和水平静载试验数据进行对比分析, 确定本场地两种桩型的优劣性。

2 工程概况

本工程位于天津南港工业区内, 吹填材料为细砂、粉砂, 场地在吹填至高程约 +5.5m 左右后, 对吹填砂层采用了无填料振冲挤密处理, 处理后的现地面高程约在 +4.0 ~ +4.3m。初步处理后的吹填层平均厚度约 10m, 以中密~密实状态的细砂为主。

根据工程地质勘察资料, 地表下地层主要分为以下 11 层:

表 1 各地层分层及特征表

单元土体	地层特征	揭示厚度
①吹填砂	灰黄色, 饱和, 中密状态, 局部密实; 以细砂为主, 颗粒较均匀, 含少量贝壳屑, 密实度分布不均匀; 构成吹填场地的主要组成部分并反应了吹填层的主要特征	约10m
②淤泥质粘土	灰色, 饱和, 流塑状态, 含少量腐植物, 局部间砂或夹薄层粉砂	约10m
③-1粉土	灰色, 湿~很湿, 稍密~中密状态	约20m
③-2粉细砂	灰色、灰黄色, 中密状态; 颗粒较均匀, 含少量贝壳屑	
④粉质粘土	黄褐色, 饱和, 软塑~可塑状态	0~5.0m
⑤-1粘土	灰色, 饱和, 软塑~可塑状态	13m
⑤-2粉细砂	灰色, 饱和, 中密~密实状态	

⑥-1粉质粘土	褐黄色，饱和，可塑～硬塑状态	23m
⑥-2粉细砂	灰黄色，饱和，密实状态	
⑦粉质粘土	褐灰色，饱和，可塑～硬塑状态	0～6.6m
⑧细砂	灰色，局部灰黄色，饱和，密实状态，呈厚层分布，连续稳定	约14m
⑨粉质粘土	灰色，饱和，可塑～硬塑状态	约15m
⑩粉细砂	灰色，饱和，密实状态	
⑩a粉质粘土	灰色，饱和，可塑～硬塑状态	
⑪粉质粘土	灰色，褐黄、黄绿色，饱和，可塑～硬塑状态	约7m，未揭穿

本工程采用两种桩型进行试验，详细设计参数及检测方法见下表：

表 2 试桩设计参数及检测方法表

试桩分组	后注浆灌注桩	普通旋挖灌注桩
试桩编号	试1、试2、试3	试4、试5、试6
桩长	61m	74m
桩径	1200mm	1200mm
设计桩砼强度	C40	C40
桩端持力层	⑥2层粉砂	⑧层粉砂
单桩竖向抗压静载试验	3根	3根
桩身应力测试	3根	3根
单桩水平静载试验	3根	3根
水平位移观测（测斜）	12m×3	12m×3

3 后注浆灌注桩

3.1 加固原理

3.1.1 桩侧注浆加固原理

桩侧进行后注浆时，浆液先对泥皮进行渗透、置换、消除，对桩周土体进行劈裂、混合、挤密，充填桩侧与桩周土体的间隙，提高桩侧与桩周土体的粘结力，从而提高桩的侧摩阻力；当浆液压力大于桩周土体的孔隙水压力时，浆液将向四周土体渗透，既挤密桩侧土体，又在桩周形成固结体，改善桩与桩周土的咬合性能，提高桩的侧摩阻力。

3.1.2 桩端注浆加固原理

桩端进行后注浆时，桩底虚土可与注入的水泥浆发生物理化学反应形成结石体，压力浆液通过渗透、挤密、填充及固化作用，提高持力层的强度和变形模量。压力达到一定程度，可使桩端形成扩大头，增加桩端承压面积，提高桩端承载力。

3.2 施工工艺

后注浆旋挖钻孔灌注桩的施工工艺流程为：测放桩位→旋挖钻机就位→成孔施工（泥浆护壁）→清孔、安放钢筋笼（注浆管固定在钢筋笼主筋上）→二次清孔→灌注混凝土→成桩后 24 小时进行开环→成桩 3～5 天进行后注浆→28 天后检测验收。

3.2.1 注浆位置确定

本工程后注浆灌注桩采用桩端桩侧复式后注浆工艺，其中桩侧注浆位置在③-2 层、⑤-1 层，距桩顶分别约 40.8m，51.5m。注浆导管沿钢筋笼圆周均匀设置 3 根。

3.2.2 注浆装置

注浆管采用内径 15mm 的钢管，因钢筋笼过长，分为三段制作再进行机械连接。注浆管连接采用丝扣连接。

注浆管均匀绑扎在钢筋笼主筋上，并且布置在钢筋笼内侧，防止在安放钢筋笼时损坏注浆管，影响后注浆效果。固定时，注浆管在桩端应超出钢筋笼，并保证桩端注浆孔深入沉渣不小于 8cm。

桩侧注浆装置采用环状注浆管，即采用四通连接竖向注浆管，再用内置钢丝的花管连接成环状，在花管上均匀布置 4 个注浆点。每个注浆孔用图钉堵塞，并用胶带缠绕，作为注浆单向阀。

3.2.3 施工参数的选择

（1）桩侧及桩端注浆土层均为饱和粉细砂，水灰比过小会降低注浆的有效性，根据工程实践经验，浆液的水灰比采用 0.7:1。

（2）桩端注浆终止压力应根据土层性质及注浆点深度确定。对于风化岩、非饱和黏性土及粉土，注浆压力宜为 3～10MPa，对于饱和土层注浆压力宜为 1.2～4MPa，软土取低值，密实黏性土取高值。本工程桩端注浆土层为饱和粉细砂，注浆压力取为 1.5～2.5 MPa。

（3）单桩注浆量应根据桩径、桩长、桩端桩侧土层性质、单桩承载力增幅及是否复式注浆等因素确定，可按式估算：

$$G_c = \alpha_p d + \alpha_s n d$$

式中， α_p 、 α_s —分别为桩端、桩侧注浆量经验系数， $\alpha_p = 1.5 \sim 1.8$ ， $\alpha_s = 0.5 \sim 0.7$ （本工程分别取 1.5，0.6）；
n—桩侧注浆断面数，（本工程取 2）；

d—基桩设计直径（m），（本工程取 1.2m）；

G_c —注浆量，以水泥质量计（t）

经计算，单桩注浆量约为 3.3t。

3.2.4 注浆施工

(1) 浆液制备：注浆材料采用普通硅酸盐水泥，水泥强度等级为 P.042.5，受潮结块或过期水泥不得使用。水泥浆采用机械搅拌，应搅拌均匀，浆液中不能有水泥结块及其他杂物，以保证后注浆质量。将搅拌好的浆液通过滤网置于储浆池中，并不断搅拌，防止沉淀。

(2) 开环：在成桩后 24 小时将后注浆装置用高压清水贯通，使注浆孔开封，保证后期注浆的施工质量。

(3) 注浆：注浆在成桩后 3～5 天后进行，压浆采用的水泥浆的水灰比 0.6～0.7，注浆压力为 1.5～2.5MPa。单桩注浆水泥用量估算 3.3t，采用先注稀浆，再压注稠浆的顺序进行压浆操作，直至按设计要求完成压浆工作。实际试桩施工中，3 根注浆管中，第一根注浆管注浆压力约 0.8 MPa，终止压力约 2.5 MPa，注浆量也达到 3.3t。

4 质量保证措施

(1) 桩侧及桩端注浆孔的位置控制

桩侧注浆孔的位置选择在③-2 粉细砂层、⑤-2 粉细砂层，对桩侧阻力偏小的土层进行加固。

桩端注浆孔的位置超过笼底至少 10cm，并进入虚土一定深度，保证注浆质量。

(2) 后压浆采用注浆量和注浆压力双控方法，以水泥注入量控制为主，泵送终止压力控制为辅。水泥压入量达到预定值的 75%，泵送压力超过 2.5MPa，可停止压浆。若水泥浆从桩侧溢出，改间歇压浆、调小水灰比至水泥量满足预定值。

后压浆质量保证关键在于压浆装置绑扎入孔、各道工序成品保护、水泥浆压入操控等全过程控制和及时的检测信息反馈，要点如下：

I、压浆所用材料和设备必须符合要求。

II、钢筋笼压浆导管的连接均采用丝扣连接，经施工方自检及监理检查确认无误后方可进行下道工序。

III、为方便对水灰比的控制与检查，应在搅拌桶上刻画配制水灰比为 0.6～0.7 的标志。

IV、桩底压浆导管设置两道，如果出现一道压浆管堵塞、折断等异常情况，启用另外一道压浆管进行后压浆，如果出现两道压浆导管均损毁，则及时上报项目部总工，由总工程师会同有关人员提出处理方案。

V、桩侧压浆管如果出现堵塞、折断等异常情况，把侧管设计的水泥浆补入本桩的桩底压浆管中，在记录中注明。

5 检测结果

5.1 竖向抗压静载试验

通过竖向抗压静载试验，通过桩身应力监测值，可分析桩侧注浆位置土层侧摩阻力的变化情况，并结合最终沉降值，综合评价两种桩型在竖向荷载作用下的受力特点。试验加载量及分级见下表。

表 3 试验最大加载量及分级表 (kN)

分级 桩号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
试1~试6	3400	5100	6800	8500	10200	11900	13600	15300	17000

(1) 桩侧阻力

在极限荷载作用下，后注浆灌注桩及普通钻孔灌注桩在两处桩侧注浆位置的桩侧阻力平均值如下表。

表 4 桩侧阻力平均值 (kPa)

地层 桩型	后注浆灌注桩	普通钻孔灌注桩	差值	比例
③-2层粉细砂	115	94	21	22.3%
⑤-2层粉细砂	63	50	13	26.0%

由上表可见，③-2 层粉细砂、⑤-2 层粉细砂经过后注浆处理，桩侧阻力有明显提高，提高比例超过 20%。

(2) 沉降

单桩静载试验最大加载为 17000kN，后注浆灌注桩及普通钻孔灌注桩的沉降量如下表。

表 5 沉降量 (mm)

桩号 桩型	试1/试4	试2/试5	试3/试6	平均沉降量
后注浆灌注桩	15.61	11.54	13.74	13.63
普通钻孔灌注桩	13.93	12.88	12.66	13.16
差值	1.68	-1.34	1.08	0.47

由上表可见，竖向抗压静载试验下，后注浆灌注桩和普通钻孔灌注桩的平均沉降值分别为 13.63mm、13.16mm，相差仅 0.47mm，相差比例仅为 3.57%。

5.2 水平静载试验

本工程在桩顶下 1.2m 处进行水平静载试验，通过水平试验桩的桩身内力测试可测得桩身弯矩分布和最大弯矩位置，绘制出不同荷载下对应的 Mz-z 图

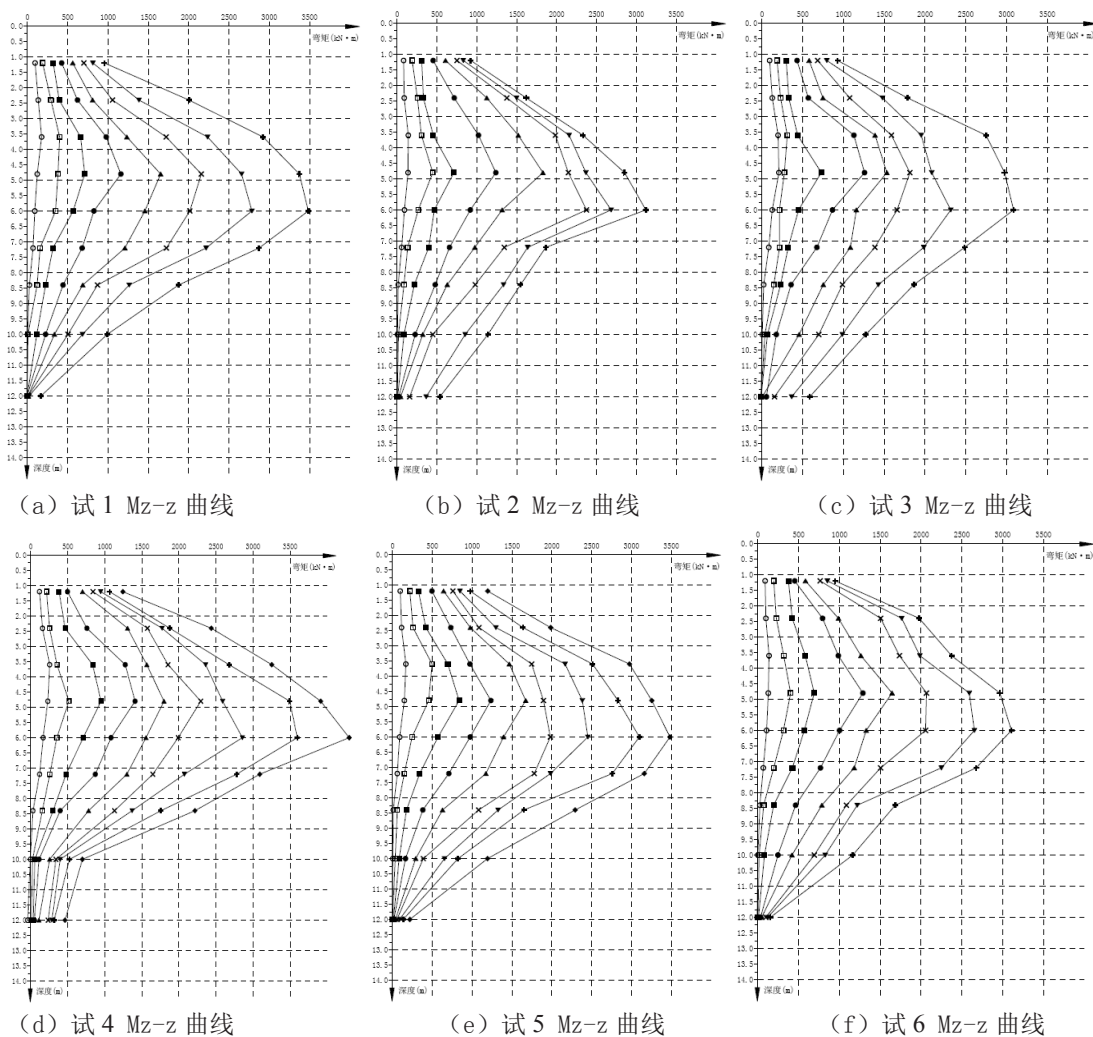


图1 试验桩1-6号Mz-z曲线

由图1可知,最大弯矩随着水平荷载的增大而增大,且水平荷载越大,最大弯矩位置逐渐下移,但位置下移并不明显,往往连续4-5级荷载作用下最大弯矩位置并不发生变化。后注浆灌注桩(试1~试3)、普通钻孔灌注桩(试4~试6)的最大弯矩位置均为桩顶下6.0m,无明显差异。

6 结论

(1) ③-2层粉细砂、⑤-2层粉细砂经过后注浆处理,桩侧阻力有明显提高,提高比例超过20%。可知桩侧注浆减弱了泥皮的影响,浆液充填了桩周间隙,增强了桩体与桩侧土体的粘结力,提高了注浆范围内桩侧阻力,进而提高单桩承载力。

(2) 桩长61m的后注浆灌注桩与桩长74m的普通钻孔灌注桩相比,在相同的竖向荷载下,累计沉降相差无几,可知后注浆灌注桩可大幅提高单桩承载力。

(3) 根据水平荷载试验结果证明,后注浆灌注桩与普通灌注桩在水平受力状态下并无明显差异。

(4) 本工程中,达到相同的设计荷载时,后注浆灌注桩的桩长比普通钻孔灌注桩短13m,可以缩短施工工期。每根桩减少混凝土用量约 14.7m^3 ,即使考虑注浆水泥成本,也可大幅降低工程成本。

由以上结论可知,后注浆灌注桩在类似吹填地层中适用性较强,比普通钻孔灌注桩有一定的优势。

[参考文献]

- [1] JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范[S]
- [2] GB50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S]
- [3] 邓祥辉, 张永杰, 房海勃. 后压浆钻孔灌注桩承载力分析与试验研究. 建筑科学与工程学报, 2015(32): 58-64.
- [4] 陈立新, 舒斌, 杨宗耀. 灌注桩桩基后注浆施工工法. 岩土工程技术, 2010(24): 51-54.
- [5] 张开伟, 郅正华, 李志勇. 单桩水平静载试验各项测试参数分析. 城市勘测. 2016(16): 167-171;
- [6] 陈祥, 孙进忠, 蔡新滨. 基桩水平静载试验及内力和变形分析. 岩土力学. 2010, 第31卷, 753-758;
- [7] 张术来, 张春刚, 付勇. 新近吹填场地灌注桩不同桩型对比试验研究. 勘察科学技术. 2017(2): 14-17