



后注浆技术在码头软土地基 灌注桩补强工程中的应用*

李达宏, 张蕊, 顾祥奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200030)

摘要: 钻孔灌注桩因其承载能力高、对大型打桩船依赖性小、对陆域围垦结构的影响小等优点, 广泛应用于港口工程建设中。当工程区软土深厚、施工经验不足时, 灌注桩极易出现质量问题, 此时结构安全遭到质疑, 影响工程验收和投产使用。对港口工程灌注桩常见问题成因及处理方法进行归纳总结, 并结合工程实例, 采用后注浆技术对深厚软基超长灌注桩桩端缺陷进行修复, 检测数据显示加固效果良好, 保证了工程的经济性和时效性。

关键词: 港口工程; 软土地基; 灌注桩; 后注浆技术

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0133-06

Application of post-grouting technology in reinforcement project of cast-in-place piles in soft soil foundation of wharf

LI Dahong, ZHANG Rui, GU Xiangkui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: Bored piles are widely used in harbor construction due to their high bearing capacity, low dependence on large piling vessels and low impact on land reclamation structures. When the soft soil is deep in the project area and the construction experience is not enough, the quality problem of the cast-in-place piles is very easy to occur, and then the structural safety is questioned, which affects the acceptance of the project and the commissioning of the use of the project. In this paper, the causes and treatment methods of common problems of cast-in-place piles in wharf are summarized, and combined with engineering examples, the defects at the end of super-long cast-in-place piles with deep soft foundation are repaired by using post-grouting technology, and test data show that the reinforcing effect is good, which ensures the economy and timeliness of the project.

Keywords: port engineering; soft soil foundation; grouted pile; post-grouting technology

从20世纪40年代开始, 随着钻孔设备的成熟, 钻孔灌注桩技术出现, 可有效解决水下深基底施工的难题^[1]。随着钻孔设备及施工技术的发展, 钻孔灌注桩以承载能力高及技术经济性好等特点广泛运用于港口工程的建设中。桩基是港口工程中最主要的构件, 一旦出现质量问题影响极大。然而, 钻孔灌注桩属于隐蔽工程, 桩基质量

受诸多因素影响, 质量控制一直是这类桩型的施工难点, 其中软土地基钻孔灌注桩的质量问题更为突出。

软土在我国沿海一带广泛分布, 如渤海湾及天津塘沽、长三角、珠三角以及福建省的沿海地区都存在海相或湖相沉积的软土^[2]。因此软土地基钻孔灌注桩在港口工程中的运用十分广泛。通

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 李达宏 (1996—), 男, 硕士, 从事港口工程设计。

常情况下,软土是指直径不大于0.1 mm的颗粒在土壤样品中含量超过一半的近代沉积物^[3],在港口工程中遇到的软土通常有泥炭质土、冲填土、淤泥质土、饱和黏性土、杂填土等^[4]。一般情况下软土层提供的侧摩擦阻力较小,而且深厚软基甚至会产生负摩阻效应,直接影响桩基承载力。因此在深厚软基条件下钻孔灌注桩通常桩径更大、桩更长,以确保满足承载能力要求^[5]。然而,在钻孔灌注桩中大直径长桩更容易发生桩位偏位、混凝土强度偏弱、桩身混凝土存在缺陷等问题^[6]。在钻孔过程中,在孔壁表面存在泥浆残留,且桩侧软土层的水平有效应力降低,导致桩侧阻力下降,同时因桩端沉渣也会削弱桩端阻力^[7]。后注浆技术作为解决这些问题的有效手段被广泛应用于钻孔灌注桩中^[8],但对于长桩、超长桩的处理效果却没有明确的理论依据。

本文针对软土地基条件下灌注桩常见工程问题成因及处理方法进行分析。以典型工程为例,采用后注浆技术对桩端受损的超长灌注桩进行加固处理,并且通过高应变检测验证加固后桩基承载能力和整体结构安全度,为此类工程问题的处理提供参考。

1 软土地基灌注桩常见问题及处理方法

1.1 常见问题

在港口工程软土地基灌注桩施工过程中的常见问题有:1) 桩位偏差,实际桩位与设计桩位偏差超出规范要求;2) 灌注桩混凝土强度不能满足设计要求;3) 桩身有颈缩等质量问题;4) 桩身混凝土缺陷出现断桩。

1.2 处理方法

灌注桩混凝土达不到要求,包括桩头和桩身混凝土达不到要求两种情况,其中桩头混凝土强度达不到要求的问题常出现,会导致静载试验中桩头的破坏。造成混凝土强度不满足设计要求的原因及处理方法为:1) 超灌高度不够,受桩底沉渣、护壁泥浆、孔壁形状、钢筋笼和桩长的影响,需要超灌足够的高度才能保证桩头部位混凝土的

质量;2) 冲孔灌注桩锥形锤头导致孔底呈倒锥形,从而导致桩头混凝土强度达不到设计要求,因此冲孔深度需要留出一定富余;3) 灌注桩受地下水影响,孔底出现积水,先行灌注的混凝土会被地下水稀释,导致桩端部混凝土强度低,如果孔底地下水不能保证完全排除时可以采用水下混凝土灌注工艺。

除桩头混凝土外,桩身混凝土强度受损的情况也时常发生,主要原因及处理方法为:1) 在软土地基条件下桩长范围内存在许多软弱土层,混凝土灌注未凝固前软弱土层在上层土重力作用下会向孔内挤压造成颈缩现象,可采用钢筋补强法^[9];2) 在钻孔灌注桩施工时,钻头提升过快或混凝土浇筑的上升速度未跟上钻头提升速度会导致断桩现象,断桩不仅会造成竖向承载能力减弱还会对水平承载能力造成影响,如果出现断桩现象可以对桩基进行钢筋加固处理,深部断桩在承载能力满足要求的前提下可以不进行处理。

综上,灌注桩混凝土强度达不到要求主要依靠加强施工措施管理以及对桩基局部钢筋加固的方法进行处理^[10]。然而,在港口工程中由于施工条件复杂,上述方法不能完全避免灌注桩的质量问题,因此成桩后通过灌注桩后注浆技术加固桩基使其承载能力达到要求可以很好地解决灌注桩成桩的质量问题。

2 灌注桩后注浆技术

2.1 技术特点

灌注桩后注浆技术是为了灌注桩成桩后的若干时间内,改善桩土结合状态,将桩底桩侧的沉渣和泥皮通过注浆固化,并加固桩底和桩周土体,使桩基的承载力得到较大提升,稳定性增强并减少桩基沉降而采用的一种加固方法。

灌注桩后注浆技术具有以下特点:1) 承载能力大幅提高,注浆前后承载能力可以提高40%~120%;2) 应用范围广,灌注桩后注浆技术可以用于各类光柱桩的后处理;3) 灌注桩后注浆时间不受限制,曾经有1年以上成功实施注浆的工程案例。

2.2 注浆装置

灌注桩后注浆装置及施工过程见图1。

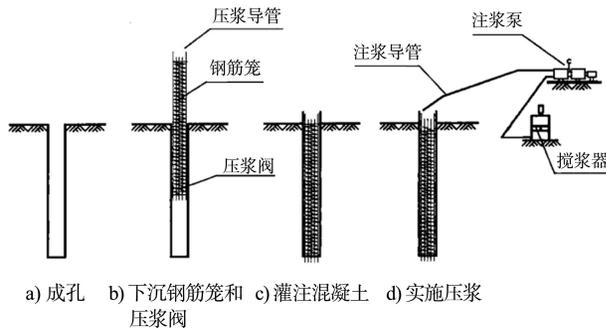


图1 后注浆装置和工艺流程

Fig. 1 Post-grouting device and technological process

2.3 注浆机理

注浆效应可分为渗入性注浆、压密注浆、劈裂注浆,随桩端、桩侧土层性质及浆液性质、注浆压力的不同而不同。这3种注浆性态多同时存在于一次注浆过程中,在同样的注浆执行过程中,它们彼此交错,并无明显的界限。在桩侧注浆且桩侧都是粗粒土时,主要是体现为渗入注浆;而桩侧土为细粒土时,劈裂注浆为注浆的主要性态。在桩端注浆过程中,当持力层为粗粒土或与粗粒土较近时,桩底注浆主要以渗入注浆为主;当持力层和桩侧都是细粒土时,桩底注浆以渗入注浆和压密注浆为开端,最终转变成劈裂注浆。

2.4 加固效应

后注浆加固效应主要有充填胶结效应、加筋效应、固化效应以及压密效应。其中,渗入注浆发生在卵砾石和砂土中时,会在土体孔隙中填入浆液,散粒胶结使土体强度和刚度得到较大的改善,故将其视为充填胶结效应,见图2a);当劈裂注浆发生在黏性土、粉土、粉细砂层时,网状结石土体将单一介质土体分割加筋为复合土体,网状结构的强化作用能在很大程度上改善复合土体的强度变形性状,视为加筋效应,见图2b);桩端的淤积、桩侧的泥皮与注浆液发生物理化学反应后,明显提高了桩端、桩侧的侧阻力,视为固化性作用,视为固化效应;加注的浆液会使桩侧桩底土

体产生不同程度的压密效应,特别是桩端压密效应的产生可以使承载能力明显提升。

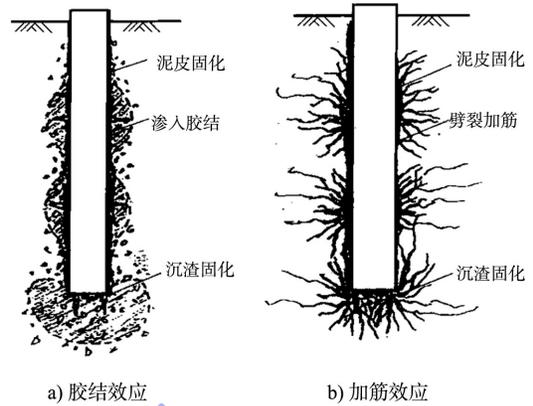


图2 灌注桩加固效应

Fig. 2 Reinforcement effect of cast-in-place pile

2.5 注浆参数

灌注桩后注浆施工工艺参数主要有水泥注入量、注浆水灰比、注浆起始时间、注浆速度、注浆压力,注浆顺序等。

1) 地下水、成孔工艺等因素均会影响水灰比大小,根据已有工程经验一般选用0.60~0.80。

2) 注浆压力是指在土体特征、桩长、水灰比、注浆时间、注浆点深度、地下水位等因素的影响下,注浆时不会使地表产生过大的隆起和基桩上抬量或地表跑浆的压力。正常施工的前提下,注浆压力可按式估算^[11]:

$$p_g = p_w + \zeta_r \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: p_g 为注浆压力; p_w 为桩侧、桩底注浆处静水压力; γ_i 、 h_i 分别为有效重力密度(地下水以下为重力密度)、注浆点以上 i 层土的厚度; ζ_r 为经验系数,取值范围为1.0~4.0,细粒土取低值,非饱和土、粗粒土和风化岩中取高值,对于桩侧压浆, ζ_r 取桩底压浆时的30%~70%。

由于浆液的扩散能力与注浆压力的大小有关,建议采用相对较低的注浆压力和注浆速度,以保证浆液能够注入。

3) 注浆量的一般规律为土体充浆率越大,注浆体强度越高。

3 工程实例

3.1 工程概况

3.1.1 结构形式

某码头主体采用高桩梁板式结构,排架间距7 m,桩基选用 $\phi 800$ mm 预应力高强度混凝土(PHC)管桩,每排架布置5~8根桩。上部结构采用现浇横梁、预应力轨道梁、预制纵向梁系及选合面板。其中1根PHC桩超高8.479 m,承载能力不满足要求,考虑避免对已完成桩基及结构造成影响,在横梁侧增加1根直径 $\phi 1\ 000$ mm 灌注桩,桩长67.00 m,3根 $\phi 57$ mm、壁厚3.5 mm 声测管沿钢筋笼平均 120° 通长布置,下端封闭焊接,且超出设计桩底0.50 m,上端超出设计桩顶约3.35 m。

3.1.2 地质条件

工程场地地基土可划分为6个工程地质层,10个工程地质亚层,灌注桩的桩端进入 $\textcircled{6}_1$ 粉质黏土层,各主要土层分布情况见图3。

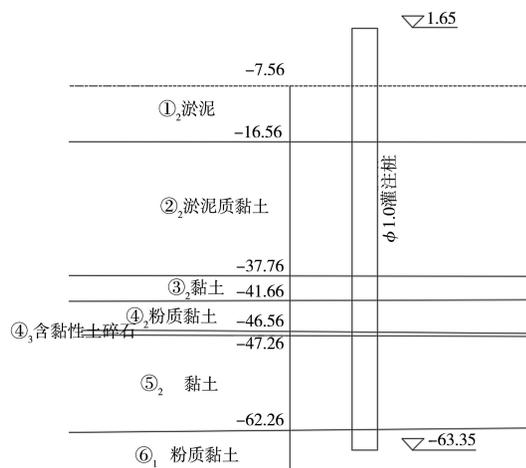


图3 土层断面(单位:m)

Fig. 3 Soil layer section (unit: m)

3.1.3 质量问题及成因分析

灌注桩施工完成后,经超声波透射检测后,端部2.9 m 范围内桩顶以下64.1~67.0 m 存在严重缺陷,检测结果见表1。

表1 超声波透射检测结果

Tab. 1 Ultrasonic transmission test results

设计强度等级	直径/mm	设计桩长/m	检测深度/m	完整性描述	完整性类别
C45	1 000	67	67	1-2 剖面桩顶以下64.1~67.0 m 存在严重缺陷, 1-3 剖面桩顶以下65.8~67.0 m 存在严重缺陷, 2-3 剖面桩顶以下64.1~67.0 m 存在严重缺陷	Ⅳ类

缺陷成因分析:由于灌注桩较长,桩端距泥面高度57.85 m,施工过程因注浆提管时混凝土未凝固、承载力较低,并且由于软土松散和强度低的特点,桩侧土压力挤压致使桩端局部发生向内压缩变形,导致出现桩身不完整以及承载能力下降。

3.2 加固方案

钻孔灌注桩成本过高,进行补桩加固会导致工程成本无法控制,因此选择对桩基自身进行加固。桩基加固主要考虑钢筋补强法和后注浆加固法,其中钢筋补强法需要从桩顶钻孔并放入钢筋或者型钢,空孔部分采用高强度混凝土灌注,最后进行注浆。而后注浆加固法只需要利用预埋的声测管作为注浆孔即可实施加固。经对比后注浆加固法实施过程更便利,加固成本更可控,施工进度也可以得到很好的保证,因此本工程选择后

注浆加固方案对桩基进行加固处理。

3.2.1 后注浆加固方案

考虑利用灌注桩预埋的声测管,兼作桩端后注浆孔。桩端注浆以渗透和压密的方式注入浆液,浆液在桩端缺陷区劈裂渗透,使桩端缺陷范围附近土体加固密实,并产生“扩底”效应,桩端承载力将得到较大提高,通过压密注浆法处理后满足桩基完整性和可靠性的要求。

后注浆使用小径取芯钻,将3根 $\phi 48$ mm 声测管端头封管板打通,通过高程换算确保端头无封堵。采用声测管与注浆器连接,注浆器底端成锥形开口,钢管底端打孔填入图钉用作单向阀,再用绝缘胶布和硬包装带缠绕包裹,防止小孔堵塞。注浆管使用丝扣连接不能出现漏浆现象,注浆器见图4。

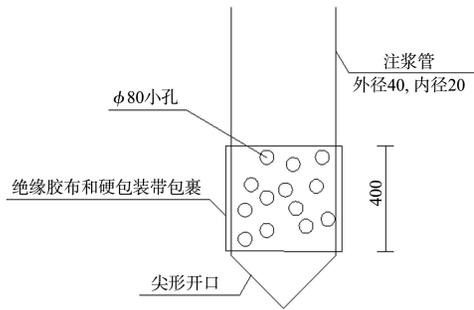


图4 注浆器 (单位: mm)

Fig. 4 Grouting device (unit: mm)

由于桩端持力层为粉质黏土,饱和土浆液水灰比应为 0.45~0.65,加固浆液采用纯水泥浆,水灰比例为 0.55。保持低水灰比宜适量掺入减水剂,如木钙等,以增加浆液流动性,减水剂掺量在 0.2%~0.3%。水泥浆液过筛,以去除水泥结块。

桩端后注浆采用预埋的 3 根声测管作为注浆孔,注浆孔等边三角形对角线长约 0.63 m,可按注浆有效半径布置从而全面覆盖桩端,对于风化岩、非饱和黏性土、粉质黏土,按土层性质和注浆点深度确定注浆压力 3~10 MPa 为宜;饱和土层注浆压力以 1.2~4.0 MPa 为宜,软土应取低值,密实黏土应取高值,本工程取 2.5 MPa,桩端后注浆有效范围见图 6。

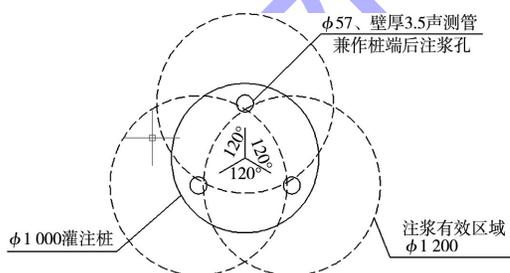


图5 有效注浆范围 (单位: mm)

Fig. 5 Effective grouting range (unit: mm)

3.2.2 加固效果

通过后注浆加固后,采用高应变检测法对桩基完成性和承载力进行检测分析。结果表明,加固后桩身完整性完好,桩基承载力提高 22.75%,见表 2。

表 2 高应变检测结果

Tab. 2 High strain test results

加固状态	拟合侧向承载力/ kN	拟合端部承载力/ kN	拟合单桩竖向极限承载力/ kN	是否满足承载力要求	桩身完整性类别
加固前	4 461.9	2 499.6	6 961.5	是	Ⅳ类
加固后	5 477.0	3 068.3	8 545.3	是	Ⅰ类

4 结语

1) 港口工程灌注桩在软土条件下,因软土具有松软、孔隙比大、压缩性高和强度低等特点导致软土条件下灌注桩质量控制困难,发生质量缺陷需要及时进行处理,从而提高桩基结构的承载力和结构安全度。

2) 工程实例及检测结果表明,当深厚软基超长灌注桩桩端小范围出现质量问题时,采用后注浆方法可以有效提高灌注桩的承载能力以及桩身完整性,为深厚软基条件下超长灌注桩类似问题的处理提供参考。

3) 通长情况下规范对于缺陷桩特别是Ⅲ类、Ⅳ类桩会要求按废桩处理,本工程利用预埋声测管对缺陷桩作后注浆加固处理后桩基满足设计要求,保证了工程的经济性和时效性。

参考文献:

- [1] 潘湘勇. 公路桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用探讨[J]. 西部交通科技, 2019(6): 113-116, 120.
PAN X Y. Bridge construction discussion on application of bored pile construction technology in highway[J]. Western China communications science & technology, 2019 (6): 113-116, 120.
- [2] 黎玉. 滨海港口软土地基固结沉降规律及应用研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2021.
LI Y. Study on consolidation settlement discipline and application of soft soil foundation in the coastal port [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2021.
- [3] 于春芳. 软土地基的特点及处理方法[J]. 交通运输研究, 2013, 30(14): 16-18.
YU C F. Characteristics of soft soil foundation and treatment methods[J]. Transport research, 2013, 30(14): 16-18.

[4] 高翔. 如何处理港口工程中的软土地基问题研究[J]. 科技与创新, 2020(9): 130-131.
GAO X. Study on how to deal with soft ground problems in port projects [J]. Science and technology & innovation, 2020(9): 130-131.

[5] 胡庆立, 张克绪. 大直径桩的竖向承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2002(4): 491-495.
HU Q L, ZHANG K X. Research on axial bearing behavior of large diameter piles[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2002(4): 491-495.

[6] 刘金波, 郭金雪, 张寒, 等. 灌注桩承载力不满足要求处理原则、方法及案例[J]. 施工技术, 2017, 46(12): 160-165.
LIU J B, GUO J X, ZHANG H, et al. Treatment principle and approach of bearing capacity of cast-in-place pile can't meet the requirement and case [J]. Construction technology, 2017, 46(12): 160-165.

[7] 饶少华, 万志辉, 罗志聪, 等. 强风化岩层大直径后压浆嵌岩桩承载性状试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(S1): 287-295.
RAO S H, WAN Z H, LUO Z C, et al. Experimental study on bearing behavior of large-diameter post-grouted rock-socketed pile in strongly weathered rock formations [J]. Journal of building structures, 2022, 43(S1): 287-295.

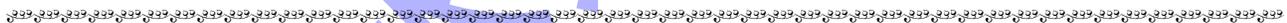
[8] 李怀峰, 于坤, 李焱彬, 等. 黄河下游地区桥梁后压浆桩承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1579-1583.
LI H F, YU K, LI Z B, et al. Field test study on bearing characteristics of post-grouting piles of bridges in lower Yellow River [J]. Building structure, 2021, 51(S2): 1579-1583.

[9] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
China Academy of Building Research. Technical code for building pile foundations: JGJ 94 - 2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[10] 刘金波, 郭金雪, 张松, 等. 灌注桩质量问题处理原则和方法[J]. 施工技术, 2018, 47(1): 143-147.
LIU J B, GUO J X, ZHANG S, et al. Treatment principle and approach of bored pile quality problems [J]. Construction technology, 2018, 47(1): 143-147.

[11] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHANG Y, LIU J B. Pile foundation manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

(本文编辑 王璁)



(上接第 115 页)

[7] 刘成民, 夏玉斌. 盐田港三期工程强夯参数确定[J]. 水运工程, 2009(10): 143-146, 152.
LIU C M, XIA Y B. Determination of dynamic compaction parameters for Yantian Port phase III project [J]. Port & waterway engineering, 2009(10): 143-146, 152.

[8] 张先亮, 丘建金. 深圳西海岸填海区软土工程特性差异分析及处理方法建议[J]. 工程地质学报, 2006(14): 350-354.
ZHANG X L, QIU J J. The analysis and suggestion of disposing methods on the engineering characteristic diversity of the soft soil in sea reclamation area of west coast of Shenzhen [J]. Journal of engineering geology, 2006(14): 350-354.

[9] 张运标. 深圳地区第四系主要地层特征探讨[J]. 广州建筑, 2011, 39(5): 3-10.
ZHANG Y B. Shenzhen quaternary stratigraphy of the main layer [J]. Guangzhou architecture, 2011, 39(5): 3-10.

[10] 张运标. 深圳地区常见的工程地质问题和工程实例[J]. 广州建筑, 2009, 37(5): 50-56.
ZHANG Y B. Common problem of engineering geology and engineering examples in Shenzhen [J]. Guangzhou architecture, 2009, 37(5): 50-56.

(本文编辑 赵娟)