

大直径后注浆灌注桩 在极软岩地质条件码头中的应用

王景灯

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 湄洲湾港秀屿港区石门澳作业区11#泊位工程建设1个10万吨级通用泊位及相应的配套设施, 码头平台采用高桩梁板式结构, 对地基承载力要求高。针对码头平台下部基础为极软岩的地质条件, 对码头平台的大直径灌注桩采用桩端后注浆工艺, 通过静载试验对比分析未注浆与后注浆灌注桩。结果表明, 经过桩端后注浆的灌注桩有效提高单桩竖向承载力, 控制了码头沉降量, 减小基桩的入土深度, 缩短工程建设工期, 节省工程造价, 具有显著的经济效益和社会效益。

关键词: 灌注桩; 后注浆; 单桩竖向承载力; 静载荷试验

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0195-07

Application of post-grouting pile with large diameter in wharfs with extremely soft rock geological condition

WANG Jingdeng

(Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: The project of Berth 11 in Shimen'ao operation area of Xiuyu port area in Meizhou Bay Port, is a project constructing a 100,000 DWT bulk and general cargo wharf with relevant supporting facilities. The wharf is a high-piled beam-slab structure, which requires high foundation bearing capacity. In response to the geological condition of the lower part of the wharf foundation which is extremely soft rock, post-grouting technology is adopted at the pile toe of large-diameter cast-in-place piles, the static load test results of non-grouting and post-grouting cast-in-place piles is compared. The results show that the post-grouting pile can effectively improve the vertical bearing capacity of single pile, control the settlement of wharf, reduce the depth of foundation pile, shorten the project construction period, save the project cost, and has significant economic and social benefits.

Keywords: cast-in-place pile; post-grouting; vertical bearing capacity of a single pile; static load test

我国灌注桩后注浆技术应用始于20世纪80年代初^[1], 近年来, 该技术在建筑桩基和桥梁桩基设计中得到广泛应用。目前后注浆技术在码头中的应用并不多, 特别是直径大于2 m的灌注桩。灌注桩后注浆施工工艺是指在灌注桩成桩一定时间后, 通过预设于桩身内的注浆导管及与之相连的桩端、桩侧注浆阀以压力注入水泥浆的工艺。

通过后注浆一方面可以通过桩底和桩侧后注浆加固桩底沉渣和桩身泥皮; 另一方面可以对桩底及桩侧一定范围通过渗入、劈裂和压密注浆起到加固效果, 从而大幅度增加基桩的桩侧阻力和桩端阻力, 达到提高单桩承载力和减小桩基沉降的目的。

湄洲湾港秀屿港区石门澳作业区11#泊位工程

收稿日期: 2024-02-20

作者简介: 王景灯(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程规划及设计工作。

码头平台采用灌注桩基础，桩基直径为 2.3 和 2.5 m 两种；桩基持力层为散体状强风化花岗岩，该土层具有强度高、压缩性低的力学性能，但又同时具有泡水易软化、崩解而导致强度降低的特点。岩石坚硬程度属极软岩，岩石完整程度为极破碎。本文通过对码头平台的大直径灌注桩采用桩端后注浆工艺，并进行静载荷试验以验证其实际工程效果。

1 工程概况

湄洲湾港秀屿港区石门澳作业区 11# 泊位工程位于湄洲湾北岸石门澳内，项目建设 1 个 10 万吨

级通用泊位及相应的配套设施，年设计通过能力 466 万 t^[2]。

结合工程规划、用海政策、地质条件以及经济技术指标等因素综合分析比选，码头结构形式采用高桩梁板式结构，桩基采用灌注桩。码头平台长 306 m，宽 33 m，码头面高程为 10.0 m。码头平台分为 4 个分段，每个分段长约 70 m，排架间距 10 m，每个排架由 1 根直径 2.5 m 和 3 根直径 2.3 m 钻孔灌注桩(采用桩端后注浆工艺)组成，桩基持力层为散体状强风化花岗岩。码头结构断面见图 1。

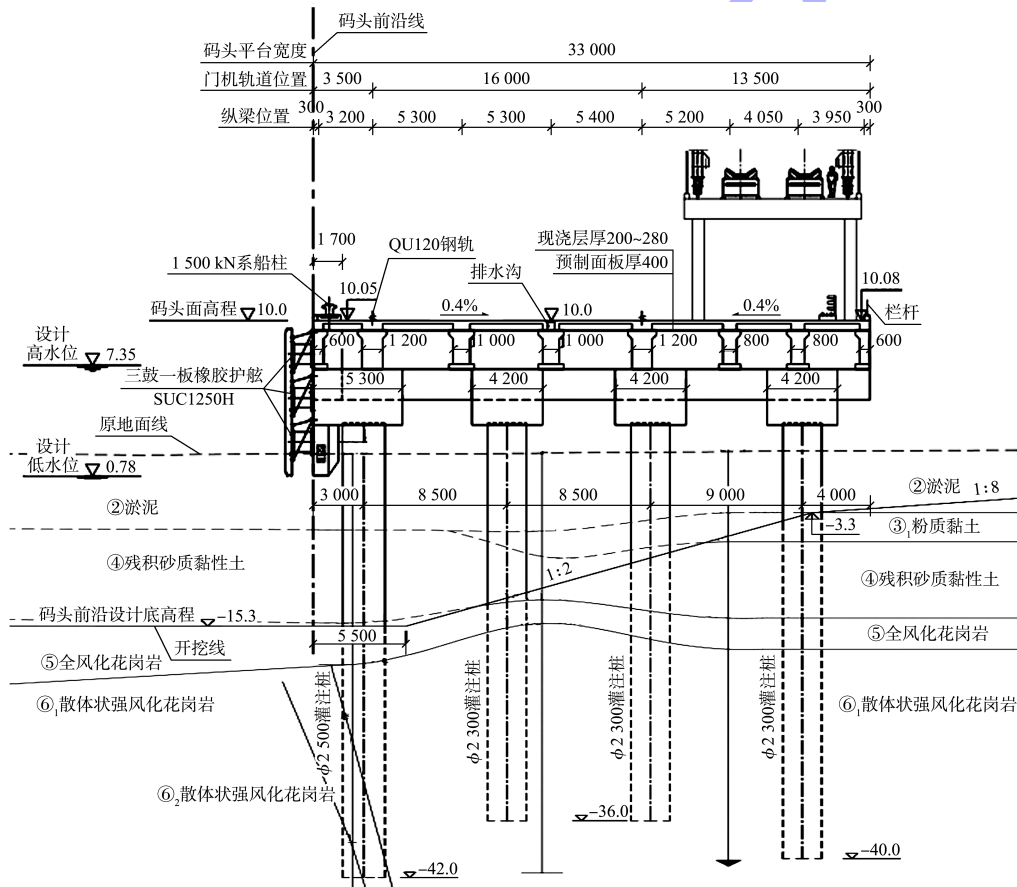


图 1 码头结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 自然条件

2.1 设计水位

高潮累积频率 10% 设计高水位 7.35 m (高程基准为当地理论最低潮面，位于 1985 国家高程基准下 3.77 m)，低潮累积频率 90% 设计低水位 0.78 m；50 a 一遇极端高水位 8.61 m，50 a 一遇极端低水位 -0.16 m。

2.2 设计波浪

设计高水位下重现期 50 a 一遇波浪要素见表 1。

表 1 重现期 50 a 一遇波浪要素

方向	波高 $H_{1\%}$ /m	周期 T /s	波长 L /m
S	2.30	5.2	33.8
SW	1.35	3.8	20.9
SE	1.80	4.4	29.5

2.3 工程地质

工程主要地基土自上而下为: 淤泥, 厚 0.40~10.30 m, 流塑状; 粉质黏土, 厚 0.40~10.90 m, 可塑-硬塑, 标贯击数 4.59~20.93 击; 中砂, 厚 0.50~3.50 m, 稍密-中密状, 标贯击数 6.76~19.28 击; 残积砂质黏性土, 厚 0.70~16.40 m, 硬塑状, 标贯击数 8.29~23.1 击; 全风化花岗岩,

厚 0.70~20.20 m, 标贯击数 20.84~35.77 击, 具有泡水易软化、崩解, 强度降低的特点, 岩石坚硬程度属极软岩, 岩石完整程度为极破碎; 散体状强风化花岗岩, 受孔深限制, 揭露最大厚度为 28.30 m, 标贯击数 31.78~110.08 击, 具有泡水易软化、崩解, 强度降低的特点, 岩石坚硬程度属极软岩, 岩石完整程度为极破碎。土层特征参数见表 2。

表 2 土层特征参数

岩土名称	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	直接快剪		地基承载力 特征值 f/kPa	冲、钻孔灌注桩	
		黏聚力标准值 c_k/kPa	内摩擦角标准值 $\varphi_k/(^\circ)$		极限桩侧摩阻力 标准值 q_l/kPa	极限桩端阻力 标准值 q_R/kPa
全风化花岗岩	1.95	24	28	350	85	1 500
散体状强风化花岗岩	2.05	25	30	500	110	3 000

3 码头平台桩基设计方案

3.1 码头平台桩基选型及特点

根据地勘资料可知, 码头平台区域强风化岩埋深较浅, 挖入式港池在满足码头前沿停泊水域水深的情况下, 已开挖至全风化层。若采用打入桩, 将无法满弹性长桩入土深度的要求。因此, 本工程在采用高桩梁板式结构的情况下, 只能采用灌注桩基础。本项目灌注桩设计特点:

1) 码头为 10 万吨级通用泊位, 泊位等级大, 且需要装卸集装箱和散货等多货种, 工艺复杂, 上部装卸设备多且重, 要求基桩承载力大。

2) 码头采用的高桩梁板式结构对沉降敏感, 需严格控制沉降量。

3) 码头采用挖入式港池, 基桩上部覆盖层薄, 灌注桩侧摩阻小。

4) 码头平台区域中风化层埋深非常深, 灌注桩持力层只能采用散体状强风化花岗岩, 而其具有强度高、压缩性低的力学性能, 但同时具有泡水易软化、崩解而导致强度降低的特点。岩石坚硬程度属极软岩, 完整程度为极破碎, 以该土层为持力层则桩基竖向承载力低。

码头平台布置直径 $\phi 2.5$ m 的灌注桩 32 根, 直径 $\phi 2.3$ m 的灌注桩 96 根, 共计 128 根灌注桩。结合本工程灌注桩的主要特点, 桩基持力层为极

软岩的散体状强风化花岗岩桩端阻力小, 沉降量大, 上部覆盖层薄桩侧摩阻力小, 桩基的竖向承载力小, 而码头平台要求的单桩极限承载力高, 需控制沉降量。一是通过加大灌注桩桩径和桩长提高基桩承载力; 二是通过采取桩端后注浆的工艺提高桩端阻力, 进而提高基桩承载力。

码头结构内力计算涉及的波浪力等外力荷载的计算按相关规范公式计算, 按照 JTS 167—2018 《码头结构设计规范》^[3] 选取相应的荷载分项系数, 根据码头设计荷载组合得出直径 2.3 m 的桩基承载力设计值为 14.316 MN, 后续试验检测以该桩型进行比对。

桩基单桩承载力设计值计算根据 JTS 147-7—2022 《水运工程桩基设计规范》^[4] 计算:

1) 灌注桩单桩轴向抗压承载力设计值计算公式:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum \psi_{s,i} q_{t,i} l_i + \psi_p q_R A) \quad (1)$$

2) 后注浆灌注桩单桩轴向抗压承载力设计值计算公式:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum \beta_{s,i} \psi_{s,i} q_{t,i} l_i + \beta_p \psi_p q_R A) \quad (2)$$

式中: Q_d 为单桩轴向承载力设计值, kN; γ_R 为单桩轴向承载力抗力分项系数, 取 1.65; U 为桩身

截面周长, m ; $\beta_{s,i}$ 为第 i 层土的侧摩阻力增强系数; $\psi_{s,i}$ 、 ψ_p 分别为桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数; $q_{f,i}$ 为单桩第 i 层土的单位面积极限侧摩阻力标准值, kPa ; l_i 为桩身穿过第 i 层土的长度; β_p 为桩端阻力增强系数; q_R 为单桩单位面积极限桩端阻力标准值, kPa ; A 为桩端截面面积, m^2 。

计算结果见表 3。由表可知, 使用桩端后注浆工艺后, 在单桩承载力设计值同样的情况下单根桩可减少约 15 m 桩长。经测算, 采用桩端后注浆缩短桩长可节省投资 2 375 万元。因此, 本工程采用桩端后注浆工艺以提高单桩竖向承载力, 并通过试验检测确定其可行性。

表 3 直径 2.3 m 桩基单桩承载力设计值计算结果

工况	单根桩桩长/m	单根桩入土深度/m	桩侧摩阻力标准值/MN	桩端阻力标准值/MN	γ_R	Q_d /MN	备注
无后注浆	54.9	48.5	25.024	8.766	1.65	20.479	与后注浆对应承载力的工况
有后注浆	39.9	33.7	16.640	17.532	1.65	20.710	同一工况, 有无处理比对
无后注浆	39.9	33.7	16.640	8.766	1.65	15.397	

3.2 桩端后注浆技术要求

桩端后注浆技术要求为^[5-6]:

1) 后注浆作业前需进行注浆试验, 最终确定注浆参数。

2) 后注浆装置的设置应符合下列规定: ①超声波检测管兼做后注浆导管, 应采用钢管, 且应与钢筋笼固定并焊接。注浆管安装时应确保注浆嘴一端进入桩底沉渣或桩底部土中 300~400 mm, 注浆管连接处需用止水带密封; ②每根灌注桩均设置 5 根直径 60 mm、壁厚 4 mm 的注浆导管, 沿钢筋笼圆周对称布置, 导管端部设置注浆阀; ③钢筋笼应沉放到底, 不得悬吊, 下笼受阻时不得撞笼、墩笼、扭笼。

3) 后注浆阀性能应符合下列规定: ①注浆阀应能承受 1.5 倍桩长的泥浆压力, 注浆阀外部保护层应能抵抗砂石等硬质物的刮撞而不致使注浆阀受损; ②注浆阀应具备逆止功能。

4) 混凝土浇筑完成后 12~24 h 内, 应进行预埋管路的压水试验。正式注浆前应保持注浆管内水注满状态, 管内仍存在压力水时, 不得打开闸阀, 防止管内压力水射出伤人。

5) 注浆应采用 42.5 级水泥浆液, 水灰比 0.5~0.6。按每个循环使用量配置备用浆液, 浆液使用前应过筛, 防止杂物堵塞压浆孔, 浆液制备

后应静置不少于 5 min, 消除浆液中的空气。

6) 注浆作业与成孔作业点的距离不宜小于 8~10 m。桩端压浆终止压力暂定为 5~10 MPa, 持荷时间为 5 min, 压浆流量不超过 75 L/min。

7) 注浆作业宜于成桩 2~30 d 内, 桩身混凝土强度达到设计强度的 75%, 并在桩身超声波检测结束后进行。

8) 同一根桩中的全部压浆管宜同时均匀压注水泥浆。

9) 桩底注浆宜用注浆量与注浆压力双控, 当满足下列条件之一时可终止注浆: ①注浆总量和注浆压力均达到设计要求; ②注浆总量已达到设计值的 75%且注浆压力已超过设计值。

4 试验分析

4.1 试验方案

4.1.1 试验方法

选取 2 根工程桩 (B-2、C-3) 进行试验, 采用高应变检测和静载荷试验 2 种方法进行, 互为验证。高应变检测按照《水运工程地基基础试验检测技术规程》^[7] 执行, 采用实测曲线拟合法确定桩轴抗压承载力, 采用 30 t 自由落锤锤击, 现场 75 t 履带吊配合。

根据试验检测最大加载量 24.000 MN 的要求

和现场检测条件的具体情况,本工程反力装置形式采用锚桩法,锚桩反力由试桩相邻的 4 根 $\phi 2\ 300\ \text{mm}$ 的工程灌注桩提供^[8]。反力装置由 2 根并排的 20 m 主梁和 4 根 12 m 次梁组成,次梁并列 4 排,与锚桩通过长 500 mm 的钢圆管(半径 1 070 mm、厚度 30 mm)分别焊接连接。利用 $\phi 2\ 300\ \text{mm}$ 的工程灌注桩的施工平台作为主次梁吊装、安装及抗压试验的工作平台,平台不得与试验桩和基准桩相连接,平台设置护栏、安全警示标志和安全信号灯等。锚桩位置见图 2。

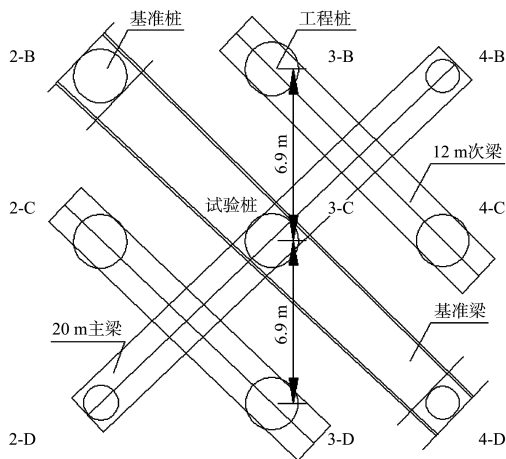


图 2 锚桩位置

4.1.2 反力装置安装要求

反力装置安装步骤如下: 1) 将试桩超灌至灌注桩施工平台之上,对桩头进行加固处理,加固混凝土应比桩身混凝土强度提高 2 个等级,处理后的试桩桩顶高程控制为 10.5 m。同时将 4 根锚桩超灌一定高度,并使 4-B 和 2-D 桩顶高程控制在 11.21 m, 2-C、3-B、3-D、4-C 锚桩主筋顶高程控制在 12.71 m; 2) 将 3 cm 厚铁板置于试桩中心,并将 5 个 630 t 千斤顶放置于铁板之上,千斤顶与主梁之间设置 10 cm 厚的铁板,铁板与主梁间预留 5 cm 工作行程; 3) 将 2 根 20 m 的主梁并排置于试桩之上,圆管与主梁两侧分别焊接牢固后,与灌注桩主筋焊接; 4) 2 根 12 m 次梁吊装至 2-C 和 3-D 锚桩上方的主梁之上,并列 2 排; 另外 2 根 12 m 次梁吊装至 3-B 和 4-C 锚桩上方的主梁

之上;再通过圆管与次梁两侧分别焊接牢固后,与锚桩主筋焊接。整体反力装置见图 3。

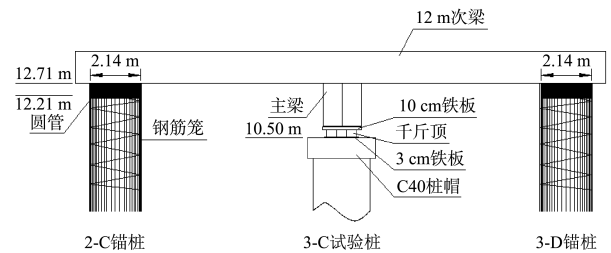


图 3 整体反力装置

4.1.3 检测方法 & 检测要求

1) 检测方法。在轴向抗压承载力试验前,对试桩和锚桩桩身完整性进行检测,桩身完整性满足设计要求、试桩混凝土强度达到设计强度等级要求且不少于 28 d 后方可进行加载试验。试验采用慢速维持荷载法,荷载由油泵通过千斤顶施加于桩顶,试桩采用 5 个千斤顶控制荷载的施加,千斤顶的中心点应与桩轴线重合。桩顶沉降量由 4 个位移传感器测得,最后根据原始记录进行室内资料整理。抗压静载试验过程中利用水准仪对 8 根锚桩上拔量进行监测,其上拔量控制在设计允许范围内。

2) 荷载分级。试验最大加载量为 24.000 MN,加载分为 10 级进行,第 1 级取分级荷载的 2 倍进行加载。如加载至最大试验荷载后,尚未达到极限状态,试验终止。

3) 每级荷载施加后,沉降测读时间应为 0、5、10、15、30 min,其后每隔 30 min 测读 1 次,至 60 min 内对应沉降值不大于 0.1 mm 为止;卸载时,沉降测读时间为 0、15、30、60 min。卸载至零测读 1 次,维持 180 min 结束时再测读 1 次。

4) 终止加载条件。当试验符合下列条件之一时可终止试验:

①某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍或 $Q-s$ 曲线出现可以判断极限承载力的陡降段,且桩顶总沉降量超过 40 mm;

②采用慢速维持荷载法试验,在某级荷载作

用下, 24 h 未达到稳定标准;

③ $Q-s$ 曲线没有明显陡降段, 桩顶总沉降量达 60~80 mm 或达到设计要求的最大允许沉降量;

④检测性试验已加载至设计要求的最大加载量。

4.2 试验结果

4.2.1 高应变检测结果

如表 4 所示, 高应变检测出的轴向抗压承载力标准值考虑单桩轴向承载力抗力分项系数 1.65 后的单桩轴向抗压承载力设计值为 14.867~15.721 MN, 与规范计算的无后注浆单桩轴向抗压承载力设计值 15.397 MN 基本一致^[9-12]。

表 4 高应变检测结果

桩号	单桩轴向抗压承载力标准值/MN			备注
	桩侧	桩端	合计	
B-2	14.120	10.410	24.530	无后注浆
C-3	12.760	13.180	25.940	无后注浆

4.2.2 静载检测结果

为验证后注浆对灌注桩承载力提升效果, 对 B-2 桩注浆前后进行静载试验, 第 1 次静载时未进行桩底后注浆, 检测时间为 2023-06-25—2023-06-26。第二次静载于注浆后 20d 进行, 检测时间为 2023-07-24—2023-07-25。对 C-3 桩只做有后注浆的工况。静载检测结果见表 5。

表 5 静载荷试验结果

桩号	最大试验荷载/MN	最大试验荷载下沉量/mm	残余变形/mm	极限荷载下沉量/mm	单桩极限承载力标准值/MN	备注	
B-2	第 1 次静载检测	21.600	83.36	-	40.00	17.430	无后注浆
	第 2 次静载检测	24.000	14.33	6.64	-	24.000	有后注浆
C-3	24.000	16.56	9.30	-	24.000	有后注浆	

桩静载的荷载-沉降量 $Q-s$ 曲线见图 4。由图可知, 静载荷试验检测的无后注浆情况下单桩极限承载力标准值考虑单桩轴向承载力抗力分项系数 1.60 后的单桩轴向抗压承载力设计值为 10.894 MN (沉降量 40 mm 对应的荷载作为极限承载力标准值), 采用桩端后注浆工艺后, 其单桩轴向抗压承载力设计值均满足设计要求的承载力(由于采用工程桩做试验, 因此未加载至其极限承载力状态), 说明后注浆工艺有效提高了桩基的承载力并减小了沉降量。

4.2.3 试验结果分析

对比高应变检测和静载荷试验 2 种方法的检测结果可知, 单桩极限承载力在未注浆情况下采用高应变检测结果与规范计算值基本一致, 为 15.397 MN, 且均大于设计要求的 14.316 MN, 但同工况下采用静载荷试验检测的单桩轴向抗压承载力设计值仅为 10.894 MN。根据规范规定, 静载荷试验的单桩极限承载力在 $Q-s$ 曲线没有明显陡降段, 桩顶总沉降量 40 mm 所对应的荷载为极限承载力。试验的 $Q-s$ 曲线没有明显陡降段, 说明在静载荷试验下, 桩基虽然沉降量大, 但曲线属于缓变, 并未超过地基土的极限承载力。笔者分析主要是由于桩底沉渣和局部厚度范围内的散体状强风化岩的泡水软化、崩解引起, 符合极软岩的工程特征。2 种检测地基承载力的方法均是可行的, 工程桩基承载力有无注浆均大于 24.000 MN, 桩端后注浆在本工程的关键作用是减小桩基的沉降量。

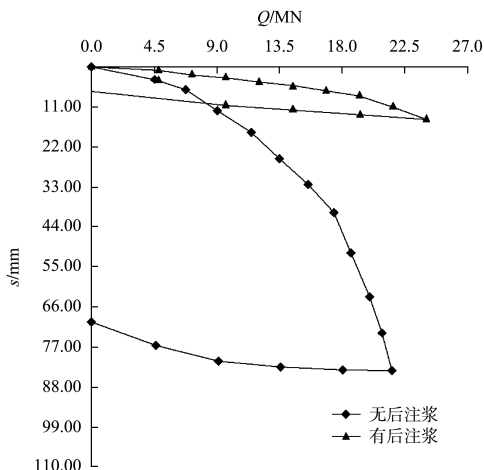


图 4 桩静载 $Q-s$ 曲线

4.3 施工参数确定

根据试验结果, 对设计提出的桩端后注浆施工参数进行调整: 1) 对于直径大于 2 m 的灌注桩

分 2 批次进行注浆, 第 1 批 3 根注浆管同步注浆, 注浆总量达到停止注浆标准后, 再开始第 2 批剩余 2 根注浆管同步注浆, 直至达到停止注浆标准。

2) 散体状强风化花岗岩沉渣厚度小, 主要系泡水软化、崩解, 声测管底部注浆喷嘴进入桩底沉渣 3 cm 即可; 3) 注浆压力按 1.0 MPa 控制; 4) 满足以下任意条件即可停止注浆: ①直径 2.3 m 灌注桩注浆量达到 7.0 t, 直径 2.5 m 灌注桩注浆量达到 8.0 t; ②注浆总量已达到原设计注浆量的 75%且注浆压力已超过 10 MPa; ③如发现水泥浆从桩周冒出, 间歇 30 min 后再换其它注浆管注浆, 直至注浆量达到第①点要求, 或者水泥浆从桩周冒出。

5 结论

1) 在极软岩地质条件下, 码头通过采用大直径灌注桩桩端后注浆工艺, 有效提高了单桩竖向承载力, 控制了码头沉降量。项目单桩长度减小 15 m, 节省 2 375 万元, 有效缩短 2 个月工期, 经济效益和社会效益显著。

2) 高应变和静载检测结果表明, 在极软岩情况下, 高应变可以检测桩基的承载力, 但无法预警桩基的沉降, 如在类似极软岩地基上建设沉降要求高的建筑, 建议采用静载荷试验方法, 既能检测承载力, 又能反映沉降情况。

参考文献:

[1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[2] 福建省交通规划设计院有限公司. 湄洲湾港秀屿港区石门澳作业区 11 号泊位工程施工图设计文件[R]. 福州: 福建省交通规划设计院有限公司, 2021.

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 237—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.

[5] 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[6] 福建建工集团总公司, 福建省二建建设集团有限公司. 福建省灌注桩后注浆施工技术规范. DBJ/T 13-247—2016[S]. 福建: 福建省住房和城乡建设厅, 2016.

[7] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基基础试验检测技术规范: JTS 237—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[8] 白晓宇, 牟洋洋, 张明义, 等. 风化岩基大直径灌注桩后注浆承载性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 1-11.

[9] 付裕, 张肖. 大直径桩端后注浆灌注桩在某工程中的应用[J]. 江西建材, 2023(3): 326-327, 335.

[10] 李永辉, 朱翔, 周同和. 桩端后注浆对大直径灌注桩影响的现场对比试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 388-396.

[11] 周占磊, 赵春晓. 后注浆灌注桩在孟加拉某电厂工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2019(2): 6-9.

[12] 刘贵强, 杨文, 高小平, 等. 钻孔灌注桩桩端后注浆试验研究[J]. 工程与建设, 2015, 29(6): 796-798.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 187 页)

[6] OCDI. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: OCDI, 2002.

[7] 徐雪松, 王婷婷. 基于 Plaxis3D 空间的钢圆筒围护结构稳定性控制[J]. 水运工程, 2014(10): 161-164.

[8] 彭志豪, 卢永昌. 插入式钢圆筒内侧土压力分布规律及计算方法[J]. 水运工程, 2019(9): 249-252, 258.

[9] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 中交一航局

第一工程有限公司. 插入式钢圆筒结构设计与施工规范: JTS 167-13—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

[10] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.

(本文编辑 王璁)