



后注浆灌注桩 在外海岩基码头工程中的应用

任志杰，梁超

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：针对在外海无掩护孤立墩施工环境条件下岩基上采用灌注斜桩存在泥浆护壁的泥皮和孔底残余沉渣降低桩基承载力、孔壁浸泡软化降低桩周土层土体强度、混凝土芯柱过长质量难以保证、硬质岩层钻孔成孔难度大、成孔工期长等技术难点，进行减小桩基入岩深度和提高桩基承载力的研究。采用灌注桩施工后进行桩底后注浆技术，对桩底沉渣和岩基裂隙进行注浆密实，并对后注浆桩基进行检测。结果表明，后注浆能提高桩基承载力，有效减小桩基入岩芯柱长度，从而保证混凝土芯柱质量，缩短施工工期。

关键词：外海；岩基；灌注斜桩；后注浆；桩基承载力；入岩芯柱长度

中图分类号：U 655.55

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0370-06

Application of post-grouting cast-in-place pile in offshore batholith wharf project

REN Zhi-jie, LIANG Chao

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: For constructing the cast-in-place batter pile on batholith under the offshore construction conditions of without cover and isolated pier, several technology difficulties exist, such as mud counterfort and bottom sediment reducing pile bearing capacity, soak softening of hole wall lowering the soil strength, hard to ensure quality of long concrete core column, difficult to drill hole on batholith and long hole forming period. In terms of these construction difficulties, we carry out research on reducing the depth of pile into rock and improving the bearing capacity of pile foundation. We apply the post-grouting measure after the cast-in-place pile construction, compact sinking slag and batholith fissure, and test the post-grouting pile foundation. The results show that the post-grouting measure increases pile bearing capacity, reduces the depth of pile into rock, guarantees concrete core quality and decreases the construction period.

Keywords: offshore; batholith; cast-in-place batter pile; post-grouting; pile bearing capacity; depth of concrete core column into rock

大型原油码头工程一般位于外海浪大、水深的无掩护开敞水域，且码头多为蝶形布置、采用墩式结构，在外海无掩护孤立墩施工环境条件下桩基施工难度大。本文以青岛港董家口港区原油码头二期工程为例，介绍30万吨级泊位引桥桩基在外海无掩护施工环境岩基上采

用灌注斜桩所存在的主要技术难点，进行减小桩基入岩深度和提高桩基承载力的研究，并根据研究结果进行了外海岩基上灌注桩桩端后注浆设计、施工及施工后桩基检测，形成外海斜桩灌注桩后注浆技术，为同类工程提供借鉴。

1 工程概况

青岛港董家口港区原油码头二期工程 30 万吨级油品泊位位于董家口嘴作业区西防波堤二期工程外侧, 码头平面采用蝶形布置, 设置 1 个工作平台、4 个靠船墩、6 个系缆墩, 与引桥成 T 形布置, 引桥长 456 m, 总宽 12 m, 上部结构采用预应力混凝土变截面连续箱梁形式, 引桥墩采用高桩墩台结构, 共 7 个墩 (2#~8#墩), 墩顶高程 8.9 m, 墩台尺寸为 10 m×10 m×3 m(长×宽×高)。本工程 30 万吨级泊位见图 1。



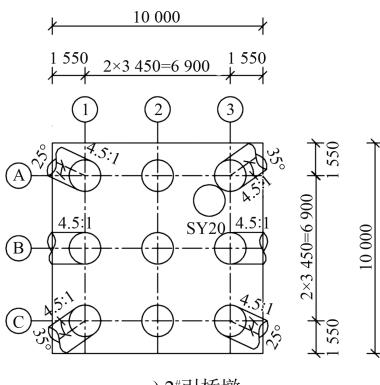
图 1 30 万吨级泊位

引桥墩基础均为 $\phi 1.5$ m 的钢管桩+灌注桩嵌岩芯柱, 钢管桩打入强风化岩面不少于 4 m, 极端岩面以下 4.5~9.0 m 采用芯柱灌注嵌岩, 各引桥墩桩基布置见表 1。

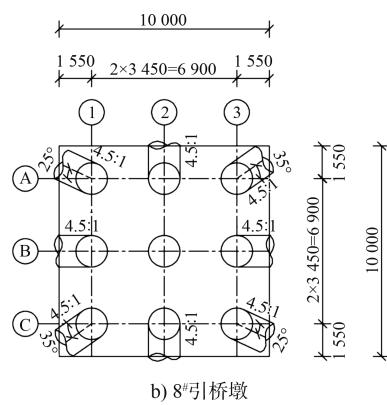
表 1 引桥墩桩基布置

引桥墩	单墩桩 数量/根	单墩桩基布置	压桩力设 计值/MN
2#墩	9	6 根斜桩(斜度 4.5:1)和 3 根直桩	7.072
3#~7#墩	8	8 根斜桩(斜度 4.5:1)	7.756
8#墩	9	8 根斜桩(斜度 4.5:1)和 1 根直桩	7.072

引桥墩桩位布置见图 2, 引桥墩结构断面见图 3。

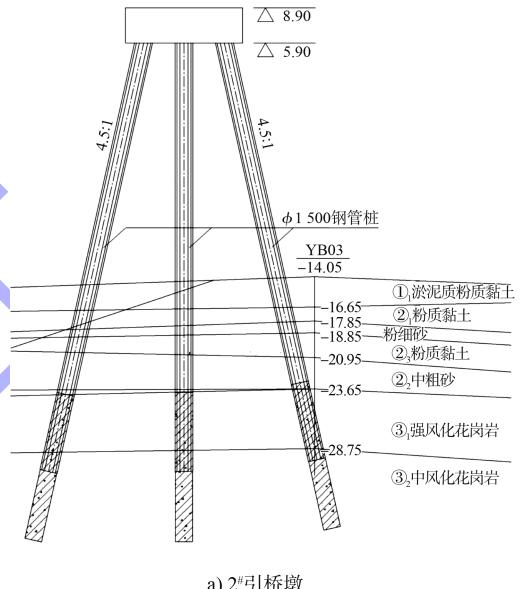


a) 2#引桥墩

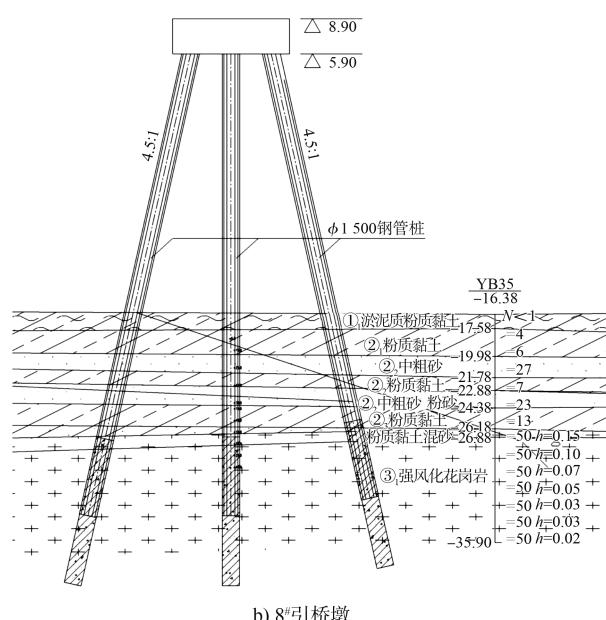


b) 8#引桥墩

图 2 引桥墩桩位布置 (单位: mm)



a) 2#引桥墩



b) 8#引桥墩

注: N 为标贯击数(击); h 为贯入度(m)。下同。

图 3 引桥墩结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

工程所在区域泥面高程在-16.99~-15.41 m 之间。工程场区岩土层分布较有规律, 其岩土层自上而下分布为: ①₁淤泥质粉质黏土、②₁粉质黏土、②₂中粗砂、夹层粉质黏土混砂、②₃粉质黏土、③₁强风化花岗岩、③₂中风化花岗岩。其中粗粒强风化花岗岩为黄褐色, 原岩结构可见, 主要成分为

石英、长石, 岩芯呈砂土状, 手掰易碎, 遇水软化崩解, 该层连续分布, 平均标贯击数 $N > 50$ 击; 中风化花岗岩为青灰色、肉红色、夹灰白色斑, 粒状结构, 主要矿物成分为石英、长石, 节理裂隙较发育, 岩芯呈短柱状, 锤击声哑, 不易碎。引桥区域工程地质典型剖面见图 4, 各土层地质指标见表 2。

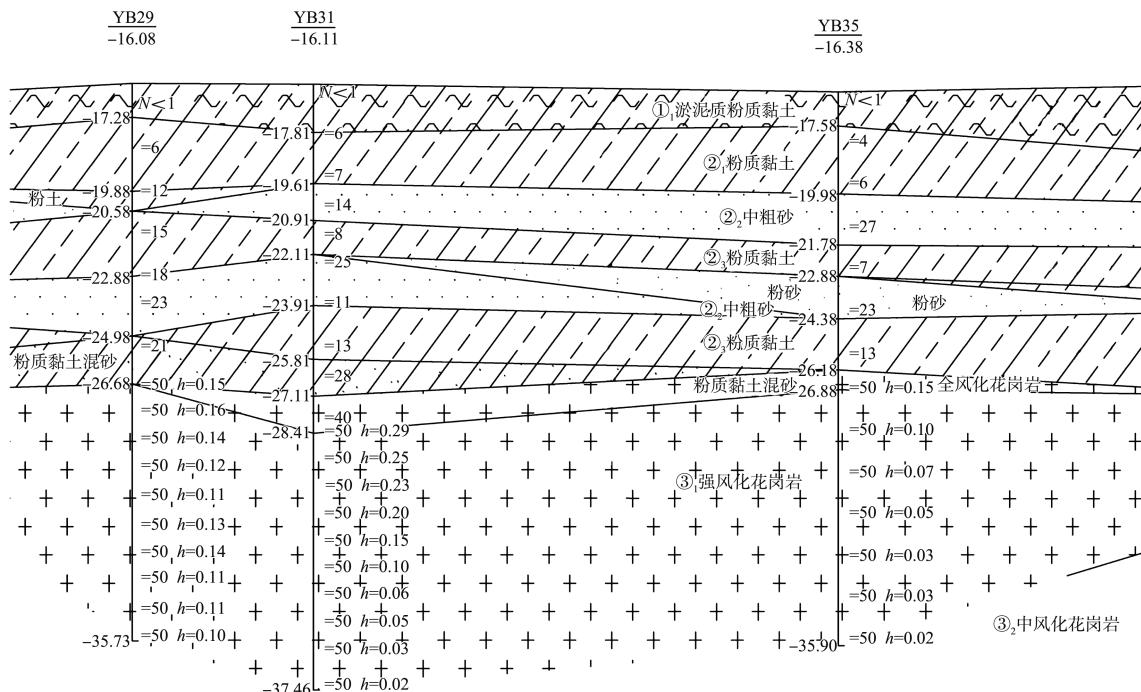


图 4 引桥区域工程地质典型剖面 (单位: m)

表 2 各土层地质指标

土层	土的状态	土层一般深度/m	打入桩			泥浆护壁钻(冲)孔桩		
			单位面积极限侧摩阻力标准值 q_s/kPa	单位面积极限桩端阻力标准值 q_R/kPa	土的水平地基抗力系数随深度增长的比例系数 $m/(MN \cdot m^{-4})$	单位面积桩侧摩阻力标准值 q_s/kPa	极限单位面积桩端阻力标准值 q_R/kPa	土的水平地基抗力系数随深度增长的比例系数 $m/(MN \cdot m^{-4})$
① ₁ 淤泥质粉质黏土	$N < 1$ 击	1.5	4	-	3	12	-	3
	液性指数 $I_L = 0.55$,							
② ₁ 粉质黏土	孔隙比 $e = 0.697$, $N = 7.1$ 击	3.0	35	-	7	50	-	7
粉细砂	$N = 14.2$ 击	4.0	36	-	7	35	-	7
② ₂ 中粗砂	$N = 20.9$ 击	8.5	60	-	12	60	-	15
	液性指数 $I_L = 0.61$,							
② ₃ 粉质黏土	孔隙比 $e = 0.713$, $N = 11.9$ 击	5.5	40	-	7	50	-	7
全风化花岗岩	$N = 38.0$ 击	9.0	100		15	90	-	20
③ ₁ 强风化花岗岩	$N > 50$ 击	13.0	160	7 000	22	150	2 000	50
③ ₂ 中风化花岗岩	饱和单轴抗压强度标准值为 46.4 MPa	-	-	-	-	-	-	-

2 岩基上采用灌注斜桩存在的主要技术难点

2.1 成孔采用泥浆护壁形成泥皮降低桩基侧摩阻力

本工程斜桩灌注芯柱成孔在强风化岩层中, 工程区域强风化原岩风化呈砂土状, 手掰易碎, 遇水软化崩解, 在钻头的扰动下极易导致塌孔; 因此, 在成孔过程中采用了泥浆护壁, 以维持孔壁稳定, 避免出现塌孔现象。泥浆中的黏土颗粒在循环过程中吸附于孔壁, 形成泥皮, 起到保护孔壁的作用, 但泥皮降低了灌注芯柱混凝土与桩周土层的黏结力, 降低了桩侧摩阻力。

2.2 孔底沉渣降低桩基承载力

本工程采用泥浆护壁、反循环钻机成孔, 成孔检查合格后进行清孔, 通过泥浆循环系统清理孔内的沉渣。经检测, 清孔后沉淀物厚度 5~10 cm, 孔底沉渣难以完全清除, 降低了桩基承载力。

2.3 孔壁受浸泡软化, 桩周岩土层抗压、抗剪强度降低

在成孔过程中, 泥浆护壁时桩孔内充满泥浆, 在清孔后浇筑混凝土之前, 桩孔内充满海水, 孔壁受泥浆和海水浸泡, 使桩周岩土层的抗压和抗剪强度降低, 导致桩基承载力降低。

2.4 混凝土芯柱过长质量难以保证

本工程混凝土芯柱采用导管水下灌注混凝土成桩工艺, 水下混凝土必须连续灌注, 一次完成, 严禁中途停工; 且为防止钢筋骨架被混凝土顶托上升, 应尽量缩短混凝土总灌注时间, 防止顶层混凝土进入钢筋骨架时流动性过小。如混凝土芯柱过长, 浇筑质量难以保证。

2.5 成孔难度大、工期长

本工程所处区域岩层风化程度不均, 强风化岩层较发育区域厚度超过 10 m, 风化岩层单轴抗压强度为 67.1~94.1 MPa, 斜桩灌注成孔施工时, 钻头在进入强度较高岩层时钻孔进尺缓慢, 且本工程范围内强风化原岩风化呈砂土状, 手掰易碎, 遇水软化崩解, 在钻头的扰动下极易导致塌孔, 如成孔深度加深, 则孔壁岩体软化崩解后在重力作用下更易发生塌孔, 导致成孔工期需要更长^[1]。

在斜桩成孔时, 由于孔位倾斜, 为了有效保证成孔轴线及尽量避免钻头咬桩, 在钻头回旋钻进时须安装导向装置, 但钻杆在重力作用下不可

避免存在挠曲, 尤其是当钻头进入钢管桩端以下位置, 因为没有钢管桩约束, 孔位将更向下倾斜, 如成孔深度加深, 则严重影响成桩质量。

3 灌注桩后注浆设计

3.1 后注浆灌注桩承载力计算原理

本工程针对技术难点进行了减小桩基入岩深度和提高桩基承载力的研究, 通过采用灌注桩施工后进行桩底后注浆等技术措施, 对桩底沉渣和岩基裂隙进行注浆密实, 以提高桩基承载力, 有效减小桩基入岩长度, 从而减小斜桩成孔长度, 保证混凝土芯柱质量, 缩短施工工期。根据《码头结构设计规范》^[2], 灌注桩采用后注浆技术时, 可大幅提升灌注桩的侧阻力和端阻力, 其单桩极限轴向抗压承载力应通过静载荷试验确定, 在符合《码头结构施工规范》^[3]有关后注浆技术实施规定的条件下, 其单桩轴向承载力设计值可按下式估算:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_d} [U \left(\sum_{i=1}^n \beta_{si} \psi_{si} q_{fi} l_i \right) + \beta_p \psi_p q_R A] \quad (1)$$

式中: Q_d 为单桩轴向承载力设计值(kN); γ_d 为单桩轴向承载力抗力分项系数, 对于灌注桩, 经验参数法取 1.55~1.65; U 为桩身截面周长(m); ψ_{si} 、 ψ_p 为桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数; q_{fi} 为单桩第 i 层土的单位面积极限侧摩阻力标准值(kPa); l_i 为桩身第 i 层土的长度(m); 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); β_{si} 、 β_p 分别为第 i 层土的侧阻力增强系数、端阻力增强系数, 按表 3 取值。

表 3 后注浆侧阻力增强系数 β_{si} 、端阻力增强系数 β_p 取值

土层名称	β_{si}	β_p
黏性土、粉土	1.3~1.4	1.5~1.8
粉砂	1.5~1.6	1.8~2.0
细砂	1.5~1.7	1.8~2.1
中砂	1.6~1.8	2.0~2.3
粗砂	1.5~1.8	2.2~2.4
砾砂	1.6~2.0	2.2~2.4
碎石土	1.5~1.6	2.2~2.5

3.2 计算结果及分析

本工程桩基共计 58 根, 其中斜桩 54 根、直桩 4 根, 灌注桩芯柱位于强风化花岗岩中, 采用桩底后注浆, 灌注桩后注浆的侧阻力和端阻力增

强系数按碎石土增强系数取 $\beta_{si} = 1.5$ 、 $\beta_p = 2.2$ ，计算得出灌注桩后注浆满足要求所需的入岩芯柱长度和对应的桩基承载力。

以 2#墩 B2 桩和 8#墩 B2 桩为例，分别计算灌注桩采用后注浆前后的入岩芯柱长度和对应的桩基承载力，并进行对比，计算结果见表 4。

表 4 采用后注浆前后灌注桩芯柱长度及桩基承载力计算结果对比

引桥墩	桩号 (控制钻孔)	是否采用 后注浆	入岩芯柱 长度/m	抗压承载 力设计值/ kN		抗拔承载 力设计值/ kN
				抗压承载 力设计值/ kN	抗拔承载 力设计值/ kN	
2#墩	2-B2 (YB03)	否	7	7 260	3 225	
		是	7	11 110	3 775	
	8-B2 (YB34)	否	2	5 748	1 987	
		是	2	8 196	2 293	
8#墩	8-B2 (YB34)	否	6	7 149	3 125	
		是	6	11 054	3 690	
	8-B2 (YB34)	否	2	5 940	2 033	
		是	2	8 388	2 379	

由表 4 可知，2#墩 B2 桩采用桩底后注浆，在满足桩基承载力要求时，灌注桩入岩芯柱长度可减小 5 m，如入岩芯柱长度不减小，桩基抗压承载力可提升 53%；8#墩 B2 桩采用桩底后注浆，在满足桩基承载力要求时，灌注桩入岩芯柱长度可减小 4 m，如入岩芯柱长度不减小，桩基抗压承载力可提升 55%。

4 灌注桩后注浆施工

4.1 施工流程

本工程后注浆采用单液高压注浆工艺。桩底后注浆施工工艺流程为：注浆管制作→桩成孔→注浆管固定在钢筋笼上一起吊放埋设→灌注桩身混凝土→注浆管注水开塞→水泥浆配制→注浆。后注浆施工工艺见图 5。

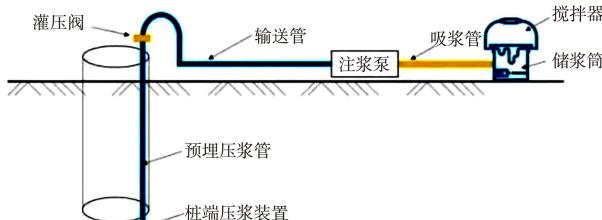


图 5 后注浆施工工艺

4.2 施工工艺

1) 注浆管制作。注浆管采用 3 根直径 50.8 mm 壁厚 2.5 mm 的无缝钢管，底部连接成品橡胶套，各段之间采用焊接连接。注浆管上端外部套丝及预留外接丝头，并用堵头封死；安放之前清除管内杂物，以防堵塞注浆孔。

2) 安装注浆管。安装时将 3 根钢管对称布置在钢筋笼内侧，并焊接固定，随钢筋笼同步安放，注浆管底必须连接桩底的橡胶套。后注浆注浆管安装见图 6。

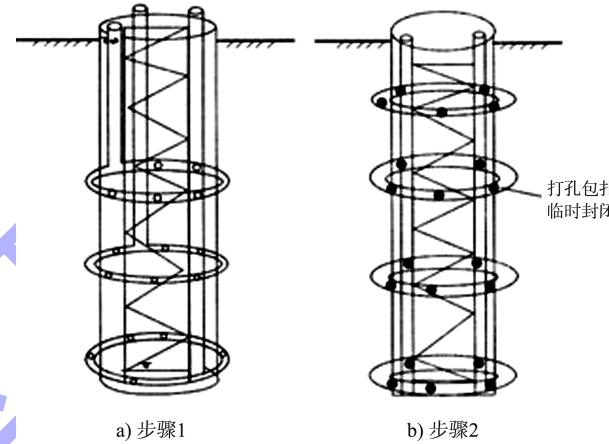


图 6 后注浆注浆管安装

3) 注浆管开塞及压水试验。成桩 1 d 即混凝土完成终凝前，用高压泵压送清水冲洗注浆管道，开塞压力在 5~8 MPa，并进行压水试验，压力不超过 5 MPa，注水量不小于 1 m³。

4) 安装孔口装置和输浆管。注浆管上部安装进浆阀和耐高压管路，连接 2UB-5 双型缸柱塞式灰浆泵，该泵最大工作压力 15 MPa，出浆量为 3~5 m³/h。

5) 注浆材料为 42.5R 普通硅酸盐水泥浆，根据每根桩所处区域岩层风化程度进行现场试验确定水灰比，水灰比在 0.5~0.9，浆液初凝时间 3~4 h，稠度 17~18 s，7 d 强度 ≥ 10 MPa。外添加剂采用 U 型膨胀剂，其掺量 ≤ 5%，使其补偿浆液收缩。水泥浆随拌随用，开塞压力 5~8 MPa，注浆压力为 1~3 MPa，维持压力 3 MPa，桩底压浆终止压力 5~10 MPa，持荷时间 5 min。

6) 高压注浆。用高压注浆泵压注水泥浆，注

浆前混凝土桩养护期不少于 7 d(混凝土强度达到 80%以上); 浆液在注浆过程中可由稀逐渐调浓, 以保证注浆效果。同一根桩中的全部压浆管同时均匀压注水泥浆, 采用分流器分流注浆, 每根分流管上安装压力表进行测定。注浆时应控制注浆流速保持低速, 注浆压力不超过 5 MPa, 现场随时根据注浆压力调整注浆流速, 水泥浆拌制应保证可以连续注浆。注浆过程中注浆压力变化见图 7。

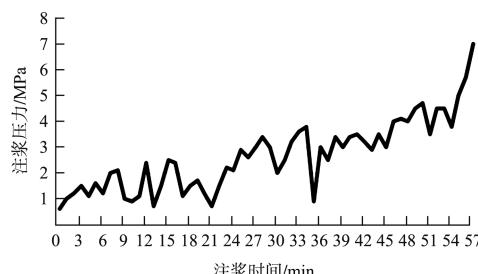


图 7 注浆压力变化

7) 注浆记录: 注浆过程中记录桩号、桩径、成桩时间、压浆时间、压水压力、开始注浆时间、

注浆压力、终止压力、水灰比、注浆量、终止时间、浆液稠度等。

因每根桩所处区域岩层风化程度不均, 现场统计单桩后注浆质量 1.20~3.14 t, 单桩注浆时间 2~4 h。

5 后注浆施工后桩基检测

5.1 后注浆后桩基承载力及桩身完整性检测

本工程在灌注桩后注浆施工后, 对 2#墩 B2 桩和 8#墩 B2 桩进行了高应变动力检测, 以检测桩基承载力及桩身完整性。检测结果为: 2#墩 B2 桩单桩竖向抗压极限承载力标准值为 13.446 MN, 8#墩 B2 桩单桩竖向抗压极限承载力标准值为 12.276 MN, 桩身均完整^[4]。

高应变动力检测结果显示, 灌注桩采取后注浆后桩基承载力设计值与计算值基本一致, 满足桩基设计要求。高应变动力检测结果见表 5。

表 5 高应变动力检测结果

桩号	桩长/m	桩径/mm	贯入度/mm	传递能量/kJ	极限承载力/MN	侧摩阻力/MN	端阻力/MN	完整性系数 β 值	桩身完整性
2-B2	42.0	1 500	3	104	13.446	4.750	8.696	1	完整
8-B2	38.6	1 500	2	125	12.276	3.591	8.685	1	完整

5.2 后注浆的桩底沉渣及岩基裂隙密实检测

本工程为检测后注浆的桩底沉渣及岩基裂隙的密实情况, 进行钻芯取样检测, 取芯孔钻到桩底 0.5 m 以下, 取出的混凝土芯柱直径大于 100 mm, 根据检测结果可知, 后注浆对桩底沉渣及岩基裂隙的密实效果良好。

6 结语

1) 在强风化岩岩基上灌注桩采用桩底后注浆措施后, 桩基承载力可提高 50%以上。

2) 在强风化岩岩基上灌注桩采用桩底后注浆措施后, 桩基承载力保持不变的情况下, 灌注入岩芯柱长度可减小 4~5 m, 减小斜桩成孔的难度, 保证成孔和混凝土芯柱浇筑质量, 同时在强风化花岗岩下亚带、中风化岩层中采用 40、15 cm/h 的钻进速度, 可以有效缩短工期。

3) 在强风化岩岩基上灌注桩采用桩底后注浆措施后, 后注浆对桩底沉渣及岩基裂隙的密实效果良好。

4) 在强风化岩岩基上进行灌注桩后注浆, 后注浆材料采用 42.5R 普通硅酸盐水泥浆, 应根据桩基所处区域岩层风化程度进行现场试验确定水灰比, 水灰比在 0.5~0.9, 浆液在注浆过程中可由稀逐渐调浓, 注浆过程中宜用低压、慢速注浆, 保证注浆效果。

5) 根据桩基所处区域岩层风化程度, $\phi 1.5$ m 灌注桩桩底后注浆在强风化岩岩基上单桩注浆质量 1.20~3.14 t, 单桩注浆时间 2~4 h。

6) 根据项目竣工结算, 本项目 $\phi 1.5$ m 灌注桩桩底后注浆在强风化岩岩基上单桩注浆费用为 1.19 万元/根。

(下转第 381 页)