

文章编号: 1007-2993(2026)04-0504-09

花岗岩风化层灌注桩泥皮特性及 桩侧后注浆的应用

莫继军¹ 刘小明² 胡波银² 魏清华¹

(1. 梧州市建筑设计院, 广西梧州 543002; 2. 广西壮族自治区地质环境监测站, 广西南宁 530201)

【摘要】 花岗岩风化层具有含砂量高、黏粒胶结紧密、遇水易软化崩解等特性, 灌注桩多采用泥浆护壁施工, 该工艺下桩周会形成泥皮。通过收集两个花岗岩风化层灌注桩不满足承载力要求的工程实例, 结合测试数据及现场开挖验证, 总结了花岗岩风化层中灌注桩侧泥皮的特性。研究表明花岗岩风化层中灌注桩侧泥皮厚度较大, 性质接近软塑黏土状, 桩侧阻力表现为桩身混凝土与泥皮之间的阻力, 对单桩承载力影响很大。工程实践表明, 采用桩侧后注浆处理泥皮, 可以全部消除泥皮对桩侧阻力的不利影响, 但对桩周土体的加固作用不明显, 处理后桩侧阻力可按花岗岩风化层本身性质取值。

【关键词】 花岗岩风化层; 泥皮; 桩极限承载力; 桩极限侧阻力; 桩侧后注浆

【中图分类号】 TU473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0216

Characteristics of mud cake in bored cast-in-place piles within granite weathered strata and application of pile side post-grouting

MO Jijun¹ LIU Xiaoming² HU Boyin² WEI Qinghua¹

(1. Wuzhou Architectural Design Institute, Wuzhou 543002, Guangxi, China; 2. The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning 530201, Guangxi, China)

【Abstract】 Granite weathered strata are characterized by high sand content, tight clay cementation, and easy softening and disintegration upon contact with water. Bored cast-in-place piles are generally constructed with slurry-supported walls, under which a mud cake will form around the pile shaft. By collecting two engineering cases where bored cast-in-place piles failed to meet bearing capacity requirements, combined with test data and field excavation verification, the characteristics of the mud cake of bored cast-in-place piles in granite weathered strata were summarized. The study shows that the shaft mud cake of bored cast-in-place piles in granite weathered strata has a relatively large thickness and properties similar to soft plastic clay. The shaft resistance is manifested as the resistance between the pile concrete and the mud cake, which exerts a significant impact on the bearing capacity of single piles. Engineering practice demonstrates that pile side post-grouting treatment effectively eliminates the adverse effects of mud cake on side resistance. However, this treatment shows limited reinforcement effect on surrounding soils. After treatment, the pile side resistance can be determined based on the inherent properties of the granite weathered strata itself.

【Key words】 granite weathered strata; mud cake; pile ultimate bearing capacity; pile ultimate shaft resistance; pile side post-grouting

0 引言

当钻孔灌注桩处于地下水位以下、成孔深度较大或者土体遇水易塌孔时, 多采用泥浆护壁成孔工艺。由于泥浆的吸附性和黏着力较强, 同时受土层本

身性质影响, 成孔后孔壁常常残留泥浆层, 在桩身混凝土灌注过程中不能完全消除, 在成桩后桩周围形成一层薄夹层, 即泥皮, 厚度几毫米至几十毫米不等, 泥皮的形成受成孔时间、成孔方式、泥浆比重、岩土层

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA24206043-2)

作者简介: 莫继军, 男, 1972 年生, 大学本科, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事岩土工程勘察设计和地质灾害治理方面的工作。E-mail: 554828408@qq.com

通信作者: 刘小明, 男, 1981 年生, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质环境保护与地质灾害方面的研究。E-mail: 352025898@qq.com

性质等因素影响^[1-2]。

针对钻孔灌注桩泥皮,许多专家学者进行了相关研究。张忠苗等^[1]、李小勇等^[3]对钻孔灌注桩泥皮和桩周土进行取样试验,试验表明,与桩周土相比泥皮的工程地质性质更差。Chen等^[4]研究了桩侧不同粗糙度及不同泥皮厚度对接触面剪切特性的影响。董志高等^[5-6]、霍凤民^[7]对桩侧泥皮性质及泥皮分布对灌注桩承载性状的影响开展了研究。庞小朝等^[8]开展了泥皮对花岗岩残积土与结构接触面力学特性影响的试验研究,结果表明泥皮厚度达到5 mm时接触面抗剪强度急剧下降。张治军等^[9]认为不同泥皮厚度对结构接触面力学特性表现存在差异,并提出泥皮临界厚度的概念。由此可见,泥皮的性质、厚度直接影响灌注桩桩侧阻力的发挥,对摩擦型桩的单桩承载力影响最大,如不对桩侧泥皮进行处理会导致单桩承载力不满足设计要求。目前泥皮处理主要有施工过程控制和成桩后处理两个方面。施工过程控制方面主要有严格控制泥浆浓度和成孔时间、成孔后灌注前进行洗孔及刮孔处理等措施,但对于易塌孔的地层易导致桩身混凝土灌注前出现塌孔,影响混凝土灌注和桩身质量;成桩后处理主要是采用桩侧、桩端后注浆工艺。相关研究表明,对泥皮采用桩侧、桩端后注浆处理可以有效提高桩的承载性能^[10-13]。

以往研究主要针对常规地层钻孔灌注泥皮的物理力学特性和形成机理,对后注浆加固主要集中于改良桩侧土体物理力学特性以提高单桩承载力。本文聚焦于花岗岩风化层中的钻孔灌注桩,以实际工程桩为样本,结合开挖及检测验证等方法,研究泥皮特性及对单桩承载力的影响程度,并对桩侧后注浆处理前后效果进行对比,验证泥皮后处理措施的有效性,可为同类地层工程应用提供设计与施工经验。

1 花岗岩风化层灌注桩桩侧泥皮效应

1.1 花岗岩风化层的工程特性

根据桂东南地区大量工程资料反映,花岗岩地区一般风化强烈,风化层厚度较大,一般在10~50 m,局部最大厚度超过70 m。花岗岩风化层具有明显的垂直分带性,其工程性质随深度增加而增加。花岗岩风化具有明显的不均匀性,风化层中常见强度较高、风化程度较低的球状风化体(孤石)、岩脉或夹层分布。

花岗岩残积土、全风化、强风化层原岩矿物成分除石英外,长石、黑云母等基本已全部风化成高岭土,统称为花岗岩风化层。花岗岩风化层因矿物组成和微观结构,具有显著的水敏性质,并影响其力学性

能^[14-16]。花岗岩风化层含砂量高,从颗粒组成看属砂土类,但颗粒间有黏粒紧密胶结,其力学性质与黏性土接近,具有较高的黏聚力和内摩擦角,且具有遇水易软化崩解的特性,手捏易碎散呈砂土状,地下水位以下成孔易出现塌孔现象。

1.2 花岗岩风化层中灌注桩泥皮特征

由于花岗岩风化层具有含砂量高、含有高岭土等黏土类矿物、易软化崩解等工程特性,采用泥浆护壁钻孔灌注桩成孔施工时,需要浓度较高的泥浆进行护壁,以防止孔壁坍塌并将粗颗粒钻渣返出孔外,同时由于土层本身含有较多高岭土成份,会导致泥浆浓度进一步增加,而土体切面较粗糙,有利于泥浆吸附并黏结于孔壁。因此花岗岩风化层更易形成较厚的泥皮,严重影响灌注桩抗拔、抗压的承载性能^[17-19]。

本研究收集了梧州地区花岗岩风化层中采用泥浆护壁的钻孔灌注桩工程实例,实例工程桩静载试验单桩承载力较设计值严重偏低,初步推断为桩侧泥皮导致。现场开挖检查显示桩身混凝土外侧黏附着一层黏土(见图1),很湿,软塑状,其力学性质明显低于桩周土体,该软塑状黏土即所谓桩侧泥皮。泥皮分布厚度沿桩周及桩长存在一定差异,但总体上均有分布,泥皮厚度介于8.0~35.0 mm,平均厚度为16.8 mm。以上情况说明在花岗岩风化层中泥浆护壁钻孔灌注桩通常会在桩侧形成泥皮,且厚度较大。

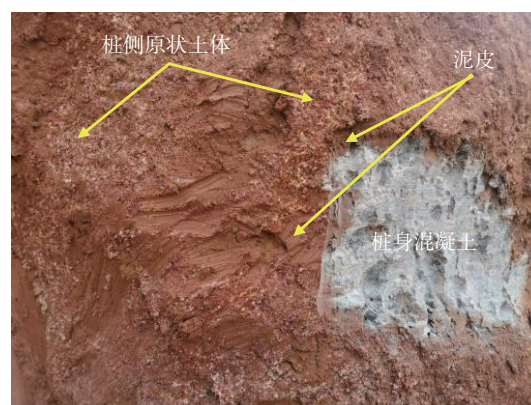


图1 梧州某工程桩桩侧泥皮照片

Fig. 1 Mud cake on the side of a pile from a project in Wuzhou

1.3 泥皮对单桩承载力的影响分析

泥皮的存在导致桩侧阻力作用界面由原来的桩土直接接触变成了桩身与泥皮直接接触,再通过泥皮传到土体,直接影响到桩侧阻力的正常发挥。张治军等^[9]通过对砂砾石料与结构物之间不同厚度泥皮进行剪切试验,提出泥皮存在两个临界厚度(记为 H_1

和 H_2 , 且 $H_1 < H_2$), 当泥皮厚度小于临界厚度 H_1 时, 传力接触面表现为砂砾石与混凝土板接触面特征; 当泥皮厚度介于两临界值之间时, 传力接触面表现为泥皮与混凝土板接触面; 当泥皮厚度大于临界厚度 H_2 时, 剪切破坏发生在泥皮内部。

本文自梧州地区两个花岗岩风化层泥浆护壁钻孔灌注桩项目中收集了 5 根工程桩信息, 各桩的岩土层情况见表 1 和表 2, 静载试验 $Q-s$ 曲线见图 2。5 根桩单桩承载力静载试验结果均严重低于设计值。为便于对比分析, 将花岗岩残积土和全风化花岗岩合并为一个花岗岩风化层, 汇总后的工程实例桩情况见表 3。

表 1 梧州某项目 1 工程实例桩岩土层情况

Tab. 1 Stratigraphic conditions of example piles for Project 1 in Wuzhou

岩土层名称	桩侧土层厚度/m		承载力	极限侧阻力	极限端阻力
	桩编号		特征值	标准值	标准值
	SY1	SY2	f_{ak} /kPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kN
素填土	2.0	8.0	80	13	
粉质黏土	4.90	3.2	200	55	
花岗岩残积土	12.1	7.9	250	75	
全风化花岗岩	9.0	8.1	310	100	1500
强风化花岗岩			460	130	2000

表 2 梧州某项目 2 工程实例桩岩土层情况

Tab. 2 Stratigraphic conditions of example piles for Project 2 in Wuzhou

岩土层名称	桩侧土层厚度/m			承载力	极限侧阻力	极限端阻力
	桩编号			特征值	标准值	标准值
	SY3	SY4	SY5	f_{ak} /kPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kN
素填土	0	3.3	3.3	70	10	
花岗岩残积土	13.1	11.1	11.1	240	70	
全风化花岗岩	6.3	10.1	10.5	330	85	1700
强风化花岗岩			8.1	450	120	2000

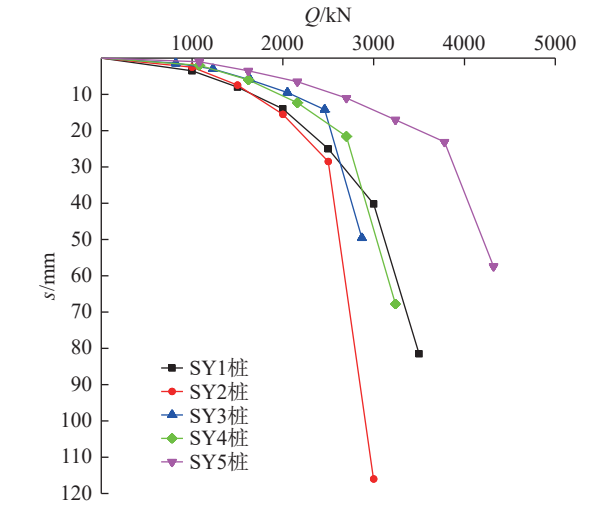


图 2 工程实例桩静载试验 $Q-s$ 曲线
Fig. 2 $Q-s$ curve of static pile load test on the example piles

表 3 收集工程实例桩情况汇总表

Tab. 3 Summary of collected engineering case piles

项目名称	桩号	桩径/mm	桩长/m	桩端持力层	花岗岩风化层总厚度/m	计算风化层平均侧阻力 q_{sk} /kPa	计算极限承载力 Q_{uk} /kN	实际极限承载力 Q_{uk1} /kN	反推风化层平均侧阻力 q_{sk1} /kPa	Q_{uk1}/Q_{uk}	q_{sk1}/q_{sk}
梧州某项目1	SY1	800	28.00	全风化花岗岩	21.10	85.7	5985	2998	29.3	0.50	0.34
	SY2	800	27.20	全风化花岗岩	16.00	87.6	4929	2500	27.2	0.51	0.31
	SY3	800	19.40	全风化花岗岩	19.40	74.9	4289	2460	33.0	0.55	0.44
梧州某项目2	SY4	800	24.50	全风化花岗岩	21.20	77.1	5045	2700	33.1	0.53	0.43
	SY5	800	31.00	强风化花岗岩	27.70	95.3	7723	3780	38.0	0.49	0.40

从表 3 数据分析看, 静载试验得出的单桩极限承载力 Q_{uk1} 仅是按建议参数计算单桩极限承载力 Q_{uk} 的 0.49 ~ 0.55 倍, 反推计算花岗岩风化层平均侧阻力 q_{sk1} 介于 27.2 ~ 38.0 kPa, 平均值约为 32.1 kPa, 为按建议参数计算所得的花岗岩风化层平均侧阻力 q_{sk} 的 0.31 ~ 0.44 倍, 该侧阻力参数与软塑状黏性土参数基本一致, 工程性质更接近于淤泥质土。从试验结果可以看出, 侧阻力与泥皮工程性质关系密切。

根据前文所述, 花岗岩风化层中泥浆护壁成孔桩形成的泥皮较厚, 泥皮含水量高, 性质差。从实际

工程桩的检测结果看, 桩侧阻力表现为桩身混凝土与泥皮之间的摩阻力, 呈现泥皮超过临界厚度 H_1 的特性^[9], 单桩承载力计算时, 花岗岩风化层的桩侧阻力按软塑黏土参数取用^[19]更趋于合理。

综上分析可知, 泥皮的存在导致了桩侧阻力只是桩与泥皮之间的摩阻力, 而泥皮较原花岗岩风化层的性质相差很大, 桩侧摩阻力降低 1 倍以上, 当桩侧荷载超过桩与泥皮之间的侧阻力后, 桩端分担的力增加, 形成桩身刺入破坏, 从而导致单桩承载力不满足设计要求, 泥皮对摩擦型桩的承载力影响很大。根据

现有大量研究成果,采取桩侧后注浆可以有效改善桩侧泥皮的力学性质,提高桩侧阻力,从而提高单桩承载力。

2 桩侧后注浆处理灌注桩泥皮应用案例

2.1 工程概况及地质条件

梧州某项目商住楼地上 28 层,设 2 层地下室,采用框架结构、桩基础,设计±0.00 标高为 37.15 m,承台底标高为 27.20 m。

场地处于花岗岩风化山丘边缘,花岗岩各风化带完整,且风化层厚度大。建筑物范围地层自上而下依次为:素填土①,新近回填,呈松散状;砂质黏性土(花岗岩残积土)②,可塑—硬塑状;全风化花岗岩③₁,呈

坚硬土状;强风化花岗岩③₂,呈坚硬土状;中等风化花岗岩③₃,岩层较破碎,属软岩类;微风化花岗岩③₄,岩层较完整,属坚硬岩类。花岗岩残积土及全风化花岗岩中分布有大量花岗岩球状风化体(俗称“孤石”),中等风化—微风化花岗岩埋深较大,且中等风化岩中也见微风化夹层。场地典型地质剖面见图 3,岩土层主要物理力学指标见表 4。

2.2 桩基方案比选

场地平整至设计桩顶标高后,素填土基本已挖除,出露地层以花岗岩残积土及全风化花岗岩为主,但地基承载力无法满足上部建筑物荷载的要求,且花岗岩风化层中存在大量球状风化体,风化均匀性差,

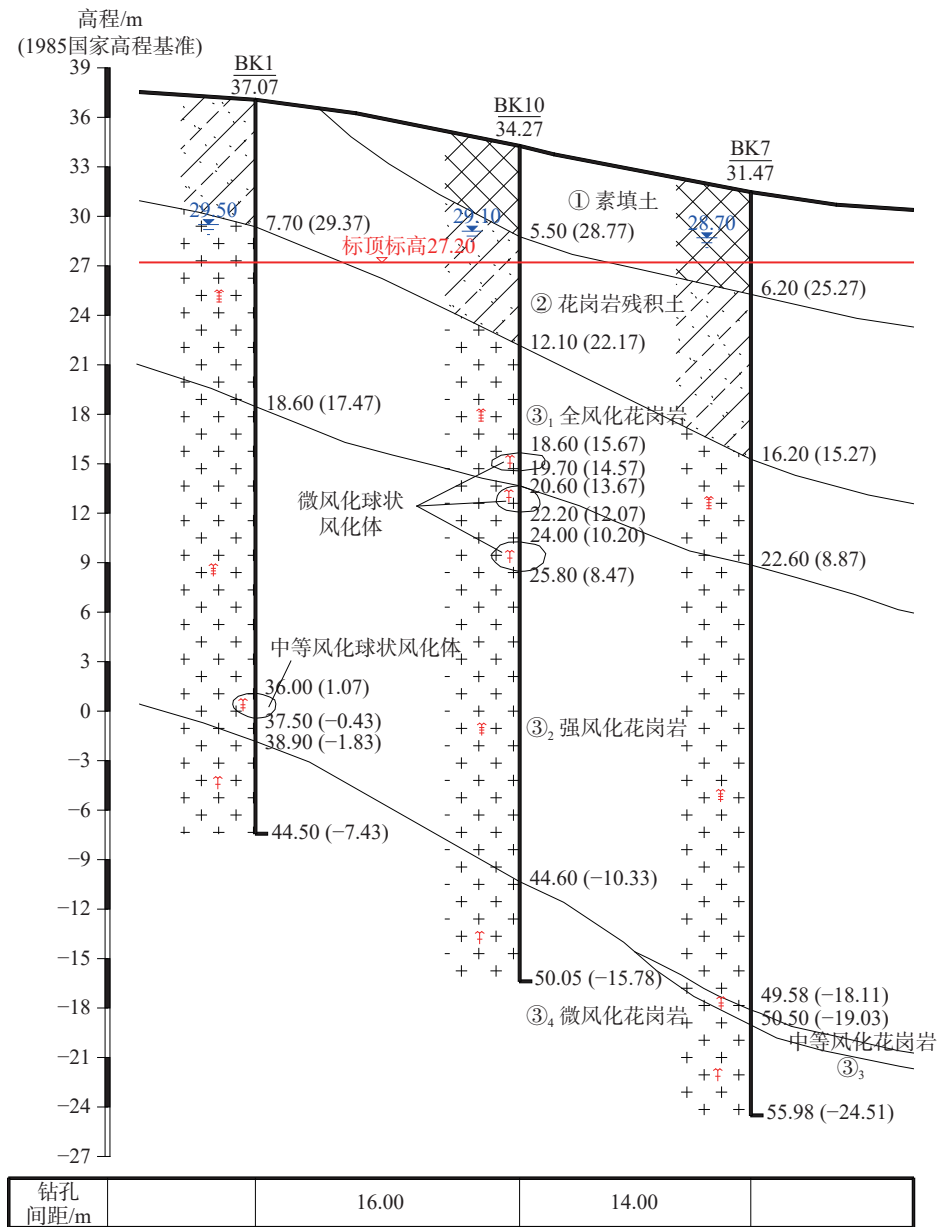


图 3 典型地质剖面图(单位:m)
Fig. 3 Typical geological profile (Unit: m)

表 4 场地岩土层主要物理力学指标
Tab. 4 Main physical and mechanical indices of site stratigraphy

地层编号	岩土层名称	层厚/m	承载力 特征值 f_{ak} /kPa	岩石饱和抗压 强度 R_c /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	钻孔灌注桩极限 侧阻力标准值 q_{sk} /kPa	钻孔灌注桩极限 端阻力标准值 q_{pk} /kPa
①	素填土	0 ~ 6.20						
②	花岗岩残积土	5.50 ~ 13.70	240		26.1	25.5	75	1500
③ ₁	全风化花岗岩	5.90 ~ 13.80	320		32.0	26.0	100	1800
③ ₂	强风化花岗岩	9.20 ~ 29.00	450		39.0	27.0	120	2200
③ ₃	中等风化花岗岩	0 ~ 29.90	1300	7.0			400	4200
③ ₄	微风化花岗岩		22500	89.0				

风化带起伏大。预应力混凝土管桩遇球状风化体会出现断桩和斜桩,且进入强风化层深度有限,当强风化层埋深较浅处,会造成有效桩长过短的情况。长螺旋钻孔压灌桩受施工机械能力的限制,桩径和桩长不能太大,且无法穿过球状风化体。钻孔灌注桩因桩侧形成泥皮,会大幅降低桩侧阻力,为满足设计承载力要求,需采用中等风化—微风化岩层为桩端持力层^[19],而工程场地中等风化—微风化岩层层面起伏较大,从桩顶设计标高起算最大深度超过 45 m,且花岗岩风化层中存在大量球状风化体,如以中等风化、微风化岩层为持力层,则造价高、工期长。

综上所述,如能有效处理钻孔灌注桩的桩侧泥皮问题,则可考虑采用摩擦型钻孔灌注桩,可以节约工程造价,减小施工难度,缩短施工工期。因此采用钻孔灌注桩基础,按摩擦型桩设计,以强风化花岗岩为桩端持力层,并采用后注浆工艺对泥皮加固处理。

2.3 桩侧后注浆灌注桩的设计

灌注桩后注浆主要有桩底后注浆及桩侧后注浆两种^[20]。桩底后注浆主要针对桩端岩土体和桩底沉渣加固处理,可以有效提高桩端土体的承载能力;桩侧后注浆主要用于桩侧土体加固,以提高桩侧土体摩擦力,进而提高单桩承载力。目前单纯以处理桩侧泥皮为主要目标的桩侧后注浆应用案例较少,同时注浆工艺对后注浆效果影响较大,如注浆参数和工艺不当会导致注浆加固失败^[21-23]。

花岗岩风化层本身物理力学性质决定了桩侧形成的泥皮性质较差且厚度相对较大,泥皮呈软塑黏土状,其力学性质与桩身混凝土和桩周土体相差悬殊,相当于在桩侧形成一个软弱的薄夹层。桩侧压力注浆过程中,浆液大部分会沿桩侧泥皮内部向桩体四周及上下流动,对泥皮起到加固置换作用,有效改善泥皮力学性质,而只有少量浆液会穿过泥皮进入桩周风化层中,因此泥皮厚度较大且桩周土体渗透性较差

时,桩侧后注浆对桩周土体的加固效果并不明显。桩侧后注浆处理泥皮原理见图 4。

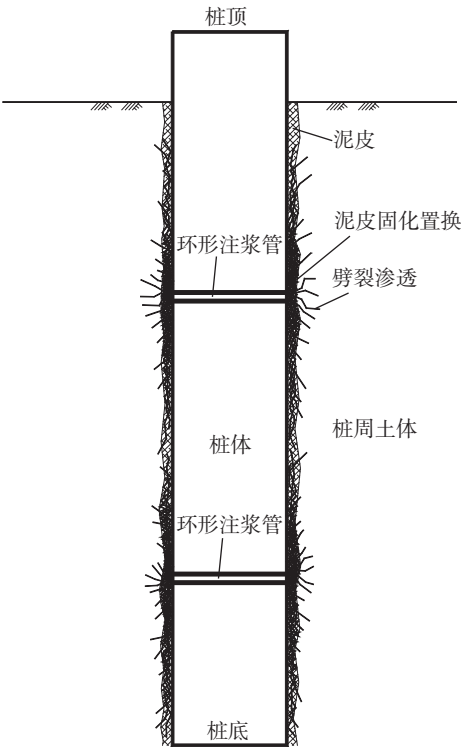


图 4 桩侧后注浆加固泥皮示意图
Fig. 4 Schematic diagram of mud cake reinforcement by pile side post-grouting

本工程桩侧后注浆灌注桩采用旋挖成孔,最初设计桩径为 1200 mm,有效桩长取 28.0 m,设计单桩极限承载力标准值取 12000 kN。经试验桩施工及检测(见后文 40#试验桩静载试验结果)后,对最初设计进行了调整,最终确定采用 1000 mm 的桩径,设计单桩极限承载力标准值取 11000 kN,按勘察报告建议的参数及设计单桩承载力计算,确定取有效桩长 30.0 m,即考虑采用桩侧后注浆对泥皮处理完成后桩侧摩阻力达到桩侧土参数建议值。考虑到桩侧泥皮呈软塑黏性土状,渗透性较差,桩身共设置 4 道环形

注浆软管,最底一道设置于距桩底 4.0 m 处,自下而上每间隔 6.0 m 设置一道;注浆软管沿桩周对称安装两个单向止浆阀,确保浆液只可向外单向流动,需确保注浆环管能承受不低于 10 MPa 的压力,并与 DN25 钢质压浆管连接至桩顶,压浆管壁厚 3.25 mm,压浆管间采用螺纹连接,压浆管与桩身钢筋笼绑扎固定,与加筋箍焊接;后注浆材料采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥浆,水灰质量比采用 0.70~0.90,注浆压力取 2~5 MPa,设计单桩注浆量不小于 2.0 t。桩侧后注浆桩体结构设计大样见图 5。

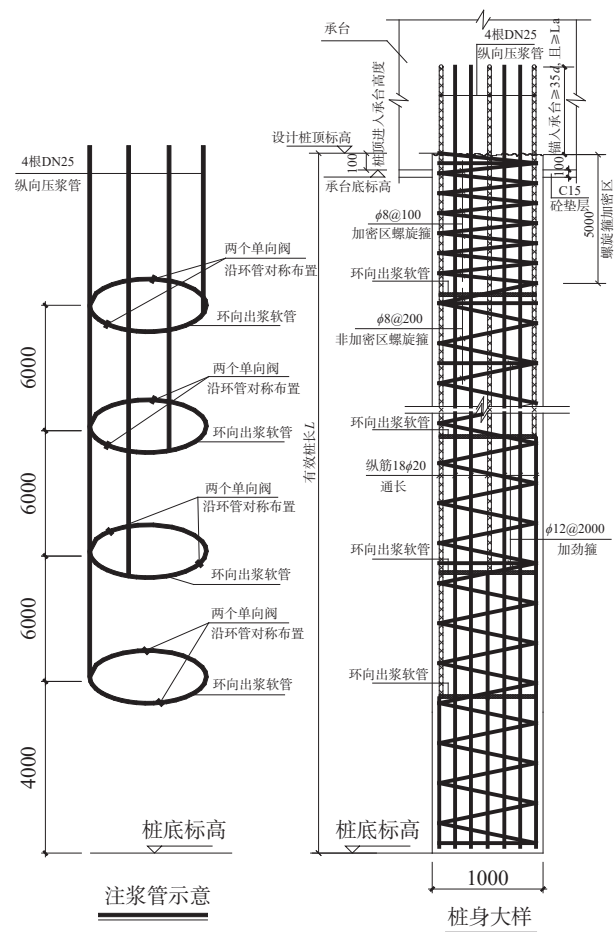


图 5 桩侧后注浆桩结构大样图(单位:mm)

Fig. 5 Detail drawing of structure with post-grouting along pile shaft (Unit: mm)

2.4 桩侧后注浆的施工方法

桩侧后注浆的施工主要包括注浆装置安装、注浆装置检查与疏通、注浆材料制备、注浆作业等步骤,具体如下:

(1)注浆装置安装:桩侧后注浆装置与钢筋笼同步加工安装,注浆环管设置深度按设计要求埋设,沿环管对称安装好两个具备逆止功能的注浆阀。导管钢管与注浆环管连接应牢固,与桩身钢筋笼箍筋绑扎

固定,可代替桩身主筋使用,注浆导管高出现场地面 0.30 m,于导管顶部清晰标注导管所连接的注浆环管的深度,管口采用堵头拧紧,防止杂物及泥浆掉入注浆管内,确保管路畅通。安装好后将注浆装置与钢筋笼一起下放至桩孔内。

(2)注浆装置检查与疏通:每节钢筋笼下放结束时,应在导管内注入清水以检查其密封性能,当注浆导管注满水后水面保持稳定为达到要求;如发现漏水,应提升钢筋笼检查,在处理好后方可再次下笼。在成桩后 8~12 h,进行清水劈裂,当压力表显示压力突然明显下降,表示注浆管底部混凝土已成功贯通,立即停止注水,并测量注水用水量。

(3)注浆材料:采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥配置的纯水泥浆,严格控制水和水泥的用量,确保水灰质量比满足设计要求。

(4)注浆作业:注浆作业宜于成桩后 2~7 d 内进行,通过地面注浆管连接注浆泵和注浆导管进行注浆;注浆顺序采取先上后下的方式,先对最上层注浆管注浆,完成后再逐层向深部注浆管注浆;控制注浆流量不超过 75 L/min,注浆压力控制在 2~5 MPa;注浆作业离邻近桩成孔作业点的距离不小于 8 m,若注浆作业 4 m 范围内有未注浆的工程桩,需在注浆作业完成后对未注浆工程桩内的注浆管再次进行清水劈裂。当注浆压力长时间低于正常值或者地面出现冒浆或者周围桩孔患浆,则改为间歇注浆,间歇时间为 30~60 min,或适当调低浆液的水灰质量比。

(5)注浆停止标准:注浆总量达到设计值的 75%,且注浆压力超过设计值。

3 桩侧后注浆处理效果分析

3.1 桩侧后注浆桩承载力检测

桩侧后注浆桩的承载力检测采用静载试验,静载试验采用慢速维持荷载法,最大加载量取设计单桩极限承载力标准值,以压重平台堆配重作为反力装置,在桩身混凝土强度达到设计要求的条件下且注浆完成 20 d 后进行。静载试验前对受检桩采用声波透射法(对埋有声测管的桩)及低应变法对桩身完整性进行检测,避免桩身存在缺陷而影响检测结果。为便于分析,将静载试桩结果按沉降量大小分成两类进行归类汇总,静载试验 $Q-s$ 曲线见图 6。

全面施工前,试打了试验桩并抽取 1 根桩(40#桩,桩径 1200 mm,设计单桩极限承载力标准值为 12000 kN)进行单桩静载试桩,以验证优化桩侧后注浆施工工艺;桩侧后注浆桩施工完成后,随机抽取 7 根工程桩采用单桩静载试验进行检测(工程桩桩径

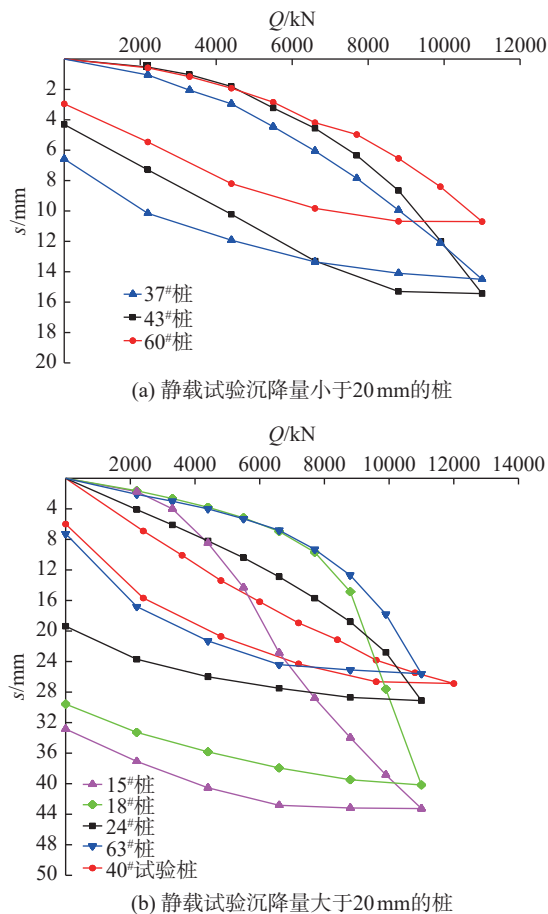


图 6 工程桩静载试验 $Q-s$ 曲线
Fig. 6 $Q-s$ curve of static pile load test on the engineering piles

1000 mm, 设计单桩极限承载力标准值为 11000 kN), 试验前各桩的桩身完整性检测结果均为桩身完整。根据表 4 建议的参数计算花岗岩风化层的平均侧阻力 q_{sk} 及单桩极限承载力 Q_{uk} , 按前文分析确定的泥皮影响下钻孔灌注桩风化层平均侧阻力 q_{sk1} 取 32.1 kPa 时计算单桩极限侧阻力 Q_{uk1} , 并按静载试验最大荷

载 Q_{uk2} 值计算桩侧后注浆完成后花岗岩风化层平均侧阻力 q_{sk2} 值, 各项数据汇总见表 5。计算中桩径大于 800 mm 时考虑桩侧、桩端尺寸效应; 遇中等风化及微风化花岗岩球状风化体(即孤石)时按其所处的风化层考虑; 对于 60# 桩桩端已至微风化花岗岩, 对评价桩侧泥皮加固效果已无意义, 不再进行相应计算。

3.2 数据分析

从试验数据看, 37#、43#、60# 桩桩端受地层影响较大, 代表性不强, 其余 5 根桩检测数据对于评价桩侧注浆效果代表性较好。其中 15#、18# 桩静载试验结果沉降量较大, 最大试验荷载基本接近桩的极限承载力, 桩侧后注浆实施后侧阻力 q_{sk2} 与建议按参数计算的侧阻力 q_{sk} 比值约为 1.0 ~ 1.03, 说明处理后泥皮影响基本已消除, 桩侧阻力达到桩周土体本身的侧阻力, 但对桩周土体侧阻力基本没有提高, 处理后单桩承载力 Q_{uk2} 是未进行泥皮处理的单桩承载力 Q_{uk1} 的 2.40 ~ 2.42 倍。24# 桩和 63# 桩静载试验结果沉降量适中, q_{sk2} 与 q_{sk} 比值介于 0.90 ~ 0.99, q_{sk2} 与 q_{sk} 比值也达到了 2.90 ~ 3.20, $Q-s$ 曲线呈缓变形, 说明试验最大荷载并未达到承载力极限。作为试验桩的 40# 桩, 其静载试验结果沉降量适中, q_{sk2} 与 q_{sk} 比值为 1.01, $Q-s$ 曲线呈缓变形, 说明试验结果反映的最大荷载并未达到极限承载力, 承载力仍存在一定储备。经分析认为, 40# 桩为试验桩, 桩侧后注浆处理工艺控制较好, 除对泥皮处理效果较好外, 对桩侧土体也有一定程度的加固作用。

经核对施工记录, 60# 桩桩端已进入强度很高的微风化花岗岩体, 与摩擦型桩已有本质区别, 因此静载试验反映沉降量很小, $Q-s$ 曲线呈缓变形, 单桩承载力仍有较大储备。而 37# 桩、43# 桩桩底遇直径较大的微风化花岗岩球状风化体, 虽然桩长较设计桩长稍

表 5 检测工程桩情况汇总
Tab. 5 Summary of inspection for tested engineering piles

桩号	桩径/mm	有效桩长/m	桩端持力层	花岗岩风化层总厚度/m	按建议参数计算平均侧阻力 q_{sk} /kPa	按建议参数计算极限承载力 Q_{uk} /kN	按灌注桩计算极限承载力 Q_{uk1} /kN	试验最大加载值 Q_{uk2} /kN	沉降量/mm	注浆后平均侧阻力 q_{sk2} /kPa	Q_{uk2}/Q_{uk1}	q_{sk2}/q_{sk}	q_{sk2}/q_{sk1}
37#	1000	28.40	微风化孤石	28.40	99.8	10137	4370	11000	14.50	109.9	2.52	1.10	3.42
43#	1000	32.40	微风化孤石	32.40	107.2	12059	4756	11000	15.44	96.3	2.31	0.90	3.00
60#	1000	28.30	微风化花岗岩	28.30	102.3			11000	10.70				
15#	1000	30.70	强风化花岗岩	30.70	101.5	10989	4591	11000	43.26	101.6	2.40	1.00	3.16
18#	1000	30.30	强风化花岗岩	30.30	100.0	10731	4553	11000	40.17	103.0	2.42	1.03	3.21
24#	1000	33.50	强风化花岗岩	33.50	103.5	12048	4862	11000	29.20	93.1	2.26	0.90	2.90
63#	1000	30.40	强风化花岗岩	30.40	103.7	11098	4563	11000	25.60	102.7	2.41	0.99	3.20
40#	1200	28.40	强风化花岗岩	28.40	97.9	11910	5415	12000	26.88	98.8	2.22	1.01	3.08

短, 静载试验反映沉降量也较小, $Q-s$ 曲线呈缓变形, 单桩承载力也有较大储备。经分析认为球状风化体类似于扩大头型式, 扩大了桩底面积, 同时也相当于桩底分布有一定厚度的硬持力层。综上分析, 对于花岗岩风化层中的摩擦型灌注桩, 采用桩侧后注浆处理可以消除花岗岩风化层泥皮对桩侧阻力的影响, 达到风化层本身的桩侧阻力水平。但由于花岗岩风化层形成泥皮较厚且呈软塑黏土状, 力学性质较差, 桩侧压力注浆过程中浆液主要沿桩侧泥皮软弱层内部向桩四周及上下流动, 只有少量浆液会穿过泥皮进入桩周风化层中, 因此对桩周土体的加固效果并不明显。

4 结论及展望

(1) 花岗岩风化层泥浆护壁钻孔灌注桩桩侧泥皮较厚, 桩侧阻力直接表现为桩与泥皮之间的侧阻力, 与风化层本身性质关系不大。对于摩擦型桩, 平均侧阻力仅为原岩土层的 0.31 ~ 0.44 倍, 相应的单桩承载力仅能达到按参数计算值的 0.49 ~ 0.55 倍, 桩基设计计算时桩侧阻力宜按软塑状黏土取值。

(2) 工程实践表明, 采用桩侧后注浆处理花岗岩风化层中灌注桩的泥皮是有效的, 其处理效果与注浆质量控制有关, 但对桩周土体的加固作用不明显, 处理后桩侧阻力可按花岗岩风化层本身性质取值。

(3) 在今后类似工程实践中将研究桩底和桩侧复合后注浆工艺, 并对桩侧后注浆工艺不断改进和完善, 以期达到既能有效处理泥皮, 也能对桩侧土体起到加固改善作用, 充分发挥后注浆在钻孔灌注桩中的优势作用, 以适应不断提高的工程需求和环境条件多样化要求。

参 考 文 献

- [1] 张忠苗, 张广兴, 吴庆勇, 等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6): 695-699. (ZHANG Z M, ZHANG G X, WU Q Y, et al. Studies on characteristics of mudcake and soil between bored piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 695-699. (in Chinese))
- [2] 赵春风, 刘丰铭, 杨砚宗, 等. 砂土中泥浆循环时间对单桩竖向承载特性的影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1): 3323-3330. (ZHAO C F, LIU F M, YANG Y Z, et al. Study of bearing capacity of a single pile in sand considering the mud cycle time[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 3323-3330. (in Chinese))
- [3] 李小勇, 谢康和, 曾国熙, 等. 钻孔灌注桩泥浆护壁性状试验研究 [J]. *建筑结构*, 2000, 30(5): 21-23. (LI X Y, XIE K H, ZENG G X, et al. Experimental research on behaviours of protection mud cake in cast-in-place bored pile[J]. *Building Structure*, 2000, 30(5): 21-23. (in Chinese))
- [4] CHEN C, LENG W M, YANG Q, et al. Effect of a filter cake on shear behavior of sand-concrete pile interface[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(6): 2019-2032.
- [5] 董志高, 付婷婷, 洪晓珍, 等. 灌注桩桩侧泥皮性质对桩承载性状影响研究 [J]. *建筑科学*, 2014, 30(9): 16-21. (DONG Z G, FU T T, HONG X Z, et al. Analysis on side mud influence on bearing capacity of bored pile[J]. *Building Science*, 2014, 30(9): 16-21. (in Chinese))
- [6] 董志高, 董平, 李俊才, 等. 钻孔灌注桩桩侧泥皮分布对桩承载性状影响研究 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2010, 21(4): 94-99. (DONG Z G, DONG P, LI J C, et al. Analysis on distribution of side mud influence on bearing capacity of bored pile[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2010, 21(4): 94-99. (in Chinese))
- [7] 霍凤民. 浅析泥皮对钻孔灌注桩承载力的影响 [J]. *地基基础工程*, 2002, 12(4): 35-39. (HUO F M. An elementary introduction to the influence of mud surface on the bearing capacity of bored concrete pile[J]. *Foundation Engineering*, 2002, 12(4): 35-39. (in Chinese))
- [8] 庞小朝, 杨浩新, 苏栋, 等. 泥皮对花岗岩残积土与结构接触面力学特性影响的试验研究 [J]. *铁道建筑*, 2017(3): 98-101, 105. (PANG X C, YANG H X, SU D, et al. Experimental study on influence of slurry on mechanical behavior of interface between granite residual soil and structure[J]. *Railway Engineering*, 2017(3): 98-101, 105. (in Chinese))
- [9] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2433-2438. (ZHANG Z J, RAO X B, WANG Z J, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2433-2438. (in Chinese))
- [10] 郭院成, 张景伟, 董晓星. 桩端桩侧后注浆钻孔灌注桩承载性能试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2014, 31(7): 14-18. (GUO Y C, ZHANG J W, DONG X X. Experimental study on bearing capacity of bored piles using pile tip and side post-grouting technology[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(7): 14-18. (in Chinese))
- [11] 王卫东, 吴江斌, 王向军, 等. 桩侧后注浆抗拔桩技术的研究与应用 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(S2): 437-445.

- (WANG W D, WU J B, WANG X J, et al. Study and application of side-grouting uplift piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 437-445. (in Chinese))
- [12] 何 剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 743-746. (HE J. Experimental research on vertical bearing properties of base-grouting bored cast-in-place pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 743-746. (in Chinese))
- [13] 张忠苗, 张乾青. 后注浆抗压桩受力性状的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 475-482. (ZHANG Z M, ZHANG Q Q. Experimental study on mechanical properties of post-grouting compressive pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 475-482. (in Chinese))
- [14] 王 晖, 严 松. 全风化混合花岗岩矿物成分与微观结构研究 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(6): 700-707. (WANG H, YAN S. Mineral composition and microstructure of completely decomposed migmatitic granite[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(6): 700-707. (in Chinese))
- [15] ZENG L, BIAN H B, SHI Z N, et al. Forming condition of transient saturated zone and its distribution in residual slope under rainfall conditions[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(8): 1866-1880.
- [16] 张翼宇, 黄志全, 赵 菲, 等. 风化花岗岩矿物组成与渗透特性相关性研究 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 103-108. (ZHANG Y Y, HUANG Z Q, ZHAO F, et al. Study on correlation between mineral composition and permeability characteristics of weathered granite[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 103-108. (in Chinese))
- [17] 程华群. 花岗岩地层灌注桩抗拔承载性能研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55(15): 1820-1824. (CHENG H Q. Study on uplift bearing capacity of cast-in-situ piles in granite geological stratum[J]. Architecture Technology, 2024, 55(15): 1820-1824. (in Chinese))
- [18] 周 宏, 陈 亮. 广东地区花岗岩风化地基泥浆护壁灌注桩侧阻力取值探讨 [J]. 勘察科学技术, 2024(S1): 94-97. (ZHOU H, CHENG L. Discussion on the value of side resistance of cast-in-place piles with slurry retaining wall for weathered granite foundation in Guangdong province[J]. Site Investigation Science and Technology, 2024(S1): 94-97. (in Chinese))
- [19] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础设计规范: DBJ 15—31—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province. Design code for building foundation: DBJ 15—31—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [21] 吴 悦, 赵春风, 刘 帆, 等. 不同注浆工况对砂土-混凝土接触面剪切特性影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 95-103. (WU Y, ZHAO C F, LIU F, et al. Effects of grouting conditions on shear behavior of sand-concrete interface[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 95-103. (in Chinese))
- [22] 仪晓立, 王振军, 侯向阳, 等. 工艺参数对灌注桩桩基后注浆浆液扩散的影响 [J]. 矿冶, 2024, 33(1): 9-14. (YI X L, WANG Z J, HOU X Y, et al. Effect of process parameter on grouting slurry diffusion after grouting pile foundation[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 9-14. (in Chinese))
- [23] 李玉灿. 桩端后注浆灌注桩承载力异常原因探讨 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38(4): 436-439. (LI Y C. Discussion on causes of abnormal bearing capacity of post grouting at pile end[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(4): 436-439. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-16