

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.023



风化岩基大直径灌注桩后注浆承载性能 试验研究

白晓宇¹, 牟洋洋¹, 张明义¹, 闫楠², 王建刚³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛, 266033; 2. 青岛大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛, 266071;
3. 中建八局第四建设有限公司, 山东 青岛, 266071)

摘要:基于6根全风化和强风化花岗片麻岩地基中大直径泥浆护壁钻孔灌注桩单桩竖向抗压静载荷试验及桩身力学测试,对其中3根试桩进行桩侧后注浆,对比分析了其承载性状、变形特性及影响因素,并将所得试验数据与勘察报告推荐值和现行规范推荐值对比。结果表明:大直径嵌岩泥浆护壁钻孔灌注桩长径比25~34与嵌岩深度5D~8D, Q-s曲线呈缓变型;经后注浆处理与未经桩侧后注浆处理的试桩相比,单桩极限抗压承载力提高1.40%~15.3%,最大沉降量降低35.1%~65.6%,回弹率提高13.1%~82.4%,控制桩顶沉降效果显著。在该试验条件下,6根试桩的承载力和变形特性受长径比和嵌岩深度影响较大。经桩侧后注浆处理的试桩,嵌岩段摩阻比和桩侧摩阻力分担比受长径比和嵌岩深度影响更小;6根试桩的桩端阻力分担比受嵌岩深度影响显著;未经桩侧后注浆处理的试桩,桩侧摩阻力分担比受嵌岩深度影响更大。

关键词:风化岩基;大直径灌注桩;桩侧后注浆;承载性状;变形特性

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0001-11

Experimental study on bearing behavior of large-diameter drilling piles with post grouting in decomposed rock foundation

Bai Xiaoyu¹, Mu Yangyang¹, Zhang Mingyi¹, Yan Nan², Wang Jianguang³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, P. R. China; 3. The Fourth Construction CO., LTD of China Construction Eighth Engineering Division, Qingdao 266071, Shandong, P. R. China)

Abstract: Based on the vertical compressive static load and pile mechanics tests of 6 large diameter mud-walled bored piles in fully weathered and strongly weathered granite gneiss foundation, including three post-grouting piles in side, the bearing behavior, deformation properties and impact factors are analyzed

收稿日期:2018-03-10

基金项目:国家自然科学基金(51708316、51778312、51809146);山东省重点研发计划(2017GSF16107、2018GSF117008);山东省自然科学基金(ZR2016EEQ08、ZR2017PEE006);山东省高等学校科技计划(J16LG02);青岛市应用基础研究计划(16-5-1-39-jch);中国博士后科学基金(2018M632641)

作者简介:白晓宇(1984-),男,博士,副教授,主要从事地基基础与城市地下工程研究,E-mail:baixiaoyu538@163.com.

Received:2018-03-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51708316, 51778312, 51809146); Shandong Key Research and Development Program (No. 2017GSF16107, 2018GSF117008); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEQ08, ZR2017PEE006); Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (No. J16LG02); Applied Basic Research Programs of Qingdao (No. 16-5-1-39-jch); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M632641)

Author brief: Bai Xiaoyu(1984-), PhD, associate professor, main research interests: foundation and urban underground engineering, E-mail:baixiaoyu538@163.com.

and the corresponding test data are then compared with the current recommended value of code and survey report. The results show that the Q - s curves of the large-diameter rock-embedded mud-walled bored piles, which are with length-diameter ratio of $25\sim 34$ and rock-embedded depths of $5D\sim 8D$, present slow type. Compared with no post-grouting piles, the ultimate compressive capacity of post-grouting piles increases by $16.7\%\sim 25\%$, the maximum settlement decreases by $35.1\%\sim 65.6\%$, and the rebound rate increases by $13.1\%\sim 82.4\%$. Besides, the control effect of pile top settlement is remarkable. Under the experimental conditions, the bearing capacity and deformation characteristics of the six test piles are greatly affected by the aspect ratio and the rock-embedded length. Nevertheless, the side resistance in rock-embedded section and side-resistance sharing ratio of the grouting piles is less influenced by the aspect ratio and the rock-embedded depth. The end-resistance sharing ratio of the six test piles and side-resistance sharing ratio of no post-grouting pile is highly affected by the rock-embedded depth.

Keywords: decomposed rock foundation; large-diameter drilling piles; side post-grouting; bearing behavior; deformation properties

近年来,由于大直径泥浆护壁钻孔灌注桩($D\geq 800$ mm)在工程实践中表现出承载力高、变形小、施工方便等良好性状,被广泛应用于高速公路、铁路、大跨桥梁、高层建筑等桩基工程中^[1]。为使理论研究跟上应用的发展,陈小钰等^[2]对人工挖孔嵌岩灌注桩进行现场静载荷和桩身内力测试,分析了其承载特性;闫楠等^[3]分别对陆域和海域区 3 根超长冲孔灌注试桩进行竖向抗压载荷试验,研究了其荷载传递机理及承载特性;Li 等^[4]通过理论和试验研究方法,探究了超长灌注桩桩土在桩顶荷载下的承载特性;王旭等^[5]通过地温测试及现场竖向静载荷试验,研究了多年冻土地基中大直径钻孔灌注桩未回冻的承载性状及变形特性;Omer 等^[6]进行了梅西亚泥岩地基大直径桩的载荷试验,分析和评价了关于此类条件下桩的现行设计方法;Thiyyakkandi 等^[7]采用试验和数值模拟手段探讨了无粉质黏土中桩侧后注浆桩的荷载传递机制及影响因素;Xing 等^[8]通过光纤、光栅测试技术探究了超大直径嵌岩灌注桩的承载性状,分析了侧阻与位移变化规律及模式;赵春风等^[9]通过现场静载荷试验,分析了软土地区大直径超长钻孔灌注桩不同土层桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系;Balakrishnan 等^[10]基于原位风化岩变形特性测试、现场单桩静载荷试验,探究了风化岩基单根灌注桩荷载变形特征预测方法;Zhou 等^[11]通过室内模型试验探究了预钻孔灌浆桩在拉、压荷载作用下的行为特性;Xu 等^[12]探究了大直径(8.0 m)大规模深挖孔桩的施工过程;李永辉等^[13]基于桩土剪切作用性状及桩侧摩阻力发挥过程,建立了广义剪切模型,并利用该模型以传递矩阵增量方式得到大直径超长灌注桩沉降计算方法。

相关研究主要集中在特殊土或软土地基中的超长钻孔或冲孔,采用桩端后注浆施工工艺的大直径

灌注桩,而对桩端嵌入全风化与强风化花岗片麻岩基,经桩侧后注浆处理的大直径钻孔灌注桩的承载性状与变形特性、桩侧后注浆对桩身泥皮的处理效果以及关于现行规范中推荐的桩侧尺寸效应系数、后注浆桩侧摩阻力增强系数的研究与实测还鲜有报道。为此,本文结合日照市某拟建建筑物地基处理项目,对 6 根大直径泥浆护壁钻孔灌注桩进行了单桩竖向抗压静载荷及桩身力学测试。其中,采用桩侧后注浆施工工艺试桩 3 根,对比分析了它们的承载性状、变形特性及影响因素,并与现行规范及勘察报告推荐值对比,得到大直径钻孔灌注桩桩侧极限侧摩阻力、桩侧尺寸效应系数、后注浆桩侧摩阻力增强系数。

1 工程概况

试验场区位于日照市南部, SZ1~SZ6 为泥浆护壁钻孔灌注桩,对其中 SZ2、SZ4、SZ6 进行了桩侧后注浆处理,注浆管位置分别在桩身 8.0、16.0、24 m 处, SZ1~SZ6 桩端均嵌入全风化和强风化花岗片麻岩,其标准贯入锤击数分别为 13.1、29.3 击,承载力特征值分别为 250、260 kPa,压缩模量 6.5、20.0 MPa。桩身混凝土强度为 C30,浆液采用 42.5 普通硅酸盐水泥制备,水灰比 0.55~0.70,直径 1.0、0.8 m 的单桩桩侧后注浆水泥用量分别为 2.0、1.5 t,流量控制在 40~50 L/min,风化岩的注浆压力为 5.0 MPa,其他土层为 2.0 MPa,采用注浆量控制为主和终止泵送压力为辅的双控方法控制后注浆标准。桩侧后注浆的质量检查及验收按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)执行。试桩的设置情况见表 1,试桩及钻孔平面布置情况见图 1。岩基上土层结构相对简单,主要为第四系杂填土、粉质黏土和砂土,稳定地下水位平均约为 1.5 m,各土层物理力学

性质指标见表 2。

表 1 试桩的设置情况

Table 1 Parameters of test piles

试桩编号	桩径/m	桩长/m	桩端嵌岩深度/m	预估单桩极限承载力/kN
SZ1	1.00	25.55	5.49	15 000
SZ2	1.00	25.55	5.51	15 000
SZ3	1.00	25.10	5.08	15 000
SZ4	0.800	25.50	5.52	9 700
SZ5	0.800	26.50	6.42	9 700
SZ6	0.800	26.60	6.52	9 700

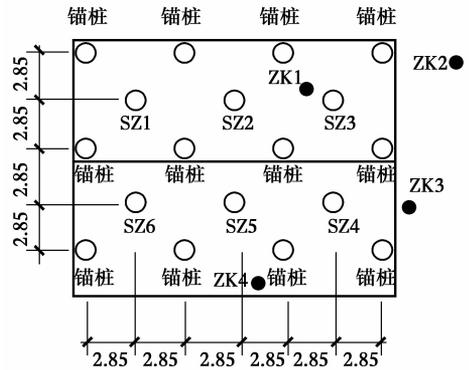


图 1 试桩及钻孔平面布置图

Fig. 1 Plane distribution of pile and borehole

表 2 土层物理力学性质指标

Table 2 Parameters of soils

土层编号及名称	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	$W / \%$	G_s	e	$\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	I_L	φ (快剪) / ($^\circ$)	C_q (快剪) / kPa	$\alpha_{0.1-0.2} / MPa^{-1}$	$E_{S0.1-0.2} / MPa$
② ₋₁ 中粗砂	1.86	17.3	2.65	0.667	1.59		25.5	5.30	0.09	20.50
⑤中粗砂	1.97	18.6	2.65	0.596	1.66		24.5	5.70	0.11	15.30
⑥粉质黏土	1.87	24.3	2.71	0.807	1.50	0.470	17.2	27.00	0.31	5.80
⑥ ₋₂ 中粗砂	2.00	19.3	2.65	0.587	1.67		23.9	6.00	0.09	19.90
⑦残积黏性土	1.88	27.0	2.73	0.832	1.49	0.400	15.6	30.00	0.30	6.51

2 试验方案

2.1 试验方法

单桩竖向抗压静载荷试验采用锚桩法提供反力,试验时以慢速维持荷载法加载,卸载时每级卸载值为每级加载值的 2 倍。4 个位移传感器对称支设在桩顶,试验时测试桩顶沉降和残余沉降。

低应变桩身完整性检测与单桩竖向抗压静载荷试验均严格执行《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[14]中的相关规定。

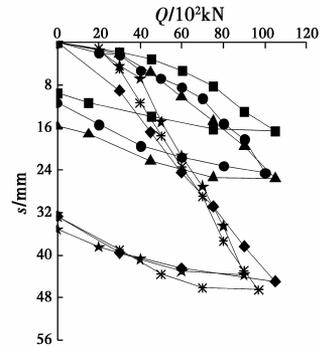
2.2 传感器布设

在单桩静载荷试验的桩身内力测试过程中,传感器采用钢弦式钢筋应力计,其型号为 JTM-V1000,量程为 0~20 kN。测试导线沿桩身全长整根引出,中间不设接头,引出后用软包扎予以保护,将带有接长杆的传感器对称焊接到测试断面处的主筋上,焊接时采取隔热措施以防损坏传感器。SZ1~SZ6 的传感器埋设位置均位于桩身 2、5、8、11、14、17、20、23 m 处。

3 试验结果与分析

3.1 单桩抗压静载荷试验测试结果

6 根试桩的荷载-位移(Q-s)曲线,见图 2。试桩的最大加载量、最大沉降量、端阻比与回弹率等见表 3。



注: ◆-SZ1 ■-SZ2 ▲-SZ3 ★-SZ4 * -SZ5 ●-SZ6

图 2 试桩的 Q-s 曲线

Fig. 2 Q-s curves of test pile

由图 2 可知,对于大直径嵌岩泥浆护壁钻孔灌注桩(长径比(L/D)25~34,嵌岩深度 5D~8D),Q-s 曲线呈缓变型。6 根试桩经低应变桩身完整性检测为 I 类桩。根据文献[14]的 4.4.2 中单桩竖向抗压极限承载力确定方法,当 SZ1、SZ2、SZ3 加载至 10 500 kN 时,锚桩出现明显上拔,仅 SZ1 最大沉降量超过 40 mm,可判断其单桩竖向抗压极限承载力分别为 9 378、10 500、10 500 kN;当 SZ4、SZ5、SZ6 分别加载至 9 000、9 700、10 000 kN 时,锚桩出现明显上拔,仅 SZ6 最大沉降量小于 40 mm,可判断其单桩竖向抗压极限承载力分别为 8 597、9 000、10 000 kN。

从图 2 还可以看出,嵌岩深度和长径比趋同的

SZ1 与 SZ3 差异较大。究其原因,与其他桩相比, SZ1 在初始加载期沉降量增长较大且较快,表明非嵌岩段土层侧向约束较小,桩土相对位移较大。表现为在桩顶荷载下 $Q-s$ 曲线呈近直线,当荷载超过 6 000 kN 后, $Q-s$ 曲线有变缓趋势,此时土层桩侧摩阻力即将发挥,桩土相对位移减小,桩顶沉降量主要取决于桩端沉降;随着荷载的增加, SZ3 的 $Q-s$ 曲线斜率变化缓慢,桩侧土层法向约束较大,桩土相对位移较小,桩顶沉降主要来自于桩身的弹性压缩,终止加载后嵌岩段桩侧摩阻力还未充分发挥。在相同岩土层条件下,长径比和嵌岩深度趋同且经桩侧后注浆处理的 SZ4 及长径比和嵌岩深度均较小的 SZ1 表现出与 SZ5 的 $Q-s$ 曲线变化规律趋同,究其原因,在 SZ4 桩身 24 m 处,受桩侧后注浆施工质量的影响(注浆压力和水灰比较大),嵌岩段桩侧极限摩阻力被削弱发挥有限,荷载主要由风化岩上覆土层侧摩阻力承担,桩端与桩侧荷载分担比约 1/4;直径 1.0 m 的 SZ1 表现出摩擦端承桩性状,第四层粉质黏土以下岩土层受灌注桩施工质量影响,桩侧极限摩阻力发挥有限,桩端与桩侧荷载分担比约为 1~2,表现出承载力低,沉降较大。SZ1 在加载 1 级, SZ5 在加载 2 级后,表现出荷载与沉降呈近线性变化特征,

表明桩顶荷载主要由桩端承担且桩侧和桩端承载力差异较大。SZ4 在施加第 1 级荷载后,随着荷载的增加,呈折线变化,斜率随之增大,当加载至 9 000 kN 时,桩顶沉降超过规范允许值。同等岩土层条件下,长径比和嵌岩深度均较小的 SZ3 和经桩侧后注浆处理的 SZ6, $Q-s$ 曲线变化规律趋同,与 SZ1、SZ4、SZ5 相比,曲线变化较缓。究其原因,试桩 SZ3 与 SZ6 相比,桩端阻力较早地开始发挥作用,分担的桩顶荷载比例较大, SZ6 桩侧摩阻力较大,桩端阻力仍有余力发挥。在加载后期嵌岩段桩侧摩阻力开始发挥,使得承载力较大,桩顶沉降主要来自于桩身弹性压缩。SZ2 的 $Q-s$ 曲线随着荷载增加曲线斜率逐渐增大,与 SZ3 相比,桩侧后注浆处理显著提高了桩侧摩阻力,改善了桩周土层强度。终止加载后,锚桩上拔,曲线末端出现明显上扬,这表明桩身存在较大的残余应力,桩身弹性压缩量较大。由图 2 可知,经桩侧后注浆处理的 SZ4 与 SZ6,在长径比和嵌岩深度趋同的条件下, $Q-s$ 曲线差异较大。究其原因,试桩均为 I 类桩,桩体完整性好,从图中也不难推测, SZ4 即将破坏,在相同施工条件和注浆标准下,试桩 SZ4 的嵌岩深度小是导致其沉降大的一个主要因素,与试桩 SZ5、SZ6 相比,嵌岩深度几乎减小 1.0 m。

表 3 试桩的承载力和变形

Table 3 Deformation and capacity of test piles

试桩编号	L/D	嵌岩深度/m	最大加载量/kN	极限承载力标准值/kN	桩端阻力/ (10^2 kN)	端阻比	最大沉降量/mm	残余沉降率/%	回弹率/%
SZ1	25.55	5.49	10 500	9 378	69	2	44.98	72.6	27.4
SZ2	25.55	5.51	10 500	10 500	43	2/3	16.6	56.7	43.3
SZ3	25.1	5.08	10 500	10 500	47	4/5	25.57	61.7	38.3
SZ4	31.88	5.52	9 000	8 597	29	1/2	43.68	80.5	19.5
SZ5	33.13	6.42	9 700	9 000	36	2/3	46.56	70.4	29.6
SZ6	33.25	6.52	10 000	10 000	25	1/3	24.49	46	54

大直径钻孔灌注桩的长径比、嵌岩深度、施工工艺和成桩质量对桩的变形特性影响较大^[15-18]。在 L/D 为 25~33 及嵌岩深度在 $5D\sim 8D$ 范围内,以及相同岩土层分布条件下,经后注浆处理的桩与未经桩侧后注浆处理的桩相比,单桩极限抗压承载力提高 1.40%~15.3%,最大沉降量降低 35.1%~65.6%,回弹率提高 13.1%~82.4%,控制桩顶沉降能力显著。在保证注浆效果的前提下,经桩侧后注浆的 SZ6 与 SZ2 相比,在 L/D 和嵌岩深度分别增加 30.1%和 18.3%的条件下,单桩极限承载力降低 24.9%,最大沉降量增大 47.5%,回弹率提高 24.7%,这表明经桩侧后注浆处理的桩,承载力和变形特性受长径比影响较大, SZ6 桩身弹性工作较明显。究其原因,在该试验条件下,2 根试桩的嵌岩深度较大(合理嵌岩深度为 $2D\sim 3D$),加载过程中,

SZ2 嵌岩段桩侧摩阻力还未充分发挥,沉降量的增长均来自桩身弹性压缩(回弹率均较大),而 SZ6 的桩径较小,桩端阻力较小,承载力降低;在该试验条件下,未经桩侧后注浆处理的 SZ5 和 SZ1 与 SZ3 相比,当 L/D 增加 32%和 1.79%,嵌岩深度增加 26.4%和 8.07%时,承载力降低 27.7%和 0%,最大沉降量增长 82.1%和 75.9%,回弹率降低 22.7%和 28.5%。综上, SZ1 的桩顶沉降量主要来自桩端压缩量,桩端较早地承担了桩顶荷载,桩端阻力较大,桩端处桩土相对位移增大,桩侧摩阻力较小; SZ5 的沉降量主要来自桩端沉降,与 SZ1 相比,桩侧泥皮强度较大,嵌岩段以上土层桩侧摩阻力发挥较早,承载力降低,桩身回弹量降低。上述表明,长径比对未经桩侧后注浆处理的桩的承载力影响较大,而变形特性受嵌岩深度影响较大。

3.2 桩身应力测试结果

钢筋计在埋设前先进行标定,在静态逐级加载过程中,使用 DP-YT-DSY-406A 频率读数仪在桩顶位移测试时刻记录钢筋计的读数,即在试验前读取初始读数,在试验过程中施加荷载后读数,假设在测试过程中钢筋与混凝土的应变协调,根据频率变化计算钢筋计所受的力,进而得到桩身轴力分布特征。根据每次测得的频率数值,按式(1)计算量测点的应力值^[17]。

$$\sigma_{si} = k(F_0^2 - F_i^2) \quad (1)$$

式中: σ_{si} 为钢筋计第*i*次应力量; k 为钢筋计率定系数; F_0 为钢筋计零频率; F_i 为钢筋计实测频率。

钢筋应变表示为

$$\varepsilon_i = \sigma_{si} / E_s \quad (2)$$

式中: ε_i 为钢筋计第*i*次应变变量; E_s 为钢筋弹性模量。

桩身混凝土应力表示为

$$\sigma_{ci} = E_c \cdot \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: σ_{ci} 为*i*截面混凝土正应力; ε_i 为*i*截面混凝土应变; E_c 为混凝土弹性模量。

假设在测试过程中钢筋与混凝土的应变协调,则桩身某截面处第*i*次测试时的轴力 F_i 可以表示为

$$F_i = A_{si}\sigma_{si} + A_{ci}\sigma_{ci} \quad (4)$$

式中: A_{si} 为*i*截面上钢筋面积; A_{ci} 为*i*截面上混凝土面积。

通过两相邻断面的桩身轴力差就可以求得两断面间平均侧摩阻力,即

$$q_i = (F_i - F_{i-1}) / h_i U_p \quad (5)$$

式中: q_i 为第*i*层土的平均侧摩阻力; F_i 、 F_{i-1} 为第*i*层土上、下面桩身轴力; h_i 为第*i*层土的厚度; U_p 为桩身截面周长。

经测试,试验中钢筋计的成活率为 92%,试验过程中,通过 6 根试桩桩身预埋钢筋计频率的变化,根据式(1)~式(4),得到每级荷载下每根试桩的桩身轴力 P_z ,由式(5)得到桩侧平均侧摩阻力 q_s ,桩侧总阻力 Q_s 和桩端阻力 Q_p 分别由式(6)、式(7)求得。

$$Q_s = U_p \sum_i q_i h_i \quad (6)$$

$$Q_p = Q - Q_s \quad (7)$$

式中: Q_s 为桩侧总阻力; Q_p 为桩端阻力; Q 为桩顶荷载。

每根试桩的 P_z 沿桩身的变化规律见图 3;每根试桩 q_s 沿桩身的变化规律见图 4;每根试桩每级荷载下 Q_s 和 Q_p 与桩顶沉降关系曲线见图 5。

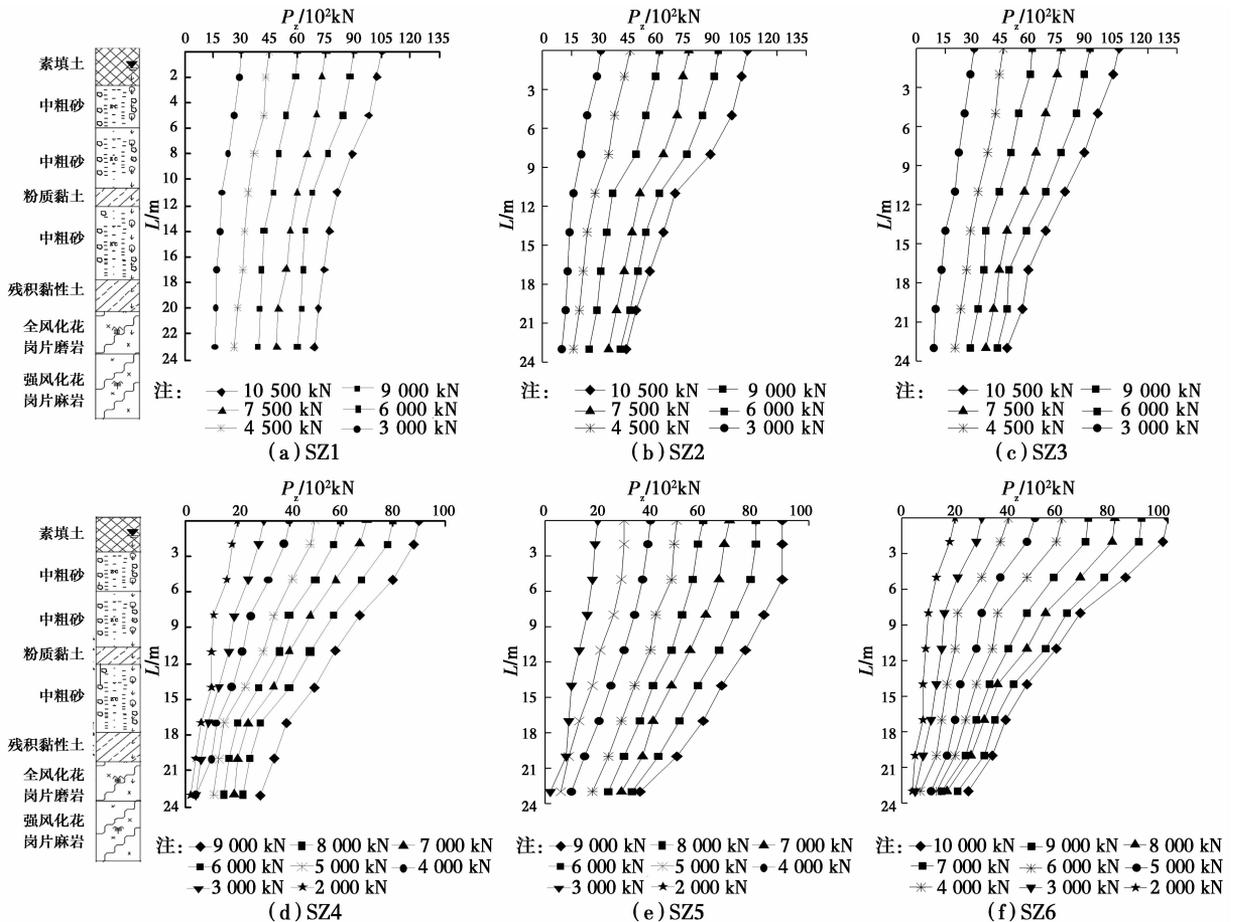


图 3 桩身轴力沿桩身分布

Fig. 3 The distribution curve of axial force along pile

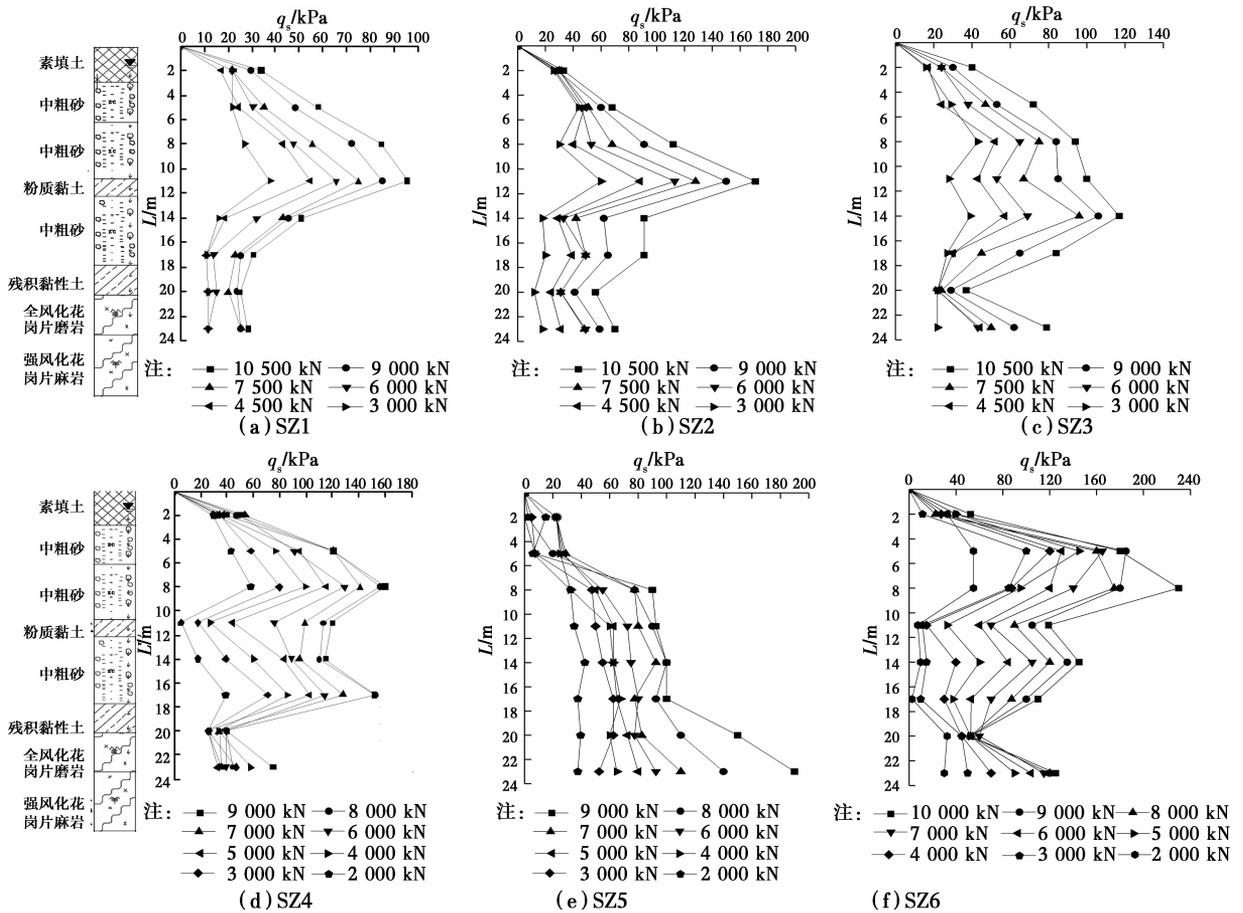


图 4 桩侧摩阻力沿深度分布

Fig. 4 The distribution of pile side friction along pile

由图 3 可知,6 根大直径嵌岩灌注桩桩身轴力沿桩身的分布规律趋同,自上而下逐渐衰减,衰减曲线呈内凹型和外凸型。其变化规律与桩的长径比、桩周和桩端土层性质、嵌岩深度、成桩方式、质量及施工工艺等有关^[17,19]。

通过对相邻土层间桩身轴力的平均相对衰减率统计发现,当长径比和嵌岩深度趋同及保证成桩质量时,比较 SZ1~SZ6 发现,经桩侧后注浆处理与未经桩侧后注浆处理的灌注桩相比,桩身轴力的平均相对衰减率提高幅度较大。中粗砂层(松散)可提高 66.7%~50%,中粗砂层(稍密~中密)可提高 33.3%~150%,粉质黏土层(可塑, $I_L=0.47$)可提高 -1.62%~30%,相对降幅较小,中粗砂层(中密)可提高 -55.6%~-5.88%,相对降幅较大,残积黏性土层(硬塑, $I_L=0.4$)可提高 -20.8%~44%,相对降幅较小,后注浆对嵌岩层以上土层增强作用较大。比较 SZ2、SZ4、SZ6 发现,在桩顶以下约 6D~8D 范围内,即第一注浆断面影响范围,根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[20] 注浆断面影响范围为各桩侧注浆断面以上 12 m 且扣除重叠部分,同一土层桩身轴力相对衰减率可提高 19%~150%,平

均提高 52.2%;在桩顶以下约 8D~20D 中部较密实土层中,即第二注浆断面影响范围,可提高 1.82%~141%,平均提高 55.7%,减小 12.6%~34.4%;在下部较软弱的土层及风化岩层,即第三注浆断面影响范围,可提高 11.4%~203%,平均提高 105%,降低 5.4%~14%;桩侧后注浆处理对桩侧摩阻力的增强作用较大,削弱作用较小。注浆效果对桩身轴力的影响较为显著,由注浆断面自下而上衰减并在重叠部分降低幅度较大,可降低 40%~53%;比较 SZ1、SZ3、SZ5 发现,泥浆护壁钻孔的成桩质量对桩身轴力的衰减影响较大,在长径比和嵌岩深度趋同的条件下,当成桩质量较差(由图 3 中试桩 SZ1 与 SZ5 桩身轴力沿深度衰减缓慢不难推断桩侧存在较厚泥皮,强度较低)时,在桩顶下约 6D~8D 的浅部土层中,桩身轴力相对衰减率可降低 20.5%~34%,在 10D~20D 中下部较密实的土层中,可降低 18.5%~60%,平均降低 39.3%。在全风化岩层,可降低 51.1%,强风化层段降低 70.7%;当成桩质量较好时,中部土层可提高 1.49%,全风化岩层提高 89%,强风化岩层提高 175%,可见,成桩质量对轴力影响明显。

从图 4 可以看出,桩侧摩阻力沿桩身竖向的变化规律表现为,在软硬土层交界处,桩侧摩阻力发生突变。横向的变化规律为,桩侧摩阻力随桩顶荷载的增加,先成线性增加,后逐渐表现出非线性,在达到极限侧摩阻力后减小并趋于稳定。对于泥浆护壁钻孔灌注桩(嵌岩深度为 $5D \sim 8D$),在全风化和强风化岩层,注浆与非注浆桩侧摩阻力的发挥模式为上小下大模式。

比较试桩 SZ1~SZ6 发现,经桩侧后注浆处理与未经桩侧后注浆处理相比,桩侧摩阻力在素填土层可提高 $31.25\% \sim 35\%$,降幅较小;中粗砂层(松散)可提高 $0.68\% \sim 150\%$,中粗砂层(稍密~中密)可提高 $19.1\% \sim 145\%$,粉质黏土层(可塑, $I_L = 0.47$)可提高 $19\% \sim 71\%$,中粗砂层(中密)可提高 $-1.71\% \sim 23.9\%$,残积黏性土层(硬塑, $I_L = 0.4$)可提高 $10\% \sim 52\%$,嵌岩桩桩侧摩阻力发挥较小,这表明后注浆对全风化和强风化片麻岩层以上桩侧摩阻力增强作用相对较大。未经桩侧后注浆处理的试桩,当长径比和嵌岩深度趋同时,施工质量较好的桩(I类桩,不存在较厚泥皮),素填土层的桩侧摩阻力可提高 $17.6\% \sim 77.8\%$;中粗砂层(松散)可提高 $24.1\% \sim 148\%$,中粗砂层(稍密~中密)可提高 $1.44\% \sim 11.2\%$,粉质黏土层(可塑, $I_L = 0.47$)可提高 $4.71\% \sim 8.11\%$,中粗砂层(中密)可提高 $17\% \sim 129\%$,残积黏性土层(硬塑, $I_L = 0.4$)可提高 $19\% \sim 228\%$,全风化岩段可提高 $51\% \sim 124\%$,降低 $48\% \sim 305\%$,强风化岩段可提高 $141\% \sim 177\%$ 。当长径比和嵌岩深度趋同时,好的注浆效果(注浆压力和水灰比达到注浆标准,不至过大)可使素填土层的桩侧摩阻力提高 $59.1\% \sim 63.6\%$;中粗砂层(松散)可提高 $48.8\% \sim 165\%$,中粗砂层(稍密~中密)可提高 $42.9\% \sim 105\%$,粉质黏土层(可塑, $I_L = 0.47$)可提高 $42.5\% \sim 43.7\%$,降低 $29.8\% \sim 30.4\%$,相对降幅较小,中粗砂层(中密)可提高 $26.1\% \sim 59.3\%$,残积黏性土层(硬塑, $I_L = 0.4$)可提高 $20.9\% \sim 67\%$,降低 27.6% ,相对降幅较小,全风化岩层可提高 $7.14\% \sim 50\%$,降低 28.6% ,强风化岩层可提高 $7.14\% \sim 78.6\%$ 。因此,桩侧后注浆处理对嵌岩段桩侧摩阻力的增强作用较弱,这是由于该试验条件下嵌岩段注浆压力和水灰比过大,导致水泥浆在一定程度上产生离析,进而削弱了界面抗剪强度,限制了嵌岩段桩侧摩阻力的发挥。因此,在长径比和嵌岩深度趋同的条件下,试桩 SZ5 与 SZ4 和 SZ6 相比,嵌岩段桩侧摩阻力发挥较大。

由图 5 可知, SZ1 表现出摩擦端承桩性状,随着

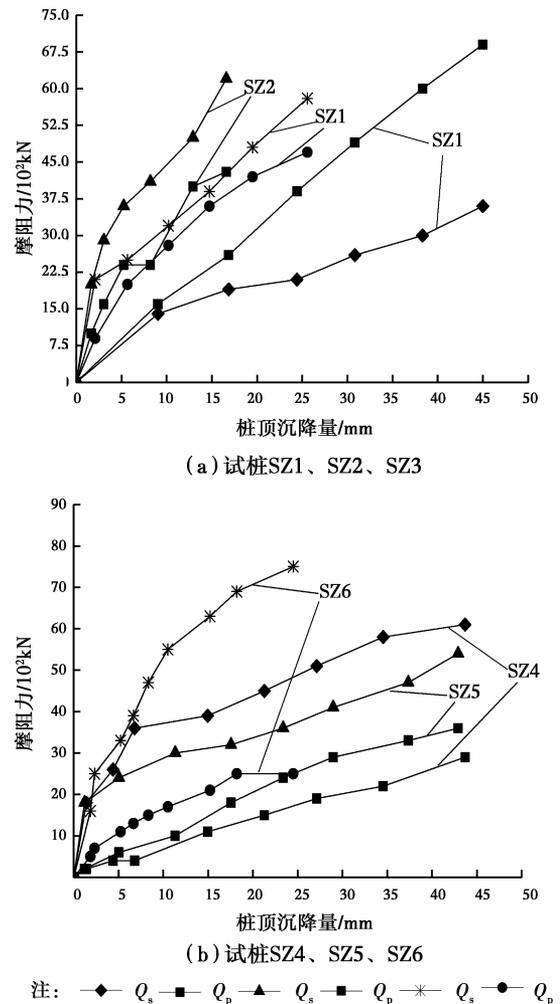


图 5 摩阻力与桩顶沉降关系曲线
Fig. 5 The curves of friction resistance and pipe top settlement

桩顶沉降量的增加,桩端阻力呈线性增长,桩顶荷载主要由桩端承担,嵌岩段及桩顶以下 $12D \sim 20D$ 范围内残积黏性土和中粗砂层的桩侧极限摩阻力较小,先于桩身中部和上部土层发挥,因而在桩顶沉降超过 25 mm 时,总桩侧摩阻力逐渐增长,但增长幅度较小,桩顶沉降主要来自于桩端沉降; SZ2、SZ4、SZ6 表现出端承摩擦桩的性状,与未经桩侧后注浆处理的试桩相比,桩侧摩阻力发挥较大。SZ2 和 SZ3 变化规律一致,曲线变化较陡,随着桩顶荷载的增加,桩侧摩阻力和桩端阻力变化曲线的竖向间距呈先增大,后减小,再增大的趋势。究其原因,嵌岩段以上桩侧极限摩阻力逐渐增大,桩端阻力发挥受限;随着荷载继续增加,嵌岩段以上桩侧极限摩阻力开始发挥,桩侧阻力增大,随后嵌岩段开始承担主要荷载,桩端阻力发挥受限。SZ4 和 SZ5 变化规律一致,曲线变化较缓,桩侧摩阻力和桩端阻力变化曲线的竖向间距较小且变化均匀,桩侧摩阻力分担荷载

的能力有限,桩端阻力发挥较早,承载力较低,沉降较大。SZ6 曲线变化较陡,桩侧摩阻力和桩端阻力变化曲线的竖向间距逐渐增大,桩端阻力未得到充分发挥,仍有一定的安全储备,桩侧摩阻力随着桩顶沉降而增加,前期增长较快且增幅较大,后期极限摩阻力发挥,嵌岩段桩侧摩阻力被注浆弱化,曲线增长变缓。

各试桩在荷载作用下的桩侧与等效桩端阻力分担比及嵌岩段桩侧极限摩阻力占总极限侧摩阻力的比例,与长径比和嵌岩深度的关系曲线见图 6、图 7。

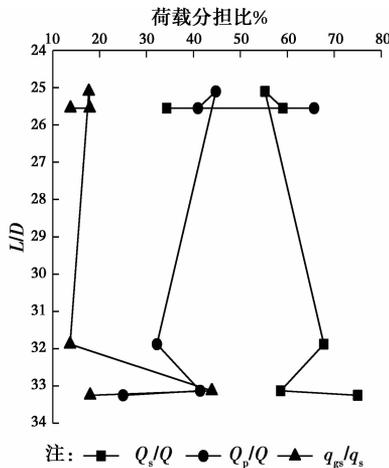


图 6 荷载分担比与长径比关系曲线

Fig. 6 The curves of load sharing ratio and aspect ratio

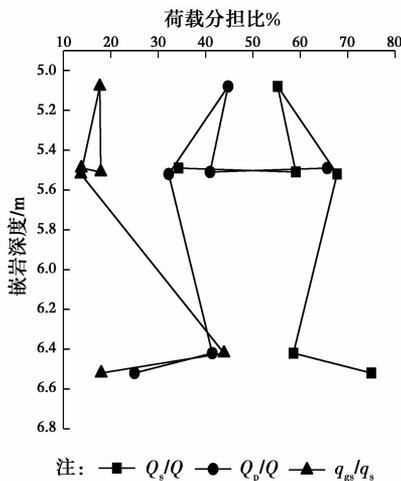


图 7 荷载分担比与嵌岩深度关系曲线

Fig. 7 The curves of load sharing ratio and rocking depth

由图 6、图 7 可知,该试验条件下,不考虑 SZ2 (嵌岩段桩侧摩阻力未充分发挥),经桩侧后注浆处理后,长径比和嵌岩深度的变化对试桩嵌岩段分担桩侧摩阻力比(q_{gs}/q_s)影响较小,而当长径比增长 29.7%和嵌岩深度增长 16.9%时,未经桩侧后注浆处理的试桩, q_{gs}/q_s 增幅为 218%,表明 SZ5 嵌岩段具有一定桩侧泥皮强度,其嵌岩段的法向约束较大,

成桩质量较好,受长径比和嵌岩深度影响较大。比较各试桩发现,经桩侧后注浆处理的试桩,桩端阻力分担比(Q_p/Q)随长径比(增幅 24.8%~30.1%)的增加呈减小趋势,降幅(21.3%~39.0%)较大,随嵌岩深度(增幅 18.1%)的增加降低 22.4%;未经桩侧后注浆处理的试桩,长径比增幅 29.7%及嵌岩深度增幅 16.9%, Q_p/Q 降幅 37.0%,表明无论是否经桩侧后注浆处理, Q_p/Q 受嵌岩深度影响较为显著。该试验条件下,未经桩侧后注浆处理的试桩,桩侧摩阻力分担比(Q_s/Q)随长径比(增幅 29.7%)和嵌岩深度(增幅 16.9%)的增加而增大,增幅(14.8%~27.0%)较大,嵌岩深度的增幅为 18.3%, Q_s/Q 增幅(10.7%)较小。表明经桩侧后注浆处理后, Q_s/Q 受长径比和嵌岩深度影响更小,而未经桩侧后注浆处理的试桩, Q_s/Q 受嵌岩深度影响更大。

3.3 测试结果与现行规范值对比

桩侧极限摩阻力实测值与勘察报告建议值的对比,后注浆桩侧摩阻力增强系数与《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)^[20] 推荐值的对比,大直径桩侧尺寸效应系数与《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)^[20] 推荐值的对比,分别如图 8~图 10 所示。

由图 8 可知,对泥浆护壁钻孔灌注桩,在保证成桩质量(泥皮厚度、泥浆持续时间、泥浆稠度)的前提下,结合图 4(a)、(b)以及其摩擦端承桩的特性,不难判断,SZ1 部分桩侧存在较厚泥皮,其部分土层的实测桩侧极限摩阻力与规范值相比偏大,具体地,中粗砂层(松散)可提高 17.9%~46.4%,中粗砂层(稍密~中密)可提高 71.8%~91.1%,粉质黏土层(可塑, $I_L=0.47$)可提高 46.9%~53.8%,中粗砂层(中密)可提高 74.2%~120%,残积黏性土层(硬塑, $I_L=0.4$),可提高 7.02%~21.8%。由图 8 可知,与勘察报告建议值相比,仅 SZ5 的全风化岩层和强风化岩层桩侧摩阻力分别提高了 15.4%和 -5%。究其原因,结合图 4,SZ1 桩侧极限摩阻力发挥有限,嵌岩段强度比一般土层低;SZ2 因锚桩上拔,其嵌岩段并未完全发挥;SZ3 在达到最大加载量时,锚桩上拔,图 5 显示试桩 SZ3 桩端阻力发挥较大,强风化岩层桩侧摩阻力已开始发挥,而全风化岩层在上部土层发挥作用时并没有明显增长,而是发挥潜力有限,受施工质量影响较大;SZ4、SZ6 受注浆质量影响,由于注浆压力较大致使嵌岩段桩侧摩阻力被削弱。图 9 显示,对于灌注桩($D=1.0$ m),桩侧尺寸效应系数在砂土中可提高 17.9%~120%,平均

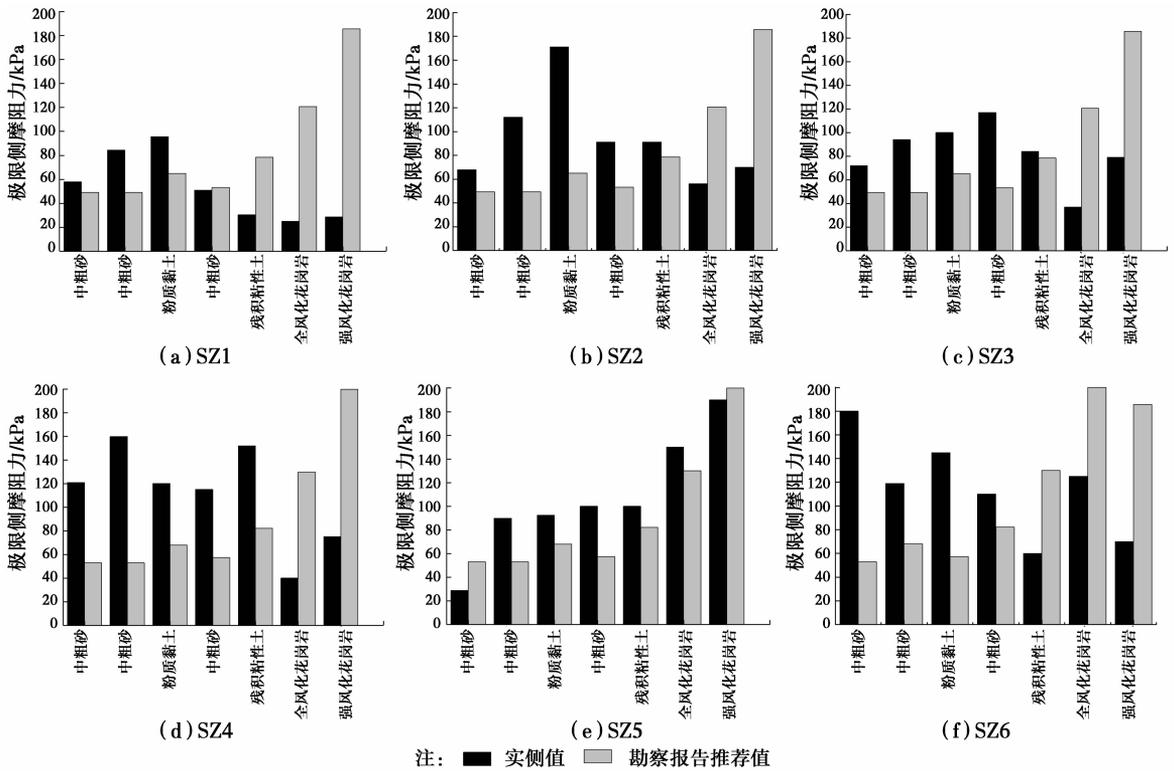


图 8 不同土层桩侧极限摩阻力实测值与勘察报告建议值的比较

Fig. 8 Pile shaft skin ultimate friction and code value in different soil layers

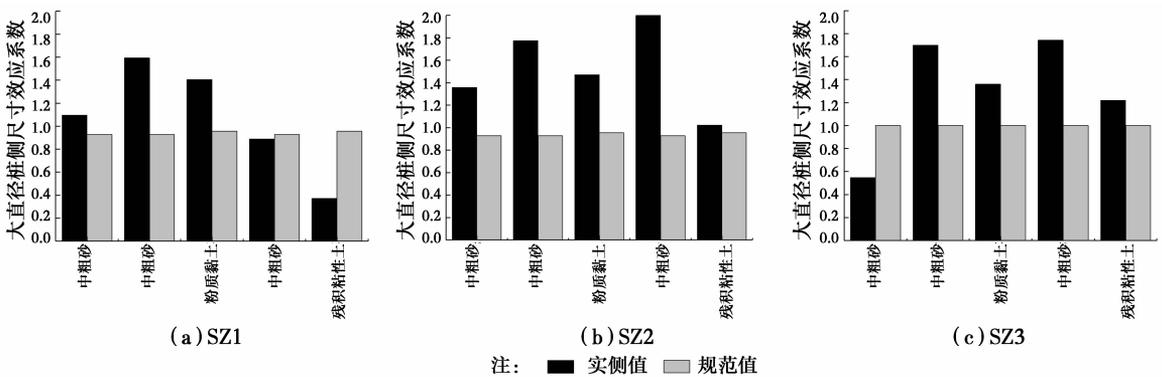


图 9 不同土层桩侧尺寸效应系数与规范值对比

Fig. 9 Size effect coefficient of pile side and code value in different soil layers

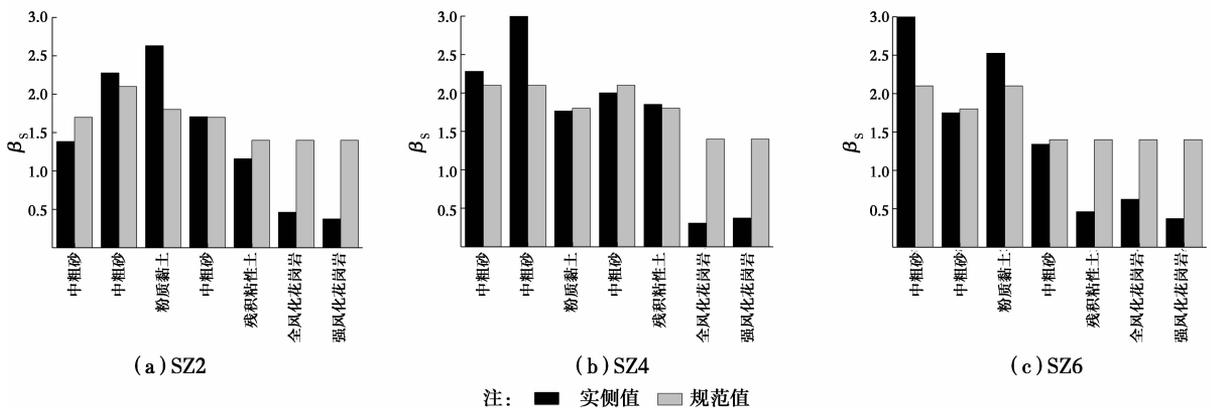


图 10 不同土层后注浆桩侧摩阻力增强系数与规范值对比

Fig. 10 Side friction resistance enhancement factor of the post-grouting pile and code value in different soil layers

提高67%，提高幅度较显著；在黏性土中可提高7.01%~53.9%，平均提高30.5%，降低幅度(61.2%)较大，但仍以提高为主。对于桩径为0.8 m的灌注桩，桩侧尺寸效应系数在砂土中可提高69.8%~74.2%，平均提高72.0%，仍以提高为主，且较为显著，在黏性土中可提高21.8%~36.0%，表明实测值在很大程度上高于规范值。图10显示，经桩侧后注浆处理后，桩侧摩阻力增强系数通过比较实测桩侧摩阻力值与按《建筑桩基技术规范》(JG J94—2008)^[20]中第5.3.5条确定的初始极限侧摩阻力标准值发现，在中粗砂层可提高8.43%~106.7%，黏性土层可提高2.8%~46.1%，表明实测值均高于规范值推荐值。

4 结论

1)对于大直径嵌岩泥浆护壁钻孔灌注桩，长径比25~34，嵌岩深度 $5D\sim 8D$ ， $Q-s$ 曲线呈缓变型。经后注浆处理与未经桩侧后注浆处理的试桩相比，单桩极限抗压承载力提高1.40%~15.3%，最大沉降量降低35.1%~65.6%，回弹率提高13.1%~82.4%，控制桩顶沉降效果显著。该试验条件下，6根试桩的承载力和变形特性受长径比和嵌岩深度影响较大。

2)该试验条件下，大直径泥浆护壁钻孔灌注桩桩身轴力衰减曲线呈内凹型；注浆效果对桩身轴力的影响显著，由注浆断面自下而上逐渐衰减，并在重叠部分降低幅度较大(40%~53%)。

3)经桩侧后注浆处理后，嵌岩段分担桩侧摩阻力比(q_{gs}/q_s)受长径比和嵌岩深度影响较小；无论是否经桩侧后注浆处理，桩端阻力分担比(Q_p/Q)受嵌岩深度影响显著；经桩侧后注浆处理后，桩侧摩阻力分担比(Q_s/Q)受长径比和嵌岩深度影响更小，而未经桩侧后注浆处理的试桩， Q_s/Q 受嵌岩深度影响更大。

4)部分土层的实测桩侧极限摩阻力与勘察报告推荐值相比，对无黏性土而言，桩侧注浆效果显著，桩侧摩阻力提高幅度较大。在中粗砂层(松散)可提高17.9%~46.4%，中粗砂层(稍密~中密)提高71.8%~91.1%，粉质黏土层(可塑， $I_L=0.47$)提高46.9%~53.8%，中粗砂层(中密)提高74.2%~120%，残积黏性土层(硬塑， $I_L=0.4$)可提高7.02%~21.8%。

5)对于桩径为1.0 m的灌注桩，桩侧尺寸效应系数在砂土中提高(17.9%~120%)显著，在黏性土中可提高7.01%~53.9%；桩径为0.8 m的灌注

桩，桩侧尺寸效应系数在砂土中提高(69.8%~74.2%)显著，在黏性土中可提高21.8%~36.0%；在砂土层中后注浆桩侧摩阻力增强系数可提高8.43%~106.7%，黏性土中可提高2.8%~46.1%。

参考文献:

- [1] 张文涛, 马建林, 王滨, 等. 嵌岩扩底抗拔桩承载特性现场试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 102-108.
ZHANG W T, MA J L, WANG B, et al. Field test study on bearing capacity of rock-embedded underreamed uplift piles [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 102-108. (in Chinese)
- [2] 陈小钰, 张明义, 白晓宇. 人工挖孔嵌岩灌注桩承载特性现场试验与机理分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 79-86
CHEN X Y, ZHANG M Y, BAI X Y. Field test and mechanism analysis of bearing capacity characteristics of manual digging rock-socketed filling piles [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 79-86. (in Chinese)
- [3] 闫楠, 白晓宇, 水伟厚, 等. 大直径超长冲孔灌注桩竖向抗压承载特性原位测试研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版 2015, 46(7): 2571-2580.
YAN N, BAI X Y, SHUI W H, et al. In-situ test study on vertical compressive bearing capacity characteristic of large diameter super-long impact-cone concrete pile [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2571-2580. (in Chinese)
- [4] LI S C, ZHANG Q, ZHANG Q Q, et al. Field and theoretical study of the response of super-long bored pile subjected to compressive load [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(1): 71-78.
- [5] 王旭, 蒋代军, 刘德仁, 等. 低温多年冻土地基大直径钻孔灌注桩未回冻状态承载性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1807-1812.
WANG X, JIANG D J, LIU D R, et al. Experimental study of bearing characteristics of large-diameter cast-in-place bored pile under non-refreezing condition in low-temperature permafrost ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1807-1812. (in Chinese)
- [6] OMER J R, ROBINSON R B, DELPAK R, et al. Large-scale pile tests in Mercia mudstone: Data analysis and evaluation of current design methods [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2003, 21(3):

- 167-200.
- [7] THIYYAKKANDI S, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soils [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(3): 439-454.
- [8] XING H F, HAN J, LI C F. Performance monitoring of superlarge-diameter rock-socketed piles by optic fiber sensors [J]. *Materials Testing*, 2017, 59(6): 585-590.
- [9] 赵春风, 李俊, 邱志雄, 等. 广东地区大直径超长钻孔灌注桩荷载传递特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 849-855.
- ZHAO C F, LI J, QIU Z X, et al. Experimental research on load transfer of large-diameter and super-long bored pile in Guangdong area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 849-855. (in Chinese)
- [10] BALAKRISHNAN E G, BALASUBRAMANIAM A S, PHIEN-WEJ N. Load deformation analysis of bored piles in residual weathered formation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(2): 122-131.
- [11] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(5): 1061-1075.
- [12] XU W, LIU B, ZHOU Y Q, et al. Construction of 8.0-m diameter rock-socketed piles in a large-scale deep excavation [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(5): 2455-2466.
- [13] 李永辉, 王卫东, 吴江斌. 基于桩侧广义剪切模型的大直径超长灌注桩承载变形计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(12): 2157-2166.
- LI Y H, WANG W D, WU J B. Bearing deformation of large-diameter and super-long bored piles based on pile shaft generalized shear model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2157-2166. (in Chinese)
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- China Academy of Building Research. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [15] 张忠苗, 何景愈, 房凯. 基于球形固结模型的桩端后注浆残余应力理论研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 2671-2676.
- ZHANG Z M, HE J Y, FANG K. Theoretical studies of pile tip post grouting residual stresses based on spherical cavity consolidation model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2671-2676. (in Chinese)
- [16] 刘金砺, 秋仁东, 邱明兵, 等. 不同条件下桩侧阻力端阻力性状及侧阻力分布概化与应用[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 1953-1970.
- LIU J L, QIU R D, QIU M B, et al. Behaviors of shaft resistance and tip resistance of piles under different conditions and conceptualization and application of distribution of shaft resistance [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 1953-1970. (in Chinese)
- [17] 刘福天, 赵春风, 吴杰, 等. 常州地区大直径钻孔灌注桩承载性状及尺寸效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 858-864.
- LIU F T, ZHAO C F, WU J, et al. Experimental research on bearing behavior and size effect of large diameter bored cast-in-situ piles in Changzhou area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 858-864. (in Chinese)
- [18] 胡庆红, 张土乔, 谢新宇. 深厚软土中大直径灌注扩底桩受力性状试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(4): 87-91.
- HU Q H, ZHANG T Q, XIE X Y. Experimental study on the bearing capacity of large diameter cast-in-place under-reamed pile in deep soft soils [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(4): 87-91. (in Chinese)
- [19] 房凯, 张忠苗, 刘兴旺. 基于沉降标准的卵砾石层中后注浆桩承载力预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1178-1183.
- FANG K, ZHANG Z M, LIU X W. Prediction of bearing capacity of post grouting pile in gravel layer based on settlement criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1178-1183. (in Chinese)
- [20] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- China Academy of Building Research. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)