

印尼地区嵌岩灌注桩竖向承载特性现场试验

管金萍¹, 张明义^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 李方强^{1,3}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033; 3. 山东省电力建设三公司, 山东 青岛 266037)

摘要:为更加深入研究不同竖向荷载作用下大直径嵌岩灌注桩的承载特性与荷载传递规律,以印尼地区某工程为依托,对3根直径为800 mm的嵌岩灌注桩进行单桩竖向抗压静载试验与桩身应力测试。试验结果表明:3根试桩的 $Q-s$ 曲线均为缓变型,沉降量均不超过17 mm,回弹率较大,介于54.8%~70.9%之间,残余沉降较小,承载力较高,均满足设计要求。桩身轴力随桩顶荷载的增加逐渐增大,随深度逐渐递减;桩侧摩阻力的发挥具有异步性,随着荷载的增大,桩侧摩阻力逐渐发挥,在嵌岩段桩侧摩阻力最大,但仍未充分发挥;桩端阻力随桩顶荷载的增加近似呈线性增大,在最大荷载作用下,桩端阻力占比约55%,表现出摩擦端承桩的特性。研究结果对国内桩基规范的完善以及当地桩基规范的制订具有较重要的意义。

关键词:嵌岩灌注桩;静载试验;承载力预测;桩侧摩阻力;桩端阻力;印尼地区

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2020)06-0134-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Field Test of Vertical Bearing Capacity of Rock-socketed Piles in Indonesia

GUAN Jin-ping¹, ZHANG Ming-yi^{1,2}, BAI Xiao-yu^{1,2}, LI Fang-qiang^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China; 3. SEPCO III Electric Power Construction Corporation, Qingdao 266037, China)

Abstract: The bearing characteristics and load transfer mechanism of rock-socketed pile of large diameter under different vertical loads were researched via vertical compression static load test and pile stress test on three rock-socketed cast-in-place piles with diameter of 800 mm in a project in Indonesia. Test results show that the $Q-s$ curves of the three test piles changed slowly, with settlement smaller than 17 mm, large rebound rate ranging from 54.8% to 70.9%, and small residual settlement as well as large bearing capacity, all meeting design requirements. The axial force of pile shaft gradually increased with the rising of the load on pile top, and gradually decreased along with depth. The change of side frictional resistance of pile was asynchronous; as load increased, the side frictional resistance gradually developed to the maximum in the rock-socketed segment, which, however, was still not fully utilized. The pile end resistance increased linearly with the increase of load on pile top. Under the maximum load, the pile end resistance ratio accounted for about 55%. The research results are helpful to the improvement of domestic pile foundation specifications and the formulation of local pile foundation specifications.

Key words: rock-socketed pile; static load test; forecast of bearing capacity; side frictional resistance of pile; pile end resistance; Indonesia area

收稿日期:2019-03-05;修回日期:2019-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51708316,51778312,51809146);山东省重点研发计划项目(2017GSF16107,2018GSF117008);山东省博士后创新项目(201903043);山东省高等学校科技计划项目(J16LG02);青岛市博士后应用研究项目(2018101);中国博士后科学基金面上项目(2018M632641)

作者简介:管金萍(1995-),女,山东诸城人,硕士研究生,主要从事岩土方面的研究。E-mail: 1810152733@qq.com

通信作者:白晓宇(1984-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,博士(后),主要从事地基基础及地下工程领域的研究工作。E-mail: baixi-ayyu538@163.com

1 研究背景

随着城市规模的不断扩大以及各项基础设施的建设,嵌岩桩凭借施工简单、沉降小、承载力高、群桩效应弱、抗震性能好等优点^[1-4]在对沉降要求比较严格、上部荷载比较大的工程中得到广泛应用。但是对嵌岩桩承载力的研究还存在着诸多不足。20 世纪 90 年代以前,人们把嵌岩桩与端承桩混为一谈,认为端承桩就是嵌岩桩,将嵌岩桩当成端承桩进行设计。然而进入 90 年代后,人们在工程中不断分析总结,发现嵌岩桩的桩侧摩阻力不容忽视,当荷载较小时,侧摩阻力主要起平衡外荷载的作用;当荷载较大时,侧摩阻力与端阻力共同发挥作用。

诸多专家学者对嵌岩桩的承载性状进行了研究:Radhakrishnan 等^[5]提出嵌岩桩桩顶在荷载作用下展现出弹性状态的趋势,试验结果表明当嵌岩桩的嵌岩深度超过 2 倍桩径时,桩端阻力较桩顶总荷载可忽略不计,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担。Carrubba 等^[6]利用嵌岩灌注桩的 5 种轴向荷载试验结果,建立了基于双曲线函数的模型以用于评估桩-岩界面的极限表面摩擦力,探讨了嵌岩桩的桩身摩阻力,桩端阻力与侧摩阻力的分布特点。Armaghani 等^[7]认为与传统的 ANN 模型相比,混合 PSO-ANN 模型预测嵌岩桩的极限承载力的准确度更高。闫楠等^[8]研究发现大直径超长冲孔灌注桩极限荷载作用下表现出摩擦桩或端承摩擦桩的特性,桩端承载力只占总荷载很小一部分,荷载主要由桩侧摩阻力承担。王卫东等^[9]将现场试验与经验值比对认为嵌岩桩桩端岩土层性质对桩侧摩阻力的影响较大,软质岩层与硬质岩层之间差别非常明显。白晓宇等^[10-11]对嵌岩灌注桩进行了一系列研究,结果表明随着嵌岩深度的增加,桩端阻力与总承载力的比值(Q_p/Q_u)会逐渐减小,桩顶沉降量也随之减小;嵌岩段桩侧摩阻力峰值随长径比的增大逐渐减小,但经过桩侧后注浆处理,长径比和嵌岩深度对嵌岩端桩侧摩阻力的影响较小。

上述专家学者对嵌岩灌注桩承载性状的研究具有一定的参考价值,但对印尼地区嵌岩灌注桩的研究鲜有报道,且当地嵌岩灌注桩的应用尚处于起步阶段,其设计、施工都是以国内桩基规范为标准,当地没有相应的桩基规范。因此,本文选择印尼地区某工程中以中风化凝灰岩为持力层的 3 根嵌岩灌注桩进行单桩竖向静载试验和桩身应力测试,详细研究了该地区嵌岩灌注桩的竖向承载特性和荷载传递

规律。研究结果对国内桩基规范的完善以及当地桩基规范的制订具有重要意义。

2 工程概况

本试验位于印度尼西亚西加里曼丹某工程场地内,根据试桩技术要求,钻孔灌注桩成孔工艺为机械成孔。试桩桩径为 800 mm,桩长介于 15.5~16.1 m 之间,桩身混凝土等级为 C35,桩端持力层为中风化凝灰岩。

2.1 工程地质条件

本工程地貌属海滩和谷地区域,上部覆盖层以海积地层为主,下部以残积地层为主,丘陵区域覆盖层以残积为主,下伏基岩为花岗岩。具体土层岩土力学参数见表 1。

表 1 各岩土层力学参数					
Table 1 Mechanical parameters of rock and soil strata					
层号	岩土层名称	厚度/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/kPa 压缩模量/MPa
① ₁	人工填土	0.4~1.5	(17)	(8)	(10) —
① ₂	粗砂	2.1~4.5	(18.2)	(20)	1
① ₃	粉质黏土	1.0~2.5	16.81	16.05	10.95 3.57
② ₁	淤泥	1.5~10.0	14.57	2.91	8.48 1.97
② ₂	粉质黏土	0.5~4.0	18.11	15.19	23.71 4.27
② ₃	中粗砂	1.0~1.55	—	—	— —
② ₄	粉砂	1.0~2.7	(19)	(33.5)	(3) (14.25)
③ ₁	粉质黏土	1.0~17.0	17.31	15.60	16.60 3.60
③ ₂	砂质黏性土	2.0~10.0	17.57	21.07	22.57 3.65
③ ₃	含砾石黏性土	2.0~16.0	17.79	26.10	22.20 3.83
④ ₁	强风化凝灰岩	0.5~16.0	19.00	(25)	(25) —
④ ₂	中风化凝灰岩	2.1~5.7	—	—	— —
⑤ ₁	强风化花岗岩	0.5~7.7	19.00	(25)	(25) —
⑤ ₂	中风化花岗岩	1.0~8.0	—	—	— —

注:表中“—”表示勘察报告未给出;()内数值为经验取值,其它数值为引用厂区地段土工试验数据结合初勘资料综合分析得到。

2.2 水文地质条件

勘察期间所测得的地下水初见水位埋深在 0~18.0 m 之间。静止水位埋深 0~18.5 m 之间,其标高在 2.48~40.99 m 之间。

根据场地及周边地势情况及周边水井(塘)的水位调查情况,场地内第四系孔隙潜水水位动态变幅主要受季节性大气降水影响,历史最高地下水位接近地表,年平均高水位埋深约为 0 m,低水位埋深约为 5.0 m,年变化幅值在 5.0 m 左右。

3 试验方案

本次试验选取 3 根嵌岩灌注桩进行静载试验,试桩编号分别为 S1,S2,S3。静载试验前进行了低应变检测,结果显示桩身完整性较好,均为 I 类桩。

在此基础上,同步进行了桩身内力测试与单桩静载试验。

3.1 单桩静载试验

根据试桩技术要求的单桩最大加载值,静载试验使用锚桩(二锚一)反力梁装置,锚桩编号分别为M1—M6。桩顶沉降测定平面在距桩顶 200 mm 以下位置,在沉降测定平面 2 条正交直径的端点处分别安装 4 只位移传感器,锚桩上各安装一个位移传感器检测锚桩的上拔量,试验现场见图 1。



图 1 试验现场

Fig. 1 Picture of field test

锚桩施工工艺与试桩相同,采用旋挖钻机成孔,施工工艺流程见图 2。试桩区域锚桩直径为 1 000 mm,经验算锚桩能够满足抗拔力要求。锚桩参数见表 2。

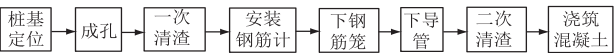


图 2 施工工艺流程

Fig. 2 Flowchart of construction

表 2 锚桩参数

Table 2 Parameters of anchor pile

编号	锚桩直径/m	桩长/m	扩底直径/m	嵌入基岩深度/m	桩身混凝土强度等级
M1	1.0	17.20	1.2	2.00	C30
M2	1.0	16.82	1.2	1.90	C30
M3	1.0	16.80	1.2	1.98	C30
M4	1.0	16.80	1.2	1.98	C30
M5	1.0	16.80	1.2	1.98	C30
M6	1.0	16.80	1.2	1.98	C30

试验的加载方式采用慢速维持荷载法,加载、测读桩顶沉降时间间隔、沉降相对稳定标准、试验终止条件以及卸荷按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[12]相关规定执行。各试桩加载参数见表 3。

表 3 荷载加载参数

Table 3 Parameters of loading

试桩编号	首级加载值/kN	每级加载值/kN	加载级数	最大加载值/kN
S1	1 440	720	9	7 200
S2	1 200	600	11	7 200
S3	1 440	720	9	7 200

3.2 桩身应力测试

本次试验桩身应力测试采用钢筋应力计法,选用

CA-GJJ-10 型钢筋应力计,通过量测荷载作用下按地层埋设并焊接在钢筋笼主筋上的钢筋计频率,依据频率与应变的关系,计算钢筋应力,再将钢筋应力通过计算换算为混凝土桩截面的轴力。静载试验加载前读取钢筋计初始读数,每级荷载施加后,待桩顶沉降相对稳定后测量一次读数。钢筋应力计沿深度方向按土层分界处布置,第一层土分界处布置 4 个钢筋计,其余土层分界处各布置 2 个钢筋计,钢筋应力计埋设分布及埋设位置分别如图 3、图 4 所示。

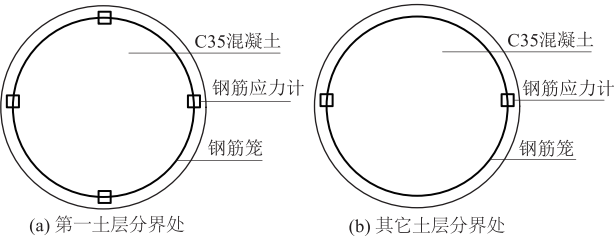


图 3 桩身钢筋应力计埋设分布

Fig. 3 Sectional view of the layout of strain gauges

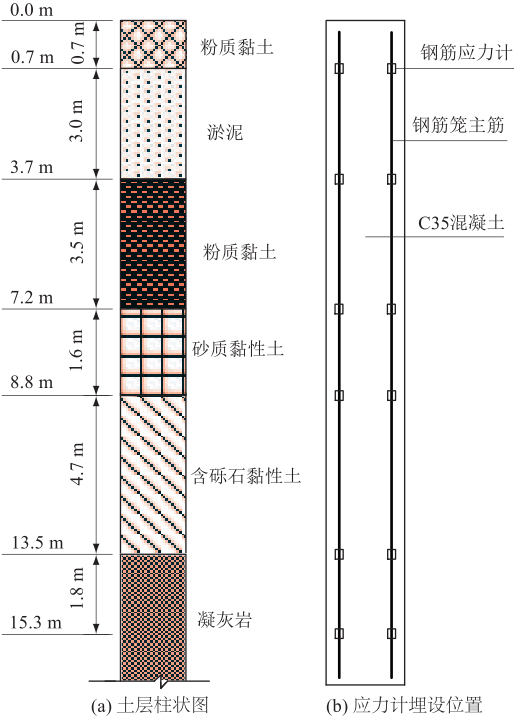


图 4 桩身钢筋应力计埋设位置

Fig. 4 Positions of steel bar stress gauges

4 试验结果与分析

4.1 Q-s 曲线分析

Q-s 曲线能够从宏观反映出荷载传递性状、桩土相互作用以及桩受荷载破坏模式^[13-16],因此,对其分析有助于对单桩竖向抗压承载性状的研究。竖向抗压静载试验过程中各试桩的最大加载值、桩顶沉降量、回弹量等数据见表 4,根据试验数据绘制 Q-s 曲线如图 5 所示。

表 4 竖向抗压静载试验结果

Table 4 Results of vertical compressive static load test

桩号	桩径/ mm	桩长/ m	最大加 载量/ kN	最大沉 降量/ mm	回弹量/ mm	残余沉 降量/ mm	回弹率/ %
S1	800	16.10	7 200	10.76	7.63	3.13	70.9
S2	800	15.50	7 200	9.29	6.50	2.79	70.0
S3	800	15.75	7 200	16.37	8.97	7.40	54.8

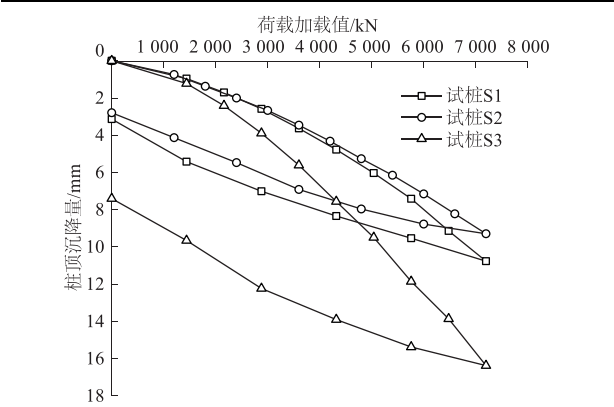


图 5 试桩 Q-s 曲线

Fig. 5 Q-s curves of test piles

从表 4 及图 5 可以看出:桩径为 800 mm 的 S1—S3 嵌岩桩的 Q-s 曲线均为缓变型,随着荷载的增加沉降速率有所增大,但幅度较小,沉降速率基本一致,试桩均未达到破坏。试桩 S1—S3 的 Q-s 曲线均为典型的抗压静载试验曲线,说明嵌岩桩承载力还有较大潜力,这与陈小钰等^[17]、苗德滋等^[18]研究成果相符。3 根试桩沉降均较小,最大沉降量介于 9.29~16.37 mm,均小于规范^[12]规定的 40 mm;残余沉降量较小,介于 2.79~7.40 mm;回弹率较大,介于 54.8%~70.9%,表明 3 根试桩的弹性工作较明显,且具有一定的可压缩性。根据规范^[12]的相关规定,得各试桩单桩竖向抗压承载力如表 5 所示。

表 5 单桩竖向抗压承载力

Table 5 Vertical compressive bearing capacity of single pile

桩号	设计桩长/ m	设计桩径/ mm	单桩极限 承载力/kN	单桩承载力 特征值/kN	桩顶沉 降/mm
S1	16.10	800	7 200	3 600	10.76
S2	15.50	800	7 200	3 600	9.29
S3	15.75	800	7 200	3 600	16.37

4.2 单桩极限承载力预测

3 根试桩最大加载值为 7 200 kN,虽达到设计极限承载力,但试桩没有发生破坏,且最大沉降量不

足极限沉降量的 1/2,单桩承载力还有较大潜力。对此根据试桩的荷载加载值及其对应的桩顶位移进行极限承载力的预测,这对现场施工具有重要意义。目前单桩竖向极限承载力的预测模型主要有多项式回归法模型、双曲线模型、指数曲线模型、调整双曲线模型、灰色理论模型、经验参数法设计模型和人工神经网络模型等^[19-22]。本文选取预测精度较高的指数曲线模型进行预测。Q-s 曲线的拟合方程及相关数据如表 6 所示。

由表 6 可以看出,指数函数的预测精度近似等于 1,设计极限承载力与极限承载力相差很大,说明在加载到设计极限承载力时,桩的承载力还有较大潜力,试桩 S1 和试桩 S3 还可以发挥 29%的潜力,而试桩 S2 还有高达 52.1%的潜力可以发挥。其原因可能是试桩 S2 首级荷载及每级加载值较小,试验加载过程中对桩身的破坏较小,所以极限承载力较大。

4.3 桩身轴力分布规律

试桩在桩顶竖向载荷作用下会引起桩身应力变化,从而导致钢筋计振弦频率改变,故可通过量测振弦式钢筋测力计在不同载荷下的频率数值,依据频率与应力的关系,计算钢筋应力,再将钢筋应力通过计算换算为混凝土桩截面的轴力^[23],3 根试桩的轴力分布曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出:虽然试桩 S2 的首级加载值以及加载级数与其他两试桩都不同,但是 3 根试桩的轴力随深度的分布曲线规律基本一致。同一级荷载作用下,随着距桩顶距离的增大,轴力分布曲线的斜率逐渐减小,轴力的衰减速度逐渐加快,在桩端处轴力达到最小值。这表明随着深度的增加,桩侧摩阻力逐渐发挥作用,抵消了一部分轴力,导致了轴力的减小。同时还可发现,同一深度处,随着荷载得逐级增加桩身轴力逐渐增大,且曲线斜率逐渐减小,表明侧摩阻力也随桩顶荷载的增大逐渐发挥。在最大荷载作用下,嵌岩段的轴力曲线斜率最小,表明桩侧摩阻力在岩层中达到最大值。

4.4 桩侧摩阻力分布规律

根据试桩的轴力分布、桩身周长以及土层厚度

表 6 指数函数拟合方程

Table 6 Fitting equations of exponential functions

试桩编号	桩长/m	拟合方程	预测精度	单桩极限承载力/kN	极限承载力预测值/kN
S1	16.10	$Q = -9\,144e^{-\frac{s}{7.8}} + 9\,360$	0.996 03	7 200	9 305.8
S2	15.50	$Q = -10\,878e^{-\frac{s}{9.3}} + 11\,097$	0.997 71	7 200	10 949.6
S3	15.75	$Q = -9\,377e^{-\frac{s}{13.2}} + 9\,736$	0.990 52	7 200	9 283.1

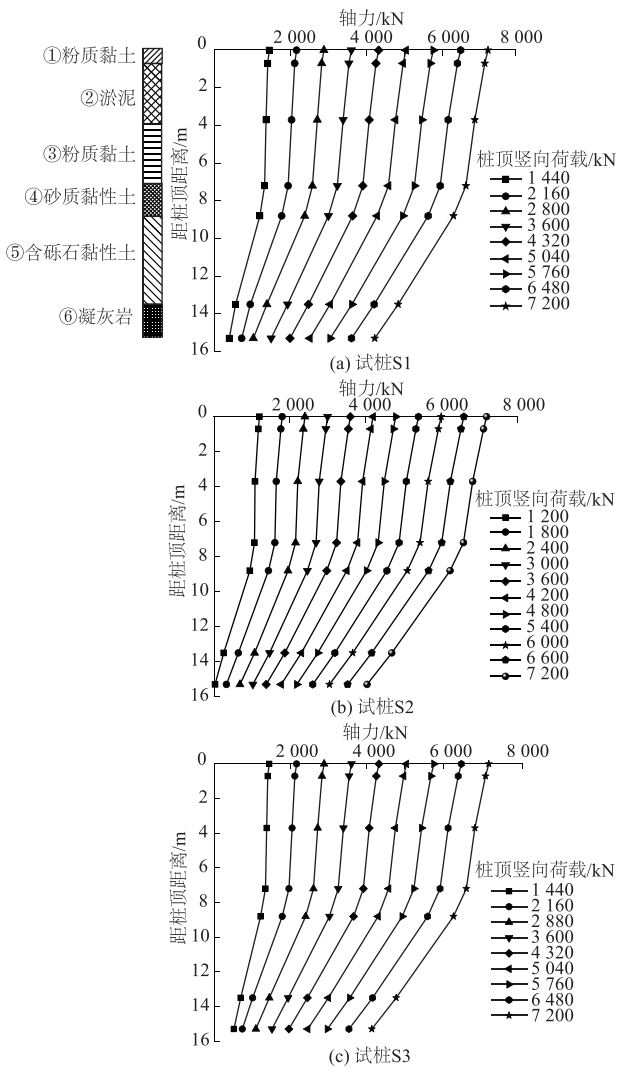


图6 试桩桩身轴力分布

Fig. 6 Distribution of axial force on pile shaft

可计算得到桩侧摩阻力,绘制各试桩桩侧摩阻力随埋置深度的变化如图 7 所示。

从图 7 可知,3 根试桩的桩侧摩阻力分布趋势基本一致,桩侧摩阻力与土的埋深及土层性质有关,且桩侧摩阻力发挥作用具有异步性,这与王卫东等^[9]的研究结果一致。随着荷载的增大,桩侧摩阻力逐渐增大,当较小荷载作用下,桩侧摩阻力在桩端有减小的趋势;当荷载较大时,桩侧摩阻力在桩端依然呈增大的趋势。这是因为当桩顶荷载较小时,桩顶沉降量较小,桩土相对位移小,侧摩阻力发挥不充分;随着桩顶荷载的增大,桩土相对位移逐渐增大,桩土接触越紧密,桩土剪切作用加强,侧摩阻力逐渐充分发挥,在基岩中达到峰值,3 根试桩在基岩处的最大摩阻力分别为 136.2、144.6、141.3 kPa。

各土层桩侧摩阻力随桩顶荷载增加而变化的曲线如图 8 所示,试桩 S1—S3 在距离桩顶 0.7~7.2 m 范围内,桩侧摩阻力较小;从图 7 也可以明显看出,由于这段土层为淤泥土和粉质黏土,淤泥流动性很大,

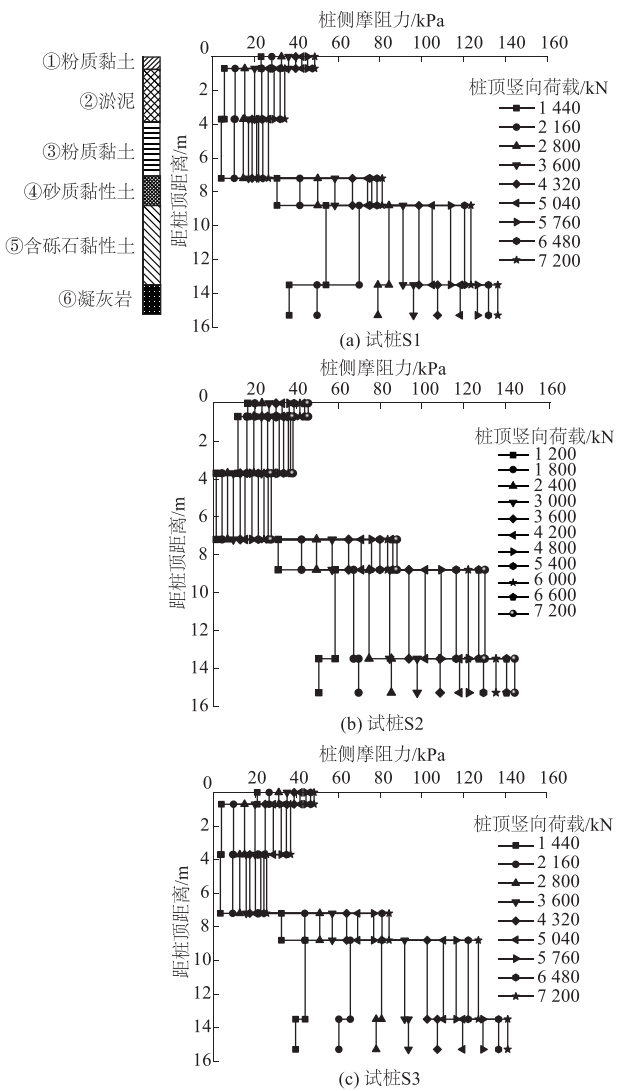


图7 桩侧摩阻力分布

Fig. 7 Distribution of pile's side frictional resistance

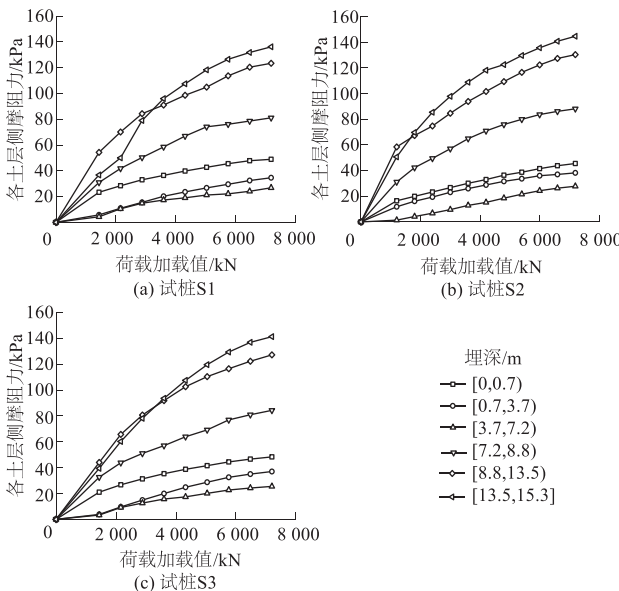


图8 试桩各土层桩侧摩阻力分布

Fig. 8 Distribution of side frictional resistance of each soil layer of the test pile

粉质黏土为软塑-可塑状,承载力较小,对桩身产生的摩阻力也较小。每土层桩侧摩阻力随着荷载的增加变化比较平缓,没有明显转折点,变化速率逐渐减小,最后趋于稳定,说明桩侧摩阻力是逐渐发挥作用的,到最后桩侧摩阻力发挥完全,桩端阻力开始发挥。

最大荷载作用下 3 根桩各土层的桩侧摩阻力相差不大,说明试验具有可靠性,试验平均值与规范^[24]推荐参数的比较如图 9 所示。

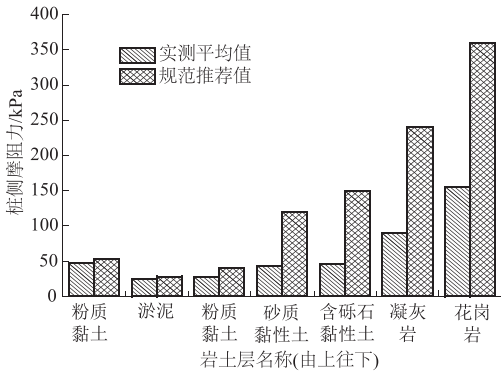


图 9 桩侧摩阻力对比
Fig. 9 Comparison of pile's side frictional resistance

由图 9 可得,除了淤泥层实测值比推荐值大之外,其他各土层的实测值均比经验值小。究其原因,一方面是考虑勘察时由于一些外界因素,导致淤泥层勘察不准确;另一方面是对于该地区的淤泥层来说规范过于保守。除了淤泥层,其它层的侧摩阻力为经验值的 0.6~0.9 倍,其主要原因是本试验并没有加载到极限荷载以致于侧摩阻力没有达到规范^[24]中的极限侧摩阻力。另外,本试验中,中风化凝灰岩侧摩阻力平均值为 140.7 kPa,而文献[25]中推荐的中风化凝灰岩桩侧摩阻力特征值为 100 kPa,说明岩石的区域差异性对嵌岩段侧摩阻力有一定的影响,这种影响因素应该在桩基础设计、施工过程中予以重视。

4.5 桩端阻力分布规律

因 3 根试桩距桩端有 0.2~0.8 m 不等的距离未安装传感器,为计算准确,此段的轴力和桩侧摩阻力近似等于所测得的最大桩身轴力和桩侧摩阻力,桩端轴力为此段桩身轴力和桩侧摩阻力之差,根据轴力计算得到桩端阻力,绘制桩端阻力与荷载加载值关系曲线如图 10 所示。

由图 10 可得,桩端阻力随桩顶荷载的增加而增大,且其增长速率也不断变大。当试桩 S1—S3 的桩顶荷载增大到 3 600 kN 时,荷载加载值和桩端阻力基本呈线性关系,此时试桩 S1—S3 的曲线斜率基本一致,相差不超过 18%,总体呈增加的趋势,说明桩端阻力逐渐发挥,随着荷载增大其增量逐渐增大,而桩侧

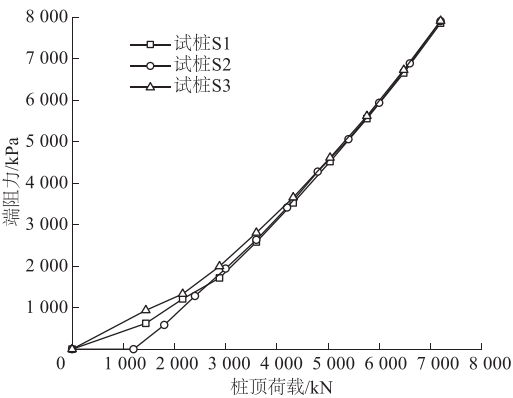


图 10 各试桩端阻力与荷载加载值关系曲线
Fig. 10 Relation between end resistance of each test pile and load

摩阻力的增量随着荷载增大呈减小的趋势。当荷载加载值最大时,端阻力达到最大值,且 3 根桩的最大端阻力基本相同。本试验中在最大荷载作用下,桩端阻力平均值为 7 886.3 kPa,与文献[25]推荐的中风化凝灰岩桩端阻力极限值相比提高约 12.7%,可见岩石区域差异性对桩端阻力也有一定的差异性。

由于桩端阻力由桩身轴力、桩侧摩阻力以及桩截面积计算得到,侧摩阻力对桩端阻力的影响较大,同级荷载侧摩阻力越大,桩端阻力越小。试桩 S1—S3 当荷载较小时,端阻力占比较小,荷载主要由桩侧摩阻力分担,表现出端承摩擦桩的性状;随着荷载的增大,端阻力逐渐发挥主要作用,极限荷载作用下,端阻力的占比分别为 54.78%,55.13%,55.17%,桩顶荷载主要由端阻力承担,表现出摩擦端承桩的性状,各试桩荷载分担比例如表 7 所示。

表 7 各试桩荷载分担比例
Table 7 Load sharing ratio of each test pile

试桩	加载值/kN	荷载分担比例/%		
		Q_d/Q	Q_{sz}/Q	Q_s/Q
S1	1 440(初始)	21.70	78.30	11.52
	7 200(最终)	54.78	45.22	8.55
S2	1 200(初始)	0.04	99.96	19.07
	7 200(最终)	55.17	44.83	9.08
S3	1 440(初始)	32.73	67.27	12.37
	7 200(最终)	55.13	44.87	8.87

注: Q_d 为端阻力, Q 为桩顶荷载, Q_{sz} 为总侧摩阻力, Q_s 为嵌岩段桩侧摩阻力。

从表 7 可知,随着荷载增大,端阻力的占比逐渐增大,嵌岩段的桩侧摩阻力占比逐渐减小。当荷载较小时,桩顶荷载主要由侧摩阻力承担,随着荷载增加,端阻逐渐发挥作用,并承担主要荷载。还可以分析得到,试桩 S2 的初始荷载小于其他 2 根桩的初始荷载,在此荷载作用下,端阻力的占比小于桩侧摩阻力的占比,且接近于 0,说明荷载较小时,桩端阻力基本未发挥,这与前面分析的结果一致。

5 结 论

本工程中试桩的桩端持力层为中风化凝灰岩,试验过程中,单桩竖向抗压静载试验与桩身应力测试同时进行,分别对单桩承载力、桩身轴力、桩侧摩阻力以及桩端阻力进行了研究。研究结果表明:

(1)各试桩的 Q - s 曲线均为缓变型,随着荷载的增加沉降逐渐增大,沉降量均 $<17\text{ mm}$,回弹率较大,残余沉降较小,最大加载值为设计极限承载力;3 根试桩均未发生破坏,试桩的承载力还有较大潜力,经预测试桩 S1—S3 还有 29%~52.1% 的潜力可以发挥。

(2)同一级荷载作用下,桩身轴力随埋深的增加逐渐减小,且减小的速率逐渐增大;同一深度处,随桩顶荷载的增大桩身轴力逐渐增加,在基岩处荷载减小速率最大,说明侧摩阻力发挥充分。

(3)桩侧摩阻力的发挥具有异步性,随着荷载的增大,桩侧摩阻力逐渐发挥,3 根试桩在中风化凝灰岩处的最大侧摩阻力介于 136.2~144.6 kPa 之间。各土层桩侧摩阻力随着桩顶荷载增大逐渐增大,且变化较平缓,最后趋于稳定。

(4)桩端阻力随桩顶荷载增加逐渐增大,当荷载较小时,桩端阻力趋于 0,桩侧摩阻力发挥主要作用;当 S1—S3 加载到 3 600 kN 时,其桩端阻力与桩顶荷载基本呈线性关系;当施加到最大荷载时,桩端阻力达到最大值,试桩 S1—S3 的最大端阻力占比超过 50%,表现出较好的摩擦端承桩的特性。

综上所述,嵌岩灌注桩具有承载力高、沉降小等特点,在印尼地区具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] ALAVI A H, SADROSSADAT E. New Design Equations for Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations Resting on Rock Masses [J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(1): 91-99.

[2] KULKARNI R U, DEWAIKAR D M. A Numerical Approach to Assess the Capacity of Rock-socketed Piles Subjected to Axial Compression in Mumbai Region Based on the Pile Load Test Data [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 11(5): 441-451.

[3] 柯 洪, 吴 翔, 王继华, 等. 天津厚土层超长钻孔灌注桩单桩承载特性研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2821-2826.

[4] 张 琦, 刘 军, 戴国亮, 等. 大直径嵌岩桩桩端极限承载力计算方法 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(1): 118-124.

[5] RADHAKRISHNAN R, LEUNG C F. Load Transfer Behavior of Rock-socketed Piles [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(6): 755-768.

[6] CARRUBBA P. Skin Friction on Large-diameter Piles Socketed into Rock [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(2): 230-240.

[7] ARMAGHANI D J, RAJA R S N S B, FAIZI K, *et al.* Developing a Hybrid PSO-ANN Model for Estimating the Ultimate Bearing Capacity of Rock-socketed Piles [J]. *Neural Computing and Applications*, 2017, 28(2): 391-405.

[8] 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.

[9] 王卫东, 吴江斌, 聂书博. 武汉绿地中心大厦大直径嵌岩桩现场试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 1945-1954.

[10] 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.

[11] 白晓宇, 张明义, 朱 磊, 等. 强风化花岗岩中嵌岩短桩承载特征原位试验与有限元分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(2): 512-524.

[12] JGJ 106—2014, 建筑基桩检测技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[13] XING H, ZHANG Z, MENG M, *et al.* Centrifuge Tests of Superlarge-diameter Rock-socketed Piles and Their Bearing Characteristics [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(6): 1-10.

[14] 陈 筠, 王鹏程, 季永新, 等. 较破碎岩体中桩基竖向承载力分析与探讨 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(10): 98-101.

[15] YU R. The Bearing Characteristics of Large Diameter Rock Socketed Pile [J]. *International Journal of Intelligent Information and Management Science*, 2015, 4(3): 34-35.

[16] 陈小钰, 张明义, 白晓宇, 等. 深厚回填土中嵌岩灌注桩承载性状现场试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(7): 1799-1807.

[17] 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.

[18] 苗德滋, 张明义, 白晓宇. 大直径泥浆护壁嵌岩灌注桩承载特征性现场试验 [J]. *工程建设*, 2018, 50(4): 6-10.

[19] 邓志勇, 陆培毅. 几种单桩竖向极限承载力预测模型的对比分析 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(4): 428-431.

[20] 俞宗卫, 许 魁, 李 桢. 几种单桩极限承载力预测模型的验证分析 [J]. *工业建筑*, 2007, 37(8): 64-67.

[21] 俞 峰, 张忠苗. 混凝土开口管桩竖向承载力的经验参数法设计模型 [J]. *土木工程学报*, 2011, 44(7): 100-110.

[22] 白晓宇, 张明义, 寇海磊, 等. 基于 BP 神经网络的静压桩承载力时间效应预测 [J]. *工程勘察*, 2014, 42(4): 7-11.

[23] KOU H, GUO W, ZHANG M, *et al.* Axial Resistance of Long Rock-socketed Bored Piles in Stratified Soils [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 114(3): 58-65.

[24] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[25] 邵明成, 喻祖洪. 钻孔扩底灌注桩在杭州地区的应用 [J]. *城市勘测*, 2009(2): 147-149.