

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.011



# 人工挖孔嵌岩灌注桩承载特性 现场试验与机理分析

陈小钰<sup>a</sup>, 张明义<sup>a, b</sup>, 白晓宇<sup>a, b</sup>

(青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛, 266033)

**摘要:**以青岛市某大型工程为依托,对在泥质粉砂岩地基中的 5 根人工挖孔嵌岩灌注桩分别进行竖向静载荷试验与桩身内力测试。根据大直径嵌岩桩实测数据探讨大直径人工挖孔嵌岩灌注桩的荷载传递机理与竖向承载特性。试验结果表明:试桩荷载-沉降(Q-s)曲线为缓变形,桩顶沉降量均小于 11 mm,卸载回弹率大,幅度为 51%~75%,承载力较高,5 根试桩均满足设计要求;在最大荷载下,5 根嵌岩桩桩端阻力所占桩顶荷载比值均在 10%~20%之间,随桩长、嵌岩深度(中风化)增大而减小,表现出端承摩擦桩的特性;桩身荷载自上而下逐步发挥,上覆土层先达到侧摩阻力极限值,在嵌岩段中部侧摩阻力达到峰值;桩入岩越深,安全储备量越大,在泥质粉砂岩中风化段,实测侧摩阻力约为规范推荐值的 2.5 倍,说明 5 根桩有较大的承载潜力;随着荷载的增大,嵌岩段分担的总阻力由 39%上升至 45%,嵌岩段侧摩阻力占主要比重,但桩端阻力分担荷载的比例上升速率较快;根据行业标准与静载试验数据,重新认识该地层人工挖孔嵌岩灌注桩的竖向承载特性,充分发挥其承载潜力,对工程桩桩身尺寸进行优化,达到节约材料和提高施工功效的目的,具有较好的经济效益。

**关键词:**挖孔桩;泥质粉砂岩;桩身应力;桩侧摩阻力;桩身优化

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0079-08

## Field test and mechanism analysis of bearing capacity characteristics of manual digging rock-socketed filling piles

Chen Xiaoyu<sup>a</sup>, Zhang Mingyi<sup>a, b</sup>, Bai Xiaoyu<sup>a, b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:**Based on an important project at Qingdao, vertical static load test and the pile shaft stress test were conducted on five manual hole digging and pilling piles installed into argillaceous siltstone. The load transfer mechanism and vertical load bearing capacity of the large-diameter rock-socketed piles were

**收稿日期:**2017-03-28

**基金项目:**国家自然科学基金(51078196);山东省自然科学基金(ZR2016EEQ08);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)

**作者简介:**陈小钰(1993-),女,主要从事地基基础研究,(E-mail)437522912@qq.com。

白晓宇(通信作者),男,博士,(E-mail)baixiaoyu538@163.com。

**Received:**2017-03-28

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 51078196); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEQ08); Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (No. J16LG02); Applied Basic Research Programs of Qingdao (No. 16-5-1-39-jch)

**Author brief:**Chen Xiaoyu(1993-), main research interest; foundation, (E-mail)437522912@qq.com.

Bai Xiaoyu(corresponding author), PhD, (E-mail)baixiaoyu538@163.com.

discussed through the measured data. The test results showed that the load-displacement of five test piles was slow type, with the pile sedimentation less than 11 mm and larger unloading resilience ranging from 51%~75%, and all the piles had high bearing capacity which could meet the design requirements. Under the ultimate load, the proportion of head load transmitted and supported by the shaft base was between 10%~20% and decreased along with the increase of the shaft length and socked length (socketed into medium weather part), which showed the characteristic of end-support friction pile. The load of the shaft gradually worked from the top to the toe, and the soil side friction reached its ultimate value at first, while the peak side friction located at the medium of the socked length. The deeper of the socked length, the more safety stock of the pile, and the measured side friction was 2.5 times of the recommendation at the medium weathering rock. The percentage of the socked part supporting the total loading increased from 39% to 45% along with the increasing applied load, and the side friction of the socked part played an important role while the end resistance possessed a quick growth ratio. Based on the standard and data of static load test, vertical bearing capacity of the manual hole digging pile was refreshed, and the pile size was optimized in order to save the materials and improve the effectiveness of the construction, leading to the great economic benefits.

**Keywords:** hole digging pile; argillaceous siltstone; static compression load; shaft friction; pile optimization

人工挖孔桩最早于 1983 年在美国温哥华问世, 具有施工成本低, 影响范围小, 承载力大等优点, 一般直径大于 800 mm<sup>[1]</sup>。随着近年中国经济的发展, 人工挖孔桩被广泛运用于江苏、江西、山东半岛等地的重点高层建筑、大型桥梁以及码头工程中; 同时, 人工挖孔桩的广泛应用也吸引众多学者关注。柳春<sup>[2]</sup>收集福州市 300 根以软弱土层作为持力层的人工挖孔灌注桩, 给出其承载力计算公式以及当地常用土层的极限端阻力标准值; 蔡来炳等<sup>[3]</sup>根据现场试验数据, 分析了花岗岩残积土对人工挖孔桩承载力的影响, 指出以花岗岩残积土为持力层的人工挖孔桩, 单桩承载力主要取决于桩端承载力; 何现启等<sup>[4]</sup>使用模糊综合法对影响灰岩地区人工挖孔桩施工安全各因素进行多层次综合评价; 曹贤发<sup>[5]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立人工挖孔施工过程中桩间土失稳力学模型, 并探讨了各主要因素对桩间土稳定性的影响规律; 余海见等<sup>[6]</sup>通过 ANSYS 分析了人工挖孔桩护壁结构对桩竖向承载力贡献的影响, 在给定工况条件下, 按承载力控制时, 分段式护壁结构对桩竖向承载力的贡献可高达 20%。已有研究从承载性能、施工技术等不同角度对人工挖孔桩进行了分析与研究, 但对于嵌岩深度(全风化)大于 10 m 的人工挖孔桩鲜有研究。另外, 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[7]</sup>中取干作业钻孔作用下的侧阻极限值来估算人工挖孔桩侧阻力极限值, 与实际工况不符。设计人员过低评估桩身侧摩阻力, 造成桩身尺寸过大, 从而引起不必要的财力与物力成本。鉴

于此, 为深入研究人工挖孔嵌岩桩的受力特性与荷载传递机制, 根据青岛某大型工程中 5 根大直径人工挖孔嵌岩灌注桩静载试验与桩身内力测试结果, 分析深厚泥质粉砂岩中人工挖孔灌注桩的受力特性。

## 1 试验概况

### 1.1 工程概况

青岛某大型工程位于胶州市胶东镇, 大沽河西岸地区, 土层±0 绝对高程约 10.0 m, 拟采用框架结构体系, 基础采用大直径人工挖孔嵌岩灌注桩, 试验桩 5 根, 桩径 1.0 m, 桩长介于 12~13 m 之间, 混凝土强度等级为 C30, 桩端持力层为中等风化泥质粉砂岩, 各试桩参数如表 1 所示。

表 1 试桩参数

Table 1 Parameters of testing piles

桩号	桩长/m	土层厚度/m	全风化段长度/m	强风化段长度/m	中风化段长度/m
P1	12.0	2.5	3.0	4.0	2.5
P2	12.8	2.9	3.4	3.5	3.0
P3	12.5	2.3	2.8	4.2	3.2
P4	12.5	2.6	3.6	3.1	3.3
P5	13.5	2.6	2.8	4.0	4.1

### 1.2 场地水文地质与工程地质条件

场区地形整体较平坦, 地貌属河流洪冲积平原, 后经人工回填改造。场区土层主要由第四系全新统

人工填土层、洪冲积层组成,场区基岩埋深较浅,基岩面整体较平缓,基岩软硬不均,主要为白垩系王氏群红土崖组泥质粉砂岩。地下水形态类型主要是上层滞水和基岩裂隙水,实测钻孔内水位标高为 4.94~9.77 m,场区地下水主要受大气降水补给,受季节影响,地下水位年变幅 1~2 m。按地层渗透性,场区地下水对混凝土结构具有弱腐蚀性,属 II 类环境类型。工程共揭示了 5 个标准层,1 个亚层,按自上而下,由新到老的顺序将各土层分布特征与其物理力学性质分述如表 2,其中  $f_{ak}$  由静载荷试验测得, $c_k$ 、 $\varphi_k$  为室内剪切试验取得。

表 2 岩土参数

Table 2 Parameters of rock and soil

层号	岩土层名	$f_{ak}/$ kPa	$E/MPa$	$\gamma /$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	$c_k/kPa$	$\varphi_k/(^\circ)$
①	耕植土			18		* 15
① <sub>1</sub>	杂填土			18		* 18
⑦	粉质黏土	180	6.80/ $E_s$	19.2	32.4	13.5
⑮	全风化段	210	7.32/ $E_s$	19.4	38.2	16.2
⑯	强风化段	360	20/ $E_0$	22		* 35
⑰	中风化段	1 000	40/ $E_0$	24	1 012	39.3

注: $f_{ak}$ 为地基承载力特征值,kPa; $E_s$ 为压缩模量,MPa; $E_0$ 为变形模量,MPa; $\gamma$ 为天然重度; $c_k$ 为黏聚力; $\varphi_k$ 为内摩擦角(\*为等效内摩擦角)。

场区地下水位较浅,一般在粉质黏土层与填土层之间;泥质粉砂岩中风化带稳定性相对较强,是很好的桩端持力层,由于其下覆厚度较大,按桩基考虑,桩端持力层以下地基可视为均匀性地基;填土层、黏土层与泥质粉砂岩全、强风化段均有不同程度的弱膨胀性,呈不连续层状或团状分布;桩身自重较小,可忽略不计。

## 2 试验方案

选取场地共 5 根试桩进行竖向承载性能研究,经桩身低应变检测后,5 根试桩与锚桩桩身结构均完整,属 I 类桩。在此基础上,桩身内力测试与单桩静载试验同时进行。

### 2.1 静载荷试验

静载荷试验最大加载量应大于设计单桩抗压承载力特征值的 2 倍<sup>[8]</sup>,P1、P2、P4 试桩最大加载量为 12 600 kN,P3、P5 为 10 800 kN,5 根试桩加载到最大荷载时均未产生明显破坏。

试验采用锚桩-反力梁体系加载,4 根锚桩与反

力梁连接,使用 4 台 500 t 的千斤顶配合高压油泵同步加载,合力中心与试桩轴线重合。施加的荷载通过安装在千斤顶上的荷重传感器进行量测,桩顶位移通过安装在桩顶的 4 个位移传感器量测。静载试验采用慢速维持荷载法,每级加载量为 1 080 kN,首次施加两级荷载,以后每级加载 1 080 kN,试验过程中加载与补载均自动完成。测读时间、终止试验条件以及试桩极限承载力的确定均按《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014)<sup>[8]</sup>执行。

锚桩施工工艺与试验桩相同,锚桩为人工挖孔扩底桩,锚桩中心与试验桩中心的距离为 4.0 m,锚桩提供的反力大于预估最大加载值的 1.5 倍,锚桩参数见表 3。静载试验加载系统立面图见图 1、图 2。

表 3 锚桩参数表

Table 3 Parameters of anchor pile

桩身直径/m	扩底直径/m	嵌入中风化岩深度/m	单桩竖向抗拔极限承载力标准值/kN	桩身混凝土强度等级
1.0	2.0	1.3	4 050	C30



图 1 加载系统现场图

Fig. 1 Field view of loading system

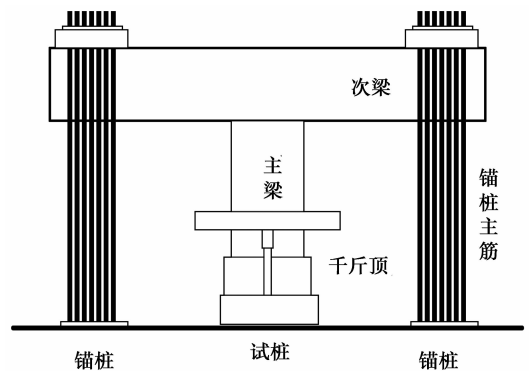


图 2 加载系统立面示意图

Fig. 2 Sectional sketch of loading system

### 2.2 桩身内力监测

为提高试验精准性与可操作性,5 根试桩在相

同位置布设 JTM-V1000 型振弦式钢筋应力计和 XB-150 型振弦式土压力计。每根试桩安装 6 组钢筋应力计与 2 个土压力计,钢筋应力计布设分布如图 3,每一截面 4 个钢筋应力计呈  $90^\circ$  安装。每根试桩共 24 个钢筋应力计,钢筋应力计在安装时采用同轴搭接焊。在每级加载前后记录钢筋应力计频率值,进一步求得加载过程中的桩身轴力、桩侧摩阻力与桩端阻力。钢筋应力计安装现场如图 4 所示。

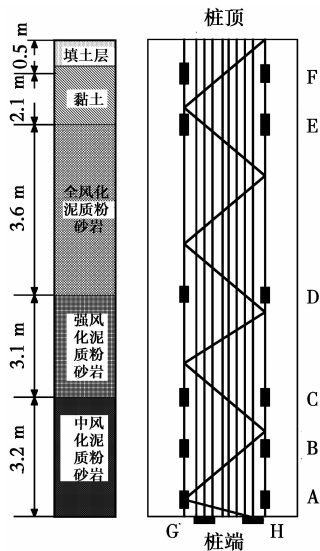


图 3 钢筋应力计安装位置示意图

Fig. 3 Profile of steel gauges layout of testing piles



图 4 钢筋应力计安装现场图

Fig. 4 Field view of reinforced bar

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 $Q-s$ 曲线分析

$Q-s$  曲线从宏观上表现了荷载传递性状、桩土相互作用以及桩受荷载破坏模式,因此,对  $Q-s$  曲线分析有助于对桩身竖向承载力的分析<sup>[9-12]</sup>。试验区 5 根试桩  $Q-s$  曲线如图 5 所示,各试桩的最大加载值,桩顶沉降相关数据见表 4。

表 4 试桩抗压静载结果

Table 4 Results of compressive static load tests

桩号	最大加载量/kN	桩顶沉降/mm	回弹量/mm	残余沉降/mm	回弹率/%
P1	12 600	9.2	5.32	3.9	57.8
P2	12 600	6.07	4.57	1.5	75.3
P3	10 800	8.86	4.52	4.3	51.5
P4	12 600	6.21	4.21	2.0	67.8
P5	10 800	10.31	5.72	4.6	55.5

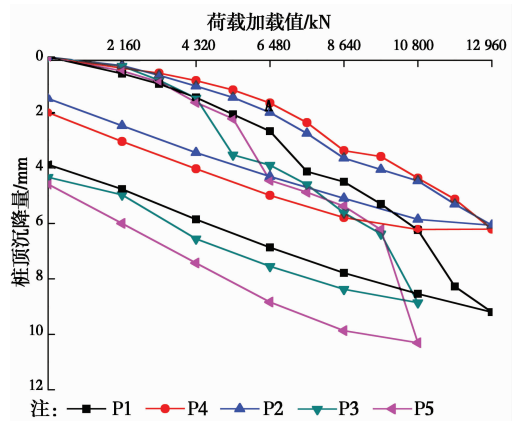


图 5 试桩  $Q-s$  曲线

Fig. 5  $Q-s$  curves of testing piles

从表 4 及图 5 可以看出,在各级荷载作用下,5 根试桩沉降均较小,最大仅为 10.31 mm,嵌岩桩承载性能较好;残余变形小,残余沉降介于 1.5~4.6 mm 之间,卸载回弹率大,幅度为 51%~75%,桩的弹性工作特性较明显,并具有一定的压缩性。5 根试桩的  $Q-s$  曲线为缓慢型,在整个加载过程中,无陡降段,随着荷载的增大沉降速率基本保持不变,总沉降量较小,在 6.07~10.31 mm 之间,为典型的抗压静载试验曲线,说明即使嵌入软岩地基,嵌岩桩的承载力依然较高。吕福庆<sup>[13]</sup>等根据 19 个工程 71 根嵌岩桩静载试验的实测资料将嵌岩桩沉降曲线分为 3 个区域,其中 1 区为挖孔嵌岩桩  $Q-s$  曲线分布区,当桩达到设计要求的荷载时,沉降量一般不超过 25 mm。这与试验中人工挖孔嵌岩桩沉降量较小一致。

5 根试桩中 P3、P4 的长径比均为 12.5, P1、P2、P5 的长径比分别为 12、12.8、13。5 根试桩桩顶最大沉降差距约为 5 mm,最大沉降量为最小沉降量的 1.7 倍,在桩顶沉降量为 4 mm 时, P4 桩的竖向承载力为 10 800 kN,而 P5 试桩仅为 7 540 kN。即使是在相同的场地条件下,相同的长径比、荷载施加值,相同的试验方法,也很难取得完全一致的试验结果,因为成桩质量是有差别的。



### 3.2 桩身轴力分布规律

设试桩截面上下轴向应力相同,根据应力计读数以及桩身相对弹性模量可求桩身不同截面处桩身轴力<sup>[14]</sup>。由于在每级荷载作用下,轴力分布曲线较为接近,仅给出部分试桩(P3 试桩)的轴力分布曲线,如图 6 所示。可以看出,在特定荷载作用下,轴力分布沿桩身逐渐递减,桩身轴力从上而下依次发挥,且轴力分布斜率逐渐减小,在基岩中部达到最小,说明随桩身埋深深度的增加,桩侧摩阻力逐渐增大;在特定土层中,轴力分布曲线斜率随着上部垂直荷载的增大不断减小,且在基岩层内斜率降低幅度最大,说明随荷载增加,各地层侧摩阻力被不断发挥出来,基岩层侧摩阻力增幅最大。

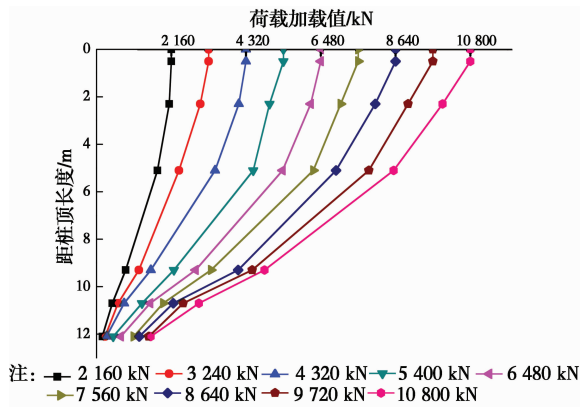


图 6 P3 试桩轴力分布图  
Fig. 6 Load distribution of P3 pile

### 3.3 桩身侧摩阻力分布规律

设桩侧摩阻力沿桩身均匀分布,由轴力与桩身实际尺寸计算而得桩体各截面处侧摩阻力,如图 7 所示。桩体侧摩阻力发挥受土层性质以及土层埋深的影响,从上而下异步发挥。最大荷载作用下,侧摩阻力随桩长埋深增大而不断增加且在嵌岩段达到峰值。嵌岩段中部侧摩阻力高达 450~500 kPa,而靠近桩端侧摩阻力并未完全发挥,仅为 280~340 kPa,说明即使在地层深度(3.0 m)较小的情况下,侧摩阻力也存在差异,建议规范考虑埋深对侧摩阻力发挥的影响效应。

各地层桩侧摩阻力随桩顶荷载等级变化曲线如图 8 所示。在最大荷载下,嵌岩段侧摩阻力明显大于土层,且在分级荷载下,嵌岩段侧阻力增大幅度远大于土层。在上覆土层段,试桩均存在明显的转折点;对于埋深 2.6 m 处土层,其侧摩阻力在加载之初已基本接近极限值,约为 150 kPa,后随荷载增大表现为平缓趋势;在埋深 6.1 m 处土层,约在第 7 级荷

载下达极限值,约为 150 kPa;而对于更深土层,侧摩阻力值无明显转折点,说明仅上部土层充分发挥其侧摩阻力,桩身还有很大承载潜力可挖。

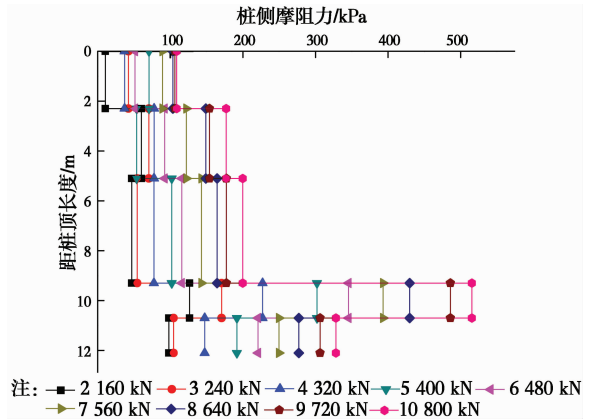


图 7 P3 试桩侧摩阻力分布图  
Fig. 7 side friction distribution of P3 pile

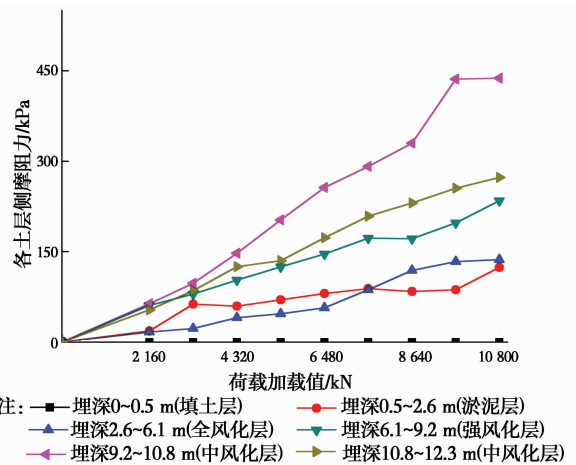


图 8 P3 试桩各层侧摩阻力分布图  
Fig. 8 Mobilization of local side friction on P3 pile

最大加载时的桩周各土层侧摩阻力实测值与推荐值如表 5 所示。5 根试桩各土层侧摩阻力差别不大,证明试验的可行性以及试验数据的可靠性。在最大加载作用下,桩周各土层侧摩阻力实测值均大于勘察报告推荐值,且随着桩入土深度的增加,增强系数不断增大,在桩端持力层,中等风化段侧摩阻力为勘察推荐值的 2.5 倍。究其原因,桩顶荷载并未达到荷载极限值,桩身侧摩阻力从上而下依次发挥,埋深越大,桩侧摩阻力越不能充分发挥。另外,即使侧摩阻力充分发挥,现行桩基技术规范<sup>[7]</sup>取干作业钻孔条件下的侧摩阻力值为人工挖孔桩取值依据,但人工挖孔桩中的护壁与端承作用,能有效增大桩土接触面积及桩土界面粗糙度,从而增大侧摩阻力,且增强应力随埋深增加不断增大<sup>[6, 15]</sup>。根据规范<sup>[7]</sup>确定 P3、P5 根桩的试验竖向抗压极限承载力均不

低于 10 800 kN, 竖向抗压极限承载特征值不低于 5 400 kN, P1、P2、P4 根桩的试验竖向抗压极限承载力均不低于 12 600 kN, 竖向抗压极限承载特征值不

低于 6 300 kN。5 根试桩平均承载力值小于 30%, 故极限承载力极限值为 11 800 kN。

表 5 各土层侧摩阻力实测值与推荐值对比

Table 5 Comparison between standard values of pile side friction and measured values under the max load

土层	P1/kPa	P2/kPa	P3/kPa	P4/kPa	P5/kPa	平均值/ kPa	规范推荐 值/kPa	增强系数
粉质黏土	88	108	112	97	93	98	60	1.6
泥质粉砂岩全风化	101	123	154	134	183	139	80	1.7
泥质粉砂岩强风化	339	266	312	325	104	270	140	1.9
泥质粉砂岩中风化	454	590	375	412	404	447	180	2.5

### 3.4 嵌岩段阻力分析

根据置于桩底的两个量程为 6 MPa 的土压力盒计算桩端阻力值。桩端阻力与桩长和嵌岩比(中风化)的关系见图 9、图 10, 桩端阻力标准值与推荐值对比见表 6。

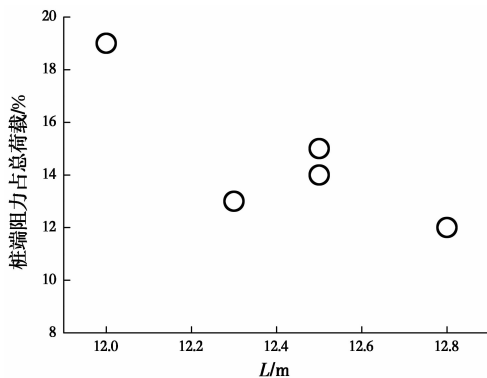


图 9 桩端阻力随桩长变化

Fig. 9 Variation of tip resistance with the length of piles

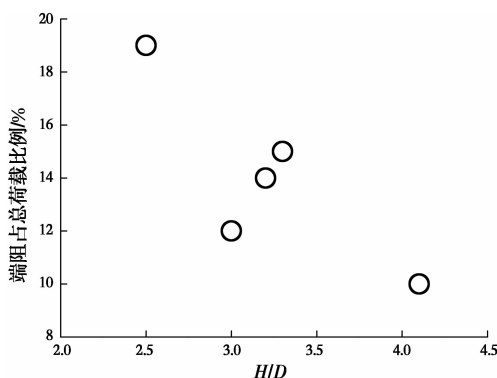


图 10 桩端阻力随嵌岩比变化

Fig. 10 Variation of tip resistance with embedded depth

表 6 桩端阻力实测值与推荐值对比

Table 6 The comparison between measured values and recommended values of tip resistance

P1	P2	P3	P4	P5	实测 平均值	规范 推荐
3 113	1 941	1 991	2 450	1 451	2 189	6 000

由图 9、10 可知, 在最大加载下, 5 根人工挖孔嵌岩灌注桩实测端桩阻力所分担桩顶荷载比例( $Q_b/Q$ )在 10%~20% 之间, 随着桩身长度增加而减弱, 随桩体嵌岩(中风化)深度增大而降低, 5 根桩均表现出端摩擦桩的性状, 说明其单桩竖向承载力大部分由桩侧摩阻力提供, 这与已有的研究成果一致<sup>[16-17]</sup>。但如果在极限加载条件下, 情形会有所变化, 桩端会承受更多的上部荷载。由表 6 可以看出, 在最大加载下, 5 根试桩桩端阻力实际发挥值远小于勘察推荐值, 说明试桩仍有较大承载潜力可挖。其中 P5 桩由于其较大的嵌岩比(4.1), 端阻发挥值最小, 仅为规范值的 24%。

表 7 试桩平均荷载分担比例

Table 7 Average percentage of shaft and base resistance supporting total load of test piles

加载值	$(Q_r/Q)/\%$	$(Q_b/Q)/\%$	$(Q_s/Q)/\%$	$(Q_b/Q_{br})/\%$	$(Q_r/Q_{br})/\%$	$S_t/\text{mm}$
初始加载 (2 160 kN)	31	7.6	61.4	19	81	0.43
设计标准值 (5 400 kN)	33	8.9	57	21	79	2.1
最大荷载	35	14	55	28	72	8

注:  $Q$  为桩顶荷载;  $Q_s$  为各土层总阻力;  $Q_{br}$  为嵌岩段总阻力;  $Q_r$  为嵌岩段侧摩阻力;  $Q_b$  为端阻力;  $S_t$  为桩顶位移。

由表 7 可知, 随着荷载的增大, 土层分担荷载比例呈下降趋势, 但下降幅度较小, 约为 10% 左右。相对应, 嵌岩段总阻力分担比例呈上升趋势, 其中, 嵌岩段侧摩阻力与端阻阻力均随荷载表现出增长趋势, 增长幅度分别为 13%、50%; 虽嵌岩段侧摩阻力在端阻力中占主要比例, 但增幅较小; 端阻力占嵌岩段总阻力比值较小, 介于 19%~28% 之间, 但增长较大, 幅度约为 47%。说明嵌岩段中侧摩阻力提供主要阻力, 但端阻占比增长较快。

在设计标准值荷载(5 400 kN)下, 端阻分担比例

不足10%,且桩顶平均位移约为2.1 mm,远小于规范最大位移值(40 mm)以及0.05 D,说明在设计标准值荷载下,5根试桩基本无变形,有很大的承载潜力。

## 4 讨论

对于人工挖孔嵌岩灌注桩,过大的嵌岩深度与桩身直径均会造成施工难度的增大以及施工成本的增加,因此,应当结合勘察报告与静载荷试验数据对桩身尺寸进行优化,以便达到最大性价比。

通过上述分析可知,5根试桩仍有很大的承载潜力,试桩设计参数过于保守。分析原因,一方面,勘察报告中土层极限侧摩阻力取值过低,以干作业钻孔桩作为取值依据,忽略人工挖孔桩中的端承护壁作用;另一方面,施工过程中,由于施工技术的局限性,桩身直径、嵌岩深度、桩身质量等因素无法完全控制。

龚成中等<sup>[18]</sup>、张建新等<sup>[19]</sup>讨论桩身尺寸对侧摩阻力发挥的影响得出以下结论:1)对于大直径桩( $D \geq 800$ )随着桩直径的增大,桩侧摩阻力值减小;2)随着嵌岩深度的增大,桩侧摩阻力值减小。据此减小桩身尺寸不会对侧摩阻力产生消极影响。

考虑施工难易程度以及行业现行标准,对桩身直径分别取800、600 mm进行桩竖向极限承载力验算。其中,桩各层侧摩阻力取静载试验实测侧摩阻力值。不同直径下的桩竖向承载力极限值见表8。

表8 不同直径桩竖向承载力极限值对比

Table 8 Comparison of vertical ultimate capacity of piles in different diameters

桩型	设计标准值/kN	φ800 极限值/kN	增强系数	φ600 极限值/kN	增强系数
P1	5 404	9 531	1.76	5 995	1.11
P2	5 404	9 324	1.73	5 016	0.93
P3	5 404	10 286	1.9	6 934	1.28
P4	5 404	9 682	1.79	6 483	1.20
P5	5 404	8 608	1.59	5 515	1.02

由表8可以看出,当桩直径为800 mm时,5根试桩的极限承载值均满足设计要求,极限承载力增强系数在1.59~1.9之间,有一定的安全储备。而当直径为600 mm时,其极限承载力增强系数在0.93~1.28之间,P2、P5试桩承载力略低,不能完全满足设计承载力要求。故综合考虑取800 mm作为工程桩直径。

直径800 mm的人工挖孔试桩中,每根桩的混凝土方量为31 m<sup>3</sup>,约73.5 t。与直径1 000 mm的等长度挖孔桩相比,采用直径800 mm的挖孔桩,可

节省21%混凝土量及18%的人工挖土方量。

按青岛当地材料单价以及劳动力成本价格估算,C30混凝土单价取300元/m<sup>3</sup>,人工挖土方量单价取260元/m<sup>3</sup>。本工程共计约1 000根人工挖孔灌注桩,若均采用直径800 mm挖孔桩代替直径1 000 mm桩,将节省450万元成本,经济效益显著。混凝土及挖土方量节省量及成本节省量如表9、表10所示。

表9 不同直径单桩混凝土及挖土方量

Table 9 Volume of concrete under different pile diameters

单桩直径/mm	混凝土方量/m <sup>3</sup>	人工挖土方量/m <sup>3</sup>
1 000	39	28
800	31	23

表10 800 mm直径单桩节约成本

Table 9 Cost saving using 800 mm diameter pile

混凝土方量节约比/%	人工挖孔方量节约比/%	单桩节约成本/万元	1 000根桩节约成本/万元
21	18	0.45	450

## 5 结论

1)试桩荷载-沉降(Q-s)曲线为缓变形,桩顶沉降量均小于11 mm,桩顶卸载回弹率较大,幅度为51%~75%。即使在相同的施工条件以及相同的桩身参数下,成桩质量也有一定的差别。

2)5根试桩均满足设计要求,且有较大的承载潜力,说明人工挖孔成桩工艺可行。实测侧摩阻力值均大于勘察报告推荐值,在中等风化段,实测桩身侧摩阻力值为447 kN,为勘察推荐值的2.5倍。

3)在最大加载条件下,5根桩桩端阻力承担上部荷载比值均在10%~20%之间,表现出端承摩擦桩的特性。桩身轴力自上而下逐步发挥,侧摩阻力在嵌岩段中部达最大值,端阻分担荷载随桩长增大而减弱,随嵌岩深度增大而减小。

4)随荷载增大,土层侧摩阻力分担上部荷载比例由61%下降至55%,嵌岩段总阻力呈上升趋势。其中嵌岩段总阻力主要由其侧摩阻力承担,但端阻占比随荷载增加上升速率较快,约为47%。

5)根据勘察报告与静载荷试验值对桩身尺寸进行优化:本工程可用φ800工程桩代替φ1 000人工挖孔桩,据此可节约21%混凝土方量,18%人工挖土方量,节省工程总造价450万元。

## 参考文献:

[1] 张龙. 人工挖孔桩完整性及承载力检测应用研究[D].

- 西安:西安建筑科技大学, 2014.
- ZHANG L. The application study on test of integrity and bearing capacity of manual hole digging pile [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] 柳春. 软土地基人工挖孔桩承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 40-44.
- LIU C. Experimental research on bearing capacity of belled pile in weak soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 40-44. (in Chinese)
- [3] 蔡来炳, 李永盛, 施峰. 花岗岩残积土持力层人工挖孔桩承载力研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 33-37.
- CAI L B, LI Y S, SHI F. Bearing capacity of hand-dug piles embedded on granite residual clay [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1): 33-37. (in Chinese)
- [4] 何现启, 张清, 朱自强, 等. 灰岩地区人工挖孔桩施工安全综合动态模糊评价[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(3): 132-137.
- HE X Q, ZHANG Q, ZHU Z Q, et al. Comprehensive dynamic fuzzy evaluation for construction safety of manual digging pile in limestone area [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(3): 132-137. (in Chinese)
- [5] 曹贤发, 张家生, 刘之葵, 等. 施工期间人工挖孔桩桩间土稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1443-1448.
- CAO X F, ZHANG J S, LIU Z K, et al. Stability analysis of soil between manual digging piles during construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1443-1448. (in Chinese)
- [6] 余海见, 韩彦丰, 罗丽娟. 护壁结构对人工挖孔桩的竖向承载力贡献研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 771-776.
- YU J H, HAN Y F, LUO L J. Study on contribution of segmented protection wall to vertical bearing capacity of manual digging pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 771-776. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Technical code for building pile foundation: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. 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.
- The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Technical code for testing of building pile foundation: JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] CHOI Y, O'NEILL M W, NAM M S, et al. Pullout behaviors for battered large diameter reaction piles during static pile load tests for large diameter piles [C]// International Deep Foundations Congress 2002, February 14-16, 2002, Orlando, Florida, United States, 2002: 793-806.
- [11] 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.
- [12] HE H, DAI G, GONG W. Prediction of bearing capacity for rock-socketed under-reamed uplift piles based on Hoek-Brown failure criterion [C]// Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure, 2014: 54-61.
- [13] 吕福庆, 吴文, 姬晓辉. 嵌岩桩静载试验结果的研究与讨论[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 84-96.
- LYU F Q, WU W, JI X H. Research and discussion on the axial static load testing results of rock-socketed bored pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(1): 84-96. (in Chinese)
- [14] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y, et al. Axial resistance of long rock-socketed bored piles in stratified soils [J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 58-65.
- [15] 郭勇. 人工挖孔桩承载力影响因素及质量控制研究[D]. 西安: 建筑科技大学, 2010.
- GUO Y. Study on the factors of the bearing capacity and the quality control on the manual hole digging pile(MHDP) [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] BOUCHELOUKH A, GONG W, DAI G. Prediction of the base resistance for drilled shafts socketed into rock [J]. Rock Mechanics and Its Applications in Civil, Mining and Petroleum Engineering, 2014, 237: 143-153.
- [17] RADHAKRISHNAN R, LEUNG C F. Load transfer behavior of rock-socketed piles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(6): 755-768.
- [18] 龚成中, 何春林, 龚维明. 基于自平衡试桩法大直径嵌岩桩尺寸效应分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2403-2407.
- GONG C Z, HE C L, GONG W M. Analysis of size effect on the large diameter rock-socketed pile based on self-balance method [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2403-2407. (in Chinese)
- [19] 张建新, 吴东云, 张淑朝. 嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1221-1224.
- ZHANG J X, WU D Y, ZHANG S C. Finite element analysis of size effect of rock-socketed piles [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1221-1224. (in Chinese)