

人工挖孔嵌岩短桩承载性能研究

徐 敏, 童小东

(东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘 要: 利用自平衡测试技术, 对江苏省刑侦技术大楼的两根人工挖孔嵌岩短桩的承载力进行了测试, 并根据测试结果, 对人工挖孔嵌岩短桩的受力特点进行了分析。

关 键 词: 自平衡测试技术; 人工挖孔嵌岩短桩; 承载力

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Study on self-balanced measurement of bearing capacity for man-excavated rock-socket short piles

XU Min, TONG Xiao-dong

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The method of self-balanced measurement and its application to testing of bearing capacity of two man-excavated rock-socket piles in Jiangsu province, are introduced. On the basis of the testing results, the characteristics of bearing capacity of man-excavated rock-socket short pile are analyzed.

Key words: self-balanced measurement; man-excavated rock-socket short pile; bearing capacity

1 引 言

嵌岩桩是桩身一部分或全部嵌设于岩石中的桩基础^[1], 因其单桩承载能力高、抗震性能好、沉降小等特点而被广泛应用于建筑、市政、公路桥梁、港口码头等工程领域。虽然嵌岩桩的工程应用已有比较长的历史, 但人们对其受力机理的认识还不全面。由于嵌岩桩的承载力往往比较高, 传统的堆载法和锚桩法的费用较为昂贵, 且试验的历时较长, 给嵌岩桩承载力试验带来了困难, 从而制约了人们对其承载性状的全面研究。

自平衡测试技术是近年来在国内外迅速发展并推广使用的一种新型基桩承载力测试技术, 它能有效地解决传统试桩方法难以解决的诸如水上试桩、狭长场地试桩、大直径深长灌注桩承载力检测等工程技术难题, 并以省时、经济、技术先进等优点而受到工程界青睐。本文运用自平衡测试技术, 对江

苏省刑侦技术大楼的两根长径比分别为 10.7 和 7.8 的人工挖孔嵌岩短桩的承载力进行了测试, 并根据测试结果对嵌岩桩的承载性状进行了分析。

2 工程概况

江苏省公安厅刑侦技术大楼工程。位于南京市扬州路 1 号省公安厅内, 建筑物为地上 21 层、地下 2 层, 总高度约 78.20 m。采用人工挖孔嵌岩灌注桩, 根据国家有关规范规定和工程的需要, 采用自平衡法对工程的两根基桩进行竖向承载力试验, 两根试桩参数见表 1, 其中试桩 1 从桩底向上 1.65 m 范围内进行了扩底, 扩大头直径为 1.80 m。

根据本工程的岩土工程勘察报告, 在两根试桩的岩(土)层分界面处预埋钢筋应变计, 以测出各级荷载作用下, 桩身相应截面的轴力和岩层的侧摩阻力。场地试桩桩长范围内土层性质依次如图 1, 图 2 所示。

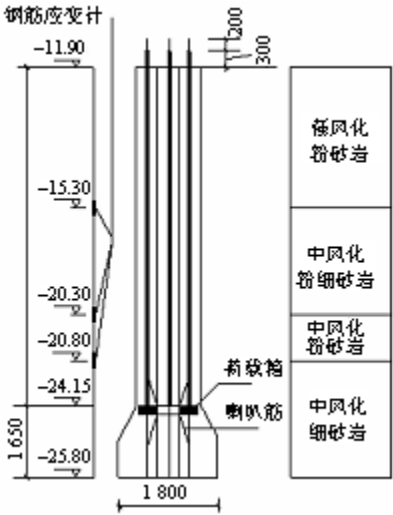


图 1 试桩 1 示意图 (单位: mm)
Fig.1 Sketch map of pile 1 (unit: mm)

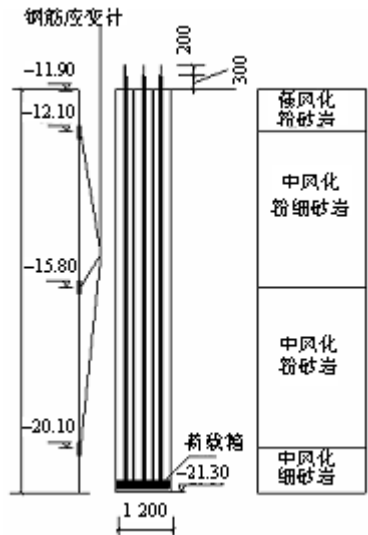


图 2 试桩 2 示意图 (单位: mm)
Fig.2 Sketch map of pile 2 (unit: mm)

3 自平衡测试技术

3.1 测试原理

自平衡试桩法是把一种特制的加载装置——荷载箱, 埋入桩内, 将荷载箱的高压油管 and 位移棒引到地面, 由高压油泵向荷载箱充油, 箱顶与箱底被推开, 产生向上与向下的推力, 从而调动桩周土的侧阻力与端阻力的发挥, 其上部桩身的摩擦力与下部桩身的摩擦力及端阻力相平衡——自平衡来维持加载。根据加载过程中荷载箱上表面向上、下表面向下的一一对应关系, 可以绘出向上、向下 $Q-S$ 曲线, 进而可以确定单桩抗压极限承载力。其测试原理如图 3 所示。

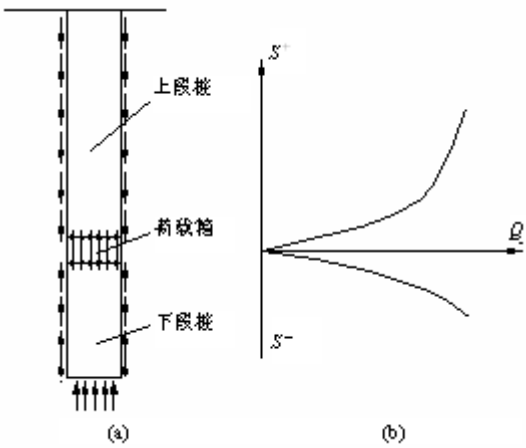


图 3 测试原理示意图
Fig.3 Sketch map of self-balanced measurement

表 1 试桩参数表

Table 1 Parameters of the two piles

桩号	桩径 / mm	桩长 / m	长径比 l/d	荷载箱距桩底距离 / m	成孔方式	预估加载值 / kN
试桩 1	1300	13.90	10.70	1.65	人工挖孔桩	35 000
试桩 2	1200	9.40	7.80	0.00	人工挖孔桩	26 000

表 2 各岩层的物理力学指标

Table 2 Rock parameters of each layer

岩层编号	岩层名称	天然密度 ρ / g·cm ⁻³	天然单轴抗压强度标准值 f_{tc} / MPa	饱和单轴抗压强度标准值 f_{tc} / MPa	极限侧阻力标准值 q_{sik} / kPa
④-1	强风化粉砂岩	2.31			20
④-2A	中风化粉细砂岩	2.36	9.7	9.3	
④-2B	中风化粉砂岩	2.32	1.1	1.4	
④-2C	中风化细砂岩	2.37	10.2	9.2	

说明: 强风化岩由于不能取样成型, 其强度不能通过单轴抗压试验确定, 这类强化嵌岩段极限承载力参数标准值可根据岩体的风化程度按砂土、碎石类土取值。

3.2 测试方法

试桩的位移量测采用电子位移传感器每根桩共

布设 4 只, 其中 2 只测荷载箱的向下位移, 2 只测荷载箱的向上位移。加载采用慢速维持法, 测试按

规范^[4]附录 C 和技术规程^[3]进行。

3.3 单桩竖向抗压极限承载力的确定

$$Q_u = \frac{Q_{u上} - W}{\gamma} + Q_{u下} \quad (1)$$

式中： Q_u 为单桩竖向抗压极限承载力； $Q_{u上}$ 为荷载箱上部桩的实测极限值； $Q_{u下}$ 为荷载箱下部桩的实测极限值； W 为荷载箱上部桩自重； γ 为荷载箱上部桩侧摩阻力修正系数，对于岩石， $\gamma=1$ 。

4 测试数据的整理与分析

4.1 承载力测试结果及与规范^[4]的比较

两根试桩的自平衡测试 $Q-S$ 曲线如图 4 所示。

试桩 1 的极限加载值为 $2 \times 17\,500$ kN，其竖向抗压极限承载力为

$$Q_u = \frac{17\,500 - \pi \times 0.65^2 \times 13.90 \times 24.5}{1.0} + 17\,500 = 34\,548 \text{ kN}$$

试桩 2 的极限加载值为 $2 \times 13\,000$ kN，其竖向抗压极限承载力为

$$Q_u = \frac{13\,000 - \pi \times 0.6^2 \times 9.4 \times 24.5}{1.0} + 13\,000 = 25\,740 \text{ kN}$$

文献[4]对嵌岩桩的单桩承载力标准值的计算考虑到由桩周土总侧阻 Q_{sk} 、嵌岩段总侧阻 Q_{rk} 和总端阻 Q_{pk} 三部分所组成，即

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} + Q_{pk} = u \sum_{i=1}^n \zeta_{si} q_{sik} l_i + u \zeta_s f_{rc} h_r + \zeta_p f_{rc} A_p \quad (2)$$

式中： f_{rc} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值，对于黏土质岩取天然湿度单轴抗压强度标准值； h_r 为桩身嵌岩深度，超过 $5d$ 时（ d 为桩径）取 $h_r=5d$ ，岩层表面倾斜时，以坡下方嵌岩深度为准； ζ_s 、 ζ_p 分别为嵌岩段侧阻力和端阻力修正系数，根据 h_r/d 由规范按表 3 查取； q_{sik} 为嵌岩段以上桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值；强风化岩由于不能取样成型，其强度不能通过单轴抗压试验确定，这类强化嵌岩段极限承载力参数标准值可根据岩体的风化程度按砂土、碎石类土取值； u 、 A_p 分别为桩身周长及桩端截面积。

表 3 嵌岩段侧阻和端阻修正系数

Table 3 The modified coefficient of lateral resistance and tip resistance of rock-socketed segment of pile

h_r/d	0.0	0.5	1	2	3	4	≥ 5
ζ_s	0.000	0.025	0.055	0.070	0.065	0.062	0.050
ζ_p	0.500	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000

人工挖孔桩的大直径端阻力尺寸效应系数 $\psi_p = (0.8/D)^n$ ， D 为桩端直径； n 为经验系数，对于岩石， $n = 1/3$ ；侧阻力尺寸效应系数 $\psi_s = (0.8/d)^{1/3}$ 。

根据表 2 所列岩层的各参数，按规范（JGJ94-94）计算两根试桩的承载力标准值试桩 1 为 12 106 kPa，试桩 2 承载力标准值为 10 135 kPa。

从图 4 试桩 2 的荷载箱向下 $Q-S$ 曲线看出，在荷载箱最终加载值条件下，荷载箱向下位移较大，达到了 16 mm，这可能是荷载箱底部岩层不平整造成的。

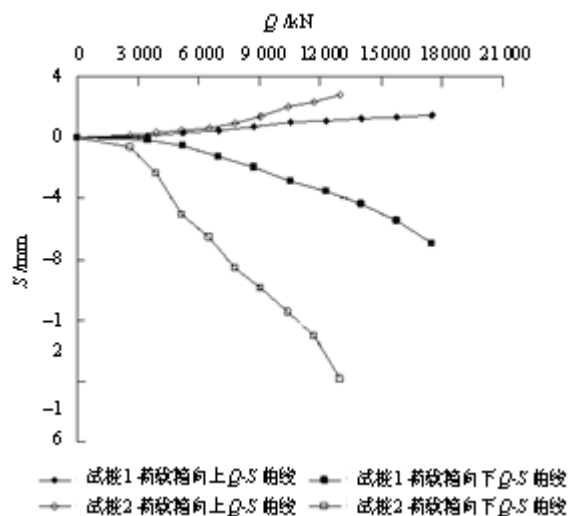


图 4 自平衡测试试桩 $Q-S$ 曲线图

Fig.4 The $Q-S$ curve of the pile by self-balanced measurement

4.2 对规范（JGJ94-94）计算结果的分析

比较承载力测试结果与规范计算结果可以看出，规范计算结果较实测结果偏小，按规范计算桩端阻力时，两根桩的嵌岩比都大于 5，桩端阻力计算值为 0；用自平衡法测试承载力时，包括了桩端阻力与桩侧阻力两部分，规范计算出来的承载力偏保守，为桩基以后日常使用提供了一定的安全储备。

4.3 桩身轴力测试结果

由试验实测各级荷载作用下钢筋应变计的稳定应变值乘以桩身截面抗压刚度 $E_p A_p$ ，推算出试桩在各级荷载作用下预埋钢筋应变计处的截面轴力，两根试桩各截面的轴力分别如图 5、图 6 所示。

4.4 桩侧摩阻力的计算与分析

根据轴力图，计算预埋钢筋应变计的相邻两截面轴力差，将轴力差除以相应段的桩身侧面积，即可得到该段的侧摩阻力。试桩 1、试桩 2 侧摩阻力分布如图 7、图 8 所示。

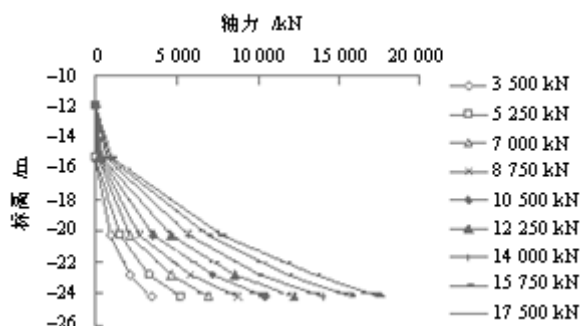


图5 试桩1各截面轴力图

Fig. 5 The axial force of each section of pile 1

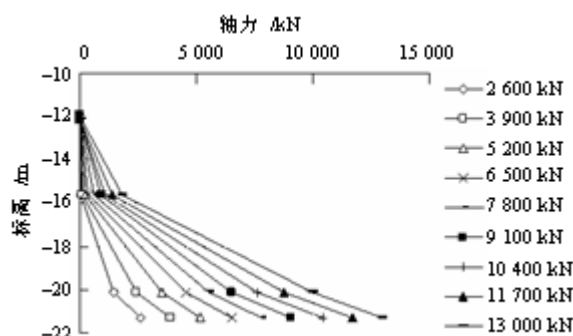


图6 试桩2各截面轴力图

Fig. 6 The axial force of each section of pile 2

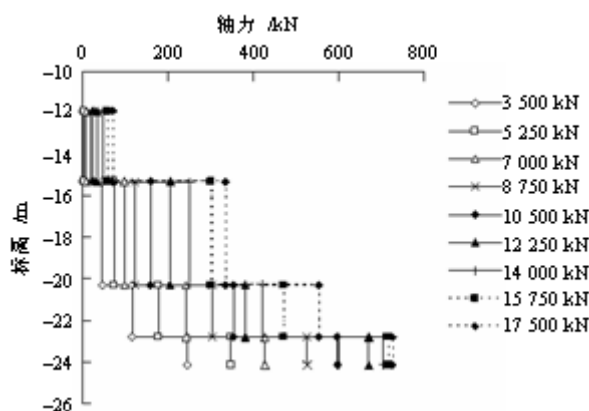


图7 试桩1侧摩阻力分布图

Fig. 7 Lateral resistance distribution of pile 1

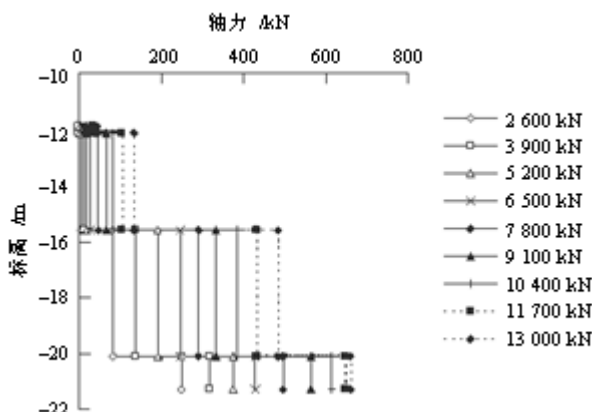


图8 试桩2侧摩阻力分布图

Fig. 8 Lateral resistance distribution of pile 2

从图7可以看出,在逐渐加大的各级荷载作用下,试桩1周围各岩层对桩的侧摩阻力也逐渐增大,在最后两级荷载15 750 kN及17 500 kN作用下,靠近桩端的④-2C层中风化细砂岩对桩的侧摩阻力增长不大,该层基岩对桩的侧摩已基本充分发挥,但位于④-2C层以上各岩层对桩的侧摩阻力仍有一定程度的增长,侧摩阻力尚未完全发挥。

从图8可以看出,由于试桩2桩顶处的岩层厚度很小,为0.2 m,所以该层岩层对桩身所能提供的侧摩阻力也很小。在最后两级荷载作用下,④-2C层中风化细砂岩对桩侧摩阻力增长不大,可认为该层岩层对桩的侧摩阻力已基本充分发挥。

4.5 等效转换后侧阻端阻比

4.5.1 等效转换原理^[2]

将自平衡法获得的向上、向下两条 $Q-S$ 曲线通过转换,等效为相应的用堆载法获得的一条 $Q-S$ 曲线的方法,即为等效转换法。其中包括承载力的转换与相应位移的计算,承载力转换已如前所述为

$$Q = \frac{Q_{\text{上}} - W}{\gamma} + Q_{\text{下}}, \text{ 荷载作用下位移 } S \text{ 的计算为}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_1 &= \frac{Q_{\text{下}} L_{\text{上}}}{E_p A_p}; \\ \Delta S_2 &= \frac{(Q_{\text{上}} - W)/\gamma}{E_p A_p} \frac{L_{\text{上}}}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$S = S_{\text{下}} + \Delta S_1 + \Delta S_2$$

式中: ΔS_1 为受压桩上段在桩端 $Q_{\text{下}}$ 作用下产生的弹性压缩变形量; ΔS_2 为受压桩上段在侧摩阻力作用下产生的弹性压缩量 $L_{\text{上}}$ 为等效受压桩上段桩长; S 为等效桩顶荷载对应的桩顶位移。

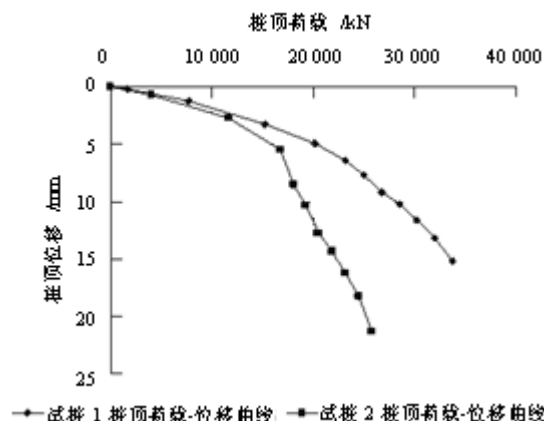


图9 等效桩顶荷载-位移曲线

Fig. 9 The equivalent pile top load-displacement curve

4.5.2 侧阻端阻比

根据等效转换原理得到的两根试桩桩顶荷载-位移曲线如图 9 所示,两根试桩在各级荷载作用下,桩侧阻力和桩端阻力所占桩顶荷载的百分比见表 4、表 5。

从试桩 1 和试桩 2 的等效桩顶荷载-位移曲线(图 9),试桩 1 的曲线比试桩 2 的曲线要缓,且试桩 1 的等效曲线为缓变型,没有明显的陡降点,说明试桩 1 由于扩底的缘故,桩端承载能力得到了提高,具有较好的承载性能。

表 4 各级荷载作用下试桩 1 侧阻、端阻分布情况

Table 4 The distribution between lateral resistance and tip resistance under different loads of pile 1

加荷级数	等效桩顶荷载 / kN	桩端阻力 / kN	端阻占等效 桩顶荷载比 / %	桩侧阻力 / kN	侧阻占等效 桩顶荷载比 / %
1	15 282	3 500	22.90	11 782	77.10
2	20 211	5 250	25.98	14 961	74.02
3	23 268	7 000	30.08	16 268	69.92
4	25 018	8 750	34.97	16 268	65.03
5	26 768	10 500	39.23	16 268	60.77
6	28 518	12 250	42.95	16 268	57.05
7	30 268	14 000	46.25	16 268	53.75
8	32 018	15 750	49.19	16 268	50.81
9	33 768	17 500	51.82	16 268	48.18

表 5 各级荷载作用下试桩 2 侧阻、端阻分布情况

Table 5 The distribution between lateral resistance and tip resistance under different loads of pile 2

加荷级数	等效桩顶荷载 / kN	桩端阻力 / kN	端阻所占等效 桩顶荷载比 / %	桩侧阻力 / kN	侧阻所占等效 桩顶荷载比 / %
1	11 696.3	2 600	22.23	9 096	77.77
2	16 740.5	3 900	23.30	12 840	76.70
3	18 040.5	5 200	28.82	12 840	71.18
4	19 340.5	6 500	33.61	12 840	66.39
5	20 640.5	7 800	37.79	12 840	62.21
6	21 940.5	9 100	41.48	12 840	58.52
7	23 240.5	10 400	44.75	12 840	55.25
8	24 540.5	11 700	47.68	12 840	52.32
9	25 840.5	13 000	50.31	12 840	49.69

从表 4、表 5 可以看出,试桩 1 和试桩 2 在极限荷载作用下,其侧摩阻力占桩顶荷载的比例都接近 50 %,这是因为两根试桩的桩端进入呈中等风化的细砂岩作为持力层,该岩层属于软岩,极限荷载作用下,端部沉降量要大于以硬质岩层作为持力层的端部沉降量,这是桩身与岩层间有较大的相对位移使侧摩阻力得以充分发挥。

5 结 论

(1) 自平衡测试方法试验方便,费用低,时间省,该法利用桩的侧阻力与端阻力互为反力,因而可清楚地分出侧阻力与端阻力分布和各自的荷载-位移曲线,且试验后试桩仍可作为工程桩使用,具有很好的经济效益和社会效益。

(2) 按规范^[4]嵌岩桩承载力计算公式计算出的人工挖孔嵌岩短桩承载力偏小,这为桩基日后的使用提供了安全储备。

(3) 对于桩端进入极软岩或软质岩石,呈中等风化岩层作为持力层的人工挖孔嵌岩短桩,其侧摩阻力可占到桩总承载力的 50 %左右,可视为摩擦端承桩。

参 考 文 献

- [1] 刘利民,舒翔,熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京:中国建材工业出版社,2002.
 - [2] 龚维明,戴国亮. 桩承载力自平衡测试技术及工程应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2006.
 - [3] DB32/T291—1999, 桩承载力自平衡测试技术规程[S].
 - [4] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].
 - [5] 刘树亚,刘祖德. 嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J]. 岩土力学,1999,10(4): 86—92.
- LIU Shu-ya, LIU Zhu-de. Some problems on the research and design of rock-socket piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4): 86—92.