

单桩承载性状试验研究

王遇国^{1,2}, 梅志荣², 张季超³

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中铁西南科学研究院, 四川 成都 610031; 3. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 利用预埋钢筋应力计和滑动测微计进行了强夯加固后的软弱土地基的桩身应力应变测试, 探讨了钢筋应力计焊接、混凝土浇筑、静载试验堆载配重吊装等对测试的影响, 给出了提高测试精度的建议。分析了弹性模量随桩身应变的变化关系, 研究了不同荷载作用下的桩侧摩阻力及端阻力分布规律、桩侧摩阻力随桩顶沉降的发挥性状以及粉砂层、粉质黏土层的桩侧摩阻力随该土层桩土相对位移的发挥性状。研究成果可供同类工程项目的设计和科研参考。

关键词: 桩; 承载性状; 滑动测微计; 静载试验; 侧摩阻力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)01-0007-05

作者简介: 王遇国(1978-), 男, 四川资中人, 博士研究生, 工程师, 从事岩土、隧道与地下工程研究。E-mail: wangyuguo1978@126.com。

Experimental researches on bearing characteristics of a single pile

WANG Yu-guo^{1,2}, MEI Zhi-rong², ZHANG Ji-chao³

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Southwest Research Institute Co., Ltd. of C.R.C., Chengdu 610031, China; 3. Department of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The stress and strain of a single pile are tested by setting reinforcing steel bar ergometers and sliding micrometers, and some influence factors to test results are discussed, including the reinforcing steel bar jointing, the concrete cast and the concrete block installation by chain block during static load tests. The following aspects are analyzed; the relationship between elastic modulus and stain of piles, the distribution of pile side friction force and tip force under different loads, the side friction force characteristics for the settlement of piles, and the side friction force characteristics of silty sand and silty clay for relative displacement between piles and soil. The research results can be used as references for the design and researches of similar projects.

Key words: pile; bearing characteristic; sliding micrometer; static load test; side friction force

0 前 言

桩基础作为一种重要的基础形式, 在高层建筑、桥梁、港口、近海结构以及大型发电厂构筑物等工程中得到了广泛应用, 研究单桩承载特性为设计施工提供借鉴是非常重要的。为研究单桩承载特性, 通常埋设钢筋应力计、土压力盒、滑动测微计等测试元件进行桩身应力应变测试。本文预埋钢筋应力计和滑动测微计对桩身应力进行了测试, 分析了钢筋应力计焊接、混凝土浇筑、堆载配重吊装等对测试的影响, 研究了强夯加固后的软弱土地基的单桩承载性状。

1 工程概况与测试仪器选择

1.1 工程概况

广东科学中心位于广东科学中心小谷围岛西部, 三面被珠江环绕, 地貌属珠江三角洲冲积平原。其工

程地质特点: ①普遍分布第四纪海陆相沉积的软土, 由淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土及砂土组成, 厚度约为 10~15 m; ②淤泥含水率高、孔隙比大、压缩性高、强度低, 含水率 63.8%, 孔隙比 1.72, 压缩系数 1.17 MPa^{-1} , 抗剪强度指标 $c=5.9 \text{ kPa}$, $j=6.4^\circ$ 。

该工程天然地基存在高压缩性、承载力较低等问题, 其承载力不能满足上部建筑物施工阶段及正常使用的要求, 经方法比较, 选用强夯动力排水固结法进行地基处理^[1], 主体采用 $\Phi 800 \text{ mm}$ 和 $\Phi 1000 \text{ mm}$ 两种钻(冲)孔灌注桩约 1500 根。根据建筑地基基础设计规范^[2]和建筑桩基技术规范^[3]的要求选取 15 根桩进行静载荷试验。

基金项目: 建设部资助项目; 广东省重点科技攻关资助项目(2004B10101048)

收稿日期: 2008-10-07

1.2 仪器的选择与测试原理

为研究强夯加固后的软弱土地基单桩承载性状、侧摩阻力发挥特性及荷载传递规律,对 7 根桩预埋滑动测微计进行应变测试,滑动测微计是根据线法监测原理^[4]研制而成的一种高精度应变计,通过测量两个测标(测标间距为 1000 mm)之间的距离变化来测量变形。变形测量分辨率可达 0.001 mm,应变测量分辨率可达 1×10^{-6} 。此外,与固定埋设的电测原件相比,滑动测微计避免了零点漂移,并具有温度自补偿功能等优点。

制桩期间,滑动测微计测管及测标对称地安装在钢筋笼上。测标按每米安装 1 个,直到桩底。加载前测定每两个测标之间的距离(初始度数),每级荷载稳定后、施加下级荷载前,测定变形后相应阶段读数,该读数与初始读数的差值除以测段长度(1000 mm),即为两个测标之间的平均应变值。

为校核测试结果,对其中 3 根桩的桩顶上部 10 m 范围内,以 1 m 为间距,在钢筋笼上焊接了钢筋应力计,钢筋应力计内部钢弦的自振频率 f 随其所受应力 s 而变化,其关系式为 $f = \frac{1}{2L} \sqrt{s/r}$, 其中 L 为钢弦的有效长度, r 为钢弦的材料密度。

2 现场测试的几个问题分析

2.1 应力计焊接的应力变化

钢筋焊接是一个不均匀加热和冷却的过程。施焊时,钢筋产生不均匀的温度场,焊缝及附近温度可高达 1600℃ 以上。高温时,钢材的受拉和受压力学性能可以忽略,达到受力为零的平衡状态,温度降低时,焊接钢筋要收缩,从而导致了钢筋应力计处于受拉状态。

钢筋计安装前的初始应力取 0 值,焊接后钢筋计将产生拉应力,实测该工程中某桩 10 个钢筋应力计焊接后应力变化,见表 1,钢筋应力计的焊接导致应力计产生拉应力,平均值达 14.42 MPa。因此试验中要重视初值的测试。

2.2 混凝土浇注的应力变化

混凝土浇注后受自重作用和收缩变形等影响而引起应力变化。混凝土收缩是个长期过程,超过 20 a 后收缩变形仍不会停止^[5],收缩变形在混凝土开始干燥时发展较快,以后减慢。将混凝土浇筑前的钢筋应力取零值,某试桩浇注后 1 d 和浇注后 7 d 的钢筋计应力测试结果见表 1(负号表示压应力),平均值分别为 11.14 MPa 和 10.41 MPa,可见混凝土浇筑 1 d 后应力变化减缓。

2.3 堆载对试验结果的影响

为研究边堆载对测试结果的影响,选取某试桩在

6000 kN 桩顶荷载作用时,进行了堆载配重的吊装,在每级荷载加载后的第 5, 10, 30, 60, 120 min(加载 2 h 后,加下一级荷载)记录钢筋应力计测试结果,折算为桩身应力见表 2。从表 2 可见,堆载对桩身内力测试有较大影响,堆载配重的吊装将导致桩身荷载应力的提前施加,为精确分析荷载传递性状,应避免边堆载边测试。

表 1 应力变化对照表

Table 1 Variation of stress MPa

桩深位置/m	钢筋计安装后	混凝土浇注后	
		浇筑后 1 d	浇筑后 7 d
1	13.4	-11.1	-10.80
2	16.1	-9.1	-17.90
3	15.2	-8.6	-11.10
4	13.5	-8.4	-7.96
5	14.9	-12.5	-11.30
6	15.9	-12.4	-7.30
7	14.2	-11.9	-8.00
8	14.3	-12.6	-11.20
9	13.2	-11.8	-7.70
10	13.5	-13.0	-10.80

表 2 堆载作用下的桩身应力测试表

Table 2 Variation of stress of a single pile for concrete block

installation by chain block during static load tests MPa

桩深位置/m	6000 kN				7000 kN
	5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
1	9.6	9.8	10.0	10.5	11.0
2	9.0	9.2	9.5	9.9	10.5
3	8.6	8.8	9.1	9.5	10.2
4	8.2	8.4	8.7	9.2	9.9
5	7.8	8.1	8.4	8.8	9.6
6	7.6	7.9	8.2	8.5	9.2
7	7.3	7.5	7.8	8.1	8.6
8	6.9	7.1	7.3	7.7	8.2
9	6.5	6.7	6.9	7.2	7.7
10	5.9	6.1	6.3	6.6	7.0

3 试验结果的处理

3.1 断面修正

由于施工影响,实际桩径和设计桩径存在一定误差,为提高计算分析准确性,采用灌注桩孔径检测系统对钻孔进行测试,以孔径测试值作为桩径值,进行桩身断面修正^[6],

$$e_i = e_{i0} \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中, e_{i0} , e_i 分别为第 i 段修正前后的应变, D_i 为第 i 段断面实际直径,现场实测取值, D_0 为桩身断面平均直径,依据实测 D_i 计算得到。

3.2 应变曲线的拟合

为了消除误差或其他因素产生的应变值异常, 必须对应变曲线作数学处理^[7]。否则, 直接对测量数据进行微分或插值是不适当的, 会造成误差成倍增加。在数据处理过程中, 根据荷载传递函数推导应力应变拟合曲线, 对修正后的应变曲线进行拟合与磨光处理。

3.3 弹性模量校正

试验证明, 混凝土弹性模量是应变量级的函数, 它随应变或轴力的增加而降低。为得到更合理的轴力曲线, 本文采用桩顶应变与桩顶荷载校正弹性模量,

$$E_i = \frac{4}{\pi D^2} \frac{P}{e_{0i}}, \quad (2)$$

式中, D 为钻孔平均直径(m), P 为桩顶荷载(kN), e_{0i} 为第*i*级荷载下桩顶处的拟合应变。

SZH-1b试桩弹性模量与应变关系见图1, 相应的线性回归方程为

$$E_i = 29.8 - 0.0086e_i. \quad (3)$$

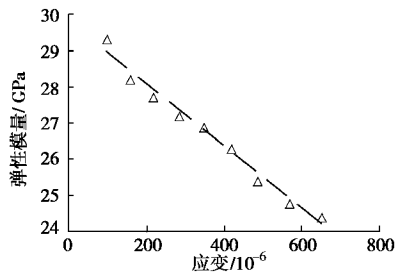


图1 SZH-1b 桩身弹性模量 - 应变关系图

Fig. 1 Relationship between elastic modulus and strain of SZH-1b

4 单桩承载特性分析

4.1 桩侧摩阻力与端阻力的计算与分布规律

根据前面分析, 各土层的单位侧摩阻力为

$$f(z) = \frac{1}{\pi D} \frac{dP(z)}{dz}. \quad (4)$$

本次测试共对7根桩进行了桩身应变测试, SZH-1b及SZH-1c两试桩各级荷载作用下的侧摩阻沿深度变化规律曲线见图2, 3。由图可见, 桩身侧阻自上而下逐渐发挥, 桩土相对位移是产生侧摩阻的原因, 在荷载作用下, 桩身上部首先发生弹性压缩, 产生相对桩土位移, 随着荷载沿桩身向下传递, 侧阻也随之向下逐步发挥。在前两级荷载甚至第一级荷载作用下桩顶就几乎发挥出最大侧阻, 随着荷载的增大, 桩顶侧阻有不同程度的降低现象。桩侧摩阻力主要由下部粉质黏土层及砂岩提供, 最大侧摩阻力高达200 kPa以上, 其中SZH-1b和SZH-1c试桩的最大侧摩阻力分别达到206, 219 kPa, 远大于规范取值。在桩端附近, 可能由于桩端阻力影响, 侧向应力松弛。

4.2 桩侧摩阻力及桩端阻力随桩顶沉降的发挥特性

从桩侧摩阻力与桩顶沉降关系(图4)看, 各试桩在桩顶最大加载下侧摩阻力已得到较充分的发挥。在桩顶沉降小于8 mm左右时, 侧阻随着桩顶沉降量的增大而成线性增加; 桩顶沉降为8~15 mm时, 曲线有一个过渡区, 在这个过渡区, 随着荷载的增加, 侧阻不断增大, 但侧阻的增幅逐渐变小。SZH-3c试桩的桩顶沉降量较大, 侧阻发挥非常充分, 曲线表明当桩顶位移大于16 mm左右时, 随着桩顶荷载增加, 侧阻与沉降的关系曲线已变得非常平缓, 侧阻的增幅已非常小。在试验最大加载量下, 各试桩侧阻发挥值主要在90~110 kPa, 远大于规范取值, 主要是强夯加固软弱土地基取得了较显著的效果, 桩侧摩阻力有较大幅度提高。

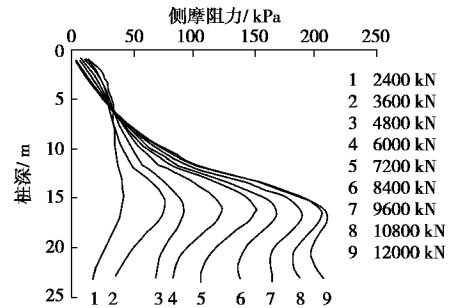


图2 SZH-1b 试桩桩深 - 侧摩阻力曲线

Fig. 2 Relationship between side friction force and depth of SZH-1b under different loads

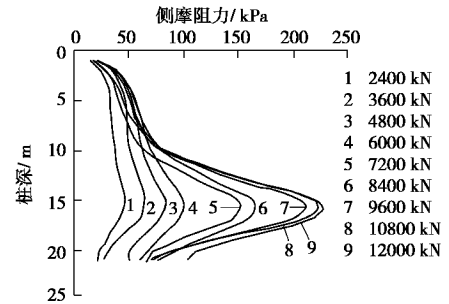


图3 SZH-1c 试桩桩深 - 侧摩阻力曲线

Fig. 3 Relationship between side friction force and depth of SZH-1c under different loads

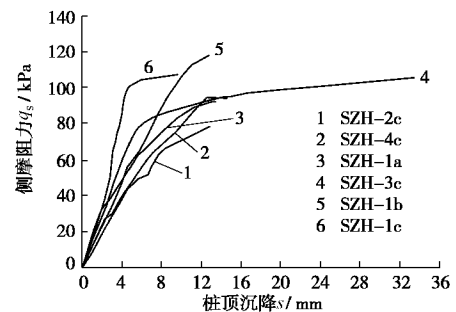


图4 各试桩侧摩阻力 - 桩顶沉降曲线图

Fig. 4 Relationship between side friction force and settlement

从埋设滑动测微计进行监测的 7 根试桩桩端阻力与桩顶位移关系图 (图 5) 看, 除 SZH-3c 试桩外, 各试桩桩端阻力与桩顶位移近似直线, 几乎没有明显拐点, 在桩顶最大荷载作用下, 桩端阻力尚未达到极限承载力状态。由于 SZH-3c 试桩桩顶沉降量较大, 达 33.21 mm, 从桩端阻力与桩顶沉降关系曲线图看, 该试桩桩顶沉降量不到 5 mm 时, 桩端阻力与桩顶沉降关系曲线斜率较小, 5~16 mm 段是桩端阻力的主要发挥阶段, 当桩顶沉降大于 16 mm 后曲线趋于平缓, 但随着桩顶沉降量的增大端阻仍有较大幅度增大。试验结果也表明 SZH-3c 试桩在桩顶最大加载量下端阻力值达 9373.3 kPa, 而其它各试桩端阻发挥值在 4500~6000 kPa, 且随着荷载增加端阻的发挥没有减缓的趋势, 适当提高该类工程桩基极限端阻设计取值具有明显的经济效益。

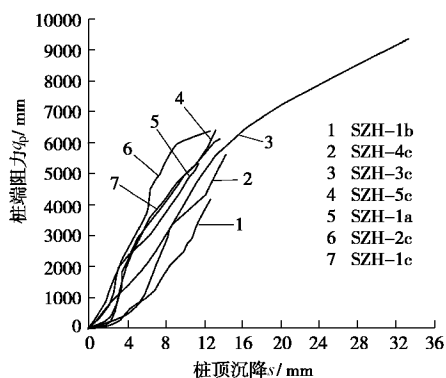


图 5 各试桩端阻力 - 桩顶沉降曲线

Fig. Relationship between tip friction force and settlement

4.3 分土层的侧摩阻力发挥性状

各土层的侧摩阻力发挥与该土层的桩土相对位移有关, 为研究单桩侧摩阻与桩土相对位移关系, 通过滑动测微计测试结果, 对粉砂层及粉质黏土层的桩侧摩阻力及桩土相对位移进行了计算。本计算取该土层平均桩土位移为该土层的桩土相对位移值, 该土层的平均侧摩阻力为该土层的侧摩阻力。土层侧摩阻力为

$$f_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{A_{si}} \quad (5)$$

式中, N_i , N_{i-1} 分别为第 i 土层的上下端面处的桩身轴力, A_{si} 为第 i 土层段的桩周面积。

假定荷载作用下土体不随桩体移动, 试验中滑动测微计测试结果为桩身应变, 以 1 m 为单位进行测试, 利用桩顶实测沉降值 s_0 与该桩身压缩量可分别计算出桩深为 z 处的桩土相对位移, 即

$$s(z) = s_0 - \sum_{j=0}^z e(j) \Delta j \quad (6)$$

式中, s_0 为桩顶沉降量, Δj 为桩深位置 j 处测点间距 (本试验测点间距为 1 m), $e(j)$ 为桩深位置 j 处桩长

1 m 范围的实测平均应变值, $s(z)$ 为桩深 z 处的桩土相对位移。土层桩土位移之和与该土层厚度的比值, 即为该土层的桩土相对位移平均值。与桩基工程手册^[8]计算的桩土相对位移相比, 利用滑动测微计测试值计算桩土位移更准确可靠。

粉砂层位置深度范围 7~14 m 内, SZH-1b 试桩的深度范围相对小些, 仅 6~10 m。比较侧阻与桩土相对位移的关系, 在桩土相对位移 1 mm 左右时, 侧摩阻力达 35 kPa 左右, 随着相对位移增大加, 侧摩阻增加, 在桩土相位移 6 mm 后, 侧摩阻增加趋于平缓, 见图 6。

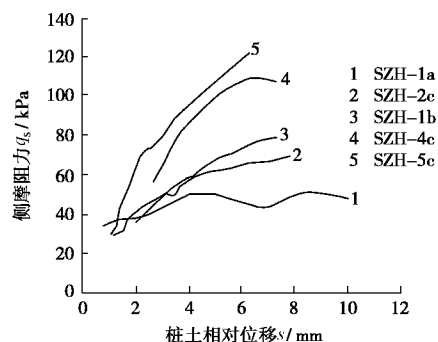


图 6 粉砂层桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线 $q_s - s$

Fig. 6 Relationship between side friction force and relative displacement of piles and silty sand soils

粉质黏土层深度范围大致在 14~18 m。图 7 为粉质黏土层桩侧阻与桩土相对位移曲线 $q_s - s$, 在桩土位移较小时该土层侧摩阻力较小 (桩土位移 1 mm 左右时, 侧摩阻力仅 20 kPa), 随着桩土位移的增大, 该土层的侧摩阻急剧增加, 在桩土位移达到 5~6 mm 时, 侧摩阻为 140~160 kPa, 此时该土层的侧摩阻接近极限值, 增势变缓, 随着桩土相对位移的增大, 该土层的侧阻还有一定余量发挥。与粉砂土的侧阻发挥性状比较, 粉质黏土侧摩阻的发挥明显滞后于粉砂土层的桩侧摩阻发挥, 但随着桩土相对位移的增加, 其侧摩阻增加较快。

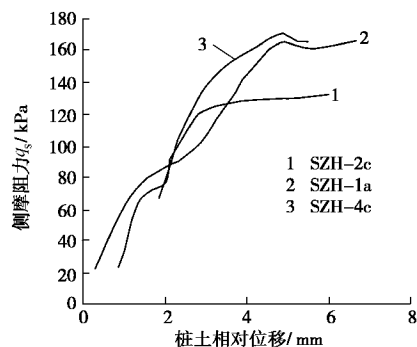


图 7 粉质黏土层桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线 $q_s - s$

Fig. 7 Relationship between side friction force and relative displacement of piles and silty clay soils

5 结 论

(1)用滑动测微计测量桩身应变,修正弹性模量,计算桩身、侧摩阻力及桩土相对位移,分析单桩承载性状,具有测量数据稳定、精度高、适宜各种环境中测试等优点。

(2)钢筋应力计的焊接、混凝土的浇筑等将产生初始应力,测试前要注意初值的归零。弹模随应力变化,测试时的堆载等因素都将对试验精度产生影响,测试和数据分析时应采取措施消除。

(3)测试结果表明,经动力排水固结法加固后的软弱土地基单桩侧摩阻和端阻都有较大幅度提高,该类工程的桩基设计时可适当提高极限端阻和侧阻取值。

(4)桩顶荷载由桩端阻力和桩侧阻力共同承担,桩顶荷载作用的不同阶段端阻和侧阻的发挥性状不同。在桩顶沉降达 12 mm 左右时侧阻已发挥比较充分,端阻还将随着桩顶沉降增加而不断上升,桩顶沉降达 30 mm 左右时端阻发挥才较充分。

(5)土层的侧摩阻随着桩土相对位移的增加逐渐发挥,到接近极限侧摩阻时变化减缓。粉砂层在桩土相对位移 6 mm 后,侧摩阻增加趋于平缓;粉质黏土层在桩土位移达到 5~6 mm 后,侧摩阻增加趋于平缓;粉质黏土层的侧摩阻发挥滞后于粉砂层侧摩阻的发挥。

参考文献:

- [1] 张季超. 基础工程处理与检测实录[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1998. (ZHANG Ji-chao. Foundation engineering processing and factual test records[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [2] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 2002: 123 - 124. (GB50007 — 2002 Code for design of building foundation[S]. 2002: 123 - 124. (in Chinese))
- [3] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 1995: 130 - 137. (JGJ94—94 Technical code for building pile foundations[S]. 1994: 130 - 137. (in Chinese))
- [4] 李光煜, 黄 粤. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 99 - 109. (LI Guang-yu, HUANG Yue. Linewise observation and portable instruments on strain monitoring in geomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 99 - 109. (in Chinese))
- [5] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 48 - 49. (GUO Zhen-hai. Principle of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 48 - 49. (in Chinese))
- [6] 陈尚桥. 用滑动测微计实测桩的荷载传递函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1267 - 1271. (CHEN Shang-qiao. Measuring the load-transfer functions of piles by using sliding micrometers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1267 - 1271. (in Chinese))
- [7] 王国体, 王志亮. 单桩侧摩阻力曲线的推求与拟合[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(2): 205 - 209. (WANG Guo-ti, WANG Zhi-liang. The side skin friction curves ascertainment and imitation of single pile[J]. Journal of Hefei Industry University, 2000, 23(2): 205 - 209. (in Chinese))
- [8] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (Editorial Committee of Pile Foundation Engineering Manual. Pile foundation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))