

文章编号:1673-9469(2013)02-0025-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2013.02.007

## 大直径灌注桩桩身轴力试验研究

袁海超,唐立刚,张向辉

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**结合单桩载荷试验,通过在桩身中分层、均匀埋设钢筋计,将试桩沿深度分成多个截面,推算桩身不同深度的轴力大小,并测量桩在各级荷载作用下的桩顶沉降,详细分析了单桩的Q-S曲线特征、桩身轴力的分布规律等。结果表明,在竖向荷载作用下,桩身轴力沿桩的深度逐渐衰减,随着荷载等级的加大,轴力沿桩身衰减的速率也在加大,且桩的深度越深变化速率也就越大。

**关键词:**钢筋计;静载荷试验;桩身轴力;荷载传递

**中图分类号:**TU473.1+6

**文献标识码:**A

## Research on axial force test of large diameter piles

YUAN Hai - chao, TANG Li - gang, ZHANG Xiang - hui

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on the test of the single pile load, axial force from different depth can be measured in the way which dividing the depth of the pile into several sections by stratifying the pile and burying reinforcement meter into it evenly. Settlement of the top of pile under various levels load is also measured in the same way. Under the vertical load, Q-S curve characteristics of the single pile as well as distribution of the axial force are precisely analyzed in this article. Pile axial force along the pile gradually decays with the increase of the load level; the rate of the decay is getting bigger at the same time. It changes severely with the change of the depth of the pile.

**Key words:** reinforcement meter; static loading test; axial force; load transmission

目前,桩的荷载传递理论日趋成熟,研究方法也多种多样<sup>[1]</sup>。通过载荷试验,在桩身安置应力应变原件来反映桩的力的传递的方法,已被业界人士公认为最直观和最具操作性的方法<sup>[2]</sup>。本文通过在桩身的不同截面埋设钢筋计的方法,推算出桩身不同位置的轴力,并结合Q-S曲线及桩轴力的变化来讨论桩的力的分布。

### 1 工程试验概况

场地位于邯郸市河北工程大学土工试验厂房,试桩桩长为13 m,直径为800 mm,埋入地层为13.80 m,桩顶标高为-0.80 m,为冲击钻成孔灌注桩。该试验桩纵筋10Φ14均布,箍筋Φ8@200(100)。

为分析桩顶荷载在桩身内的传递规律,计算

桩身轴力大小,在试桩主筋上均匀布置钢筋计。本试验共埋设60个钢筋计,10根主筋每间隔一根布置一组钢筋计,每组12个,从距离桩顶1米处开始,自上而下每个间隔1.00 m均匀分布,共5组。这样可保证每个截面都有5个钢筋计,可直观反应出桩不同位置力的变化情况。

根据土工试验厂房的勘察报告,该场地地层为冲洪积作用形成,由第四纪全新世新近沉积土组成,详细土层信息见表1。

### 2 载荷试验原理及方法

#### 2.1 试验装置

采用堆载法加压方式,测试装置主要包括:加荷、反力装置、桩顶沉降观测装置。荷载由1 m<sup>3</sup>混

表1 土层参数表

Tab.1 The soil parameter table

土层编号	土层名称	颜色	状态或密实度	土层厚度/m	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa
①	杂填土		松散	0.50 ~ 1.30	
②	粉土	黄褐色	中密,湿	2.00 ~ 3.70	7.4
③	粘土	灰色	软塑	0.50 ~ 1.30	3.1
④	粉土	灰色	稍密 ~ 中密,湿	2.00 ~ 3.50	7.2
⑤	粉质粘土	灰 ~ 灰黑色	可塑状态	1.50 ~ 2.90	5.4
⑥	粉质粘土	黄褐色	可塑 ~ 硬塑	4.90 ~ 7.20	7.7
⑦	粉土	黄褐色	密实,湿	0.40 ~ 1.30	7.7
⑧	粉质粘土	黄褐色	可塑及硬塑状态	4.50 ~ 5.00	7.8

混凝土试块堆载组成。千斤顶的反力由桩及反力横梁承担,用百分表测量桩顶沉降。在试桩上方用钢梁搭设堆载平台,通过试桩上的千斤顶向钢梁施加压力从而达到加荷的目的。试桩所承受的荷载由 JCQ - 503E 静载荷试验仪控制油压千斤顶进行分级施加,加载及反力装置见图 1。



图1 载荷试验现场

Fig.1 The site of static loading test

## 2.2 试验原理

当钢筋受力时,引起钢筋计弹性钢弦的的应力变化,通过频率仪测得其改变钢弦的振动频率,可求出钢筋所受到的荷载大小,依据变形协调原理,可推导出桩身各截面的应变和相应的轴力值,此外还可以进一步求出桩的侧摩阻力和桩端阻力<sup>[2]</sup>。

计算桩身轴力时,应假定桩身材料均匀一致,即桩身的应力应变关系在整个桩长上都是相同的,同时,在桩受压时,桩内钢筋和混凝土共同受力工作,所以可以认为他们变形相同。根据以上假定,可推算出桩不同截面的轴力。推算过程如下:

步骤 1:试桩内钢筋所受力的计算。

前文中提到,钢筋所承受的力即为钢筋计的力,可知力  $P_i$  为

$$P_i = K \cdot (f_0^2 - f_i^2) \quad (1)$$

式中: $P_i$  - 被测钢筋计所受的力,kN; $K$  - 钢筋计的灵敏度系数,kN/Hz<sup>2</sup>; $f_0$  - 钢筋计的初始震动频率值; $f_i$  - 钢筋计在加第  $i$  级荷载时的频率值。

步骤 2:钢筋的应变计算。

由  $P_i$  大小和钢筋计的弹性模量可算出钢筋计的应变为

$$\varepsilon_i = \frac{P_i}{E_s \cdot A_s} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_i$  - 钢筋计应变; $E_s$  - 钢筋计的弹性模量/MPa; $A_s$  - 钢筋计截面面积/m<sup>2</sup>。

步骤 3:试桩轴力的计算。

由上文假设可知桩身材料混凝土应变与钢筋计应变相同,即  $\varepsilon_c = \varepsilon_i$ ,由轴力计算公式为

$$N_i = E_c \cdot A_c \cdot \varepsilon_c \quad (3)$$

将式(1)、式(2)带入式(3)化简可得

$$Q_i = \frac{P_i \cdot A_c \cdot E_c}{A_s \cdot E_s} \quad (4)$$

式中: $Q_i$  - 桩身第  $i$  截面轴力/kN; $P_i$  - 被测钢筋计所受的力/kN; $E_c$  - 桩身混凝土的弹性模量/MPa; $A_c$  - 桩身横截面面积/m<sup>2</sup>。

## 2.3 试验方法

依据《建筑桩基检测技术规范》<sup>[3]</sup>,本次静载荷试验采用慢速维持荷载法施压。试桩荷载要求达到 1 600 kN,加载分级进行,采用等量加压。

### 2.3.1 加载方式

静载荷试验开始阶段,平均每级 80 kN 开始加载,当荷载加至 1 120 kN 后,改为每级荷载为 160 kN。加荷时,每级荷载施加后按 5, 15, 30, 45, 60 min 测量桩顶沉降,以后每隔 30 min 读测一次。当每小时沉降量小于等于 0.1 mm,且连续出现两次时,则认为试桩相对稳定可加下一级荷载。

终止加载条件:

表2 钢筋计观测表  
Tab.2 The observing table of reinforcement meter

钢筋计 编号	5-11	5-12	5-13	5-14	5-15	5-16	5-17	5-18	5-19	5-20
初始频率	1 753.9	1 745.9	1 553.5	1 670.9	1 691.0	1 636.0	1 631.5	1 635.1	1 630.8	1 638.9
N <sub>1</sub>	1 754.6	1 746.8	1 554.8	1 670.5	1 690.0	1 634.3	1 629.6	1 633.1	1 629.1	1 637.7
N <sub>2</sub>	1 753.5	1 748.0	1 556.0	1 670.6	1 689.3	1 633.2	1 628.4	1 632.0	1 628.1	1 637.0
N <sub>3</sub>	1 753.7	1 748.9	1 557.1	1 670.8	1 688.8	1 632.0	1 628.7	1 630.7	1 627.2	1 636.2
N <sub>4</sub>	1 753.5	1 749.1	1 557.9	1 670.6	1 688.1	1 631.0	1 627.5	1 629.6	1 626.4	1 635.6
N <sub>5</sub>	1 752.9	1 748.9	1 558.1	1 670.3	1 687.3	1 629.9	1 626.4	1 628.4	1 627.2	1 634.8
N <sub>6</sub>	1 753.8	1 748.5	1 558.0	1 669.7	1 686.5	1 628.8	1 625.3	1 627.4	1 626.2	1 634.3
N <sub>7</sub>	1 752.8	1 747.7	1 557.5	1 668.9	1 685.7	1 627.8	1 624.3	1 628.1	1 626.1	1 633.8
N <sub>8</sub>	1 751.5	1 746.6	1 556.8	1 668.1	1 684.9	1 627.1	1 623.6	1 627.6	1 625.9	1 633.7
N <sub>9</sub>	1 750.3	1 745.4	1 556.1	1 667.6	1 684.7	1 627.2	1 623.7	1 627.9	1 626.1	1 634.0
N <sub>10</sub>	1 748.7	1 744.1	1 555.4	1 667.1	1 684.6	1 627.5	1 624.2	1 628.4	1 626.6	1 634.2
N <sub>11</sub>	1 747.4	1 743.1	1 555.2	1 667.5	1 685.3	1 628.5	1 625.0	1 629.1	1 627.4	1 634.9
N <sub>12</sub>	1 746.8	1 743.3	1 556.0	1 668.8	1 686.3	1 629.8	1 625.8	1 628.2	1 628.2	1 635.4
N <sub>13</sub>	1 746.9	1 744.1	1 558.0	1 670.9	1 688.4	1 632.1	1 627.4	1 629.3	1 627.6	1 636.1
N <sub>14</sub>	1 746.5	1 744.4	1 558.9	1 672.1	1 689.7	1 633.4	1 626.7	1 629.8	1 628.2	1 636.5
N <sub>15</sub>	1 744.1	1 742.5	1 558.0	1 672.0	1 690.3	1 635.2	1 629.6	1 630.7	1 628.9	1 636.5
N <sub>16</sub>	1 740.7	1 738.5	1 554.0	1 667.9	1 686.8	1 631.8	1 626.4	1 628.8	1 626.1	1 633.1
N <sub>17</sub>	1 735.9	1 732.9	1 547.6	1 661.5	1 681.4	1 626.7	1 622.0	1 624.1	1 623.1	1 627.7

注: N<sub>i</sub> 为静载荷试验加载等级。

(1) 已达到设计要求的 1 600 kN;

(2) 某级荷载作用下, 桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍;

(3) 某级荷载作用下, 桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍, 且经 24 h 尚未达到相对稳定。

### 2.3.2 卸载方式

该试验共分四级卸载, 卸载时每级荷载维持 1 h, 并按第 15, 30, 60 min 读数后方可进行下一级卸载, 当卸载至 0 kN 时, 测读桩顶的残余沉降量。

### 2.3.3 钢筋计的观测

桩身轴力测试采用的钢筋计仪器型号为 XB-100, 规格为  $\Phi 16$ , 焊接在试桩主筋上, 由于埋深不同, 故用不等长度的电缆与钢筋计相连, 便于数据采集。读数采用频率仪人工读数。试验将已压桩前的频率为设初始频率, 当每级荷载达到规范规定的稳定状态时测读钢筋计的读数。由于文章篇幅有限加之观测数据较多, 随机抽取部分实测数据见表 2。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 载荷试验 Q-S 曲线特征

静载荷试验所得的 Q-S 曲线的线型是桩身材

料或桩周土破坏模式的宏观反应, 本试验所得的试桩 Q-S 曲线见图 2。由该曲线图可以看出, 当荷载较小时, 桩顶沉降较小, 几乎全为桩和周围土体的弹性变形。随着荷载的加大, 沉降量也逐渐加大。试桩最大位移量为 76.34 mm, 最大回弹量为 23.03 mm, 回弹率 30.2%。Q-S 曲线成陡降型, 桩端呈刺入冲剪破坏, 可以看出该试桩桩端土层和桩身土层均为软弱土层, 桩端阻力<sup>[4]</sup>不会很大。从图上可以看出在荷载 1 280 kN 时出现陡降, 可近似认为该级荷载为试桩的竖向抗压极限承载力<sup>[5]</sup>。

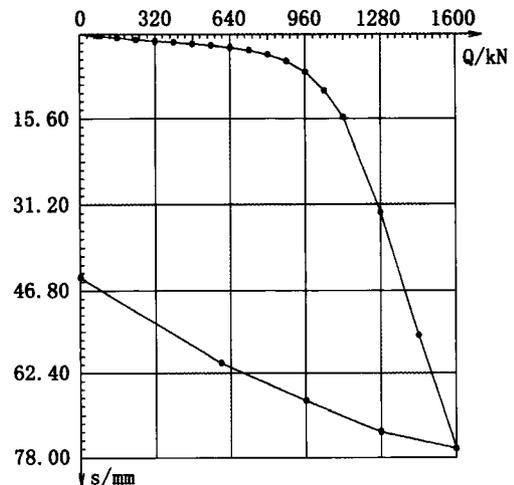


图2 试桩Q-S曲线

Fig.2 Q-S curves of test pile

### 3.2 桩身轴力特征

由钢筋计观测资料和上文提到的计算公式可求得桩身的轴力分布图(图3):从图形上可以看出,在各级荷载作用下,桩身轴力沿桩的深度逐渐衰减,且随着荷载等级的加大,轴力沿桩身衰减的速率也在加大,桩的深度越深变化速率也越大。当继续增加荷载,达到1280 kN时,桩身轴力分布的曲线斜率基本不再变化,整个曲线接近于发生平行移动,轴力沿深度方向呈倒三角分布。这是由于桩土相对位移所产生的侧摩阻力<sup>[4]</sup>有无发挥造成的。

结合Q-S曲线,荷载在0~960 kN时,桩顶沉降量较小,处于弹性阶段,此时桩身轴力沿桩深的衰减速率也较小,当荷载大于960 kN,试桩从弹塑性阶段到塑性阶段直至破坏,轴力的衰减速率在一步步加大,当达到极限荷载时出现双曲线特征。

由桩的轴力分布图可以看出,随着桩顶荷载的加大,桩身轴力在-10 m后出现反弹,这是因为在此处桩身出现了负摩阻力<sup>[5]</sup>,轴力向下传递时必须克服这种负摩阻力,故桩底轴力非线性递增,在桩底呈肚鼓状分布。

由于该桩身轴力是由钢筋计的测量然后再换算成混凝土的应变求得的,而混凝土受温度湿度的影响,加上钢筋计埋放时的误差,实际算得的桩身轴力数值上的偏差也是允许的。

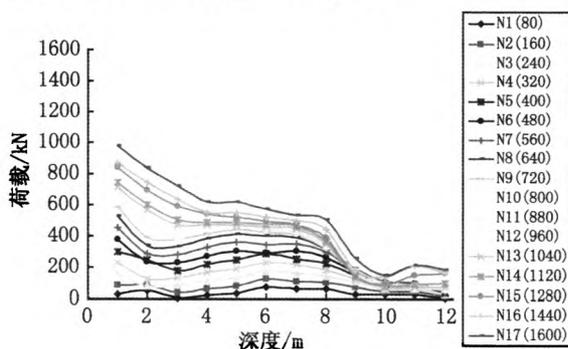


图3 桩身轴力分布图

Fig.3 Figure of axial force distribution

### 4 结论

1) 桩身轴力沿着桩身向下呈衰减趋势,上部衰减速率缓慢,下部加快,这是由于桩侧摩阻力的发挥造成的;而桩底轴力的非线性增加,呈肚鼓状分布是因为在桩底生成了负摩阻力。

2) 在加荷的过程中,桩底的轴力一直占据很小的一部分比例,说明此试桩主要是由侧摩阻力来承担桩顶的荷载,Q-S曲线呈陡降型、桩端呈刺入破坏,表明桩端与桩身均为软弱土层,可确定该桩属于摩擦型桩。

### 参考文献:

- [1] 律文田,王永和,冷伍明. PHC管桩荷载传递的试验研究和数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 3(27): 467-470.
- [2] 王成. 桩基计算理论与实例[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010.
- [3] JGJ 106-2003, 建筑桩基检测技术规范[S].
- [4] 徐至钧,赵锡宏. 建筑桩基设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [5] 李斌. 反射波法在桩身完整性检测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(s2): 35-37.
- [6] 杜占鹏,徐兵,顾夏贤. 多层地基土中钻孔灌注桩桩身轴力试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 186-187.
- [7] 吴雄志,贾志刚,涂兵雄. 水泥土桩荷载传递性状的数值分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2007, 24(1): 4-7.
- [8] 张学辉,李其廉. 高轴力下钢筋混凝土异形柱节点受力性能研究[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(5): 237-242.
- [9] 许旭堂,吴能森,崔广强,龚灿宁,肖勇杰. PHC管桩极限承载力影响因素敏感性分析[J]. 河北工程大学学报;自然科学版, 2012, 29(2): 29-32.
- [10] 潘艳辉,石明生,葛明明. 钢筋计在PHC管桩中的试验方案分析[J]. 西部探矿工程, 2007(11): 57-59.

(责任编辑 马立)