

桩基承载力自平衡测试技术及应用研究

钱宝源¹, 叶俊能², 陈忠¹

(1. 宁波大学 地基处理中心, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通工程建设指挥部, 浙江 宁波 315012)

摘要: 结合工程实例, 介绍了桩承载力自平衡试验的原理和方法. 探讨了大直径、超长钻孔灌注桩的竖向承载性状, 分析了桩端压浆对于提高桩基承载力的作用, 研究了桩侧阻力和桩端阻力的发展规律及注浆前后的变化. 测试结果表明: 桩端压浆对提高桩基承载力, 改善桩基沉降效果显著; 桩端承载力提高 3 264 kN, 桩侧摩阻力提高较多, 为 6 290 kN; 同时也表明自平衡技术可广泛应用于桩基承载力测试.

关键词: 自平衡试桩法; 承载力; 压浆

中图分类号: TU432.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 02-0098-05

桩基是主要的基础工程之一, 它承担了上部建筑的全部荷载^[1]. 由于成桩工艺的固有缺陷(桩底沉渣和桩侧泥膜), 导致桩端阻力、桩侧阻力显著降低. 为了消除桩底沉渣等隐患, 国内外将地基处理灌浆技术引进到桩基, 后压浆技术也就应时而生^[2]. 通常会采用锚桩法、堆载法或堆锚结合法来确定桩的实际承载力是否达到设计要求. 然而, 由于场地的限制, 超大超长和高吨位的桩采用上述方法已无法解决验桩的问题. 然而, 近几年发展起来的基桩自平衡法解决了一般荷载试验方法无法解决的验桩问题^[3-6].

例如某桥梁基础采用钻孔摩擦桩, 钻孔桩数量众多, 根据详勘地质报告(试桩区土层地质条件见表 1)揭示的情况来看, 地质条件较差. 因此为满足承载力要求, 钻孔桩设计桩长较长. 试桩参考地质钻孔 XZK321, 试桩有关参数见表 2.

为了测定各土层的桩侧摩阻力和选定持力层的桩尖阻力以及单桩承载力, 给予钻孔桩设计提供依据, 在试桩的基础上, 需要进一步完善钻孔灌注桩施工工艺; 桩端压浆、压浆情况见表 3, 其中, 总压浆量为 2 680 L, 最大压浆压力为 4 MPa.

表 1 试桩区土层地质条件

土层代号	土层名称	层底标高/m	桩侧摩阻力/kPa	桩尖允许承载力/kPa
1	亚砂土	-2.00	25	120
2	亚砂土	-14.60	35	160
1	淤泥质亚粘土	-36.20	20	80
2	亚粘土	-46.80	25	120
1	粘土	-57.00	22	90
1	粘土	-66.20	45	170
1	细砂	-76.30	55	250
2	亚粘土	-81.40	45	180
2-1	细砂	-83.05	50	220
1	粘土	-86.20	60	200
2	粘土	-88.00	40	170

1 自平衡试验方法

1.1 试验方法

1.1.1 测试原理

自平衡试桩法是接近于竖向抗压桩实际工作条件的试验方法, 其加载设备采用东南大学土木工程学院研制的专利产品——荷载箱, 它与钢筋笼连接后安装在桩身平衡点上, 并将高压油管 and 位移棒一起引到地面. 试验时, 从桩顶通过高压油管对荷载箱内腔施加压力, 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, 直至破坏.

1.1.2 轴向应力测试

基桩自平衡试验开始后, 荷载箱产生的荷载

表2 试桩参数

编号	桩径/m	桩顶标高/m	桩底标高/m	有效桩长/m	成桩形式	预估加载值/t	地质钻孔号
SZ1	Φ1.5	5.0	-85.0	90	钻孔灌注桩	3 000	XZK321
SZ2	Φ1.5	5.0	-85.0	90	钻孔灌注桩	3 000	XZK321

表3 压浆情况汇总表

管道	第一循环			第二循环			第三循环		
	时间	压力/MPa	压浆量/L	时间	压力/MPa	压浆量/L	时间	压力/MPa	压浆量/L
声测管 1	11:09~11:17	2	500	17:19~17:28	2	500	23:42~23:51	4	380
声测管 2	11:21~11:28	2	500	13:34~17:40	3	500	23:56~24:11	4	300

沿着桩身轴向往上、往下传递。假设基桩受荷后,桩身结构完好(无破损,混凝土无离析、断裂现象),则在各级荷载作用下混凝土产生的应变等于钢筋产生的应变,并通过量测预先埋置在桩体内的钢筋计可以实测到各钢筋应力计在每级荷载作用下所得的应力-应变关系,同时可推算出相应桩截面的应力-应变关系,那么相应桩截面微分单元内的应变亦可求得。由此便可求得在各级荷载作用下各桩截面的桩身轴力值及轴力、摩阻力随荷载和深度变化的传递规律。

1.1.3 实验仪器及设备

基桩自平衡试验采用的设备有荷载箱、电动油泵、电子位移器、数据采集仪等。轴向应力测试采用的仪器设备有钢筋应变计和应变采集仪。相关系统如图1所示。

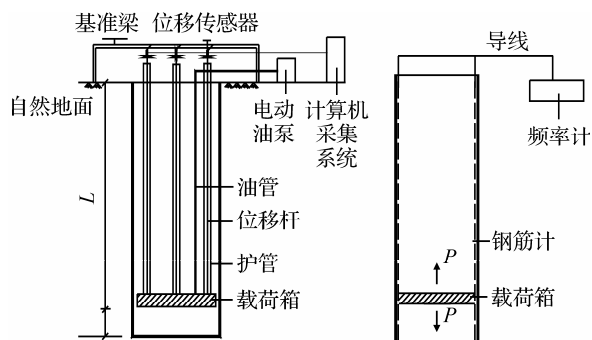


图1 桩基自平衡加载测试系统

1.2 测试系统

加载采用荷载箱,并通过高压油泵输油加载。试桩测试采用双荷载箱,下荷载箱设置于桩身距桩端1.5 m处,上荷载箱设置于桩身距桩端13.5 m处。试桩的位移量测采用电子位移计。

下荷载箱加载时,共架设6只电子位移计,2只测量下荷载箱向下位移,2只测量下荷载箱向上位移,2只测量上荷载箱底板位移。

上荷载箱加载时,共架设8只电子位移计,2只测量上荷载箱向下位移,2只测量上荷载箱向上位移,2只测量桩顶位移,2只测量下荷载箱顶板位移。

经应变计与电脑相联,由电脑控制量测并在电脑屏幕上实时显示 $Q-S$ 曲线、 $S-lgT$ 曲线和 $S-lgQ$ 曲线。

1.3 测试规程

加载采用慢速维持荷载法,测试按《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024-85)、《桩承载力自平衡测试技术规程》(DB32/T291-1999)进行。

1.4 单桩竖向抗压极限承载力等效转换曲线判断

将自平衡法获得的向上、向下2条 $Q-S$ 曲线通过转换等效为相应的传统静载方法获得的1条 $Q-S$ 曲线(等效转换曲线),并可根据等效转换曲线进行判断。

2 自平衡测试结果与分析

正式测试之前,采用声测法对桩身完整性进行检测,结果表明桩身砼浇灌质量良好;并进行桩身砼试块强度试验及弹性模量试验, $E = 3.74 \times 10^4$ MPa。

2.1 测试情况

桩径1500 mm,桩顶标高+5.00 m,桩底标高-85.00 m,进行桩端压浆,总压浆量为2680 L,最大压浆压力4 MPa。先进行下荷载箱测试,然后进行上荷载箱测试。在上荷载箱测试时,中段桩侧阻力不足以提供反力时,将下荷载箱油管封住后,将中段桩连接成一个整体共同承担上荷载箱向下的推力。测试顺序及工况如图2所示。

2.1.1 加载分级

下荷载箱设计加载值 2×9400 kN,上荷载箱设

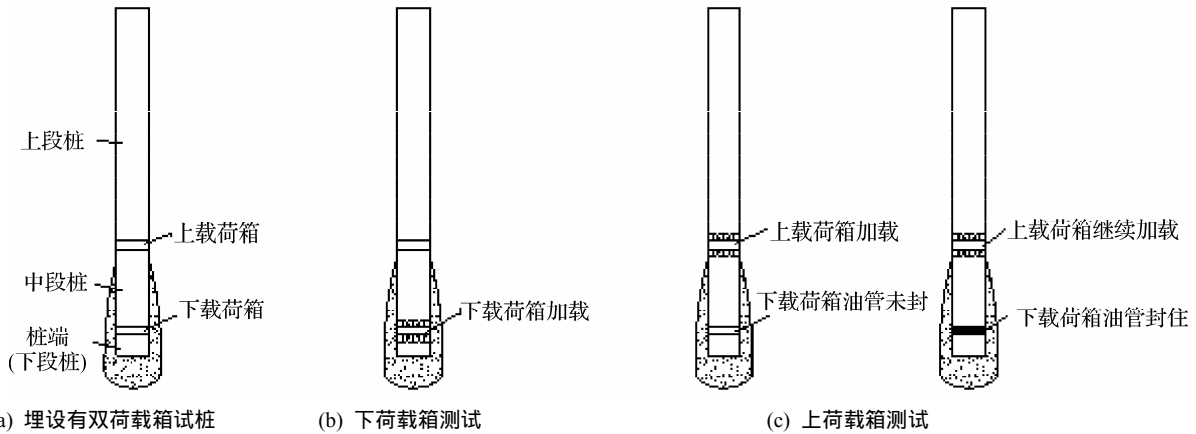


图2 测试顺序及工况

计加载值 $2 \times 15\,000\text{ kN}$, 每级加载为极限承载力的 $1/20$, 第一级按 2 倍荷载分级加载.

2.1.2 下荷载箱测试情况

测试加载至第 13 级($2 \times 6\,580\text{ kN}$), 向下位移超过 42.66 mm . 继续加载至第 14 级($7\,050\text{ kN}$), 向下位移发生突变, 超过 80 mm , 终止加载, 开始卸载. 实测结果见图 3 和表 4. 根据下荷载箱测试情况, 下段桩极限承载力为 $6\,580\text{ kN}$.

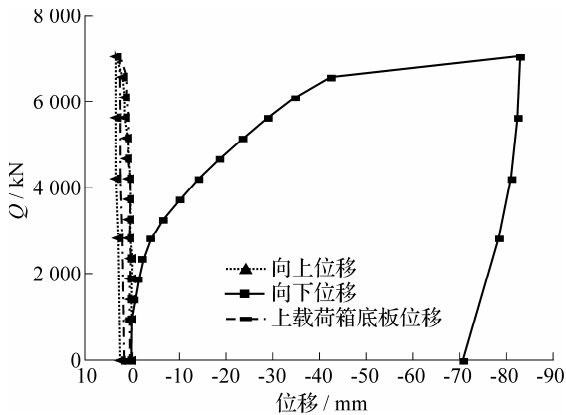


图3 压浆后下荷载箱自平衡测试曲线

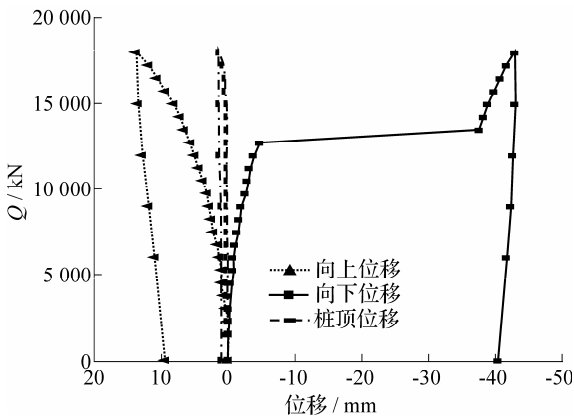


图4 试桩(压浆后)上荷载箱自平衡测试曲线

2.1.3 上荷载箱测试情况

测试加载至第 17 级($2 \times 13\,500\text{ kN}$), 向下位移发生突变. 为了继续加载测出上段桩的极限承载力, 将下荷载箱的油管封住. 加载至预定加载最大值第 19 级($2 \times 15\,000\text{ kN}$), 向上位移较小, 继续加载. 加载至第 23 级($2 \times 18\,000\text{ kN}$), 向上位移较小, 仍为 13.60 mm , 加载设备已达极限, 终止加载, 开始卸载. 实测结果见图 4 及表 4. 根据上荷载箱测试情况, 上段桩极限承载力为 $18\,000\text{ kN}$; 中段桩极限承载力为 $12\,750\text{ kN}$.

表4 试桩实测结果

试桩编号	下荷载箱	上荷载箱
预定加载值/kN	$2 \times 9\,400$	$2 \times 15\,000$
最终加载值/kN	$2 \times 7\,050$	$2 \times 18\,000$
荷载箱处最大向上位移/mm	3.46	13.60
向上残余位移/mm	2.32	9.23
上部桩土体系弹性变形/mm	1.14	4.37
荷载箱处最大向下位移/mm	82.98	-
向下残余位移/mm	70.84	-
下部桩土体系弹性变形/mm	12.14	-
桩顶向上位移/mm	-	1.14
桩顶残余位移/mm	-	0.99
上段桩压缩变形/mm	-	12.46

2.2 转换方法

在桩承载力自平衡测试中, 测定了荷载箱的荷载、垂直方向向上和向下的变位置, 以及桩在不同深度的应变, 从而可以计算轴力、摩阻力和截面位移.

2.2.1 轴力计算

应变变量可由桩身预埋的应变计读数求得, 其

计算公式为:

$$\varepsilon_s = K\varepsilon_r + B,$$

其中, ε_s 为应变计在某级荷载作用下的应变值; K 为应变计系数; ε_r 为应变计在某级荷载作用下读数; B 为应变计计算修正值。

在同级荷载作用下, 试桩内混凝土所产生的应变值等于钢筋所产生的应变值, 相应桩截面微单元内的应变值即为钢筋的应变值, 其计算公式分别如下:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s,$$

$$\sigma_c = \varepsilon_c E_c,$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s,$$

$$P_z = \sigma_s A_s + \nu \sigma_c A_c,$$

其中, ε_c 为某级荷载作用下桩身截面混凝土产生的应变值; σ_c 为某级荷载作用下桩身截面混凝土产生的应力值, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$; σ_s 为某级荷载作用下钢筋产生的应力值, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$; ν 为混凝土的塑性系数; E_c 为桩身混凝土弹性模量, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$; E_s 为钢筋弹性模量, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$; A_c 为桩身截面混凝土的净面积, m^2 ; A_s 为桩身截面纵向钢筋总面积, m^2 ; P_z 为某级荷载作用下桩身某截面的轴向力, kN . 在建立试桩标定截面处的 $P_z \sim P_{zi}$ 相关方程后, 各量测截面的桩身轴向力 P_z 值便可由相应的相关方程求得。

2.2.2 摩阻力计算

各土层桩侧摩阻力 q_s 可根据下式求得:

$$q_s = \Delta P_z / \Delta F,$$

其中, q_s 为桩侧各土层的摩阻力, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$; ΔP_z 为桩身量测截面之间的轴向力 P_z 差值, kN ; ΔF 为桩身量测截面之间桩段的侧表面积, m^2 。

2.2.3 截面位移计算

为了解桩侧土摩阻力 q_s 随桩身沉降 S 的变化规律, 即求得桩侧实测的传递函数 $q_s \sim S$ 关系, 需确定各计算深度处桩身位移 S_i 值, 计算方法如下:

$$S_i = S_{i+1} - \Delta_i,$$

其中, S_i 为第 i 计算截面处的沉降量, mm ; S_{i+1} 为 $i+1$ 计算截面处的沉降量, mm ; Δ_i 为第 $i+1$ 截面到第 i 截面间桩身的弹性压缩量, mm ; 按下式计算:

$$\Delta_i = (P_{z,i} + P_{z,i+1})L_i / 2A_n E_c,$$

其中, $P_{z,i}$ 为第 i 截面桩身轴向力, kN ; L_i 为第 $i+1$ 截面至第 i 截面处桩段长度, m ; A_n 为桩身换算截面面积, $\pi d^2 / 4 + nA_s (E_s / E_c - 1)$. 其中, d 为试桩

直径, mm ; n 为主钢筋根数; A_s 为单根主筋面积。

通过桩的应变和断面刚度, 由上述公式可以计算出轴向力分布, 进而求出不同深度的桩侧摩阻力, 并利用荷载传递解析方法, 将桩侧摩阻力与变位量的关系、荷载箱荷载与向下变位量的关系, 换算成桩顶荷载对应的荷载-沉降关系。

2.3 自平衡测试结果分析

2.3.1 极限承载力

采用等效转换方法, 根据已测得的各土层摩阻力-位移曲线, 转换至桩顶(+5.00 m), 等效转换曲线如图 5 所示, 等效转换曲线为陡变型, 等效转换曲线对应桩顶位移为 40 mm 的荷载情况见表 5。

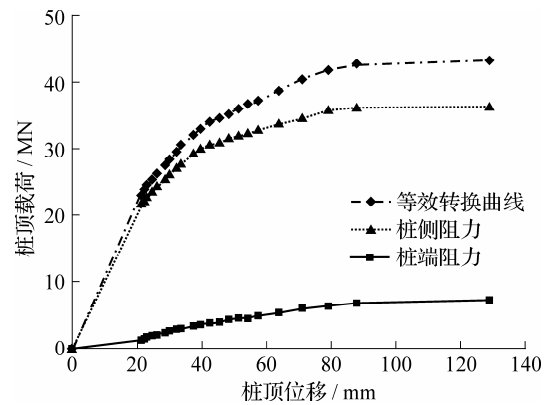


图 5 SZ2 试桩等效转换曲线

表 5 SZ2 试桩等效转换结果

桩身范围	+5.00 m~85.00 m
极限承载力/kN	42 567
承载力/kN	33 012
极限相应位移/mm	87.77
相应位移/mm	40.00
极限桩端阻力/kN	6 580(15.46%)
相应桩端阻力/kN	3 316(10.04%)
极限总侧摩阻/kN	35 987(84.54%)
相应总侧摩阻/kN	29 696(89.96%)

SZ2 试桩极限承载力取等效转换方法计算结果, 极限承载力为 42 567 kN, 相应的位移为 87.77 mm。

2.3.2 分层岩土摩阻力

SZ2 试桩的分层岩土摩阻力情况见表 6。

2.3.3 桩端承载力

根据 SZ2 试桩的桩端阻力-位移曲线, 取陡变点即第 13 级加载值为极限承载力. 桩端极限承载力(包括 1.5 m 桩侧摩阻力)为 6 580 kN, 相应位移为

表6 SZ2试桩各岩土层摩阻力

地层编号	岩土层名	深度/m	地质报告摩阻力值/kPa	实测摩阻力极限值/kPa	对应位移值/mm
2	亚砂土	-9.07~-14.60	35	30.66	8.20
1	淤泥质亚粘土	-14.60~-36.20	20	29.43	8.48
2	亚粘土	-36.20~-46.80	25	52.06	9.33
1	粘土	-46.80~-57.00	22	47.29	10.33
1	粘土	-57.00~-66.20	45	95.64	11.63
1	细砂	-66.20~-76.30	55	192.25	13.48
2	亚粘土	-76.30~-81.40	45	164.26	3.93
2-1	细砂	-81.40~-83.50	50	290.80	3.74

42.66 mm.

3 结论

利用自平衡试验测试了桩基承载力、桩端压浆对提高桩基承载力,改善桩基沉降效果显著。上段桩桩侧(不受压浆影响)的侧摩阻力约为地质报告计算侧摩阻力的1.75倍。根据钻孔灌注桩桩端极限承载力计算公式,清底系数取0.8时,桩端极限承载力计算值(包括1.5 m桩侧摩阻力)为3 664 kN,实测桩端承载力(包括1.5 m桩侧摩阻力)约为此值的1.80倍,该提高值可以认为是地质报告保守引起的。说明压浆对粘土持力层的桩端承载力提高较少,桩端以上13 m范围内砂土的侧摩阻力提高较多。建议在满足设计要求的情况下缩短桩长,将桩端持力

层改在₂₋₁细砂层,这样产生的压浆效果较好。

参考文献:

- [1] JGJ94094. 建筑桩基技术规范[S].
- [2] Osterberg J. New device for load testing driven piles and drilled shaft separates friction and end bearing[J]. Piling and Deep Foundations, 1989(1):421-427.
- [3] DB32PT291099. 桩承载力自平衡测试技术规程(江苏省地方标准)[S].
- [4] 龚维明, 蒋永生, 翟晋. 桩承载力自平衡测试法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5):532-536.
- [5] 戴国亮, 龚维明, 程晔, 等. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6):690-694.
- [6] 邓立志, 雷金山, 陆海平, 等. 超长桩承载力自平衡试验及其应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(5):50-56.

Application of Self-balanced Method in Bearing Capacity Testing of Pile

QIAN Bao-yuan¹, YE Jun-neng², CHEN Zhong¹

(1. Soil Improvement Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Urban Rail Transit Project Construction Headquarter, Ningbo 315012, China)

Abstract: In this paper, the self-balance test principle and method are introduced in combination with a case-study. The vertical bearing behavior of large diameter and super-longhole bored pile are analyzed, and the effect of grouting on improving the bearing capacities of piles is discussed. The development of the pile side resistance and pile tip resistance at the pre and post of grouting are investigated. The results show that the grouting can improve the bearing capacities of piles and decrease the settlement obviously, 3 264 kN for the tip resistance and 6 290 kN of the pile side resistance are achieved. The application suggests that the proposed test method has numerous advantages in the testing of large capacity pile in the sea, and the method is expected to be extended in its applications.

Key words: self-balanced testing method; grouting; bearing capacity

(责任编辑 章践立)