

# “四线图”法在基桩承载力检测中的应用分析

徐学连

上海申元岩土工程有限公司

**摘要:** 本文主要介绍了一种分析自平衡测桩数据的“四线图”法, 将上段桩和下段桩视作两根独立的单桩, 通过绘制曲线 $Q \sim s_{上}$ 、 $Q \sim s_{顶}$ 、 $Q \sim \Delta s$ 、及 $Q \sim s_{下}$ , 分别确定其极限承载力。另外, 还提出了一种从理论上将比例系数 $\lambda$ 精细化的方法, 引入了土体的正摩阻力和负摩阻力的比值 $k_r$ , 在此基础上对比例系数 $\lambda$ 进行了相应的推导, 最后得到更为精确的整桩极限承载力。

**关键词:** 自平衡; “四线图”法; 比例系数; 极限承载力

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.01.063

## 引言

当前, 随着高速铁路、地铁、跨海大桥、超高层建筑等工程项目的不断涌现, 桩基础已经成为最主要的基础形式之一。基桩承载力检测的方法主要有堆载法、锚桩法、高应变法。此类方法主要适用于场地较开阔的工程, 要求现场地基具有一定的承载力, 并具备车辆机械通行的条件。堆载法的成本较高, 需要耗费大量的人力和物力, 同时受到现场条件和静载平台尺寸的制约, 无法对较高承载力的基桩进行检测。锚桩法需要在试桩周边打设锚桩, 该方法不仅需要合适的锚桩场地, 而且施工锚桩的费用较高, 对于较高承载力的基桩, 往往需要施工多根锚桩。高应变法检测的前提是将基桩假设为一维弹性杆件, 检测结果受环境、操作人员的水平等各个因素影响较大, 往往无法获得基桩真实的承载力值。

因此, 为解决传统基桩检测方法的缺陷, 国内外学者提出了采用自平衡法进行基桩的检测。自平衡法的试验设备简单, 不占用场地且试验费用较低, 适用于各类深基坑桩、海上桩、桥桩等, 已经成为大吨位桩、超长桩的主要检测方法之一<sup>[1]</sup>。

美国学者早在20世纪80年代中期就已开展了自平衡法的研究, 此后该方法在全球多个国家地区得到了应用。1996年, 东南大学率先对自平衡法进行了深入研究, 同时做了大量的试验, 通过工程应用和实践, 研发了多种受力状态下的荷载箱形式和检测分析方法, 并牵头制订了相关行业规范<sup>[2]</sup>。

自平衡法的测试曲线分析、极限承载力确定是影响试验结果准确性的关键因素之一。目前, 主要采用等效转换的方法, 将自平衡测试曲线转换成传统静载测桩法的 $Q \sim s$ 曲线, 并通过结合公式和经验得出整桩的极限承载力。国内学者认为在这一方面具有一定的改进空间<sup>[3-4]</sup>。

## 一、自平衡法的检测机理

自平衡法和传统方法的检测机理有较大的区别, 自平衡法的作用力位于桩身, 而堆载法和锚桩法的作用力位于桩顶, 如图1所示。

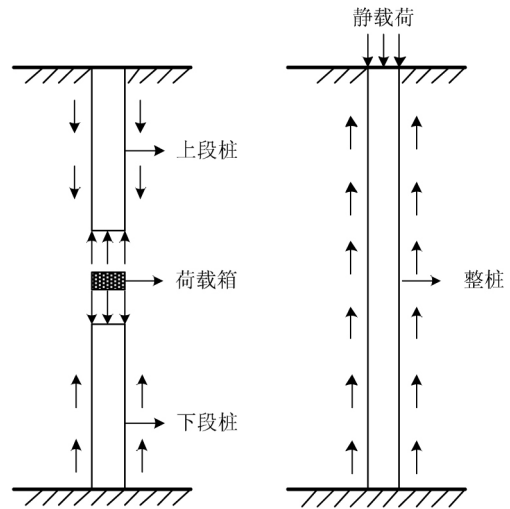


图1 自平衡法与传统方法的对比图

采用传统方法测桩, 需要在桩顶施加荷载, 并采集桩顶的位移, 通常需要体积庞大的配重块和较大的作业面积, 对试验的环境要求较高<sup>[5]</sup>。

采用自平衡法测桩, 需在桩身埋设荷载箱。荷载箱主要由液压油管、上顶板、下顶板和液压千斤顶组成。

在进行加载检测时, 仅需要将液压泵站、传感器等轻便型设备运至现场, 无其他大型设备。因此, 可解决大量的劳力及机械成本。

检测过程中, 荷载箱同时对上段桩和下端桩施加作用力, 荷载箱的作用力可由压力传感器测得, 通过分级加载, 上、下段桩的位移由位移传感器进行采集。采用自平衡法、传统方法测桩的对比, 如表1所示。

表1 自平衡法与传统方法测桩的对比

检测方法	作用力			数据采集	曲线绘制
	形式	作用点	方向		
传统方法	配重块或者锚桩	桩顶	竖直向下	压力值及位移值	$Q \sim s$ $S - 1gT$ $S - 1gQ$
自平衡法	荷载箱	桩身	竖直向上和向下	压力值及位移值	上、下段桩: $Q \sim s$ $S - 1gT$ $S - 1gQ$ 整桩: 等效转换的 $Q \sim s$ 曲线

## 二、“四线图”法的原理

### (一) 规范方法

规范中提出通过测得上段桩数据 $Q$ 、 $s_{上}$ , 下段桩数据 $Q$ 、 $s_{下}$ , 分别绘制 $Q \sim s_{上}$ 曲线和 $Q \sim s_{下}$ 曲线, 并采用等效转换的方法, 将曲线 $Q \sim s_{上}$ 和 $Q \sim s_{下}$ , 转换成传统静载测

桩法的 $Q \sim s$ 曲线。这种等效转换方法分为简化转换法和精确转换方法，两种转换方法的原理基本相同<sup>[6]</sup>。两种转换方法均假定了桩基是弹性体，荷载箱的埋设位置为自平衡桩的平衡点，由此将试桩分为分为上段桩和下段桩。

根据受力特性，可认为等效受压桩（传统静载试验法）的下段桩与自平衡检测法的下段桩的位移值是一致的。自平衡检测法上段桩位移值可认为荷载箱下段桩受到的荷载值及上段桩受到向上荷载值所引起的弹性压缩变形量之和。

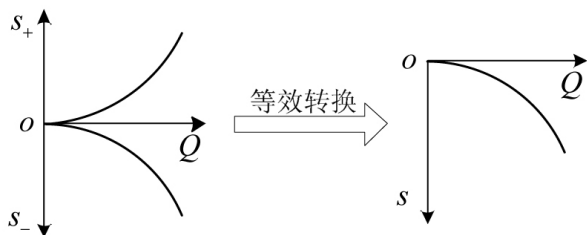


图2 等效转换法示意图

但是，当采用自平衡法进行测桩时，上段桩和下段桩同时进行施加荷载，但是两段桩体的受力特性、桩侧土体性质是完全不同的，导致 $s_+$ 、 $s_-$ 的差异性较大。采用等效转化的方法并不能精确地拟合得到 $Q \sim s$ 曲线。

### (二) “四线图”法

“四线图”法即采用自平衡法测试得到上段桩数据 $Q$ 、 $s_+$ 、 $s_顶$ ，下段桩数据 $Q$ 、 $s_-$ ，另外上段桩增加位移差数据 $\Delta s$  ( $\Delta s = s_顶 - s_+$ )，分别绘制曲线 $Q \sim s_+$ 、 $Q \sim s_顶$ 、 $Q \sim \Delta s$ 、及 $Q \sim s_-$ ，如图3所示。

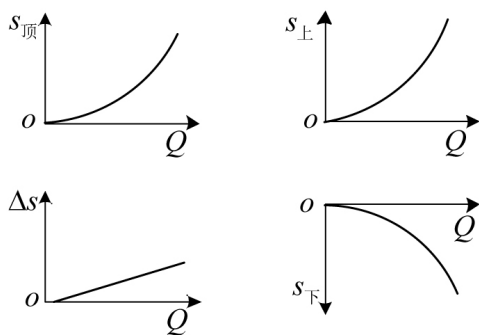


图3 “四线图”法示意图

采用“四线图”法将上段桩和下段桩视为两根独立的桩体进行静载试验，试验曲线进行独立分析，且无需转化成传统静载测桩法的 $Q \sim s$ 曲线。分析“四线图”，分别得到上段桩和下段桩的极限承载力，采用相应的转换公式将两段桩的极限承载力转化成整桩的极限承载力。

### 三、“四线图”法的机理分析

#### (一) 极限承载力的分析

由上文所述，“四线图”法认为采用自平衡法测试过程中，上段桩和下段桩为两根独立的单桩，因此两段桩体各自得到相应的测试曲线，通过对曲线的分析，得

到上段桩的极限承载力以及下段桩的极限承载力，随后采用相关公式进行计算，可以得到较为精确的整桩极限承载力 $Q^e$ ，文中公式使用符号 $e$ 代表极限值<sup>[7]</sup>：

$$Q^e = \frac{Q_上^e - G}{\lambda} + Q_下^e \quad (1)$$

式中： $Q^e$ 为整桩极限承载力值； $Q_上^e$ 为上段桩极限承载力值； $G$ 为上段桩自重； $\lambda$ 为比例系数； $Q_下^e$ 为下段桩极限承载力值。

根据图所示曲线，可以得到一下分析结果：

(1)  $Q \sim s_上$ 、 $Q \sim s_顶$ 及 $Q \sim s_-$ 均达到极限条件，且 $Q \sim \Delta s$ 未出现桩体破坏现象，则可根据公式，计算得到整桩的极限承载力。

(2)  $Q \sim s_顶$ 未达到极限条件， $Q \sim s_上$ 达到极限条件， $Q \sim \Delta s$ 出现桩体破坏现象，判断上段桩是否存在质量问题。

(3)  $Q \sim s_上$ 、 $Q \sim s_顶$ 均达到极限条件，且 $Q \sim \Delta s$ 未出现桩体破坏现象， $Q \sim s_-$ 未达到极限条件，则可根据公式，计算得到整桩的承载力小于其实际的极限承载力，结果偏于保守。

(4)  $Q \sim s_上$ 、 $Q \sim s_顶$ 均未达到极限条件，且 $Q \sim \Delta s$ 未出现桩体破坏现象， $Q \sim s_-$ 达到极限条件，则可根据公式，计算得到整桩的承载力小于其实际的极限承载力，结果偏于保守。

对于(3)、(4)两种情况，可根据工程的实际情况，进行进一步的加载以到达极限状态。

#### (二) 比例系数“ $\lambda$ ”的取值

根据桩基规范<sup>[8]</sup>，单桩竖向极限承载力值可由下式计算：

$$Q^e = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (2)$$

式中： $u$ 为桩身周长； $q_{sik}$ 为第 $i$ 层桩周土的极限侧阻力； $l_i$ 为第 $i$ 层桩周土的厚度； $q_{pk}$ 为桩端处的极限阻力； $A_p$ 为桩端面积。

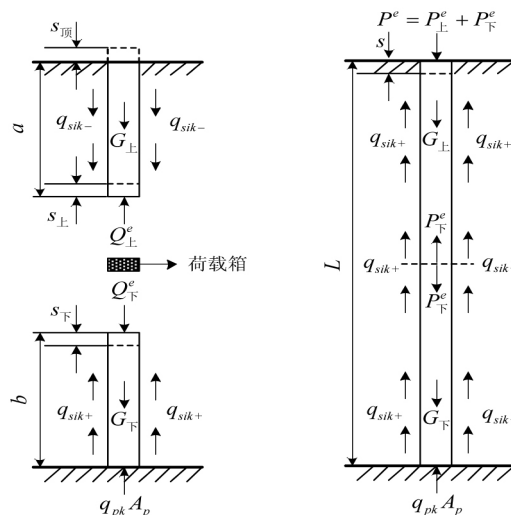


图4 自平衡法和传统方法的作用力对比

如图4所示, 采用自平衡法测试过程中, 上段桩受到荷载箱提供的上推力作用, 被向上顶起, 此时可以认为上推力  $Q_{\pm}^e$  由上段桩的桩周土产生的负摩阻力  $u \sum q_{sik-l_i}$  和上段桩自重  $G_{\pm}$  进行平衡, 桩顶面为临空状态, 故不存在阻力  $q_{pk} A_p$ , 因此, 上推力可推导得到:

$$Q_{\pm}^e = u \sum q_{sik-l_i} + G \quad (3)$$

如图所示, 对上述试桩采用传统静载测桩法过程中, 同样将试桩分为上段桩和下段桩, 两者下段桩的受力是相同, 且  $Q_{\mp}^e = P_{\mp}^e$ , 上段桩的桩顶受到静载荷  $P^e$ , 桩端受到反力  $P_{\mp}^e$ , 桩身受到桩周土产生的正摩阻力  $u \sum q_{sik+l_i}$  以及上段桩自重  $G_{\pm}$ , 故得到:

$$\left. \begin{aligned} P^e &= P_{\pm}^e + P_{\mp}^e \\ P^e &= u \sum q_{sik+l_i} + P_{\mp}^e - G_{\pm} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由上式整理得到采用传统静载测桩法时, 上段桩的极限承载力值:

$$P_{\pm}^e = u \sum q_{sik+l_i} - G_{\pm} \quad (5)$$

在同一土层中, 土体的正摩阻力和负摩阻力可以通过实验手段获得, 假设两者的比值为  $k_i$ , 故得到:

$$k_i = \frac{q_{sik+}}{q_{sik-}} \quad (6)$$

$k_i$  在同一土层是相对稳定的数值, 假设上段桩桩周所有土层的正摩阻力和负摩阻力比值为  $K_i$ , 则可得到:

$$K_i = \frac{\sum q_{sik+l_i}}{\sum q_{sik-l_i}} = \frac{\sum k_i q_{sik-l_i}}{\sum q_{sik-l_i}} \quad (7)$$

$$K_i = \frac{P_{\pm}^e + G_{\pm}}{Q_{\pm}^e - G_{\pm}} \quad (8)$$

因此, 根据公式、整理得到比例系数  $\lambda$  和整桩极限

承载力值  $Q^e$  的精确表达式:

$$\lambda = \frac{Q_{\pm}^e - G}{K_i(Q_{\pm}^e - G) - G} \quad (9)$$

$$Q^e = K_i(Q_{\pm}^e - G_{\pm}) + Q_{\mp}^e - G_{\pm} \quad (10)$$

#### 四、结语

随着越来越多超大直径、超深基桩的出现, 自平衡检测方法的应用将越来越广泛。因此, 采用该方法进行检测的承载力值计算显得尤为重要。自平衡法测试单桩极限承载力, 采集的数据与传统方法差异性较大。因此需要将自平衡检测数据通过精确转换拟合和科学分析, 得出最为接近的承载力值。

采用“四线图”法分析自平衡法数据时, 将上段桩和下段桩视为同时进行静载试验的两根单桩, 根据“四线图”的分析法则, 能够更好地判断上、下段桩的极限承载力。另外, 本文提出了一种从理论上将比例系数  $\lambda$  精细化的方法, 引入了土体的正摩阻力和负摩阻力的比值  $k_i$ , 通过  $k_i$  推导出比例系数  $\lambda$  和整桩极限承载力值  $Q^e$ , 从而避免了依靠经验设定  $\lambda$  的数值。

本文提出的“四线图”法和比例系数  $\lambda$  精确化的计算方法, 在原理上易于理解, 在实际的应用中仍需要大量的工作去检验和完善, 目的是将自平衡法能更好地服务工程项目, 推动检测方法的应用和发展。

#### 参考文献

- [1] 戴国亮. 桩承载力自平衡测试法的理论与实践[D]. 东南大学, 2003.
- [2] 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(05): 532-536.
- [3] 王伯惠. 评桩基测试自平衡法[J]. 公路, 2005(07): 24-32.
- [4] 徐风云, 黄文机. 桩承载力自平衡法存在的几个关键问题[J]. 公路, 2005(04): 42-46.
- [5] 龚维明, 戴国亮. 桩承载力自平衡法的几个关键问题讨论[J]. 公路, 2005(08): 24-27.
- [6] JGJ 106-2014, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [7] JT/T 738-2009, 基桩静载试验自平衡法[S].
- [8] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S].

作者简介: 徐学连(1987-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要研究方向为岩土工程设计与施工。