

自平衡桩基静载试验在工程中的应用

□ 杜 静

[摘 要] 本文依托实际工程，采取自平衡桩基静载试验对桩基承载力进行检测，说明自平衡桩基静载试验的试验原理、试验参数的选取及试验过程，并对试验数据进行分析，总结Q～s曲线规律，算出试桩的极限承载力、桩侧阻力和桩端阻力，结合检测结果，对试验桩的承载力进行评价，也可为类似工程提供参考。

[关键词] 自平衡桩基静载试验；Q～s曲线；后注浆；极限承载力

桩基础是一种最为常见的基础形式，在高层建筑、公路、桥梁、水利及港口工程中应用极其广泛。桩基础属于地下隐蔽工程，尤其是灌注桩，容易出现夹泥、缩颈、断桩或桩底沉渣过厚等问题，这些质量缺陷严重影响桩身的结构完整性和承载力，因此必须对基桩进行质量检测^[1]，以减少隐患，这也是保障地下结构安全稳定的有效措施，对保证工程质量至关重要。传统的基桩荷载试验方法有堆载法和锚桩法，前者需要大量的堆载，后者需要设置锚桩及反力大梁，不仅耗时长、费用高，存在一定的危险性，而且对试验场地要求高。甚至受到荷载吨位、交通运输、场地条件等限制，许多桩基检测试验无法正常开展。

20世纪80年代，美国学者Osterberg提出了自平衡法，将荷载箱预埋在桩底，通过试桩自身的反力平衡，测试桩基的端阻力和桩侧摩阻力^[2]。20世纪90年代，清华大学教授李广信首次将自平衡法引进国内^[3]，随后，龚维明团队在国内开始自平衡法的实用性研究和应用，并制定了相应规程进行推广^[4]。目前，自平衡法已在全国20多个省市的多个工程中应用。

1 自平衡桩基静载试验原理

自平衡桩基静载试验是将一种特殊设计的加载设备——荷载箱，与钢筋笼焊接在一起，埋入桩的指定位置，浇筑混凝土成桩，待混凝土强度达到设计强度后，由高压油泵向荷载箱充油施压，利用桩身自重、桩侧阻力及桩端阻力相互提供反力的试验方法^[5-7]，试验装置原理如图1所示。与传统的堆载法和锚桩法相比，自平衡法桩基静载试验具有以下优点：

第一，试验装置简单，运输方便，试验占地面积较

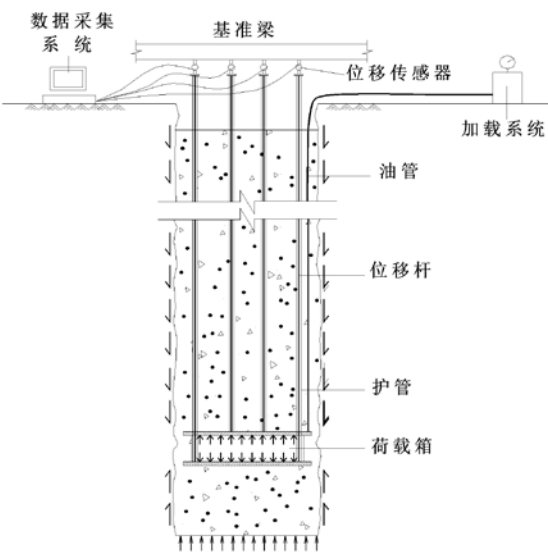


图1 自平衡法检测示意图

小，无须堆载和大型反力架，安全省事。第二，节省时间，当土体稳定或压浆达到设计强度即可测试，几根桩可同时测试，大大节省了试验时间。第三，试验后测试桩可作为工程桩使用。第四，试验费用低，相比传统方法可节省30%～60%成本。第五，应用范围广，可应用到水上试桩、坡地试桩、狭窄场地试桩、斜桩、嵌岩桩等复杂工况^[8-9]。

除此之外，由于沿试桩桩身安装了应力（变）计和位移测点，自平衡法静载试验还可得到桩侧各土层的分层摩阻力和端阻力，不仅可以用于工程桩承载力检测，也可为桩基优化和设计提供依据。因此，自平衡法在桩基承载力测试中得到广泛应用^[10-12]，工程技术人员对

其也进行了大量的研究。自平衡法因提供反力的方式与传统静载试验不同，故而荷载传递规律与桩侧摩阻力发挥不同于传统静载试桩，技术人员对此开展大量对比试验，蔡雨等开发自平衡室内模型试验装置，实行上、下段桩加载分离，避免因加载点位置设置不当，导致某段桩无法测得极限承载力的问题^[13]。陈雪峰对7个自平衡试桩项目30根自平衡试桩的平衡点位置进行统计分析，明确平衡点设置在桩身长度的1/5～1/3处（距桩端），能够提高自平衡试桩的成功率^[14]。徐长节等在试验中发现自平衡法试桩的上部桩与静载法试桩的桩身受力特性差别较大^[15]，前者桩侧摩阻力由下及上发挥，后者桩侧摩阻力由上及下发挥。自平衡法试桩经转换后的Q～s曲线较平滑，加载值两种方法的Q～s曲线有一定差异，随着加载值的增大，两者的曲线趋于一致。

本文结合实际工程对自平衡桩基静载试验的工程应用进行探讨，说明自平衡桩基静载试验的试验原理和试验过程，并结合具体的检测试验结果，对试验桩的承载力进行评价，希望对自平衡桩基静载试验在实际工程应用中提供一定的参考^[11]。

2 工程应用

2.1 工程概况

本工程位于南宁市，场地较平整，根据勘察单位提供的资料，土层自上而下分为素填土、细砂、强风化岩层和中风化岩层。

（1）素填土：黄褐色、灰褐色，结构松散，稍湿，主要由粉质黏土组成，表层含植物根系，揭示层厚2.10m～13.50m，层底高程79.03m～87.88m，属高压缩性土。

（2）细砂：灰色、黄色，湿～稍湿，松散状，矿物成分为长石、云母、石英等，揭示层厚1.80m～10.80m，层底高程76.92m～81.96m，取扰动土试样6组做颗粒筛分，粒径大于0.075mm的颗粒质量平均占比为91.24%。

（3）强风化岩层（E_{3b}）：青灰色、灰褐色，泥质结构，岩体较完整，呈硬塑土状，层厚1m～10.80m，层底高程48.50m～84.48m。属极软岩，岩体完整程度为较破碎，岩体基本质量等级分类为Ⅴ级。

（4）中风化砂质泥岩：红褐色、青灰色，泥砂质结构，岩体较完整，未钻穿该层。属极软岩，岩体完整程度为较完整，岩体基本质量等级分类为Ⅴ级。

2.2 试桩概况

按照《建筑桩基检测技术规范》（JGJ 106—2014）^[16]第3.3.4条，《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》（GJ/T 403—2017）^[5]第3.1.1条，受检基桩数量不应小于同一条件下基桩分项工程总桩数的1%，且不应小于3根，故本工程随机抽取6根工程桩进行承载力检测，桩号命名为SZ1～SZ6。根据《岩土工程勘察报告》中提供的各土层侧摩阻力，计算出单桩竖向极限承载力，并结合超前钻成果，确定SZ1、SZ3、SZ4三根试桩不做后注浆处理，以持力层中风化砂质泥岩10m控制试桩桩长，SZ2、SZ5、SZ6三根试桩进行后注浆处理，并按此三根桩的侧阻力的1.3倍计算出的单桩极限承载力大于等于13000kN控制桩长。按《建筑桩基技术规范》（JGJ 94—2008）第5.3.6条计算单桩竖向极限承载力标准值，并计算出各桩极限承载力及荷载箱安装位置，试桩信息如表1所示。

2.3 试验过程

试验按《建筑桩基检测技术规范》和《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》进行，采用慢速维持荷载法逐级加载。每级加载值为预估试验最大加载值的1/20，第一级按两倍荷载加载，每级荷载达到稳定后进行下一级加载，直至试桩破坏或达到试验要求，然后分级卸载^[6]。SZ1～SZ6的Q～s曲线分别如图2—图7所示。以不注浆的SZ1和注浆的SZ5为例进行说明，SZ1和SZ5桩预估试验最大加载值分别为14800×2kN和13000×2kN，分20级进行加载，SZ1加载至13320×2kN时，上段位移增量为6.16mm，下段沉降量为18.11mm，比前一

表1 试桩信息表

试桩号	桩径（mm）	桩长（m）	是否后注浆	极限承载力（kN）	荷载箱安装位置	注浆后预估极限承载力（kN）	预估试验最大加载值（kN）
SZ1#	1200	54.50	否	19722	距桩底14m	/	14800×2
SZ2#	1200	36.02	是	10392	距桩底11m	13001	13000×2
SZ3#	1200	57.60	否	20257	距桩底14m	/	15200×2
SZ4#	1200	58.20	否	22921	距桩底18m	/	17200×2
SZ5#	1200	37.91	是	10392	距桩底10.50m	13001	13000×2
SZ6#	1200	37.66	是	10379	距桩底10.50m	13000	13000×2

[基金项目] 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（编号：2021KY1133）研究成果；广西交通职业技术学院自然科学研究项目（编号：JZY2019KAZ05）研究成果。

[作者简介] 杜 静，广西交通职业技术学院，副教授，硕士。

级荷载作用下位移分别增加9倍和35.5倍；SZ5加载至9750×2级荷载，较前一级荷载作用下位移分别增加1.1倍和11.6倍，根据《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》JGJ/T 403—2017^[2]第4.3.4条：“某级荷载作用下，荷载箱上段或下段位移增量大于前一级荷载作用下位移增量的5倍，且位移总量超过40mm”，终止加载。

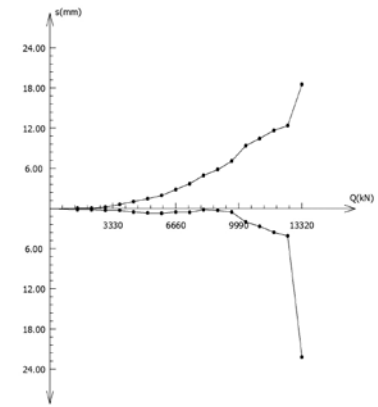


图2 SZ1试桩Q~s曲线图

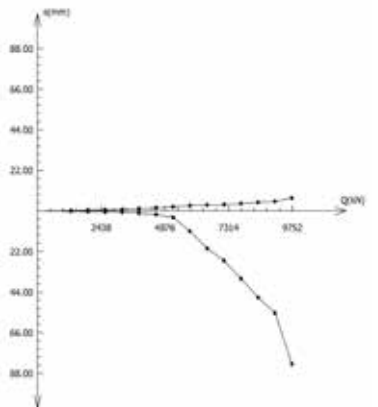


图3 SZ2试桩Q~s曲线图

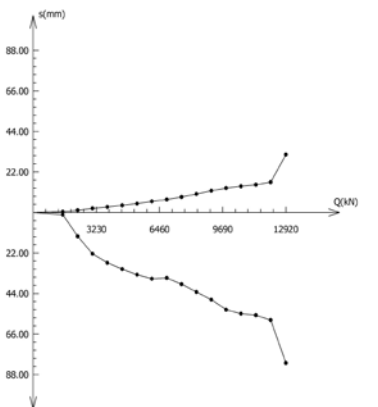


图4 SZ3试桩Q~s曲线图

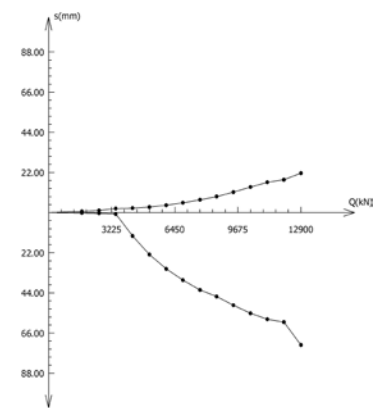


图5 SZ4试桩Q~s曲线图

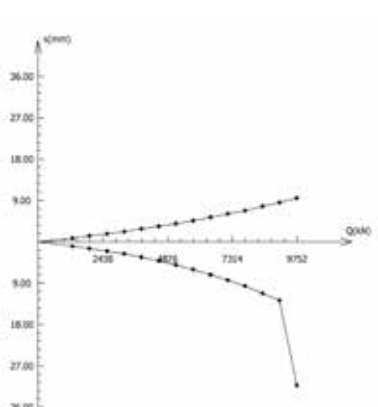


图6 SZ5试桩Q~s曲线图

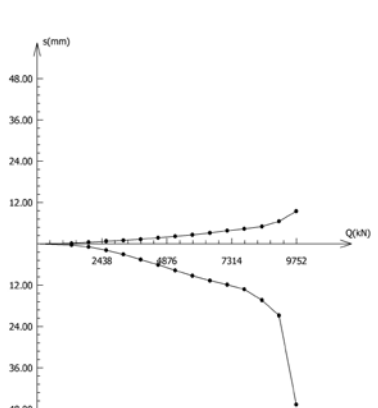


图7 SZ6试桩Q~s曲线图

2.4 结果分析

通过试桩Q~s曲线发现，SZ1、SZ3~SZ6试桩的荷载—位移变化曲线均为陡变型曲线，根据《建筑基桩

自平衡静载试验技术规程》，对于陡变型曲线，确定极限加载值时，取曲线发生明显陡变的起始点对应的荷载值^[2]。因此SZ1、SZ3~SZ6试桩的极限加载值分别为：12580kN、12160kN、12040kN、9100kN和9100kN。SZ2试桩本次试验曲线属于缓变型曲线，按照《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》，缓变型曲线极限加载值可由位移量确定^[2]，因此，SZ5试桩的极限加载值为9100kN。

2.5 数据处理及评价

根据各试桩的极限加载值，可按下式确定试桩的单桩竖向抗压极限承载力^[2]：

$$Q_u = \frac{(Q_{uu} - W)}{\gamma_1} + Q_{ud}$$

式中： Q_u 为单桩竖向承载力极限值，kN； Q_{uu} 为上段桩的极限加载值，kN； Q_{ud} 为下段桩的极限加载值，kN； W 为荷载箱上段桩自重与附加重量之和，kN； γ_1 受检桩的抗压摩阻力转换系数^[2]。

通过计算可得到每根桩的单桩极限承载力，见表2，实测极限承载力较地勘测算的极限承载力均有增大，3根后注浆的试桩极限承载力增大明显，均增加1.7倍以上。

表2 自平衡法静载试验承载力极限值				
检测桩号	桩径（m）	测算极限承载力（kN）	单桩竖向承载力极限值（kN）	增加倍数
SZ1	1.20	19722	24260	1.23
SZ2	1.20	10392	17745	1.71
SZ3	1.20	20257	23536	1.16
SZ4	1.20	22921	24790	1.08
SZ5	1.20	10392	181110	1.74
SZ6	1.20	10379	17768	1.71

3 结语

- （1）自平衡法省时省力，安装简单、不受场地限制，无须配重，可进一步推广应用。
- （2）在计算单桩竖向承载力极限值的公式中，抗压摩阻力转换系数只是通过工程实践经验获得，缺乏理论计算，有待进一步探索。
- （3）在测试中，6根试桩的Q~s曲线上、下段桩的位移变化有所不同，上段桩曲线变化平缓，位移较小，没有出现突变；而下段桩位移较大，曲线出现突变，这

说明测试中上、下段桩没有同时达到极限承载力，荷载箱的安装位置并不是桩的平衡点位置。

（4）后注浆试桩的承载力极限值较由地勘测算的极限值增大1.7倍以上，桩基施工工艺可采用后注浆处理方式，为保证注浆质量，主要可采用桩端桩侧复式注浆，并注意浆液水灰比及注浆流量，注浆顺序为先桩侧后桩端。

[参考文献]

[1]白建光,王国忠,朱守林,等.基础工程[M].北京:北京理工大学出版社,2016:80—85.
[2]何春林,龚成中.大直径深嵌岩桩两种原位试验方法对比分析[J].公路,2012(12):7—11.
[3]刘朝钢,方磊,黄锋,等.OSTERBERG测桩法模型试验研究[J].铀矿地质,1996(6):369—374.
[4]龚维明,戴国亮,蒋永生,等.桩承载力自平衡测试理论与实践[J].建筑结构学报,2002(1):82—88.
[5]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基桩自平衡静载试验技术规程:JGJ/T 403—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
[6]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:中国建筑工业出版社,2005:1—9.
[7]胡艳.自平衡法静载试验在桥梁基桩检测中的应用[J].山西建筑,2014,40(14):220—221.
[8]赵东,韩祺,夏浪,等.基桩自平衡检测法技术的应用研究[J].粘接,2020,44(11):159—161+171.
[9]王贤栋,邢皓枫.自平衡试桩法的研究进展[J].江西建材,2021(4):11—13.
[10]穆保岗,龚维明,黄思勇.天津滨海新区超长钻孔灌注桩原位试验研究[J].岩土工程学报,2008(2):268—271.
[11]王文学.基桩自平衡法承载力检测的应用探究[J].山西建筑,2020,46(11):81—83.
[12]毛宗原,毛刚,张强.灌注桩承载力自平衡法应用及试验特性研究[J].工程技术研究,2020,5(12):58—59.
[13]蔡雨,徐林荣,周德泉,等.自平衡与传统静载试桩法模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(8):3011—3018.
[14]陈雪峰.自平衡试桩平衡点位置研究[J].现代交通技术,2020,17(2):38—42.
[15]徐长节,李碧青,蔡袁强.自平衡法试桩的承载特性试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(7):1262—1268.
[16]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.