

自平衡桩基试验法在深厚软土地区高架车站中的应用研究

沈 华¹, 邢如祥², 王筱萌³, 李家旺⁴

(1. 湖州市交通工程质量管理服务中心, 浙江 湖州 313000; 2. 中铁十五局集团有限公司, 上海市 200070;

3. 中铁十五局集团第二工程有限公司, 上海市 200070; 4. 浙江如通苏湖城际铁路有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘 要: 为了验证如通苏湖城际铁路南浔高架站特大桥复杂地质条件下重要桥梁桩基的容许承载力, 选取2根钻孔灌注桩, 桩径1.0 m, 桩长70 m, 在原桩上进行自平衡桩基试验, 桩身内力测试采用分布式光纤法, 通过在桩身内布设传感光纤, 形成传感网络, 荷载箱加压后, 计算传感信号数据得到试桩各段桩侧阻力和桩端阻力, 分析得到了测试数据与勘察资料参数、铁路行业规范推荐参数的误差在合理范围内, 验证了桩基设计的安全性和经济合理性, 说明了自平衡桩基试验法在该地区深厚软弱地层中的应用可靠性, 为该地区同类工程桩基设计和优化提供了参考。

关键词: 自平衡; 分布式光纤法; 试验; 平衡点; 摩阻力

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0288-05

Research on Application of Self-Balanced Pile Foundation Testing Method in Elevated Stations in Deep Soft Soil Areas

SHEN Hua¹, XING Ruxiang², WANG Xiaomeng³, LI Jiawang⁴

(1. Huzhou Traffic Engineering Quality and Safety Management Service Center, Huzhou 313000, China; 2. China Railway 15th Bureau

Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. China Railway 15th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd., Shanghai 200070, China;

4. Zhejiang Rudong-Nantong-Suzhou-Huzhou Intercity Railway Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: To verify the allowable bearing capacity of important bridge pile foundations of the Nanxun Elevated Station Bridge in the Rudong - Nantong - Suzhou - Huzhou Intercity Railway under complex geological conditions, two cast-in-situ bored piles with a diameter of 1.0 m and a length of 70 m are selected to conduct the self-balanced pile foundation tests on the original piles. The distributed optical fiber method is used to measure the internal forces of the piles. By embedding sensing optical fibers inside the piles, a sensing network is formed. After the load box is pressurized, the sensor signal data is calculated to obtain the side resistance and end resistance of each section of the test pile. The analysis shows that the errors between the test data and the survey data parameters and the recommended parameters in the railway industry standards are within a reasonable range. The safety and economic rationality of the pile foundation design are confirmed, demonstrating the reliability of applying the self-balanced pile foundation test method in deep soft soil stratum of this area. The reference is provided for the design and optimization of similar engineering pile foundations in the region.

Keywords: self-balanced; distributed optical fiber method; test; equilibrium point; frictional resistance

0 引言

随着基建行业发展, 桩基作为一种稳定、可靠的

基础形式, 被广泛应用于房建、桥梁等中大型工程中, 为了验证桩基设计的安全性、可靠性和经济合理性, 往往需要进行桩基试验。传统的桩基竖向抗压承载力试验有堆载法、锚桩法。堆载法需要庞大的堆载物和堆载场地, 静压时间长, 且占用吊装设备时间较长。锚桩法需要设置额外的锚桩和大刚度荷载梁, 两种方法试验时间长、成本高、安全风险高^[1-4]。针对以上缺点, 自平衡桩基试验法应运而生, 其检测一根试桩一般需要1~2 d, 较堆载法、锚桩法节约了

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 中铁十五局集团第二工程有限公司科研计划项目(2024C77)

作者简介: 沈华(1976—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁隧道工程监督管理工作。

通信作者: 邢如祥(1990—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计和施工技术研究工作。电子信箱: 1249420511@qq.com

大量时间,且不需要庞大的堆载体和反力设施,操作方便、安全,尤其适用于狭窄场地试桩、水上试桩、斜坡试桩等情形^[5]。张衡^[6]介绍了自平衡法静载试验的基本原理和步骤,验证了该方法在桩基试验中的可靠性;徐国翔等^[7]依托实际工程比较了桩端后注浆灌注桩注浆前后对自平衡试验的影响,分析了其 $Q-s$ 曲线的异同,提出了自平衡桩基试验法的适用条件和局限性。李小娟等^[8]依托台州湾项目工程,通过原位试验验证了黏性土层中自平衡法承载力计算中转换系数 γ_1 的取值范围为0.7~0.8;李小娟、戴国亮等^[9]通过工程试验和数值模拟提出了砂性土层中自平衡法承载力计算中转换系数 γ_1 的影响因素和推荐取值范围。

为了验证桩基设计的可靠性和经济合理性,依托如通苏湖城际铁路湖州南浔高架站特大桥桩基试验,探讨了自平衡桩基试验法在深厚软土地区高架车站的应用效果,为该地区同类工程桩基设计和优化提供了参考。

1 工程概况

如通苏湖城际铁路(南浔至长兴段)项目线路起自苏浙省界,浙江境内段沿着沪苏湖高铁南侧引入南浔站,终于长兴站,线路全长64.8 km,设计时速160 km/h。土建1标起于苏浙省界,止于漾南站(不含),包括南浔站(含)至漾南站(不含)。南浔高架站特大桥全长601.53 m,上部结构为简支箱梁和道岔连续梁,下部结构为矩形花瓶型实体墩+矩形承台+钻孔桩基础,钻孔灌注桩根据结构受力和地质条件分别采用1.0、1.25 m桩径,均为端承摩擦桩。桥梁桩基位于深厚软土地区,根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)第6.1.5条^[10],对于地质复杂的重要桥梁,摩擦桩的容许承载力应通过试桩确定。由于下部结构施工工期紧张,同时因为线路与既有沪苏湖高铁并行,为避免试验对既有桥梁桩基产生附加应力,试验方法采用了自平衡桩基试验法。

桥址位于湖州市南浔区,地形平坦开阔,场地分布有人工填土、素填土,填土下为第四系松散沉积层,厚约60~160 m,上部地层为第四系全新统冲积软塑~可塑状粉质黏土、流塑状淤泥质粉质黏土、稍密粉土等,总厚度为15~25 m;中部为第四系上更新统冲积软塑~硬塑状黏性土层,底部分布有粉土、粉细砂等,总厚度为30~60 m;下部为第四系中更新统冲积灰色中细砂,含砾中粗砂与粉质黏土互层等。

2 试验原理

自平衡桩基试验法是一种通过预先在桩身内部安装荷载箱,利用桩体自重、桩侧摩擦阻力及桩端支承力互为反力来进行静载测试的技术^[11-13]。该方法具体操作如下:将特制的自平衡荷载箱与钢筋笼一同安置于桩身指定深度处,并将荷载箱的加压管路及其他监测元件引至地面,随后完成混凝土灌注作业。试验时,通过地面加压泵向荷载箱注压,使其同时向上、向下施加荷载,从而分别激发桩身上段与下段的响应。通过监测并分析加载过程中获得的数据,可计算出桩基的极限承载力、桩侧摩阻力分布等关键参数,为桩基工程设计提供可靠依据,见图1。

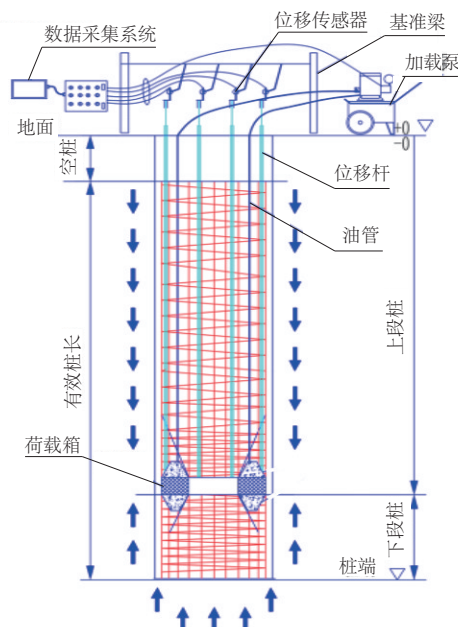


图1 自平衡桩基试验法示意

通过分析加载值 Q (kN)和荷载箱处上段桩、下段桩位移 s (mm),可得到上段桩极限加载值 Q_{uu} (kN)和下段桩极限加载值 Q_{ud} (kN),按式(1)计算单桩竖向抗压极限承载力 Q_u (kN):

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - W}{\gamma_1} + Q_{ud} \quad (1)$$

式中: W 为荷载箱上段桩的自重和附加重量之和(kN),地下水位以下取浮重度; γ_1 为试桩的抗压摩阻力转换系数,根据目前现行规范和相关研究进展,黏土、粉土可取0.8,砂土可取0.7。

桩身内力测试采用分布式光纤法,与桩基自平衡试验同步进行。光纤传感技术以光波作为信息载体,通过光纤介质感知并传输外部物理量信号。在该技术应用于试桩检测时,将各类传感光纤或光学传感元件布设于桩身内部,构成分布式传感监测网

络。借助相应的调制与解调设备,可对沿桩身分布的物理参量进行连续采集。一旦被测参数发生变化,系统即可实时感知其空间分布与数值大小,进而分析其随时间或荷载变化的规律,具体工作原理见图2。检测系统主要由两部分组成,一是布里渊分布式光纤解调 N8511,二是分布式光纤传感器,即试桩内力检测专用的钢丝绳传感光缆。

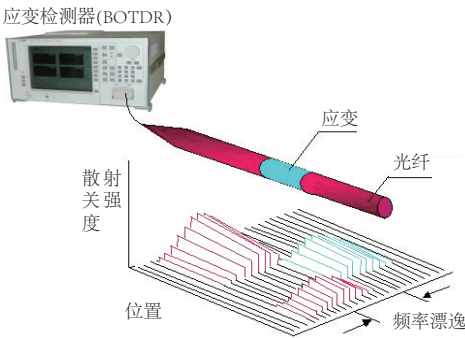


图2 分布式光纤检测技术原理示意图

桩身内力测试得到光纤的轴向压应变 $\varepsilon(Z)$, 其与桩身混凝土轴向应变一致,则桩身压应力 $\sigma(Z)$ 为:

$$\sigma(Z)=\varepsilon(Z) \cdot E \tag{2}$$

桩身轴力 $Q(Z)$ 为:

$$Q(Z)=\sigma(Z) \cdot A \tag{3}$$

桩侧分布摩阻力 $q_s(Z)$ 为:

$$q_s(Z)=-\frac{1}{U} \cdot \frac{\Delta Q(Z)}{\Delta Z} \tag{4}$$

桩端阻力 q_p 为:

$$q_p=\frac{Q_n}{A} \tag{5}$$

式中: E 为桩身混凝土的弹性模量,kPa; A 为桩身截面面积, m^2 ; U 为桩身周长,m; $\Delta Q(Z)$ 为土层内桩身两截面间轴力变化量,kN; ΔZ 为对应土层内桩身两截面间深度差,m; Q_n 为桩端轴力,kN。

3 工程应用

3.1 试桩概况

在南浔高架站特大桥场地内布置两根试桩进行自平衡试验检测,试桩经声波透射法检测均为 I 类桩,试桩参数见表 1。试桩均采用回旋钻机成孔,加载采用慢速维持荷载法,荷载箱为环形油缸式荷载箱,直径同钢筋笼外径,高 300 mm,行程 120 mm。每根试桩布置 4 个位移传感器,量程 50 mm,通过磁性表座固定在基准钢梁上,用于量测桩身荷载箱处的向上、向下位移,见图 3。根据地勘报告,查找与试桩最为匹配的探孔,根据报告参数计算该试桩各土层

桩侧摩阻力及桩端阻力,经试算确定荷载箱位置,即假设某一位置为平衡点,计算其上桩侧摩阻力和上段桩桩身自重(地下水位以下取浮重)之和、其下桩侧摩阻力和桩端阻力之和,二者相等处即为平衡点,对平衡点以上桩侧摩阻力需乘以抗压摩阻力转换系数修正。试桩 SZH2 荷载箱位于桩底以上 22.6 m 处,试桩 SZH3 荷载箱位于桩底以上 21.6 m 处。

表 1 试桩参数表

位置	桩号	桩身完整性类别	桩径/m	桩长/m	单桩竖向承载力特征值/kN
南浔站	SZH2	I 类桩	1	70	4 300
	SZH3	I 类桩	1	70	43 00



图3 自平衡桩基试验法位移传感器

分布式光纤法桩身内力测试采用 2 根光缆 U 型对称绑扎在钢筋笼的主筋上,同钢筋笼一同下放并浇筑在桩身内。在下放底部第一节钢筋笼之前,在地面上采用扎带或扎丝将光缆沿一侧主筋方向进行绑扎,绑扎间隔 0.5 m,光缆沿主筋方向进行绑扎直至到达钢筋笼主筋底部附近的加强箍筋,沿加强箍筋进行绑扎至对称的钢筋笼主筋处,将光缆沿另一侧钢筋笼主筋穿过荷载箱向上绑扎。后在每节钢筋笼下放前,定位拟绑扎光缆的钢筋笼主筋,并用绳索悬挂光缆,待本节钢筋笼下放时,通过绳索将光缆沿主筋方向拉直,边下放钢筋笼边绑扎光缆。待全部钢筋笼下放完成后,将外露的光缆采用多层尼龙袋进行保护,并固定在外露的钢筋笼吊筋上。光缆布设方式见图 4。

3.2 桩基承载力测试

试桩 SZH2 在加载至 6 020 kN 时,本级下位移为 2.16 mm,累计下位移为 14.92 mm,本级上位移为 32.70 mm,累计上位移为 45.25 mm,本级上位移增量大于上一级的 5 倍,且位移总量大于 40 mm,终止加

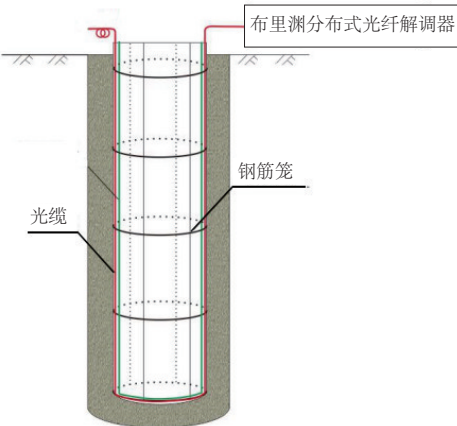


图4 分布式光纤法光缆布置示意

载,根据《建筑桩基自平衡静载试验技术规程》(JGJ/T 403—2017)第5.0.2条第1款^[14],对于陡变型曲线,上段桩极限加载值 Q_{um} 和下段桩极限加载值 Q_{ud} 应

表2 试桩检测结果汇总表

试桩 编号	设计承载力 特征值/kN	荷载箱上部极 限加载值/kN	荷载箱下部极 限加载值/kN	荷载箱上段桩 累计位移/mm	荷载箱下段桩 累计位移/mm	Q-S 曲线类型	单桩竖向抗压 极限承载力/kN	单桩竖向抗压承 载力特征值/kN
SZH2	4 300	6 020	6 020	45.25	14.92	陡降型	10 302	5 151
SZH3	4 300	5 590	5 590	16.43	41.07	陡降型	9 428	4 714

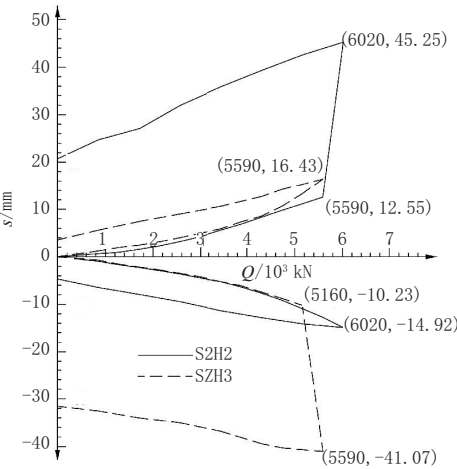


图5 试桩Q-s曲线

3.3 桩身内力测试

根据《基桩分布式光纤测试规程》(T/CECS622—2019)和分布式光纤测试数据,结合地质资料、桩型、成桩工艺和施工记录等综合分析,所测桩的土层侧摩阻力、端阻力见表3。

通过将试桩得到的桩侧摩阻力和桩端阻力与勘察报告参数、《铁路桥涵地基与基础设计规范》(TB 10093—2017)^[15]推荐参数对比,见表4,可知分布式光纤法测试转换桩侧摩阻力参数与勘察资料参数最大差值百分比为28%,且均比勘察资料参数大,说明桩基桩侧摩阻力参数取值合理,并保有一定的安全系数;分布式光纤法测试转换桩端阻力

取曲线发生明显陡变的起始点对应的荷载值即5 590 kN,根据式(1)计算可得单桩竖向抗压极限承载力为10 302 kN,单桩竖向抗压承载力特征值为5 151 kN。试桩SZH3在加载至5 590 kN时,本级上位移为3.15 mm,累计上位移为16.43 mm,本级下位移为30.84 mm,累计下位移为41.07 mm,本级下位移增量大于上一级的5倍,且位移总量大于40 mm,终止加载,上段桩极限加载值 Q_{um} 和下段桩极限加载值 Q_{ud} 取5 160 kN,见图5,根据式(1)计算可得单桩竖向抗压极限承载力为9 428 kN,单桩竖向抗压承载力特征值为4 714 kN,两根试桩检测结果汇总见表2。两根试桩结果均大于原设计的单桩竖向承载力特征值4 300 kN。

表3 最大试验荷载下桩身各土层侧摩阻力统计表

序号	土层	桩侧摩阻力/kPa			备注
		SZH2	SZH3	平均值	
1	③ ₁ 淤泥质黏土	11.1	8.3	9.7	
2	④ ₁ 粉质黏土	33.4	33.4	33.4	
3	④ ₄ 粉质黏土	29.2	30.2	29.7	
4	⑤ ₁ 粉质黏土	56.3	51.9	54.1	
5	⑤ ₁₋₁ 粉土	36.7	—	36.7	
6	⑥ ₂₋₁ 粉土	44.5	45.9	45.2	
7	⑦ ₁ 黏土	49.0	41.7	45.35	
8	⑦ ₁₋₂ 粉砂	72.3	58.4	65.35	
9	⑧ ₂ 粉质黏土	66.3	55.3	60.8	
10	⑧ ₃ 粉砂	83.4	72.8	78.1	SZH2持力层
11	⑨ ₁ 粉质黏土	—	64.0	64.0	SZH3持力层
12	桩端阻力	1 801.9	1 401.5		

参数与勘察资料参数最大差值百分比为17%,SZH2试桩值终止条件取决于上段桩,下段桩摩阻力尤其是桩端阻力可能未完全发挥,其值小于勘察资料参数。SZH3试桩值终止条件取决于下段桩,其值大于勘察资料参数,说明桩基桩端阻力参数取值合理。无论是分布式光纤法测试转换桩侧摩阻力参数,还是勘察资料桩侧摩阻力参数,在地面下20~25 m范围内均小于《铁路桥涵地基与基础设计规范》(TB 10093—2017)推荐范围,其下约20 m范围内分布式光纤法测试转换桩侧摩阻力参数与规范推荐范围较为吻合,⑦₁₋₂粉砂层至

桩底约 25~30 m 范围内分布式光纤法测试转换桩侧摩阻力参数比规范推荐范围大,分析可能与土层深度有关的因素如土层扰动程度、固结度、土层状态等有关。

表4 桩侧摩阻力、桩端阻力分析对比表

序号	土层	分布式光纤法测试 参数/kPa	勘察资料 参数/kPa	试验与地勘差值 百分比/%	《铁路桥涵地基与基础设计规范》 (TB 10093—2017)/kPa
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	③ ₁ 淤泥质黏土		9.7	8	21
2	④ ₁ 粉质黏土		33.4	32	4
3	④ ₄ 粉质黏土		29.7	26	14
4	⑤ ₁ 粉质黏土		54.1	50	8
5	⑤ ₁₋₁ 粉土	桩侧摩阻力	36.7	34	8
6	⑥ ₂₋₁ 粉土		45.2	40	13
7	⑦ ₁ 黏土		45.35	42	8
8	⑦ ₁₋₂ 粉砂		65.35	60	9
9	⑧ ₂ 粉质黏土		60.8	50	22
10		桩侧摩阻力	78.1	70	12
11	⑧ ₃ 粉砂	桩端阻力	1 801.9	2 000	-10
12		桩侧摩阻力	64	50	28
13	⑨ ₁ 粉质黏土	桩端阻力	1 401.5	1 200	17

4 结 语

(1)自平衡桩基试验法具有操作简单、安全性高、适用性强、试验速度快的优点。

(2)自平衡桩基试验验证了桩基设计参数的合理性,保证了结构安全,为该地区、该类地质条件下桩基设计、优化提供了参考。

(3)自平衡桩基试验法平衡点即荷载箱位置的选择至关重要,理论上上段桩和下段桩同时达到终止条件时,才能达到上段桩和下段桩极限阻力条件,平衡点的选择取决于试验前桩侧摩阻力和桩端阻力参数和试桩抗压摩阻力转换系数的选取,本次试验证明了在该地区对于黏土、粉土 γ_1 取0.8,对于砂土 γ_1 取0.7是合适的,为该地区今后同类试验平衡点位置计算提供了依据。

(4)自平衡桩基试验法难以使上段桩和下段桩同时达到极限条件,即存在上段桩或下段桩阻力未完全发挥的现象。实践证明,在平衡点选取大致准确的前提下,试验结果在工程可接受的范围内,可满足工程验证性需求。如为研究各土层准确的阻力参数,可采取增加样本数量、调整 γ_1 取值等方法。

参考文献:

[1] 唐小富,王焱,赵少杰.大直径摩擦桩堆载法静压试验在大浏高速公路的应用研究[J].公路工程,2012,37(3):103-105;115.

[2] 曾亮红.锚桩法在水运工程基桩静载荷试验中的应用[J].珠江水运,2024(14):30-32.

[3] 孟新秋,赵雪璞.堆载法与自平衡法结合在承载力检测中的应用[J].土工基础,2024,38(2):328-331;341.

[4] 程旭.锚桩法静载试验在水利工程基桩检测中应用研究[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2023,23(4):14-19.

[5] 李开正,刘斌.高速公路桥梁自平衡桩基静载试验研究[J].北方交通,2024(12):24-28.

[6] 张衡,张长稳.自平衡法静载试验在大直径桩基检测中的应用研究[J].建设科技,2024(增刊1):158-161.

[7] 徐国翔,王婷婷.自平衡法静载试验在桩基检测中的应用[J].浙江建筑,2010,27(3):18-20;26.

[8] 李小娟,陈雪奖,戴国亮,等.黏性土中钻孔灌注桩自平衡转换系数取值研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):226-232;262.

[9] 李小娟,戴国亮,龚维明,等.砂性土中自平衡试验转换系数取值研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):659-668.

[10] TB 10093—2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].

[11] 王勇.基桩承载力自平衡法工程实例应用研究[J].黑龙江科学,2025,16(14):87-89.

[12] 肖萌,王幸友,牙政锐,等.自平衡荷载箱桩基承载力检测技术[J].工程与建设,2025,39(1):144-147.

[13] 严子林,刘松.基桩自平衡静载试验中平衡点问题研究[J].地基处理,2024,6(5):475-480.

[14] JGJ/T 403—2017 建筑桩基自平衡静载试验技术规程[S].

[15] TB 10093—2017 铁路桥涵地基与基础设计规范[S].