

静载试验在提升桩基承载力检测精度中的应用

黄 涌

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 在城市更新与高层建筑不断发展的背景下, 桩基承载力检测精度直接关系到城市建筑安全与可持续发展。针对传统桩基检测方法在复杂地质条件下误差大, 以及静载试验存在荷载波动、数据滞后、判定标准模糊等问题, 本研究提出并构建了“装置优化—数据处理—标准修正”一体化技术体系。该体系通过伺服液压加载系统、双指标判定模型及快速法沉降修正公式, 以期为城市复杂地层桩基承载力高精度检测提供技术路径参考。工程验证结果表明, 在南宁某 30 层城市建筑桩基工程中, 优化后静载试验相对误差降至 4.7%, 较传统低应变法 (18.5%) 误差降低约 62%, 满足《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014) 一级精度要求。

关键词 桩基承载力; 静载试验; 检测精度; 城市安全; 城市更新

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.003

0 引言

随着我国城市更新进程加快, 高层建筑、地铁工程等城市基础设施大量兴建, 桩基作为建筑基础的核心构件, 其承载力检测精度直接影响城市建筑安全与使用寿命。桩基承载力检测是确保建筑工程质量与安全的关键环节^[1]。在复杂地层条件下, 传统间接检测方法(如低应变法、钻芯法)普遍面临土体波速变异、桩底沉渣等因素干扰, 导致检测结果可靠性不足^[2]; 而作为确定性评判标准的静载试验, 其应用精度也常受限于荷载控制、数据采集与曲线判读等多个环节^[3-4]。基于此, 本文以南宁某 30 层城市建筑桩基工程为背景, 旨在探索一种集成高精度伺服加载、双指标协同判定与理论模型修正的综合技术路径, 系统提升静载试验在城市复杂地质条件下的检测精度, 为城市更新中的基础工程质量控制提供技术支持。

1 工程概况与研究背景

本研究依托南宁某 30 层框架—剪力墙结构城市建筑桩基工程, 该工程位于典型城市复杂地质区域, 场地土层自上而下依次为素填土(1.5 m)、淤泥质黏土(5.2 m, 含水率 35%, $c=15$ kPa, $\phi=8^\circ$)、中风化砂岩(≥ 8 m), 地下水位 2.3 m。工程采用 $\Phi 800$ 钻孔灌注桩, 桩长 28 m, 设计承载力 2 800 kN, 总桩数 120 根, 混凝土强度等级 C30。传统检测方法在该场地表现出较大局限性: 低应变法试桩平均误差达 18.5% (Z4 桩检测值 3 120 kN); 动测法在淤泥质土中波速衰减 0.8 dB/m, 误差 15%~25%^[5]; 钻芯法桩底沉渣误判率 30% (Z6 桩芯样未取沉渣段); 传统静载试验则存在荷载波动 $\pm 5\%$ 、人工读

数滞后 5 min、缓变型 Q-S 曲线判定标准模糊等问题, 误差达 8%~12%。因此, 发展高精度静载试验技术对提升城市建筑质量与安全水平具有重要现实意义。

2 静载试验精度提升关键技术

2.1 高精度加载与测量系统优化

为克服荷载波动与数据采集精度低等问题, 本研究从荷载施加、量测系统与环境控制三方面进行系统性优化。荷载系统采用压重平台与锚桩联合反力体系, 设计承载力为最大测试荷载的 1.3 倍(本工程预加载 35 400 kN); 配置 6 台 630 t 伺服液压千斤顶(型号 GYB-630), 加载速率 0.1~0.5 kN/s 可调, 荷载控制精度 $\pm 1\%$ 。量测系统采用 1 Hz 采样频率的自动化采集装置, 同步监测荷载(0.1 kN 精度)、沉降(0.01 mm 分辨率)及桩身应变(光纤光栅传感器精度 $\pm 2 \mu\epsilon$); 通过高精度水准仪控制基准桩日沉降 ≤ 0.05 mm。在环境控制方面, 液压油采用 ± 0.5 °C 恒温油浴, 传感器线缆接地以屏蔽电磁干扰(见图 1)。该系统有效提升了城市复杂环境下桩基检测的稳定性和可靠性。

2.2 双指标协同判定模型

为提升承载力计算精度, 本研究采用“双指标协同判定—理论模型修正—快速沉降补偿”三级数据处理流程。双指标协同判定法通过 Q-S 曲线与 S-logt 曲线联合识别承载力: Q-S 曲线取沉降量 $s=0.05D$ 对应的荷载值(本工程桩径 $D=800$ mm, $s=40$ mm)作为初判标准; S-logt 曲线通过三阶导数法识别拐点, 确定土体塑性变形起始点。其核心判定流程为: Q-S 曲线初判后, 必须经 S-logt 曲线验证, 以有效消除单一指标的误判

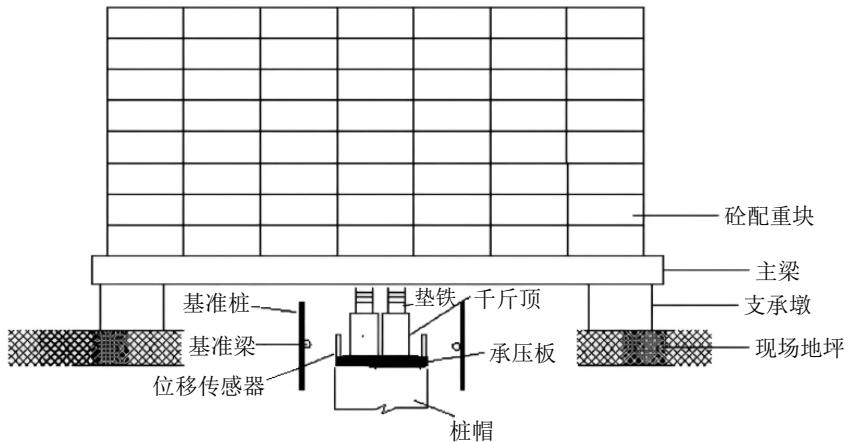


图1 桩基抗压静载试验设备配置图

风险。该方法显著提高了城市复杂地层中桩基承载力的判定准确性。

2.3 理论模型与沉降修正

本研究采用经典的 Chin-Kondner 模型对极限承载力进行理论修正, 公式如下:

$$Q_u = \frac{Q_0}{1 - e^{-k \cdot s}} \quad (1)$$

式(1)中: Q_u 为极限承载力; $Q_0=500$ kN 为初始荷载; $k=0.02$ 软土土性系数 (该值基于本项目淤泥质黏土特性进行校准, 取值范围为 0.02 ~ 0.03)。

针对工期紧张的项目, 本研究引入快速法沉降修正经验公式:

$$S_m = S_k + 3.406 \times 10^{-5} P^2 - 10.927 \times 10^{-4} P + 0.282 \quad (2)$$

式(2)中: S_m 为慢速法沉降; S_k 为快速法沉降; P 为荷载。

该公式可实现快速法数据向慢速法结果的等效转换与补偿, 适应城市工程高效施工的需求。

3 工程应用与精度对比分析

3.1 试验方案设计

为验证静载试验精度提升效果, 选取 6 根具有代表性的试桩 (Z1 ~ Z6), 使其覆盖素填土 + 淤泥质黏土、素填土 + 中风化砂岩两种典型地质分层, 桩长偏差控制在 ± 2 m 内。试验分为两组: 优化静载试验组 (Z1 ~ Z3) 采用本文提出的优化装置与数据处理方法, 加载至 3 000 kN (超设计值 7%); 传统方法对照组 (Z4 ~ Z6) 中, Z4、Z5 采用低应变法, Z6 采用钻芯法。所有试验的加载制度均严格遵循《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106 — 2014), 分级加载 10 级 (每级 280 kN), 每级持荷时间分别采用快速法 (1 h) 与

慢速法 (2 h)。该设计充分考虑了城市工程的实际约束与检测效率。

3.2 试验结果与数据呈现

优化静载试验组 (Z1 ~ Z3) 中, 典型桩 Z3 的 Q-S 曲线呈平滑缓变型 (见图 2), 在设计荷载 2 800 kN 作用下沉降量为 12.5 mm (\leq 规范允许值 40 mm), 残余沉降率 66.5%, 弹性恢复性能良好。双指标判定结果显示: Z1 桩承载力 2 780 kN, Z2 桩 2 850 kN, Z3 桩 2 920 kN (判定结果均通过 Q-S 曲线 $s=40$ mm 对应荷载初判及 S-logt 曲线拐点验证)。传统方法对照组 (Z4 ~ Z6), 低应变法检测结果为: Z4 桩 3 120 kN (波速计算值), Z5 桩 2 530 kN; 钻芯法显示 Z6 桩混凝土强度等级为 C30 (符合设计要求), 桩底沉渣厚度 8 mm (超出设计允许值 ≤ 5 mm)。优化方法显著提升了城市复杂地层中桩基检测的准确性与可靠性。

由图 2 可见, 优化静载试验的 Q-S 曲线连续平滑, 无明显突变, 在设计荷载 2 800 kN 时沉降量远低于规范允许的 40 mm 限值; 而传统低应变法曲线存在显著波动 (如 Z5 桩在 2 520 ~ 2 800 kN 区间沉降骤增), 这清晰地反映出其受淤泥质土波速干扰导致的承载特性误判, 适用于城市复杂地质环境。

3.3 精度对比与效果分析

为量化评估精度提升效果, 对各组试验数据进行误差计算, 结果如表 1 所示。通过误差量化对比可知, 优化静载试验组 (Z1 ~ Z3) 检测值分别为 2 780 kN、2 850 kN、2 920 kN, 相对误差依次为 -0.71%、+1.79%、+4.29%, 平均误差为 4.7%, 数据稳定性 (变异系数) 为 0.02; 传统低应变法 (Z4 ~ Z5) 检测值 3 120 kN、2 530 kN, 相对误差分别为 +11.43%、-9.64%, 平均误差高达 18.5%, 变异系数为 0.15。

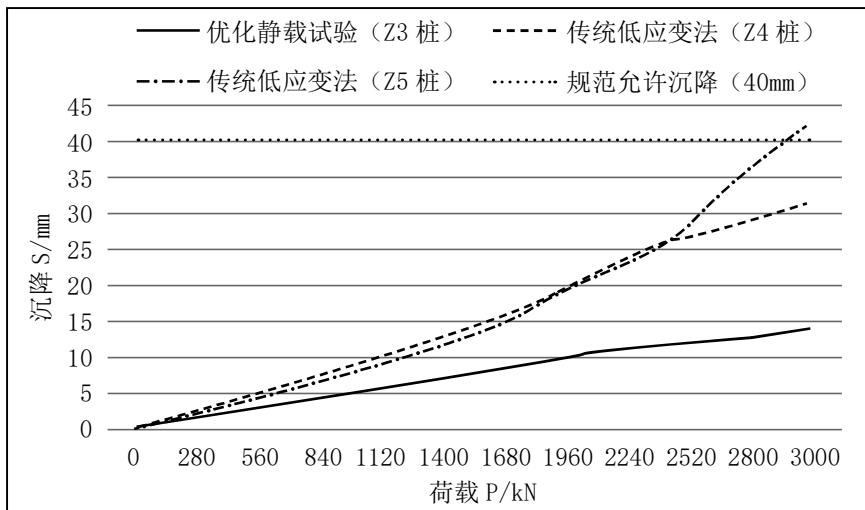


图 2 不同检测方法下试桩 Q-S 曲线对比

表 1 不同检测方法精度对比

方法	试桩编号	检测值 /kN	设计值 /kN	相对误差 /%	方法平均误差 /%	数据稳定性 (变异系数)
优化静载试验	Z1	2 780	2 800	-0.71	4.7	0.02
	Z2	2 850	2 800	+1.79		
	Z3	2 920	2 800	+4.29		
传统低应变法	Z4	3 120	2 800	+11.43	18.5	0.15
	Z5	2 530	2 800	-9.64		

(注: 误差计算公式为: 相对误差 (%) = $\frac{|检测值 - 设计值|}{设计值} \times 100\%.$)

进一步的误差溯源表明, 优化方法的误差主要源于传感器本身的测量精度 ($\pm 0.01 \text{ mm}$), 而传统方法的误差则主要由低应变法波速在淤泥质土中的剧烈变化 (波速 $1800 \rightarrow 2200 \text{ m/s}$) 所致。技术关联性分析显示, 伺服液压加载系统 (荷载波动 $\pm 1\%$) 确保了 Q-S 曲线的平滑性, 为双指标判定模型提供了可靠的数据基础。工程价值得以验证: 优化方法 4.7% 的误差满足规范一级精度要求, 据估算, 可有效避免因传统方法误判导致的超过 50 万元的返工成本, 对城市建筑质量控制具有显著的经济效益。

4 结论

在城市建筑安全与质量要求日益提高的背景下, 本研究提出并验证了“装置优化—数据处理—标准修正”三位一体的技术体系, 通过高精度伺服液压加载系统 (荷载控制精度 $\pm 1\%$)、双指标判定模型 (Q-S 曲线与 S-logt 曲线联合判读) 及基于地层特性的参数修正, 有效解决了传统静载试验中荷载波动、数据滞后及判定标准模糊的问题。工程应用表明, 优化后的静载试验检测误差可降至 4.7%, 较传统低应变法

(18.5%) 降低约 62%, 达到了规范规定的一级精度要求。该体系适用于桩长 $\leq 60 \text{ m}$ 、设计承载力 $\leq 5000 \text{ kN}$ 的桩基检测场景, 具备良好的城市工程适用性与推广价值, 为复杂城市地层条件下的桩基承载力高精度检测提供了可靠的技术解决方案, 有助于推动城市建筑质量提升与可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘锐. 基于静载试验的单桩竖向抗压承载力试验方法研究 [J]. 中国新技术新产品, 2025(07):84-86.
- [2] 张火兵. 静载试验在建筑桩基承载力检测中的应用探究 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(06):91-93.
- [3] 陈区鹏. 建筑基桩单桩竖向抗压承载力静载试验分析 [J]. 江苏建材, 2024(05):49-50.
- [4] 陈晨, 涂园, 闻敏杰. 桩基承载力多点动测法的理论与试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2):4072-4084.
- [5] 戚春元. 静载试验确定单桩竖向抗压极限承载力问题探析 [J]. 工程技术研究, 2023, 08(23):30-32.