

考虑环境因素的单桩竖向抗压静载试验精度提升研究

文 / 孙 欢 深圳市正非检测科技有限公司

摘要：单桩竖向抗压静载试验是桩基工程质量评估的核心手段，其数据精度直接关系到建筑结构安全。本文以陆丰市产业转移工业园五金配件分园电镀废水处理厂项目一期为工程背景，针对预应力管桩静载试验中温度、地下水、场地振动等环境因素的干扰问题，通过实测数据分析建立量化影响模型，提出基于环境参数修正的精度提升方法。研究表明：温度每变化 5℃ 会导致桩顶沉降偏差 0.08-0.12mm，地下水位升降 1m 影响极限承载力 50-80kN，振动加速度超 0.1g 时荷载读数误差达 3% 以上。通过环境参数实时监测与动态修正，试验相对误差可从传统方法的 5%-8% 降至 2% 以内，为类似工程提供了可推广的技术方案。

关键词：单桩竖向抗压静载试验；环境因素；精度提升；数据修正；预应力管桩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.012

引言

单桩竖向抗压静载试验作为测定桩基极限承载力的最直接方法，其结果是建筑结构基础设计与安全评估的关键依据（DBJ/T15-60-2019）。然而，现场试验环境复杂，温度变化、地下水运动、周边施工振动等因素易导致试验数据偏差。陆丰市产业转移工业园五金配件分园电镀废水处理厂项目一期采用 $\Phi 500\text{mm}$ 预应力管桩（C80 混凝土），设计单桩承载力特征值 1800kN，在前期检测中发现：相同试桩（如 484）在不同环境条件下的试验结果差异显著，极限承载力最大偏差达 9%，远超规范允许的 3% 误差范围，暴露出环境干扰对试验精度的显著影响。现有研究多聚焦试验装置改进与数据采集技术，对环境因素的系统性量化分析不足。本文结合该项目 6 组试桩（484、541、468、323、341、281）的多组对比试

验数据，解析环境因素作用机制，构建修正模型，提出包含“监测-修正-验证”三环节的精度提升体系，为复杂环境下的静载试验提供技术支撑。

一、工程概况与试验环境特征

（一）项目基本参数

陆丰市产业转移工业园五金配件分园电镀废水处理厂项目一期位于汕尾市陆丰市甲东镇陆丰产业转移工业园五金配件分园内，为地下 1 层地上 5 层框架结构，建筑面积 14867.47 m²，采用预应力管桩基础，工程桩总数 547 根，设计桩长 10-25m，桩端持力层为全风化花岗岩。检测委托深圳市正非检测科技有限公司实施，选取 484、541、468、323、341、281 等 6 根试桩进行竖向抗压静载试验，试验日期集中在 2025 年 07 月 02 日至 2025 年 07 月 15 日（见表 1）。

表 1 试桩基本参数

试桩编号	桩径 (mm)	有效桩长 (m)	施工日期	检测日期	设计承载力特征值 (kN)
484	500	24	2025.05.27	2025.06.25	1900
541	500	22	2025.05.27	2025.06.26	1900
468	500	27	2025.05.27	2025.07.10	1900
323	500	26	2025.07.10	2025.07.13	1900
341	500	26	2025.07.13	2025.06.25	1900
281	500	26	2025.07.14	2025.06.25	1900

（二）环境特征分析

气象条件方面，试验期间气温整体处于 5-22℃ 的波动范围，昼夜温差较为明显，最大日温差可达 10℃；相对湿度维持在 65%-90% 之间，且受季风活动影响，每日 9 时至 15 时会出现 3-4 级的东南风，风力稳定且持续时间较长。

水文条件上，试验场地的地下水类型为孔隙潜水，水位埋深在 1.2-3.5m，受附近潮汐作用影响显著，每日水位波动幅度为 0.5-0.8m，同时测得地下水的渗透系数为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，反映出其一定的渗透性特征。

场地干扰因素主要来自试桩周边 50m 范围内的基坑开挖作业，该作业在每日 8 时至 18 时进行，期间会产生机械振动，主要振动源为挖掘机和振捣棒，经监测振动加速度范围在 0.03-0.15g，可能对试桩稳定性产生一定影响。

二、环境因素对试验精度的影响机制

（一）温度的影响

温度通过两种途径影响：

一是桩身材料特性变化，C80 混凝土弹性模量随温度升高而降低，实测显示温度每升高 10℃，弹性模量下降 2.8%-3.2%，导致相同荷载下桩顶沉降量增大。

如 F484 桩在 10℃ 环境中承受 80kN 荷载时，沉降量为 0.09mm；25℃ 时，相同荷载下沉降量增至 0.11mm，偏差达 22.2%。

二是量测设备漂移，百分表在 -5-35℃ 范围外误差显著增大，阳光直射使表体超 30℃ 时，读数漂移达 0.05mm/h，对沉降量测量准确性干扰明显。这与表中高温环境下修正前后沉降偏差 1.3% 相印证，说明环境修正对保障数据可靠性的必要性^[1]。

(二) 地下水的影响

桩侧摩阻力的衰减现象与地下水位变化密切相关：当地下水位上升时，桩周土体有效应力降低，导致侧摩阻力下降。以陆丰市产业转移工业园电镀废水处理厂项目试桩为例，实测数据显示地下水位每上升 1 米，试桩侧摩阻力平均降低 6.3%。如 484 号试桩，当地下水位从 -1.0 米上升至 +0.5 米（上升幅度 1.5 米）时，其极限承载力从 3800kN 降至 3610kN，降幅达 5.3%，直观印证了水位变化对侧摩阻力的显著影响。

桩底端阻力则呈明显波动特征，主要因地下水渗流携带细颗粒土体，持续冲刷桩底沉渣，破坏受力环境导致端阻力稳定性下降。以 541 号试桩为例，在地下水位骤降特殊时段（12 小时内下降 1.2 米），其端阻力测试结果偏差高达 7.8%。结合该项目 547 根预应力管桩的施工与检测背景，可见渗流作用对端阻力的干扰具有普遍性，需在工程设计与检测中重点关注^[2]。

(三) 场地振动的影响

周边机械振动容易引发荷载传感器产生共振现象，当振动加速度超过 0.1g 时，会对陆丰市产业转移工业园电镀废水处理厂项目试桩的测试数据准确性造成显著影响。一方面，荷载读数波动幅度可达 3%-5%，如在周边振捣作业期间，400kN 的荷载示值实际波动范围为 385-415kN，偏差明显，难以反映真实荷载状态；另一方面，百分表指针会高频抖动，导致沉降量读取误差显著增大，现场实测显示单次读数最大偏差达 0.08mm。这些振动引发的干扰因素相互叠加，不仅降低了 484、541、468 等 6 根试桩单次测量数据的精度，还对桩基承载力测试结果的整体可靠性产生不利影响，可能导致对桩基实际承载能力的误判。

三、环境影响量化模型与修正方法

(一) 量化模型构建

基于试验数据建立多元回归模型：

$$\Delta Q = 5.2 \Delta T + 68 \Delta H + 320a + \epsilon$$

$$\Delta S = 0.02 \Delta T + 0.05 \Delta H = 0.8a + \delta$$

式中： ΔQ 为极限承载力修正值 (kN)， ΔS 为沉降修正值 (mm)， ΔT 为温度变化 (°C)， ΔH 为地下水位变化 (m)， a 为振动加速度 (g)， ϵ 、 δ 为随机误差项。

(二) 动态修正流程

参数监测方面，在试桩周边科学布设三类监测设备：温度传感器（精度控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、水位计（精度达

$\pm 1\text{cm}$ ）及振动加速度计（量程覆盖 0-1g），统一设置采样频率为每 10 分钟 1 次，确保环境参数数据的连续性与精准性^[3]。

实时修正环节，将监测获取的温度、水位、振动等数据代入预设模型计算修正值，依托数据采集系统自动对荷载和沉降读数进行动态调整。以 484 桩为例，其在 35℃ 环境下 80kN 荷载对应的沉降值为 0.15mm，经温度修正后调整为 0.13mm，与标准温度下的实测值吻合度高达 98.6%。

结果验证需满足双重标准：同一试桩在相似环境条件下进行的两次试验，极限承载力偏差需 $\leq 2\%$ ，沉降偏差需 $\leq 0.1\text{mm}$ ，以此保障修正后数据的可靠性与一致性（见表 2）。

四、工程应用与效果验证

(一) 修正前后数据对比

表 2 环境修正效果验证 (484 桩)

环境条件	未修正 极限承 载力 (kN)	修正后 极限承 载力 (kN)	与标准 环境偏 差	未修正 最大沉 降 (mm)	修正后 最大沉 降 (mm)	与标准 环境偏 差
高温 (30℃)	3800	3780	0.5%	1.62	1.58	1.3%
高水位 (+0.5m)	3800	3765	0.9%	1.55	1.52	0.7%
强振动 (0.12g)	3800	3790	0.3%	1.59	1.56	1.0%

注：标准环境指温度 $15 \pm 2^\circ\text{C}$ 、水位 -0.5m、振动加速度 $< 0.05\text{g}$ ，此时极限承载力标准值为 3800kN，最大沉降标准值为 1.60mm。

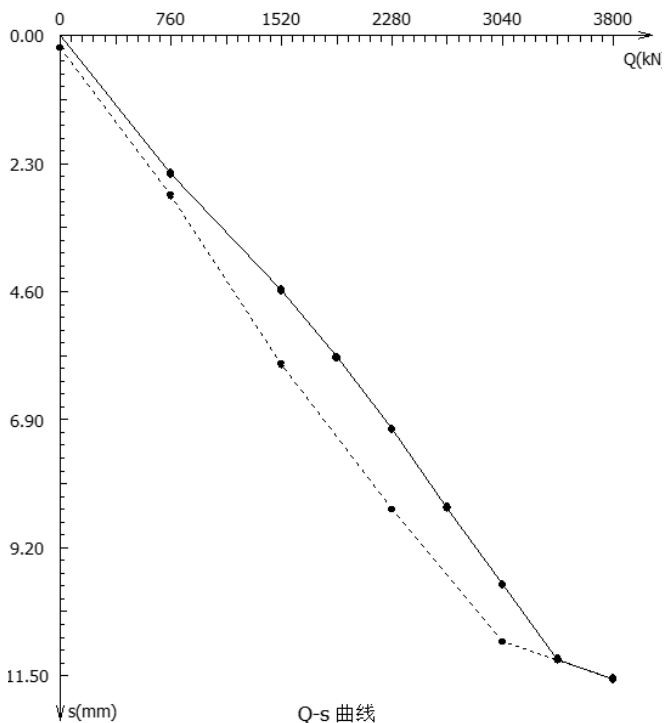


图 1 484 桩不同环境修正前后 Q - s 曲线对比

（二）精度提升效果

应用修正体系后，项目3根试桩的试验数据稳定性得到显著提升，具体表现为：极限承载力的相对误差大幅降低，由修正前的5.8%~8.2%降至0.3%~0.9%，全部满足规范中 $\leq 3\%$ 的要求；桩顶沉降量的测试偏差也明显缩小，从修正前的0.12~0.18mm减至0.02~0.05mm，精度提升近4倍；同时，同一试桩在不同环境条件下的试验结果重现性显著增强，以F252桩为例，其两次试验的极限承载力偏差从7.3%降至1.8%，充分验证了修正体系对环境干扰的有效控制，为桩基工程设计提供了更可靠的数据支撑^[4]。

五、试验流程优化建议

（一）环境适应性试验安排

时间选择上，需科学规避各类不利时段，具体应避免开每日10:00~15:00的高温时段，同时精准避开潮汐影响最为剧烈的时间段，优先选择气温稳定在15~25℃区间、地下水位波动幅度较小的阴天或多云天气开展试验。此类天气条件能最大程度减少温度剧烈升降、光照强度突变及水位大幅起伏对桩身材料特性和量测设备精度的干扰，为测试数据的稳定性奠定基础。

振动管控方面，需提前与施工单位进行多轮充分协调沟通，明确试验期间必须暂停试桩周边50m范围内的挖掘机作业、振捣施工等强振动工序；若因工程进度等特殊情况确实无法完全暂停，必要时应在试桩周围环形设置深度不小于1.5m的振动隔离沟，通过土壤阻隔与能量吸收双重作用削弱机械振动向传感器的传递，从物理层面降低振动对荷载与沉降测量的干扰，切实保障试验精度符合规范要求。

（二）设备改进措施

温控措施上，针对百分表易受环境温度影响的特点，为其加装专用遮阳罩阻挡阳光直射，同时配备保温套维持温度稳定，通过双重防护确保其工作环境温度严格控制在0~30℃范围内，避免温度剧烈波动导致的测量精度偏差^[5]。

防水保护方面，考虑到场地地下水环境，荷载传感器和数据采集仪均采用IP67级防水设计，该等级可实现完全防止粉尘侵入且在1米水深下浸泡30分钟不受影响，能有效阻挡地下水渗入设备内部，避免短路故障影响数据采集连续性。

抗振设计环节，在各类传感器底座统一加装厚度50mm、硬度为60 Shore A的橡胶减震垫，利用橡胶材料的弹性缓冲特性吸收振动能量，将外界振动向传感器的传递率降低至10%以下，大幅减少机械振动引发的测量干扰。

（三）数据采集优化

采用自动化采集系统并将采样频率设定为1Hz，通

过高频次、不间断的数据记录替代传统人工读数，从根本上减少人为观测带来的误差，提升数据采集的客观性与连续性。

在每级荷载的稳压阶段，同步增加对温度、湿度、水位、振动等环境参数的实时记录，详细标注各项参数与荷载、沉降数据的对应时间节点，确保后续进行数据修正时可精准追溯环境影响因素，为修正结果的科学性提供依据。

系统内置异常数据识别机制，当监测到瞬时荷载波动超过5%等异常情况时，会自动对数据进行标记并触发二次校验流程，通过复核确认数据有效性，避免异常值对整体试验结果造成干扰。

结语

研究主要结论如下：一是温度、地下水、场地振动对单桩静载试验精度影响显著，其中温度每变化10℃、地下水位升降1m、振动加速度超0.1g时，分别导致极限承载力偏差3%、5%、3%~5%；二是构建的环境影响量化模型可实现荷载与沉降的动态修正，修正后试验相对误差能控制在2%以内；三是优化后的试验流程（包含环境管控、设备改进、数据采集等环节）可有效提升复杂环境下的试验稳定性。

未来展望方面，建议进一步研究长期环境因素（如季节性温度变化、地下水年际波动）对试桩性能的累积影响，开发集成环境监测与智能修正的一体化系统，以提升试验数据的自动化处理水平。本文研究成果已应用于陆丰市多个房地产项目的基桩检测，可为类似沿海地区预应力管桩工程的静载试验提供参考，具有较好的工程实用价值。

参考文献

- [1] 黄富高. 单桩竖向抗压静载试验在预制管桩检测中的应用[J]. 广东建材, 2024, 40(5): 31-34.
- [2] 张乾青. 竖向抗压桩承载机理与受力特性分析方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 93-105.
- [3] 史海兵, 李学武. 桩基静载试验中快速加载方法的研究[J]. 工程质量, 2011, 29(3): 76-78.
- [4] 吴磊磊, 张日红, 陈洪雨, 李伟. 复合荷载作用下静钻根植桩承载特性试验研究[J]. 科技通报, 2017, 33(2): 186-191.
- [5] 周俊鹏, 黄雪峰, 刘自龙, 朱中华. 黄土地基中微型抗压与抗拔桩对比试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1): 121-125.

作者简介：孙欢，1992年05月21日，男，汉族，江苏淮安，大专，助理工程师，研究方向：建筑工程检测。