

超高层建筑地基基础静载变形检测技术要点与应用分析

文 / 丘燕君 广州开发区建设工程检测中心有限公司

摘要：在建筑工程项目中，开展超高层建筑地基基础静载变形检测是保证结构安全与稳定的关键环节，对建筑物运行寿命有直接影响。文章在研究中将结合某超高层建筑，在说明地基基础静载变形检测的必要性基础上，以锚桩法为研究对象，阐述了该技术在案例工程项目中的可行性，并从前期准备、试验安装、加载测试过程、数据处理等几个方面对该技术的测试流程与关键步骤展开详细研究。根据最终测试结果，锚桩法在本次测试中的可行性，能减少测量结果误差，因此具有推广价值。

关键词：锚桩法；超高层建筑；地基基础；静载试验；变形检测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.035

引言

在城镇化全面推进的大背景下，超高层建筑因为具有土地利用率高等优点而成为建筑工程项目的首选，但由于超高层建筑项目本身具有荷载大、基础埋深大等问题，导致整个结构面临复杂的受力状态，而静载变形测试作为评估地基基础性能的重要组成部分，在现场测试中可通过模拟试验荷载条件来精准测量基础沉降与回弹情况，成为保证建筑物稳定运行的关键，因此值得关注。

一、案例概况

某超高层建筑物的总高度为473.6m，其整体建筑结构采用了巨型框架+核心筒+伸臂桁架，建成后的总建筑面积为42.6万 m^2 ，计划建设一个集商贸、休闲、办公于一体的地标性建筑。但结合工程项目的实际情况来看，整个工程项目开展静载检测具有必要性，一方面，项目所在地层变异较大，需要通过静载试验的方式保证长期安全，即观察装置在长期荷载条件下是否会出现塑性变形等，为完善建筑物设计方案奠定基础。

二、超高层建筑地基基础静载变形检测技术的选择

在案例超高层建筑项目地基基础静载变形检测中决定采用锚桩法展开现场检测，该方法实际上通过工程桩或专用锚桩提供反力来进行静载试验的方法，根据现有高层建筑检测经验可知，该技术通常采用4-8根锚桩通过反力梁系统为试桩提供加载反力，并且在液压千斤顶等设备支持下施加分级荷载，最终精准测量桩顶沉降变化。相较于堆载法，锚桩法可轻松时间30000kN以上的大吨位加载，而堆载法则受场地与材料的限制，导致其荷载能力难以有效突破20000kN。从经济性角度来看，锚桩法可节省40%-43%的试验成本，具有良好的经济效益。与传统自平衡法相比，锚桩法能真实还原上部结构的荷载传递路径，因此测量结果更能真实还原工程实际情况。同时锚桩法可同步测试桩侧摩阻力和端阻力，而自平衡法难以准确分离这两部分数据。由此可见，案例项目在地基基础静载变形检测中选择锚桩法具有可行性。

三、地基基础静载变形检测技术要点分析

(一) 前期准备

在锚桩法现场测试中，应根据桩基设计承载力桩径

及场地条件，确定锚桩的材质、规格与数量，为确保测试结果有较高精度，应保证锚桩可均匀布设在试桩周围，且与试桩的距离也应满足规定，即桩径的3倍-5倍，通常大于等于2m^[1]。锚桩顶部处理中，需将锚桩顶部开凿至设计标高，并充分清理直至露出主筋并调直。案例项目中为确保能与反力系统之间实现可靠连接，选择在桩顶预设连接装置（如螺栓、钢板）。

测量系统准备中，案例项目选择精度达到0.01mm的电子位移计，数量大于等于4个，该装置沿试桩桩顶均匀布置；设置基准系统，该项目中的基准梁使用截面高度达到150mm的型钢加工制作，且基准点被设置在不受试验荷载影响的稳定土层上，通过混凝土墩固定（尺寸 $\geq 500mm \times 500mm \times 500mm$ ）。

最后开展场地与安全准备，即清理试验场地内的杂物，要求将地面坡度控制在5%以内，并设置坡度 $\geq 2\%$ 的排水口；在场地周围开挖尺寸300mm \times 300mm排水沟，避免场地浸泡雨水而影响测试效果。

(二) 试验安装

1. 搭建反力系统

案例项目中反力系统的搭建方案如图1所示。

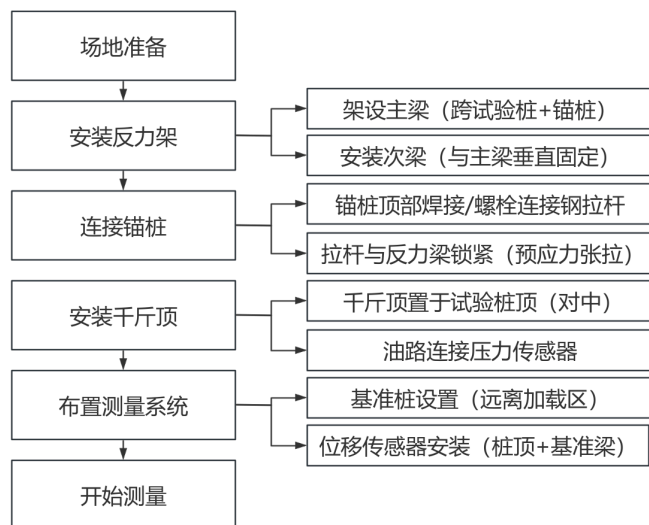


图1 搭建反力系统流程图

基于图 1 介绍的操作流程，在现场操作中应注意以下内容：（1）锚桩，选择钢筋混凝土预制桩或者灌注桩，根据试验荷载确定锚桩的直径，通常大于等于试桩直径的 0.8 倍。确定锚桩数量，通常根据最大试验荷载和单根锚桩的抗拔承载力计算确定锚桩数量，案例工程在锚桩法测试中规定锚桩数量大于等于 4 根，且所有锚桩均需均匀布设在试桩周围。（2）反力梁。本次锚桩法测试中的反力梁材质为 Q235B 工字钢，其截面尺寸根据荷载设计确定，理想状态下应确保反力梁在最大试验荷载作用下的挠度小于等于跨度的 1/200。（3）连接装置。在反力梁与锚桩连接中采用螺栓连接技术，其中的所有螺栓均为 8.8 级高强度螺栓；在千斤顶与反力梁、试桩连接中，试验人员在反力梁与千斤顶之间设置材料 Q235 且厚度 $\geq 20\text{mm}$ 的刚性垫块；千斤顶与试桩之间设置承压板，该承压板的尺寸应与试桩顶截面尺寸保持相同，二者的规格误差应 $\leq 30\text{mm}$ [2]。

在反力系统搭建中，现场操作人员按照设计要求施工锚桩，使锚桩垂直度等关键数据满足设计标准，并在施工结束后，通过对锚桩的质量检测评估桩身完整度。反力梁安装作业中，可用专业设备将其运抵现场，并正确摆放；现场操作人员用吊车将反力梁调整至水平位置后即可与锚桩对接。在本次连接作业中应确保连接节点牢固可靠，且反力梁的中心线与试桩的中心线重合。在反力梁与试桩之间安装千斤顶，为确保结构有稳定的受力，要求将千斤顶均匀布设在试桩两侧，且装置的中心线应与试桩保持相同；构件安装结束后评估千斤顶性能状态，确保设备能顺利运行。最后可在千斤顶上安装荷载传感器，在试桩上安装位移计，二者连接后便于采集现场测试数据。

2. 反力系统数据验算

为快速获得超高层建筑地基基础静载变形的相关数据，需通过反力系统验算采集相关资料，主要包括：（1）强度验算。本环节数据计算的主要目的是确保反力梁、锚桩等构件在最大试验荷载条件下的应力不会超过设计强度，以反力梁为例，其弯曲强度可以用公式（1）计算。

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq (\sigma) \quad \text{公式（1）}$$

在公式（1）中， σ 表示弯曲应力； M 表示最大弯矩； W 表示截面抵抗矩； (σ) 表示材料许用应力。

（2）稳定性验算中应尽量确保锚桩不发生倾斜、位移等现象，其计算方法参照公式（2）。

$$\varphi b \sigma = \frac{M}{\varphi \sigma \times W} \leq (\sigma) \quad \text{公式（2）}$$

在公式（2）中， $\varphi b \sigma$ 表示整体稳定性； $\varphi \sigma$ 表示稳定性系数，其他数据解释见公式（1）。

（3）变形验算。本环节数据计算中，应确保反力梁在最大试验荷载下的挠度低于允许值，此时则有公式（3）。

$$f = \frac{5ql^4}{384 \times E \times F} \quad \text{公式（3）}$$

在公式（3）中， f 表示变形挠度； q 表示均布荷载； l 表示反力梁的跨度值； E 表示弹性模量； F 表示截面惯性矩。

（三）加载测试过程

1. 加载前的准备工作

在加载测试前需检查已搭建完成的反力系统、加载设备及测量系统等，确认锚桩、反力梁等构件的连接效果满意，各个节点之间无松动问题；保证千斤顶等关键设备的运动状态正常，且所有传感器均完成校核且保持连接稳定 [3]。

在正式加载作业开始前应记录装置的初始速度，包括试桩桩顶初始标高、位移计初始读数及荷载传感器初始值，还需要将测量场地的温度、湿度等作为影响测试结果判定的依据，为后续数据修正提供有力依据。

2. 分级加载操作

在第一级加载操作中，主要利用千斤顶向试桩施加荷载，本次加载过程应保证缓慢且均匀，避免出现冲击荷载等问题；当加载至预定荷载后即可锁定千斤顶，并安排专人记录荷载传感器读数，正常情况下第一级加载过程中实际加载值与预定值偏差不超过 $\pm 5\%$ 。

后续分级加载作业中，应确保每级加载均在前一级荷载作用下试桩沉降达到稳定标准后进行。案例项目中对本项目提出详细数据要求，即在每 1h 内沉降量小于 0.1mm 且连续出现 2 次（从分级加载后的第 1h 开始观测）。整体加载过程与第一级加载操作保持相同方式，在施加精准荷载的情况下，此时测试过程中只需详细记录加载结束后的数据即可。

荷载维持阶段，测量人员应密切观察反力系统稳定性，观察构件有无拔起或者反力梁变形等情况，记录其中的异常数据。

3. 沉降观测

在施加荷载后，可严格按照表 1 提出的数据展开现场观测。

表 1 沉降观测频率

时间	观测频率
前 1h	每 10-15min 观测一次
1h-2h	每 30min 观测一次
2h 以上	每 1h 观测一次

基于表 1 介绍的观测频率，要求在锚桩法测试中能认真观察位移计读数，计算试桩沉降量，并与对应的荷载值一同记录在试验表格中，此时相关数据证实存在沉降事故出现突然增大的表现时，需要密切观察测量系统

与试桩状态，必要时可暂停加载^[4]。每次实验结束后需对本次记录的沉降数据做复核，避免出现关键数据丢失等情况；针对所有存在疑问的数据，可重新观测或者检查设备，避免错误数据持续存在。

（四）数据记录与分析

1. 加载过程中的数据记录

在每级加载前记录传感器的初始数值，在加载开始后观察荷载值变化，直至获得稳定后的荷载值，此时要求记录的荷载数据精度达到 0.1kN。在统计荷载值的同时还需要统计每级荷载施加的时间，便于分析荷载与时间之间的相关性。

在沉降数据记录中，可按照沉降观测频率以及时间统计各位移计的读数，本环节的数据记录精度应达到 0.01mm；若数据观测过程中发现某一位移计存在明显异常数据（相较于其他位移计，该设备读取的偏差值超过 10%）时，可先剔除该数据并确定原因。

根据案例项目的实际经验来看，在试验过程中可能出现荷载波动超过 ±5%，或者伴有沉降数据异常突变的情况，此时需记录异常发生的原因以及荷载等级，为确保能更进一步提升试验数据结果的可靠性。

2. 数据分析

（1）荷载 - 沉降（Q-s）曲线分析。在图像绘制中，将根据记录的每级荷载值以及对对应桩顶沉降量等绘制该曲线。该图片以荷载 Q 为纵坐标，以沉降 s 为横坐标，通过适当比例来真实还原沉降与荷载之间的相关性。结合案例项目的实际情况，该项目中的荷载 - 沉降（Q-s）曲线如图 2 所示。

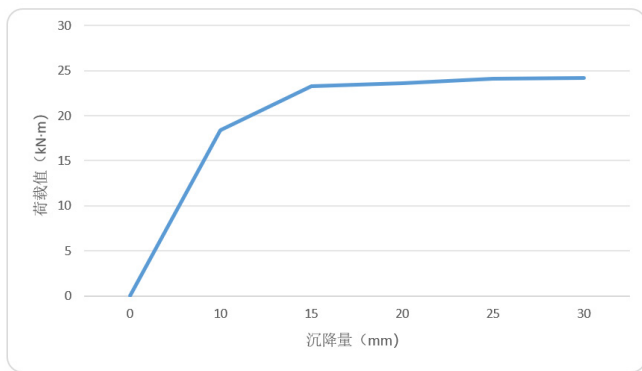


图 2 案例项目荷载 - 沉降 (Q-s) 曲线

根据图 2 所显示的相关数据可以发现，整个项目中的 Q-s 曲线呈现出线性增长的特征，且随着荷载量的增加，其荷载值逐渐平缓，证明试桩已接近或达到极限承载力。通过分析曲线的斜率变化，可判断试桩在不同荷载阶段的变形特性。

（2）沉降 - 时间（s-t）曲线分析。在本次基础静载变形检测技术中，针对每级荷载，以时间 t 为横坐标、沉降 s 为纵坐标绘制曲线，根据该曲线可以判断任意荷载条件下的沉降变化情况^[5]。案例项目中的观测结果显

示，在试验 5 天后每 1h 内的沉降量不超过 0.1mm 且连续出现 2 次，由此认为沉降稳定。

（五）测试过程中的相关注意事项

在锚桩法静载测试中，相关人员应重点关注以下几方面问题：（1）安全控制是保证测试过程顺利进行的关键，因此应密切关注反力系统稳定性问题，确保反力架有足够的刚度与强度，避免后期加载过程中出现变形或者破坏。限制荷载也是保证安全的关键，案例项目中明确提出，严禁出现超过最大试验荷载 10% 的超载情况，防止锚桩拔起或反力架坍塌。（2）测量精度保障。为保证试验结果精度，应严格规范基准桩的设置位置，确保基准桩必须设在不受试验影响的区域（距离试验桩 ≥ 3 倍桩径），避免沉降干扰。同时在测试过程中经常出现锚桩上拔的情况，若测试结果证实上拔量明显超过预期时，应暂停试验并分析原因。

四、结果评价

案例项目在地基基础静载变形检测中使用锚桩法取得了满意效果，从技术优势来看，该技术具有节省场地的优势，在相同的条件下，常规堆载法的作业面积要求达到 500 m² 以上，而锚桩法仅需 140 m² 即可完成。从经济性来看，单次试验节省堆载材料运输费 38 万元。最后从数据精度来看，案例项目采用的锚桩法数据波动 < 3%，相关数据的精度较高。

结语

锚桩法在超高层建筑地基基础静载变形检测中发挥着积极作用，作为一种现代化测量手段，该技术为建筑全生命周期安全管理奠定了良好基础。在未来，锚桩法在现场检测中还应主动与“锚桩 - 光纤”协同监测系统联用，通过信息化技术创新方法，使该技术能在建筑工程领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 曹冰心, 王向平, 付永刚. 后植筋技术在 CFG 桩复合地基静载试验中的应用 [J]. 建筑结构, 2024, 54(21): 152-155, 109.
- [2] 汤生鹏. 静载条件下强夯置换地基承载力试验研究 [J]. 江西建材, 2025(5): 134-136.
- [3] 李科. 复合地基承载力静载试验研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(19): 30-32.
- [4] 何玮山, 李超华, 池景豪, 等. 建筑物内地基基础静载试验关键技术研究及应用 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(7): 111-114.
- [5] 傅少君, 谢作为, 杨红成, 等. CFG 桩复合地基静载试验及有限元模拟 [J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(6): 698-702.

作者简介：丘燕君，1987 年 12 月，男，汉族，广东省兴宁市，本科，中级工程师，研究方向为地基基础检测。