

公路桥梁桩基承载力静载试验检测方法优化

王恒灿

浙江爱丽智能检测技术集团有限公司 浙江杭州 311700

摘要: 桩基础是公路桥梁结构承载和变形的核心隐蔽单元,其承载能力直接影响到整个生命周期的安全储备。传统静载荷试验主要采用低速持荷试验,存在测试周期长、交通扰动大、反力装置笨重等问题,不能满足当前装配式建造和快速检测的需求。随着交通量的增加和跨度的增大,桩基设计荷载不断突破极限,对测试精度、效率以及环境保护提出更加严格的要求,推动静载试验向智能化、轻质化和绿色化方向发展。

关键词: 公路桥梁; 桩基承载力; 静载试验; 检测方法优化

静载荷试验实质上是原位再现桩-土体系的极限平衡状态,并利用分层荷载曲线分析侧阻和端阻耦合作用机理。既有规范以安全系数方法作为判别核心,只关注极限承载力点值,忽略桩-土的加卸载路径和桩土刚度演变信息,存在安全冗余和风险盲区并存的问题。为突破“载荷-沉降”的单维判据,可引入能耗、位移率比等多维指标,融合数字化伺服、自平衡、双向加载等反力新形式,重构试验控制逻辑,实现承载力判定由静定位到全过程动态辨识的范型转变。

一、公路桥梁桩基承载力静载试验核心特征

1. 试验原理与受力特点

公路桥梁桩基静载试验的核心内容是模拟桩基的受力状态,对桩基进行逐级加载和观测沉降,从而判断桩基的极限承载能力和变形性能。试验过程中,荷载传递到桩基顶部,再由桩周土体和桩端持力层传递,荷载-沉降关系曲线直接反映了桩的承载特性^[1]。在荷载不大的情况下,桩基的沉降主要表现为桩身的弹性压缩和桩周土体的瞬态变形,并呈线性关系,随着荷载的增大,桩周土体逐渐进入塑变期,沉降速率逐渐加快,曲线上出现拐点,在荷载作用下,桩端土体发生破坏,沉降迅速增加,桩基础失稳。

通过单桩水平静载试验,观测桩的水平位移和弯矩分布,评价其抗侧移刚度和抗弯承载力。水平荷载下,桩基础与周围土体共同工作,表层土为其提供侧向抗力,其最大弯矩一般发生在地下一定深度,而这一部位又是桩基开裂的关键部位。静载荷试验要求既能反映桩基础竖向和水平向受力特性,又能全面反映复杂受力状态下桩基础的承载能力。

2. 试验材料与设备技术要求

静载荷试验中采用的材料在荷载传递过程中应满足稳定和安全的的要求。堆载施工中所使用的配重块为C30钢筋混凝土预制块,单体重量为2~5t,强度 $\geq 30\text{MPa}$,表面平整度控制在5mm以内,防止施工时发生滑移、倾覆等现象。锚桩法采用抗拉强度 $\geq 540\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 16\%$ HRB400螺纹钢HRB400,锚固效率 ≥ 0.95 ,极限拉力下锚具变形 $\leq 3\text{mm}$ 的夹片式锚具^[2]。

该实验装置的核心设备必须满足高精度的控制要求,试验用压力表、油泵、油管在加载时的压力不应超过额定工作压力的80%,且不应小于额定工作压力的20%,载荷精度误差为 $\pm 1\%$,活塞行程 $\geq 200\text{mm}$,以保证载荷的顺利、可控。位移计选用量程 $\geq 50\text{mm}$ 、精度 $\leq 0.01\text{mm}$ 、温度补偿 $-10^{\circ}\text{C}-60^{\circ}\text{C}$ 、适用于各种环境下的沉降监测。传感器需对其进行计量校准,标定误差 $\leq \pm 0.5\%$,采样频率 $\geq 10\text{Hz}$,保证载荷和沉降数据的实时采集。

二、静载试验优化方案设计与前期准备

1. 试验总体方案规划

试验方案应综合考虑工程地质条件,桩基础参数和场地条件。工程概况适应性分析需要明确核心参数:当桩基直径为1.2~2.0米时,荷载设备必须覆盖整个桩基顶部;对于30~50米长的超长桩,沉降观测需延长24小时以上;在软土地区,试验场地需铺设20mm厚的钢板进行加固,使其承载能力达到250千帕以上。

试验过程依次进行,即在试验前完成桩顶处理、清除桩顶浮皮、平整、桩顶设置钢垫分散荷载;然后布置加载装置和监控装置,调试合格后进行分段加载。在每

级荷载作用后,每隔一段时间进行一次沉降观测,待达到稳定标准后,再进行下一阶段的荷载,当荷载达到设计荷载或设计荷载的1.5倍时,分阶段卸荷,观察回弹情况。

试验区根据桩的分布特征进行分区,对多桩基桥,可将其划分为若干试验区,每区选择1~2个代表桩。以单桩测试周期为单元,相邻测试间隔 ≥ 48 小时,避免测试荷载之间的相互影响,保证单桩测试环境的独立性。

2. 加载体系选型与优化设计

传统的加载方式有明显的局限性,堆载方法适合于荷载 $\leq 3000\text{kN}$ 且场地开阔的场合,如直径1.2米、长30米的桩基础,若采用预制混凝土块堆载,其总重量需为试验荷载的1.3倍^[3]。锚桩法适用于大承载力桩基,荷载 $\geq 5000\text{kN}$,4根锚桩对称布置,锚桩间距 ≥ 4 倍,避免锚桩位移对试验结果产生影响。

将单桩水平静载试验和锚桩固结的优点相结合,对组合加载系统进行优化设计,使其适应复杂工况要求。在2000~8000kN荷载范围内,采用“液压千斤顶+锚桩反力架”的组合体系,采用Q355B型钢焊制反力架,主梁截面为500×300mm,立柱间距为3m,柱间设置角钢剪刀撑以增强稳定性。在加载系统中,增加负载反馈控制器,实时调整油压,保证各阶段荷载作用误差在 $\pm 0.5\%$ 以内。

当锚桩受力为800kN时,锚筋选择6根25mm直径的螺纹钢,稳定系数取0.85,验算承载力 $\geq 1000\text{kN}$ 。在刚度控制方面,反力架的最大挠度(L为主梁长度)应在L/5000以内,实测值应 $\leq 2\text{mm}$ 。结构抗倾覆验算按风荷载和附加荷载的1.3倍进行,抗倾覆安全系数 ≥ 2.5 ^[4]。

三、关键检测技术优化实施

1. 加载装置优化与现场布置

加载装置优化聚焦稳定性和精度,采用同步加载系统,实现多个千斤顶并行工作,由中心控制器同步施加荷载,同步误差 $\leq \pm 1\%$ 。为保证荷载的垂直传递,桩顶设置球形支座,避免偏心荷载的产生,支座球形度误差不得超过0.5mm,接触压力 $\leq 25\text{MPa}$ 。

荷载等级优化按“前期粗调整+后期精调整”方式进行,极限荷载 $\leq 70\%$ 时,各阶段荷载取极限荷载的10%,稳定30分钟。在荷载大于70%的情况下,各阶段荷载取极限承载力的5%,并延长至60分钟,直到沉降率 $\leq 0.1\text{mm/h}$ 为止。卸荷分级和加载是对称的,每级卸载量为荷载的2倍,观察回弹至稳定状态。

某工程采用2台5000kN液压千斤顶同步加载,截面

600×300mm的H型钢,加载时荷载波动 $\leq 0.3\%$,满足高精度试验的要求。

2. 监测系统布置与数据采集

将位移监测、应力监测和环境监测有机结合起来,实现多源数据的同步采集。位移监测点按“桩顶+桩身”布置,并在桩顶布置4个距桩顶 $\geq 100\text{mm}$ 的对称位移仪,以避免边缘效应的影响;每隔5m布置一根斜传感器,对桩身的侧向位移和弯曲变形进行监测。采用0~200MPa量程、精度 $\leq \pm 0.5\text{MPa}$ 的钢筋应力传感器布置在桩身中下段,对桩身应力进行实时监测^[5]。

采用无线传输方式进行数据采集,通过网关将采集到的数据汇总到云平台上,采样频率设定为每分钟1次,荷载作用时加密到1次/10秒。当沉降率大于0.5mm/分时,系统会发出报警信号,提示操作人员停止装载。在环境监测中,温度、湿度和风速同步记录,当温度变化 $\geq 5^\circ\text{C}$ 时,位移数据经温度校正。

监控设备的安装精度严格控制,位移计的安装垂直度误差不超过 1° ,应力传感器应牢固地绑扎在钢筋轴线上,且与钢筋轴线平行,误差不超过 3° 。

3. 支撑体系搭设与预压处理

试验支护系统可根据场地条件选择满堂支架或独立钢管支架。当场地承载力大于200kPa时,可采用扣件式钢管支架,立柱纵向间距0.8米,横向间距0.8米,采用100mm×100mm方木,在顶托和反力架的接触点上分散局部压力。在软土地基上,以 $\phi 300\text{mm}$ 钢管为立柱,采用独立式钢架支撑,承台采用1.0米×1.0米×0.5米的C30混凝土承台,保证支架沉降不超过1mm^[6]。

支护系统的预压应按照设计荷载进行,第一级荷载达到50%时,用沙袋均匀堆载,24小时后进行100%的加载,观察沉降情况,稳定后,加载至120%并保持48小时。卸荷顺序相反,每级卸荷结束后监测回弹,24小时内沉降差小于0.5mm,判定预压合格。

预压监测是在支架顶端设置沉降观测点,以0.01mm的精度进行电子水准仪量测。然后,每隔6小时读取一次数据,然后加载至120%,每2小时加一次,绘制沉降-时间曲线,以验证支架的稳定性。某工程基坑支护系统的预压设计荷载为1200kN,48小时后最大沉降差为0.8mm,卸荷后回弹0.6mm。

4. 数据处理技术优化与分析

可采用基于智能分析算法的荷载-沉降曲线自动拟合模型。在此基础上,利用Origin软件对原始数据进行

平滑处理，剔除异常值，并利用双曲线和指数曲线的联合拟合方法，精确地判断桩基的屈服荷载和极限荷载。

数据校正技术对环境因子和设备误差进行优化，采用线性回归方程对温度进行校正，实现不同温度下位移数据到20℃的转换，负载校正是在考虑千斤顶油压损耗的基础上，以每小时0.3%的比率补偿。采用沉降率法和相对变形法确定极限承载力，以沉降率 $\geq 0.5\text{mm/分}$ 或桩顶沉降达10%为极限状态。

将试验成果以数字图形的形式展现出来，并绘制出荷重-沉降(Q-s)、沉降-时间(s-t)曲线和桩身应力分布图，直观地反映桩的承载性能。对某工程桩基静载荷试验资料进行优化处理，其极限承载力判断误差为1.5%，比传统方法精度提高40%以上。

5. 节点控制与成型质量检测

实验节点控制着三个关键步骤：加载，监控，卸载。在荷载节点上记录各阶段荷载的作用时间，稳定时间，

沉降量，记录数据误差不超过 $\pm 0.01\text{mm}$ ；监测节点定期对传感器数据进行校验，并在每级荷载作用前和对应应变仪和应变仪进行零点标定；卸荷节点处观察回弹，计算回弹速率，回弹率 $\geq 80\%$ 为桩的弹性力学性能。

采用超声波回弹综合法评定桩身完整性。试验结束后，清理桩顶残余载荷，修复桩顶破损部分，保证桩基础正常使用。

某工程节点采用M24高强度螺栓连接，计算出终拧扭矩($k=0.13$ 、 $d=24\text{mm}$ 、 $P=225\text{kN}$)，计算得终拧扭矩 $702\text{N}\cdot\text{m}$ ，现场采用扭矩扳手校验，误差 $\leq \pm 3\%$ 。经超声波检测，桩身完整性达到I类，符合设计要求。

6. 程实例验证

以某高速公路桥梁桩基工程为例，采用直径1.5m、桩长40m的钻孔灌注桩为研究对象。采用常规静载荷试验和本文提出的优化方法进行对比测试，测试数据见下表，测试设备布置如表1所示。

表1 传统方法与优化方法检测结果对比表

检测指标	传统方法	优化方法	优化提升幅度
极限承载力 (kN)	6850.23 ± 152.36	6920.56 ± 85.42	精度提升44.0%
试验周期 (h)	72.0	48.0	效率提升33.3%
最大沉降量 (mm)	45.23 ± 1.25	44.86 ± 0.52	稳定性提升58.4%
数据采集频率 (次/h)	12	60	频率提升400.0%
温度修正误差 (%)	± 2.3	± 0.8	误差降低65.2%

由表1可知，优化后的极限承载力测试精度明显提高，试验周期缩短33.3%，数据采集频率大大提高，能更准确地捕捉桩基的受力和变形特性。现场测试结果表明，优化后的桩基承载力更加稳定，最大沉降变化更小，温度校正误差小于 $\pm 0.8\%$ ，完全满足公路桥梁桩基检测的高精度要求。

结束语

综上所述，公路桥梁桩基承载力静载试验检测方法优化，不仅可以提高桩基承载力评估的精度和效率，还能促进桥梁基础设计从经验安全系数向性能极限状态转变，为大跨度、长寿命、大跨度、重载交通工程提供可验证的安全边界。面向未来，随着桩-土模型精细化、传感网络边缘化以及数字孪生等技术的成熟，将静载试验纳入施工-运营全过程的闭环，实现桩基承载力参数的实时更新和风险预警，支撑我国公路桥梁桩基在复杂

地质环境和极端荷载条件下的韧性服役，为我国交通强国战略的稳健实施提供支撑。

参考文献

- [1] 况文斌. 自平衡静载试验法在桥梁桩基承载力检测中的应用[J]. 交通世界, 2025, (Z2): 172-174.
- [2] 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.
- [3] 王相相. 桥梁桩基承载力检测技术及其应用[J]. 四川建材, 2024, 50(11): 196-197+200.
- [4] 李奕金. 砂土地层桩基自平衡解析转换方法及承载力研究[J]. 铁道建筑技术, 2024, (11): 66-69+92.
- [5] 曹丹丹. 公路桥梁实验测量技术与管理策略[J]. 四川建材, 2024, 50(07): 63-64+67.
- [6] 赵瑞青. 桥梁桩基承载试验分析[J]. 山东交通科技, 2022, (04): 104-106.