

桩基检测中的静载和动载检测研究

周 亮

(江西金得有色工程技术有限公司, 江西 九江 332000)

摘 要 随着建设工程规模与复杂程度的不断提高, 科学验证桩基的承载力并严格控制其施工质量, 是工程建设中的核心环节。静载检测与动载检测作为两类具有代表性的桩基检测方法, 分别建立在不同的力学原理与测试技术基础上, 广泛应用于各类桩基工程的质量控制与验收评估中。本文主要探讨两种方法的原理与实施要点, 分析其技术特点与结果之间的互补关系, 以期在实际工程中合理选择与联合运用静载与动载检测方法提供有益参考。

关键词 桩基检测; 静载试验; 动载检测; 承载力

中图分类号: TU413.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.037

0 引言

随着现代工程结构向大荷载、深基础、复杂地质条件方向发展, 对桩基检测技术提出了更高要求。静载检测与动载检测作为两类代表性方法, 分别基于不同的物理原理与工程实践形成各自的技术体系。静载试验通过模拟实际工作状态下的荷载传递过程, 为评估桩基极限承载力与变形特性提供直接依据; 而动载检测则利用应力波在桩身中的传播特性, 实现对桩身质量与缺陷的快速诊断与承载力间接推定。深入理解其技术特点与适用范围, 对提升桩基工程质量控制水平具有重要的现实意义。

1 桩基检测中的静载和动载检测技术原理

1.1 静载试验技术原理

静载试验技术原理基于经典的土力学与结构力学理论, 通过向桩顶施加接近于实际工作状态的竖向或水平荷载, 并精确测量其随时间产生的沉降或位移, 从而直接确定其承载能力与变形特性。该技术应用慢速维持荷载法, 利用液压千斤顶逐级施加载荷, 并由反力系统提供相应反力。每级荷载持续作用, 直至桩顶沉降趋于稳定, 从而充分调动桩侧及桩端阻力。通过绘制 $Q-s$ 曲线和 $s-lgt$ 曲线等, 可明确判断桩的极限承载力、使用状态下的承载能力及变形特性, 为工程设计提供可靠的数据支持。

1.2 动载检测技术原理

动载检测技术原理主要基于应力波在桩身中的传播理论。瞬态冲击力作用于桩顶会激发应力波, 该波动沿桩身传播。在波阻抗变化处或桩底, 应力波会产生上行反射。安装于桩顶的高精度传感器用以记录这些响应, 据此分析桩身是否存在缺陷并推定其承载力。

低应变法利用一维弹性波理论, 通过分析反射波的相位、幅值与到达时间来判断缺陷位置与性质。高应变法则通过求解波动方程, 采用 Case 法或数值拟合分析, 将实测力与速度信号进行匹配, 从而估算桩的侧阻、端阻及模拟静载 $Q-s$ 曲线, 实现对承载力的评估^[1]。

2 桩基检测中的静载检测实施要点

2.1 反力装置设计与验算

反力系统是开展静载试验的关键组成部分, 其主要作用是为千斤顶提供充足、稳定而安全的反向支撑。该系统的设计须按最不利工况考虑, 以保证试验全程具备充分的安全保障。目前常用的反力形式主要采用锚桩横梁和压重平台两种装置。其中, 锚桩反力系统通过工程桩或专门设置的锚桩提供反力。设计时需验算锚桩的抗拔承载力及连接钢筋的强度; 横梁作为传力构件, 需进行抗弯、抗剪及刚度计算, 防止过度变形影响测试精度。压重平台则通过堆载重物提供反力, 其设计关键在于堆载总量不得小于预定最大试验荷载的 1.2 倍, 且平台支墩面积需满足地基承载力的要求, 防止在试验过程中发生地基失稳或显著沉降^[2]。

反力装置的验算是一个系统的安全校核过程。对于锚桩法, 需计算锚桩数量、入土深度、钢筋截面面积, 并评估其在上拔力作用下周围土体的抗剪强度, 确保群锚效应不会导致整体失效。横梁的计算需采用结构力学方法, 在最不利荷载组合下, 其最大挠度应小于跨度的 $1/400$, 以避免对沉降观测产生干扰。对于压重法, 除总重量外, 还需对平台承重结构的强度与稳定性进行复核, 并确保堆载物重心居中、堆放稳固, 留有足够的安全距离, 以防堆载平台在试验过程中发生倾覆或垮塌, 从而保障人员与设备安全。

2.2 加载制度与沉降观测

加载制度与沉降观测是获取准确 $Q-s$ 曲线的关键环节,其执行质量直接决定试验结果的可靠性。加载过程应采用慢速维持荷载法,并严格依照预先确定的荷载等级逐级施加。每级加载量一般取预估极限承载力或最大试验荷载的 $1/10 \sim 1/15$ 。每级荷载施加完毕后,须立即读取并记录沉降初始值,之后按第 5、15、30、45、60 分钟的时间间隔监测沉降变化,超过 1 小时后改为每 30 分钟观测一次,直至沉降趋于稳定。稳定标准一般定义为:连续两次观测中,每小时沉降增量不超过 0.1 mm。只有在当前荷载级达到稳定后,才能进行下一级的加载。

沉降观测需使用高精度、大量程的位移传感器或精密水准仪,其测量精度应优于 0.01 mm。基准梁应独立架设,其支点需远离加载区和承压板的影响范围,以避免随地面一同沉降,确保读数的真实性。观测时需同步记录各测点的沉降值、观测时间以及环境温度,以便进行数据分析与修正。

2.3 终止加载条件与结果判定

终止加载条件是判断试验是否达到目的或桩身已发生破坏的关键准则,是试验安全性与经济性的重要保障。依据规范要求,试验过程中若发生以下任一情况,应立即终止加载:第一,在某一荷载级别下,桩顶沉降量超过前一级沉降量的 5 倍,且累计沉降已超过 40 mm;第二,在某级荷载下,桩顶沉降量达到前一级的 2 倍以上,且持续观测 24 小时后仍未达到稳定状态;第三,荷载—沉降曲线显示为缓变形态,累计沉降量超过 60 ~ 80 mm,同时实测承载力显著低于设计预定的极限值;第四,已顺利施加至设计规定的最大试验荷载并保持稳定^[3]。

结果判定是基于完整的测试数据进行的综合分析。测试分析的核心步骤是绘制荷载—沉降($Q-s$)及沉降—时间对数($s-lgt$)曲线。当 $Q-s$ 曲线表现为陡降型时,应以曲线发生急剧转折的起始点之前一级的荷载值,作为其极限承载力。对于缓变形曲线,则需根据沉降标准或采用数学外推方法综合确定极限承载力。此外, $s-lgt$ 曲线簇的形态有助于判断桩端土的性质和桩的破坏模式。

3 桩基检测中的动载检测实施要点

3.1 低应变反射波法的传感器安装与激振控制

传感器安装与激振控制是低应变反射波法获取高质量原始信号的基础,直接决定了桩身完整性判读的

准确性。传感器应选用高性能加速度计或速度计,并垂直安装于桩顶经过打磨的平整面上。安装点需远离钢筋头,通常选择距桩心约 $2/3$ 半径处。安装时必须使用耦合剂,并通过磁座、螺丝或手压等方式确保传感器与桩顶表面紧密粘结,形成足够的附着力,防止在激振过程中产生二次振动或脱离,从而避免引入虚假信号。激振控制旨在产生一个能量适中、频率成分合适且具有良好重复性的脉冲信号。激振通常采用手锤或力棒敲击桩顶,锤头材质和锤重决定了脉冲力的宽度和能量。对于浅部缺陷检测,需选用硬锤头产生高频窄脉冲;对于深部缺陷或长桩检测,则需选用软锤头或重锤产生低频宽脉冲以增强穿透力。敲击点宜选择在桩顶中心,且敲击方向应垂直于桩顶面。

3.2 高应变动力试桩法的锤重选择与信号分析

锤重选择是高应变法成功实施的首要条件,其核心是确保桩土体系产生足够的塑性位移,从而充分激发桩侧阻力和端阻力。锤重的选择并非随意而定,需根据试桩的尺寸、预估极限承载力以及目标位移量进行理论计算。规范要求锤重通常不宜小于单桩预估极限承载力的 1.0% 至 1.5%,以保证桩顶产生的动位移接近静载试验在相同荷载下的沉降量。落锤高度则需根据锤重、桩径及桩土体系刚度进行调节,以获得合适的冲击速度。落锤必须导向良好,保证锤体对中、平稳地自由下落,避免偏心撞击,以防止桩头损坏或测试数据严重失真。信号分析是高应变法的核心技术,其过程是从实测的力与速度时程曲线中提取桩土体系的内在参数。

3.3 声波透射法的声测管布置与数据判读

声测管的预埋布置是声波透射法得以实施的前提,其设计与施工质量决定了检测的范围与可靠性。声测管的选用与安装须满足以下技术要求:一是材质应为金属管,内径须较换能器直径大 20 mm 以上,以保证其导向顺畅。二是布置数量与桩径严格对应:桩径不大于 800 mm 时设 2 根;介于 800 mm 至 2 000 mm 时设 3 根;超过 2 000 mm 时建议设 4 根。三是安装时须严格保证各管在钢筋笼内侧对称、垂直,并绑扎牢固。其核心要求是管路必须保持平行、全桩长通畅且密封不漏水,管底应密封,管顶在灌注前需加盖,防止水泥浆液堵塞管路,从而确保检测探头能到达桩底并获取全桩长数据。数据判读是一个基于声学参数异常的综合诊断过程。检测时,发射与接收换能器在充满清水的声测管中同步升降,测量声时、声幅、声频等参数沿深度的变化。数据分析首先观察声参量—深度曲线的形态^[4]。

4 静载与动载检测技术对比分析

4.1 技术特性对比

静载与动载检测技术在基本原理、设备配置、测试周期及适用目标上存在本质区别，二者构成了互补而非替代的关系。静载试验通过液压千斤顶施加荷载，由反力装置提供平衡，采用慢速维持荷载法，使桩—土体系充分变形直至达到新的平衡状态，从而直接测量荷载与沉降的对应关系。其过程模拟了基础的实际受力状态，结果直观、可靠，被誉为承载力测定的“黄金标准”。然而，其设备笨重、安装复杂、测试周期长、成本高昂且难以进行大范围普查，通常用于为设计提供最终验证或对动载结果进行校准。动载检测则基于应力波理论，通过瞬态冲击在桩顶激发应力波，利用传感器接收反射信号，通过波动理论分析来推断桩身结构完整性和推定承载力。其设备轻便、测试快速、成本较低，适用于大批量桩的快速普查。两种方法的核心技术特性对比如表 1 所示。

表 1 静载检测与动载检测核心技术特性对比

对比维度	静载检测	动载检测
测试原理	直接施加静荷载，测量力与位移的关系（平衡原理）	施加瞬态冲击荷载，分析应力波传播与反射（波动理论）
荷载性质	慢速、维持荷载，使桩土体系充分变形	瞬态、冲击荷载，激发桩体的动力响应
主要提供参数	直接确定极限承载力、工作荷载下的沉降	推定承载力，评价桩身完整性（缺陷位置与性质）
测试周期	长（数天）	短（数分钟至数小时）
设备规模与成本	庞大、复杂、成本高昂	轻便、灵活、成本相对较低
结果可靠性	高，被公认为最直接、可靠的方法，是验证其他方法的基准	承载力结果为间接推定，需静载验证；完整性检测可靠性较高
对桩体的影响	属于破坏性试验（至极限状态），试验后桩通常不可再用	属于非破坏性或低破坏性试验，对桩身基本无影响
适用目标	设计验证、竣工验收、为动载提供标定	施工过程质量控制、大面积普查、缺陷诊断

4.2 检测结果互补性

静载与动载检测结果的互补性主要体现在其对桩基性能评价的不同维度上，二者结合可构建一个从宏观承载力到微观完整性的全面评价体系。静载试验提供了桩基抗压性能的宏观、整体性结论。它精确给出了在设计荷载下的沉降量以及极限承载力值，反映了桩土体系整体的、最终的工作状态。然而，静载试验无法揭示桩身是否存在内部缺陷，也无法解释承载力不足或沉降过大的具体原因^[5]。

动载检测，特别是低应变和高应变法，则提供了桩基结构状态的微观、局部性信息。低应变法能精确探测桩身的连续性，定位缩颈、扩颈、离析、断裂等

缺陷的位置和严重程度，解释了桩身材料本身的质量问题。高应变法在推定承载力的同时，还能通过曲线拟合分析将总阻力划分为侧阻和端阻，从而判断承载力主要来源于桩侧摩阻还是桩端支承，这为分析静载试验结果提供了内在机理层面的解释。因此，动载检测可以诊断“病因”，而静载检测则验证了“症状”的严重程度，二者相辅相成，共同构成了对桩基工程质量的完整诊断报告。

5 结束语

静载试验以其结果直观可靠成为承载力判定的基准，而动载检测则凭借其高效经济的特点在完整性评价与大范围普查中发挥着不可替代的作用。二者并非相互排斥，而是构成强大的技术互补体系。在实际工程中，应根据具体设计要求、地质条件及工程目标，科学地选择与组合这两种方法，建立多层次的桩基质量评估流程，从而为建设工程的安全与耐久性提供坚实的数据支撑与技术保障。

参考文献：

- [1] 张帮伟. 基于静载和动载法的桩基检测分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(09): 150-153.
- [2] 常永浩. 桩基静载检测中桩侧负摩阻力试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(06): 112-115.
- [3] 朱家俊, 马永平, 浦艳芳. 锚桩反力法静载试验在桩基检测中的应用[J]. 云南水力发电, 2025, 41(04): 73-76.
- [4] 张夏开. 桩基静载检测中存在的问题与对策[J]. 四川水泥, 2023(12): 16-18.
- [5] 韦超林. 桩基静载检测中的常见问题及处理措施[J]. 冶金管理, 2022(23): 73-75.