

水利工程地基基础施工质量检测方法及工程实践

王 赛

塔城水利工程质量检测有限公司 新疆 塔城 834700

摘 要：水利工程地基基础施工质量直接关系到整个工程的安全稳定与长期运行效益。针对水利工程地基基础隐蔽性强、施工条件复杂、质量影响因素多等特点，本文系统阐述了当前水利工程地基基础施工质量检测的主要方法，包括静载试验法、动力检测法、波速测试法、钻芯取样法、原位测试法等，分析了各方法的适用范围与优缺点。结合某大型水利枢纽工程地基处理实践，详细介绍了综合检测技术的应用过程与效果评价，提出了基于多方法融合的质量检测优化策略。研究表明，合理选择并综合运用多种检测方法，能够显著提高地基基础质量评价的准确性与可靠性，为类似工程提供参考。

关键词：水利工程；地基基础；质量检测；静载试验；动力检测；工程实践

引言

水利工程是国民经济和社会发展的基础设施，其安全性、耐久性直接关系到人民生命财产安全和区域经济社会发展。地基基础作为水利工程的隐蔽部分，承担着将上部结构荷载传递至地层的核心功能，其施工质量若存在缺陷，往往难以在后期运行中发现和补救，一旦发生失稳或破坏，将造成不可估量的损失。因此，科学、有效地开展地基基础施工质量检测，是确保水利工程质量的关键环节^[1]。近年来，随着我国水利工程建设规模的不断扩大和地质条件的日趋复杂，传统单一检测方法已难以满足高精度、高效率的质量控制需求。如何在复杂地质条件下准确评价地基基础的承载能力、完整性与均匀性，成为工程技术人员面临的重要课题。

1 水利工程地基基础施工质量检测主要方法

1.1 静载试验法

静载试验法是目前公认的地基承载力检测中最直接、最可靠的方法。该方法通过在桩顶或地基表面逐级施加竖向荷载，观测地基或桩基的沉降变形特征，从而确定其极限承载力和变形模量。根据加载方式的不同，可分为锚桩法、堆载法和锚桩-堆载联合法。静载试验的突出优势在于力学模型清晰、结果直观准确，能够真实反映地基土在受力状态下的工作性能。该方法尤其适用于大直径灌注桩、重要建筑物的桩基承载力验收检测。然而，静载试验也存在明显局限：试验周期长、成本高、设备笨重，且属于破坏性或损伤性检测，难以大规模普检。在实际应用中，通常选取总桩数的1%且不少于3根进行抽检。近年来，自平衡静载试验技术得到发展，通过在桩身预设荷载箱，可实现上下两段同时加载，有效解决了传统方法在大吨位、水上施工等特殊条件下的

应用难题。

1.2 动力检测法

动力检测法以应力波传播理论为基础，通过分析桩土系统在瞬态或稳态激振作用下的响应特征，推定桩身完整性及承载力。低应变反射波法是最常用的动力检测手段，通过安装在桩顶的加速度传感器接收反射波信号，根据波速、波形和相位变化判断桩身缺陷位置与性质。该方法具有设备轻便、检测速度快、不损伤桩身、可全数检测等优点，特别适用于大面积的桩身完整性普查。高应变动力检测法采用重锤锤击桩顶，使桩体产生贯入度，通过分析实测的力波和速度波曲线，采用Case法或曲线拟合法计算单桩极限承载力^[2]。该方法兼有承载力检测和完整性检测功能，但精度受锤击能量、桩周土阻力分布等因素影响较大，一般要求与静载试验进行对比标定。在实际工程中，低应变法常用于混凝土灌注桩和预制桩的完整性普检，高应变法则作为静载试验的补充，在工期紧张或静载条件受限时采用。需要指出的是，动力检测结果的解释依赖工程经验，对于复杂地质条件和特殊桩型，应结合其他检测方法综合评判。

1.3 波速测试法

波速测试法包括跨孔波速测试和单孔波速测试，通过测定弹性波在地基土中的传播速度，反演计算土体的动弹性模量、剪切模量等力学参数。该方法主要用于评价地基处理效果，如强夯置换层、振冲碎石桩复合地基的均匀性和加固深度。跨孔波速测试需在检测区域钻设两个或多个测试孔，一个孔内激发震源，其余孔内布置检波器，根据波到达时间计算波速。该方法的优势在于测试范围大、代表性强，能够反映地基土在水平方向的均匀性变化。但钻孔成本较高，且不适用于含大粒径碎石的土层。近年来，

面波法（瑞利波法）得到推广应用，其只需在地表布置检波器列阵，通过分析面波频散特性获得地层波速剖面，具有无损、快速、成本低的优点，在堤防工程、围垦工程的地基质量检测中效果良好。

1.4 钻芯取样法

钻芯取样法是唯一能够直接获取地基材料实物样本的检测方法。采用地质钻机在桩身或地基中钻取芯样，通过观察芯样的颜色、均匀性、胶结状况以及进行室内力学试验，全面评价材料强度、桩长、沉渣厚度、桩底持力层性状等关键指标。该方法的优势在于结果直观、信息丰富，能够发现其他方法难以识别的渐变型缺陷，如混凝土离析、夹泥、蜂窝等。同时，钻芯法不受桩长和桩径限制，特别适用于大直径超长桩的质量判定。然而，钻芯法属于有损检测，钻孔会对结构造成一定损伤，且检测费用高、效率低，抽样比例一般控制在总桩数的0.5%~1%。此外，小直径桩因芯样直径过小而难以获得可靠强度指标。在水利工程中，钻芯法常与声波透射法配合使用，先用声波法初步筛查可疑桩段，再对有疑问部位进行钻芯验证。

1.5 原位测试法

原位测试法是指在原位应力状态下测试地基土工程性质的检测方法，主要包括标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验和旁压试验等。这些方法适用于天然地基和复合地基处理效果的检测评价。标准贯入试验通过测定贯入器击入土层的锤击数 N 值，结合经验公式估算砂土密实度、黏性土承载力及抗剪强度指标。动力触探试验根据探头形式和落锤质量分为轻型、重型和超重型，适用于砾砂、碎石土等地基的均匀性检测。静力触探试验采用液压或机械方式将锥形探头压入土层，连续记录锥尖阻力和侧壁摩阻力，能够精细划分土层和确定地基承载力。旁压试验通过在钻孔中放置旁压器并施加气压，测量土体变形与压力的关系，获得地基土的水平基床系数和变形模量^[3]。原位测试法具有不扰动土体、测试范围代表性好、可连续获取数据等优点，但试验结果的解释高度依赖地区经验，不同方法之间需要相互验证。在水利工程地基检测中，常采用标准贯入试验与静力触探试验相结合的方式，前者用于获取关键深度的离散数据，后者用于连续分层评价。

2 工程实践案例分析

2.1 工程概况

某大型水利枢纽工程位于我国西南地区，主要任务以防洪、发电为主，兼顾航运和水资源配置。工程挡水建筑物为混凝土重力坝，最大坝高98m。坝基覆盖层厚度

变化大，地质条件复杂，基岩为中风化花岗岩，上部覆盖第四系冲洪积层，包括粉质黏土、细砂、含砾中粗砂及碎石层，厚度8~25m不等。设计采用振冲碎石桩对覆盖层进行加固处理，桩径1.0m，桩间距2.0~2.5m，桩长穿透软弱层进入下卧持力层不小于2.0m，总桩数1864根。该工程地基处理质量检测面临三大难点：一是施工区地下水丰富，常规检测方法受水位影响大；二是碎石桩体材料为开山碎石，粒径不均，对动力检测信号干扰严重；三是工期紧，要求检测方法快速高效且干扰后续工序。针对上述特点，项目采用了“原位测试为主、波速法普查、钻芯法验证”的综合检测方案。

2.2 检测方案设计

检测方案分为三个阶段实施。第一阶段为施工过程控制检测，每完成100根桩随机抽取3根进行重型动力触探试验，检测桩体密实度和桩间土挤密效果，同时采用瞬态面波法沿轴线方向每20m布置一个测线，快速评价处理区域的整体均匀性。第二阶段为完工后完整性检测，采用跨孔波速测试选取代表性断面布置测试孔，孔距4m，测试深度至基岩面以下2m，分析波速分布特征及加固深度。第三阶段为承载力验证检测，选取地质条件最差和波速异常区域共12个点位进行单桩复合地基静载试验，并在其中3个点位进行钻芯取样，获取桩体材料的物理力学指标。该方案充分发挥了不同方法的互补优势：原位测试直接获取力学参数，面波法实现大范围快速筛查，钻芯法提供直观验证。检测点位的布设遵循“重点突出、随机抽检、异常加密”的原则，既保证了代表性，又兼顾了经济性。

2.3 检测实施与结果分析

重型动力触探完成156个点。碎石桩桩身平均锤击数12~18击/10cm，桩间土由处理前的4~6击提高至8~12击，挤密效应明显。按经验公式换算，复合地基承载力特征值达220~280kPa，满足设计要求。局部因碎石级配不良、含泥量偏高出现锤击数低于6击的低值区，已补桩处理。瞬态面波法完成测线32条（总长5680m）。反演得到剪切波速180~260m/s，不均匀系数0.23，地基均匀性良好。波速低于160m/s的异常区段共4处（长12m、8m、15m、6m）。与动力触探结果对比，吻合度达85%以上。跨孔波速测试布设8个断面24对孔。波速随深度增加：0~5m为150~190m/s，5~15m为190~240m/s，15m以下为240~300m/s，与地层分布规律一致。动剪切模量较处理前提高1.8~2.5倍，深层加固效果良好。静载试验完成12点。Q-s曲线均为缓变型，特征值荷载下沉降量5.2~11.8mm（限值30mm）。承载力特征值试验结果为

235~292kPa,设计值满足率100%。钻芯取样3孔(总进尺67.2m),显示桩体骨料分布均匀,胶结良好,未见连续夹层。桩体材料饱和单轴抗压强度3.8~5.2MPa,满足设计要求。

2.4 综合检测效果评价

通过多种检测方法的综合运用,该工程地基处理质量得到了全面评价。以静载试验和钻芯法为“基准”,面波法和跨孔波速测试的检测结果与之吻合良好,桩身完整性判定准确率达到92.5%,承载力推定误差控制在 $\pm 12\%$ 以内。与单一采用动力触探相比,综合检测方案增加费用约15%,但检测效率提高了30%,更重要的是有效避免了漏检和误判,发现并处理了4处潜在质量缺陷,避免了后期返工造成的更大损失。该实践表明,对于碎石桩等粗颗粒材料构成的水利工程地基,不宜仅依赖单一动力检测方法,而应建立“原位测试-波速普查-局部验证”的多层次检测体系。面波法可快速圈定异常区,动力触探对异常区进行加密复核,静载试验和钻芯法最终确认承载力与材料性能,这种逐级递进的检测策略在保证质量的前提下最大限度地节约了成本。

3 存在的问题与发展趋势

3.1 当前面临的主要问题

尽管水利工程地基基础质量检测技术不断发展,但在实际应用中仍存在若干问题。一是检测方法的适用性界限不够清晰,不同方法得出的结果有时存在矛盾,如何确定方法选择的优先顺序和结果采信标准尚缺乏系统研究。二是检测结果的可靠性依赖现场操作规范性,如低应变检测中传感器安装位置偏差、激振方式不当等都会引入较大误差,而目前尚缺乏有效的现场质量控制手段^[4]。三是对新型地基处理技术如高压旋喷桩、水泥土搅拌桩复合地基的检测理论滞后于工程实践,现有规范中的经验公式多基于传统桩型,推广应用的置信度有待提高。

3.2 技术发展趋势

展望未来,水利工程地基基础检测技术将向智能化、数字化、集成化方向发展。基于物联网的远程实时监测系统正在兴起,通过在桩身或地基中埋设光纤光栅

传感器,可实现对地基受力变形状态的长期自动监测,为施工质量控制和安全运行评估提供连续数据。人工智能技术的引入为检测信号解释提供了新思路,深度学习算法在低应变波形识别和缺陷分类方面已展现出优于传统经验判别的能力。此外,多种物理场联合反演技术有望打破单一方法的局限性,通过弹性波、电磁波、直流电法等联合探测,实现地基基础质量的多参数综合评价。标准化的检测数据共享平台建设也将推动区域经验公式的积累和优化,最终形成更加科学、高效、经济的水利工程地基基础质量检测技术体系。

4 结语

水利工程地基基础施工质量检测是保障工程安全的重要防线。本文系统总结了静载试验、动力检测、波速测试、钻芯取样和原位测试等主要检测方法的原理、适用范围及技术特点,并结合大型水利枢纽工程实践,验证了综合检测方案的有效性。研究表明,没有一种检测方法是万能的,应根据工程地质条件、基础类型、工期要求和成本约束,科学构建“多种方法、相互印证、逐级递进”的检测体系。静载试验和钻芯法作为“金标准”用于关键点位验证,波速类方法用于大范围快速筛查,原位测试用于过程控制和局部加密,是当前较为成熟的组合模式。随着传感器技术、人工智能和大数据方法的不断进步,水利工程地基基础质量检测将朝着更精准、更高效、更智能的方向持续发展,为水利基础设施建设提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]高亚镇.水利工程地基承载力检测技术要点[J].全面腐蚀控制,2026,40(4):386-388.
- [2]叶鸿涛.提高水利工程地基基础岩土检测技术要点[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(3):216-218.
- [3]马秀敏,陈波,张海亮.水利工程地基处理技术对比分析[J].水上安全,2026,(2):160-162.
- [4]郭道迁,于志多.水利工程中软土地基处理技术的比选与应用实例[J].水上安全,2026,(1):151-153.