

水利水电工程地基处理与基础施工技术分析

魏传林

四川川交路桥有限责任公司 四川 德阳 618300

摘要: 水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,其安全性和稳定性直接关系到防洪、发电、灌溉、供水等多重功能的实现。而地基作为承载整个工程结构的基础,其处理质量与基础施工技术水平对工程的整体性能具有决定性影响。本文系统梳理了水利水电工程中常见的地基问题类型,深入分析了当前主流的地基处理技术(如灌浆加固、桩基技术、强夯法、置换法等)及其适用条件,并结合典型工程案例探讨了不同地质条件下基础施工的关键技术要点。同时,文章还对智能监测、绿色施工及BIM技术在地基处理与基础施工中的应用前景进行了展望,旨在为提升我国水利水电工程的地基处理水平和基础施工质量提供理论参考与实践指导。

关键词: 水利水电工程;地基处理;基础施工;灌浆技术;桩基;智能监测

引言

水利水电工程通常规模宏大、结构复杂,且多建于地质条件复杂的山区、河谷或软土地区。这类工程不仅承受巨大的水压力、土压力,还需应对地震、洪水、温度变化等多种自然荷载作用。因此,确保其地基具有足够的承载力、稳定性和抗渗性,是保障工程长期安全运行的前提。然而,在实际工程建设中,天然地基往往难以满足设计要求,存在诸如承载力不足、沉降过大、渗透性强、液化风险高等问题。为此,必须采取科学有效的地基处理措施,并辅以精细化的基础施工技术。近年来,随着新材料、新工艺和信息技术的快速发展,水利水电工程的地基处理与基础施工技术不断革新。从传统的换填、夯实到现代的高压旋喷桩、深层搅拌桩,再到基于物联网的实时监测系统,技术手段日益多样化、智能化。然而,如何根据具体工程地质条件选择最优技术方案,如何在复杂环境下保障施工质量,仍是当前面临的重要课题。

1 水利水电工程常见地基问题类型

水利水电工程所处环境复杂,地基问题具有多样性与特殊性,主要可归纳为以下几类:

1.1 软弱地基

软弱地基主要指由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土等构成的低强度、高压缩性土层。此类地基承载力低,易产生不均匀沉降,对大坝、厂房等重型结构构成严重威胁。例如,沿海地区的抽水蓄能电站常面临深厚软土层问题。

1.2 岩溶地基

岩溶(喀斯特)地貌广泛分布于我国西南地区。岩溶地基内部存在大量溶洞、裂隙和地下暗河,导致地基

整体性差、承载力不均,且存在突水、塌陷等风险。大型水电站坝址若位于岩溶区,需进行详尽的地质勘探与针对性处理。

1.3 断裂带与破碎岩体

活动断裂带或构造破碎带内的岩体完整性差,节理裂隙发育,力学性能显著降低。此类地基不仅承载能力弱,还可能因地震活动引发错动,对工程结构造成破坏。

1.4 高渗透性地基

砂砾石层、卵石层等地层渗透系数大,易形成渗流通道,导致坝基渗漏、管涌甚至流土破坏。尤其在高水头作用下,渗透稳定性成为关键控制因素。

1.5 地震液化地基

在地震设防区,饱和砂土或粉土地基在强烈震动下可能发生液化,丧失承载能力,引发结构倾斜或沉陷。这对位于地震活跃带的水利枢纽构成重大安全隐患。

2 主要地基处理技术及其适用性分析

针对上述地基问题,工程实践中发展出多种地基处理技术。合理选择技术方案需综合考虑地质条件、工程规模、工期、成本及环境影响等因素。

2.1 灌浆加固技术

灌浆是水利水电工程中最常用、最核心的地基处理手段之一,通过向地基岩土体中注入浆液,填充孔隙与裂隙,从而提高其强度、整体性和抗渗性。(1) 固结灌浆:主要用于提高基岩的整体性和弹性模量,常用于坝基、厂房基础。浆液多为水泥浆,压力较低(0.2~B0.5MPa),孔距2~4m。(2) 帷幕灌浆:旨在形成连续的防渗帷幕,阻断地下水渗流路径。通常布置在坝基上游侧,深度可达数十米至上百米,采用分序加密、自上而下分段灌注工艺。(3) 高压喷射灌浆(高喷):利用高压

水、气、浆复合射流切割土体并混合凝固,形成圆柱状或板墙状固体,适用于砂层、淤泥等松散地层的防渗与加固^[1]。(4)化学灌浆:采用环氧树脂、聚氨酯等化学材料,适用于细微裂隙($<0.1\text{mm}$)或需快速固化的场合,但成本较高且环保要求严格。灌浆技术适用于岩体裂隙发育、渗透性强、局部软弱夹层等地质条件,是岩基处理的首选方案。

2.2 桩基技术

桩基通过将荷载传递至深层稳定持力层,有效解决软弱地基承载力不足问题。(1)钻孔灌注桩:成孔后下放钢筋笼并浇筑混凝土,适用于各类土层及岩层,单桩承载力高,广泛用于厂房、开关站等建筑物基础。(2)预制桩(如PHC管桩):工厂预制、现场打入,施工速度快,但对硬夹层或孤石适应性差。(3)CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩):由水泥、粉煤灰、碎石和水拌合而成,兼具置换与挤密作用,适用于处理深厚软土,成本较低。桩基特别适用于深厚软土、回填土或存在局部软弱下卧层的情况,可有效控制沉降。

2.3 强夯法与动力固结

强夯法利用重锤(10~40t)从高处(6~20m)自由落下,对地基施加强大冲击能,使土体密实。适用于处理碎石土、砂土、低饱和度粉土及杂填土地基。对于高饱和和软土,可结合排水措施(如插设塑料排水板)形成“动力固结法”,加速孔隙水排出,提高固结速率。强夯振动大,对周边建筑物有影响;对淤泥质土效果有限,需谨慎使用。

2.4 置换与换填法

将不良土层挖除,回填砂石、灰土、碎石或工业废料(如钢渣、粉煤灰)等性能良好的材料。该方法简单直观,适用于浅层软弱土(深度 $<3\text{m}$)。对于深层软土,可采用振冲碎石桩或深层搅拌桩实现原位置换^[2]。深层搅拌桩利用搅拌机械将水泥浆与软土强制拌和,形成水泥土桩体,兼具加固与止水功能,广泛用于围堰、闸基防渗墙。

2.5 排水固结法

通过设置竖向排水体(砂井、塑料排水板)配合堆载预压或真空预压,加速软土固结,减小工后沉降。该方法周期较长,但成本低、效果稳定,适用于大面积软基处理,如水库库区道路、进场公路等。

3 基础施工关键技术要点

地基处理完成后,基础施工的质量直接决定上部结构的安全。水利水电工程基础施工具有体量大、精度高、环境复杂等特点,需重点关注以下技术环节:

3.1 基坑开挖与支护

大型水电站的厂房、溢洪道、泄洪洞进口等部位的基础开挖深度常常超过20米,形成深大基坑。在此类工程中,基坑的稳定性直接关系到施工安全与周边环境。针对不同地质条件,需选择适宜的支护形式:在岩质边坡区域,通常采用系统锚杆配合挂网喷射混凝土进行主动支护,既能限制岩体松弛,又能防止局部掉块;而在土质深基坑中,则多采用地下连续墙、钻孔灌注排桩结合内支撑或土钉墙等支护体系。施工过程中必须严格遵循“分层、分段、对称、限时”的开挖原则,避免一次性开挖过深导致应力集中^[3]。同时,应建立完善的信息化监测系统,对支护结构的位移、基坑内外水位、土压力及邻近建筑物沉降等参数进行实时采集与分析,一旦发现异常立即启动应急预案,确保施工全过程处于受控状态。

3.2 大体积混凝土基础施工

水工结构的基础通常为混凝土,其断面尺寸巨大,水泥水化反应释放的热量难以及时散发,易在内部形成较高的温度梯度,进而引发温度裂缝。这些裂缝不仅影响结构的整体性,还可能成为渗水通道,威胁工程耐久性。为有效控制温度裂缝,施工中需采取一系列综合温控措施:首先,在混凝土配合比设计阶段,应优选低热水泥,并掺加粉煤灰、矿粉等矿物掺合料以降低水化热总量;其次,采用分层分块浇筑工艺,控制每层厚度在2~3米以内,并合理安排浇筑间歇时间,避免冷缝产生;再次,在混凝土内部预埋蛇形冷却水管,通入循环冷水进行中期降温;最后,加强后期养护,采用保温保湿覆盖措施(如草帘+塑料薄膜),将混凝土内外温差严格控制在 25°C 以内,确保结构在降温收缩过程中不产生有害裂缝。

3.3 止水与防渗系统施工

水利水电工程对防渗性能要求极高,基础与上部结构之间的施工缝、伸缩缝等接缝部位是渗漏的高发区域。因此,必须设置可靠的止水系统。常用的止水材料包括紫铜片、不锈钢片、橡胶止水带及PVC止水带等,其中金属止水带耐久性好、适应变形能力强,多用于重要永久缝;橡胶类止水带则安装便捷,适用于一般施工缝。施工过程中,止水材料的定位必须准确,严禁扭曲、偏移或破损;接头部位需采用热硫化或专用胶粘剂进行严密连接;同时,止水带两侧的混凝土应充分振捣密实,确保其与周围混凝土紧密结合,杜绝形成渗水通道^[4]。此外,对于高水头工程,还需在止水带外侧增设沥青井、隔水层等辅助防渗措施,形成多道防线。

3.4 接地与防雷基础

水电站厂房、GIS开关站等区域电气设备密集，对防雷与接地系统的要求极为严格。基础施工阶段需同步预埋接地网，通常采用镀锌扁钢或铜缆作为接地体，埋设深度不小于0.8米，并与主接地网可靠焊接。接地电阻值是衡量系统有效性的重要指标，一般要求不大于0.5欧姆。为达到此目标，除合理布置接地体外，还可采用降阻剂改善周围土壤导电性能。施工中应特别注意接地体的防腐处理、焊接质量及与设备基础钢筋的电气连通性，确保整个接地系统在雷击或短路故障时能迅速泄放电流，保障人员与设备安全。

4 典型工程案例分析——三峡工程：复杂岩基处理典范

三峡水利枢纽工程坝址位于前震旦纪闪云斜长花岗岩地基上，虽然基岩整体强度高，但存在F1、F2等多条大型断层以及密集发育的节理裂隙系统，局部区域完整性较差。为确保世界级高坝的安全稳定，工程采用了“断层置换+固结灌浆+帷幕灌浆”三位一体的综合处理方案。具体而言，对规模较大的断层带进行开挖后，采用高强度混凝土回填形成“混凝土塞”，恢复地基连续性；在全坝基范围内实施系统性固结灌浆，孔深8至15米，显著提升了岩体的整体弹模；同时，在坝基上游侧布置双排帷幕灌浆孔，最大深度超过100米，形成一道纵深防渗屏障。这一系列措施有效解决了岩体破碎、渗漏通道多等难题，为三峡大坝的长期安全运行奠定了坚实基础。

5 技术发展趋势与展望

5.1 智能监测与数字孪生

现代传感技术与信息技术的融合，正在深刻改变传统施工管理模式。通过布设光纤光栅传感器、倾角计、渗压计等设备，结合无人机航测、InSAR地表形变监测等手段，可构建覆盖地基变形、渗流场、应力场的全方位实时监测网络。在此基础上，依托BIM（建筑信息模型）与GIS（地理信息系统）平台，建立工程全生命周期的“数字孪生体”，不仅能对灌浆过程、基坑开挖、混凝土浇筑等关键工序进行动态模拟与优化，还能基于监测数据自动预警潜在风险，实现从“被动响应”到“主动防控”的转变。

5.2 绿色低碳技术应用

在“双碳”战略背景下，绿色施工理念日益深入人心。水利水电工程地基处理领域正积极探索资源循环利用路径，例如将粉煤灰、矿渣、钢渣等工业固废作为桩体材料或回填料，既降低工程成本，又减少环境污染；推广

使用电动或混合动力灌浆设备，降低施工能耗与碳排放；在边坡防护中采用生态袋、植生混凝土等生态工法，替代传统硬质护面，促进工程与自然环境的和谐共生。

5.3 新型材料与工艺

材料科学的进步为地基处理提供了全新可能。微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术利用特定菌种催化生成碳酸钙胶结砂粒，实现土体原位固化，具有环境友好、能耗低的优点；纳米材料改性的灌浆浆液可显著提升渗透性与耐久性，适用于超细裂隙处理；此外，3D打印技术也开始尝试用于制造形状复杂的异形基础构件，提高施工精度与效率。这些前沿技术虽尚处试验阶段，但展现出广阔的应用前景。

5.4 标准化与模块化施工

为提升施工效率与质量一致性，推动基础施工工艺标准化已成为行业共识。通过总结成熟经验，制定涵盖成孔、灌浆、钢筋绑扎、混凝土浇筑等环节的标准化作业流程，并配套开发专用工装设备。同时，探索装配式基础的发展路径，如工厂预制管桩承台、模块化接地网等，实现“现场装配、工厂制造”，减少野外作业量，缩短工期，提升工程质量可控性。

6 结语

水利水电工程的地基处理与基础施工是保障工程安全、耐久与经济性的关键环节。面对复杂多变的地质条件，必须坚持“因地制宜、综合治理”的原则，科学选择灌浆、桩基、强夯、置换等技术手段，并严格把控基础施工各环节质量。未来，应进一步融合信息技术、新材料与绿色理念，推动地基处理与基础施工技术向智能化、可持续方向升级，为我国重大水利水电工程建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1]程涛.水利水电工程基础处理施工技术分析[J].水上安全,2024,(15):191-193.
- [2]汤启明.水利水电工程中基础处理的施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2020,(14):105.
- [3]谢晓芳.基于水利水电工程基础处理施工技术分析[J].科技创新导报,2020,17(05):46+48.
- [4]刘青龙.水利水电工程施工中不良地基处理技术分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第四届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.河南联创建筑工程有限公司郑州分公司,;2025:352-353.