

水利水电工程地基处理与基础施工技术分析

冯绍宇

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

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,其安全性和耐久性直接关系到人民生命财产安全及经济社会可持续发展。地基作为承载上部结构荷载的关键部位,其稳定性、承载力和变形特性对整个工程的成败具有决定性影响。本文系统梳理了水利水电工程中常见的不良地基类型及其工程特性,深入分析了当前主流的地基处理技术(包括灌浆、桩基、置换、排水固结、加筋等)的原理、适用条件及工程应用效果。同时,针对基础施工中的关键环节,如基坑开挖、防渗帷幕、大体积混凝土浇筑及温控防裂等技术进行了详细探讨。最后,结合现代智能化、绿色化发展趋势,对地基处理与基础施工技术的未来发展方向进行了展望,旨在为相关工程实践提供理论参考和技术支撑。

关键词: 水利水电工程;地基处理;基础施工;灌浆技术;桩基工程

引言

水利水电工程通常规模宏大、结构复杂、服役周期长,且多建于地质条件复杂的山区河谷地带。其地基不仅要承受巨大的静水压力、动水压力、结构自重以及地震荷载,还需在长期浸水、干湿循环、冻融交替等严酷环境下保持稳定。因此,地基处理与基础施工是水利水电工程建设的核心环节,其技术水平直接决定了工程的安全性、经济性和耐久性。历史上,因忽视地基问题而导致的工程事故屡见不鲜。例如,20世纪70年代某大型土石坝因坝基存在软弱夹层未得到有效处理,在蓄水后发生严重渗漏和滑坡,造成巨大经济损失。这些教训深刻揭示了科学、合理进行地基处理与基础施工的极端重要性。随着我国“双碳”战略的推进和“十四五”规划对可再生能源发展的高度重视,一批高坝大库、抽水蓄能电站等重大水利水电项目正在或即将开工建设。这些工程对地基处理提出了更高、更精细的要求。

1 水利水电工程常见不良地基类型及特性

水利水电工程地基的复杂性主要源于其选址的特殊性。常见的不良地基类型主要包括:

1.1 软弱土层地基

主要指淤泥、淤泥质土、冲填土等高压缩性、低强度、高含水量的土层。此类地基承载力极低,压缩变形大,在荷载作用下易产生不均匀沉降,对重力坝、厂房等刚性结构危害极大。

1.2 岩溶(喀斯特)地基

广泛分布于我国西南地区。岩溶地基内部存在溶洞、溶蚀裂隙、地下暗河等,导致地基完整性差、渗透性强、承载力不均。水库蓄水后,水位抬升可能诱发岩溶塌陷

或集中渗漏,威胁大坝安全。

1.3 断裂破碎带地基

由构造运动形成的断层、节理密集带等地质构造,岩石破碎、胶结差、力学强度低,且往往构成良好的导水通道。若处理不当,将成为水库渗漏的主要路径,并可能在地震作用下发生错动。

1.4 膨胀土与湿陷性黄土地基

膨胀土遇水膨胀、失水收缩,产生反复的胀缩变形;湿陷性黄土在浸水后会显著附加沉降。这两种地基在干湿交替的库区环境中极易引发上部结构开裂。

1.5 高渗透性砂卵砾石层地基

此类地基颗粒粗大、孔隙率高、渗透系数大,难以形成有效的防渗体系。在高水头作用下,易发生管涌、流土等渗透破坏。

2 水利水电工程主要地基处理技术分析

2.1 灌浆技术

灌浆技术是水利水电工程中应用最为广泛且成熟的核心地基处理手段,其基本原理是通过钻孔将浆液注入岩土体的裂隙或孔隙中,经凝结硬化后起到加固、防渗和改善整体力学性能的作用。根据功能和施工目的的不同,灌浆可分为固结灌浆、帷幕灌浆、回填灌浆及化学灌浆等多种类型。固结灌浆通常在坝基开挖后进行,孔深一般为5~8m,孔距2~4m,呈梅花形布置,灌浆压力控制在0.2~0.5MPa,以避免抬动破坏;水泥浆液水灰比常按5:1、3:1、2:1、1:1、0.6:1逐级变浓,确保充分填充微裂隙^[1]。帷幕灌浆则沿坝轴线布置一至三排深孔,孔深可达100~200m以上,采用自上而下分段灌浆法,灌浆压力随深度增加逐步提高,终孔段压力常达3~5MPa,

形成连续、低透水性（一般要求 $Lu \leq 3$ ）的防渗屏障。对于细微裂隙或高流速漏水通道，传统水泥浆难以有效封堵，此时可采用环氧树脂或聚氨酯类化学浆材，其粘度可低至 $5 \sim 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，凝胶时间可在数秒至数小时内调节，适用于应急堵漏或精密防渗。近年来，智能灌浆系统广泛应用，通过实时采集灌浆压力、注入流量、抬动位移（控制阈值通常 $\leq 0.1 \text{ mm}$ ）等参数，结合自动记录与反馈调节，显著提升了灌浆过程的可控性与质量一致性。

2.2 桩基技术

当浅层地基无法满足承载力或变形控制要求时，桩基技术通过将荷载传递至深层稳定持力层，成为解决深厚软弱地基问题的有效途径。在水利水电工程中，钻孔灌注桩因其适应性强、承载力高而被广泛应用，尤其适用于覆盖层较厚的河床地基。施工中常采用GPS-20型或ZKD系列全套管全回转钻机成孔，孔径通常为 $1.0 \sim 2.5 \text{ m}$ ，成孔垂直度偏差控制在 $1/200$ 以内；水下混凝土浇筑采用导管法，混凝土坍落度控制在 $180 \sim 220 \text{ mm}$ ，初凝时间不小于6小时，强度等级不低于C30。对于局部软弱区或防渗接头处理，高喷灌浆桩（旋喷桩）通过高压（ $25 \sim 40 \text{ MPa}$ ）水泥浆射流切割土体，并与原位土混合形成直径 $0.8 \sim 1.5 \text{ m}$ 的圆柱状加固体，水泥掺量一般为 $20\% \sim 25\%$ ，28天无侧限抗压强度可达 $2 \sim 5 \text{ MPa}$ 。而在处理大面积深厚软土地基时，振冲碎石桩通过 75 kW 以上振冲器振动成孔，回填粒径 $20 \sim 80 \text{ mm}$ 的碎石并分段振密，形成复合地基，其承载力可提升 $1.5 \sim 2.5$ 倍；CFG桩则采用长螺旋钻孔泵送混合料工艺，混合料由水泥、粉煤灰、碎石和石屑按配合比（如水泥:粉煤灰:碎石:石屑 $=1:1:6:2$ ）拌制而成，桩体强度可达C10~C20。值得注意的是，水利水电工程中的桩基除承受竖向荷载外，还需抵抗水压力引起的水平推力及闸墩等结构产生的上拔力，因此在设计中必须充分考虑多种荷载组合及长期浸水环境下的耐久性问题。

2.3 置换与垫层法

对于埋深较浅的软弱土层，置换与垫层法是一种经济且直观的处理方式。该方法通过将原有软弱土体部分或全部挖除，回填性能优良的砂、碎石、灰土等材料，并分层压实，从而形成承载力高、压缩性低的人工地基。换填厚度一般不超过 3 m ，回填材料最大粒径不宜超过 50 mm ，分层厚度控制在 $200 \sim 300 \text{ mm}$ ，采用 18 t 以上振动压路机碾压，压实系数不小于 0.95 。在此基础上，砂石垫层或反滤层的设置不仅可起到应力扩散作用，还能有效引导渗流水排出，防止细颗粒被带走而引发管涌^[2]。例如，在重力坝坝基下游常设置三层反滤层，由细砂（ $d_{50} \approx$

0.3 mm ）、中砂（ $d_{50} \approx 1.0 \text{ mm}$ ）和碎石（ $d_{50} \approx 10 \text{ mm}$ ）组成，各层厚度 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ ，严格遵循“上细下粗、逐级过渡”的反滤准则，确保渗流出口处土体颗粒不被渗流带走，保障渗流稳定。

2.4 排水固结法

排水固结法主要针对饱和软粘土地基，其核心思想是通过设置竖向排水通道并施加预压荷载，加速孔隙水排出，促使土体在施工期间完成大部分固结沉降。工程中常采用塑料排水板（SPB），其通水量 $\geq 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，滤膜渗透系数 $\geq 5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ，间距 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ ，呈正三角形布置；随后进行堆载预压，加载速率控制在每天 $\leq 2 \text{ kPa}$ ，总荷载等于或略大于设计荷载，预压时间通常为 $6 \sim 12$ 个月。真空预压法则通过铺设密封膜并抽真空形成 $80 \sim 85 \text{ kPa}$ 的负压，无需堆载，施工周期可缩短 30% 以上，且对周边环境扰动小。通过监测孔隙水压力消散速率和地表沉降曲线，可判断固结完成程度，一般要求固结度达到 85% 以上方可进行上部结构施工。

2.5 加筋与锚固技术

加筋与锚固技术通过引入高强度材料增强土体或岩体的整体稳定性。在填筑工程中，铺设聚丙烯或聚酯土工格栅（抗拉强度 $\geq 50 \text{ kN/m}$ ，延伸率 $\leq 10\%$ ）可有效约束土体侧向变形，提高边坡或地基的抗滑能力。而在高陡边坡或地下洞室支护中，预应力锚索技术被广泛应用：锚索采用 $\Phi 15.2 \text{ mm}$ 高强度低松弛钢绞线（ $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ ），钻孔直径 $130 \sim 160 \text{ mm}$ ，锚固段长度 $6 \sim 12 \text{ m}$ ，采用M35纯水泥浆（水灰比 $0.4 \sim 0.45$ ）注浆，张拉锁定荷载通常为设计荷载的 $1.1 \sim 1.2$ 倍，超张拉后回退至设计值以补偿松弛损失。该技术不仅支护效果显著，且对原地貌扰动小，已成为现代水利水电工程高边坡治理和地下工程支护的主流手段。

3 基础施工关键技术分析

3.1 基坑开挖与支护技术

水利水电工程的基础施工往往涉及超大、超深基坑，且多位于地下水位高、邻近水体的复杂环境中。为确保干地施工条件，常采用管井降水系统，井深 $30 \sim 50 \text{ m}$ ，井距 $15 \sim 25 \text{ m}$ ，单井出水量 $\geq 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ，将地下水位降至基底以下 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ ^[3]。基坑支护方面，对于深度超过 15 m 的厂房基坑，常采用地下连续墙+内支撑体系，墙体厚度 $0.8 \sim 1.2 \text{ m}$ ，混凝土强度C30~C35，内支撑采用 $\Phi 609 \text{ mm}$ 、 $t = 16 \text{ mm}$ 钢管，预加轴力按设计值的 $50\% \sim 70\%$ 施加。施工过程中实施信息化管理，布设测斜管（精度 $\pm 0.1 \text{ mm/m}$ ）、水位计及支撑轴力计，设定预警阈值（如日变形速率 $> 3 \text{ mm/d}$ 或累计变形 $> 0.3\% H$ ），一旦超限立即启动应急

预案,实现“动态设计、信息化施工”的安全闭环管理。

3.2 防渗体系施工技术

混凝土防渗墙是处理深厚松散透水地基的关键技术,采用CJF-20或MS-200型液压抓斗或铣槽机成槽,槽宽0.6~1.0m,墙体深度可达80~120m,混凝土入槽坍落度控制在180~220mm,扩散度 ≥ 400 mm,28天抗压强度 ≥ 20 MPa,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s。在心墙土石坝或平原水库库盆中,HDPE土工膜(厚度1.5~2.0mm,密度 ≥ 0.94 g/cm³)被广泛用于防渗,焊接采用双轨热熔焊机,焊缝强度不低于母材的80%,气压检测压力0.25MPa保压5分钟无泄漏。施工后需覆盖300~500mm厚保护层,防止紫外线老化和机械损伤,确保防渗体系长期有效。

3.3 大体积混凝土基础施工与温控防裂技术

重力坝基础混凝土常为C20~C25低热混凝土,单仓体积可达数千立方米。为控制温度裂缝,配合比设计中掺加I级粉煤灰(掺量30%~40%)和中热硅酸盐水泥,胶凝材料总量控制在180~220kg/m³,水胶比 ≤ 0.55 。骨料采用风冷或液氮预冷,混凝土出机口温度夏季控制在7~10℃。浇筑后埋设 $\Phi 25$ mm HDPE冷却水管,间距1.5m $\times$ 1.5m,通8~12℃制冷水,初期通水流量1.2~1.5m³/h,持续7~10天;后期通河水进行中期冷却^[4]。表面覆盖3~5cm厚保温被(导热系数 ≤ 0.05 W/(m $\cdot$ K)),冬季延长至28天。通过分布式光纤测温系统(空间分辨率1m,精度 ± 0.5 ℃)实时监控内部温度场,确保内外温差 ≤ 25 ℃,降温速率 ≤ 1 ℃/d,有效抑制温度裂缝产生。

3.4 基础与上部结构的连接

基础顶面高程误差控制在 ± 5 mm以内,平整度 ≤ 3 mm/2m。预埋锚栓(如M48、Q345B)位置偏差 ≤ 2 mm,采用定制钢架精确定位,并在混凝土初凝前复测校正。廊道接口、接地网等预埋件均需进行三维坐标复核,确保与上部结构精准对接。任何微小偏差都可能影响机电设备安装精度或结构受力性能,故该环节虽属收尾工作,却不

可掉以轻心。

4 发展趋势与展望

面向未来,水利水电工程地基处理与基础施工技术将呈现以下发展趋势:一是智能化与数字化深度融合,BIM、数字孪生技术将贯穿工程全生命周期,基于大数据和人工智能的地质预报与风险预警系统将成为标准配置;二是绿色低碳化转型加速,低碳胶凝材料、再生骨料及非开挖生态施工工艺将被大力推广;三是材料性能持续升级,超高性能混凝土(UHPC)、自修复混凝土等新材料将提升基础结构的耐久性与服役寿命;四是施工装备向自动化、无人化迈进,智能灌浆台车、无人巡检机器人等将显著提高施工效率与本质安全水平。

5 结语

水利水电工程的地基处理与基础施工是一项集地质学、岩土力学、水工结构、材料科学和施工技术于一体的系统工程。面对日益复杂的工程地质条件和更高的安全、环保要求,必须坚持“因地制宜、综合治理、动态优化”的原则。一方面,要不断深化对传统成熟技术(如灌浆、桩基、温控)的理解与精细化应用;另一方面,要积极拥抱新技术、新材料、新工艺,推动行业向智能化、绿色化、高质量方向发展。唯有如此,才能为国家重大水利水电工程构筑坚不可摧的根基,保障其百年安澜。

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]卢志斌.水利水电工程施工中不良地基处理技术分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(10):80-82.
- [3]汤启明.水利水电工程中基础处理的施工技术分析[J].绿色环保建材,2020,(07):179-180.
- [4]董亮亮.水利水电工程基础处理施工技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(36):99-101.