

水利水电施工地基处理技术

孙冬琳 张怀德

封丘县水利局 河南 新乡 453300

摘要：水利水电施工地基处理技术是保障工程安全稳定的关键。针对软土地基，常用换填垫层、强夯及振动水冲法等提升承载力；岩溶地基则通过充填、跨越或桩基处理消除地质缺陷；膨胀土采用石灰/水泥改性或湿度控制抑制胀缩；地震液化地基采用排水、加密或置换法增强稳定性。施工需结合地质条件、经济性、环保要求选型，并加强材料检验、成桩检测及长期监测，确保地基处理效果满足工程需求。

关键词：水利水电施工；地基；处理技术

引言：水利水电工程作为国家经济发展的重要支撑，其安全稳定运行高度依赖地基的可靠性。然而，受复杂地质条件影响，软土沉降、岩溶塌陷、膨胀土胀缩及地震液化等问题频发，严重威胁工程结构安全。地基处理作为施工关键环节，需根据地质特性、承载需求及环境约束，科学选择换填、强夯、化学灌浆、复合地基等技术，并优化施工参数与质量控制措施。本文聚焦水利水电工程地基处理技术，系统分析其技术原理与应用要点，为工程实践提供参考。

1 水利水电施工地基特性与常见问题

1.1 典型地质条件分类

(1) 软土地基：主要由淤泥、淤泥质土、粉质黏土组成，具有高含水量（通常 $\geq 35\%$ ）、高孔隙比（ ≥ 1.0 ）、低承载力（天然地基承载力特征值 $\leq 120\text{kPa}$ ）及大压缩性特点。受荷载作用时易产生长期沉降，且固结时间长，施工中若处理不当，易导致建筑物后期不均匀沉降。(2) 岩溶地基：因石灰岩等可溶性岩石受水侵蚀，形成溶洞、溶沟、溶蚀裂隙等地质缺陷。溶洞规模差异大（小至数厘米，大至数十米），部分充填软弱土或积水，地基承载力分布不均，易引发建筑物局部塌陷，对基础稳定性威胁极大。(3) 膨胀土地基：含大量亲水矿物（如蒙脱石），具有遇水膨胀、失水收缩的特性，胀缩率可达3%-5%。受季节降水或地下水位变化影响，地基反复胀缩，易导致基础开裂、建筑物倾斜，尤其对浅基础水工结构破坏显著。(4) 断裂带与不均匀地基：断裂带由破碎岩块、断层泥组成，承载力低且稳定性差；不均匀地基则因地层岩性、厚度差异大，导致地基刚度分布不均。两者均易使建筑物产生差异沉降，引发结构内力集中。

1.2 地基失稳的工程危害

(1) 沉降变形、渗透破坏、滑坡风险：沉降变形包

括均匀沉降（超过设计限值会导致建筑物标高降低，影响功能）和不均匀沉降（引发结构开裂、构件损坏）；渗透破坏表现为管涌（土颗粒被渗流带出，形成空洞）、流土（土体整体随渗流移动），导致地基土体流失、承载力下降；滑坡风险多发生于边坡地基，滑动会造成建筑物失稳、坍塌，威胁工程安全。(2) 对水工建筑物的影响：大坝地基失稳会导致坝体开裂、渗流量增大，严重时引发溃坝事故；闸室地基失稳会使闸室倾斜、闸门无法正常启闭，影响防洪、输水功能；堤防地基失稳会导致堤防沉陷、裂缝，汛期易发生管涌、漫溢，威胁沿岸安全^[1]。

2 水利水电施工地基处理技术体系

2.1 物理加固技术

(1) 换填垫层法：适用于软土地基、湿陷性黄土地基等浅层地基处理，尤其当原地基承载力低、压缩性高且处理深度小于3m时效果显著。施工要点包括：先清除表层软弱土层，选择级配良好的砂石、灰土等优质填料，分层摊铺并采用压路机或夯实机械压实，每层压实度需达到设计要求（通常 $\geq 95\%$ ），同时控制填料含水量在最优含水率范围内，避免出现起皮、松散等问题。

(2) 强夯法：动力压实机理是利用重锤（一般10-40t）从高处（8-20m）自由落下产生的巨大冲击力，对地基土体进行强力夯实，使土体孔隙减小、密实度提高，从而增强地基承载力。参数设计需结合地基土类型确定，主要包括夯锤重量、落距、夯点布置（正方形或梅花形）、夯击次数（每点6-10击）及两遍夯击间的间隔时间（砂性土1-2周，黏性土3-4周），确保夯击能量均匀传递至地基深层^[2]。(3) 振动水冲法：通过振动机械将带有喷嘴的套管沉入地基，边振动边冲水成孔，再填入砂石或CFG（水泥粉煤灰碎石）混合物形成桩体。砂石桩适用于松散砂土地基，可提高地基抗液化能力；CFG

桩适用于软土地基，能与桩间土共同作用形成复合地基，大幅提升地基承载力。施工中需控制振动频率（20-30Hz）、冲水压力（0.2-0.5MPa）及桩体密实度，避免出现断桩、缩颈现象。

2.2 化学加固技术

（1）水泥搅拌桩：湿法是将水泥浆通过搅拌机械注入地基土中，与土体强制搅拌形成桩体，适用于含水量较高的软黏土；干法是将水泥粉直接喷入地基土中，依靠土体水分水化形成桩体，适用于含水量适中的黏性土。湿法桩体强度高但需处理泥浆污染，干法施工便捷但对土体含水量敏感，施工时需根据地基土含水量选择合适工艺，控制搅拌速度（15-20r/min）及桩长偏差（ $\leq 50\text{mm}$ ）。（2）高压喷射注浆法：利用高压泵将水泥浆液（压力20-40MPa）通过喷嘴喷射，破坏地基土体并与浆液混合形成固结体。旋喷形成圆柱形固结体，适用于地基加固；定喷形成板状固结体，适用于防渗帷幕；摆喷形成扇形固结体，适用于局部防渗。施工中需控制喷射压力、提升速度（10-20cm/min）及旋转角度（旋喷360°，摆喷10-30°），确保固结体连续完整^[3]。（3）化学灌浆技术：通过压力将化学浆液（如环氧树脂、丙烯酰胺）注入地基裂隙或孔洞，浆液固化后堵塞渗漏通道。防渗堵漏材料选择需结合渗漏介质，对于清水渗漏，可选用丙烯酰胺类速凝浆液；对于含泥沙渗漏，宜选用环氧树脂类高强度浆液；对于高水压渗漏，需选用膨胀型聚氨酯浆液，确保浆液在高压下不被冲散，形成有效防渗层。

2.3 复合地基技术

（1）桩土复合地基：碎石桩由碎石分层夯实形成，适用于松散砂土地基，可提高地基抗液化能力；CFG桩为水泥粉煤灰碎石桩，适用于软土地基，承载力提升效果显著；PHC管桩为预应力高强混凝土管桩，适用于承载力要求高的大型水工建筑物地基。施工中需合理确定桩间距（2-4m）及置换率（15%-30%），确保桩体与桩间土协同工作。（2）加筋土技术：土工格栅通过其网格结构与土体咬合，增强土体抗剪强度，适用于边坡加固及堤坝地基处理；土工膜具有防渗功能，可与土体结合形成防渗层，适用于尾矿坝、蓄水池等防渗要求高的工程。施工时需确保土工材料铺设平整，接头采用焊接或黏结处理，避免出现褶皱、破损，同时做好上下保护层铺设，防止材料老化。

2.4 特殊地质处理技术

（1）岩溶地基处理：对于小型溶洞，采用混凝土或水泥砂浆充填密实；对于大型溶洞，采用钢筋混凝土盖

板跨越，盖板两端支撑在完整岩体上；对于深埋溶洞，采用钻孔灌注桩穿越溶洞，桩端落在稳定岩层上。处理前需通过地质雷达探明溶洞分布，确保处理方案针对性。（2）膨胀土改良：石灰或水泥改性是按比例（石灰3%-8%、水泥2%-5%）将改性材料掺入膨胀土，降低胀缩性；湿度控制通过设置排水系统或覆盖保湿层，维持地基土含水量稳定。施工中需均匀搅拌改性材料，确保改性效果达标。（3）地震液化地基处理：排水法通过设置砂井或塑料排水板，加速地基土排水固结；加密法采用振冲或强夯，提高土体密实度；置换法将液化土层换填为非液化的砂石或灰土。处理方案需结合地震烈度及液化等级确定，确保地基在地震作用下不发生液化^[4]。

3 水利水电施工地基处理技术选型与优化设计

3.1 技术选型原则

（1）地质条件适应性分析：需优先匹配地基地质特性，如软土地基优先选用换填垫层法、CFG桩复合地基等技术，避免强夯法因振动引发土体扰动；岩溶地基需根据溶洞大小、埋深选择充填、跨越或桩基处理，确保技术适配地质缺陷；膨胀土地基则侧重石灰/水泥改性或湿度控制技术，针对性抑制胀缩变形。同时，需结合地基承载力要求、地下水埋深等参数，避免技术与地质条件错配导致处理失效。（2）经济性、工期与环保要求：经济性方面，需对比技术成本（如换填垫层法材料成本低，高压喷射注浆法设备成本高），优先选择性价比高的方案；工期上，紧急工程宜选用振动水冲法等施工进度快的技术，避免强夯法长间隔期影响进度；环保要求上，需减少化学灌浆技术中有害浆液对地下水的污染，优先采用土工膜等环保材料，符合水利工程生态保护标准。

3.2 多因素综合评价模型

（1）层次分析法（AHP）在技术比选中的应用：先构建目标层（最优技术选型）、准则层（地质适应性、经济性、工期、环保性）、方案层（候选处理技术）的层次结构；再通过专家打分确定各准则权重（如地质适应性权重0.4，经济性权重0.3），对候选技术进行两两比较并构建判断矩阵；最后计算权重向量与一致性检验，得分最高的技术即为最优选择，可有效避免单一因素决策的片面性。（2）基于数值模拟的参数优化（如FLAC3D、PLAXIS）：利用FLAC3D模拟强夯法中夯锤重量、落距对地基密实度的影响，优化夯击参数；通过PLAXIS建立复合地基模型，模拟桩间距、置换率对承载力的作用，确定最优桩体布置；针对岩溶地基，模拟充填材料强度、桩基深度对地基稳定性的影响，优化处理参数。数值模拟可提前预判技术效果，减少现场试错成

本,提升设计精准度。

4 水利水电施工地基处理施工质量控制与监测

4.1 施工过程质量控制要点

(1) 材料质量检验:水泥需查验出厂合格证与进场复检报告,重点检测强度等级(如P.O42.5水泥28d抗压强度 $\geq 42.5\text{MPa}$)、安定性及凝结时间,严禁使用受潮结块水泥;外加剂需检验减水率、缓凝性等指标,如聚羧酸系减水剂减水率应 $\geq 25\%$,且与水泥适配性需达标;骨料需控制级配与含泥量,砂石含泥量分别 $\leq 3\%$ 、 $\leq 5\%$,碎石粒径需符合设计要求(如CFG桩骨料粒径 $\leq 30\text{mm}$),每批次材料需按规范抽样检验,不合格材料严禁入场。(2) 成桩/成墙质量检测:成桩质量采用钻芯法检测,沿桩身均匀取芯,检查桩身完整性(无断桩、缩颈)、混凝土强度(芯样抗压强度不低于设计值95%),抽检比例不低于总桩数1%;静载试验用于检测单桩承载力,分级施加荷载(每级荷载维持1-2h),直至桩体破坏或达到设计承载力,承载力需满足设计要求且沉降量符合规范(如最终沉降量 $\leq 40\text{mm}$);成墙质量(如高压喷射注浆防渗墙)需检测墙体连续性与防渗性能,采用注水试验检测渗透系数(应 $\leq 1\times 10^{-6}\text{cm/s}$),确保墙体无渗漏通道^[5]。

4.2 长期监测技术

(1) 沉降观测:分层沉降仪埋设于地基不同深度土层,通过测读磁环位置变化,获取各土层沉降量,监测频率为施工期每3d一次,运营初期每月一次,后期每季度一次;GPS监测布设平面监测网,精度达毫米级,实时采集建筑物整体沉降数据,适用于大型堤坝、大坝等工程,可及时发现不均匀沉降(允许沉降差 $\leq 2\%$),避免结构开裂。(2) 渗流监测:测压管埋设于地基防渗体下游,通过测量管内水位计算渗透水头,判断防渗效

果;渗压计采用振弦式传感器,直接埋入地基土体,实时监测孔隙水压力变化,当渗压值突然升高时,提示可能存在渗漏风险,需及时排查;监测数据需每日记录,渗透量超设计值(如坝基渗透量 $\leq 0.1\text{L}/(\text{m}\cdot\text{d})$)时启动应急措施。(3) 应力应变监测:光纤光栅传感器具有抗干扰、精度高的特点,可粘贴于桩体或埋入地基土体,实时监测应力应变变化;如在复合地基桩体中布设传感器,监测桩体受力状态,确保桩土荷载分配符合设计要求(桩体承担荷载比例 $\leq 70\%$);传感器数据通过光纤传输至监测系统,异常数据(如应变突增20%)自动报警,为地基安全评估提供依据。

结束语

水利水电工程地基处理技术关乎工程安全与长久运行,其重要性不言而喻。通过合理选用换填、强夯、灌浆等针对性技术,能有效解决软土、岩溶等不良地质问题,提升地基承载力与稳定性。施工中需严格把控质量,兼顾经济与环保要求。展望未来,随着技术创新与智能化手段应用,地基处理将更趋精准高效,为水利水电事业可持续发展筑牢根基。

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]王久春.水利工程施工中软基基础处理技术分析[J].运输经理世界,2020,(16):139-140.
- [3]刘艳萍.水利水电工程基础处理施工技术浅析[J].世界家苑,2025(1):156-158.
- [4]朱宗洲.水利水电工程施工中不良地基处理技术分析[J].建材发展导向,2024,22(23):114-116.
- [5]林显宁.水利水电工程基础处理施工关键技术研究[J].水上安全,2024(24):133-135.