

Treatment Technologies and Application Effects of Soft Soil Foundations in Water Conservancy and Hydropower Projects

Xiaokai Hu Chao Zhao Yubao Hu

Zhongshui Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230601, China

Abstract

Hydropower and water conservancy projects are the core infrastructure for national flood control safety, water resource allocation, and clean energy supply. Soft soil foundation is one of the most common engineering geological problems encountered in the construction of water conservancy projects along rivers, coasts, and lake plains in China. Soft soil has adverse engineering characteristics such as high water content, high compressibility, low shear strength, strong rheological properties, and thixotropy. If not handled properly, it can easily cause uneven foundation settlement, structural cracking, dam slope instability, seepage damage and other engineering accidents, seriously threatening the safety of construction and operation. Based on this, this paper systematically reviews the core technologies and application effects of soft soil foundation treatment in hydropower and water conservancy projects, clarifies the applicable boundaries and quality control points of different technologies, and has important engineering practical significance for ensuring the quality and long-term operation safety of hydropower and water conservancy projects.

Keywords

soft soil foundation; hydropower and water conservancy projects; foundation treatment technology; settlement control; application effect

软土地基在水利水电工程中的处理技术及应用效果

胡笑凯 赵超 胡玉宝

中水淮河规划设计研究有限公司, 中国·安徽 合肥 230601

摘要

水利水电工程是国家防洪安全、水资源调配、清洁能源供给的核心基础设施,而软土地基是我国沿江、沿海、湖泊平原区水利工程建设中面临的最常见工程地质难题之一。软土具有高含水率、高压缩性、低抗剪强度、强流变性与触变性等不良工程特性,若处理不当,极易引发地基不均匀沉降、结构开裂、坝坡失稳、渗流破坏等工程事故,严重威胁工程建设与运行安全。基于此,本文系统梳理水利水电工程软土地基处理的核心技术与应用效果,明确不同技术的适用边界与质量控制要点,对保障水利水电工程建设质量与长期运行安全具有重要的工程实践意义。

关键词

软土地基; 水利水电工程; 地基处理技术; 沉降控制; 应用效果

1 引言

软土地基的变形与稳定控制,是水利水电工程建设的核心技术难点之一。与工业与民用建筑工程相比,水利水电工程对地基的要求具有显著特殊性:堤坝工程需控制大面积、大填方荷载下的长期工后沉降,保障坝体防渗体系完整性;水闸、泵站、电站厂房等水工建筑物,对地基不均匀沉降极为敏感,需严格控制沉降差避免结构开裂与止水失效;同时,水利工程长期处于临水、动水工况,地基需满足抗渗流、抗冲刷、抗液化等多重性能要求。

【作者简介】胡笑凯(1999-),男,中国安徽歙县人,本科,助理工程师,从事水利水电工程地质研究。

2 软土地基对水利水电工程的主要危害

2.1 沉降变形破坏

在坝体、堤身填方荷载作用下,软土地基产生大幅固结沉降,轻则导致堤顶高程不足、坝坡坡度超标,影响工程防洪标准;重则引发坝体防渗体(土工膜、混凝土防渗墙)拉裂,造成渗漏通道。对于水闸、电站厂房等刚性结构,不均匀沉降会导致底板开裂、闸墩倾斜、止水带失效、闸门启闭受阻,直接丧失工程功能^[1]。

2.2 整体失稳破坏

软土地基低抗剪强度的特性,会大幅降低水工结构的抗滑稳定安全系数。堤坝工程易因地基土体剪切破坏,引发坝坡整体滑移、堤身坍塌;水闸、泵站等建筑物易发生沿地

基面的深层滑移，导致结构整体倾覆。此类失稳事故往往具有突发性，极易造成重大工程损失与安全事故^[2]。

2.3 渗流破坏风险

水利工程长期处于水头差作用下，软土地基本身渗透性差，但若存在施工扰动形成的裂缝、软弱夹层，或与粉砂层交错分布，极易在渗流作用下引发管涌、流土、接触冲刷等渗流破坏，逐步扩大渗漏通道，最终导致地基渗透失稳，甚至引发坝体溃决^[3]。

3 水利水电工程软土地基主流处理技术及适用场景

3.1 排水固结法

排水固结法是处理大面积软土地基最常用的技术之一，其核心原理是：在软土层中设置竖向与水平排水通道，通过施加预压荷载，加速软土中孔隙水排出，促使土体固结压缩，孔隙比减小，抗剪强度与承载能力逐步提升，同时提前完成大部分沉降，有效控制工后沉降量。

根据预压方式的不同，排水固结法主要分为堆载预压法、真空预压法，以及真空 - 堆载联合预压法三类：

3.1.1 堆载预压法

该技术是通过在地基表面堆填土石方等荷载，模拟工程运行期的实际受力状态，分级施加预压荷载。竖向排水体通常采用塑料排水板、袋装砂井，水平排水体采用砂垫层，形成完整的排水体系。施工核心要点是严格控制加载速率，实时监测地基沉降、孔隙水压力与侧向位移，避免加载过快引发地基滑移失稳。该技术工艺成熟、施工简便、造价低廉，适用于堤坝、围堰、库区大面积填方等软基处理工程，尤其适合软土层厚度较大（3m 以上）、对工后沉降控制要求高的工程，是水利堤防工程中应用最广泛的软基处理技术。

3.1.2 真空预压法

该技术通过在排水垫层上铺设密封膜，利用真空设备抽气形成膜内外负压差，使软土中的孔隙水在负压作用下排出，实现土体固结。其核心优势是无需堆载大量土石方，预压荷载通过负压均匀施加，不会引发地基剪切破坏，加载速率远快于堆载预压，工期更短，同时对周边土体的扰动极小。适用于超软土地基、对加载速率敏感的软土层，以及临近已有建筑物、环保要求高的水利工程。在滨海滩涂围垦、河道堤防加固工程中应用广泛。

3.1.3 真空 - 堆载联合预压法

该技术结合了两种预压方式的优势，通过真空负压与堆载荷载叠加，大幅提高预压效果，可实现更高的地基强度提升幅度与更优的沉降控制效果，适用于荷载大、沉降控制要求严格的堤坝、围堰工程。

3.2 复合地基处理技术

复合地基技术的核心原理是：通过在软土层中设置桩体增强体，使桩体与桩间土共同承担荷载，形成复合地基，大幅提升地基承载能力，减小沉降变形，同时可通过桩体材料的选型，兼顾地基加固与防渗需求。该技术承载力提升幅

度大、沉降控制效果好，是水利水电工程中水工建筑物软基处理的核心技术，主流类型包括水泥土搅拌桩、碎石桩、CFG 桩三大类。

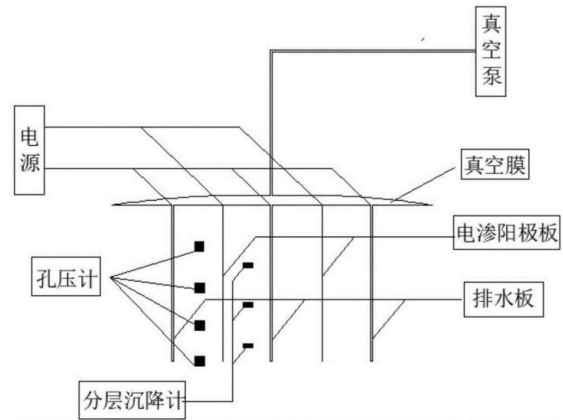


图 1：真空预压法

3.2.1 水泥土搅拌桩技术

该技术通过深层搅拌机械，将水泥固化剂与软土原位强制搅拌，利用水泥的水化反应、离子交换反应与硬凝反应，使软土硬结形成具有整体性、水稳性与足够强度的水泥土桩体，与桩间土形成复合地基。根据施工工艺的不同，分为湿法（水泥浆搅拌）与干法（粉体喷射搅拌）两类。施工核心要点是严格控制水泥掺量、搅拌提升速度与复搅次数，保障桩体的均匀性与连续性。该技术的核心优势是施工噪音小、无振动、对周边环境扰动小，桩体渗透系数可降至 1×10^{-7} cm/s 以下，兼具地基加固与防渗帷幕的双重功能，完美适配水利工程的安全需求。广泛适用于淤泥、淤泥质土、粉质黏土等软土层，是水闸、泵房、小型水库坝基、渠道防渗等工程软基处理的首选技术。

3.2.2 碎石桩技术

该技术通过振冲、沉管等工艺，在软土层中成孔，回填碎石并振捣密实，形成大直径碎石桩体。其加固原理包括三个方面：一是置换作用，用高强度的碎石桩替换软弱土体，承担主要荷载；二是排水作用，碎石桩是良好的竖向排水通道，可加速桩间土的排水固结；三是挤密作用，成桩过程中对周边土体产生挤密效应，提升桩间土强度。施工核心要点是控制成桩深度、填料量与振密电流，保障桩体密实度。该技术适用于松散砂土、粉土、可液化土层，以及软塑状态的黏性土地基，在堤坝工程抗滑稳定加固、可液化土层处理中应用广泛，可有效提升地基抗剪强度与抗液化能力。

3.2.3 CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）技术

该技术以水泥、粉煤灰、碎石、石屑为原料，制成高粘结强度的刚性桩体，通过桩体、桩间土与褥垫层的协同作用，形成刚性桩复合地基。其核心优势是桩体强度高，承载能力提升幅度远大于水泥土搅拌桩与碎石桩，地基变形量小，沉降稳定快，可有效控制不均匀沉降。适用于对承载力与沉降控制要求极高的水工建筑物，如大型水闸、电站厂房、调压井、渡槽等重要结构的软基处理，尤其适合软土层厚度

大、上部结构荷载集中的工程场景。

3.3 换填垫层法

换填垫层法是最传统、最直接的浅层软基处理技术，其核心原理是：将基础底面下一定厚度的软弱土层全部挖除，换填强度高、压缩性低、水稳性好、性能稳定的材料，如级配砂石、灰土、水泥石、块石等，经分层碾压夯实后，形成满足设计要求的地基持力层。

施工核心要点是：严格控制换填厚度，水利工程中常用换填厚度为1-3m，过厚会导致开挖与回填成本大幅增加；分层回填、分层压实，严格控制每层回填厚度与压实度，保障垫层的均匀性与整体性；同时做好基坑排水，避免软土基坑积水、边坡坍塌，防止基底土体受水浸泡软化。

该技术的优势是工艺简单、施工周期短、质量易控制、加固效果立竿见影，不存在后期沉降问题。其局限性是仅适用于浅层软土地基，对于深层软土，开挖难度大、成本高、易引发基坑失稳。

3.4 化学加固法

化学加固法，也称为注浆加固法，其核心原理是：通过压力注浆设备，将水泥浆液、水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等固化材料，注入软土地基的孔隙与裂隙中，通过浆液的填充、胶结、固化作用，填充土体孔隙，胶结土颗粒，降低土体渗透性，提升土体强度与整体性。

根据注浆工艺的不同，可分为劈裂注浆、压密注浆、渗透注浆三类。施工核心要点是：根据软土的渗透性与孔隙特征，优化浆液配比与注浆压力，控制浆液扩散半径，避免注浆不足或浆液过度扩散，同时做好注浆效果的现场检测。

该技术的核心优势是施工灵活性强，无需大规模开挖，对原有结构扰动极小，可实现精细化、局部化加固。在水利水电工程中，主要用于三类场景：一是已有水利工程的软基补强与病害治理，如水库除险加固中坝基渗漏、堤身沉降的补强处理；二是复杂地质条件下的局部软土、裂隙夹层处理，弥补其他加固技术的盲区；三是水利工程抢险中的防渗堵漏、地基应急加固。

3.5 加筋土技术

加筋土技术是一种岩土增强型软基处理技术，其核心原理是：在软土地基表层或填方土体中，分层铺设高强度、低延伸率的土工合成材料，如土工格栅、土工布、土工加筋带等，利用筋材与土体之间的界面摩阻力与咬合力，约束土体的侧向变形与不均匀沉降，提升地基土体的整体刚度与抗滑稳定性，分散上部荷载，降低软土层的附加应力。

施工核心要点是：保证筋材铺设平整、搭接长度满足设计要求，避免筋材破损、弯折，同时控制回填土的压实度，保障筋土协同作用效果。该技术的优势是施工简便、工期短、造价低、适应变形能力强，无需大型施工设备，对软土地基的扰动极小。

在水利水电工程中，加筋土技术主要应用于软土地基上的堤坝、围堰、河道护岸、渠道边坡工程，常与排水固结

法联合使用，可有效抑制堤身的侧向位移，提升坝坡抗滑稳定安全系数，减小不均匀沉降，是堤坝软基处理中重要的辅助与补强技术^[4]。

4 典型工程应用与效果分析

4.1 港珠澳大桥香港口岸填海工程

港珠澳大桥香港口岸填海工程是世界上首个在深厚淤泥层上进行的大规模海上振冲碎石桩加固案例。工程区域软土层厚度大、含水量高、灵敏度高，传统处理方法难以奏效。项目采用底部出料振冲碎石桩技术，累计施工碎石桩4万余根、总长度120余万延米。该工程的成功实践具有多重意义。技术层面，验证了干法底部出料工艺在海上深厚淤泥层的适用性，解决了成孔困难、孔壁坍塌等技术难题。环保层面，采用干法作业替代传统湿法振冲，实现零泥浆排放，契合海洋环境保护要求。该工程为后续类似跨海交通枢纽软基处理提供了重要参照。

4.2 苏北灌溉总渠阜宁腰闸重建工程

阜宁腰闸重建工程是软土地基上水工建筑物拆除重建的典型范例。老闸因淤土地基沉降过大而报废，新闸建设中对地基处理给予了高度重视。工程采用2000余根水泥搅拌桩+预应力管桩复合桩，配合地下连续截渗墙，形成坚实的“底座+屏障”体系。施工过程中面临的巨大挑战是工期紧张——主体工程仅7个月建设时间。建设单位通过“三联单”工作模式细化每日任务，在有限作业面上投入3台搅拌桩机、2台静压桩机与1台成槽机，多点并行作业，最终按期完成基础施工。新闸建成后已累计通水13.7亿立方米，运行状态良好，证明复合桩基方案有效控制了软基沉降^[5]。

5 结论

软土地基的不良工程特性，是水利水电工程建设中必须解决的核心地质难题，其处理效果直接决定了工程的建设质量与长期运行安全。排水固结法、复合地基技术、换填垫层法、化学加固法、加筋土技术等主流处理技术，各有其加固原理、适用场景与技术优势，不存在绝对最优的技术，工程中需结合地质条件、建筑物功能、荷载特点、工期与造价要求，科学选型，必要时采用多技术组合方案，实现加固效果、工程安全与经济效益的平衡。

参考文献

- [1] 张帅乾. 旋挖桩加固在水利工程软土地基处理中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2026, 54(02): 147-150+161.
- [2] 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, (01): 151-153.
- [3] 刘晓亚, 肖骏. 软土地基处理技术在水利工程施工中的应用研究[J]. 水上安全, 2026, (01): 163-165.
- [4] 简学兴. 水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (32): 190-192.
- [5] 尉阳阳. 水利水电工程基础处理施工技术[J]. 大众标准化, 2025, (20): 40-42.