

水利工程施工中软土地基处理技术

余海龙¹ 封 帆²

1. 江苏地泽建设工程有限公司 江苏 邳州 221300

2. 徐州市正泰水利建筑工程检测有限公司 江苏 邳州 221300

摘 要：软土地基是水利工程建设中常见的地质问题，具有承载力低、易变形等特点，对工程安全构成严重威胁。本文探讨了水利工程施工中软土地基处理技术，包括搅拌桩、土钉墙、预应力锚索、砂石换填垫层、深层水泥搅拌桩、排水固结法等多种方法。这些技术旨在提高软土地基的承载能力和稳定性，确保工程结构的安全运行。合理选择和应用软土地基处理技术，对提升工程质量、延长工程寿命具有重要意义。

关键词：水利工程施工；软土地基；处理技术

引言：水利工程在保障国家水资源安全与促进经济社会发展中扮演着至关重要的角色。然而，软土地基作为水利工程施工中常见且复杂的地质条件，其低强度、高压缩性和不均匀沉降等特性，往往给工程带来严峻挑战。因此，探索并应用有效的软土地基处理技术，对于确保水利工程结构安全稳定、提高施工质量具有重要意义。本文将对相关处理技术进行系统阐述，以为水利工程施工实践提供参考。

1 软土地基处理技术的必要性

1.1 软土地基不稳定性分析

（1）易受压变形：软土地基由大量黏土颗粒和水分组成，土体结构松散，孔隙率大。在外部荷载作用下，水分难以快速排出，土颗粒易发生相对位移，导致地基产生显著的压缩变形。这种变形具有时效性，会随时间推移逐渐累积，可能使上部结构出现沉降不均的问题。

（2）抗剪切能力低：软土地基的土颗粒间黏聚力小，内部摩擦力弱，抗剪切强度极低。当受到水平方向的力或竖向荷载分布不均时，极易发生剪切破坏，引发地基失稳。例如在水利工程的堤坝建设中，可能导致坝体滑移等严重事故。

（3）可能引发周边土体位移或结构变形：软土地基的变形会传递到周边土体，使周边土体产生位移。若周边存在其他建筑物或结构物，这种位移会对其产生附加应力，导致结构变形、开裂，影响其正常使用和安全。

1.2 软土地基处理的重要性

（1）满足水利施工的地基标准：水利工程对地基的承载能力、变形量等有严格的标准和要求。通过有效的处理技术，可改善软土地基的物理力学性质，使其各项指标达到施工标准，为工程的基础施工提供可靠的保障，确保后续施工环节的顺利进行。

（2）确保工程安全与稳定：处理后的软土地基能提高其稳定性和承载能力，

有效避免因地基问题引发的工程事故。无论是堤坝、渠道还是水利枢纽等工程，稳定的地基是其安全运行的前提，可减少因地基失稳造成的经济损失和人员伤亡。

2 水利工程施工中软土地基常用处理技术分析

2.1 换填处理法

2.1.1 原理与应用场景

换填处理法通过挖除基础范围内的软土，替换为强度高、稳定性好的材料，形成垫层承担上部荷载，从而提高地基承载力、减少沉降。在水利工程中，适用于软土层厚度小于3米的小型堤坝基础、渠道岸坡、涵闸底板等部位，尤其适合对沉降敏感且荷载较小的场景。

2.1.2 关键步骤与技术要点

（1）垫层材料选用：优先选用级配良好的砂石，含泥量不超过5%，粒径控制在5-50mm，确保透水性和压实性；灰土采用Ⅲ级以上生石灰与黏性土按3：7或2：8比例混合，适用于地下水位较低区域；素土选用塑性指数10-15的黏土，剔除草根、石块等杂质。

（2）垫层设计与施工：垫层厚度根据下卧层承载力计算确定，通常为0.5-2米，宽度超出基础边缘0.3-0.5米以扩散应力。施工时分层摊铺，每层厚度20-30cm，采用振动压路机碾压，碾压次数不少于6遍，压实度需达到93%以上，碾压时控制含水率在最优含水率±2%范围内，避免出现橡皮土现象^[1]。

2.1.3 适用条件与限制

适用于软土层薄、工期紧、荷载较小的工程。但软土层厚度超过3米时，换填成本显著增加；在地下水位高的区域需配合降水，否则易导致边坡坍塌，且对周边土体扰动较大。

2.2 预压处理方法

2.2.1 方法概述与目的

预压处理法是在水利工程施工前，通过堆载或真空

负压的方式对软土地基施加荷载,促使地基中的孔隙水排出,土体发生固结,进而提高地基的强度,降低工程竣工后的沉降量。其主要目的是在工程施工前完成大部分沉降,确保堤坝、渠道等水利设施在运营期间的稳定性,防止因沉降过大而出现开裂、渗漏等问题。

2.2.2 分级预压实施步骤

首先,铺设30-50cm厚的砂垫层作为排水层,并按照1-2米的间距设置塑料排水板。分级堆载时,第一级荷载施加至总荷载的50%,待监测到沉降速率 $\leq 10\text{mm}/\text{天}$ 后,再施加第二级荷载,直至达到设计荷载(通常为坝体自重的1.1倍)。预压期的长短根据地基的固结度确定,一般为6-12个月。

2.2.3 预压效果的监测与评估

通过设置沉降观测点监测地基的总沉降量,利用孔隙水压力计监测孔隙水压力的消散情况。当地基的固结度达到85%及以上,且连续10天的沉降速率 $\leq 5\text{mm}/\text{天}$ 时,可判定预压效果达标,此时可以卸载并进入后续的施工阶段^[2]。

2.3 排水加固法

2.3.1 排水设施设计与安装

水平排水设施采用级配砂,厚度为30-50cm,铺设前需对场地进行平整并清除杂物。垂直排水体的深度应穿透软土层并进入下卧硬土层,间距控制在1.5-2.5米之间。安装垂直排水体时,要确保滤膜完好无损,其顶端嵌入水平排水层的长度不少于50cm。

2.3.2 常用方法

(1) 排水板:选用SPB-C型塑料排水板,其断面尺寸为 $100\text{mm}\times 4\text{mm}$,通过插板机将其沉入土中。该方法适用于处理5-20米厚的软土,施工效率可达300-500米/天。

(2) 深层排水井:直径为40-60cm,采用长螺旋钻机成孔,井内放置由透水土工布包裹的碎石。深层排水井适用于处理厚度超过20米的软土,若与真空预压技术结合使用,可加快地基的排水固结速度。

2.3.3 加固效果与适用范围

经排水加固处理后,地基的承载力可提高40%-60%,压缩模量提升1.5-2倍。该方法适用于淤泥、淤泥质土等饱和软土地基,在堤坝、库区围堤等水利工程中应用广泛。但对于含有砂夹层的地基,其加固效果相对较差^[3]。

2.4 化学加固处理方法

2.4.1 添加剂的选择与应用

(1) 生石灰:适用于含水率超过50%的软土,它通过吸水膨胀来挤密土体,每立方米软土的用量为30-50kg,常用于渠道边坡的浅层加固。(2) 水泥:一般选用

P.O42.5级水泥,通过水化反应胶结土颗粒,提高地基强度,适用于荷载较大的泵站底板等基础部位。(3) 硅酸钠溶液:与软土中的氯化钙反应生成硅酸钙凝胶,可实现快速止水加固,如用于堤坝漏洞的修补,其浓度控制在30-40Be'之间。

2.4.2 添加剂用量的控制与调整

水泥用量根据“90天无侧限抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ”的要求进行设计,通常为软土干重的10%-20%;生石灰用量随软土含水率的增加而提高,含水率每增加10%,用量相应提高10%;硅酸钠溶液的用量按加固体积计算,每立方米软土的用量为20-30L,且需通过试块试验验证其加固效果。

2.4.3 化学反应原理与加固效果

水泥水化后生成C-S-H凝胶,能够将土颗粒胶结为一个整体;生石灰与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,进而与土中的 SiO_2 反应生成稳定的矿物;硅酸钠与钙离子反应形成网状凝胶。经化学加固处理后,软土地基的抗压强度可达0.5-2.0MPa,能够满足中小型水利工程的基础要求。

2.5 灌浆处理方法

2.5.1 灌浆材料与浆液配置

灌浆材料主要有水泥、水泥砂浆和化学浆液等。水泥浆采用P.O42.5级水泥,水灰比控制在0.8-1.2之间,可掺入3%-5%的膨润土以改善其流动性;水泥砂浆由水泥、砂和水组成,砂的粒径不大于2mm,砂率为30%-50%;化学浆液如聚氨酯,浓度控制在50%-70%,固化时间需控制在5-30分钟范围内。

2.5.2 灌浆方式分类与实施步骤

(1) 挤密灌浆:采用 $\Phi 50\text{mm}$ 的注浆管,注浆压力为2-5MPa,从地基底部向上分段进行注浆,每段长度为0.5-1米,适用于软土的加密处理。(2) 充填灌浆:采用低压(0.2-0.5MPa)注浆方式,将浆液注入软土中的裂隙,采用纯压式注浆,直至浆液溢出,主要用于堤坝的防渗处理。(3) 渗透灌浆:注浆压力小于0.5MPa,通过钻孔将浆液注入软土,浆液依靠自身压力渗透并填充孔隙,适用于渗透系数为 10^{-3} - 10^{-5}cm/s 的软土^[4]。

2.5.3 灌浆效果的检测与验收

通过钻孔取芯观察浆液的充填率,采用声波检测判断加固体的完整性,利用载荷试验测定地基的承载力。要求芯样的完整性达到85%及以上,地基承载力提高30%及以上,验收合格后方可进行后续施工。

2.6 旋喷处理法

2.6.1 旋喷设备与浆液喷射技术

旋喷处理法所使用的主要设备有XP-30型旋喷桩机、

40MPa高压泵、喷嘴等,喷嘴直径为2-3mm,喷射角度为15°。施工时,先由钻机钻孔至设计深度,然后旋喷管以10-15r/min的速度旋转,并以20-30cm/min的速度提升,通过高压浆液切割、搅拌软土,形成加固体。

2.6.2 旋喷浆液配置与过程控制

旋喷浆液以P.O42.5级水泥为主,水灰比为1:1-1.5:1,可掺入2%的粉煤灰以改善浆液性能。施工过程中,需控制注浆压力在20-30MPa之间,流量为80-120L/min,冒浆量不得超过20%。若出现压力骤降的情况,需立即停喷检查,防止出现断桩现象。

2.6.3 旋喷处理法的加固效果分析

旋喷处理后会形成直径为0.6-1.2米的水泥土桩,单桩承载力可达100-300kN,复合地基的承载力可提高1-2倍。该方法适用于处理5-20米深的软土地基,如闸室基础加固等。但对于含有块石的软土,容易出现桩体不均匀的情况,此时需采用多轴旋喷技术进行优化。

3 水利工程施工中软土地基处理技术选择与优化

3.1 处理技术选择原则

处理技术的选择需综合考虑地基特性、工程需求与成本效益三大核心因素。地基特性包括软土厚度、含水率、有机质含量、承载力等,如深厚软土更适合预压与排水加固组合技术,而浅层软土可优先选用换填法。工程需求需匹配结构荷载、沉降控制标准及工期要求,例如堤坝工程对防渗性要求高,需优先考虑灌浆或旋喷技术。成本效益则需平衡前期投入与长期维护费用,避免过度处理导致成本浪费,或处理不足引发后期工程隐患。

3.2 不同技术组合应用的探讨

(1) 组合应用的优势与挑战。优势在于发挥技术协同效应,如预压+排水板组合可缩短固结时间30%-50%,化学加固+灌浆组合能同时提升强度与防渗性。挑战则体现在技术匹配性与施工协调性上,不同技术的施工参数需精准适配,例如旋喷桩与排水井间距设计不当可能引发应力集中,增加施工管控难度。(2) 实际案例分析。某水库堤坝工程中,采用“真空预压+水泥土搅拌桩”组

合技术:先通过真空预压排出70%孔隙水,再用搅拌桩形成复合地基,使地基承载力从80kPa提升至180kPa,较单一技术节省工期40%,且后期沉降量控制在5cm内,验证了组合技术的可行性。

3.3 处理技术优化策略

(1) 加强实地勘察与地基承载能力分析。通过钻探、静力触探等手段获取软土物理力学参数,结合有限元软件模拟地基受力状态,为技术选择提供数据支撑,避免因勘察不足导致技术错配。(2) 进行必要的现场试验与数据收集。施工前开展试桩、试夯等试验,记录不同技术参数下的加固效果,如水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线,为大规模施工提供优化依据。(3) 引入新技术与设备提升处理效率。采用智能注浆控制系统实现浆液流量与压力的实时调节,应用大直径深层搅拌桩机减少施工次数,通过数字化监测系统动态追踪地基变形,提升处理精度与效率。

结束语

综上所述,水利工程施工中软土地基处理技术的选择与应用至关重要,它不仅关乎工程的整体安全与稳定性,也影响着施工效率与成本控制。通过科学分析与实践探索,我们已积累了丰富的软土地基处理经验和手段。展望未来,随着材料科学、工程技术等领域的不断进步,软土地基处理技术将持续创新升级,为水利工程建设提供更为高效、环保的解决方案,助力水利事业蓬勃发展。

参考文献

- [1]陈华,徐彤.水利施工中软土地基处理技术[J].居舍,2021,(04):35-36.
- [2]马佳佳.水利工程施工中的软土地基处理技术[J].农村经济与科技,2020,(14):132-133.
- [3]高淑梅.水利工程软土地基处理技术探讨[J].水电站机电技术,2020,(11):117-118.
- [4]冯是明,邹福华.水利工程施工中软土地基处理技术[J].水科学与工程,2021,(12):123-124.