

初探水利工程软土地基筑堤的技术方法

王立武

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050021

摘要: 水利工程中,软土地基因含水量高、压缩性强、抗剪强度低等特性,易引发不均匀沉降及稳定性问题。针对此类地基,常用技术包括:堤身自重挤淤法,通过分期加高堤身挤出淤泥;抛石挤淤法,以块石置换软土;垫层法,挖除软土后换填砂石等高强度材料;以及加筋法,利用土工合成材料限制侧向变形。施工需结合地质条件选择适宜方法,并加强监测与质量检验,确保堤防结构安全稳定。

关键词: 水利工程;软土地基筑堤;技术方法

引言:在水利工程建设中,堤防工程是抵御洪水、保障区域安全的关键设施。然而,软土地基因具有高含水量、低强度、大压缩性等不良特性,在筑堤过程中极易出现沉降变形、滑坡失稳等问题,严重影响堤防工程质量与安全。随着水利事业不断发展,对筑堤技术要求日益提高。因此,深入研究软土地基筑堤的技术方法,有效解决软土地基带来的工程难题,成为保障水利工程安全稳定运行的重要课题。

1 水利工程软土地基特性与筑堤工程需求分析

1.1 软土地基的工程特性

(1) 物理性质:软土地基的物理性质具有显著特殊性,含水量普遍高于液限,部分区域可达50%-80%,远超普通黏性土;孔隙比通常大于1.0,部分淤泥类土甚至超过1.5,导致土体结构松散;压缩性极强,压缩系数 a_{1-2} 多在 $0.5-2.0\text{MPa}^{-1}$ 之间,受荷载作用时易产生大幅体积收缩。(2) 力学性质:其抗剪强度极低,不排水抗剪强度往往低于 20kPa ,难以承受较大外力;同时蠕变特性显著,在长期恒定荷载作用下,变形会随时间持续发展,可能导致后期工程结构失稳。(3) 常见类型:主要包括淤泥、淤泥质土和软黏土。淤泥多分布于河流入海口、湖泊沉积区,有机质含量高;淤泥质土是淤泥经轻微固结形成,性质略优于淤泥;软黏土则常见于内陆低洼地带,黏粒含量高、渗透性差。

1.2 软土地基对筑堤的主要影响

(1) 沉降问题:软土地基压缩性强,筑堤后在堤防自重及外部荷载作用下,易发生不均匀沉降,导致堤防出现纵向裂缝,严重时破坏堤防结构完整性,影响防洪功能。(2) 稳定性问题:由于抗剪强度低,软土地基难以提供足够的抗滑力,在水位变化、地震等外部因素影响下,堤防易发生滑坡;同时,软土渗透性低,易引发管涌现象,进一步威胁堤防稳定性。(3) 渗透问题:

软土地基渗透性系数通常小于 10^{-6}cm/s ,排水能力极差,筑堤过程中孔隙水压力难以消散,长期积累会降低土体有效应力,加剧沉降和失稳风险^[1]。

1.3 筑堤工程的技术需求

(1) 承载力提升:需通过地基处理技术(如换填、排水固结、强夯等),将软土地基承载力提高至满足堤防自重、水位压力及车辆荷载等要求的水平,一般需达到 $120-150\text{kPa}$ 以上。(2) 沉降控制:严格限制总沉降量,通常要求堤防竣工后总沉降不超过 30cm ;同时控制差异沉降,相邻区段沉降差需小于 5cm ,避免结构开裂。(3) 稳定性保障:采取抗滑措施(如设置防渗墙、加固桩)确保堤防抗滑安全系数大于 1.25 ;通过防渗处理满足抗渗要求,防止管涌发生;兼顾抗倾覆设计,保障堤防在极端工况下的稳定性。(4) 工期与成本:在选择地基处理方案时,需平衡技术可行性与经济性,例如排水固结法工期较长但成本较低,强夯法工期短但对周边环境要求高,需根据工程实际情况优化方案,控制总造价在预算范围内。

2 水利工程软土地基筑堤的关键技术方法

2.1 地基预处理技术

(1) 排水固结法:核心是设排水通道加速软土固结,减少后期沉降。用塑料排水板时,按 $1.5-2.0\text{m}$ 间距梅花形布置,深入软土下卧硬层,配合 $2-3\text{m}$ 分级堆载预压,6-12个月可完成 $70\%-80\%$ 固结量;真空预压联合堆载技术,抽真空维持 80kPa 以上负压,叠加堆载荷载,固结时间缩短 $30\%-50\%$,适用于工期紧、软土厚度超 10m 的工程。(2) 化学加固法:水泥搅拌桩将水泥浆与软土强制搅拌,形成 $0.5-0.8\text{m}$ 柱状加固体,桩体无侧限抗压强度 $1.5-3.0\text{MPa}$,适用于淤泥质土、软黏土,加固深度 $\leq 20\text{m}$;高压喷射注浆(旋喷桩),用 $20-40\text{MPa}$ 高压水流切割土体并注水泥浆,形成防渗帷幕或加固桩,桩

径可0.6-2.0m调整,适用于含砂层软土地基,解决渗漏问题^[2]。(3)物理加固法:强夯法用8-30t重锤从8-20m高度自由落下,施加冲击荷载,使软土密实度提高15%-25%,适用于表层软土厚度<5m场地,施工需设砂/碎石垫层防锤底黏土;振冲碎石桩用振冲器振动成孔,填碎石形成0.8-1.2m桩体,置换部分软土并设排水通道,地基承载力提高50%-100%,适用于粉土、粉质黏土与软土混合地层;砂井置换打设0.3-0.5m砂井,置换局部软土,加速排水固结,适用于软土分布不均区域。

2.2 复合地基技术

(1)桩网复合地基:以刚性CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)为核心,桩径通常为0.4-0.6m,桩间距1.5-2.5m,桩顶铺设2-3层土工格栅(抗拉强度 $\geq 50\text{kN/m}$),形成“桩-网-土”共同受力体系。该技术可将地基承载力提升至200-300kPa,同时通过土工格栅分散荷载,减少差异沉降,适用于高等级堤防工程,尤其能满足堤防顶部车辆通行的荷载要求^[3]。(2)散体材料桩:砂石桩采用级配砂石填入成孔,桩径0.6-1.0m,通过挤密作用使桩间土密实度提高,适用于处理松散粉土与软土互层地基,可有效改善地基渗透性;生石灰桩则通过生石灰吸水膨胀、水化反应,产生热量并形成强度,既加固软土,又能降低土体含水量(含水量可降低10%-15%),适用于有机质含量较低的软土地基,成本较水泥类加固技术低20%-30%。(3)加筋土技术:在堤身填土中分层铺设土工布(渗透系数 $\geq 10^{-3}\text{cm/s}$)或土工格室(高度10-20cm),土工布可增强土体整体性,减少填土侧向位移;土工格室通过约束土体,提高填土承载能力,延缓裂缝发展。该技术施工简便,可与其他地基处理技术结合使用,适用于堤防边坡加固和堤身防渗,能使堤防抗滑安全系数提高0.2-0.3。

2.3 轻质堤防结构技术

(1)泡沫轻质土填筑:采用水泥、粉煤灰、发泡剂等材料制备泡沫轻质土(干密度300-800 kg/m^3),替代传统填土筑堤,可将堤体自重降低40%-60%,显著减少地基附加应力。施工时通过泵送浇筑,形成连续整体结构,无需分层碾压,且泡沫轻质土具有一定强度(抗压强度0.3-1.0MPa)和渗透性,适用于软土地基上的高填方堤防,能有效控制沉降量(总沉降可控制在15cm以内)。(2)EPS板应用:在堤防底部铺设20-50cm厚的EPS板(密度15-30 kg/m^3),作为柔性垫层,可分散堤体荷载,减少地基应力集中;同时EPS板具有良好的隔震性能,能降低地震对堤防的影响。施工时需在EPS板上下铺设土工膜防渗,防止雨水渗入软土地基,适用于软土厚

度大、沉降控制要求严格的堤防工程,尤其在地震高发区应用优势明显。

2.4 动态监测与信息化施工

(1)沉降观测:采用分层沉降仪(测量精度 $\pm 1\text{mm}$)监测不同深度土层的沉降量,每50-100m设置一个监测断面,定期(初始每周1次,稳定后每月1次)采集数据;结合GPS监测技术(平面精度 $\pm 5\text{mm}$,高程精度 $\pm 10\text{mm}$),实时监测堤防顶部整体沉降,通过数据分析判断地基固结情况,调整施工进度。(2)孔隙水压力监测:在地基中埋置孔隙水压力计(测量范围0-500kPa,精度 $\pm 2\text{kPa}$),每20-30m布置一个监测点,实时监测加载过程中孔隙水压力变化。当孔隙水压力系数(孔隙水压力增量与荷载增量比值)超过0.5时,需减缓加载速率或暂停加载,防止地基发生剪切破坏,确保施工安全^[4]。

(3)数值模拟分析:利用PLAXIS、ABAQUS等有限元软件,建立软土地基筑堤三维模型,模拟不同施工阶段的地基应力、沉降及稳定性。通过输入地质参数(黏聚力、内摩擦角、压缩模量)和施工参数(加载速率、加固深度),优化地基处理方案(如调整桩间距、预压时间),使设计方案更贴合工程实际,降低施工风险,减少后期返工成本。

3 水利工程软土地基筑堤的技术方法选型原则与实施流程

3.1 技术选型依据

(1)地质条件:软土厚度是核心考量,厚度小于5m时优先选物理加固法(如强夯、表层换填),厚度5-15m可采用排水固结或复合地基技术,厚度超15m需结合轻质堤防结构;分层情况中,若存在砂夹层,需搭配高压喷射注浆防渗;地下水位高于软土顶面时,需先设降水系统,再选用排水固结或化学加固法,避免施工中出现管涌。(2)工程规模:堤防高度3m以下、荷载等级低(仅承受自重)的小型工程,可选用成本较低的砂石桩或加筋土技术;高度3-8m、需满足车辆通行的中型工程,需采用桩网复合地基提升承载力;高度超8m、使用年限50年以上的大型堤防,需组合排水固结+化学加固技术,保障长期稳定性。(3)环境因素:施工空间狭窄(如城市河道堤防)时,优先选高压喷射注浆、EPS板等小型设备可操作的技术;工期紧张(如防汛应急工程)需选强夯、真空预压联合堆载等快速加固技术;环保要求高(如生态保护区)时,避免使用生石灰桩(易产生碱性污染),选用泡沫轻质土或土工合成材料类技术。

3.2 典型技术组合方案

(1)浅层软土:针对厚度2-5m的浅层软土,采用

“表层换填（换填30-50cm级配碎石）+加筋土技术”，换填层提高表层承载力，分层铺设土工格栅（每0.5m一层）增强堤身整体性，适用于小型农田水利堤防，成本低且施工周期短（1-2个月）。（2）深层软土：对厚度10-20m的深层软土，采用“排水固结（塑料排水板+堆载预压）+桩网复合地基（CFG桩）”，先通过排水固结完成60%固结量，再打设CFG桩（桩长深入硬层1-2m），桩顶铺土工格栅，适用于中型河道堤防，可将地基承载力提升至250kPa以上。（3）高灵敏度软土：针对灵敏度大于4的高灵敏度软土（受扰动易失稳），采用“化学加固（水泥搅拌桩）+轻质堤防结构（泡沫轻质土）”，水泥搅拌桩形成加固帷幕（桩间距1.2-1.5m）保护软土，泡沫轻质土降低堤体自重（减少30%附加应力），适用于沿海淤泥质土区域堤防，避免施工扰动导致地基失稳。

3.3 实施流程与质量控制

（1）施工前：开展详细地质勘察，每100m布置一个勘察孔，探明软土分层、力学参数；选取20-50m试验段，验证技术方案（如排水固结试验段监测固结速率），根据试验结果优化参数（如调整塑料排水板间距、CFG桩桩长）；编制专项施工方案，明确设备型号、施工顺序及应急措施。（2）施工中：严格按分层填筑要求施工，每层填土厚度不超30cm，碾压密实度 $\geq 93\%$ ；同步开展动态监测，沉降观测每周1次、孔隙水压力实时监测，当沉降速率超5mm/d或孔隙水压力系数超0.5时，暂停加载并调整施工参数；对关键工序（如水泥搅拌桩成桩、EPS板铺设）实行旁站监督，确保桩身垂直度偏差 $\leq 1\%$ 、EPS板搭接长度 $\geq 10\text{cm}$ 。（3）施工

后：验收需满足沉降标准，竣工后6个月内沉降速率 $\leq 0.5\text{mm/d}$ ，总沉降量符合设计要求（通常 $\leq 30\text{cm}$ ）；承载力检测采用平板载荷试验，检测点数量 \geq 总桩数的1%，承载力需达到设计值的1.1倍以上；同时检查堤身防渗性能，通过注水试验确保渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$ ，验收合格后方可投入使用^[5]。

结束语

水利工程软土地基筑堤是一项复杂且关键的任务，其技术方法的选择与运用直接关乎堤防工程的质量与安全。本文所探讨的多种技术方法，从不同角度为应对软土地基难题提供了思路与方案。在实际工程中，需综合考量地质条件、工程要求、经济成本等因素，合理选用并优化组合。未来，随着科技不断进步，相信会有更多创新技术涌现，进一步提升软土地基筑堤水平，为水利事业的稳健发展筑牢坚实基础。

参考文献

- [1]王浩,耿玉芝,李福.水利工程施工中软土地基处理技术研究[J].水上安全,2025,(09):185-187.
- [2]张旭林.水利水电工程施工中软土地基处理技术分析[J].科技资讯,2025,23(08):163-165.
- [3]唐昌金.水利水电工程建设中软土地基加固处理技术研究[J].水利技术监督,2025,(05):160-161.
- [4]李占峰,王江峰.水利市政工程建设中的软土地基施工技术[J].四川建材,2023,49(11):74-75.
- [5]张兴旺.水利工程常见不良地基基础施工方法与处理策略探究[J].建材发展导向,2023,21(24):108-110.