

水利工程防洪堤坝施工中的土体加固技术研究

王珊珊

江苏省鸿源招标代理股份有限公司 江苏 南京 210000

摘要：防洪堤坝以填筑土体为主体承载结构，其力学性能直接决定工程整体安全。本文围绕堤坝施工中土体加固的基础理论、技术工艺与质量管控展开论述，分析了堤坝土体受力形变特征及失稳诱因，梳理了物理加固、化学加固与复合加固三类技术的施工逻辑与适配场景，探讨了施工流程规范化、工序协同优化与过程管控体系的构建路径。不同加固技术依据土体工况差异化选用，可有效改善堤坝密实度、抗渗性与结构稳定性，为防洪堤坝施工质量提升提供技术支持。

关键词：防洪堤坝；土体加固；施工技术；防渗处理；质量管控

引言：防洪堤坝作为水利枢纽工程的关键屏障，其结构安全性高度依赖填筑土体的力学状态与抗渗性能。堤坝土体长期承受自重、水压与渗透力的复合作用，内部应力分布不均，加之施工环境临水潮湿、工况多变，土体结构极易在填筑阶段遗留孔隙发育、层间结合不良等隐患。传统压实、换填等工艺难以从根本上消除深层结构性缺陷，土体失稳风险始终伴随工程运行周期。引入系统化的土体加固技术，对施工阶段土体结构进行针对性改良，已成为保障堤坝整体性能的重要技术手段。

1 防洪堤坝土体加固的基础理论与施工特性

1.1 防洪堤坝土体结构的受力与形变特征

防洪堤坝以填筑土体为核心承载结构，整体结构受力形式具备较强的复合型特征。堤坝土体长期承受自重荷载、水体侧向压力与渗透作用力，内部应力分布呈现多层次、非均匀的分布状态。土体结构在外部荷载持续作用下，会产生阶段性的形变变化^[1]。初期形变表现为土体颗粒间隙收缩，结构整体趋于密实。荷载持续作用后，土体内部会产生细微滑移与结构性错位，逐步形成内部裂隙与形变空间。土体材质的松散属性、孔隙分布特点，会改变结构形变的发展节奏，让堤坝土体具备明显的形变滞后性与渐变发展特征。

1.2 堤坝土体失稳的主要诱发因素

堤坝土体结构失稳由内部材质特性与外部环境作用共同引发。土体自身颗粒配比不均、密实度不足、层级填筑均匀度偏差，都会弱化结构整体承载能力，埋下失稳隐患。水体长期渗透会改变土体内部含水率，软化土质结构，降低颗粒之间的咬合强度，破坏土体原有结构形态。外部水文环境变化、持续浸泡、水位反复涨跌，会持续冲击堤坝土体结构，加剧内部裂隙发育与土体松散程度。土体结构长期处于动态荷载环境中，微小损伤

不断累积，会逐步引发滑移、沉降、渗漏等结构性失稳问题。

1.3 土体加固技术的作用原理与技术属性

土体加固技术通过物理、化学、生物等不同技术路径，重塑堤坝土体的结构状态与力学性能。各类加固方式通过填充土体孔隙、压实松散结构、固结土质颗粒、强化内部咬合强度等方式，改善土体密实度与整体稳定性。不同加固技术具备差异化的技术属性，物理加固侧重结构重组与颗粒压实，化学加固侧重材质改性与整体固结，复合加固结合多类技术优势优化土体综合性能。技术应用能够改变土体原有松散、透水、易形变的特质，提升土体抗渗能力、抗剪能力与结构承载能力。

1.4 防洪堤坝施工场景对土体加固的特殊要求

防洪堤坝施工场景具备临水作业、工况复杂、环境干扰多的特点，对土体加固工作存在专属要求。加固施工需要适配堤坝分层填筑的结构特点，匹配土体逐层成型的施工节奏。加固作业需要适应临水、潮湿的施工环境，保障技术工艺在高湿度土质条件下的有效落地。加固处理后的土体结构需要适配长期水文动态作用，维持结构稳定性与抗渗性。施工工艺需要适配堤坝狭长、露天作业空间，适配野外复杂施工环境，保障加固施工的适配性与有效性。

2 防洪堤坝土体施工现存问题与加固技术适配难点

2.1 堤坝填筑土体施工常见结构性缺陷

防洪堤坝填筑施工过程中，土体结构易留存多种原生结构性缺陷。分层填筑作业过程中，层间处理不够细致会形成薄弱夹层，破坏土体结构整体性。填筑材料筛选不够规范，颗粒级配排布杂乱，造成局部土体孔隙分布不均^[2]。压实作业管控不到位会出现局部密实度不足的问题，土体内部留存大量空隙。填筑施工工序衔接不

连贯,土层固结状态存在差异,结构整体均匀性难以保障。这类施工缺陷会改变土体受力状态,让堤坝结构在后续运行中出现各类不稳定表现。

2.2 复杂水文环境下土体施工的不稳定特征

堤坝施工多处于临水露天环境,水文条件会持续干扰土体施工质量。水体渗透作用会抬升土体含水率,软化填筑土层,降低土体颗粒粘结强度。水位浮动会改变土体外部荷载状态,未固结的填筑土层易产生轻微位移与形变。阴雨天气会加剧土体表层松散程度,破坏施工成型的土层结构。水系周边土体长期保持湿润状态,固结速度缓慢,施工成型周期被动拉长。水文环境带来的持续干扰,让土体施工成型质量难以维持稳定状态。

2.3 传统土体处理工艺的固有局限

传统土体处理工艺多以压实、换填、表层修整为主要手段,存在明显技术短板。常规压实工艺仅能改善土体表层密实状态,对深层土体孔隙与隐性裂隙无法有效处理。换填工艺作业范围有限,难以适配大范围、大深度的土体结构优化需求。传统工艺对土体材质改性能力薄弱,无法改变土质透水、易软化的固有特性。工艺开展方式较为固化,只能处理成型后显性结构问题,无法从施工阶段规避结构性隐患。老旧工艺的技术短板,难以适配高标准堤坝防渗与稳定施工需求。

2.4 堤坝施工场景下加固技术的适配阻碍

堤坝特殊施工场景,会对各类土体加固技术形成多重适配阻碍。狭长带状的施工场地空间受限,大型加固设备开展作业会受到场地约束。临水潮湿工况会影响部分加固材料固化效果,弱化技术实施质量。土体分层结构的差异化特征,让单一加固技术难以兼顾整体结构优化需求。现场多变的施工工况,会干扰加固工艺的标准落地,增加技术调控难度。

3 防洪堤坝施工常用土体加固技术工艺与应用逻辑

3.1 物理类土体加固技术施工工艺与适用场景

物理类土体加固技术通过外力干预重塑土体颗粒分布,调整孔隙结构,保留土体原有物质组分。常用技术类型涵盖碾压压实、强夯固结、换填垫层、土工加筋,施工操作流程简单,现场落地性良好。碾压压实采取分层往复作业模式,挤压孔隙空间,提升土层密实度,适配堤坝主体分层填筑施工环节^[3]。强夯固结利用高能冲击作用,重构深层土体结构,改善深部土体松散问题,适用于堤坝基础土层预处理。换填垫层清除现场软弱劣质土层,替换稳定性更强的填筑材料,改善基底承载条件,用于堤坝局部低洼、土质偏弱区域的施工处理。土工加筋铺设柔性筋材联结土体颗粒,限制土体位移变

形,增强土层抗滑移能力,多用于堤坝边坡与临水坡面的结构处理。物理加固施工门槛较低,对场地环境包容度高,适用于堤坝基础结构与常规土层改造作业。

3.2 化学类土体加固技术施工流程与应用逻辑

化学类土体加固技术借助改性材料与土颗粒的理化反应,改变土体力学属性与抗渗属性。施工前期根据现场土质条件调配注浆材料,把控配比参数与固化指标,保障材料渗透效果。按照钻孔布设、压力注浆、渗透填充的工序推进施工,将改性材料输送至土体孔隙与裂隙内部。材料在土体内部逐步扩散凝胶、固化成型,填充空隙结构,粘结松散土颗粒,形成整体性更强的固结层。施工过程严控注浆压力与推进速度,避免参数波动扰动原生土体结构。化学加固可以处理深层细微孔隙与隐蔽裂隙,强化土体抗渗性能与结构整体性,多用于堤坝深层缺陷治理、渗漏通道封堵及土体结构改造施工。

3.3 复合加固技术的施工组合方式与技术特征

复合加固技术融合多种单一加固手段,弥补单项技术的应用短板,适配复杂堤坝施工工况。主流组合形式包括物理压实搭配化学注浆、土工加筋配合浅层固结、基底换填结合深层注浆等方式。施工过程遵循分层、分区的作业思路,依托物理技术优化土体整体密实度,利用化学技术处理深层细微结构缺陷,通过加筋材料约束表层土体形变。多技术叠加可以覆盖土体浅层、中层、深层的结构改造需求,弥补单一技术治理维度单一、作用深度有限的不足。复合加固可同步处理土体密实度不足、裂隙发育、抗滑移偏弱、渗透性偏高等多重结构问题,适配土质复杂、施工环境多变的堤坝施工场景。

3.4 不同加固技术与堤坝土体工况的适配逻辑

不同加固技术拥有专属技术特点与适用场景,依据堤坝土体实际工况差异化选用。土质均匀、结构缺陷单一的常规填筑土层,采用物理加固方式优化密实度,合理管控施工投入。土体松散、裂隙发育、渗漏问题突出的复杂土层,采用化学加固方式完成深层结构改性与裂隙填充。土质层次复杂、结构缺陷多样、稳定标准较高的堤坝区段,采用复合加固方式开展全方位结构优化。作业场地开阔、施工空间充足的区域,选用强夯、大面积碾压等规模化加固工艺。作业空间狭窄、临水环境复杂的局部区域,选用微创注浆、局部加筋等精细化加固方式。技术与工况的精准匹配,可针对性解决各类土体结构短板,优化堤坝加固施工成效。

4 防洪堤坝土体加固施工的优化提升路径

4.1 土体加固施工流程的规范化优化方式

土体加固施工流程规范化,依托工序细化与标准细

化落实施工升级。梳理加固施工全流程作业内容,剔除随意化的作业环节,建立统一的工序执行标准^[4]。针对物理加固、化学加固、复合加固的不同施工环节,拆分独立作业步骤,明确各环节的操作标准与执行细节。规范施工前期土质勘察、材料调配、设备调试的前置工作,减少前期准备疏漏带来的施工偏差。规范施工中期作业执行方式,统一工艺操作尺度,弱化人工操作差异带来的施工质量波动。规范施工后期作业收尾流程,做好施工区域整理、工序交接工作,保持施工流程的连贯完整。标准化的流程体系,能够稳定加固施工质量,减少非技术性施工问题。

4.2 加固施工工序与堤坝整体施工的协同优化

加固施工属于堤坝整体施工的细分环节,工序排布需要匹配堤坝整体建设节奏。结合堤坝分层填筑、分层成型的施工模式,穿插对应阶段的土体加固作业,适配土层固结节奏。调整加固工序排布时序,避免加固作业与填筑作业、修整作业相互干扰,合理排布各分项施工的先后顺序。针对堤坝基础、坝体、边坡等不同施工区段,匹配对应阶段的加固施工内容,适配各区段的结构成型进度。衔接各工序之间的交接节点,明确工序转换的作业要求,规避工序脱节引发的施工隐患。合理的工序排布模式,能够提升整体施工效率,保障堤坝结构成型的完整性。

4.3 复杂工况下土体加固技术的适配调整策略

临水、潮湿、土质杂乱的复杂施工工况,需要针对性调整加固技术实施方式。高含水率土质环境中,调整化学加固材料配比,优化固化速度,适配潮湿土体的固结条件。土层结构杂乱、软硬交错的施工区域,调整加固作业深度与作业范围,分层开展差异化加固处理。水位波动频繁的施工区段,调整加固作业时序,选择环境稳定时段开展施工,规避水文变动干扰作业质量^[5]。场地空间受限的狭长坝段,替换大型施工工艺为小型微创工

艺,适配狭小作业空间的施工条件。

4.4 土体加固施工质量的过程管控体系构建

土体加固施工质量提升,依托全过程过程管控体系实现稳定提质。搭建覆盖施工前期、施工中期、施工后期的全维度管控框架。前期管控聚焦施工方案审核、施工材料核验、设备状态检查,从源头把控施工基础条件。中期管控聚焦工序操作细节、工艺参数执行、现场作业状态,及时纠正不规范作业行为。后期管控聚焦施工成型状态核查、作业问题梳理,为后续施工优化提供参考。

结束语

防洪堤坝施工中土体加固技术的应用,需从理论认知、工艺选择与过程管控三个维度协同推进。物理加固、化学加固与复合加固各具技术优势,依据土体工况精准匹配方能发挥最大效能。施工流程的规范化与工序排布的协同化,有助于消除人为操作偏差,保障加固质量的稳定性。全过程管控体系的建立,将质量控制贯穿施工前期、中期与后期,为堤坝结构安全提供持续保障。土体加固技术的合理运用,对提升防洪堤坝整体施工水平具有切实的工程价值。

参考文献

- [1]李飞,张春媛.水利工程防洪堤坝施工中的土体加固技术研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(2):195-197.
- [2]黄雍,胡军,林杰,等.水利工程防洪堤坝高压旋喷防渗加固技术研究[J].湖南水利水电,2025(6):73-75,79.
- [3]许子福,杨立兵.水利工程堤坝防渗加固施工技术[J].工程建设与设计,2022(1):195-197.
- [4]高武林.水利工程施工中堤坝防渗加固技术的应用研究[J].价值工程,2024,43(24):139-142.
- [5]赵芳芳.水利工程的堤坝防渗加固施工技术应用[J].工程技术发展,2024,5(1):7-9.