

水库坝基强夯置换技术的加固效果研究

李 伟

奎屯第七师勘测设计研究院有限公司 新疆 奎屯 833200

摘 要: 强夯置换技术通过重锤冲击能量实现坝基软弱土层置换, 形成高强度墩体并改善土体结构。本文分析动力置换、动力固结及动力密实机制, 揭示置换墩与土体协同承载及渗流优化规律。研究地质条件、施工参数及设备工艺对加固效果的影响, 提出承载力提升、变形控制、抗液化能力及长期稳定性评价方法。多维度分析表明, 该技术可显著提升土体干密度、抗剪强度及变形模量, 优化坝体应力分布与渗流场, 降低环境振动与噪声影响, 为水库坝基加固提供科学依据。

关键词: 强夯置换技术; 复合地基; 加固机制; 承载力; 渗流稳定性; 环境适应性

引言: 水库坝基稳定性直接影响工程安全与运行效益, 软弱土层易引发沉降变形、渗透破坏及地震液化等问题。传统加固方法存在成本高、工期长或适应性差等局限, 强夯置换技术凭借高效、经济及环境友好等优势, 成为坝基处理的重要手段。该技术通过重锤冲击能量实现软土置换与土体改良, 形成复合地基体系, 但加固效果受地质条件、施工参数及工艺控制等多因素制约。系统研究其加固机制与效果评价方法, 对优化设计参数、提升施工质量及保障水库长期安全运行具有重要意义。

1 强夯置换技术原理与加固机制

1.1 技术原理

动力置换过程通过重锤自由落体产生的巨大冲击能量, 直接作用于坝基地表软弱土层。这种能量传递使土体发生瞬时剪切破坏, 在夯击点下方形成连续贯通的破碎带^[1]。随着填料的分层填入与反复夯击, 破碎带逐渐被高强度碎石等置换材料填充, 最终形成竖向承载力显著的置换墩体。置换墩体深度通常可达数米, 具体取决于锤重、落距及地质条件, 能够有效穿越软弱土层并嵌入相对密实的下卧层。动力固结效应源于冲击波在土体中的传播特性。高频振动波使土颗粒间的连接结构发生动态重组, 原本封闭的孔隙体系被强制打开, 形成大量临时排水通道。这种瞬态排水条件加速了孔隙水压力的消散过程, 促使土体在有效应力增加的条件下发生固结变形。对于饱和软黏土, 该过程可显著缩短排水路径, 提高固结速率。动力密实机制主要体现在对非饱和土体的改良作用。夯击能量产生的侧向挤压应力使土颗粒重新排列, 小颗粒填充大颗粒间隙, 形成更紧密的骨架结构。这种密实过程伴随体积压缩与干密度提升, 直接

导致土体抗剪强度指标的改善。对于砂性土, 该过程还可消除液化势, 增强地震作用下的稳定性。

1.2 加固机制分析

置换墩与周围土体通过应力扩散与变形协调形成复合地基体系。墩体承担主要竖向荷载, 并通过侧摩阻力将部分应力传递至周边土体。这种荷载分担机制使地基应力分布更趋均匀, 有效控制坝体沉降差异。置换材料的高透水性进一步优化了渗流场分布, 降低浸润线高度。土体结构在冲击能量作用下经历破坏-重塑的动态过程。初始阶段, 原生结构被彻底解体, 颗粒间连接强度降低; 随着固结进程推进, 新结构在有效应力控制下逐步形成, 表现为颗粒定向排列与胶结物质再生。这种结构演变直接导致土体工程性质的质变, 压缩性显著降低而承载能力大幅提升。超孔隙水压力的消散过程具有明显的时间依赖性。夯击瞬间产生的孔隙水压力在施工期间保持较高水平, 随停歇时间延长逐步衰减。该过程与土体渗透系数密切相关, 渗透性越强, 固结完成时间越短。通过合理控制施工间歇, 可确保土体在下一轮夯击前达到足够强度, 避免过度塑性变形。

2 影响加固效果的关键因素

2.1 地质条件

不同类型土层对强夯置换效果的制约作用存在显著差异, 地下水位埋深与土体渗透性直接影响排水固结效率, 进而决定加固效果优劣^[2]。黏性土易生“橡皮土”, 砂性土可能液化, 淤泥质软土易缩颈, 需针对性处理。以冲洪积平原中下部为例, 该区域多为低液限黏土与粉土质沙互层, 地下水位1.6-2.2m, 以下将强夯置换与大开挖换填等常用方法, 从核心维度简化对比, 具体如表1所示。

表1

对比维度	强夯置换技术	大开挖换填	振冲碎石桩	塑料板排水法
地质适应性	适配软流塑黏土与粉土质沙夹层，加固深度3-4m，降水可解决高水位问题	仅适用于<2m浅层黏土，深层处理易边坡失稳	适配粉土质沙，软流塑黏土中易塌孔、成桩难	仅加速排水固结，无法提升软土承载力
施工成本	投资约3606万元，成本最优	投资8630万元，需支护排水，成本最高	投资21875万元，填料用量大，成本较高	投资17421万元，需配套土工材料
加固效率	4000kN·m夯击能，工期为换填法1/3	分层开挖碾压，工期最长，受雨季影响大	黏土中速率降50%，效率中等偏下	固结周期数月，效率最低
环境影响	减振沟可控振动，弃土量少	破坏植被，弃土量大，扬尘严重	噪声大，易产生泥浆污染	扰动小，可能残留土工材料
长期稳定性	碎石墩复合地基，控沉降、抗液化能力强	均匀性好，下卧层仍有蠕变风险	界面易应力集中，可能桩土脱空	仍为软土地基，难达承载力要求

土层厚度分布同样关键，厚层软土需采用多遍夯击逐步置换，薄层夹砂地层则需精准控制夯击深度防止下卧层扰动。高地下水位条件下，夯击产生的超孔隙水压力难以快速消散，易在置换墩周围形成“水囊”效应，降低墩体承载力。地下水流速过快时，可能引发置换材料流失，需采取防冲刷措施保持墩体稳定性。

2.2 施工参数

夯击能作为动力置换的核心驱动力，通过锤重与落距的组合调控直接影响加固范围。增大锤重可提升单次冲击能量，扩展置换墩直径；增加落距则能延长冲击波作用时间，加深有效加固深度。但过高的夯击能可能导致土体过度破碎，反而降低置换效率，需根据土层性质进行能量匹配设计。夯击次数与间歇时间的协同控制决定土体固结程度。初始夯击阶段以破坏土体结构为主，后续夯击侧重于墩体密实与应力扩散。每遍夯击后需预留足够间歇时间，使超孔隙水压力消散至一定比例后再进行下一轮施工。对于渗透性较差的黏性土，间歇时间可能长达7-21天，而砂性土通常3-7天即可满足要求。置换材料性质对墩体质量具有决定性影响。粒径大于5cm的粗颗粒碎石可形成稳定骨架，但过粗粒径易导致夯锤反弹；粒径小于0.075mm的细颗粒含量应控制在5%以内，避免降低透水性。良好级配的碎石能减少孔隙率，提升墩体密实度，而含泥量超标会阻碍排水通道形成，延长固结时间。

2.3 设备与工艺

夯锤设计参数直接影响冲击力传递效率。底面积较小的夯锤可产生更高单位面积压力，适合深层软土加固；底面积较大的夯锤则能扩大影响范围，适用于表层处理。静接地压力需与土体承载力匹配，过大的接触应力可能引发夯锤下陷，过小则导致能量耗散。施工顺序安排对地基均匀性至关重要。分序夯击通过跳打方式减少相邻夯点间的应力叠加，避免局部过度隆起；满夯处

理采用低能量夯击覆盖整个施工面，可消除分序夯击留下的松散层，提升表层密实度。对于大面积坝基，需划分多个施工单元，通过合理的作业路线规划减少重复夯击与漏夯现象。

3 加固效果的核心指标与评价方法

3.1 承载力提升

置换墩承载力计算需综合考虑墩体材料强度与侧摩阻力贡献^[3]。采用经验公式时，墩体直径、填料内摩擦角及嵌入深度是关键参数，需通过室内三轴试验确定材料力学指标。复合地基承载力计算则需建立墩土应力分担模型，通过面积置换率反映墩体对整体承载的贡献程度。现场检测中，平板载荷试验可直观获取压力-沉降曲线，依据规范确定极限承载力；动力触探通过锤击数反映土体密实度，结合地区经验建立与承载力的相关关系。两种方法需交叉验证，避免单一检测手段的局限性。

3.2 变形控制

压缩模量是评估土体变形特性的核心参数，通过固结试验获取的E值可代入分层总和法计算理论沉降。实测沉降采用分层沉降仪监测，重点对比坝体中心与边缘的差异沉降。渗流稳定性分析需建立二维或三维渗流场模型，计算浸润线位置与出逸点高程。强夯置换通过降低土体渗透系数改变渗流路径，使浸润线向深部偏移，减少坝坡逸出风险。渗流梯度需控制在允许范围内，防止发生管涌或流土破坏。

3.3 抗液化能力

液化势评估采用标准贯入试验与剪切波速测试相结合的方法。标准贯入击数N值低于临界值时判定存在液化可能，需结合地震烈度与地下水位进行修正。剪切波速测试通过测定土体剪切模量反映密实程度，波速越高表明抗液化性能越强。强夯置换通过增大土体相对密度消除液化势，置换墩作为不液化体可阻断地震波传播路径，降低液化范围。密实度提升使土体循环应力比降低，即使部

分区域仍存在液化可能,也不会引发整体失稳。

3.4 长期稳定性

置换墩的蠕变特性是影响复合地基长期稳定性的关键因素。在持续荷载作用下,墩体材料(如碎石)可能因颗粒间接触应力调整发生缓慢变形,需通过长期荷载试验或加速蠕变试验获取蠕变参数,建立蠕变模型预测墩体变形随时间的发展规律。复合地基的长期沉降预测需综合考虑土体固结与蠕变效应。基于一维固结理论,结合蠕变修正系数,构建沉降-时间关系模型,通过参数反演与实测数据拟合,提高预测精度^[4]。该模型可评估坝基在运营期内的沉降发展趋势,为维护决策提供科学依据,确保水库长期安全运行。

4 加固效果的多维度分析

4.1 力学性能改善

强夯置换通过能量输入改变土体微观结构,进而引发宏观物理力学性质显著变化。干密度提升是土体密实化的直接体现,伴随孔隙率降低,土颗粒间接触点增多,形成更稳定的骨架结构。渗透系数变化呈现双向特征,对于粗颗粒置换材料,孔隙连通性增强可能提高渗透性;而对于细粒土基体,颗粒重组与孔隙压缩往往导致渗透性降低。抗剪强度提升源于内摩擦角增大与黏聚力增强的双重作用,其中内摩擦角变化与颗粒形状及级配优化密切相关,黏聚力提升则得益于土颗粒间胶结物质生成与接触面积扩大。变形模量增长规律与加载历史相关,初始阶段以弹性变形为主,随加载次数增加逐渐表现出弹塑性特征,最终趋于稳定值。

4.2 结构响应优化

坝体应力分布优化通过置换墩的应力集中效应实现。强夯形成的置换墩具有较高模量,在荷载作用下承担更多竖向应力,使坝体应力重分布更趋均匀。变形协调性分析需关注墩土界面性状,良好的界面结合可避免应力集中引发的局部破坏,确保墩体与周围土体协同变形。渗流场与应力场耦合作用体现在两方面:渗流产生的动水压力改变土体有效应力状态,影响变形特性;而土体变形又导致渗流通道改变,形成新的渗流路径。强

夯置换通过降低土体渗透性,减小渗流梯度,同时提高土体抗剪强度,增强对渗流作用的抵抗能力,形成更稳定的渗流-应力平衡状态。

4.3 环境适应性

振动影响控制需从能量传播路径与衰减规律入手。夯击产生的振动波随距离增加呈指数衰减,通过合理布置减振沟或橡胶隔震垫可阻断振动传播。施工机械选型与夯击参数优化是降低振动强度的关键,低频大振幅夯击比高频小振幅更易引发环境振动。噪声控制侧重声源治理,采用静音型夯锤与液压驱动系统可显著降低机械噪声,施工时段选择与隔音屏障设置可进一步减少噪声传播。扬尘治理需建立全流程防控体系,包括施工前洒水湿润、施工中覆盖防尘网、施工后及时清理等措施,对于干燥土层可添加化学固尘剂增强抑尘效果。环保措施实施需兼顾工程效率与生态保护,避免过度防护导致成本增加或工期延误。

结束语

强夯置换技术通过动力置换、固结及密实机制显著改善坝基土体工程性质,形成高承载力复合地基。研究证实,合理匹配地质条件与施工参数可有效控制沉降差异、增强抗液化能力并优化渗流场分布。多维度分析表明,该技术对力学性能、结构响应及环境适应性具有综合提升作用,但需重视长期蠕变效应及施工振动控制。实际应用中应结合工程特点动态调整工艺,强化过程监测与效果验证,为水库坝基加固提供可靠技术支撑。

参考文献

- [1]沈志新.水库除险加固中坝基防渗墙施工技术的优化分析[J].水上安全,2024(24):7-9.
- [2]宋佳阳.微生物加固技术在水库坝基岩体防渗加固中的应用[J].水利技术监督,2024(8):241-244,251.
- [3]韦永杰.白石岩水库防渗加固技术及渗漏安全性分析[J].水利技术监督,2025(6):307-310.
- [4]陈泽荣.帷幕灌浆在水库除险加固工程大坝坝基处理中的应用[J].建材与装饰,2025,21(32):157-159.