

# 土质大坝高含水率填筑材料压实特性及施工技术研究

和阳阳

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

**摘要：**高含水土体特殊的物理结构会增大土质大坝填筑压实施工难度，极易造成坝体成型质量缺陷。通过分析高含水填筑土体颗粒分布、水分赋存及孔隙结构特征，本文系统剖析土体压实过程中外力传递、水分迁移及颗粒重组的作用机理，梳理材料组分、施工机械、作业环境等核心影响因素。结合现场施工规律，构建集土体改性预处理、格栅加固填筑、分级压实及动态调控于一体的成套施工技术体系，可为土质大坝高含水填筑施工质量管控提供有效的理论与工程技术参考。

**关键词：**土质大坝；高含水率土体；压实特性；孔隙结构；填筑施工技术

引言：土质大坝填筑体的密实程度与结构稳定性，直接决定坝体防渗能力与整体服役周期。场地水文地质条件导致天然填筑土体普遍存在含水率超标、水分分布不均等问题，传统压实工艺难以适配特殊土体的施工要求。高含水状态会重塑土体颗粒受力特征与孔隙结构形态，改变土体压实响应规律，施工阶段易出现压实不均、土体松散、坝体稳定性不足等问题。深入探究高含水土体压实机理，优化配套施工技术体系，是提升土质大坝填筑质量、改善坝体结构性能的重要途径。

## 1 高含水率填筑材料的基本物理性状分析

### 1.1 不同含水状态下填筑材料的颗粒分布特征

土质大坝填筑土体以粗细土颗粒堆积为主要结构形式，颗粒级配决定土体基础物理属性。土体水分发生变动时，内部颗粒聚集与排布结构会产生对应改变。低水分状态下的填筑土体结构相对松散，粗细颗粒呈独立分散状态，颗粒间隙排布规整，土体整体结构保持稳定。水分持续渗入土体内部，颗粒之间的结合作用持续减弱。土体内部黏粒与粉粒脱离原有位置产生迁移，局部区域逐渐聚集形成细颗粒团块。水分含量继续升高，土体颗粒形成分层排布结构。粗颗粒相互搭接构成土体骨架，发生迁移的细颗粒不断填充骨架空隙，土体原始堆积结构得到重塑。

### 1.2 材料内部水分的赋存形式与空间分布规律

填筑土体内部水分存在多种赋存形态，不同形态水分在土体内部呈现差异化空间分布特征。自由水多集中分布于土体表层与大孔隙区域，具备较强流动性，可沿孔隙通道自由迁移，空间分布随机性较强。土颗粒表层紧密附着薄膜水，水体流动性极差，是高含水土体的主要水分构成部分。土体含水量不断提升的过程中，自由水占比不断增加，原本相互独立的孔隙水道逐步连通，

形成贯通的水分渗透通道<sup>[1]</sup>。水分由表层大孔隙向土体深层微孔隙持续渗透，空间分布由局部集中状态转向整体扩散状态。孔隙尺寸差异与颗粒疏密程度，约束水分渗透范围与留存形态，让高含水土体形成稳定且独特的水分空间分布格局。

### 1.3 含水条件下颗粒间的相互作用状态

干燥填筑土体依靠颗粒接触面的摩擦力与嵌挤咬合力维持整体结构稳定。水分侵入土体内部后，颗粒间力学作用模式发生改变。颗粒表层被薄膜水包裹，接触面摩擦阻力持续降低，颗粒嵌挤支撑效果不断弱化。颗粒间隙被自由水充分填充，形成连续水膜隔离层，阻断固体颗粒的直接接触。土体含水率越高，颗粒表层附着水膜厚度越大，颗粒之间的相互约束作用持续弱化。高含水环境大幅降低颗粒相对滑移阻力，土体结构抗变形能力持续下降。颗粒间力学作用随含水状态持续改变，形成高含水填筑材料区别于常规土体的变形特征与压实基础特征。

### 1.4 高含水率环境下材料原生孔隙的结构特征

土体天然原生孔隙的尺寸、连通性与空间形态，决定了土体的基础密实潜力与可压缩性能。常规含水率条件下，土体孔隙结构完整，大小孔隙交错排布、连通性稳定，结构整体性良好。高含水率环境会持续重塑土体原生孔隙结构，水分持续填充孔隙、挤压孔隙内留存空气，改变孔隙内部介质组成；土体微小孔隙被水体完全填充闭合，大孔隙在水分压力与颗粒位移耦合作用下发生收缩；部分封闭孔隙随水分渗透形成贯通渗流通道。整体来看，高含水工况下土体孔隙总数量减少、规整排布形态被打破，可压缩空间范围发生改变，直接主导填筑材料受压过程中的压实响应规律。

## 2 高含水率填筑材料的压实作用机制阐释

## 2.1 压实外力的内部传递路径

压实作业的外部荷载作用于土体表层,自上而下形成梯度化力场传导体系。干燥土体依托完整的固体颗粒骨架传递应力,应力损耗小、传导稳定性高。高含水率填筑土体为固液耦合体系,孔隙水体参与应力传递,彻底改变传统土体传力机制。外部荷载首先作用于表层土体,由浅层颗粒与孔隙水体共同承接压力,再逐层向土体深层扩散传递<sup>[2]</sup>。由于孔隙水体具备可压缩、可流动特性,应力在传导过程中会产生持续损耗,土层深处承受的荷载强度逐级降低,应力数值随土层深度增加呈梯度递减特征。固液耦合的传力模式,决定了高含水率土体独特的受力响应与压实均匀性特征。

## 2.2 压实进程中孔隙水动态迁移规律

持续的压实荷载会打破孔隙水的静态分布平衡,驱动水体定向迁移与排出。压实作业初期,土体表层孔隙率先受压收缩,孔隙水获得流动动能,向低压孔隙区域渗流扩散。浅层大孔隙流通阻力小,水体迁移效率高,可快速向未压实区域汇集;深层微孔隙受土体刚性骨架约束,水体流动速率缓慢。随着压实作业持续推进,孤立的孔隙结构逐步贯通,分散水体不断聚拢整合,形成连续稳定的渗流通道,土体内部过量水分沿通道向表层或侧向边界排出。孔隙水迁移、汇聚、排出的全过程,持续优化土体水分分布状态,为土体颗粒重组、结构密实化提供核心前提。

## 2.3 含水环境下土体颗粒位移重组行为

土体高含水状态弱化了颗粒间摩擦阻力与嵌挤咬合作用,降低了土体结构稳定性。在外加压实荷载作用下,原有颗粒堆积平衡体系被打破,开启颗粒重组过程。粗颗粒构成的土体骨架发生小幅沉降与错位,重构土体内部空余空间形态;细颗粒脱离原有结构约束,沿孔隙水渗流方向滑移迁移,精准填充土体内部孔隙空洞。颗粒整体遵循空间适配原则,持续完成错位、排布、嵌挤优化,有效压缩土体松散区域,提升颗粒堆积密实度,推动填筑土体逐步实现密实成型。

## 2.4 压实作用下孔隙结构演化过程

压实作业前,高含水率填筑土体孔隙形态杂乱,大小孔隙无序交错,封闭孔隙与贯通孔隙随机共存,整体结构松散多孔。在持续压实荷载作用下,土体压实呈现梯度化孔隙演化特征:浅层大孔隙率先受压收缩,孔径持续减小、连通性逐步降低,孔隙空间被颗粒与水体填充;深层微孔隙在颗粒挤压与水体压力耦合作用下逐步闭合,无效孔隙数量大幅削减。随着压实进程推进,土体孔隙分布趋于规整,孔隙整体占比持续下降,松散

的原生土体结构逐步转化为均匀、致密、稳定的压实结构。孔隙结构的迭代演化,是高含水率填筑材料实现密实成型、提升力学性能的核心本质。

## 3 高含水率填筑材料压实过程的关键影响因素梳理

### 3.1 材料自身组分的内在影响

填筑材料的颗粒组分是决定土体压实性能的内在核心因素,直接主导土体受压后的结构调整规律。土体黏粒、粉粒、砂粒的占比配比,决定颗粒粗细搭配状态与孔隙储水空间尺度。细颗粒含量偏高的土体,孔隙结构细密、水体吸附能力强,压实过程中水分排出难度大,土体密实转化速率慢;粗颗粒占比偏高的土体,孔隙通道开阔,结构调整空间充足,颗粒重排与脱水密实效率更高。同时,土体内有机质、胶结物质会改变颗粒表面物理特性,弱化颗粒重组与结构密实能力<sup>[3]</sup>。不同组分形成的差异化含水适配性,直接决定压实作业难度与成型稳定性。

### 3.2 压实机械作业模式的直接影响

压实机械的荷载幅值、作用方式、作业时长等参数,决定外部荷载的施加强度与作用节奏,直接干预土体应力传递、水体迁移与颗粒重组进程。压实荷载幅值不足时,颗粒无法突破水膜束缚,孔隙水难以有效排出,土体松散结构无法充分密实;荷载幅值过大时,表层土体易出现过度假挤压、结构扰动、局部翻松等质量问题。作业时长不足会导致土体结构调整不充分,孔隙残留量超标、压实度不足;作业时长过长则会破坏已成型的密实嵌挤结构,引发土体二次松散。科学把控机械作业参数,是保障压实作业高效、合规、高质量推进的关键。

### 3.3 外部作业环境的间接干预

施工现场环境条件持续干预土体含水状态与结构稳定性,间接影响压实成型质量。空气湿度直接决定表层土体水分蒸发速率,高湿度环境下土体水分散失缓慢,长期维持高含水状态,结构抗压稳定性偏弱;环境温度影响孔隙水黏度与流动性,低温会降低水体渗流效率,延缓土体脱水密实进程。此外,场地通风条件、坝基基底承载力也会影响压实效果:通风不畅易造成局部水分富集,基底承载力不足会引发土层不均匀沉降,导致土体受压失衡、压实均匀性不达标。

### 3.4 多要素交互作用关系

单一要素仅能局部改变压实状态,材料组分、机械模式、作业环境三类要素相互制约、互补适配,共同决定最终压实质量。材料组分奠定土体压实的基础属性,限定土体结构调整、水分迁移的能力上限;机械作业模式在材料固有属性范围内,调控外力作用效率与压实强

度；外部环境动态改变土体实时含水状态与作业工况，修正压实进程发展趋势。工程实践中，可通过优化机械作业参数弥补材料组分缺陷，通过调整施工工艺规避恶劣环境干扰，厘清多要素交互逻辑，是优化高含水填筑施工工艺的重要理论基础。

#### 4 高含水率填筑材料配套施工技术体系构建

##### 4.1 基于生石灰掺拌的高含水土体改性预处理技术

常规土体预处理多依赖自然晾晒，施工效率低且受天气制约，无法稳定保障工期。本文采用生石灰掺拌改性工艺处理高含水土体，从源头优化土体物性，解决脱水不彻底、压实难度大的问题。施工可结合土体天然含水率与黏粒含量，通过现场试验确定合理生石灰掺量。生石灰掺入土体后可发挥双重改性效果，水化反应能够快速消耗土体内部自由水与薄膜水，省去长时间晾晒工序<sup>[4]</sup>。反应生成的胶结物质可包裹土体颗粒，细化孔隙结构、削弱土体亲水性，有效提升颗粒粘结强度，改善高含水土体易滑移、难密实的短板。土体改性后静置1~2d，含水率检测合格即可上坝填筑，局部含水率超标区域可定点补掺生石灰整改，无需整体返工。

##### 4.2 基于土工格栅的分层填筑加固工艺

高含水土体分层填筑后层间粘结强度偏低，坝体成型后易出现不均匀沉降、开裂等病害。本次施工引入土工格栅层间加固技术，有效提升填筑体整体稳定性。施工严格控制摊铺规格，单层摊铺厚度稳定在20~30cm，厚度偏差控制在±2cm以内，杜绝超厚摊铺影响压实质量。每层土体摊铺整平后，满铺双向土工格栅，格栅搭接宽度不小于20cm，搭接位置采用绑扎固定，防止施工过程中错位滑移。格栅铺设完成后开展压实作业，让土颗粒充分嵌入格栅网孔，形成复合受力结构，有效约束颗粒位移、抵消压实形变，强化层间嵌挤效果。每层压实合格后，及时清理表层浮土并做拉毛处理，进一步提升层间整体性。

##### 4.3 高低频组合的专项分级压实工艺

传统反复补压的压实方式容易扰动土体结构，针对高含水土体孔隙水活跃、深层压实困难的特点，本文采用高低频组合分级压实工艺。施工遵循低频稳压、高频强压、慢速递进的原则，规避快速压实封闭孔隙水、

表层土体扰动等问题。压实初期选用低频低压压路机稳压，行驶速度控制在2~3km/h，轻柔固定土体颗粒结构，打通孔隙水渗流通道，排出浅层滞留水分。稳压2~3遍后，切换高频高压模式，适度提升压实荷载、放缓行驶速度，逐层压实深层土体，推动微孔隙水分排出，实现土体整体密实。

##### 4.4 多指标联动的施工全过程动态调控技术

高含水填筑施工工况波动较大，固定施工参数难以适配现场需求。为改变晾晒、补压的被动整改模式，施工全程联动含水率、摊铺厚度、压实度、孔隙率四项核心指标动态调控施工工艺。预处理阶段依据实时含水率数据，调整生石灰掺量与拌合静置时长，精准把控预处理质量与施工工期。同时适配现场温湿度调整施工计划，高温环境缩短土体裸露时长，防止表层失水开裂；低温高湿环境优先采用石灰改性脱水，规避晾晒施工的弊端。针对局部松散、含水率超标等问题，采用翻拌补灰、精准补压的靶向整改方式，实现施工全过程可控可调。

#### 结束语

高含水率填筑土体的压实成型，是水分迁移、颗粒重组与孔隙结构持续优化的动态过程，施工质量由土体属性、机械参数及作业环境多重条件共同制约。系统梳理高含水土体物理性状与压实机理，能够清晰掌握各类因素对填筑质量的影响规律。整合土体改性预处理、分层格栅加固、分级压实及动态调控的成套工艺，可有效攻克高含水填筑施工难题，完善大坝填筑施工技术框架，提升坝体密实度与结构稳定性，为同类水利填筑工程提供可靠的技术参考。

#### 参考文献

- [1]李霄.水利工程大坝填筑施工技术要点思考[J].中国住宅设施,2025(6):151-153.
- [2]刘宏伟.大坝填筑施工技术在水利水电工程中的应用[J].价值工程,2025,44(27):152-154.
- [3]曾宏,熊湾.石家水库大坝填筑红黏土掺砂改良试验分析[J].广西水利水电,2025(4):12-15.
- [4]王大志.基于混凝土防渗填筑技术的水利大坝工程施工设计研究[J].工程建设与设计,2024(16):182-184.