

# 土石坝心墙压实度不足导致渗漏问题的现场检测与处置对策

陈智勇

樟树市水利工程服务中心

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8791

**[摘要]** 土石坝心墙压实度不足引发渗漏，这是坝体主要隐患，直接关联结构安全与运行稳定。压实缺陷的具体成因明确后，分析常用及先进检测技术适配情况，结合实际工程给出处置与加固的多种具体手段。检测结果综合判读与风险评估同步开展，建立科学可行的修复与监测体系，为同类工程提供技术支撑，强化防渗效果，保障坝体运行安全水平。

**[关键词]** 土石坝；心墙压实度；渗漏检测；处置对策；结构安全

## On-site Inspection and Countermeasures for Seepage Issues Caused by Insufficient Compaction of Earth-rock Dam Core Walls

Chen Zhiyong

Zhangshu City Water Conservancy Engineering Service Center

**[Abstract]** Insufficient compaction of earth-rock dam core walls leading to seepage poses a major structural hazard, directly impacting dam safety and operational stability. After identifying the specific causes of compaction defects, this study analyzes the applicability of conventional and advanced detection technologies, proposing practical reinforcement methods tailored to real-world engineering scenarios. Integrated interpretation of inspection results and risk assessment are conducted concurrently to establish a scientifically sound repair and monitoring system. These measures provide technical support for similar projects, enhance seepage prevention effectiveness, and ensure optimal dam operational safety.

**[Key words]** earth-rock dam; core wall compaction degree; leakage detection; remediation measures; structural safety

### 引言：

土石坝是重要的水利工程结构，安全稳定运行直接关联流域防洪灌溉与人民生命财产安全，心墙为土石坝防渗核心部位，压实质量至关重要。施工及运营过程中，筑坝材料、施工工艺及现场管理的各类偏差，常会导致心墙压实度不足，进而引发渗漏等影响工程安全的潜在隐患。本文针对该问题展开分析，结合现场实际检测与科学处置方法，为水利工程实际实践提供切实有效技术支撑。

### 一、压实度不足引发渗漏的机制与成因分析

#### (一) 心墙结构在防渗体系中的关键作用

土石坝防渗系统中，心墙多坐落于坝体中轴线上，是阻断渗流穿透坝体的屏障。其由低渗性材料筑成，粉质粘土或心墙黏土这类适配材料为主，需达到规定压实度以保证密实性和连续性，阻断渗流通道。心墙控制坝体整体渗透线分布，减少水头差异带来的渗透应力，在整个坝体结构中承担控制渗流、分散应力、协调坝体变形的作用，压实质量关联防渗系统安全性能。

工程实践中，心墙作为关键防渗构件，与坝基、反滤层、排水体的协同关系至关重要。压实不良或出现裂隙时，渗流会绕过防渗体系进入坝体内部，形成渗漏隐患，严重时引发管涌、渗透变形等灾害。心墙在地震、水位波动等复杂工况下易受应

力集中影响，材料松散、压实不足会导致整体防渗能力下降。确保心墙压实度符合设计标准，是保障坝体长期稳定运行的前提，压实度达标可降低心墙渗透系数，阻断渗流通道形成，增强土体结构整体性与抗变形能力，避免孔隙率过大引发的渗透破坏，提升坝体防渗体系安全可靠。

### (二) 压实度不足的形成原因及常见部位

压实度不足由多种因素叠加导致，施工工艺不规范、材料性质差异、水分控制偏差、碾压设备选用不当及碾压遍数不够均会产生实质性影响。心墙填筑材料含水率偏离最佳值，干密度会明显降低，进而无法达到设计文件中规定的压实度标准<sup>[1]</sup>。碾压层厚度把控不当、碾压遍数未达规范要求，会造成心墙各部位压实不均匀，局部区域密实度差异较大。部分区域因碾压机械无法抵达或现场操作空间受限，易形成压实“死角”，进而出现压实度偏低的薄弱区域，成为坝体潜在的渗漏路径。

现场调查与工程案例表明，心墙压实度不足多出现于坝体中下部、边界交接区以及施工接缝等关键部位。这些区域施工难度较大、结构形式复杂，压实作业往往难以达到理想状态，尤其是心墙与基岩接触面之间的过渡带，因地形起伏较大、施工操作空间有限，更易产生明显的压实缺陷。这些薄弱部位一旦处于高水头作用下，极易成为渗漏初发点，随后逐步扩展为贯通性渗流通道，对坝体整体安全构成直接威胁。渗流集中发展后，可能引发土体细颗粒流失、管涌及渗透变形等破坏性现象，导致坝体局部失稳，甚至显著提升整体安全风险。加强这些重点部位的压实质量控制是提升心墙防渗性能的关键，需严格把控填料含水率、分层碾压厚度及碾压遍数，确保心墙压实过程均匀且连续，满足设计要求。

### (三) 压实缺陷对坝体渗流稳定性的影响

压实缺陷削弱心墙防渗能力，渗流路径延伸至坝体内部，加大坝体结构被侵蚀破坏的可能，压实度不足区域，土体孔隙率上升、渗透系数提高，局部水流速度加快，形成集中渗流。渗流超出心墙容许渗透能力，会产生渗透破坏，严重时诱发管涌、流土等灾害，引发坝基不均匀沉降及滑动破坏，影响坝体结构稳定。压实不良还会导致水压力重新分布，出现应力集中区域，加快坝体变形。

实际工程里，渗流破坏早期表现难以察觉，发现渗漏迹象时，大概率已形成大范围压实劣化区。细颗粒随水流迁移会进一步扩大土体孔隙结构，形成内部“渗流管道”，让渗流集中发展，常规方式难以封堵。长时间运行后，压实缺陷逐步累积，呈现非线性破坏特征，让坝体陷入不可逆的劣化状态。识别和修复压实缺陷对确保坝体渗流稳定至关重要，也对检测技术和处置手段提出更高标准。精确探测手段及时发现隐患区域，配合科学修复措施，可有效遏制渗流发展，提升坝体防渗性能，保障工程安全运行。

## 二、现场检测方法和技术应用

### (一) 常用压实度与渗漏检测手段对比分析

压实度检测是土石坝施工与运行过程中判断填筑质量的关键指标，常用检测手段涵盖环刀法、灌砂法以及核子密度仪法三种核心类型。环刀法操作简便且无需复杂设备，适用于坝体浅层土体检测，高石含量区域或土体密实度较高的部位，其检测准确性会受到明显限制。灌砂法适配现场粗颗粒土体的密实度测定，检测精度始终保持稳定状态，受土体颗粒级配影响较小，但对现场操作的规范性与环境条件有着较强依赖。核子密度仪法数据获取速度快，可实现一定深度范围内土体的非破损检测，在坝体施工全过程应用较为广泛，使用过程中需严格遵循辐射安全相关规定与操作标准。三种方法在压实质量评估中均具备各自独特优势，复杂施工部位及心墙隐蔽区域的检测适应性仍存在明显局限，渗漏问题的检测手段与压实度检测不同，更侧重精准识别渗流路径与土体内部水动力行为特征。

常用检测方法包含电阻率法、红外热像法、地质雷达技术及静力水准测量技术。电阻率法通过实时监测土体电性参数变化，据此判断土体内部水分分布状况，可快速锁定渗漏集中区域及范围。红外热像法依托渗漏现象引发的坝体表面温度差异，完成热异常区域识别，检测灵敏度较高，外界气温、光照等环境因素易对检测结果产生干扰。地质雷达可通过电磁波反射信号，探测地下空洞、土体介质变化等情况，适配坝体浅层结构缺陷的快速检测。压实度检测聚焦土体密实性相关数据采集与分析，渗漏检测更关注渗流行为特征及潜在渗透通道的精准定位，两类检测手段合理结合使用，可系统、全面评估心墙压实质量与坝体渗流风险之间的内在关联性。

### (二) 先进探测技术在渗漏诊断中的实践应用

检测技术不断发展，非接触式与高精度无损探测技术手段已逐步应用于土石坝渗漏诊断领域。分布式光纤温度传感(DTS)技术在坝体长距离实时温度监测中展现独特优势，利用光纤沿线温度感知能力，准确定位渗流区域热异常点，拥有连续监测、响应灵敏的突出特点。相较于传统温度计测点布置模式，DTS空间覆盖性和数据连续性更具优势，已在大型土石坝长期运行监控中广泛应用。

三维电阻率层析成像(ERT)技术在实际工程中也取得显著应用成效，通过多组电极合理布设，构建出土体内部电性分布三维可视化图像，精准识别心墙压实薄弱区和潜在渗流通道。对坝体中深层结构异常响应更为灵敏高效，能有效弥补常规二维测线探测存在的不足<sup>[2]</sup>。工程应用里，ERT与红外热成像、水化学示踪等方法协同应用，构建多源信息融合的渗漏诊断体系，可提高渗漏识别的精准度和诊断可靠性。这些技术应用既提升检测科学性，也为心墙压实度不足问题的早期预警与定点修复提供有力技术支撑。

### (三) 现场检测结果的判读与风险评估

现场检测获取的大量实测数据，需结合坝体结构特征与实际运行条件判读，才能识别压实度缺陷及引发的渗漏风险。检测结果需做多维度分析，涵盖压实度与渗透系数的空间分布关

联、渗流路径走向及水头变化规律。数据处理中采用 GIS 空间分析、有限元反演分析技术，可将坝体渗流场与应力场转化为可视化表达形式。对比不同监测参数的演化规律，能识别异常区域，判断其是否会发展为结构性渗漏。

风险评估需结合检测结果建立分级评价模型，将坝体划分为安全、可控、关注及高风险四个区域。检测出的压实薄弱区与渗漏高敏感区，需结合历史运行数据和结构响应判定风险等级。某区域压实度大幅低于设计标准，且伴随明显电阻率下降与热异常信号，需判定为重点隐患区，制定专项加固或修复方案。检测判读与风险评估是心墙压实度缺陷精准识别、有效处置的前提，对大坝运行安全有着重要现实价值。

### 三、压实度缺陷的处置技术与工程对策

#### (一) 常规修复方法及适用条件

土石坝心墙压实度不足引发的渗漏问题，实际工程中可通过多种常规方法修复，回填碾压法、黏土截渗墙、劈裂注浆法是最为常用的三种。回填碾压法用于心墙压实薄弱区未完全形成贯通性渗透通道的场景，局部开挖剔除疏松筑坝材料后，重新铺设合格材料并按标准碾压，恢复心墙原有压实度与结构完整性。黏土截渗墙适配渗漏路径相对集中、渗透深度较浅的区域，在渗漏部位精准构建低渗性黏土墙体，阻断渗流继续向坝体内部扩展。劈裂注浆法在心墙及其邻近区域注入低渗性注浆材料，填补土体内部孔隙与细微裂隙，适配不具备大面积开挖施工条件的狭窄作业空间。

不同修复方法需结合地质条件、渗漏范围及坝体运行状态综合选用，高水头作用下运行的大坝，单纯采用表层处理手段难以形成可靠防渗屏障，需与深层注浆或结构加固措施联合应用。多年运行的大型老坝，修复施工需控制对原有坝体结构的扰动，优先选取扰动小、施工工期短、施工机械适配性强的修复方案。常规修复措施在工况合适时能有效控制渗漏扩展，效果可持续性依赖后续监测评估与维护管理。缺乏系统性长期跟踪监测手段时，修复区域可能因坝体再次沉降、筑坝材料老化或新渗流路径形成出现复漏，需建立完善监测体系与定期维护机制，保障修复效果稳定持久。

#### (二) 新型材料与加固技术的应用实践

防渗加固技术持续发展，各类新型材料与先进施工工艺已逐步应用于土石坝心墙压实缺陷的修复工作。材料选用上，膨润土复合垫、自愈合防渗膜、高聚物可控注浆材料均具备优良防渗性能与良好施工适应性。膨润土复合垫遇水浸泡后会发生膨胀，自动密封土体孔隙，适配浅层心墙缺陷区的快速封堵需求。自愈合防渗膜拥有裂缝自动闭合能力，小变形条件下可恢复自身完整性，强化修复区域长期稳定性。高聚物注浆材料凭借低黏度、高膨胀性与强渗透性，能充分填充心墙内微裂隙和疏松区域，提升结构整体密度。

施工技术领域，低扰动注浆工艺、水平定向钻注法与深层

混合加固技术已逐步替代传统粗放式施工。大坝边坡、坝基接缝等空间受限部位，水平定向钻进结合定点注浆技术可精准控制浆液扩散范围，减轻对坝体的过度扰动<sup>[1]</sup>。深层混合加固技术借助高速搅拌设备，将加固材料与心墙原土进行原位混合，形成均质固结区，多用于压实度严重不足或心墙连续性遭到破坏的区域。这类新材料与施工技术的推广，大幅提升渗漏治理效率，也为复杂工况下的修复作业提供了更多解决路径。提升材料自适应性及修复手段精准度，既能增强修复区域的密实性与耐久性，也能降低施工对原有结构的扰动风险，为土石坝心墙缺陷治理提供更安全、高效的技术支撑。

#### (三) 处置效果评估与长期监测建议

压实度缺陷处置完成后，单次检测无法全面评估处置区域的长期安全性与稳定性，需建立覆盖多维度的效果评估机制。处置后需开展多参数对比监测，涵盖修复区压实度、土体渗透系数、坝体水位响应变化、结构变形及渗流量等核心监测指标，以此判断修复效果是否达到预设目标。修复初期需设置高频率观测周期，对比修复前后检测数据的演化规律，排查二次渗流路径及新出现的压实薄弱区域。红外热像、电阻率法及水文地球化学示踪等技术可辅助验证修复区域的结构完整性与防渗效能，提升诊断结果的可信度。

长期运行管理阶段需建立分层分区动态监测体系，重点部位布设高密度监测点，联动自动化监控系统实现实时预警响应。曾出现压实缺陷的区域纳入重点巡查与定期复查范围，采用分布式光纤监测、地质雷达复测等技术开展周期性核验。高风险坝体需将检测结果纳入数字化安全管理平台，构建问题识别、修复实施至后续运行的全周期闭环管理模式。科学评估与系统监测结合，可有效防止心墙压实度缺陷发展为重大安全隐患，保障土石坝运行安全可控。

#### 结语：

土石坝心墙压实度不足引发的渗漏问题，本文分析其成因机制、现场检测技术及处置对策，构建适配工程实际、从问题识别到风险控制的完整技术路径，压实缺陷经科学诊断与分类修复，可提升坝体防渗性能，降低工程运行风险。新型材料与监测手段投入应用，可强化治理效果的稳定性与可持续性。相关研究成果为同类工程提供实用参考，对保障土石坝长期安全稳定运行具有重要现实意义。

#### 【参考文献】

- [1]向鹏,李浪.土石坝黏土心墙压实度影响因素的灰关联熵分析[J].人民珠江,2024,45(S1):170-174.
- [2]张宗亮.特高心墙堆石坝筑坝关键技术与创新应用[M].中国水利水电出版社:202012:385.
- [3]杜丽荣.黏土心墙土石坝监测资料分析及安全评价研究[D].西安理工大学,2020.