

团体标准
《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》
编制说明

2025年11月

《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》编制说明

一、标准制定的必要性

堤防是为了兴水利、除水害而沿江河、湖泊、海洋的岸边或蓄滞洪区、水库库区的周边修建的防止洪水漫溢或风暴潮袭击的挡水建筑物，是防御洪水最普遍、最有效的工程措施，也是抵御洪水泛滥的最后一道屏障，是防洪工程体系中极其重要的组成部分，在综合防洪工程体系中发挥着非常重要的作用，其长效健康服役关系到整个水工程的安危，已成为关乎国计民生、社会稳定的公共安全问题。同时，“水工程智能建造与安全服役理论”也已被遴选为《国家自然科学基金“十四五”发展规划》中优先发展领域的重要内容。截至2020年年底，我国已建成各类水库大坝98566座，5级及以上江河堤防32.8万公里，其中绝大部分为土石材料。受勘测、设计、施工及管理水平的限制，土石堤坝渗漏问题尤为突出。随着两轮全国病险水库除险加固和各地堤防整修工作的开展，许多土石堤坝渗漏病险状态得到了一定程度的改善，但仍有大量中小型病险水库大坝及江河堤防尚未得到处置或处置不彻底，此外，随着服役年限的增加，新的渗漏病险还在不断出现。

伴随着全球气候持续恶化，自然界中的极端降雨增多，堤坝在持续高水头压力作用下堤身、堤基薄弱部位极易形成渗漏通道，且经洪水长时间浸泡，易产生散浸、渗漏和滑坡等险情，虽经历了多次维修加固，但施工接头多，运行时间长，建设标准低，这些问题导致堤坝在高水位作用下往往会发生不同程度险情，对堤坝整体安全和持续发挥效益产生了严重威胁。因此，加快完善土石堤坝渗漏分析与防控技术体系，为堤坝安全运行提供科学、全面的技术支撑，并为有关部门提供有效的决策依据，规范土石堤坝渗漏分析与防控的要求，制定本指南。

然而现有规范在如何精细化完成土石堤坝渗漏问题仿真分析中缺乏明确的标准，渗流控制无统一定量标准，在为促进土石堤坝工程长效安全和应急管理的长远发展，《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》围绕土石堤坝渗漏

破坏问题进行深入的研究，系统总结归纳并创新了土石堤坝渗漏探测和险情防控的关键理论和技术，涉及土石堤坝裂隙-渗流试验装置及测试技术、土石堤坝渗漏病险分布式监测试验装置及测试技术、基于比例边界有限元方法的土石堤坝水-土-结构多场耦合精细化仿真技术、石堤坝渗流控制定量标准等方面，以期为堤坝安全运行提供科学、全面的技术支撑，并为有关部门提供有效的决策依据，研究成果为工程防汛抢险、除险加固及安全运行提供科学依据，具有重要的工程应用价值和社会经济效益。

二、标准编制原则及依据

- (一) GB 50487《水利水电工程地质勘察规范》；
- (二) GB 50286《堤防工程设计规范》；
- (三) SL 188《堤防工程地质勘察规程》；
- (四) SL 551《土石坝安全监测技术规范》；
- (五) T/CWEA 24《小型水库大坝渗漏处理技术导则》；
- (六) T/CI 1031《堤防防渗工程施工技术规程》。

三、标准背景及工作情况

(一) 任务来源

堤坝作为防洪工程体系的核心组成部分，其安全事关国计民生。“水工程智能建造与安全服役理论”已被列为《国家自然科学基金“十四五”发展规划》优先发展领域。然而，我国现存的大量土石堤坝普遍存在渗漏病险问题，且在全球极端气候频发的背景下，渗漏风险日益加剧，严重威胁下游人民生命财产安全和公共安全。因此，系统解决土石堤坝渗漏问题，制定科学、统一的防控技术指南，是保障国家水安全和水工程长效服役的战略任务。当前，我国在土石堤坝渗漏分析与防控领域，存在分析手段不足、监测技术空白、控制标准缺失等显著的技术瓶颈与标准缺失。为将已攻克的渗漏分析、监测与防控关键技术转化为行业通用规范，为指导工程除险加固与安全运行提供科学决策依据，特立项编制《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》。

（二）标准起草单位

指南由江西省水利科学院提出并负责主要起草工作，承担指南的整体架构设计、核心章节编写及统稿定稿等任务。河海大学、大连理工大学、西安理工大学作为联合起草单位共同参与起草，负责指南中重要技术点的研究和建议，并参与指南内容的讨论。

（三）标准研制过程及相关工作计划

1. 前期准备工作

项目立项前，标准编制小组查阅、研读相关国内外文献，以及标准 GB/T 50487 《水利水电工程地质勘察规范》、GB/T 50286 《堤防工程设计规范》等，广泛土石堤坝渗漏分析与防控资料，开展实验室测试，围绕土石堤坝渗漏防控的核心技术链条，系统开展了从渗漏诱发机理、渗透破坏演化过程，到管涌型与流土型破坏模式识别、临界状态判定及防控措施优化的全周期研究，积累了贯穿渗透破坏孕育、发展至失稳全流程的理论研究与工程实践经验，并多次与相关行业人员进行调研、交流，广泛征求标准制定方面的意见和建议。在此基础上，编制小组初步整理形成了《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》标准术语、检测技术要求及方法，并据此草拟了标准框架。

2、标准起草过程

2025年9月10日，江西省水利科学院作为牵头单位，向中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会提交了《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》立项申请及标准草案，经委员会组织相关领域专家评审，同意立项。

2025年9月26日，由中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会向国家标准委全国标准服务平台提交立项，立项编号为：CHI2025016，并向全社会公示了15日。

2025年10月6日，江西省水利科学院组织召开标准启动会暨第一次起草会议，就标准总体框架、章节分工及编制进度进行深入讨论，明确了各小组任务与时间节点。

2025年10月16日，编制小组赴贵州召开第二次起草会议，确定标准内容草案。

2025年11月3日，将标准草案提交中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会，通过审核。

（四）标准依托的主要试验（或验证）情况分析

1. 实验方法概述

围绕土石堤坝渗漏核心技术需求，构建“物理试验-数值模拟-现场验证”结合的实验体系，核心方法如下：

①渗透破坏机理分析

物理模型试验：用渗透仪对重塑/原状土样逐级加载水头，观测颗粒迁移与破坏过程，结合CT扫描分析孔隙结构，验证颗粒划分（可动/阻塞颗粒）及稳定性判别标准（细颗粒含量、不均匀系数 C_u ）。CFD-DEM耦合模拟：构建土-水耦合模型，模拟细颗粒迁移，输出流失量、孔隙率等参数，与物理试验对比（误差 $\leq 15\%$ ），揭示管涌、流土机理。

②防渗体渗流特性试验

混凝土裂缝-渗流试验：用定制装置控制裂缝宽度（ $0.01\sim 5.00\text{mm}$ ，精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ），施加恒压（最大 2.0MPa ），监测渗流量，分析裂缝与渗流的量化关系。渗流-应力耦合试验：用万能试验机制备劈裂试件，模拟受力状态，同步监测变形与渗流量，结合SEM、CT观测微观结构，建立孔隙与渗透系数关联模型。

③渗漏监测与识别

分布式光纤监测：布设铠装光缆（短期拉伸强度 $\geq 1500\text{N}$ ），采用主动加热（功率 $3\sim 12\text{W/m}$ ）与被动测温，验证渗漏定位精度（温控 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ）。多参量联合监测：同步布设孔隙水压力计、量水堰，采集水位、渗流量等，用算法构建异常识别模型，验证三级预警合理性。

④防渗结构验证

嵌岩混凝土造槽试验：用液压抓斗机（斗重 $9\sim 30\text{t}$ ）造槽，泥浆固壁（比重 $\geq 1.30\text{g/cm}^3$ ），测试造槽速度（ $55\sim 70\text{m}^2/\text{台班}$ ）及嵌岩效果（嵌入基岩 \geq

1.0m)。深层搅拌成墙试验：用专用搅拌头（轴距450mm）实现桩体套接（宽度75mm），测试成墙速度（180~260m²/日）及防渗性能。

2. 实验过程描述

①前期准备

试样制备：土样按密度制备，筛分确定级配；混凝土试件养护后劈裂预制裂缝，用三维扫描与数控雕刻复刻标准化裂缝（精度±0.1mm）。

设备调试：校准渗流装置密封性能（稳压2h压力降≤5%）、监测系统数据同步性（时滞<10ms），确保传感器精度。

②核心试验实施

渗透破坏试验：土样饱和后逐级升水头，记录渗流量与破坏状态，确定临界水力梯度；数值模拟输入参数，对比物理试验结果。

裂缝-渗流试验：试件密封后空载检验（水压≥1.2倍设计值），控缝宽后逐级加压（0.1~0.2MPa/级），记录参数，每个工况重复2次。

防渗结构试验：嵌岩造槽实时监测垂直度，调整泥浆稳定槽壁；深层搅拌按“一序+二序”成墙，成墙后取芯检测。

③数据处理与验证

数据采集：自动记录试验参数（水头、流量等）、监测数据（温度、压力等）及微观数据（CT图像、颗粒流失量）。

预处理：剔除异常值、滤波、对齐数据，导出为标准格式；验证防渗体渗透系数、监测系统定位精度（误差≤1m）。

3. 实验结果分析

①渗透破坏机理

颗粒级配影响：细颗粒含量 $P < 25\%$ 易管涌， $P > 35\%$ 易流土， $25\% \leq P \leq 35\%$ 为过渡型（受 C_u 影响）；质量分形维数 D 与临界水力梯度 i_{cr} 负相关（ $R^2 \geq 0.85$ ）。

宏细观耦合：水力梯度超 i_{cr} 时，孔隙率骤增（≥20%），力链断裂，与模拟结果吻合；球形颗粒 i_{cr} 比棱角颗粒低15%~20%。

②裂缝-渗流特性

缝宽与渗流关系： $w < 0.1\text{mm}$ 时 Q 与 w^2 线性相关（ $R^2 \geq 0.9$ ）， $w > 0.1\text{mm}$ 时 Q 与 w^3 拟合（ $R^2 \geq 0.95$ ）；同一缝宽下 Q 与水压线性正相关（ $R^2 \geq 0.98$ ）。

装置可靠性：重复试验渗流量误差≤3%，密封性能达标。

③防渗结构性能

嵌岩防渗墙：槽壁垂直度偏差 $\leq 0.3\%$ ，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ，芯样连续无孔隙。深层搅拌墙：日成墙 220m^2 ，套接宽度 $70\sim 80\text{mm}$ ，28d渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ，抗剪强度 $\geq 0.3\text{MPa}$ 。

④监测系统有效性

光纤监测：30min内定位渗漏（误差 $\leq 0.8\text{m}$ ），渗漏点 $\Delta T \geq 2^\circ\text{C}$ （非渗漏区 $< 0.5^\circ\text{C}$ ）。多参量监测：异常识别准确率 $\geq 92\%$ ，三级预警响应合理。

⑤综合结论

实验明确了渗透破坏判别标准与临界水力梯度，建立了裂缝渗流量化模型；防渗结构与监测系统满足工程要求，为土石堤坝渗漏防控提供技术支撑。

四、标准编制对产业发展的支撑作用及解决的主要问题

1. 土石堤坝渗漏分析方面

提出的土石堤坝基于细颗粒精细划分的土体内部稳定性分析方法、土石堤坝渗流侵蚀宏细观分析模型和粗糙混凝土裂缝渗透率演化分析模型，在江西鄱阳湖区二期防洪工程、永修立新圩、万青联圩等多个工程设计中得到了应用，解决了土石堤坝未考虑土颗粒流失影响下计算安全度偏低、应力-侵蚀长期作用下裂损混凝土防渗墙渗流量计算方法缺失等技术难题，避免了重大设计变更，在满足堤坝稳定和抗渗要求的前提下，大幅缩短了设计周期，显著提高了设计效率。

2. 土石堤坝施工工艺优化和方案选取方面

提出的土石堤坝水-土-结构多场多体精细化仿真技术和防渗墙造槽成墙施工技术，在江西鄱阳湖区二期防洪工程、在樟山防护区樟山堤、保丰水库扩建工程、九合联圩等堤坝施工中得到了应用。通过研发堤坝嵌岩混凝土造槽施工和防渗墙二次成墙改进搅拌头施工工法，为施工单位在造槽施工设备配置、入岩造槽施工工艺、搅拌头钻头与喷浆方式等重要施工工艺及关键施工参数的调整和优化提供了技术支撑。以保丰水库扩建工程坝体防渗加固和九合联圩除险加固工程为例，在确保施工质量满足规范和设计要求的条件下，有效解决了松散地层槽孔壁易坍塌、二次成墙速度慢和单位水泥耗量高的技术难题，保障了造槽和成墙质量，使松散地层造槽时槽孔壁坍塌得到了有效

控制，实现了造槽槽孔实时自动纠偏，保证了成墙混凝土充盈系数降低约30%，同时实现了成墙土料与水泥浆的均匀搅拌，成墙速度比三头小直径深层搅拌桩机提升约20%，单位成墙面积水泥用量降低12%以上，加快了建设进度，降低了工程造价，保障了工程安全运行。

3. 土石堤坝运行期渗漏监测和防控技术方面

提出的土石堤坝渗漏通道识别分布式监测装置与土石堤坝渗漏防控提升技术在黄河大堤（淄博高青段）、舍湾联圩加固工程等工程运行管理中得到了应用。通过土石堤坝渗漏通道识别分布式监测装置，让管理单位能实现渗漏部位的精准监测，有效支撑了工程管理单位在堤坝日常维护、渗漏部位巡查检查、险情处理等技术方案的比选和工艺流程的优化，大大提升了管护效果；通过构建渗控效果综合评价技术体系，结合土石堤坝多场多体耦合软件分析平台，让设计单位能充分考虑采用渗控设计方案的合理性、让施工单位在施工方法上进行合理的优化，充分保障了土石堤坝渗控效果。

总体来说，本指南攻克了土石堤坝渗流侵蚀机理不明晰、渗漏通道难识别、数值仿真算不准、防控技术不完善等关键技术难题，在土石堤坝坝体及防渗结构长效性能科学发现和安全保障技术体系方面取得了大量原创性成果。特别是在长效运行期渗流侵蚀稳定分析方法、渗流试验装置及测试技术、渗漏通道识别方法、多场多体仿真技术、地基渗控标准及评价技术等方面突破传统技术瓶颈，填补了国内外空白。

五、标准与国内外标准对比分析和协调性说明

1. 分析方法的精细化与机理探究深度不同

国内外现行标准（如GB 50487、GB 50286、SL 188等）主要侧重于宏观层面的工程地质勘察、设计原则与安全监测要求，虽对渗流稳定有一般性规定，但多基于传统土力学理论，未深入涉及土体内部细观结构演化与渗流侵蚀机理。

指南则规定基于细颗粒精细划分的土体内部稳定性分析方法，明确了土体内部稳定性的准确判别；规定渗流侵蚀宏细观分析模型技术参数，根据孔隙结构对渗流侵蚀的影响机制，规定了堤坝防渗体渗流特性演化机理分析技术要求；提出堤坝防渗墙混凝土裂缝-渗流试验装置技术参数，仪器可以解决

了裂损防渗墙渗流量计算难题。这些内容在国内外标准中均属首创，实现了从宏观经验判断向宏微观机理协同分析的跨越。

2. 渗漏监测技术的创新与集成度不同

现有标准（如SL 551、T/CWEA 24）主要规范了渗流量、浸润线等常规监测项目，技术手段以点式监测为主，缺乏对渗漏通道形成过程的分布式、多参数协同监测要求。

指南规定了土石堤坝渗漏通道识别分布式监测装置技术参数，明确了渗流侵蚀过程中温度、孔隙水压力、渗流量等多特征参量的联合监测技术，突破了传统手段响应滞后、定位模糊的技术瓶颈，填补了国内在渗流侵蚀分布式监测方法领域的空白。

3. 真模型的精度与耦合能力不同

国内外现有标准在数值仿真方面多限于推荐通用软件及基本计算原则，对多场耦合、精细建模缺乏具体技术规定，尤其缺乏对刚-柔结构相互作用、施工工艺影响的精细化模拟指导。

指南规定了水-土-结构多场耦合精细化分析模型的技术参数，突破了传统方法网格剖分质量不高、计算精度与效率难兼顾的限制，可实现对防渗结构与土体、坝内埋管与接触黏土等刚-柔复杂界面渗流行为的精准模拟，显著提升了数值分析的可靠性与工程适用性。

4. 渗流控制标准的定量化与系统性不同

现行堤坝设计规范（如GB 50286）虽提出了渗流控制原则，但缺乏统一的定量控制标准与效果综合评价体系，导致工程实践中渗控措施选择与验收存在较大随意性。

指南首次明确了土石堤坝地基渗流控制的定量标准，规定了考虑不同渗控方案、施工工艺等多要素的渗控效果综合评价技术要求，实现了渗流控制的规范化和定量化，解决了行业长期依赖经验判断、无统一定量依据的技术难题。在土石堤坝渗漏分析和防控技术方面，与国内外相关标准保持了一定的协调性，并具有一定的先进性和可操作性。通过进一步改进和完善，指南将为我国土石堤坝长效安全管理行业的发展提供更加有力的技术支撑。

六、标准制定的基本原则

指南编制过程中，遵循了以下基本原则：

1. 科学性与先进性原则

指南应立足现代岩土力学、渗流理论和水工结构学，吸纳并固化最新的科研成果。所有分析方法、判别标准和防控措施都应有坚实的理论依据、试验验证或成功的工程实践案例支撑，确保技术内容的科学准确与适度前瞻。

2. 系统性与全过程覆盖原则

指南应构建一个完整的技术体系，覆盖从“渗漏机理分析 → 监测识别诊断 → 工程防控设计 → 效果综合评价”的全过程。各个环节需相互衔接、逻辑自洽，形成一个闭环管理系统，为工程人员提供从问题诊断到解决方案的一站式技术路径。

3. 适用性与可操作性原则

指南的条款应清晰明确，提供的分析方法、计算公式、技术参数和施工要求必须具体、可行，便于一线工程师、设计人员和管理人员理解与应用。在追求技术深度的同时，需兼顾我国不同地区、不同等级堤坝工程的技术水平与资源条件，确保指南能够落地。

4. 协同性与多维度融合原则

指南应强调宏微观分析相结合、室内试验与现场监测相结合、数值模拟与经验判断相结合。它应促进水-土-结构多场耦合的分析思路，推动多源监测数据的融合诊断，并引导工程措施与地质条件、环境影响的协同考量。

5. 量化与精准化原则

为克服传统方法中定性描述过多、主观性强的不足，指南应致力于推动关键技术的量化。这包括：土体稳定性的定量判别、渗流控制的定量标准、防渗效果的定量评价等，以提升风险研判和决策的精准度。

6. 安全性与经济性平衡原则

所有分析与防控措施的首要考虑是确保堤坝的长期安全与防洪功能。在此前提下，指南应提供不同防渗形式的适用条件与比选原则，引导在安全可靠的基础上选择技术可行、经济合理的方案，实现安全与成本的最佳平衡。

7. 开放性与可持续性原则

指南的框架应保持开放，能够容纳未来新技术、新设备、新方法的融入。同时，应建立基于监测反馈和效果评价的持续优化机制，体现指南在指导工程“全生命周期”安全管理方面的可持续性。

七、标准主要内容

《土石堤坝渗漏分析与防控技术指南》是一部针对土石堤坝渗漏问题的综合性技术指南。其核心目标是建立一个从理论分析、监测识别到工程防控的完整技术体系，以提升堤坝渗漏风险的精准管控能力。

指南主要内容可分为以下三个核心部分：

1. 土石堤坝渗漏分析技术要求

- ① 对堤坝土体内部颗粒粒径分布划分进行规定；
- ② 对堤坝土体内部稳定性准确判别标准进行规定；
- ③ 对堤坝渗流侵蚀宏细观过程分析技术要求进行规定；
- ④ 对堤坝防渗墙混凝土裂缝-渗流试验装置技术参数进行规定；
- ⑤ 对堤坝防渗体渗流特性演化机理分析技术要求进行规定。

2. 土石堤坝运行期渗漏监测识别技术要求

- ① 对堤坝渗漏通道识别分布式监测装置技术参数进行规定；
- ② 对堤坝渗流侵蚀过程中典型特征参量联合监测技术要求进行规定；
- ③ 对堤坝内刚-柔结构特性精细化分析模型技术参数进行规定；
- ④ 对堤坝渗漏识别多场耦合分析软件技术参数进行规定；
- ⑤ 对堤坝渗漏量计算分析技术要求进行规定。

3. 土石堤坝渗漏防控技术要求

- ① 对堤坝地基渗流控制原则与控制标准进行规定；
- ② 对堤坝嵌岩混凝土造槽施工和防渗墙二次成墙技术参数与施工要求进行规定；
- ③ 对堤坝渗控效果综合评价技术标准进行规定。

八、与有关法律法规和强制性标准的关系

遵守和符合相关法律法规和强制性标准要求。以下标准规范供本指南编制过程中参考和引用：

- (一) GB/T 50487 《水利水电工程地质勘察规范》 地质勘察原则；
- (二) GB/T 50286 《堤防工程设计规范》 堤防工程设计要求；
- (三) SL/T 188 《堤防工程地质勘察规程》 堤防工程地质勘察要求；
- (四) SL/T 551 《土石坝安全监测技术规范》 堤防渗流监测要求；
- (五) T/CWEA 24 《小型水库大坝渗漏处理技术导则》 小型水库渗漏处理措施；
- (六) T/CI 1031 《堤防防渗工程施工技术规程》 堤防防渗工程施工要求。

九、重大意见分歧的处理依据和结果

本指南在制定过程中没有出现重大意见分歧

十、后续贯彻措施

1. 本指南适用于新建或加固的土石堤坝工程，包括不同堤坝高及不同用途的工程。
2. 待本指南发布后实施前，将面向指南的各相关方开展指南宣贯工作。
3. 建议该指南自发布之日起24个月内开始实施。

十一、涉及专利的有关说明

无

标准编制小组

2025年11月