

团 体 标 准

T/CHI XX-202X

土石堤坝渗漏分析与防控技术指南

Technical guide for leakage analysis and prevention and control of earth-rock dams

(征求意见稿)

提交反馈意见时，请将您知道的专利连同支持性文件一并附上。

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国高技术产业发展促进会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 土石堤坝渗漏分析技术要求	3
4.1 堤坝土体内部颗粒粒径分布划分	3
4.2 堤坝土体内部稳定性准确判别标准	3
4.3 堤坝渗流侵蚀宏细观过程分析技术要求	4
4.4 堤坝防渗墙混凝土裂缝-渗流试验装置技术参数	4
4.5 堤坝防渗体渗流特性演化机理分析技术要求	8
5 土石堤坝运行期渗漏监测识别技术要求	11
5.1 堤坝渗漏通道识别分布式监测装置技术参数	11
5.2 堤坝渗流侵蚀典型特征参量联合监测技术要求	11
5.3 堤坝内刚-柔结构特性精细化分析模型技术参数	12
5.4 堤坝渗漏识别多场耦合分析软件技术参数	13
5.5 堤坝渗漏量计算分析技术要求	13
6 土石堤坝渗漏防控技术要求	14
6.1 堤坝地基渗流控制原则与控制标准	14
6.2 堤坝嵌岩混凝土造槽施工和小直径深层搅拌防渗墙二次成墙技术参数与施工要求	16
6.3 堤坝渗控效果综合评价技术标准	16

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江西省水利科学院提出。

本文件由中国高技术产业发展促进会归口。

本文件起草单位：江西省水利科学院、河海大学、大连理工大学、西安理工大学、南京水利科学研究院、东南大学、西藏农牧大学、江西省水利水电建设集团有限公司。

本文件主要起草人：刘智、甘磊、刘俊、任杰、熊磊、马福恒、王培清、郭洪有、李子阳、罗桑、徐刚、孙一清、宗永臣、张存、宋新伟、叶文斌、陈敬玮、刘享华、吴子涵、张宏伟、周清勇、王萱子、南胜豪、康捷。

征求意见

土石堤坝渗漏分析与防控技术指南

1 范围

本文件给出了土石堤坝渗漏分析技术要求、土石堤坝运行期渗漏监测识别技术要求、土石堤坝渗漏防控技术要求等。

本文件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 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50487 《水利水电工程地质勘察规范》 地质勘察原则。

GB/T 50286 《堤防工程设计规范》 堤防工程设计要求。

SL/T 188 《堤防工程地质勘察规程》 堤防工程地质勘察要求。

SL/T 551 《土石坝安全监测技术规范》 堤防渗流监测要求。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

土石堤坝 earth-rock dam

由土料、石料或土石混合料填筑而成的挡水建筑物，包括均质坝、心墙坝、斜墙坝等多种型式。

3.2

渗漏 leakage

水体在土石堤坝及其地基中由于水力梯度作用发生的流动现象。

3.3

渗透破坏 seepage failure

土体在渗流作用下发生结构失稳的现象，包括管涌、流土、接触冲刷等类型。

3.4

管涌 piping

土体中细颗粒在渗流作用下被带走，形成连续通道的渗透破坏形式。

3.5

流土 soil flow

土体在渗流作用下整体浮动或流失的渗透破坏形式。

3.6

临界水力梯度 critical hydraulic gradient
土体发生渗透破坏时的最小水力梯度值。

3.7

可动颗粒 movable particles
粒径小于土体骨架平均孔隙直径的细颗粒，在渗流作用下易于发生迁移。

3.8

阻塞颗粒 blocking particles
粒径大于等于土体骨架平均孔隙直径但小于 2.0 mm 的细颗粒，在渗流中可能阻塞孔隙或参与形成稳定结构。

3.9

不均匀系数 coefficient of uniformity (C_u)
土体颗粒级配曲线上 d_{60} 与 d_{10} 的比值，用于评价土体的级配均匀性。

3.10

质量分形维数 mass fractal dimension
用于定量描述土体颗粒级配分布复杂性的参数，与土体的渗透稳定性相关。

3.11

CFD-DEM

计算流体力学与离散元耦合方法 (Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method)，用于模拟土-水相互作用的宏细观过程。

3.12

防渗墙 cutoff wall
位于堤坝体或地基中的垂直防渗结构，用于截断或延长渗流路径。

3.13

渗流量 seepage discharge
单位时间内通过某一断面的渗流体积。

3.14

分布式光纤监测 distributed optical fiber monitoring
利用光纤传感技术对堤坝渗流场进行连续、空间分布的监测方法。

3.15

悬挂式防渗 suspended cutoff
防渗体未嵌入相对不透水层，仅靠延长渗径以减小水力梯度和渗流量的防渗形式。

3.16

全封闭式防渗 full-cutoff seepage control

防渗体穿透所有透水层并嵌入下伏相对不透水层或基岩的防渗形式。

3.17

半封闭式防渗 semi-cutoff seepage control

防渗体部分嵌入相对弱透水层，与该层共同组成防渗体系的防渗形式。

3.18

渗透坡降 seepage gradient

单位渗流路径上的水头损失，是评价渗流稳定性的关键指标。

3.19

CF 值 certainty factor

确定性因子，用于量化某一指标状态对渗流险情发生的确信程度，取值范围为-1.0 至 1.0。

4 土石堤坝渗漏分析技术要求**4.1 堤坝土体内部颗粒粒径分布划分**

4.1.1 土体颗粒应按其粒径大小分为粗颗粒和细颗粒两大类，分界粒径宜取为 2.0 mm。细颗粒应进一步划分为可动颗粒和阻塞颗粒。

4.1.2 可动颗粒与阻塞颗粒的划分应以土体骨架的平均孔隙直径 D_0 为基准。 D_0 应按下列公式计算：

$$D_0 = 0.63nd_{20} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

D_0 为土体骨架平均孔隙直径 (mm)；

n 为土体孔隙率；

d_{20} 为土体颗粒级配曲线上累计含量为 20% 所对应的粒径 (mm)。

4.1.3 粒径小于 D_0 的细颗粒划分为可动颗粒，粒径大于等于 D_0 但小于 2.0 mm 的细颗粒划分为阻塞颗粒。

4.1.4 颗粒粒径分布的划分结果应通过土体孔隙结构分析和渗流试验予以验证，宜采用 CT 扫描、核磁共振等图像分析技术，辅助确定孔隙结构与颗粒分布。

4.1.5 划分结果应记录于土体颗粒分类报告中，包括颗粒级配曲线、孔隙率测定值、可动颗粒含量 (%) 和阻塞颗粒含量 (%)。

4.2 堤坝土体内部稳定性准确判别标准

4.2.1 土体内部稳定性判别应综合考虑几何条件与水力条件。

4.2.2 几何条件按下列规定：

a) 细颗粒 (如 < 2 mm) 含量 P 低于 25% 易发生管涌，高于 35% 易发生流土， $25\% \leq P \leq 35\%$ 为过渡型；

b) 不均匀系数 $Cu \leq 10$ 为流土型， $10 < Cu < 20$ 为过渡型， $Cu \geq 20$ 为管涌型；

c) 土体可动颗粒含量超过细颗粒总量的 50% 易发生管涌。

4.2.3 水力条件判别应通过渗流试验确定临界水力梯度 icr ，当实际水力梯度大于 icr 时，土体发生渗透破坏。

- 4.2.4 可通过质量分形维数 D 定量表征土体级配特征， D 值与 icr 呈反比关系。
- 4.2.5 应考虑颗粒形状对稳定性的影响。球形颗粒易形成连通孔隙，稳定性较差；棱角颗粒易形成稳定阻塞，稳定性较高。
- 4.2.6 对于重要工程，宜结合渗流测试手段判别土体内部稳定性。
- 4.2.7 判别结果应形成稳定性评估报告，包括判别方法、试验数据、模拟结果及结论建议。

4.3 堤坝渗流侵蚀宏细观过程分析技术要求

- 4.3.1 渗流侵蚀宏细观分析应采用物理模型试验和耦合计算流体力学与离散元（CFD-DEM）的方法，建立土-水耦合数值模型。
- 4.3.2 物理模型试验遵循以下试验步骤：
 - a) 按设计密度制备重塑试样或采用原状试样，安装试样于渗透仪中，进行饱和处理；
 - b) 施加初始水头，待渗流稳定后记录流量；
 - c) 逐级提高水头，每级稳定时间不少于 30 min，记录每级水头下的渗流量和试样变化；
 - d) 观测颗粒流失情况，收集流失物；
- 4.3.3 临界水力梯度按以下方法确定：
 - a) 绘制渗流速度与水力梯度关系曲线；
 - b) 取曲线拐点对应水力梯度为临界值；
 - c) 同时记录试样破坏时的水力梯度。
- 4.3.4 数值模型应能模拟细颗粒在渗流作用下的启动、迁移、流失及堵塞过程，并输出以下参数：
 - a) 细颗粒流失量与流失速率；
 - b) 局部孔隙率与渗透系数变化；
 - c) 力链演化与接触力分布；
 - d) 局部水力梯度与流速分布。
- 4.3.5 分析时应考虑颗粒形状、颗粒级配、密实度、水力梯度等因素的影响，并设置合理的边界条件和初始条件。
- 4.3.6 数值模拟结果应与室内试验或现场监测数据对比验证，误差应控制在 15% 以内。
- 4.3.7 应通过后处理软件可视化颗粒迁移路径、孔隙结构演变及侵蚀区域分布，并输出宏细观机理分析报告。
- 4.3.8 分析报告应包括模型参数、模拟过程、结果对比及工程建议。

4.4 堤坝防渗墙混凝土裂缝-渗流试验装置技术参数

- 4.4.1 术语如下：
 - a) 裂缝-渗流试验装置：用于对含裂缝混凝土试件进行水力劈裂或渗透性测试的专用设备系统。
 - b) 裂缝宽度控制精度：加载系统对预设裂缝宽度的实现准确度，通常以“ $\pm\%F.S.$ ”（满量程百分比）或“ $\pm\mu\text{m}$ ”表示。
 - c) 渗流量：单位时间内通过混凝土裂缝的水体体积。
 - d) 渗流速率：渗流量与过水断面的比值。
- 4.4.2 工作流程应遵循以下步骤：将预制裂缝或即将开裂的混凝土试件安装于舱内并密封 → 通过加载系统对试件施加荷载使其裂缝扩展至预定宽度 → 供水系统对试件上游面施加恒定水压 → 水通过裂缝渗流至下游 → 量测系统实时监测并记录裂缝宽度(w)、水压力(p)、渗流量(Q)等参数 → 分析渗流量与裂缝宽度、水压之间的关系
- 4.4.3 混凝土裂缝-渗流试验系统组成应符合表 4.4.1 的规定。

表 4.4.1 混凝土裂缝渗流试验系统组成与技术要求

系统名称	主要组成	主要功能
试验舱体	舱体结构、密封装置、试件安装夹具等	安装并密封混凝土试件，为渗流试验提供承压空间
机械加载系统	伺服电机驱动作动器或液压作动器、控制器	对舱内试件施加轴向拉/压应力，诱导裂缝产生或精确控制裂缝宽度
渗流供水系统	水箱、水泵、压力容器、稳压阀、精密调压阀、流量计等	为试验提供恒定压力的水流，模拟水在裂缝中的渗流过程
量测系统	裂缝宽度传感器(千分表、CCD 图像传感器等)、水压力传感器、流量传感器(精密电子天平、	实时监测并采集裂缝宽度、渗流水的压力与流量等参数
数据采集与控制系统	工业控制计算机、专用测控软件	控制载荷、裂缝宽度及水压等试验参数；实时自动采集、存储并处理所有

4.4.4 技术要求：装置的技术要求应符合表 4.4.2 至表 4.4.6 的规定。

表 4.4.2 试验舱体技术要求

序号	技术参数	技术要求	备注
1	设计耐压压力	应不低于装置最大设计工作水压的 1.5 倍，且不发生永久性变形或损坏。	安全冗余
2	密封性能	在最大设计工作水压下持续稳压 2h，压力降应不大于初始值的 5%，且所有密封面无可见泄漏。	保证试验边界条件
3	内部有效空间	应能容纳标准混凝土试件（推荐尺寸：150mm×150mm×550mm 或 Φ 150mm×300mm），并留有足够的密封和安装空间。	兼容性要求
4	材质	接触水的部件应采用耐腐蚀材料（如 06Cr19Ni10 不锈钢），并具有足够的刚度和强度。	防腐与耐久性
5	观察窗	可选配。若配备，其透明材料应能承受最大工作压力，且透光性好，便于观察内部流态或气泡。	可视化和教学需求

表 4.4.3 加载系统技术要求

序号	技术参数	技术要求	备注
1	最大加载能力	$\geq 100 \text{ kN}$ （或根据试件尺寸和混凝土强度设定）	应能模拟实际应力水平
2	载荷（应力）控制精度	$\leq \pm 1.0\% \text{ F.S.}$ （满量程）	保证加载准确性
3	裂缝宽度控制范围	$0.01 \text{ mm} \sim 5.00 \text{ mm}$	覆盖从微裂缝到宏观裂缝的典型范围
4	裂缝宽度控制精度	$\leq \pm 0.005 \text{ mm}$ 或 $\leq \pm 2.0\% \text{ R.D.}$ （取绝对值大者）	核心指标，直接影响渗流量测量准确性
5	位移控制速率范围	$0.0001 \text{ mm/s} \sim 0.1 \text{ mm/s}$ ，多档可调	满足不同加载场景需求

表 4.4.4 渗流供水系统技术要求

序号	技术参数	技术要求	备注
1	最大工作水压	$\geq 2.0 \text{ MPa}$ （可根据研究需求，如模拟高坝深水头，设定更高值）	覆盖工程常见水头范围
2	水压控制精度	$\leq \pm 1.0\% \text{ F.S.}$	保证上游水压的稳定性
3	压力波动度	$\leq \pm 0.5\% \text{ F.S.}$	防止压力波动对渗流测量的干扰
4	水质要求	宜使用脱气清水，水中悬浮物粒径不宜大于 $50\mu\text{m}$ ，以避免堵塞裂缝或测量管路。	保证试验介质纯净，减少误差来源
5	水源稳定性	应配备足够容积的恒温水箱（可选），以保持水温恒定，避免温度变化影响水流粘滞性。	提高试验结果的重复性和可比性

表 4.4.5 量测系统技术要求

序号	测量对象	技术参数	技术要求	备注
1	水压力	量程	覆盖最大工作水压的 $1.2 \sim 1.5$ 倍	过载保护

表 4.4.5 (续)

		精度	$\leq \pm 0.5\% \text{ F. S.}$	核心测量参数
2	渗流量	量程与分辨率	应兼容微小流量 (0.01 mL/min) 至较大流量 (如 1000 mL/min) 的精确测量	推荐使用精密电子天平或高精度流量计
		精度	$\leq \pm 1.0\% \text{ R. D.}$ (读数) 对于微小流量段, 可允许更高的相对误差 (如 $\pm 5\% \text{ R. D.}$)	
3	裂缝宽度	测量范围	覆盖 0 ~ 5.00 mm	核心测量参数
		分辨率	$\leq 0.001 \text{ mm}$	
		精度	应符合本标准 5.2.4 条的规定	
4	数据采集仪	采样频率	所有通道同步采集, 最高采样频率不低于 1 Hz	满足准静态渗流试验需求
5		A/D 转换位数	$\geq 16 \text{ bit}$	保证信号转换的精确度
		通道间隔离度	$\geq 100 \text{ dB}$	

表 4.4.6 数据采集与控制系统技术要求

序号	技术参数	技术要求	备注
1	控制功能	软件应能实现对载荷、裂缝宽度、水压三者中至少一个参数的自动闭环控制, 并支持恒值、斜坡、阶梯等多种控制模式。	自动化与智能化水平
2	数据同步性	所有传感器通道的数据应实现高精度同步采集和存储, 时滞应小于 10ms。	保证数据关联准确性
3	用户界面	应提供图形化人机交互界面, 可实时显示参数设定值、测量值曲线、设备状态等。	易用性
4	数据导出	应能以通用格式 (如 .txt, .csv, .xlsx) 导出原始数据和过程数据, 便于后续离线分析。	数据交互与处理便利性

表 4.4.6 (续)

5	安全保护	应设置参数超限(如压力、载荷过高)、设备异常等情况的自动报警和紧急停机功能。	设备与人员安全
---	------	--	---------

4.4.5 试验开始前,应检查混凝土试件尺寸及预制裂缝形态是否符合试验设计要求,并记录试件编号、配合比、龄期等信息。

4.4.6 应采用柔性密封材料(如高分子密封胶、橡胶止水带)对试件与试验舱体接触的界面进行密封。密封操作应符合以下要求:

a) 密封材料应涂抹均匀、连续,无断点;

b) 应将试件紧密地固定于舱体基座上,确保密封材料被充分压实($\leq 2.0\text{MPa}$)。

4.4.7 试件安装就位后,应进行空载密封性检验:向舱体内施加不低于最大设计工作水压 1.2 倍的静水压力,并维持 30min。压力降应不大于初始值的 5%,且舱体外壁及所有连接接口无任何渗漏现象。检验合格进行后续试验。

4.4.8 施加应根据试验方案,通过控制系统设定目标裂缝宽度或目标荷载值。启动加载系统,应采用位移控制模式,以规定的速率(宜不大于 0.002mm/s)缓慢施加荷载,直至裂缝扩展至目标宽度。当裂缝宽度达到目标值后,加载系统应自动转换为宽度控制模式,并在整个渗流试验过程中维持该裂缝宽度恒定,其波动幅度应符合本标准规定。每次调整裂缝宽度后,宜稳压 10 min ~ 15 min,待系统状态稳定后再进行渗流观测。

4.4.9 确认裂缝宽度稳定后,启动恒压供水系统。施加水压应遵循“逐级加载”原则,每级水压差应为 $0.1\text{MPa} \sim 0.2\text{MPa}$ 。每施加一级水压,应等待至少 15 min 或直至出水口流量达到稳定状态(连续 5 min 内流量变化率小于 5%),方可开始记录数据。对于同一裂缝宽度,宜进行至少两次重复性渗流试验,以验证数据的可靠性。

4.4.10 应采用自动数据采集系统连续记录所有传感器的读数,原始数据应可导出为通用格式(如*.xlsx)用于分析。

4.5 堤坝防渗体渗流特性演化机理分析技术要求

4.5.1 分析工作应坚持宏观与微观相结合、室内与现场相结合、监测与模拟相结合的原则。分析流程规定如下:问题定义 → 数据获取(试验/监测) → 多尺度数据分析 → 机理假设与建模 → 模型验证与修正 → 结论与应用。

4.5.2 试验方案设计应明确试验目的,确定主导因素(水压力、围压、水力梯度、化学环境等),设计单因素或多因素耦合试验路径。

4.5.3 试件制备应采用人工劈裂制样法,劈裂制样设备应符合表 4.5.1 的规定。

表 4.5.1 人工劈裂制样设备与材料要求

项目	设备与材料名称	主要技术要求与参数
1	万能试验机	精度等级:不低于 1 级; 功能:应能控制加载速率,推荐加载速率控制范围: $0.05\text{mm/min} \sim 0.5\text{mm/min}$ 。

表 4.5.1 (续)

2	垫条	截面形状：圆形； 直径：2 mm； 长度：应大于混凝土试件高度。
3	粘接剂	类型：宜采用快速固化型粘接剂（例如：氰基丙烯酸酯类）； 固化时间：初固时间 ≤ 30 s。
4	划线工具	用途：用于在试件表面预先标定劈裂位置线； 要求：标记清晰、精确。

4.5.4 劈裂步骤应符合表 4.5.2 技术要求。

表 4.5.2 人工劈裂制样步骤与技术要求

步骤名称	核心操作与技术要求
试样准备	在圆柱体试样的侧面，沿其轴线方向划出两条平行的加载线。
	将垫条均匀粘贴于两条加载线上，确保垫条与试样表面紧密接触；待粘接剂完全固化后，方可进行后续操作。
试样安装	将粘贴好垫条的试样水平放置于万能试验机下承压板中心。
	调整试样位置，确保： <ol style="list-style-type: none"> 1. 试样轴线与万能试验机中心线重合； 2. 由两根垫条构成的中轴面与承压板垂直； 3. 荷载沿预定劈裂面均匀施加，避免偏心。
加载劈裂	调整万能试验机上承压板，使其与试样上侧垫条恰好接触。
	采用位移控制或力控制模式加载，加载速率宜控制在 0.04 MPa/s ~ 0.06 MPa/s（以劈裂应力计），直至试样劈裂。
	劈裂完成后，应缓慢卸载，取出被劈裂的两半试样。

4.5.5 劈裂面筛选应采用三维扫描仪或其他等效设备获取劈裂面的表面形貌点云数据，并利用数据处理软件计算其粗糙度参数。应根据试验设计需求，选取具有不同粗糙度特征的劈裂面作为制作裂缝试样的母本。

4.5.6 数控雕刻复刻应符合表 3.5.3 的规定

表 4.5.3 数控雕刻复刻法设备、软件与步骤要求

类别	项目	技术要求与操作要点
设备与软件	数控雕刻机	加工精度：应不低于 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。
	三维扫描系统	用于获取母本裂缝面的三维点云数据。
	数据处理软件	应具备点云处理、三维模型重构及生成加工代码（如 G 代码）的功能。
	精加工设备	钻孔取芯机、切割机、磨石机等，用于试样后续精加工。
复刻步骤	数字模型重构	<p>a) 应将母本劈裂面的点云数据，经去噪、封装等处理，生成可用于加工的三维数字模型（如 STL 格式文件）。</p> <p>b) 应将三维模型导入雕刻机控制软件，设定加工路径、雕刻深度、运行速度等参数，生成加工代码。</p>
	试件雕刻	<p>a) 应将立方体混凝土试块牢固固定于雕刻机工作台。</p> <p>b) 应执行加工代码，在试块表面雕刻出与母本形态一致的裂缝面。</p>
	配对试样制备	<p>a) 应采用相同数字模型，在另一试块上雕刻出能与之配对的裂缝面。</p> <p>b) 雕刻完成后，宜采用钻孔取芯法从雕刻试块上获取含有所复制裂缝面的圆柱体或棱柱体试样。</p> <p>c) 应对试样进行切割、打磨等精加工，确保其尺寸精度和端面平整度符合试验要求。</p>

4.5.7 渗流-应力耦合试验规定试验过程中应连续、同步监测的参数：轴向/径向变形、体积变化、进水压力、出水压力、渗流量等。

4.5.8 微观结构观测：试验前后，宜采用扫描电镜(SEM)、CT 三维成像等技术观测试件微观结构（孔隙、裂纹、颗粒排列）的变化，并与宏观渗流数据关联。

4.5.9 原位监测应利用埋设的渗压计、量水堰、变形测斜仪等设备，长期采集防渗体内部的渗流场和应力变形场数据，识别异常变化趋势，渗流场反演分析应基于监测数据，采用算法反演推求防渗体渗透系数场的空间分布及其随时间的变化。

4.5.10 数据分析与机理建模技术要求应对试验和监测数据进行预处理，将多源、多尺度数据融合到统一的分析框架下。

4.5.11 应建立微观结构参数与宏观渗透系数之间的定量或定性关系，解释宏观现象的微观成因。

4.5.12 应根据主导机理选择或建立合适的本构模型。模型参数应通过试验数据拟合或反演分析确定。必须使用未参与参数拟合的另一组独立试验或监测数据对模型进行验证，评估其预测精度和可靠性。

5 土石堤坝运行期渗漏监测识别技术要求

5.1 堤坝渗漏通道识别分布式监测装置技术参数

- 5.1.1 分布式监测装置可采用光缆，传感光缆应采用单模或多模光纤。光缆应采用钢带、钢丝铠装或非金属增强材料并附加防啮齿层结构，内部填充水阻材料以增强防护，确保在监测环境中的长期稳定性。
- 5.1.2 光缆的机械性能应满足：短期拉伸强度不小于 1500N，长期拉伸强度不小于 600N；抗侧压能力不低于 1000N/100mm；最小弯曲半径静态不小于光缆外径的 10 倍，动态不小于光缆外径的 20 倍，以防止敷设和运行中的光纤损伤。
- 5.1.3 为降低连接点信号损耗，光纤接续须采用熔接方式，单个接续点的损耗应控制在 0.10dB 以下。
- 5.1.4 加热电缆或光缆的线功率密度应可调，调节范围宜为 3W/m~12W/m。同一加热回路内，其功率均匀性偏差应控制在 $\pm 10\%$ 以内；对于因回路长度差异导致的功率偏差，系统应具备相应补偿功能，用于消除因回路长度差异导致的加热不均。
- 5.1.5 系统应支持恒功率与脉冲两种加热模式，以适应不同监测场景，加热及冷却周期应可编程设置；建议单次加热时长为 10min~30min，冷却时长为 60min~180min。系统温控精度应不低于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，加热功率设定的分辨率应不大于 0.5W/m。
- 5.1.6 为保证测量准确性，温度测量系统需在不少于 3 个温度点进行标定。对于主动加热式监测系统，应进行控温电缆的阶跃加热或热脉冲测试，以验证其最小可识别温升、空间定位精度及单位长度加热能耗是否符合要求。
- 5.1.7 传感光缆敷设时应严格遵守最小弯曲半径及最大允许牵引力的限制，埋设深度与沟槽回填材料级配应符合设计要求，所有接头盒及光缆分纤点应可靠固定并满足密封防护要求。
- 5.1.8 光缆布设路径应优先选择堤坝轴线、迎水坡趾部、背水坡脚、排水渗沟周边以及地质薄弱区段等关键位置；必要时宜采用多线并行与环回冗余布设方式以提高监测可靠性。
- 5.1.9 实施主动加热监测时，应确保保温光纤与加热体保持持续紧密的热耦合状态；若非同缆布设，则应采用绑扎等方式固定，且间距不得超过 0.5 米。汛期可适当加密加热周期，高温季节则应合理降低加热功率或延长冷却时间，以兼顾监测需求与系统安全。

5.2 堤坝渗流侵蚀典型特征参量联合监测技术要求

- 5.2.1 驱动参量应包括上游水位与下游水位，测量精度不宜低于 $\pm 0.01\text{m}$ ，采样间隔宜为 1min~5min；堤身前后的水头差应根据水位值计算得出，精度不宜低于 $\pm 0.02\text{m}$ ，采样频率与水位同步。
- 5.2.2 过程参量宜包括孔隙水压力，传感器精度应不低于量程的 $\pm 0.5\%$ ，采样间隔宜为 10s~60s；分布式温度参量在被动测温模式下精度不宜低于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，主动加热模式下不宜低于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，采样间隔宜为 1min~5min。
- 5.2.3 结果参量主要为渗流量，测量精度应不低于 $\pm 5\%$ ，采样间隔宜为 1min~5min。
- 5.2.4 核心监测参量应至少按最小配置方案实施，包括沿堤坝轴线或迎水坡趾部布设 1 条分布式光缆；沿典型监测断面布设 2~3 个孔隙水压力计，宜成对布置以捕捉垂向水力梯度；并应在排水体、渗沟出口等关键位置设置渗流量监测点。
- 5.2.5 对涵洞、土体与结构接触面、历史险工段、地层非均质显著等高风险区段，应加密监测断面布设，并考虑传感回路冗余设计。
- 5.2.6 分布式光缆在堤轴线或坝基区埋深宜为 1.5 m~3.0 m，坡面区域宜为 0.8 m~1.5 m；其最小弯曲半径与链路预算应符合光缆相关规范。
- 5.2.7 孔隙水压力计在高风险区段布设间距不宜大于 20 m，一般区段不宜大于 50 m，安装时须采用反滤砂包或注浆密封防止渗流短路。

- 5.2.8 渗流量监测装置宜每 300 m~500 m 设置 1 套，并应具备自清洗与防堵塞功能。
- 5.2.9 监测系统应具备数据自动预处理能力，包括异常值识别与处理、噪声滤波以及多源数据的时间对齐，以保障数据质量。
- 5.2.10 应基于监测数据特征选取适宜的异常识别算法，可采用基于统计控制、时序分析或机器学习的模型，实现渗流异常迹象的自动识别。
- 5.2.11 预警阈值应依据设计值、历史数据或模型分析进行设定，并可根据运行状况动态优化。预警等级应至少划分为三级：
- 蓝色预警（关注级）：参量出现轻微异常。
 - 黄色预警（警示级）：关键参量持续偏离正常范围。
 - 红色预警（行动级）：多参量出现显著协同异常，指示潜在风险。
- 5.2.12 系统应能自动生成包含预警等级、位置、参量等信息的预警报告，并通过声光、短信或应用平台等多渠道及时发布。

5.3 堤坝内刚-柔结构特性精细化分析模型技术参数

- 5.3.1 堤坝内刚-柔结构材料的质量技术要求应符合表 1 的规定：

表 5.3.1 堤坝内刚-柔结构材料技术指标

结构类型	参数名称	技术指标	试验方法
刚性结构（混凝土）	弹性模量	20-40 GPa	GB/T 50081
	泊松比	0.15 - 0.2	GB/T 50081
	密度	2.2-2.6 t/m ³	ASTM C138/C138M-23
	抗压强度	20-60 MPa	GB/T 50081
	抗拉强度	1.5-3.5 MPa	GB/T 50081
柔性结构（软土地基）	软土密度	1.5-1.9 g/cm ³	SL 237
	地基反力系数	10-50 MN/m ³	JGJ 120-2012
	地基剪切模量	5-20 MPa	JGJ 120-2012
柔性结构（一般黏性土地基）	黏土密度	1.6-2.0 g/cm ³	SL 237
	地基反力系数	30-100 MN/m ³	JGJ 120-2012
	地基剪切模量	10-30 MPa	JGJ 120-2012
柔性结构（砂土地基）	砂土密度	1.9-2.2 g/cm ³	SL 237
	地基反力系数	80-200 MN/m ³	JGJ 120-2012
	地基剪切模量	20-50 MPa	JGJ 120-2012

- 5.3.2 采用二维高阶谱单元对模型的几何参考面进行离散，单元阶数应不小于 4 阶，以提高计算精度和效率，准确模拟堤坝内刚-柔结构的力学行为。
- 5.3.3 在刚性结构与柔性结构的接触区域、应力集中区域，网格需进行加密处理，单元尺寸应不大于结构最小特征尺寸的 1/2，且单元的各边长度比应控制在 1:5 以内。
- 5.3.4 通过逐步细化网格（如将单元尺寸减半、提高单元阶数）进行计算，对比不同网格密度下的计算结果。当相邻两次计算结果的相对误差小于 0.1% 时，认为网格达到收敛要求，所采用的网格划分方案可用于实际分析。
- 5.3.5 将收敛结果与解析解、参考文献或商业软件得到的结果进行对比，相对误差小于 1% 时，认为精度满足要求。
- 5.3.6 在满足计算精度的前提下，尽量采用较低的单元阶数和较大的单元尺寸。模型计算耗时小于网格单元数量与单元阶数乘积的 1/50 时，认为计算效率较高。

5.4 堤坝渗漏识别多场耦合分析软件技术参数

- 5.4.1 软件能准确模拟渗透系数在 1×10^{-8} – 1×10^{-1} cm/s 范围内土体的渗流过程。
- 5.4.2 可计算土体应力范围为 0–5 MPa，混凝土等刚性结构应力范围为 0–30 MPa。
- 5.4.3 可模拟 -20°C–60°C 温度区间内的变化。
- 5.4.4 支持常见数据格式（如 CSV、TXT、GIS 格式）的快速导入，100MB 数据文件导入时间不超过 1 分钟。
- 5.4.5 常规操作（如模型加载、参数设置）响应时间不超过 2 秒，复杂操作（如三维模型渲染）响应时间不超过 5 秒。
- 5.4.6 能以多种形式（如等值线图、云图、流线图、三维动态演示）直观展示分析结果，图形显示分辨率不低于 1920×1080 ，色彩过渡自然，无明显失真。
- 5.4.7 支持与堤坝监测系统的数据实时对接，数据传输延迟不超过 1 秒，数据准确率不低于 99%。
- 5.4.8 软件内置的监测数据异常识别算法需通过不少于 50 组实际工程案例或模拟数据验证，准确率达 85% 以上方可使用。
- 5.4.9 软件支持预警阈值设定，需综合工程参数、历史数据、地质水文等因素，以 95% 置信区间为参考，结合专家经验调整；阈值更新周期不超过 1 年，工程条件变化时即时重估。
- 5.4.10 软件设蓝、黄、橙、红四级预警。蓝色为数据超正常波动，加强监测；黄色示渗漏趋势明显，现场巡查；橙色指渗漏严重，启动应急预案；红色代表重大风险，立即抢险，各等级明确响应流程与处置措施。

5.5 堤坝渗漏量计算分析技术要求

- 5.5.1 计算工作应遵循“多种方法相互验证、计算结果合理可靠”的原则。应根据工程阶段（设计、校核、安全鉴定）和资料完备程度选择适宜的计算方法。
- 5.5.2 渗漏量计算分析宜按照流程实施，主要包括：任务确定、资料收集、方法选择与模型建立、参数确定、计算分析、成果校核与报告编制。
- 5.5.3 资料收集应包括下列内容：
 - a) 工程地质与水文地质资料，包括坝址区地层分布、岩性、地质构造、渗透系数建议值及地下水水位等；
 - b) 坝体结构与材料参数，包括坝体各分区材料的渗透系数、防渗体尺寸与性质、排水设施规格等；
 - c) 渗压计、量水堰、测压管等监测设施的历年监测数据，以及探地雷达、渗流热监测等检测成果；
 - d) 水文气象资料，包括库水位、下游水位、降雨量等时间序列数据。
- 5.5.4 计算模型应合理反映工程实际地质条件、坝体结构与边界条件，并应按照本标准要求完成计算，获得收敛、合理的渗流场水头分布成果。
- 5.5.5 渗漏量计算可采用数值积分方法，通过定义计算断面（或曲面），基于有限元计算的节点水头结果，按相应公式计算通过该面的渗流量。计算程序应经过验证，确保结果正确。
- 5.5.6 计算成果应包括特定工况下的总渗漏量、各主要渗流路径分流量、浸润线位置及水力坡降等，并宜分析渗漏量对关键参数（如渗透系数、边界水位等）的敏感性，识别影响计算结果的关键因素。
- 5.5.7 应采用另一种独立的方法（如数值法与解析法对比）或不同软件对主要结论进行交叉验证，对计算成果的不确定性进行定性或定量论述。
- 5.5.8 进行不确定性分析应识别并分类计算中的主要不确定性来源，主要包括：参数不确定性、模型不确定性和数据不确定性等，应根据分析目的和资源条件，选择以敏感性分析、参数反演分析等方法进行不确定性分析。
- 5.5.9 报告应全面、清晰地呈现计算依据、过程、方法和结论，并对计算结果的合理性和可靠性进行充分论证，提出明确结论和建议。

6 土石堤坝渗漏防控技术要求

6.1 堤坝地基渗流控制原则与控制标准

6.1.1 明确本标准中使用的关键术语：

- a) 全封闭式防渗 (Full-cutoff Seepage Control): 指防渗体 (如防渗墙或帷幕) 穿过全部透水地层并嵌入下伏的相对不透水层或基岩 (通常要求嵌入基岩不小于 1.0m) 的防渗形式。其目的是完全截断通过透水地基的渗流路径。
- b) 半封闭式防渗 (Semi-cutoff Seepage Control): 指防渗体未完全穿透所有透水地层, 但其底部嵌入地基中某一厚度较大、渗透性较低的相对弱透水层 (通常要求深入该层顶面以下不小于 5m), 与该弱透水层共同组成防渗体系的防渗形式。
- c) 悬挂式防渗 (Suspended Cutoff / Hang-up Cutoff): 指防渗体的底部未嵌入相对不透水层, 其上下端均位于透水层中的防渗形式。该形式不能完全截断渗流, 仅靠延长渗径来降低渗透坡降和减少渗流量。
- d) 渗透坡降 (Seepage Gradient): 渗流在土体或防渗体中流动时, 单位长度上的水头损失。是评价渗流稳定性的关键指标, 其值不得超过相应土体或材料的允许渗透坡降。
- e) 渗流量控制 (Seepage Flow Control): 通过防渗工程措施, 将坝基或坝体的渗漏水量限制在允许范围内。对于悬挂式防渗等形式, 常以渗流量不超过工程所在河道多年平均流量的某一百分比 (如 1%) 作为控制标准。
- f) CF 值 (Certainty Factor): 确定性因子。用于量化某个评价指标在不同区间 (或类别) 下对堤防险情发生的确信程度。其值介于 -1.0 到 1.0 之间, 正值表示该指标状态对险情发生有贡献, 负值表示该状态不利于险情发生, 绝对值越大表示确信度越高。

6.1.2 渗流控制应遵循安全可靠、经济合理、技术先进、环境友好的原则。

6.1.3 应根据工程地质条件、坝型、坝高、水文条件等因素选择合适的防渗形式。

6.1.4 覆盖层上水工建筑物的坝基渗流控制应根据地质条件、坝型特点和运行要求, 选择适当的防渗形式。防渗结构的设计应充分考虑防渗体与周围结构的变形协调性, 防止因不均匀变形导致防渗体系失效, 在设计过程中, 应对防渗体与坝体、坝基之间的结合部位进行特殊处理, 如设置过渡层、加强锚固等, 确保结合紧密, 避免出现渗漏通道; 同时, 应根据地质条件和结构特点, 合理确定防渗体的刚度和强度, 使其能够适应周围结构的变形, 保证防渗体系的整体性和稳定性。

6.1.5 防渗墙与坝体之间的变形协调性控制应明确如下控制指标:

- a) 差异沉降限值: 防渗墙与相邻坝体土体的差异沉降量应严格控制, 对于高度不大于 50m 的防渗墙, 差异沉降量不得超过防渗墙高度的 0.1%; 对于高度大于 50m 且不大于 100m 的防渗墙, 差异沉降量不得超过防渗墙高度的 0.08%; 对于高度大于 100m 的防渗墙, 差异沉降量不得超过防渗墙高度的 0.05%。该限值需结合工程运行年限动态调整, 运行初期 (1-3 年) 可适当放宽 5%-10%, 运行稳定后 (5 年及以上) 需严格符合上述限值要求。
- b) 水平位移限值: 在正常运行工况下, 防渗墙顶部水平位移不得超过 5mm/年; 在设计洪水工况下, 单次水平位移不得超过 10mm, 且累计水平位移不得超过 20mm。水平位移需重点监测防渗墙与坝体结合部位, 防止因水平位移差异导致结合面开裂。
- c) 裂缝控制限值: 防渗墙与坝体结合部位及防渗墙自身不得出现宽度大于 0.2mm 的裂缝; 若防渗墙采用混凝土材料, 迎水侧裂缝宽度不得超过 0.15mm, 背水侧裂缝宽度不得超过 0.2mm。裂缝监测应采用高精度裂缝观测仪, 定期记录裂缝宽度、长度及发展趋势。

6.1.6 防渗墙与坝体变形协调性验算方法应采用渗流 - 应力 - 变形耦合分析方法, 应当综合考虑以下场变量:

- a) 渗流场变量: 需计算不同运行工况 (正常水位、设计洪水水位、校核洪水水位) 下的孔隙水

压力分布、渗透坡降变化及渗流量变化。孔隙水压力变化会直接影响土体有效应力，进而改变坝体和防渗墙的变形特性，验算时需将孔隙水压力实时纳入应力计算模型。

- b) 应力场变量：重点分析防渗墙与坝体结合部位的接触应力、防渗墙自身的轴力和弯矩分布。接触应力应控制在防渗墙与坝体接触面的允许粘结强度范围内，对于混凝土防渗墙与土石坝体的结合面，允许接触应力不得超过 0.3MPa；防渗墙的轴力和弯矩应满足材料强度要求，混凝土防渗墙的轴心抗压强度设计值应不低于 20MPa，抗折强度设计值应不低于 2.5MPa。
- c) 变形场变量：计算坝体和防渗墙的竖向沉降、水平位移及不均匀沉降差。沉降计算应采用分层总和法结合有限元法，考虑土体的压缩性差异和时间效应（固结沉降）；水平位移计算需考虑坝体侧向土压力及水位变化引起的附加水平力，确保防渗墙在水平力作用下不发生倾覆或滑移。
- d) 环境场变量：对于严寒地区，需考虑温度变化对变形的影响，计算冬季冻胀和春季融沉引起的附加变形；对于地震高发区，需叠加地震荷载作用下的动应力和动变形，验算地震工况下的变形协调性是否满足要求，地震作用按工程所在地的基本地震加速度值确定，重要工程需提高 1 个地震动参数等级进行验算。

6.1.7 覆盖层坝基防渗形式的选择应遵循表 6.1.1 的原则和要求。

表 6.1.1 深厚覆盖层坝基渗流控制原则

防渗形式	适用条件	控制原则与技术要求
全封闭式	覆盖层以下基岩或弱透水层埋深较浅时	以渗透坡降为主控因素，地层渗透坡降和出逸坡降均应小于允许渗透坡降值。防渗墙应嵌入基岩 1.0m，帷幕灌浆布置需考虑坝高： <ul style="list-style-type: none"> • 100m 以上土石坝控制标准为 3Lu~5Lu • 超高土石坝的坝基防渗控制标准应高于规范一般要求
半封闭式 (防渗墙/帷幕与弱透水地层联合防渗)	覆盖层多元地基中存在厚度大、渗透性低的防渗依托层时	将防渗墙(帷幕)深入该地层顶面以下 5m，截断通过上部强透水层的水平渗流。若无法探明防渗依托层厚度分布，应将防渗墙穿透该层以下 5m。必须确保防渗墙底部周围渗透坡降超限区域不具备发生渗透破坏的条件
悬挂式	覆盖层深度大，且不存在可依托的弱透水层时	<ul style="list-style-type: none"> • 优先选用防渗墙 • 保证坝基不发生渗透破坏，允许坡降安全系数取 1.5~2.0 <ul style="list-style-type: none"> • 渗流量一般不超过河道多年平均流量的 1% • 保证坝体和坝基静力和动力稳定，控制变形和沉降：竣工后坝体和坝基总沉降量不宜大于坝高的 1%

6.1.8 评价要求

- a) 应复核砂砾石层（包括砂层、砂砾石层、砾卵石层等）的渗透稳定性，根据土的类型及其颗粒级配等情况判别其渗透变形形式，核定其相应的允许渗透比降。
- b) 应评价渗流出口有无管涌或流土破坏的可能性，以及渗流场内部有无管涌、接触冲刷等渗流隐患。
- c) 对于覆盖层为相对弱透水土层时，应复核其抗浮动稳定性，其允许渗透比降宜由试验法或参考流土指标确定；对已有反滤盖重者，应核算盖重厚度和范围是否满足要求。
- d) 应复核粗、细散粒料土层之间有无接触冲刷（流向平行界面）和接触流土（流向从细到粗垂

直界面)的可能性,以及散粒料土体与刚性结构物体(如混凝土墙、涵管和岩石等)界面的接触渗透稳定性。

6.1.9 检测如下:

- a) 应建立完善的地下水观测系统,监测地下渗流液面分布,通过分析库水位、地下水位及坝后渗流量关系曲线,评估渗流控制效果。
- b) 应对防渗墙、帷幕灌浆等防渗结构的完整性和防渗效果进行定期检测,发现缺陷及时处理。
- c) 应定期测量坝后渗流量,分析渗流量变化与库水位的关系,判断防渗体系的工作状态。

6.1.10 维护

- a) 对运行中出现的渗流异常,应及时分析原因并采取相应的处理措施,如灌浆、增设防渗墙、加强反滤等。
- b) 当渗流量持续增大或出现渗透破坏迹象时,应进行专题论证,制定彻底的处理方案。
- c) 对采用悬挂式防渗墙的工程,应加强监测和控制,确保渗流量和渗透坡降始终在允许范围内。

6.2 堤坝嵌岩混凝土造槽施工和小直径深层搅拌防渗墙二次成墙技术参数与施工要求

6.2.1 嵌岩混凝土造槽成墙厚度不大于1.0m,最大墙深不大于80m,宜分两期槽段施工。

6.2.2 松散填筑土层、砂质地层、砂卵石地层造槽浓泥浆固壁泥浆比重不宜低于 $1.30\text{g}/\text{cm}^3$,抓槽时抓斗下落及上提出渣时均应慢速,造槽速度宜为 $55.0\sim 70.0\text{m}^2/\text{台班}$ 。

6.2.3 造槽液压抓斗机上应安装孔壁垂直度测斜仪和液压纠偏装置,槽孔壁垂直度测斜仪测量精度不得超过 0.01° 。

6.2.4 造槽液压抓斗斗体重量宜为 $9\sim 30\text{t}$ 、闭合力宜为 $800\sim 1200\text{kN}$,可以直接在中风化上带以上的风化岩体中抓岩成槽;主卷扬机应配置自由脱钩功能,能对较硬的风化岩体进行冲击破碎,完成嵌岩槽的造槽。

6.2.5 小直径深层搅拌防渗墙二次成墙搅拌头底部应安装三翼合金钻头,以降低搅拌头的钻进扭力;搅拌头底层两个搅刀上侧均安装喷浆孔,使被搅动的成墙土料与喷入的水泥浆搅拌更均匀、充分。

6.2.6 小直径深层搅拌防渗墙二次成墙搅拌头搅拌轴距宜为 450mm ,钻头直径宜为 300mm ,一序与二序单元桩套接宽度宜为 75mm ,防渗墙日平均成墙速度宜为 $180\sim 260\text{m}^2$ 。

6.3 堤坝渗控效果综合评价技术标准

6.3.1 评价原则:

- a) 渗控效果评价应遵循科学性、系统性、实用性和独立性原则,确保评价结果客观、准确。
- b) 评价应综合考虑渗控工程的技术合理性、经济性和环境影响,进行多维度综合评价。
- c) 评价应采用定量与定性分析相结合的方法,优先采用定量指标。

6.3.2 评价周期:

- a) 渗控工程竣工验收后1年内应进行首次效果评价。
- b) 运行期应每5-10年进行一次定期评价。
- c) 遭遇特大洪水、地震等特殊工况后,应进行专项评价。

6.3.3 评价应由具有相应资质的专业机构实施,评价人员应具备相关专业背景和经验。

6.3.4 堤坝渗控效果评价指标体系分为三层:目标层、准则层和指标层。建立评价指标体系应按照图5.3.1所示流程。应包括以下四个步骤:理论准备、指标体系初选、指标体系完善、指标体系试用。

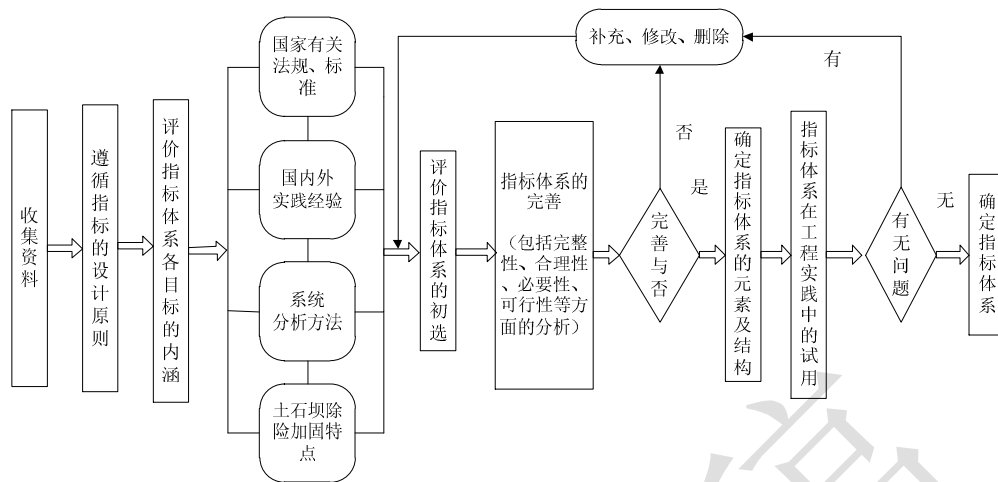


图 6.3.1 建立评价指标体系的流程图

6.3.5 指标筛选应以“剔除对评价目标序位无影响的指标”为核心原则，确保保留指标具备有效鉴别评价对象差异的能力。

6.3.6 指标体系构建过程中，应通过相关性分析等方法降低指标间信息重叠度，避免指标间存在显见的包容关系。

6.3.7 针对指标体系中可能存在的矛盾指标，可将矛盾指标从体系中剔除；无法剔除时，应通过技术规范或工程经验明确矛盾一方指标的合理值域范围，评价时仅需根据另一方指标值的大小确定评价对象的综合评价值序位。

6.3.8 土石坝除险加固效果评价指标应分为定量指标与定性指标两类，两类指标需协同纳入评价体系。评价过程中应建立定性指标与定量指标的融合机制，确保两类指标权重分配合理、数据口径一致，共同支撑科学、可信的综合评价结论。

6.3.9 各定性、定量指标的调查方法应当包括资料分析、现场检测、现场观察、试验研究、数值模拟等。

6.3.10 病险水库除险加固效果评价系统模型应结合层次分析法、概率论、模糊优选法等方法，系统地构建了病险水库除险加固效果定量评价模型，保障除险加固效果。

6.3.11 评价模型应满足可适配不同坝型（如均质土坝、心墙土坝、堆石坝）及除险加固措施（如防渗墙施工、坝体培厚、溢洪道改造）的评价需求；模型计算过程应保留中间数据（如权重计算结果、模糊隶属度矩阵），支持评价结果的反向核查。

6.3.12 应根据综合评价值确定渗控效果等级，建议渗控效果评价等级应符合表 6.3.1 的规定。

表 6.3.1 渗控效果评价等级标准

评价等级	综合评价值 A	评价说明
优秀	[0.90, 1.00]	渗控效果显著，各项指标完全达到设计要求
良好	[0.75, 0.90)	渗控效果较好，主要指标达到设计要求
合格	[0.60, 0.75)	渗控效果基本满足要求，个别指标需要改进
不合格	[0, 0.60)	渗控效果未达到要求，需要采取补救措施

6.3.13 渗控效果评价应按以下流程进行：

- a) 明确评价目的和范围；
- b) 收集工程资料和监测数据；
- c) 现场检查和检测；
- d) 指标计算和量化；
- e) 综合评价等级确定；
- f) 编制评价报告；
- g) 提出建议措施

6.3.14 数据采集要求：

- a) 应收集工程设计、施工、监理和验收等全套资料。
- b) 应收集至少 1 个水文年的渗流监测数据，包括浸润线、渗流量、渗透压力等。
- c) 现场检测应包括：渗流状态检测、防渗体完整性检测和结构安全检测等。

6.3.15 结果判定规则：

- a) 当综合评价值达到 0.75 以上且无一票否决指标不合格时，可判定为合格以上等级。
 - b) 出现以下情况之一时，应判定为不合格：浸润线高度超过设计允许值；渗透坡降大于允许值并发生渗透破坏；防渗体存在严重缺陷影响整体安全。
 - c) 当总评价值处于等级区间临界值（如 80 分、70 分、60 分），或核心指标达标情况存在争议时，启动争议处理流程；组建争议评审组：由 3 名（含）以上水利工程领域正高级工程师组成，其中至少 1 人具备病险水库除险加固专项经验；针对争议点补充数据，如重新邀请 2 名专家参与评分、复核时效性指标安全度计算过程；评审组采用“少数服从多数”原则投票，投票结果需附书面评审意见，作为最终评价结论依据。
-