ICS 93.160
CCS P 55

T/WEA

团　　体　　标　　准

T/WEA XXXX—2026

水利智慧工程混凝土裂缝防治技术规程

Code of practice for concrete crack prevention and control technology in smart water conservancy projects

（征求意见稿）

2026－XX－XX 发布　　2026－XX－XX 实施

中国智慧工程研究会　　发 布

全国团体标准信息平台

目　　次

前言 III
引言 V
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求与防治原则 3
5　裂缝分类与风险分级 5
6　设计阶段裂缝预防与控制 6
7　材料与配合比设计控制 9
8　施工过程控制与温控养护 11
9　智慧化监测与裂缝识别 14
10　裂缝评估、分级处置与修复加固 17
11　质量检验与资料归档 20
12　运行维护与持续改进 21

全国团体标准信息平台

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。

本文件由中国智慧工程研究会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

全国团体标准信息平台

引　言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分，长期处于复杂的水工环境与荷载作用条件之下。混凝土结构在服役过程中易受温度变化、收缩徐变、水化热、约束条件、基础不均匀变形、水压力与动荷载、冻融与干湿循环、化学侵蚀以及施工质量波动等因素影响而产生裂缝。裂缝一旦形成并发展，不仅会削弱结构整体性与耐久性，还可能引发渗漏、钢筋锈蚀、冻胀剥落、抗冲磨能力下降等连锁问题，进而影响工程安全运行与寿命周期成本控制。对于水库大坝、水闸、泵站、渠系及输水隧洞等关键结构，裂缝的识别、评估与治理更直接关系到水工建筑物的安全韧性与运行可靠性。

近年来，水利行业加快推进数字孪生水利与智慧工程建设，现场感知、数据采集、模型分析与智能预警等技术快速发展，使裂缝防治从传统“事后修补”的被动模式向“全生命周期主动防控”的模式演进。在工程策划与设计阶段，通过温控与配筋优化、构造细部与约束条件控制、材料体系与外加剂选择等手段，可有效降低裂缝发生概率；在施工阶段，借助智能拌和与质量追溯、温度与应变在线监测、施工过程参数实时控制与偏差纠偏，可实现裂缝风险的动态管控；在运行阶段，通过结构健康监测、裂缝图像识别、渗流与位移耦合分析及风险分级预警，可提升早期发现与处置能力，实现风险闭环管理。

但在实际工程中，仍普遍存在裂缝防治技术路线不系统、设计—施工—运维衔接不充分、裂缝分类与评价口径不统一、过程控制关键参数缺少可验证要求、监测数据与治理决策脱节、修补材料与工艺适配性不足、治理效果缺少量化验收依据等问题，导致裂缝风险难以在源头有效控制，治理成本高、返修率高，且部分工程在运行后期仍可能出现裂缝反复与耐久性衰减。

为规范水利智慧工程混凝土裂缝防治的技术要求与管理流程，本文件基于混凝土裂缝机理与水工结构特性，结合智慧工程的感知、数据、模型与闭环管控思路，提出从勘察设计、材料与配合比、施工工艺与温控、养护与成型质量、监测与识别、裂缝评估分级、处置与修复加固、质量验收与效果评价、运行维护与持续改进等环节的技术规定与实施要点，形成可执行、可核查、可追溯的全过程防治体系。

本文件适用于新建、改建、扩建水利工程混凝土结构的裂缝防治，也适用于既有工程裂缝风险治理与智慧化监测预警系统的建设与运行管理。使用本文件时，应结合工程规模等级、结构类型、环境作用与运行工况，合理确定裂缝控制目标、监测与预警阈值、处置策略与验收要求，确保裂缝防治措施与工程安全、耐久、经济及可运维目标相协调。

水利智慧工程混凝土裂缝防治技术规程

1 范围

本文件规定了水利智慧工程混凝土裂缝防治的总体要求与防治原则，裂缝分类与风险分级，设计阶段裂缝预防与控制，材料与配合比设计控制，施工过程控制与温控养护，智慧化监测与裂缝识别，裂缝评估、分级处置与修复加固质量检验与资料归档，运行维护与持续改进等内容，旨在形成覆盖“设计—施工—运行”全生命周期的裂缝风险主动防控体系，并实现关键过程参数与处置结果的可核查、可追溯。

本文件适用于新建、改建、扩建水利工程混凝土结构的裂缝预防与控制，包括但不限于混凝土重力坝、拱坝、土石坝混凝土面板及接缝部位、水闸与溢洪道、泵站与厂房、渠道与渡槽、涵洞与隧洞衬砌、消能防冲与护坦等结构类型。对采用智慧工地、数字孪生水利、结构健康监测等系统的工程，可按本文件规定将裂缝监测数据、过程质量数据与处置工单纳入闭环管理。

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，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50164 混凝土质量控制标准

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

GB/T 50082 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准

SL 677 水工混凝土施工规范

SL/T 352—2020 水工混凝土试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水利智慧工程 smart water conservancy engineering

采用感知采集、数据集成、模型分析与智能决策等技术，对水利工程建设与运行关键对象、关键过程和关键风险实施数字化、网络化、智能化管理的工程建设与运维体系。

3.2

混凝土裂缝 concrete crack

混凝土结构或构件在内外作用下产生的局部不连续开裂现象，表现为裂缝宽度、长度、深度与走向等几何特征及其随时间变化的演化规律。

3.3

裂缝防治 crack prevention and control

为降低裂缝发生概率、控制裂缝发展并减轻裂缝对安全与耐久性影响而采取的设计控制、材料与配合比优化、施工过程控制、温控养护、监测预警与修复处置等综合措施。

3.4

有害裂缝 harmful crack

对结构安全、抗渗性能、耐久性、稳定性或正常运行产生不利影响，且超出工程允许控制指标或存在进一步扩展风险的裂缝。

3.5

贯穿裂缝 through crack

裂缝贯通构件或结构截面厚度，形成连续渗流通道或显著削弱截面整体性的裂缝。

3.6

表面裂缝 surface crack

裂缝仅出现在混凝土表层区域，未贯通截面厚度，其影响程度与裂缝宽度、深度、分布密度及环境作用有关。

3.7

温度裂缝 thermal crack

由水化热引起的温升与降温过程、环境温度变化或温度梯度导致的约束应力超过混凝土抗拉能力而产生的裂缝。

3.8

收缩裂缝 shrinkage crack

由混凝土塑性收缩、干燥收缩、自收缩等体积变形在约束条件下产生的裂缝，常与早期失水、养护不足或配合比不当相关。

3.9

沉降裂缝 settlement crack

由于地基不均匀沉降、结构变形差异或施工缝处理不当导致构件产生附加拉应力而形成的裂缝。

3.10

裂缝监测 crack monitoring

利用传感器、图像采集、测量与数据分析等手段，对裂缝宽度、长度、深度、开合量及其随时间变化进行持续或周期性观测并形成数据记录的活动。

3.11

裂缝识别 crack detection

基于现场巡检、图像处理、机器学习或其他方法，对裂缝的存在、位置、走向与几何特征进行发现与提取的过程，可包括人工识别与智能识别。

3.12

裂缝分级 crack grading

依据裂缝类型、位置、宽度、深度、渗漏程度、发展趋势及结构重要性等因素，对裂缝风险等级进行划分并对应处置策略与控制要求的过程。

3.13

修复 repair

以恢复构件表面完整性、耐久性与防护性能为主要目标，对裂缝进行封闭、涂覆、表面处理或局部补强等处置的技术措施。

3.14

加固 strengthening

以提高结构承载能力、整体性、抗渗与抗裂性能或抑制裂缝进一步发展为主要目标，采取粘贴、外包、预应力、灌浆加固或结构改造等措施的处置方式。

3.15

闭环管控 closed-loop control

以裂缝风险为对象，形成“发现—评估—处置—验证—复盘改进”的连续管理过程，确保责任明确、过程可追溯、措施有效并可持续优化。

4 总体要求与防治原则

4.1 总体要求

水利工程混凝土裂缝防治应在工程全寿命周期内统筹实施，满足安全性、抗渗性、耐久性与可运维性要求，并与工程等级、结构重要性、运行工况与环境作用相适配。裂缝防治应将设计控制、材料与配合比控制、施工与温控养护控制、监测识别与评估处置、修复加固与验收评价等环节纳入统一管理体系。

智慧化裂缝防治应在满足水工混凝土施工与质量检验规程要求的基础上，结合现场感知与数据平台建设，将温度、应变、湿度、环境条件、拌和与运输参数、浇筑与振捣参数、养护参数、裂缝图像与测量数据等关键数据进行统一采集、集成与分析，并形成风险预警与处置闭环。裂缝防治的闭环管控流程应与图1相符合。

4.2 防治目标

裂缝防治目标应根据结构类型、环境等级与运行要求确定，至少应包括：

a）控制裂缝发生概率，降低早期裂缝与温度裂缝风险；

b）控制裂缝宽度、深度与分布密度，避免贯穿裂缝与有害裂缝形成；

c）控制渗漏与耐久性劣化风险，防止钢筋锈蚀、冻融剥落与冲磨损伤等次生病害；

d）建立裂缝监测识别与风险分级体系，实现裂缝发展趋势可判识；

e）建立处置与修复加固技术路线，实现处置效果可验收、可追溯。

裂缝控制指标宜在设计文件中明确，并在施工与运行阶段通过监测、检验与验收进行核查。

4.3 防治原则

裂缝防治应遵循以下原则：

a）预防为主、治理为辅：优先通过设计与施工过程控制降低裂缝风险，治理措施作为补充手段；

b）以控温控缩为核心：对大体积或温差敏感结构，应以降低温升峰值、控制降温速率与温度梯度为重点；对薄壁或大面积构件，应以控制早期失水、塑性收缩与干缩为重点；

c）以约束条件为关键：应识别内外约束来源（基础、邻近构件、钢筋、预埋件、模板与支撑等），并采取减约束与构造措施；

d）分级分类、对症施治：裂缝处置应结合裂缝类型、位置、宽度深度、渗漏程度与发展趋势分级确定措施，避免“一刀切”；

e）监测预警、闭环管控：通过监测识别与数据分析及时发现风险并闭环处置，确保处置有效性与责任可追溯；

f）兼顾耐久与可运维：裂缝处置与修复材料应与水工环境适配，满足抗渗、耐久与后期维护便利性要求。

4.4 智慧化管控总体思路

智慧化裂缝防治宜按照“数据采集—数据治理—分析评估—预警处置—效果验证—持续改进”的路径实施。应明确关键监测对象与监测频次，建立数据质量控制与异常校验机制，并将裂缝风险阈值与预警等级与处置策略联动。对关键结构部位与关键施工阶段，应实现风险前移与主动干预，形成全过程风险闭环。

为便于统一理解与实施，智慧化裂缝防治闭环流程结构应与图1相符合。

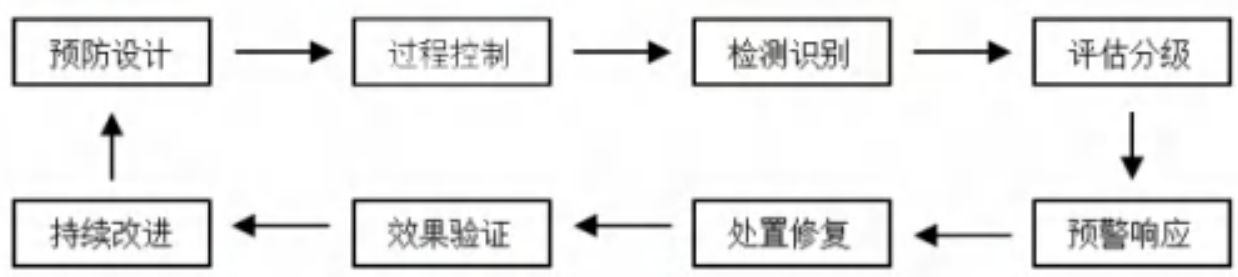

图1　水利智慧工程混凝土裂缝防治闭环流程示意图

5 裂缝分类与风险分级

5.1 裂缝分类

裂缝分类应结合成因、形态、部位与影响进行综合判定，分类结果应记录在裂缝台账中并与监测数据关联。裂缝分类宜包括以下维度：

a）按成因分类：温度裂缝、收缩裂缝、沉降裂缝、荷载裂缝、施工缺陷裂缝、化学侵蚀相关裂缝、冻融劣化相关裂缝等；

b）按形态分类：贯穿裂缝、表面裂缝、网状裂缝、放射状裂缝、阶梯状裂缝等；

c）按部位分类：坝体与坝基接触区、廊道与孔洞周边、施工缝与伸缩缝附近、闸墩与闸底板、消能防冲结构、衬砌与洞脸、转角与突变截面部位、预埋件与孔洞周边等；

d）按影响分类：无害裂缝、一般裂缝、有害裂缝（对安全、抗渗与耐久性产生不利影响的裂缝）。

裂缝分类应体现工程特性。对可能影响抗渗与结构整体性的裂缝，应优先按有害裂缝进行管理，并纳入重点监测与处置范围。

5.2 裂缝控制指标

5.2.1 指标设置原则

裂缝控制指标应根据工程等级、结构类型、受力与约束条件、环境作用与运行工况确定，并在设计文件中明确。控制指标宜包括裂缝宽度、裂缝深度、裂缝长度与分布密度、渗漏量与渗压变化、裂缝发展速率等。指标设置应满足：

a）可测量：指标应具备可检测与可记录的方法与频次；

b）可追溯：指标来源、测量方法与测量人员（或设备）应可追溯；

c）可管理：指标应与风险分级、预警阈值与处置策略联动；

d）可验证：处置后应能通过复测或监测数据验证是否达标。

裂缝控制指标应同时考虑短期控制（施工期、早期养护期）与长期控制（运行期耐久性）。对抗渗要求高的部位，应增加渗漏与渗压相关指标。

5.2.2 指标项目与记录要素

裂缝测量与记录应至少包括：裂缝编号、位置（可采用里程/桩号/轴线坐标等）、构件部位、裂缝走向、宽度、长度、深度或贯穿性判断、渗漏情况、发现时间、环境条件、发展趋势与照片/图像证据等。

裂缝台账的数据结构宜与智慧化平台的数据字段定义保持一致，以支撑自动统计、趋势分析与预警触发。

5.3 风险分级

5.3.1 分级原则

裂缝风险分级应综合裂缝几何特征、位置重要性、对抗渗与安全影响、发展趋势、渗漏程度以及运行环境等因素确定。分级应服务于处置优先级与资源配置，满足“分级清晰、阈值可执行、处置可匹配”的要求。

5.3.2 分级要素

风险分级宜至少考虑以下要素：

a）裂缝宽度与变化量：当前宽度、开合量与增长速率；

b）贯穿性与深度：是否贯穿、深度占厚度比例；

c）裂缝位置：关键受力区、抗渗控制区、应力集中区、施工缝/接缝附近等；

d）渗漏与渗压：渗漏量、渗水形态、渗压变化及其与运行水位关联性；

e）发展趋势：稳定、缓慢发展、快速发展；

f）诱发因素：温控异常、约束变化、运行工况突变、地基变形等；

g）结构重要性与后果：对结构安全、运行功能与耐久性后果的严重程度。

5.3.3 分级与处置对应关系

裂缝风险等级宜划分为四级，并与预警响应与处置措施对应。混凝土裂缝风险分级与响应处置见表1。

表1 混凝土裂缝风险分级与响应处置

风险等级	典型特征	管控要求	响应与处置建议
I级	表面细微裂缝，宽度小，稳定；无渗漏	纳入台账，常规巡检	表面封闭/养护优化；观察记录
II级	裂缝宽度或数量较大；或位于敏感部位；发展缓慢	加密监测，分析原因	表面封闭、灌浆试验段或局部修补；调整温控/约束措施
III级	裂缝宽度明显；或深度较大/疑似贯穿；出现渗漏或发展较快	启动预警，专项评估	制定专项治理方案：化学灌浆/环氧灌浆、止水处理、局部加固；复核运行工况
IV级	贯穿裂缝或渗漏显著；伴随渗压异常/位移异常；对安全构成威胁	启动应急响应	应急处置与限载限水位；加固与结构处理；必要时停运检修并复评安全

5.4 风险分级判定与复核

裂缝风险分级判定应由具备相应资质或能力的技术人员组织实施，必要时开展现场复测、钻孔取芯、超声或其他无损检测与渗流分析。对III级及以上裂缝，应形成专项评估意见，明确裂缝成因、发展趋势判断、处置目标、处置措施与验证方法。

风险等级应支持动态调整。监测数据表明裂缝发展趋势变化或处置后效果不满足目标时，应重新评估分级并调整处置策略，形成闭环管理记录，闭环流程应与图1相符合。

6 设计阶段裂缝预防与控制

6.1 控制目标与设计输入

设计单位应根据工程等级、结构类型、抗渗等级、环境作用等级及运行工况确定裂缝控制目标，并在设计文件中明确裂缝控制指标与关键控制部位。裂缝控制目标应至少考虑：

a）关键受力区、抗渗控制区与应力集中部位的裂缝控制要求；

b）温度裂缝、收缩裂缝与沉降裂缝等主要裂缝类型的风险识别与控制策略；

c）施工阶段温控与养护条件的可实现性约束；

d）运行阶段水位变化、启闭频次、动荷载、冻融与干湿循环等对裂缝发展的影响。

设计输入资料应充分，包括但不限于地质勘察资料、气象与水温资料、材料来源与性能、施工组织与工期、温控条件与施工资源、运行调度与水位变化范围等。对大体积混凝土或温控敏感结构，应在设计阶段进行温度应力分析或等效论证，明确温控指标与构造控制要点。

6.2 结构体系与构造措施

结构体系选择与构造设计应有利于降低约束、减少应力集中并提升整体抗裂能力。设计应满足以下要求：

a）合理布置结构分缝与分块：分缝位置应避开主要受力区与关键抗渗区，分块尺寸应与温控能力、施工组织与收缩变形相匹配；

b）控制截面突变：对截面突变、转角、洞口、廊道交汇等应力集中部位，应采用过渡构造、倒角、圆弧或局部加厚等措施降低应力集中；

c）预埋件与管线布置优化：预埋件、孔洞与管线集中区域应避免形成薄弱截面，必要时采取局部加强与防裂构造；

d）施工缝与后浇带：应明确施工缝位置与处理要求，必要时设置后浇带或分期浇筑以释放收缩与温度变形；

e）变形缝与伸缩缝：应根据温度变形与结构约束条件合理设置，并明确止水与缝内材料要求，避免缝边裂缝与渗漏。

关键构造部位的布置应与裂缝风险分布规律一致，并为后续监测点位布设与巡检路径预留条件。构造措施与裂缝防治闭环关系应与图1相符合。

6.3 配筋与抗裂构造设计

配筋设计应满足承载与抗裂双重要求，并结合温度与收缩效应进行综合考虑。设计应至少满足以下要求：

a）合理确定最小配筋率与分布筋：对受温度与收缩影响显著的构件，应配置足够的分布筋以控制裂缝间距与宽度；

b）加强筋设置：在洞口周边、转角、端部、预埋件集中区、施工缝附近等应力集中部位，应设置加强筋或构造筋；

c）钢筋锚固与搭接：应满足规范要求并避免锚固区开裂风险，必要时采取局部加密与构造优化；

d）保护层与耐久性：钢筋保护层厚度与抗渗耐久要求应协调，避免因保护层不足或过厚引起裂缝与耐久性问题；

e）约束与滑移：对与基础或相邻构件存在强约束的部位，可通过设置滑动层、减黏层或构造分离措施降低约束应力（经论证确定）。

对预应力混凝土或需显著提高抗裂能力的部位，宜结合专项论证采用预应力、外包加固或纤维增强等措施，但应明确施工可实施性与后期运维要求。

6.4 温控设计与温度应力控制

温控设计应以控制温升峰值、温度梯度与降温速率为核心，降低温度拉应力峰值并减少温度裂缝风险。对大体积混凝土或温控敏感结构，应明确温控指标与控制方案。温控设计宜包括：

a）材料与配合比策略：选用低水化热胶凝材料体系、合理掺合料比例与外加剂，控制水胶比与用胶量；

b）入仓温度控制：明确拌和用水、骨料降温、遮阳与喷雾等措施，并提出入仓温度控制目标；

c）分层分块与浇筑节奏：通过分层厚度、浇筑间隔与施工缝布置控制温升叠加；

d）预冷与后冷措施：对高温季节或大体积部位，可设置预冷或冷却水管系统，明确布置、流量、温度与停机条件；

e）保温与缓冷：采用保温覆盖、模板保温、延迟拆模与缓冷措施控制降温速率与内外温差；

f）温度监测点位预留：为施工期温度监测与智慧化数据采集预留测温孔、埋设件与传感器布置条件。

温控方案的设计参数、监测点位与控制指标应与后续施工阶段过程控制与智慧化监测方案一致，确保“设计目标—施工控制—监测验证”闭环可实现，闭环关系应与图1相符合。

6.5 约束控制与变形协调

裂缝防治应重视约束控制与变形协调。设计应识别外约束（基础、邻近构件、嵌固条件）与内约束（钢筋、预埋件、温度梯度引起的自约束）并采取措施降低不利影响。宜采取：

a）设置滑移层或隔离层以降低基础约束；

b）合理布置分缝、后浇带或分期浇筑以释放变形；

c）优化构造连接方式，避免刚性约束导致裂缝集中；

d）对可能出现不均匀沉降的基础，应加强地基处理与结构变形协调设计，并提出施工期沉降监测要求。

6.6 防渗与耐久性设计要点

裂缝防治与防渗耐久性设计应协同考虑。设计应明确抗渗等级与防渗体系构造，重点控制施工缝、伸缩缝、接缝及穿墙管线等薄弱环节。对冻融、磨蚀、化学侵蚀等环境作用显著的工程，应在材料体系、表面防护与构造细部上采取耐久性增强措施，并考虑裂缝对耐久性劣化的放大效应。

6.7 与智慧化监测的接口要求

为支撑智慧化裂缝防治，设计阶段宜提出监测与数据接口要求，包括：

a）关键监测对象：温度场、应变、位移、渗压、渗流、裂缝开合量等；

b）监测点位与预留条件：传感器埋设位置、测温孔与测缝装置安装条件；

c）数据需求与指标口径：监测频次、精度要求、数据格式与异常判定规则；

d）预警阈值建议：结合第5章风险分级提出预警阈值范围或设定原则；

e）与施工过程数据联动：温控、浇筑、养护、材料批次等数据的采集要求。

监测点位布设与数据联动关系应服务于图1所示裂缝防治闭环流程，确保后续“监测识别—评估分级—预警响应—处置修复—效果验证”有数据支撑。

7 材料与配合比设计控制

7.1 原材料选择与质量控制

原材料应满足水工混凝土相关规范要求，并结合工程环境与裂缝风险特点进行选型与控制。原材料控制宜满足以下要求：

a）水泥：宜选用水化热较低、性能稳定的水泥品种，控制水化热峰值与波动；同一结构部位宜保持水泥来源与品种稳定，避免批次差异引起收缩与强度发展差异；

b）掺合料：宜采用粉煤灰、矿渣粉、硅灰等掺合料优化胶凝材料体系，以降低水化热、改善孔结构与提高耐久性；掺合料质量应稳定，含水率与细度等指标应受控；

c）骨料：应优先选用级配合理、含泥量低、针片状含量受控的骨料；骨料含水率波动应纳入计量与拌和控制，避免用水量偏差导致收缩风险增加；对高寒或磨蚀环境应关注骨料抗冻与耐磨性能；

d）拌和用水：水质应满足要求，水温宜纳入入仓温度控制；

e）外加剂：减水剂、缓凝剂、引气剂、防冻剂等外加剂应与胶凝材料相容性良好，避免泌水、离析、过度缓凝或早期收缩增大；外加剂应实施批次管理与进场复验；

f）纤维材料：钢纤维、聚丙烯纤维等应满足分散性与耐久性要求，用于控制塑性收缩裂缝或提高抗裂韧性时应经试验验证其效果。

原材料应实施进场检验与过程复检。对水泥、掺合料、外加剂等关键材料，应建立批次追溯机制并与智慧化质量管理系统关联，确保裂缝风险分析可追溯到材料波动因素。

7.2 胶凝材料体系与水化热控制

裂缝防治的胶凝材料体系设计应以降低水化热、控制温升与收缩变形为重点，并满足强度、抗渗与耐久性要求。胶凝材料体系设计应满足：

a）控制用胶量：在满足强度与施工性能前提下，宜降低胶凝材料总量，减少水化热释放；

b）合理掺合料比例：通过掺合料替代部分水泥以降低早期水化热并改善后期性能；对需早强或冬季施工部位，应平衡早期强度与温控要求；

c）水化热验证：对大体积混凝土或温控敏感结构，应通过绝热温升试验或等效验证评价胶凝体系水化热特性，并作为温控设计与施工控制依据；

d）收缩与徐变考虑：胶凝材料体系应兼顾自收缩与干缩风险，避免因水胶比过低或胶材体系不合理导致自收缩裂缝倾向增加。

胶凝材料体系的选择与验证应与第6章温控设计参数相衔接，并为施工阶段温控指标提供依据。

7.3 外加剂与掺合料应用控制

外加剂与掺合料的应用应以改善和易性、降低用水量、控制凝结时间、减少泌水离析、降低收缩与提高耐久性为目标，并经试配验证其相容性与稳定性。控制要求包括：

a）相容性试验：水泥—掺合料—外加剂组合应进行相容性试验，避免坍落度损失异常、泌水离析或异常凝结；

b）凝结时间控制：对高温季节或大体积混凝土，宜通过缓凝或控温措施延缓放热峰值并利于施工；对低温季节应避免过度缓凝造成早期强度不足与冻害风险；

c）引气控制：对冻融环境应配置适当引气体系并控制含气量，兼顾抗冻与强度；

d）批次稳定性：外加剂与掺合料应实施批次一致性管理，发生供应商或批次变化时应复核试配与关键性能。

7.4 配合比参数控制

配合比设计应满足施工性能、力学性能、抗渗与耐久性要求，并重点控制裂缝相关敏感参数。配合比参数控制宜满足：

a）水胶比：在满足抗渗耐久性要求前提下合理控制水胶比，避免水胶比过大导致干缩与渗漏风险增大，亦避免过低导致自收缩显著；

b）砂率与级配：合理砂率与骨料级配应降低泌水离析并减少收缩；

c）坍落度与保坍：应满足浇筑、振捣与泵送要求并控制波动，避免因过振或离析形成收缩与裂缝隐患；

d）含气量：满足抗冻要求并控制波动；

e）温度控制参数：拌和物出机温度、入仓温度应作为配合比与生产控制的重要约束条件；

f）抗裂相关性能：必要时考虑抗拉强度发展、弹性模量、收缩与徐变等参数对温度应力与裂缝倾向的影响。

对不同结构部位或不同施工季节，可设置不同配合比，但应确保主参数受控并在质量管理系统中可追溯。

7.5 试配、验证与性能评估

配合比设计应通过试配与验证后方可用于工程。试配与验证应至少包括：

a）工作性验证：坍落度、扩展度、泌水离析、保坍性能等；

b）强度与耐久性验证：抗压强度发展、抗渗性能、抗冻性能、抗磨蚀性能；

c）温控与抗裂验证：对大体积或温控敏感结构，应开展绝热温升、收缩试验或裂缝敏感性评估，并结合温度应力分析验证温控可行性；

d）材料波动敏感性：对关键材料批次变化应进行复核验证，必要时进行二次试配；

e）施工适应性验证：结合拟采用的拌和、运输、浇筑与振捣工艺进行适应性验证，避免实验室配合比与现场条件偏差导致质量风险。

试配与验证结果应形成记录并纳入资料归档，关键参数应与智慧化质量追溯系统关联，以便裂缝风险分析与责任追溯。

7.6 配合比调整与闭环管理

施工过程中如出现环境条件变化、材料批次变化、工作性异常或温控指标偏离等情况，应按变更管理要求进行配合比调整，并进行必要验证。配合比调整应记录原因、调整内容、验证结果与生效范围，并与裂缝监测与质量数据联动分析，形成“材料—过程—结果”的闭环改进，闭环流程应与图1相符合。

8 施工过程控制与温控养护

8.1 施工准备与过程控制基线

开工前应建立裂缝防治专项施工控制方案，至少明确：

a）分层分块与浇筑顺序、施工缝位置与处理工艺；

b）入仓温度、内外温差、降温速率、拆模时间与养护周期等关键控制指标；

c）温控措施（预冷、后冷、保温覆盖、缓冷等）的实施方法与停启条件；

d）温度与应变监测点位、巡检频次与数据上报机制；

e）异常工况处置与偏差纠偏流程；

f）责任分工与资料记录要求。

关键过程参数的控制基线应与智慧化管理平台数据字段一致，确保过程数据可采集、可分析、可追溯，以支撑图1所示闭环管控。

8.2 拌和计量与出机温度控制

拌和站应实施计量校准与过程稳定性控制，确保配合比参数与温控要求落实。控制要求包括：

a）原材料含水率测定与动态修正：对砂、石含水率应按规定频次测定并及时修正用水量，避免收缩风险增大；

b）外加剂计量与掺量控制：外加剂计量应稳定，发生批次变化应复核工作性与凝结时间；

c）出机温度控制：应控制拌和物出机温度与波动，必要时采用冷却水、骨料遮阳降温、喷雾降温或制冰等措施；

d）拌和均匀性：应控制拌和时间与投料顺序，避免离析、团聚与性能波动；

e）质量追溯：应记录材料批次、计量数据、出机温度、坍落度与含气量等信息，并纳入追溯。

8.3 运输、入仓与二次温升控制

混凝土运输与入仓过程应控制时间、温度与工作性损失，避免因延误、暴晒或二次搅拌不当引起的早期收缩与裂缝风险。控制要求包括：

a）运输时间控制：应根据温度条件与运输距离设置最大运输时限；

b）温度保护：高温季节运输应采取遮阳、保温或降温措施，防止入仓温度超限；

c）入仓检验：入仓前应检测坍落度、温度等关键指标，超限应按规定处置；

d）二次加水控制：严禁随意加水调整坍落度；确需调整时应按配合比调整程序执行并记录；

e）连续性保障：浇筑过程应保证连续性，避免冷缝与施工缝处理不当导致裂缝集中。

8.4 浇筑、振捣与分层分块控制

浇筑与振捣应保证密实、均匀与连续，避免蜂窝麻面、离析、夹层与冷缝等缺陷诱发裂缝。控制要求包括：

a）分层厚度与间隔：分层厚度与浇筑间隔应与温控目标与振捣能力匹配，避免温升叠加或冷缝形成；

b）振捣控制：振捣应适度均匀，避免过振导致离析或欠振导致孔隙缺陷；

c）浇筑顺序：应按设计与施工方案确定浇筑顺序，避免强约束条件下不合理浇筑引发拉应力集中；

d）施工缝控制：如需留置施工缝，应按规定位置留置并做好表面处理与接茬措施；

e）预埋件与孔洞周边：应加强局部振捣与构造防裂措施，避免形成薄弱区与应力集中。

8.5 施工缝、伸缩缝与接缝处理

施工缝与接缝是裂缝与渗漏高发部位，应实施重点控制。处理要求包括：

a）施工缝表面处理：应凿毛、清理并保持湿润，必要时采用界面剂或接缝砂浆；

b）接缝止水：止水带、止水条或其他止水构造应安装牢固、位置准确，避免偏移与损伤；

c）接缝浇筑质量：接缝处浇筑应确保密实与粘结良好，避免夹渣与孔隙；

d）伸缩缝与变形缝：缝内材料与构造应满足变形与止水要求，避免缝边裂缝与渗漏。

8.6 温控措施实施与控制指标

8.6.1 温控指标控制

施工期应重点控制以下温控指标并形成记录：入仓温度、内部最高温度、内外温差、降温速率与温度梯度等。温控指标应与设计与专项方案一致，超限应触发预警与纠偏处置。温控指标与预警响应应满足图1所示闭环要求。

8.6.2 预冷措施

高温季节或温控敏感结构可采用预冷措施，包括骨料降温、拌和水降温、制冰掺入、夜间施工等。预冷措施应明确实施方法、目标温度与验证方式，并记录实施效果。

8.6.3 后冷措施

对大体积混凝土可采用冷却水管等后冷措施。应明确管路布置、通水时间、流量与水温控制、停机条件以及对结构影响的风险控制。后冷运行数据应纳入智慧化平台并与温度监测联动分析。

8.6.4 保温覆盖与缓冷

拆模前后应采取保温覆盖、缓冷措施控制降温速率与内外温差，避免早期降温过快引发温度裂缝。保温材料、覆盖厚度与持续时间应与温控目标匹配，并记录实施情况。

8.7 拆模与养护管理

拆模与养护是控制早期裂缝的重要环节。控制要求包括：

a）拆模时机：拆模时间应满足强度与温控要求，避免过早拆模导致表面失水与降温过快；

b）养护方式：应采用洒水、覆膜、保温毡或养护剂等方式保持湿润，控制塑性收缩与干缩；

c）养护周期：养护时间应满足规范与专项要求，对高温、干燥、多风环境应适当延长；

d）养护连续性：养护应连续不中断，发生中断应及时补救并记录；

e）冬季施工：应防止早期冻害，采取保温加热与防冻措施并控制温度梯度。

养护参数（湿度、洒水频次、覆盖状态、环境温度等）宜纳入智慧化记录，以支撑裂缝成因分析与闭环改进。

8.8 成型质量控制与缺陷预防

成型质量缺陷会显著提高裂缝风险，应重点预防蜂窝麻面、孔洞、夹渣、露筋、离析与冷缝等。控制要求包括：

a）模板与支撑：模板刚度与密封应满足要求，防止漏浆与变形；

b）表面处理：收面与压光应控制时机，避免早期失水导致表面龟裂；

c）缺陷修补：发现缺陷应及时修补并记录，修补材料与工艺应与水工环境适配；

d）质量检验：按规定进行外观、尺寸与密实性检验，必要时开展无损检测。

8.9 过程数据采集、预警与偏差纠偏

智慧化裂缝防治应对关键过程数据进行采集与分析，包括材料批次、计量数据、出机与入仓温度、浇筑时间与层厚、振捣记录、温度监测曲线、养护记录等。应建立预警规则与纠偏流程：

a）温控超限预警：内外温差、降温速率或最高温度超限应触发预警并采取保温、缓冷、调整通水等措施；

b）施工参数异常预警：入仓温度、坍落度波动、浇筑间断、养护中断等应触发预警并采取纠偏；

c）记录与闭环：预警处置应记录原因、措施与效果，形成闭环工单，闭环流程应与图1相符合。

9 智慧化监测与裂缝识别

9.1 总体要求

智慧化监测与裂缝识别应满足以下要求：

a）目标导向：监测对象应覆盖裂缝主要致因（温度、收缩、约束变形、渗流等）与裂缝关键表征（宽度、开合量、发展速率、渗漏等），并与第5章风险分级相衔接；

b）分层配置：应结合工程等级与结构重要性分层配置监测手段，关键部位采用在线监测与加密巡检相结合，一般部位采用周期巡检为主；

c）数据可用：应明确数据采集频次、精度、传输与存储要求，建立数据质量控制、异常校验与缺测补偿机制；

d）预警联动：预警阈值应与处置策略联动，形成“预警—响应—处置—验证—复盘”的闭环工单；

e）统一台账：裂缝台账、监测数据、图像证据、处置记录与验收结论应统一归集，保证可追溯。

9.2 监测对象与点位布设

9.2.1 监测对象确定

监测对象应至少包含以下类别：

a）温度相关：混凝土内部温度、表面温度、环境温度、温差与降温速率；

b）变形相关：应变、位移、沉降、接缝开合量；

c）渗流相关：渗压、渗流量、渗漏点状态与水位工况；

d）裂缝表征：裂缝宽度、开合量、长度与扩展趋势、渗漏伴随特征；

e）施工过程相关（施工期）：入仓温度、浇筑节奏、养护状态、冷却水管运行参数（如采用）等。

监测对象应与第6章设计接口要求、第8章过程控制指标及第5章裂缝分级要素保持一致，避免监测与判定口径脱节。

9.2.2 点位布设原则

监测点位布设应满足：

a）重点覆盖：应力集中区、抗渗控制区、温控敏感区、接缝与施工缝附近、孔洞与预埋件周边、基础约束强区及既往裂缝多发区；

b）成组布设：对大体积或关键部位宜成组布设（内部—表面—环境），以支撑温差与温度梯度分析；

c）可运维：点位应便于施工安装、运行维护与更换校准，避免影响结构安全与防渗；

d）可比性：点位应考虑代表性与可比性，便于跨分块、跨时段对比分析。

点位布设应形成监测布置图与点位清单，并与图1闭环流程的“监测识别—评估分级—预警响应”环节相衔接。

9.3 监测手段与采集要求

9.3.1 传感与采集要求

监测系统应具备稳定采集、可靠传输、断点续传与本地缓存能力。对关键监测数据应配置时间同步机制，确保跨数据源（温度、应变、渗压、工况水位等）可进行同一时间基准下的关联分析。

监测设备应满足环境适应性要求（潮湿、浸水、高寒、腐蚀等），并在安装后进行功能验收与基线校准。对施工期埋设式传感器，应记录埋设位置、埋深、编号与保护措施，并纳入隐蔽工程资料。

9.3.2 监测频次与数据留存

监测频次应与风险等级、施工阶段与运行工况相匹配：

a）施工期温控敏感阶段宜加密采集，满足温升、降温与温差分析需要；

b）运行期可采用“常态采集+工况触发加密”的组合方式，例如在快速涨落水位、极端气温或启闭频繁阶段加密采集；

c）数据留存应满足追溯与复核需求，关键数据应进行长期归档并具备版本与权限管理。

9.3.3 典型监测项目与方法

监测项目、典型方法与应用目的可按表2组织。表2为推荐清单，工程可结合实际增减，但关键部位应覆盖温度、变形与裂缝表征至少一类监测手段。

表2 智慧化监测项目与典型方法

监测类别	监测项目	典型方法示例	主要用途
温度	内部温度、表面温度、环境温度、温差、降温速率	埋设测温、表面测温、环境监测	温控达标判定、温度裂缝风险预警
变形	应变、位移、沉降、接缝开合量	埋设应变、测缝计、位移/沉降监测	约束变形识别、沉降裂缝风险研判
渗流	渗压、渗流量、渗漏点状态	渗压监测、渗流计、视频/巡检记录	抗渗风险识别、贯穿裂缝与渗漏联动分析
裂缝表征	裂缝宽度、开合量、发展速率	人工测缝、测缝计、图像识别辅助测量	风险分级依据、处置效果验证

9.4

表2　智慧化监测项目与典型方法（续）

监测类别	监测项目	典型方法示例	主要用途
工况关联	水位、闸门工况、温控措施运行参数	工况数据接入、冷却水参数采集	裂缝致因关联、阈值动态调整

9.5　数据质量控制与治理要求

监测数据应纳入统一数据治理与质量管理体系，至少满足：

a）数据完整性：明确缺测判定规则与缺测处置流程（重传、补采、标记不可用等）；

b）数据准确性：建立校准、比对与漂移识别机制，关键传感器应定期校验或通过冗余点位交叉验证；

c）异常识别：对跳变、漂移、噪声异常、长时间恒值等异常数据应自动标记并告警；

d）口径一致：监测点位、单位、采集频次、统计窗口与派生指标（温差、降温速率等）计算口径应统一管理；

e）关联分析：监测数据应与施工过程数据及运行工况数据联动，支撑成因分析与预警判定；

f）权限与审计：对监测数据访问、导出、阈值调整与告警处置应留痕可审计。

9.6　裂缝巡检与图像识别要求

9.6.1　巡检组织与频次

裂缝巡检应形成制度化机制，施工期与运行期应分别制定巡检计划。巡检频次应与风险分级相匹配：关键部位加密巡检，一般部位常规巡检。巡检应记录位置、时间、工况、裂缝几何特征与照片证据，并与裂缝台账关联。

9.6.2　图像采集规范

采用图像识别时，应制定图像采集规范，至少包括：拍摄距离与角度、光照与遮挡要求、标尺放置要求、分辨率要求、编号规则与数据上传规则。图像数据应满足可复核与可追溯要求，必要时保留原始图像与处理后结果的对应关系。

9.6.3　图像识别与人工复核

图像识别结果应作为辅助判读手段，尤其对高风险裂缝分级不应仅依据自动识别结果直接下结论。应建立“自动识别—人工复核—台账入库”的流程，对误识别、漏识别情况形成反馈与模型/规则优化闭环。识别结果应输出裂缝位置、走向、长度与宽度估计值（或分级区间），并关联图像证据与时间戳。

9.7　预警阈值、等级与联动响应

预警阈值应依据第5章裂缝风险分级要素与第8章温控控制指标确定，并结合结构重要性与工况特征进行分级设置。预警机制应至少满足：

a）阈值可追溯：阈值来源、计算口径、调整记录与生效范围应留痕；

b）联动处置：预警触发后应自动生成处置工单，明确责任人、处置时限、措施建议与验证方式；

c）动态调整：当材料体系、施工方案、运行调度或环境条件发生显著变化时，应复核阈值适用性；

d）复盘改进：对频繁预警或重大预警事件应复盘，完善监测点位、阈值策略或施工控制措施，闭环流程应与图1相符合。

9.8 裂缝台账、可视化与资料归集

裂缝台账应实现标准化、数字化管理，至少包含裂缝编号、位置、类型、风险等级、监测数据关联、处置记录、验收结论与复测结果。裂缝台账应与监测系统、工单系统与质量追溯系统贯通，实现：

a）一裂一档：每条裂缝形成全链路档案；

b）过程可视化：支持按部位、时间与等级统计分布与趋势；

c）证据链完整：图像、监测曲线、处置记录与验收报告形成证据链；

d）归档与移交：施工期资料应满足竣工移交与运维接管需要，运行期资料应满足安全评价与复核要求。

10 裂缝评估、分级处置与修复加固

10.1 评估的一般规定

裂缝评估应以“查明成因—判定影响—识别趋势—确定等级—提出措施”为基本路径，形成可复核的技术结论与处置建议。评估范围应覆盖裂缝所在构件、相邻构件及其约束条件，并结合施工记录、材料批次、温控曲线、运行工况（水位、闸门启闭、渗压等）与环境作用进行综合分析。

对III级及以上裂缝，或出现渗漏、渗压异常、位移异常等伴随现象的裂缝，应组织专项评估。专项评估应形成书面报告，至少包括裂缝基本信息、检测与试验数据、成因分析、风险等级判定、处置目标与方案、验证方法与后续监测要求。

10.2 现场调查与检测要求

裂缝评估应开展现场调查与必要的检测验证。调查与检测应满足以下要求：

a）现状调查应包含裂缝几何特征（位置、走向、宽度、长度、深度或贯穿性判断）、渗漏特征（渗水点、渗水形态、渗水量及其与水位变化关系）、表面劣化特征（起砂、剥落、冲磨、冻融损伤等）以及周边构造与施工缝、伸缩缝、预埋件分布情况；

b）裂缝发展趋势应结合历史测量记录、在线监测数据与图像识别结果进行判识，并与第9章监测数据质量要求一致；

c）必要时应采用无损检测或局部取样验证裂缝深度、贯穿性与内部缺陷状况，可选用超声、回弹、地质雷达等方法；对关键部位可采用钻孔取芯或开槽检查进行复核，但应采取防渗与结构保护措施；

d）涉及抗渗与渗流风险的裂缝，应结合渗压、渗流量、渗漏点变化及运行工况进行关联分析，必要时开展局部水压试验或渗流通道判别。

检测与复核结果应纳入裂缝台账并形成证据链，与图1所示闭环流程中的“评估分级—预警响应—处置修复—效果验证”环节贯通。

10.3 风险等级复核与处置目标确定

裂缝处置前应复核风险等级并明确处置目标。处置目标应至少包括以下一种或多种：

a）抗渗目标：封堵渗流通道、降低或消除渗漏，控制渗压异常；

b）结构目标：恢复或提升结构整体性、刚度或承载能力，抑制裂缝继续扩展；

c）耐久目标：阻隔侵蚀介质进入、改善表面防护，降低钢筋锈蚀与冻融剥落风险；

d）运维目标：形成可监测、可维护的状态，明确后续监测频次与阈值。

处置目标应与第5章裂缝控制指标一致，并与第9章预警阈值及后续监测策略联动。

10.4 处置原则与响应要求

裂缝处置应遵循“先止水、后修复、再加固”的总体策略，并坚持分级处置、对症施治与可回退原则：

a）I级裂缝以观察与表面防护为主，重点防止早期失水与表面劣化，必要时进行表面封闭处理并持续监测；

b）II级裂缝应在分析成因基础上采取封闭、灌浆试验段或局部修补等措施，并对温控、约束或运行工况引发因素进行纠偏；

c）III级裂缝应制定专项治理方案，明确灌浆材料与工艺参数、止水与封闭构造、必要的局部加固措施，并设置效果验证与复测要求；

d）IV级裂缝应启动应急响应，必要时采取限载、限水位、停运检修等措施，并实施加固或结构处理，处置过程应强化监测与审计留痕。

处置响应应形成工单化管理，处置闭环流程应与图1相符合。

10.5 修复处置方法选择与适用性要求

裂缝修复方法应结合裂缝是否活动（开合变化）、是否渗漏、裂缝宽度与深度、构件受力状态、环境作用与施工可达性综合确定。典型方法与适用性可按表3选择。表3为通用建议，具体材料与参数应经现场试验段验证后确定。

表3 裂缝修复加固方法选择与适用性

方法类别	典型工艺	适用情形	关键控制要点
表面封闭	开槽嵌缝、涂覆封闭、防护层	稳定表面裂缝、无明显渗漏	基面处理；材料耐水耐久；封闭连续性

表3　裂缝修复加固方法选择与适用性（续）

方法类别	典型工艺	适用情形	关键控制要点
低黏度灌注	环氧灌注	结构性裂缝、需恢复整体性且无持续渗水	干燥条件；灌注压力控制；灌后固化与验收
止水灌浆	聚氨酯等化学灌浆	有渗漏或需快速止水的裂缝	先止水后结构修复；浆材反应控制；分段分次
水泥基灌浆	水泥或微细水泥灌浆	裂缝与孔隙连通、需充填的部位	浆液细度与可灌性；压力与扩散半径；回浆判定
局部补强	外包、粘贴、加密锚固等	裂缝伴随承载或刚度不足风险	受力复核；锚固可靠；与防渗体系兼容
结构加固	外部预应力、结构改造等	重大裂缝或需显著提升整体抗裂能力	专项设计与论证；施工风险控制；长期监测

10.6　典型修复工艺控制要求

10.6.1　表面封闭与防护

表面封闭前应清理裂缝及周边基面，去除松散层、油污与浮浆。封闭材料应满足耐水、耐久与环境适应性要求，并与后续防护层体系兼容。对冻融、磨蚀或化学侵蚀环境，应同步配置表面防护措施，避免裂缝处置后因环境作用再次劣化。

10.6.2　化学灌浆止水

对渗漏裂缝宜优先采用化学灌浆止水。灌浆应进行试验段验证，确定孔距、孔深、注浆压力、浆材用量与凝胶时间等参数。灌浆过程中应控制压力与注浆速率，避免抬升、串浆或诱发新的裂缝。止水完成后应进行复测与观察，必要时再实施结构性灌注或封闭。

10.6.3　环氧灌注修复

环氧灌注适用于需恢复结构整体性的裂缝。灌注前应确认裂缝干燥或满足材料施工条件，并对渗漏进行有效止水。灌注宜分段分序实施，确保灌满与有效粘结。灌后应按规定养护并进行效果验证。

10.6.4　水泥基灌浆充填

水泥基灌浆适用于裂缝与孔隙连通、需充填加密的部位。浆材应满足可灌性与稳定性要求，必要时采用微细水泥或复合浆材。灌浆应控制水灰比、压力与扩散范围，避免离析与沉降。灌浆结束应进行回浆与压力稳定判定，并保留完整记录。

10.6.5　局部补强与结构加固

当裂缝与受力不足、变形异常或结构整体性不足相关时，应进行受力复核并采用补强或加固措施。加固方案应与防渗体系、运行工况与可运维性协调，并设置监测点位与长期观测要求，确保加固效果可验证。

10.7　处置效果验证与验收要求

裂缝处置后应开展效果验证，验证内容应至少包括：

a）外观与封闭连续性检查：封闭层、补强层完整无脱粘、无空鼓、无新增裂缝；

b）抗渗与止水验证：渗漏点变化、渗漏量变化、渗压变化及其与水位工况关联性，必要时开展局部水压或通水验证；

c）几何特征复测：裂缝宽度、开合量与发展速率复测；

d）结构与耐久性验证：对结构性裂缝可采用无损检测或局部取样验证灌注密实与粘结情况；对耐久性要求高的部位应验证防护体系有效性。

处置效果验证资料应归入裂缝“一裂一档”台账，并形成闭环结论；闭环流程应与图1相符合。

10.8 处置后监测与复发防控

裂缝处置后应制定复测与监测计划。对III级及以上裂缝，宜在处置后设定观察期，并结合工况变化（涨落水位、温度骤变、启闭频繁）进行加密观测。若监测显示裂缝继续发展、渗漏复发或出现新的伴随异常，应重新开展评估分级并调整处置策略，形成持续改进闭环。

11 质量检验与资料归档

11.1 质量检验要求

裂缝防治质量检验应覆盖设计控制落实、材料与配合比执行、施工过程温控与养护、监测数据与台账管理、裂缝处置材料与工艺、处置效果验证等内容。检验应以关键控制点为主线，重点核查：

a）关键温控指标（入仓温度、最高温度、内外温差、降温速率等）是否满足控制要求；

b）施工缝、伸缩缝与止水构造等薄弱环节是否按规定施工并检验合格；

c）裂缝监测与巡检记录是否完整，裂缝台账是否实现“一裂一档”；

d）裂缝修复加固材料进场检验、试验段验证与施工记录是否齐全；

e）处置后复测与观察结果是否满足处置目标与控制指标。

11.2 验收程序与判定要求

裂缝防治验收宜分为过程验收与结果验收：

a）过程验收：对温控措施实施、养护连续性、监测点位安装与数据采集、裂缝处置试验段及关键工序实施过程进行验收；

b）结果验收：对裂缝处置后外观质量、封闭连续性、止水效果、裂缝发展趋势与必要的结构/耐久性验证结果进行验收。

对III级及以上裂缝处置，验收应形成专项验收资料，明确处置目标、实施过程、验证方法与结论。验收判定应以控制指标达标与趋势稳定为原则；若不满足，应明确整改措施并重新验证，直至闭环完成，闭环逻辑应与图1相符合。

11.3 智慧化数据与台账验收要求

智慧化监测与管理系统相关资料应纳入验收范围，至少核查：

a）监测点位布设与编号是否与方案一致，传感器安装记录与基线校准记录是否齐全；

b）数据质量控制机制是否有效；

c）预警阈值与处置联动机制是否可用，工单闭环记录是否完整；

d）裂缝台账是否与监测数据、图像证据、处置记录与验收结论关联一致。

11.4 资料归档与移交要求

裂缝防治资料应形成完整证据链并按工程档案要求归档，资料宜至少包括：

a）设计阶段：裂缝控制目标、温控设计参数、构造与配筋控制要点、监测接口要求；

b）材料与配合比：原材料检验报告、试配与验证资料、配合比变更记录；

c）施工过程：温控措施实施记录、温度监测曲线、浇筑与养护记录、施工缝与止水构造检验记录；

d）监测与识别：监测点位清单、巡检记录、图像资料、数据质量报告、预警与工单闭环记录；

e）评估与处置：裂缝评估报告（如适用）、处置方案、试验段报告、施工记录、材料合格证明；

f）效果验证与验收：复测数据、止水验证记录、验收报告与整改闭环记录；

g）运维交接：后续监测计划、阈值建议、维护要点与风险提示清单。

资料宜实现数字化归档，数据文件、图像文件与报告文件应保持编号一致并可检索；裂缝台账应作为核心索引文件，支撑运行期的持续监测与复发防控。

12 运行维护与持续改进

12.1 运行期巡检与监测要求

运行期应建立裂缝巡检与监测制度，按结构重要性与风险等级确定巡检频次与监测配置。对关键部位、既往III级及以上裂缝处置部位、抗渗控制区、接缝与施工缝集中区、闸门与消能防冲结构等应加密巡检，必要时采用在线监测与图像识别辅助。

运行期巡检与监测应至少包括：

a）裂缝几何特征复测：宽度、长度、开合量变化及其与季节温差、水位变化的关联；

b）渗漏与渗压观测：渗漏点形态与渗漏量变化，渗压曲线与水位工况关联；

c）表面劣化检查：冻融剥落、冲磨损伤、碳化与侵蚀迹象等；

d）伴随变形观测：位移、沉降、接缝变形等与裂缝演化的关联性；

e）资料更新：巡检记录、照片证据与裂缝台账更新，形成可追溯链条。

12.2 预警响应与处置闭环

运行期应维持预警响应机制，预警阈值与响应等级应与第5章风险分级及第9章预警联动机制一致。预警触发后应形成工单，明确处置责任人、处置措施、验证方法与关闭条件。对出现以下情况的，应及时启动专项评估：

a）裂缝宽度或开合量增长速率显著上升；

b）新增渗漏或渗漏量明显增加，且与水位变化呈强相关；

c）伴随渗压异常或位移沉降异常；

d）处置后裂缝复发或出现同类裂缝群；

e）极端工况（快速涨落水位、极端气温、地震或异常荷载）后裂缝状态异常。

12.3 阈值复核与动态调整

运行期预警阈值与风险分级判定规则应定期复核，并在以下情形下开展动态调整：

a）运行工况发生变化，如调度水位范围扩大、启闭频次显著增加；

b）环境作用显著变化，如寒潮频繁、冻融次数增加或水质侵蚀性增强；

c）监测系统更新或监测点位调整导致数据基线变化；

d）处置策略或结构加固措施实施后，结构响应特征发生变化。

阈值调整应保留依据、审批记录与生效范围，并在平台中留痕可审计，确保阈值可追溯。

12.4 处置维护与复发防控

运行期对已处置裂缝应实施维护管理，重点关注封闭材料老化、灌浆体劣化、接缝止水失效与表面防护层损伤等。对发现的缺陷应及时修补，并纳入台账闭环。对复发裂缝应重新开展评估分级，明确复发原因，并优化处置策略，必要时开展结构性加固。