

张宇, 张志伟, 徐强, 等. 盐浸-干湿-冻融耦合作用下混凝土坝强震开裂机理[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 158-165. ZHANG Y, ZHANG Z W, XU Q, et al. The mechanism of strong seismic cracking of concrete dams under the coupled action of salt immersion, dry-wet cycle, and freeze-thaw cycle[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 158-165. (in Chinese)

# 盐浸-干湿-冻融耦合作用下混凝土坝强震开裂机理

张宇<sup>1</sup>, 张志伟<sup>1</sup>, 徐强<sup>2</sup>, 张雪<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学黑龙江省高校防灾减灾与防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;  
2. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为探究混凝土坝在盐浸侵蚀、干湿循环、冻融循环因素影响下的强震破坏规律, 通过材料劣化试验和数值模拟方法开展大坝强震开裂机理研究。针对坝体不同位置开展盐溶液侵蚀、干湿循环以及冻融循环劣化试验, 基于材料试验结果, 构建混凝土重力坝扩展有限元模型, 模拟混凝土材料劣化前及劣化后混凝土坝强震开裂破坏情况。结果表明: 多因素耦合作用导致混凝土材料劣化, 强震作用下会降低大坝承载能力, 增加大坝倒塌破坏风险。考虑混凝土多种劣化因素影响, 所得结论可用于高寒地区混凝土坝的抗震设计。

**关键词:** 混凝土坝; 盐溶液侵蚀; 冻融循环; 干湿循环; 破坏模式

**中图分类号:** TV642.3; TV41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0021

相对于气候温和地区, 高海拔寒冷或高纬度寒冷地区的大坝建设的数量和规模相对较小, 在特种混凝土制备与施工技术、表面防护与安全监测等技术方面仍然存在短板<sup>[1-6]</sup>。在高寒地区建设混凝土坝, 大坝在运营期内无法避免地受到盐溶液侵蚀、干湿循环、冻融循环等影响, 其抗震安全值得深入研究。

高寒地区的环境具有平均气温低、温差大、极端天气较多、辐射强、大风、干燥等特点, 这些环境因素导致混凝土劣化, 进而影响结构的抗震安全。一些学者在如何制备高抗冻、高强度、高抗裂性能混凝土的方法上开展研究。甘轶凡等<sup>[7]</sup>、高小峰等<sup>[8]</sup>研究低热水泥混凝土干燥养护下的抗压强度与劈裂抗拉强度发展规律。刘骏霓等<sup>[9]</sup>开展冻融、盐浸侵蚀及荷载耦合作用下混凝土抗冻性能研究。李雪峰等<sup>[10]</sup>研究分析了高原低气压环境对引气混凝土含气量损失、气泡间距系数变化及临界抗冻耐久性指数的影响。李庆斌等<sup>[11]</sup>将横缝张开温度作为判断横缝工作性态的重要指标。刘毅等<sup>[12]</sup>提出高寒区混凝土筑坝亟待攻克的高强高抗冻高抗裂大

坝混凝土的制备与施工质量控制、施工运行全过程防裂、表面耐久防护与安全监控三大关键难题。混凝土的性能较难同时兼顾以上要求, 这方面的挑战仍然较大, 如加入引气剂提高材料抗冻性的同时也会降低材料的强度。马睿等<sup>[13]</sup>对高寒地区混凝土坝施工过程防裂方面开展研究, 将温控防裂和大坝结构缝的工作状态联系起来, 提高温控效率。赵卫等<sup>[14]</sup>、张梦中等<sup>[15]</sup>、罗广衡等<sup>[16-17]</sup>、李帅等<sup>[18]</sup>发现保温层的使用可以降低一部分坝体温度荷载, 但对保温材料的耐久性提出了更高的要求, 特别是上下游水位变化区, 保温层的冰拔破坏将导致此位置坝体开裂破坏。白银等<sup>[19]</sup>研究了混凝土在冻融循环和水流冲刷耦合作用下的损伤进程。冯博等<sup>[20]</sup>对不同水胶比、粉煤灰掺量和含气量的高性能混凝土进行氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下的耐久性试验, 建立了氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下的高性能混凝土质量预测衰减模型。张宇等<sup>[21-22]</sup>研究了紫外线辐照和冻融循环双因素影响下的混凝土劣化规律。综上, 高寒地区大坝在运营周期内, 土工材料受到冻融循环、库水侵蚀、干湿循环、紫外线辐照

收稿日期: 2023-07-12 修回日期: 2023-11-05 网络出版时间: 2024-02-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240219.0950.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52192672)

作者简介: 张宇(1984—), 男, 黑龙江大庆人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构灾变控制研究。E-mail: zhangyu@nepu.edu.cn

通信作者: 徐强(1982—), 男, 黑龙江大庆人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构动力计算研究。E-mail: xuqiang528826@dlut.edu.cn

等因素的影响。目前采取的技术手段只能进行监测、减轻或者延缓环境因素对材料性能劣化的影响,无法消除影响,所以开展考虑混凝土劣化条件下混凝土坝安全性能研究是必要的。

研究以位于高海拔地区的卡拉混凝土重力坝为例(海拔 2 450 m,坝高 126 m),通过试验的方法研究冻融循环、盐溶液侵蚀、干湿循环共 3 种因素耦合作用对混凝土性能劣化的影响。在此基础上构建卡拉重力坝扩展有限元数值模型,从大坝的起裂加速度、应力以及裂纹发展分布规律等方面展开研究,所得结论有助于考虑混凝土劣化条件下的混凝土坝抗震设计。

## 1 混凝土材料劣化试验

### 1.1 试验准备

根据《水工混凝土试验规程(DL/T 5150—2022)》,制备 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试件用于测试盐浸、干湿循环、冻融循环因素对混凝土动态压缩性能试验的影响,制备若干 100 mm×100 mm×400 mm 试件测试混凝土的质量损失、动弹性模量以及断裂能。所用水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥,试验用水为自来水。混凝土试样的配合比见表 1。

表 1 C15 混凝土试样配合比  
Tab. 1 Mix ratio of C15 concrete samples

材料	添加剂/%		水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	石子/(kg·m <sup>-3</sup> )		水/ (kg·m <sup>-3</sup> )
	减水 剂	引气 剂				5~20 mm	20~40 mm	
用量	0.90	0.05	65	97	668	434	579	84

### 1.2 试验设备

冻融循环试验采用 HC-HDK9/Y 型混凝土快速冻融试验机,见图 1。盐浸试验采用 NELD-VS830 混凝土抗硫酸盐循环试验机。加载设备采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的电液伺服万能试验机。

### 1.3 试验工况

考虑不同区域混凝土劣化影响因素的不同,将坝体划分为 4 个区域:区域 1 为坝体内部区域,未考虑劣化因素影响;区域 2 为大坝上游正常蓄水位至上游死水位,此区域混凝土受盐浸-干湿-冻融循环因素影响;区域 3 为上游死水位至坝底,仅受库水盐溶液侵蚀区域;区域 4 为正常蓄水位以上、坝顶以及下游坝面,此区域混凝土受冻融循环因素影响。

根据以上划分区域设计试验,具体试验方案见表 2。第一组(I)为空白对照试验,对应区域 1,制作了边长 150 mm 的立方体试件 3 件以及 100 mm×100 mm×400 mm 长方体试件 3 件,分别测试了混凝土的弹性模量、密度、抗压强度以及断裂能;第二组(II)为盐浸侵蚀-干湿循环-冻融循环试验,对应区域 2,制作了边长 150 mm 的立方体轴心受压破坏试件 12 件,100 mm×100 mm×400 mm 长方体试件 12 件,测试参数同上;第三组(III)为复合盐侵蚀试验,对应区域 3,制作了边长 150 mm 的立方体轴心受压破坏试块 12 件,100 mm×100 mm×400 mm 长方体试件 12 件,测试参数同上;第四组(IV)为混凝土冻融循环劣化试验,对应区域 4,制作了边长 150 mm 的立方体轴心受压破坏试件 12 件,100 mm×100 mm×400 mm 长方体试件 12 件,测试参数同上。



图 1 冻融循环机

Fig. 1 Freeze-thaw circulator

查阅雅砻江水电站环境影响报告书<sup>[23]</sup>,得到水中各离子的含量并配置盐溶液。为了缩短试件破坏时间,在试验室配置 10 倍质量分数的复合盐溶液,复合盐溶液的配合比见表 3。工况 II 的具体方案如下:将混凝土试件先后放入抗硫酸盐循环试验机和冻融试验机中进行盐浸-干湿-冻融循环试验,先进行 4 次盐浸+干湿循环(浸泡 15 h,在 80 ℃±5 ℃ 下烘干 9 h,此为 1 次盐浸-干湿循环),用时 4 d,再进行 25 次冻融循环(在-18 ℃±2 ℃ 下冻结 2 h,在 5 ℃±2 ℃ 下融化 2 h,为 1 次冻融循环),用时 4 d。1 次完整的盐浸-干湿-冻融循环用时 8 d,即 1 次大循环,每次大循环结束后测混凝土的抗压强度、质量损失和动弹性模量。当达到下面 3 种情况之一时终止试验:完成 4 次大循环;动弹性模量下降 40%;质量损失 5%。工况 III 盐浸侵蚀试验方法同工况 II 相关部分,每 4 次循环后测量动弹性模量和质量损失;16 次循环后进行动力加载试验。工况 IV 冻融循环试

验方法同工况 II 相关部分,每 25 次循环测量动弹性模量和质量损失,100 次循环后进行动力加载试验。以上试验均通过位移加载,动态加载速率为  $10^{-3}/s$ 。

表 2 混凝土劣化试验工况

Tab. 2 Concrete deterioration test working condition

工况号	盐浸侵蚀-干湿循环-冻融循环	150 mm×150 mm×150 mm立方体试件/件	100 mm×100 mm×400 mm长方体试件/件
I	0次+0次+0次	3	3
II-1	4次+4次+25次	3	3
II-2	8次+8次+50次	3	3
II-3	12次+12次+75次	3	3
II-4	16次+16次+100次	3	3
III-1	4次+0次+0次	3	3
III-2	8次+0次+0次	3	3
III-3	12次+0次+0次	3	3
III-4	16次+0次+0次	3	3
IV-1	0次+0次+25次	3	3
IV-2	0次+0次+50次	3	3
IV-3	0次+0次+75次	3	3
IV-4	0次+0次+100次	3	3

表 3 复合盐溶液的配比

Tab. 3 The ratio of the composite salt solution

侵蚀溶液	盐用量/(g·L <sup>-1</sup> )			溶液质量分数/%	备注
	NaCl	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
A	0	0	0	0	自来水
B	0.02	0.15	0.90	0.11	基准盐溶液
C	0.20	1.50	9.03	1.06	浓盐溶液

混凝土断裂能作为材料的一种断裂指标,是非常重要的断裂常数,可用于判断混凝土结构产生的宏观裂纹是否会导致混凝土结构失去承载力,是准确预测混凝土断裂性能的重要保证,其值越高则混凝土的抗裂性能越好。为此,制备了带预制裂纹的混凝土梁进行三点弯曲试验,测量混凝土劣化前后的断裂能,试验动态加载速率为  $10^{-3}/s$ 。

### 1.4 试验结果

图 2 为试块试验前后外观情况的对比,从图中可以看出在盐浸侵蚀、干湿循环、冻融循环共 3 种因素耦合作用下,混凝土试件破坏发展快,破坏程度较严重。最初混凝土表面平整,随着试验的进行,第一次循环后,混凝土表面逐渐出现许多小坑蚀。第二次循环后,坑蚀孔洞变大,表面胶凝材料流失,表面细骨料外露。且随着试验次数的增加,细骨料开始逐渐分层剥落,试件表面出现很多不规则裂纹,试件棱角部位因强度低,较其他部位脱落严重。经过 4 次大循环粗骨料已明显暴露于表面,剥离情况十分严重。在冻融循环作用下,混凝土试件破坏外观变化与 3 种因素试验基本一致。在盐浸侵蚀作用下,由于试件表面吸附白色盐晶体,盐渍清晰可见。随着试验的进行,试件发生体积膨胀,试件表面混凝土剥落。



试验顺序为从左至右,从上至下。

图 2 试验前后外观变化

Fig. 2 Apparent change before and after testing

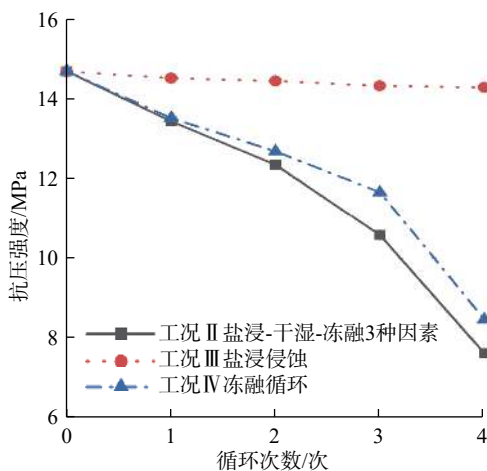
由于动力加载时混凝土拉伸试验所得数据离散性较大,开展混凝土压缩试验,依据抗震规范,混凝土的动态抗拉强度标准值取动态抗压强度标准值的10%。试验前后混凝土各参数见表4,表中抗拉强度和抗压强度是根据《水工混凝土试验规程(DL/T 5150—2022)》,将试验所得标准立方体强度换算为轴心强度。需要说明的是,表4中的动弹性模量使用混凝土动弹性模量测定仪测定,试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,以此反映劣化因素对混凝土构件动力特性的影响。

表4 劣化前后混凝土力学参数

Tab. 4 Mechanical parameters of concrete before and after deterioration

工况	动弹性模量/ GPa	质量密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断裂能/ (N·m <sup>-1</sup> )
I	28.60	2 550.00	14.69	1.47	205.00
II-4	15.54	2 304.95	7.62	0.76	160.52
III-4	22.31	2 527.05	14.29	1.43	177.94
IV-4	19.00	2 407.20	8.47	0.85	170.56

图3和图4分别为试验前后试件的抗压强度和断裂能。试验研究表明,盐浸侵蚀、干湿循环、冻融循环3种因素均在不同程度上导致混凝土劣化,力学性能降低。3种因素耦合作用下,混凝土劣化最为严重,冻融循环影响次之。

图3 试件的抗压强度  
Fig. 3 Compress strength

## 2 数值模拟

### 2.1 模型的建立

以卡拉混凝土坝5号挡水坝为研究对象,坝高96 m,坝顶宽18 m,坝底宽72.75 m,上游正常蓄水位77 m。采用ABAQUS有限元软件建立重力坝数值模型,单元类型采用4节点双线性平面应力四边

形缩减积分单元(CPS4R),模型共计23 189个单元,计算模型见图5。该模型包括一定范围的地基,坝体上下游、深度方向的地基范围取2.5倍坝高,模型中材料区划见图5。参考对寒区混凝土坝的实地调查结果<sup>[24]</sup>,冻融循环影响范围为上游正常蓄水位以上、坝顶及下游坡面,影响深度为1 m;盐浸-干湿-冻融3种因素对坝体影响范围为上游正常蓄水位至上游死水位,影响深度为1 m;盐浸对坝体影响范围从上游死水位一直延伸至坝底,没有找到卡拉大坝盐浸溶蚀深度的相关研究报告,参考其他混凝土重力坝研究结论<sup>[25]</sup>,溶蚀深度为0.29 m,为便于有限元网格剖分,本文取0.33 m。

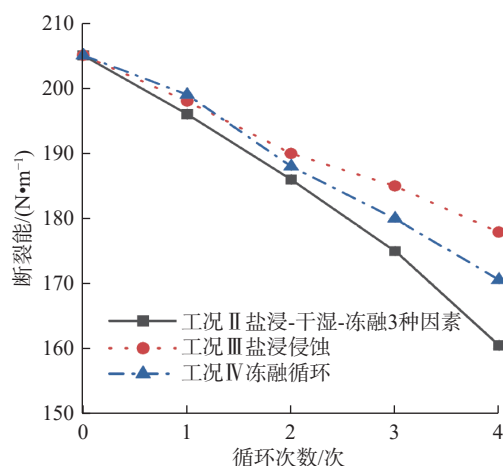
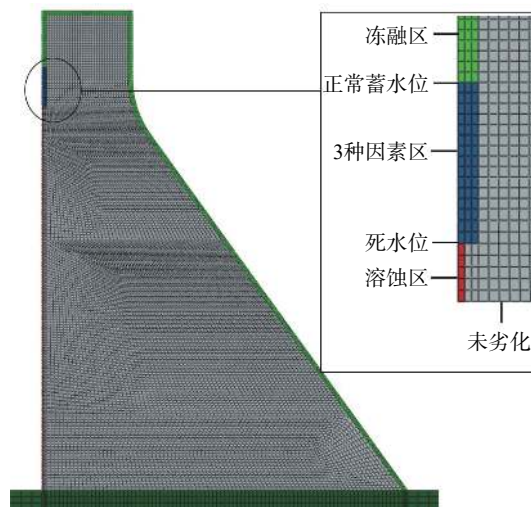
图4 试件的断裂能  
Fig. 4 Fault energy

图5 扩展有限元模型

Fig. 5 Extended finite element model

在坝基左右边界施加水平向约束,底部边界施加竖向约束。计算时大坝水位为正常蓄水位,动水压力以附加质量的形式施加;水平向地震波施加于地基左右边界,竖向地震波施加于地基地部。坝体

采用最大主拉应力准则,基岩采用 D-P 准则。瑞利阻尼取前两阶频率计算,阻尼比取 5%。坝体为混凝土材料,材料参数与上述试验相同。地基为Ⅲ类基岩,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 14 GPa,泊松比 0.20,抗剪断参数为:内摩擦因数  $f=1.05$ ,黏聚力  $c=1$  MPa。

## 2.2 地震波的选择

依据《水工建筑物抗震设计规范(GB 51247—2018)》和场地类别,确定地震动反应谱特征周期  $T_g$  为 0.20 s,设计反应谱最大值的代表值  $\beta_{max}$  为 2.00。采用人工波激励,竖向设计地震加速度代表值取水平向设计地震加速度代表值的 2/3。地震动加速度时程曲线见图 6。

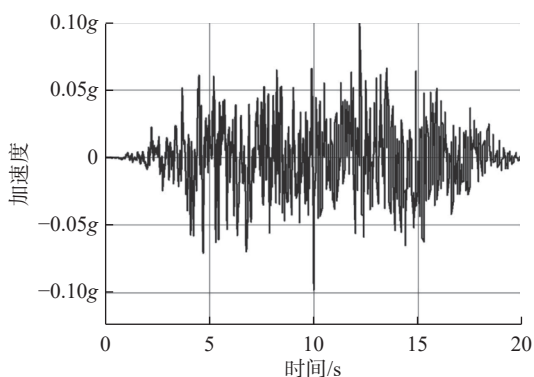


图 6 地震动加速度时程曲线

Fig. 6 Seismic acceleration time history curve

## 3 模拟结果

### 3.1 起裂加速度分析

为研究混凝土劣化对大坝起裂加速度的影响,在设计地震加速度 0.100g 基础上,每隔 0.005g 模拟大坝地震破坏情况,研究大坝破坏模式。模拟结果显示:大坝受劣化影响后,当输入水平峰值加速度为 0.105g、加震至 4.78 s 时,在大坝下游折坡处产生裂纹,其起裂加速度为 1.03 m/s<sup>2</sup>;大坝未考虑劣化影响时,当输入水平峰值加速度为 0.130g、加震至 5.22 s 时,在大坝下游折坡处产生裂纹,其起裂加速度为 1.28 m/s<sup>2</sup>。由此可知,混凝土劣化使得大坝的起裂加速度降低了 19.53%。

混凝土重力坝的结构形式导致重力坝的折坡处容易应力集中,产生大应力区域。峰值加速度为 0.105g 时重力坝下游折坡处的拉应力时程曲线见图 7。由图 7 可知,未考虑混凝土劣化影响时,虽然重力坝折坡处的拉应力大于劣化后拉应力,但仍未

达到混凝土的抗拉强度,未发生破坏;而劣化后的重力坝在较早时刻达到了混凝土的动态抗拉强度,重力坝发生拉裂破坏,拉应力得以释放。综上,混凝土劣化加重了大坝地震裂纹扩展,对重力坝抗震性能影响较大。

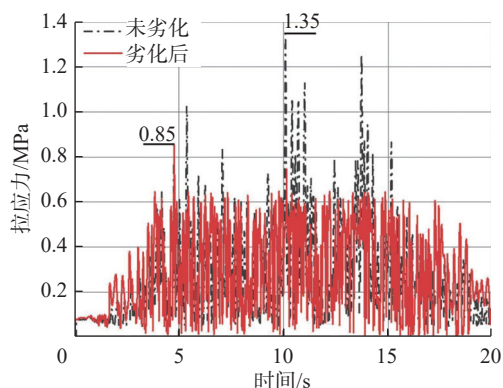


图 7 劣化前后下游折坡处拉应力时程曲线

Fig. 7 Time course curves of tensile stress at the downstream folding slope before and after deterioration

### 3.2 应力分析

地震波峰值加速度为 0.130g 时大坝起裂时刻第一主应力分布见图 8。由图 8 可知,重力坝地震开裂破坏以拉应力为主,劣化前后最大拉应力均出现在下游折坡附近,向坝体内部逐渐减弱,分布规律略有差异。劣化前重力坝最大拉应力为 1.47 MPa,劣化后最大拉应力为 0.85 MPa,受恶劣环境影响,混凝土材料力学性能下降显著。

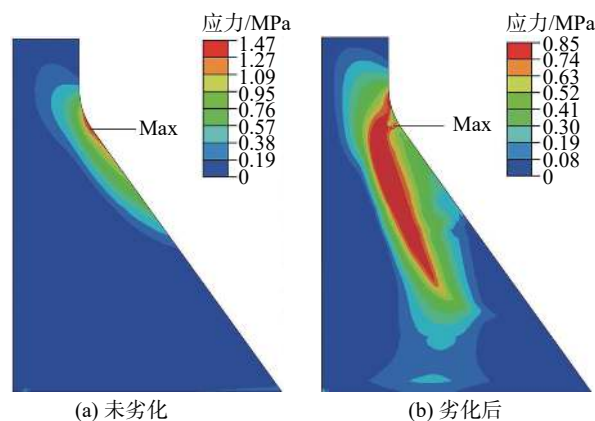


图 8 第一主应力分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of the first main stress distribution

### 3.3 裂纹发展规律

当输入地震波水平峰值加速度为 0.130g 时,得到重力坝经历盐浸侵蚀、干湿循环、冻融循环 3 种因素作用前后破坏形态见图 9。未考虑大坝劣化时,当地震波激励至 5.22 s 时,在下游折坡处产生裂纹,裂纹持续向坝体内部扩展,到一定长度时停止扩展。

考虑高寒复杂条件对坝面材料的劣化影响后,混凝土强度大幅下降,当地震波激励至 4.38 s 时下游折坡处产生裂纹,之后裂纹扩展到上游坝面,形成贯穿性裂纹,坝头倒塌破坏。高寒复杂条件下混凝土的劣化加快了裂纹的萌生与发展,对大坝整体结构稳定性造成了严重威胁。

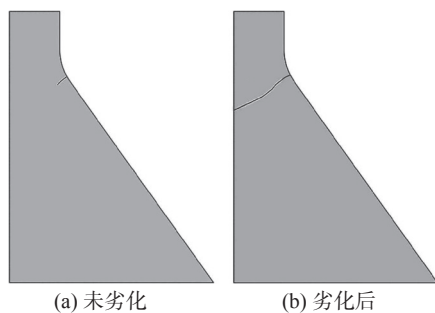


图9 大坝强震开裂破坏形态  
Fig. 9 Failure drawing of strong earthquake cracking of dam

#### 4 结论

针对恶劣环境下混凝土坝的强震破坏问题,对坝体不同位置开展考虑盐浸侵蚀、干湿循环以及冻融循环混凝土劣化试验。以卡拉混凝土坝为研究实例,利用混凝土劣化试验数据构建扩展有限元模型,分析大坝的起裂加速度、应力以及裂纹发展分布规律。研究表明:盐浸侵蚀、干湿循环、冻融循环 3 种因素均在不同程度上导致混凝土劣化,3 种因素耦合作用导致上游正常蓄水位至死水位附近混凝土劣化显著,设计时此处材料耐久性问题需特别考虑;混凝土劣化没有改变大坝强震开裂位置,但降低了大坝地震承载能力,增加了大坝发生倒塌破坏的风险。

需要说明的是,本研究仅在坝体表面 1 m 深度范围内考虑混凝土劣化的影响,这种假设也许不能充分反映坝体混凝土的劣化程度。坝体表面可使用高标号混凝土和抗冻防水涂料,针对混凝土易损位置加强监测,采取适当措施及时修复。考虑到试验周期和规模,本研究仅制备一种类型混凝土试件。尽管试验做了简化处理,所得结果仍能定性地反映混凝土坝强震开裂规律,在参考本研究结果时需考虑此点带来的影响。

#### 参考文献:

[1] 李庆斌,马睿,胡昱,等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1252-1269. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.

25.018.

- [2] 郑晓东,郝建国,李丹丹. 基于增量动力分析的重力坝抗震性能评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 184-190. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0041.
- [3] 张敬宜,李明超,张佳文,等. 基于增量动力分析与多层感知机的混凝土坝地震易损性评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 1030-1039. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0099.
- [4] 雷峥琦,刘毅,朱振洪. 高寒区混凝土坝长期运行安全监控预警方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(3): 70-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.007.
- [5] 徐强,董金凯,陈健云,等. 考虑接触问题的多边形有限元重力坝抗震断裂研究[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 211-220. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.030.
- [6] 徐强,姚文斌,陈健云,等. 考虑坝体材料参数随机性的拱坝易损性分析[J]. 人民长江, 2023, 54(12): 202-210, 224. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.12.027.
- [7] 甘轶凡,李庆斌,胡昱. 白鹤滩大坝混凝土干燥养护强度与微观结构[J]. 水力发电学报, 2022, 41(5): 42-49.
- [8] 高小峰,杨程,李庆斌,等. 龄期相关的混凝土尺寸效应断裂模型[J/OL]. 工程力学: 1-13[2023-11-05]. <https://kns-cnki-net.webvpn.nepu.edu.cn/kcms/detail/11.2595.o3.20221024.1440.136.html>.
- [9] 刘骏霓,路建国,高佳佳,等. 水工混凝土冰冻害机理及抗冻性能研究进展[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 158-165.
- [10] 李雪峰,付智,王华牢. 高原地区抗冻引气混凝土含气量设计方法研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2600-2608. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.08.010.
- [11] 李庆斌,马睿,朱贺,等. 拱坝横缝的张开温度及其应用[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 29-36.
- [12] 刘毅,杜雷功,钱文勋,等. 高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 45-52. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.03.006.
- [13] 马睿,张庆龙,胡昱,等. 混凝土拱坝温度应力与横缝性态智能控制方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 100-111.

- [14] 赵卫, 潘坚文, 王进廷, 等. 高寒区混凝土坝保温层冰拔破坏模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(10): 72-79. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.10.007](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.10.007).
- [15] 张梦中, 潘坚文, 王进廷, 等. 小湾拱坝运行期温度场反演与应力仿真分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 786-794, 813. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0082](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0082).
- [16] 罗广衡, 潘坚文, 王进廷. 瑞利波法检测混凝土表面裂缝深度的影响因素研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(9): 165-171. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.09.017](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.09.017).
- [17] 罗广衡, 潘坚文, 王进廷. 基于红外热成像的混凝土坝保温层缺陷检测方法[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(12): 71-77. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.009](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.009).
- [18] 李帅, 潘坚文, 罗广衡, 等. 溪洛渡拱坝模态参数识别[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(3): 86-95.
- [19] 白银, 叶小盛, 刘海祥, 等. 冻融循环与水流冲磨耦合作用下混凝土损伤进程[J]. *水利水电快报*, 2019, 40(11): 64-69. DOI: [10.15974/j.cnki.slsdkb.2019.11.013](https://doi.org/10.15974/j.cnki.slsdkb.2019.11.013).
- [20] 冯博, 刘青, 钱永久. 高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(5): 1083-1089.
- [21] 张宇, 张雪, 李黄河, 等. 考虑冻融和紫外线双因素影响的寒区混凝土坝抗震性能研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(1): 101-108.
- [22] 张宇, 李黄河, 王铭明, 等. 寒区混凝土劣化对重力坝抗震性能影响研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(2): 171-176. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.02.026](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.02.026).
- [23] 芮建良, 丁明明, 施家月, 等. 四川省雅砻江卡拉水电站环境影响报告书[R]. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2006.
- [24] 李守巨, 刘迎曦, 陈昌林, 等. 混凝土大坝冻融破坏问题的数值计算分析[J]. *岩土力学*, 2004(2): 189-193. DOI: [10.16285/j.rsm.2004.02.005](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2004.02.005).
- [25] 王少伟, 徐应莉, 徐丛. 基于数值模拟的混凝土坝渗透溶蚀劣化时空特征[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(1): 87-91.

## The mechanism of strong seismic cracking of concrete dams under the coupled action of salt immersion, dry-wet cycle, and freeze-thaw cycle

ZHANG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Zhiwei<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Xue<sup>1</sup>

(1. Heilongjiang Key Lab. of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In recent years, China's hydropower resource development has been steadily progressing to high altitude and cold areas. Alpine areas have more complex conditions than mild climate areas, such as large temperature differences, extremely low temperatures, strong radiation, strong wind, and dryness. These complex conditions run throughout the dam's entire life cycle of construction, water storage, and operation, directly affecting the dam's safety and durability, introducing many safety risks such as cracking to the concrete dam and putting the dam's long-term operation safety to the test. Therefore, it is necessary to explore the law of strong seismic failure of concrete dams in the whole life cycle under complex cold conditions.

The dynamic response analysis of dam is carried out by material deterioration test and numerical simulation method. Salt erosion, dry-wet cycle, and freeze-thaw cycle deterioration tests were carried out for different positions of the dam body. Through checking the environmental impact report of Yalong River hydropower station, content of each ion in the water can be obtained to configure the salt solution. To shorten the failure time of the specimen, a 10-fold concentration of complex salt solution is configured in the laboratory. The concrete specimens were successively put into the sulfate resistance cycle testing machine and freeze-thaw testing machine for salt immersion-dry and wet-freeze-thaw cycle test, first 4 salt immersion + dry and wet cycles (soaking for 15 h, drying at  $80\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 9 hours, which is a salt immersion-dry and wet cycle), taking 4 days, and then 25 freeze-thaw cycles (freezing at  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 2 h, melting at  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 2 h, for one freeze-thaw cycle), taking 4 days. A full salt-dip-wet-freeze-thaw cycle, or large cycle, takes 8 days, and the compressive strength, mass loss, and kinetic elastic modulus

of concrete are measured after each large cycle. Based on the material test results, the numerical model of gravity dam was established by ABAQUS finite element software, and the element type adopted 4-node bilinear plane stress quadrilateral reduced integral element (CPS4R), with a total of 23,189 elements in the model, and the hydrodynamic pressure was applied in the form of additional mass and artificially excited. The occurrence, development, and collapse failure of concrete dams under strong seismic stimulation before and after the deterioration of salt-immersion-wet-freeze-thaw cycles of concrete materials is simulated.

The research showed that: (1) The three factors of salt leaching erosion, dry and wet cycle, and freeze-thaw cycle all lead to concrete deterioration and reduce mechanical properties to varying degrees. The combination of three factors causes the most serious deterioration of concrete, followed by the impact of the freeze-thaw cycle. (2) In the vicinity of the normal water storage level upstream, due to the coupling of three factors, the deterioration of concrete here is significant, and its strength, the elastic modulus and the mass loss decrease. (3) The deterioration of concrete reduces the seismic bearing capacity of the dam structure, and the cracking acceleration decreases by 19.53%. (4) The deterioration of concrete materials has changed the stress distribution pattern of the dam body and even caused collapse.

When designing gravity dams in alpine regions, the durability of concrete requires special consideration. During the life cycle of a dam, it is necessary to take timely and appropriate maintenance measures for the vulnerable location of concrete.

**Key words:** concrete dam; salt solution erosion; freeze-thaw cycle; dry and wet cycle; damage mode

