

文章编号:1001-4888(2024)04-0454-09

# 盐浸-冻融-紫外线三因素影响下 寒区混凝土坝强震损伤研究\*

张宇<sup>1</sup>, 张雪<sup>1</sup>, 王舒<sup>2</sup>, 王铭明<sup>3</sup>

(1. 东北石油大学 黑龙江省寒区新能源热利用及防灾减灾重点实验室, 黑龙江大庆 163318;

2. 大庆开放大学 土木工程系, 黑龙江大庆 163311; 3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:** 为研究盐浸、冻融循环和紫外线辐照耦合作用对寒区混凝土坝的强震损伤影响,进行了三因素循环作用下的混凝土性能劣化试验和高坝抗震性能分析。根据盐浸分析结果配制高浓度盐浸液体,并根据实际情况确定冻融循环次数和紫外线辐射量,揭示盐浸-冻融-紫外线三因素与混凝土材料性能劣化之间的关联性规律;以此为基础,数值分析三因素对坝体强震破坏的影响。结果表明:恶劣环境下,混凝土材料在物理结晶膨胀破坏和化学侵蚀的相互作用下,材料性能劣化不断加深;发生强震时,盐浸-冻融-紫外线三因素改变了高坝的失效模式,降低了高坝的整体抗震性能。上述研究结果有助于深入了解恶劣环境对坝体材料力学性能的影响,并可为寒区水工结构抗震设计提供依据。

**关键词:** 混凝土坝; 寒区; 盐浸; 冻融循环; 紫外线; 抗震性能

**中图分类号:** TV32<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-099

## 0 引言

大型混凝土坝作为清洁能源的组成部分之一,在我国的经济发展中发挥着重要作用。寒区大坝的整个生命周期内混凝土材料不可避免地会受到库水盐浸、冻融循环以及紫外线辐照等多因素的影响而劣化。坝体不同部位材料劣化的主要因素不同:对于上游未接触库水位置坝体及下游坝体,主要受到冻融循环和紫外线辐照双因素耦合影响;上游水位变化位置坝体受到盐浸、冻融循环和紫外线辐照等因素耦合影响;上游死水位以下受到盐浸因素影响。劣化后的混凝土材料既会影响大坝整体的动力特性,又会加重坝体局部强震破坏程度,因此,开展寒区混凝土坝强震破坏研究时,考虑盐浸-冻融-紫外线三因素的影响是必要的。

冻融循环对大坝的上游部分区域和下游均有影响,将会引起混凝土内部的不均匀膨胀,降低混凝土结构的耐久性。很多学者研究了冻融循环影响下混凝土的劣化机理。白卫峰等<sup>[1]</sup>通过压缩试验方法建立考虑冻融劣化效应的混凝土单轴压缩统计损伤本构模型,预测冻融环境下混凝土的损伤,但该研究未开展拉伸试验研究。候春平等<sup>[2]</sup>以应变速率和冻融劣化为主控因素,通过多工况应力-应变曲线的拟合分析,构建混凝土动态轴压本构模型,该模型较适用于 $-15^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 的低温环境,有一定局限性。田威等<sup>[3]</sup>研究了冻融环境下混凝土材料的弹性模量、抗压强度、应力应变曲线等力学特性的变化规律。大坝的上游部分区域和下游在全寿命周期内还将受到紫外线辐照的影响,现阶段,考虑冻融和紫外线双因

\* 收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52269026)

通信作者: 张宇(1984-),男,博士,副教授,硕士生导师。主要从事水工结构抗震试验研究。Email: zhangyu@nepu.edu.cn

王舒(1989-),女,硕士,讲师。主要从事防灾减灾工程及防护工程研究。Email: gravitydam@163.com

素对混凝土性能劣化影响的研究较少。贾飞等<sup>[4]</sup>建立了考虑紫外线辐射作用的水工混凝土冻融循环损伤模型。王建有等<sup>[5]</sup>研究了紫外线对混凝土碳化的影响。张宇等<sup>[6]</sup>在前期已开展了冻融循环和紫外线双因素对寒区混凝土坝抗震性能影响的研究。混凝土坝上游库水侵蚀劣化影响同样不能忽略。王振山等<sup>[7]</sup>通过测定混凝土试件表面裂缝、有效孔隙率、吸水率及质量等数据,提出了混凝土氯盐侵蚀强度退化模型。由于水位高程和温度的变化,水坝上游部分区域会受到冻融循环和盐浸侵蚀的双重影响,一些学者通过试验的方法研究了盐浸侵蚀和冻融循环耦合作用下的混凝土劣化模型<sup>[8-10]</sup>。除此之外,还有学者在冻融-盐浸因素的基础上考虑了干湿循环因素对混凝土劣化的影响,采用电镜扫描与化学成分测定的方法揭示混凝土腐蚀破坏的机理<sup>[11-12]</sup>。目前,未见关于盐浸-冻融-紫外线耦合作用下混凝土材料耐久性研究,更没有在此基础上的混凝土坝强震损伤分析。考虑寒区混凝土坝不同位置不同劣化影响因素的实际情况,开展混凝土耐久性试验及其结构抗震研究是必要的。

本文以试验的方法,通过分析混凝土试件破坏形态、质量损失率、动弹性模量损失率和峰值强度等情况,研究盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用对混凝土性能劣化的影响。在试验基础上,以位于吉林省的丰满混凝土坝为例,探究恶劣运行环境对寒区既有混凝土大坝强震失效破坏的影响,所得结论有助于寒区百米级混凝土坝的抗震设计。

## 1 试验

丰满水电站位于吉林省吉林市,是我国北方地区规模较大的水电站,安全运行意义重大。丰满大坝所处自然环境恶劣,盐浸、冻融和紫外线等因素均会加速坝体材料的劣化。三因素耦合作用对坝体相应位置处混凝土的劣化影响,有可能改变大坝强震的失效路径和承载能力,威胁大坝安全,有必要开展三因素耦合作用下的混凝土耐久性试验。

### 1.1 混凝土配合比

依据丰满大坝某坝段实际情况配制混凝土试件,具体配合比见表1。其中,水泥为抚顺水泥股份有限公司生产的浑河42.5中热硅酸盐水泥;粉煤灰为吉林龙华热电厂生产的I级粉煤灰;砂和石子均由工地购入,砂细度模数2.8,石子筛分成5mm~20mm和20mm~40mm备用;减水剂和引气剂分别为江苏博特新材料有限公司生产的JM型萘系缓凝高效减水剂和GYQ型引气剂。

表1 混凝土试件配合比(单位:kg/m<sup>3</sup>)

Tab. 1 Mix ratio of concrete sample (unit: kg/m<sup>3</sup>)

砂	5mm~20mm 石子	20mm~40mm 石子	水泥	粉煤灰	自来水	减水剂	引气剂
725	525	788	97	97	93	1.75	0.19

### 1.2 盐浸液体的配制

丰满水电站水质为重碳酸钙钠水,在压力水的作用下,混凝土材料中Ca(OH)<sub>2</sub>的液相-固相平衡被打破,晶体溶解,随渗水从混凝土材料中析出,对丰满大坝的混凝土材料具有溶出性侵蚀<sup>[13]</sup>。根据文献[13]中丰满水库水的理化分析,确定HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>等离子含量,并以此作为基准。盐浸液体为碳酸氢盐、氯盐和硫酸盐的混合液体,为进行混凝土盐浸加速试验,盐浸液体各种离子含量为基准溶液的50倍,盐浸液体各离子含量见表2。选用自来水为试验用水,水中各种离子含量相对较少,忽略不计。

表2 盐浸液体组分和质量分数(单位:g/L)

Tab. 2 Composition and mass fraction of corrosion solution (unit:g/L)

离子种类	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
含量	0.27	0.61	2.63	0.27	0.30

### 1.3 试验方案

目前关于混凝土盐浸-冻融-紫外线循环试验的文献较少,也没有相关规范。作者前期已经开展了相关混凝土紫外线照射试验、冻融循环试验以及考虑紫外线和冻融双因素试验<sup>[6]</sup>,在此基础上,为了便

于试验结果对比分析,本文试验方案如下:(1)制作若干长方体试件(100mm×100mm×400mm)用于测试试件的质量、动弹性模量的变化情况,以及多组立方体试件(150mm×150mm×150mm)用于开展混凝土单轴压缩破坏试验,养护箱标准养护至规定龄期。(2)测试获得不考虑盐浸因素、冻融循环因素以及紫外线因素影响的对照组数据。(3)将试件浸泡 96h 后,放到 HDR-28 型全自动低温冻融试验机的盐浸液体中常温全浸没 600h,然后冻融循环 25 次(试件中心的最低温度控制在 $-17^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,最高温度控制在 $8^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,单次冻融循环历时4.0h),再将试件放在辐照强度为 $207\text{W}/\text{m}^2$ 的混凝土老化箱中进行紫外线照射 1440h,以上即一次完整的盐浸-冻融-紫外线循环试验。(4)如此循环试验,当试件动弹性模量下降 40%以上或者试件质量损失率大于 5%时停止试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土试件破坏形态

同一长方体试件在盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用下的表观变化如图 1 所示。从图中可以看出,表面平整的混凝土试件随着盐浸-冻融-紫外线循环试验的进行,表面细骨料脱落,出现孔洞和不规则微裂纹,并逐渐扩大或深入试件内部;试验后期试件表面粗骨料暴露,发生体积膨胀;试件棱角部位由于物理作用和化学反应较强,又是应力集中区域,脱落情况较其他部位更严重。相较于单因素或双因素的影响<sup>[6]</sup>,混凝土试件在三因素共同作用下破坏速度更快,破坏程度更严重。

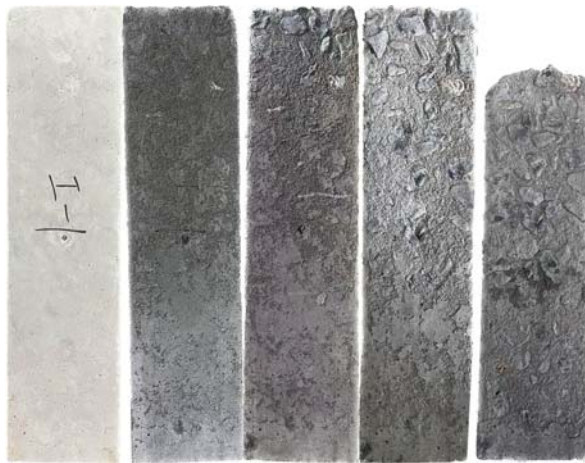


图 1 同一试件不同工况后的形态

Fig. 1 Morphology of the same specimen under different working conditions

### 2.2 混凝土的质量损失率

质量损失可导致混凝土密度的降低,进而改变高坝动力特性。盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用后混凝土的质量损失率见表 3。从表中可以看出,随着试验的进行,混凝土试件的质量在逐步降低;在试验初期,试件质量损失较小,此时对应的混凝土试件外部损伤较小;直至第四个循环,由于混凝土试件表面层的大量剥落,其质量损失率大幅上升,在经过 4 次大循环后质量损失率最高达 8.1%,平均质量损失率为 7.8%,达到停止试验标准。

表 3 盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用后混凝土质量损失率

Tab. 3 Mass loss rate of concrete under salt soaking, freeze-thaw and ultraviolet cycles

循环次数	试件 I	试件 II	试件 III	试件 IV
1	0.018	0.018	0.017	0.019
2	0.030	0.032	0.030	0.034
3	0.041	0.039	0.043	0.045
4	0.078	0.081	0.076	0.078

### 2.3 混凝土的动弹性模量损失率

混凝土动弹性模量的变化同样会影响高坝结构的动力特性。不同因素影响下混凝土的动弹性模量如图2所示。由图可知,混凝土试件动弹性模量均随着劣化试验的开展而不断降低。第一次大循环后,试件动弹性模量下降速度较缓慢,这时多因素影响尚不明显;随着循环次数的增加,混凝土试件动弹性模量的变化程度显著不同。循环次数相同时,三因素作用下试件相对动弹性模量下降程度较其他两种工况更加严重;第四次大循环后,分别下降至76.02%、63.14%和50.67%。

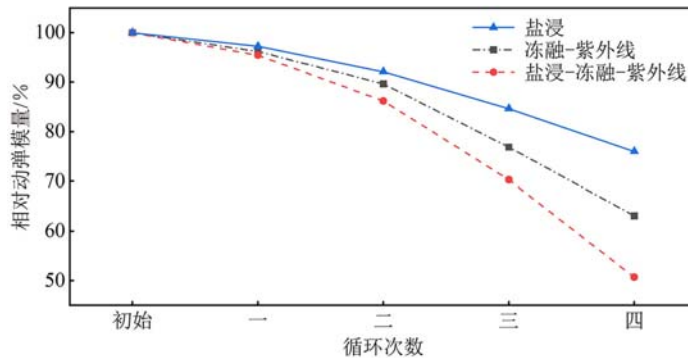


图2 3种工况作用后混凝土相对动弹性模量

Fig. 2 Relative dynamic elastic modulus of concrete under three working conditions

### 2.4 混凝土强度变化

盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用下混凝土试件峰值强度见表4。在盐浸-冻融循环-紫外线三因素共同作用下,混凝土试件峰值强度随着循环次数的增加明显降低。混合盐浸液体不断渗入混凝土的孔隙中,在冻融循环和紫外线辐照的影响下,会因为结冰膨胀对混凝土产生物理破坏;同时,盐浸液体化学反应时,如生成结晶水化物的过程中也会发生体积膨胀;以上物理作用和化学反应同时发生,所产生的膨胀会进一步加大混合盐浸液体的渗入,进而加剧混凝土劣化。4次大循环后,试件峰值强度最高折减47.48%,力学性能大幅降低。

表4 盐浸-冻融-紫外线三因素循环作用后混凝土试件峰值强度(单位:MPa)

Tab. 4 Peak strength of concrete under salt soaking, freeze-thaw and ultraviolet cycles(unit: MPa)

循环次数	试件 I	试件 II	试件 III	试件 IV
1	28.16	28.85	27.10	28.26
2	25.13	24.88	25.67	24.56
3	20.64	19.81	19.89	20.24
4	14.79	15.28	14.34	14.98

混凝土性能劣化试验结果表明,在试验初期,3种工况下的混凝土试件由于剥蚀程度较轻,力学性能降幅较小。随着试验的进行,混凝土试件表观破坏程度加深的同时,力学性能的降低速率也随之越来越大,其中三因素对混凝土试件的影响最大、劣化程度在后期急剧加快。经过盐浸、冻融循环与紫外线辐照试验,混凝土力学性能明显降低,混凝土劣化将对高坝的抗震性能产生影响。

## 3 考虑三因素影响的高坝强震损伤分析

### 3.1 大坝模型构建与地震波选取

所研坝段坝高90m,坝顶宽10m,坝底宽68.14m,死水位距坝底64m。部分数值模型如图3所示,其中坝基设置为无质量地基,向下延伸1.5倍坝高,向上下游延伸2.5倍坝高。考虑到实际情况,模型劣化区域具体设置如下:上游正常蓄水位以上、坝顶、下游考虑受到冻融循环和紫外线辐照因素的影响,根据以往对丰满水坝的实地调查结果<sup>[14]</sup>,劣化区域深度设置为1.0m,划分为3层,最外层材料相关参数由劣化试验获得,向内两层相关参数由线性插值获得,坝体内部认为没有损伤;上游正常蓄水位至死

水位考虑受到盐浸-冻融-紫外线三因素的影响,劣化深度及取值方法同上;上游死水位以下考虑受到库水盐浸侵蚀的影响,没有找到丰满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的研究结论<sup>[15]</sup>,全寿命周期内混凝土坝溶蚀深度为 0.29m,为便于有限元网格剖分,本文取 0.33m。

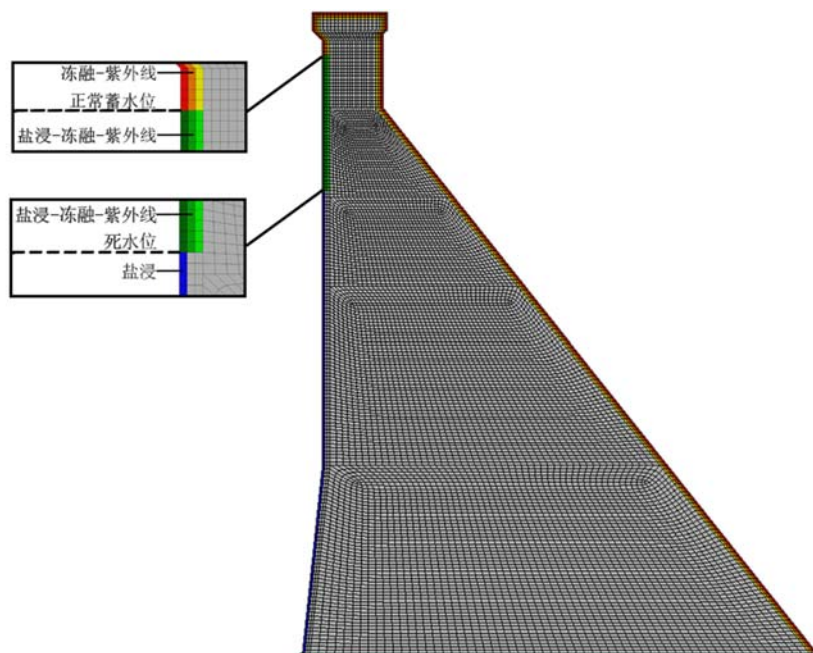


图 3 重力坝有限元模型

Fig. 3 Finite element model of gravity dam

选择 4 次大循环试验前后混凝土的峰值强度及弹性模量作为坝体混凝土本构关系的参数指标。混凝土抗拉强度衰减情况可根据抗压强度计算得出<sup>[16]</sup>,单轴受拉应力-应变曲线方程可由式(1)确定,损伤因子  $d$  可由式(2)确定<sup>[17]</sup>,取值从 0 到 1 代表无损伤到完全损伤破坏。

$$\begin{cases} y = x & (x \leq 1) \\ y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} d = 0 & (x \leq 1) \\ d = 1 - \sqrt{\frac{1}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}} & (x > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_t$  为单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数;  $x$  为混凝土受拉时应变与单轴抗压强度的比值;  $y$  为混凝土受拉时应力与峰值拉应变的比值;  $d$  为损伤因子。

丰满大坝坝址抗震设防烈度为 7 度,场地类别为 II 类,100 年超越概率为 1% 的地震波峰值加速度为 0.172g,依据《水工建筑物抗震设计标准》GB 51247-2018<sup>[18]</sup>确定地震动反应谱,并生成人工波。本文水平向人工波峰值加速度取 0.172g,竖向峰值加速度取水平向峰值加速度值的 2/3,人工波水平向时程归一化曲线如图 4 所示。

### 3.2 高坝强震损伤分析

对高坝进行强震损伤分析,所得高坝拉伸损伤如图 5 所示。理想状态下,即不考虑混凝土材料的劣化,坝体在强震激励后下游折坡处出现一定程度的损伤,坝踵和坝趾也出现损伤。考虑冻融和紫外线双因素影响时,由于暴露在空气中的坝体材料劣化,上游死水位即冻融区和非冻融区的交界处出现较为明显损伤;下游折坡处损伤程度加深、损伤范围变大,并有贯穿坝体的发展趋势。考虑盐浸-冻融-紫外线三因素影响时,正常蓄水位至死水位中间材料同时受三因素影响,劣化加剧、损伤范围加宽并延伸至坝体内部,几近贯穿;坝体下游中部较理想状态时损伤较大。由此可见,盐浸-冻融-紫外线三因素影响下,高坝强震激励的失效模式发生改变,损伤程度加重,整体抗震性能影响大,在高坝抗震设计时需考虑多



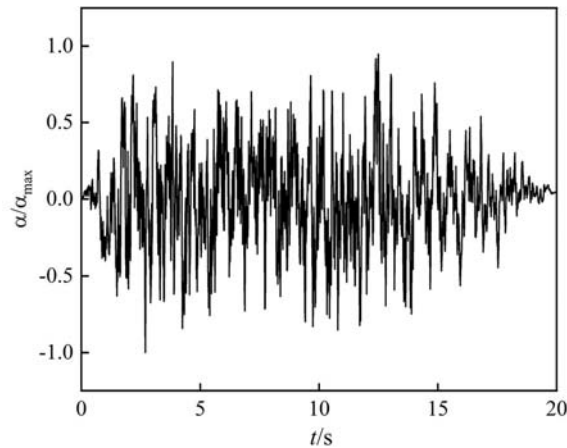


图4 人工波水平向时程归一化曲线

Fig. 4 Normalization curve of artificial wave horizontal time history

种因素导致混凝土劣化的影响。

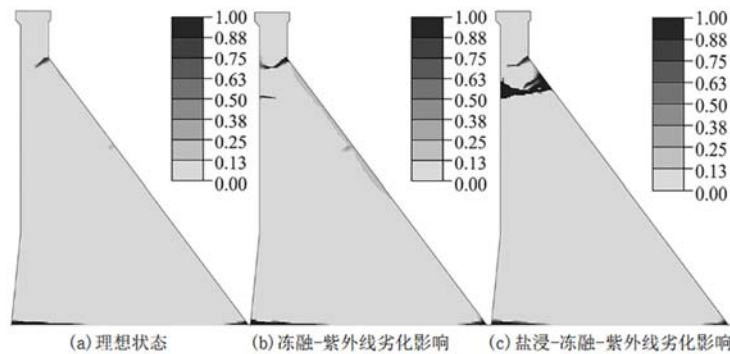


图5 高坝拉伸损伤图

Fig. 5 High dam tensile damage diagram

图6为三因素劣化影响下高坝强震损伤过程图。由图可知,2.08s时上游死水位附近首先发生破坏,盐浸-冻融-紫外线三因素影响下,混凝土在高坝强震时将较早进入非线性阶段;下游折坡处稍后产生损伤,鞭梢效应影响下坝体进入快速损伤阶段;随着强震持续激励,坝体上部损伤向内部延伸,3.83s时上游正常蓄水位至死水位之间的损伤已延伸至坝体中部,下游折坡处也有较为明显损伤,此时坝踵和坝趾位置也产生一定程度损伤;此后,地震波能量主要被坝体上部吸收,上游死水位和下游折坡处的损伤将贯穿坝体。

## 4 结论

(1) 在盐浸-冻融-紫外线三因素共同作用下,混凝土材料的劣化既有物理作用又包含化学侵蚀,伴随循环次数增加,混凝土质量损失增大、动弹性模量和峰值强度不断降低。

(2) 全寿命周期内混凝土材料的劣化使得寒区混凝土坝在强震作用下较早地进入非线性阶段,从而改变了大坝的失效模式,加重了结构损伤程度。

(3) 坝体表面未接触库水区域,以抗冻和抗裂为主要控制指标,宜采用高标号混凝土;坝体表面接触库水区域,宜采用高分子聚合物水泥抗冻防水涂料,作为坝体辅助防渗层;在大坝全寿命周期内加强监测,对材料劣化严重区域,及时修复。

(4) 本文假定盐浸-冻融-紫外线三因素对混凝土劣化程度的影响随深度变化是线性的,实际情况可能较为复杂,但此种简化处理所得结论仍然可以定性地研究恶劣环境因素下寒区高坝强震破坏规律。

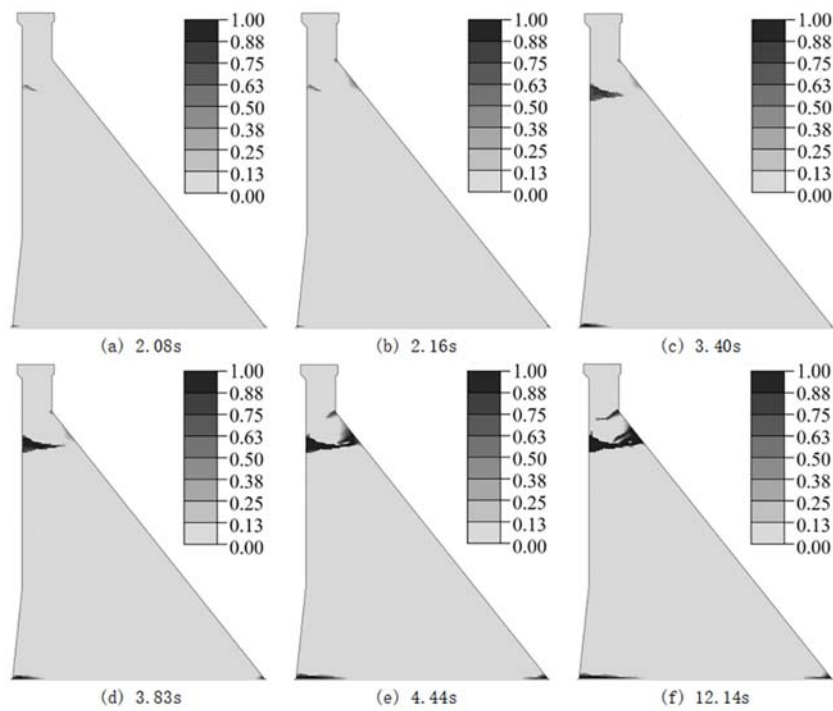


图 6 高坝损伤过程图

Fig. 6 High dam damage process diagram

## 参考文献:

- [1] 白卫峰, 牛东旭, 管俊峰, 等. 考虑冻融劣化效应的混凝土单轴压缩统计损伤模型[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 117—129 (BAI Weifeng, NIU Dongxu, GUAN Junfeng, et al. The statistical damage model of concrete under uniaxial compression considering freeze-thaw deterioration effect[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9):117—129 (in Chinese))
- [2] 候春平, 陈灯红, 彭刚, 等. 冻融劣化混凝土冰冻状态动态轴压本构特征研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1101—1112 (HOU Chunping, CHEN Denghong, PENG Gang, et al. Study on dynamic axial compression constitutive characteristics of freezing-thawing deteriorated concrete in frozen state[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1101—1112 (in Chinese))
- [3] 田威, 邢凯, 谢永利. 冻融环境下混凝土损伤劣化机制的力学试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3):299—304 (TIAN Wei, XING Kai, XIE Yongli. Experimental study of damage degradation mechanism of concrete in freeze-thaw environment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):299—304 (in Chinese))
- [4] 贾飞, 王瑞骏, 贺新星, 等. 紫外线辐射及冻融循环双因素下面板混凝土力学性能研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6):191-197 (JIA Fei, WANG Ruijun, HE Xinxing, et al. Study on mechanical properties of facing concrete under dual-factor of ultraviolet radiation and freeze-thaw cycle[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6):191—197(in Chinese))
- [5] 王建有, 祝启鑫, 袁群, 等. 紫外线对粉煤灰混凝土碳化的影响研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7):163—166, 174 (WANG Jianyou, ZHU Qixin, YUAN Qun, et al. Research on influence of ultraviolet on carbonation of fly ash concrete[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(7):163—166 (in Chinese))
- [6] 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 (ZHANG Yu, ZHANG Xue, LI Huanghe, et al. Considering the effects of freeze-thaw and ultraviolet rays on the seismic performance of concrete dams in cold regions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(1):101—108 (in Chinese))

- [7] 王振山,李亚坤,韦俊,等.玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究[J].实验力学,2020,35(6):1060-1070(WANG Zhenshan, LI Yakun, WEI Jun, et al. Experimental study on corrosion behavior and mechanical properties of basalt fiber concrete by chlorine attack[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1060-1070 (in Chinese))
- [8] 王天.柴达木盆地冻融、盐蚀环境下混凝土腐蚀机理及耐久性研究[J].铁道勘察,2021,47(2):81-86(WANG Tian. Study on corrosion mechanism and durability of concrete subjected to freeze-thaw and salt erosion Qaidam Basin[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(2):81-86 (in Chinese))
- [9] 韩铁林,师俊平,陈蕴生,等.不同化学溶液和冻融循环作用下砂浆力学特征的研究[J].实验力学,2019,34(3):489-500(HAN Tielin, SHI Junping, CHEN Yunsheng, et al. Experimental investigation on mechanical characteristics of mortar subjected to combined action of different chemical solutions and freezing-thawing cycles [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(3):489-500 (in Chinese))
- [10] 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(FENG Bo, LIU Qing, QIAN Yongjiu. Durability analysis of high-performance concrete under chloride salt erosion and freeze thaw cycles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5):1083-1089 (in Chinese))
- [11] 李长成,闫洁,李巍.寒区盐渍土环境下混凝土的破坏机理研究[J].低温建筑技术,2018,40(2):13-17(LI Changcheng, YAN Jie, LI Wei. Research on the damage mechanism of concrete bridge due to salinized soil under cold environment[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(2):13-17 (in Chinese))
- [12] 宿晓萍,王清.复合盐浸-冻融-干湿多因素作用下的混凝土腐蚀破坏[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(1):112-120(SU Xiaoping, WANG Qing. Corrosion damage of concrete under multi-salt soaking, freezing- thawing and dry-wet cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1):112-120 (in Chinese))
- [13] 朴龙泽,赵淑明,高伟平.丰满大坝渗水对混凝土的溶蚀分析[J].水利水电技术,2000(10):34-36(PIAO Longze, ZHAO Shuming, GAO Weiping. Analysis of concrete corrosion caused by water seepage in Fengman Dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000(10):34-36 (in Chinese))
- [14] 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,2004,25(2):189-193(LI Shouju, LIU Yingxi, CHEN Changlin, et al. Numerical computation and analysis of fracturing problems of concrete dam owing to freezing and thawing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2):189-193 (in Chinese))
- [15] 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(WANG Shaowei, XU Yingli, XU Cong, et al. Spatio-temporal characteristics of leakage dissolution of concrete dam based on numerical simulation [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1):87-91 (in Chinese))
- [16] 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015(Code for design of concrete structures: GB 50010-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese))
- [17] 田连波,侯建国.ABAQUS中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2015,37(4):340-345,358(TIAN Lianbo, HOU Jianguo. Reasonable plastic damaged factor of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2015, 37(4):340-345, 358 (in Chinese))
- [18] 水工建筑物抗震设计标准:GB 51247-2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018(Standard for seismic design of hydraulic structures: GB 51247-2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese))



## Study on strong earthquake damage of concrete dam in cold region affected by salt immersion, freeze-thaw and ultraviolet radiation

ZHANG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Xue<sup>1</sup>, WANG Shu<sup>2</sup>, WANG Mingming<sup>3</sup>

(1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Thermal Utilization and Disaster Reduction of New Energy in Cold Regions, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. Department of Civil Engineering, Daqing Open University, Daqing 163311, Heilongjiang, China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to study the influence of salt immersion, freeze-thaw cycles and ultraviolet radiation coupling on the strong earthquake damage of concrete dams in cold regions, concrete performance degradation tests and seismic performance analysis of high dams under three factor cycles were carried out. Based on the results of the salt immersion analysis, a high concentration salt immersion liquid was prepared. In order to obtain the law of salt immersion freeze-thaw ultraviolet cycle effect and concrete material performance degradation, the number of freeze-thaw cycles and ultraviolet radiation amount were determined according to the actual situation. Based on the previous study, numerical analysis was conducted based on three influencing factors on the strong earthquake damage of the dam body. The results indicate that under harsh environments, the deterioration of material properties reinforce continuously due to the interaction between physical crystallization expansion and chemical erosion of concrete materials. When a strong earthquake occurs, the cyclic action of salt immersion freeze-thaw ultraviolet radiation changes the failure mode of high dams, reducing their overall seismic performance. The above research results contribute to a deep understanding of the impact of adverse environmental factors on the mechanical properties of dam materials, and provide a criteria for seismic design of hydraulic structures in cold regions.

**Keywords:** concrete dam; cold regions; salt immersion; freeze-thaw cycle; ultraviolet rays; seismic performance