

文章编号: 1001-4888(2023)01-0101-08

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^{*}

张宇¹, 张雪¹, 李黄河¹, 宋业传¹, 王铭明²

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南昆明 650500)

摘要: 为分析冻融循环和紫外线对寒区混凝土坝抗震性能的影响,进行了双因素下坝体材料动力性能试验研究和高坝动力特性分析。考虑寒区紫外线辐射量及冻融循环次数,使用紫外线老化箱和冻融循环试验机模拟实际工况,得出紫外线辐照时间及冻融循环次数与寒区混凝土材料动态性能的影响规律;基于试验结果,利用数值方法分析了双因素对大坝动力损伤的影响。结果表明:与理想环境相比,紫外线辐射会降低混凝土的抗压强度和弹性模量;与单一冻融循环因素相比,紫外线与冻融循环双因素加剧了混凝土劣化;强震时,冻融和紫外线对混凝土的劣化影响,增加了大坝的损伤破坏程度。上述试验结果有助于更好地研究多因素对混凝土高坝动力学性能的影响,可为寒区大坝抗震设计提供参考。

关键词: 寒区; 混凝土坝; 紫外线; 冻融循环; 抗震性能

中图分类号: TV32⁺¹ **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-001

0 引言

随着我国经济的不断增长,水坝的建设规模也不断增大。大型水坝往往建设在不同烈度的震区,其运行期间的安全性非常重要^[1,2]。在寒区,冻融循环作用会导致筑坝材料的劣化,从而影响坝的安全运行^[3]。此外,紫外线辐射也会加速坝体外表面混凝土的劣化^[4],进而影响大坝的整体抗震性能。综上,有必要考虑双因素对坝体材料动力特性的影响。

坝体混凝土材料的性能是影响抗震性能的关键因素之一。候春平等^[5]以混凝土加载时的应变速率和冻融劣化程度为控制因素,研究了冰冻状态下混凝土的受力特征。王来贵等^[6]通过试验研究了冻融循环对不同粒径试件破坏形态及力学性质变化规律的影响。王振山等^[7]研究了混凝土在氯盐环境下的耐腐蚀性及力学性能的退化。韩铁林等^[8]结合化学溶液和冻融循环研究了砂浆混凝土的力学性能。徐善华等^[9]通过快速冻融循环试验,建立了冻融损伤混凝土与钢筋的黏结-滑移本构模型。贾飞等^[10]通过紫外线辐射试验和冻融循环试验,建立了考虑紫外线辐射作用的混凝土冻融循环损伤模型。还有部分学者通过混凝土结构试验来研究大坝抗震。Wang 等^[11]通过振动台上小型模型的动态断裂试验,对重力坝结构进行了抗震性能评估。张宇等^[12,13]在振动台上开展模型动力破坏试验,研究了坝库相互作用对高坝强震失效模式和超载能力的影响。以上研究均未考虑紫外线照射坝体混凝土,进而加剧其冻融循环破坏的因素,特别是坝体混凝土动态力学性能的变化。

^{*} 收稿日期: 2022-01-02; 修回日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969010); 东北石油大学人才引进科研启动经费资助项目(1305021827)

通信作者: 张宇(1984—),男,讲师,博士。主要从事水工结构抗震试验研究。Email: zhangyu@nepu.edu.cn

王铭明(1982—),男,副教授,博士。主要从事水工结构抗震研究。Email: wang.ming.ming@163.com

本文以位于长春地区的丰满大坝为例,结合冻融循环和紫外线辐射来研究双因素对坝体材料性能的影响,进而建立多因素作用与大坝抗震性能的关系。基于大坝混凝土材料参数、大坝所在地区的冻融循环和紫外线辐射量,通过对比紫外线、冻融循环和双因素 3 种工况,探究不同影响因素对混凝土抗压强度、应力-应变曲线、坝体结构动力特性的影响,所得结论可用于大坝抗震设计。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用油龙牌 P·O42.5 水泥;细骨料为中砂,细度模数为 2.8;粒径为 5~40mm 的碎石子,分筛成 5~20mm 和 20~40mm 两类作为混凝土试验粗骨料;减水剂、引气剂分别为山东优索化工科技有限公司生产的 FDN-C 奈系减水剂和 Foamix Ca25 混凝土引气剂;水为自来水。

1.2 试验配合比

本文试验试样的配合比见表 1。

表 1 混凝土试样配合比(单位:kg/m³)

Tab. 1 Mix ratio of concrete sample (unit: kg/m³)

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

1.3 试验方法

紫外线老化箱有 6 根 UVA-340 荧光紫外灯管,紫外线照射混凝土情况如图 1 所示,每根灯管的辐照强度为 34.5W/m²,6 根灯管照射 1 天的辐射量为 17.88MJ/m²。长春地区的自然光照下紫外线辐照强度取平均值 8.52W/m²^[14],自然状态下 1 天的辐照量为 0.74MJ/m²。紫外线老化箱照射 1 天相当于自然光下 24.16 天,15.11 天相当于自然光照 1 年。

参考相关规范^[15],冻融循环 25 次为一个周期,达到以下 3 种情况之一时停止试验:(1)冻融循环达到 100 次;(2)动弹模量下降到 60%以下;(3)质量损失 5%。冻融循环机采用山东路达试验仪器有限公司生产的 HDR-28 型全自动低温冻融试验机(见图 2)。



图 1 紫外线照射混凝土

Fig. 1 Ultraviolet-irradiated concrete



图 2 冻融试验机

Fig. 2 Freeze-thaw testing machine

长春地区 1 年当量冻融循环次数为 5.7 次^[16],即冻融循环 25 次近似于 4 年的冻融循环当量。根据以上数据设计试验,紫外线老化箱照射 60 天加冻融循环机冻融 25 次,即相当于自然条件下照射 4 年加冻融循环 4 年,以此为一个循环。通过位移加载进行混凝土抗压强度试验,为更好地分析混凝土试块的动力特性,加载速率选择为 10⁻³/s。试验加载设备采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 WAW 系列电液伺服万能试验机。

2 试验结果与分析

为了系统分析试验数据,将本文设计工况进行汇总,见表 2。

表 2 试验工况汇总

Tab. 2 Summary of test conditions

工况	紫外线照射 A	冻融循环 B	紫外线和冻融循环双因素 C
1	0 天	0 次	0 天+0 次
2	60 天	25 次	60 天+25 次
3	120 天	50 次	120 天+50 次
4	180 天	75 次	180 天+75 次
5	240 天	100 次	240 天+100 次

2.1 混凝土表面变化

图 3 为混凝土立方体试块经过紫外线照射后表面情况的图片,从图中可以看出,从工况 A1 到工况 A5,混凝土试块表面变化很微弱,可以忽略不计。

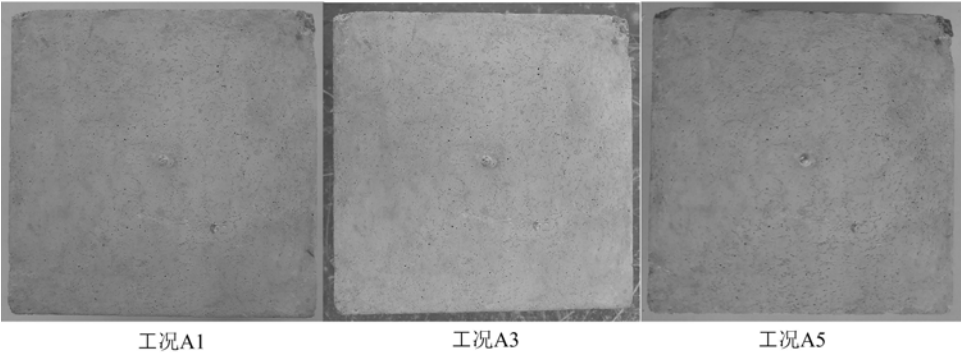


图 3 紫外线照射前后混凝土表面变化

Fig. 3 The apparent change of concrete before and after ultraviolet irradiation

图 4 为混凝土立方体试块经过冻融循环后表面情况的图片,图 5 为混凝土立方体试块经过紫外线照射和冻融循环双因素作用后表面情况的图片。从图 4 中可以看出,试验开始时,混凝土表面完好无损,随着试验的进行,混凝土表面逐渐出现细小的孔洞,表面胶凝材料流失,坑蚀孔洞变大,表面细骨料外露,且随着冻融循环次数的增加,细骨料开始逐渐剥落。随着表层细骨料的分层脱落,最终到 100 次冻融循环后粗骨料已明显暴露于表面,混凝土外表面损伤十分严重。对比图 4 和图 5 可知,紫外线照射加快了混凝土试块的表面破坏程度,在冻融循环 25 次时最为明显,由于受紫外线影响的混凝土随冻融循环次数增加逐渐脱落,因此图 4 和图 5 在工况 3 后,表面破坏情况很相似;随着新暴露混凝土表面受到紫外线的照射,工况 C5 比工况 B5 试件的表面剥离情况严重。

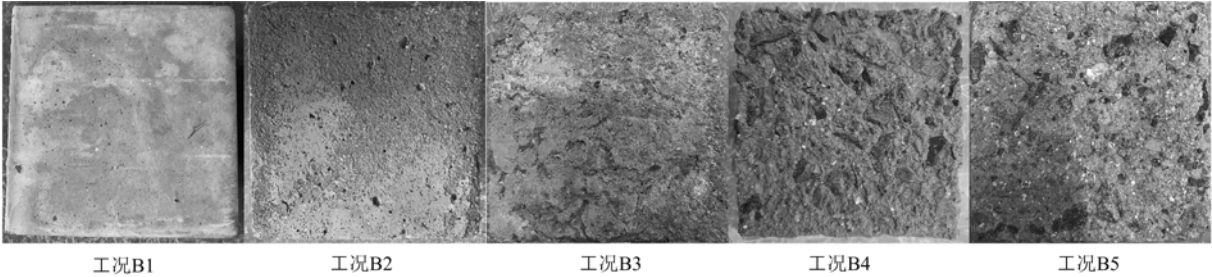


图 4 冻融循环前后混凝土表面变化

Fig. 4 The apparent change of concrete before and after the freeze-thaw cycle

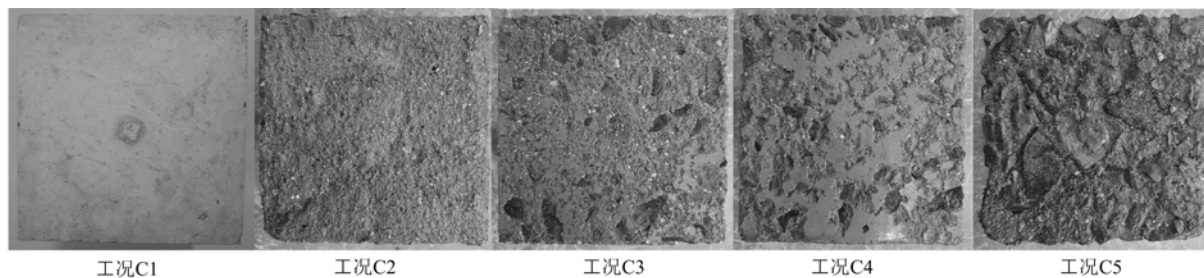


图 5 双因素作用前后混凝土表面变化

Fig. 5 The apparent change of concrete before and after dual factors

2.2 混凝土质量变化

混凝土材料的质量变化会影响大坝结构的动力特性,图 6 为混凝土立方体试块经不同因素作用后的质量变化差值。由图 6(a)可以看出,室内条件和紫外线照射下混凝土试块质量会随时间变化而降低,到达一定数值后质量停止变化,但紫外线照射会加剧混凝土试块水分的蒸发并造成试块表面老化,质量下降较多。由图 6(b)可以得出,冻融 75 次之前,紫外线对混凝土质量的损失影响较小;冻融 100 次后,紫外线对混凝土试块的质量影响较大。

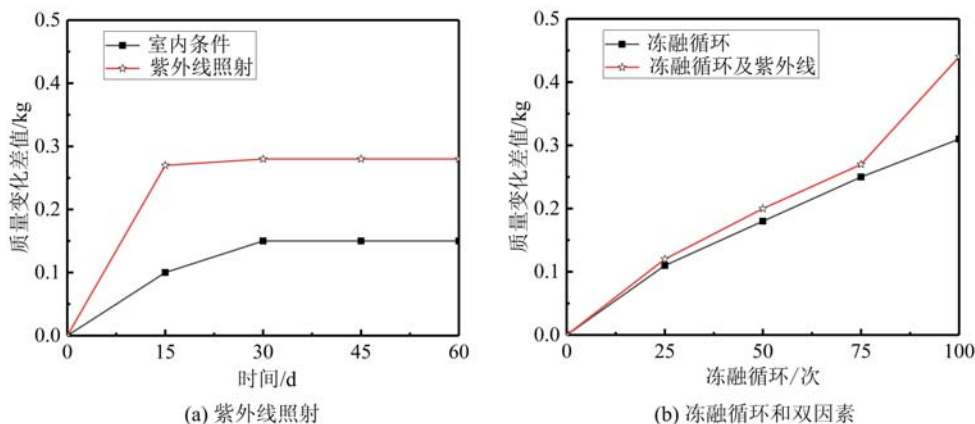


图 6 混凝土质量变化差值

Fig. 6 Difference of concrete quality change

2.3 混凝土强度变化

紫外线照射和冻融循环对混凝土的力学强度同样有影响,表 3 为不同工况下混凝土试块的抗压强度。紫外线照射在初始阶段会加剧混凝土试块水分蒸发,并造成坝体混凝土材料的老化,进而影响混凝土强度。工况 A2 强度较工况 A1 衰减了 7%,但随着照射时间的增加,即使到工况 A5 对应的 240 天,试块强度基本无衰减。冻融循环和双因素下的抗压强度整体变化趋势基本一致,工况 B2 的衰减为 8.36%,工况 C2 的衰减为 9.14%;随着试验的开展,混凝土表面胶凝材料流失,紫外线对试块抗压强度的影响减少,但随着新的胶凝材料和骨料的暴露,紫外线又会对新暴露的胶凝材料和骨料产生劣化作用,工况 C5 比工况 B5 试块强度衰减更大。

表 3 混凝土试块峰值强度(单位:MPa)

Tab. 3 Peak strength of concrete test block (unit: MPa)

工况	紫外线 A	冻融循环 B	紫外线和冻融循环 C
1	30.93	32.05	32.29
2	28.77	29.37	29.34
3	28.69	26.56	26.27
4	28.67	22.78	22.44
5	28.66	17.27	16.78

2.4 混凝土应力-应变曲线变化

不同因素作用下混凝土的应力-应变曲线如图7所示,由图可知,无论是紫外线照射还是冻融循环作用下,混凝土应力-应变曲线走势基本相同。由图7(a)可知,在混凝土应力-应变曲线的上升段,紫外线照射会降低曲线斜率,但随着照射时间的增加,应力-应变上升段斜率基本保持工况A2的斜率不变。对比图7(b)和图7(c)发现,随着试验的进行,曲线上升段的斜率逐渐扁平,双因素与单一因素冻融循环作用相比,应力-应变曲线的上升段斜率下降更为明显。

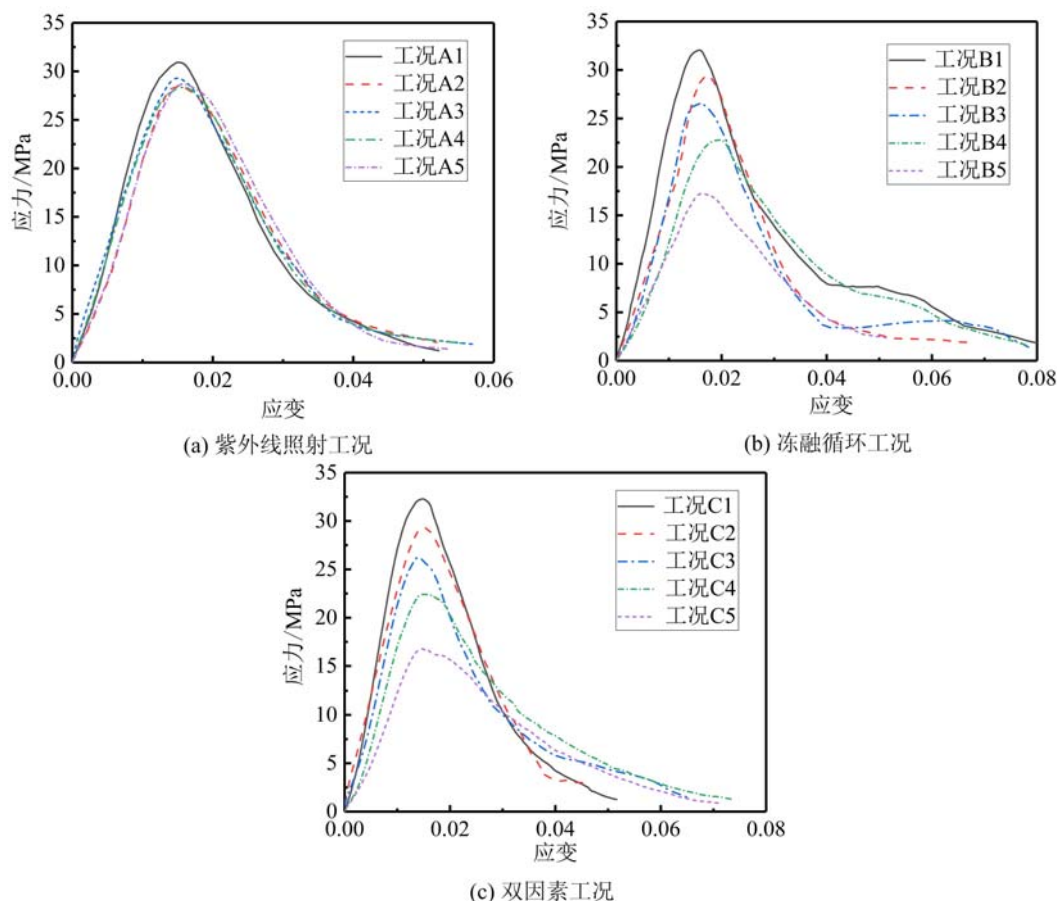


图7 混凝土应力-应变曲线

Fig. 7 Concrete stress-strain curve

3 考虑库水及混凝土劣化的大坝抗震性能分析

3.1 模型的建立

建立有限元分析模型,坝顶高程 269.5m,坝高 85.5m,坝顶宽 10m,坝底宽 68.14m,死水位高程 242m,上游折坡比 1:0.1,下游折坡比 1:0.75。模型包含了 10873 个一阶减缩积分平面应力单元,11137 个节点。冻融循环对坝体的影响深度为 1m^[17],为了更接近实际情况,本文有限元模型中双因素对大坝混凝土的劣化深度选为 1m。基于混凝土大坝的运行特点及劣化深度,设置劣化范围为上游坝体死水位以下 1m 的上部、坝顶以及下游坡面,有限元模型如图 8 所示。

考虑动水压力影响,利用 Westergaard 附加质量法来模拟大坝的动力响应。重力坝原型所在地区地震烈度为 7 度,100 年超越概率 1% 的地震动峰值加速度为 1.72m/s²,选用此加速度进行激励,通过规范反应谱生成人工地震波如图 9 所示。结合材料试验得到混凝土材料抗压强度和弹性模量,通过简化混凝土本构关系和能量等效原理^[18]构建大坝有限元模型,分析高坝在强震时结构的损伤破坏情况,其中损伤程度从 0 至 1,0 代表没有发生损伤,1 代表混凝土完全开裂。

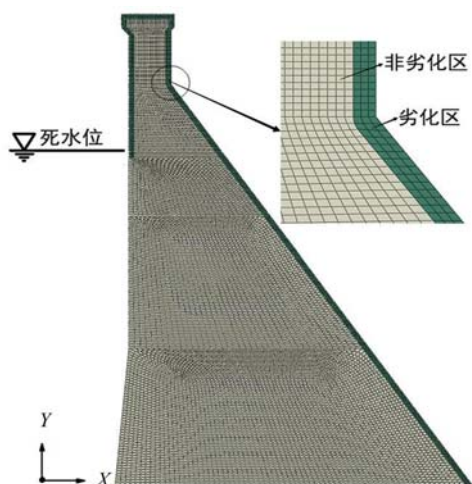


图 8 高坝有限元模型

Fig. 8 Finite element model diagram of high dam

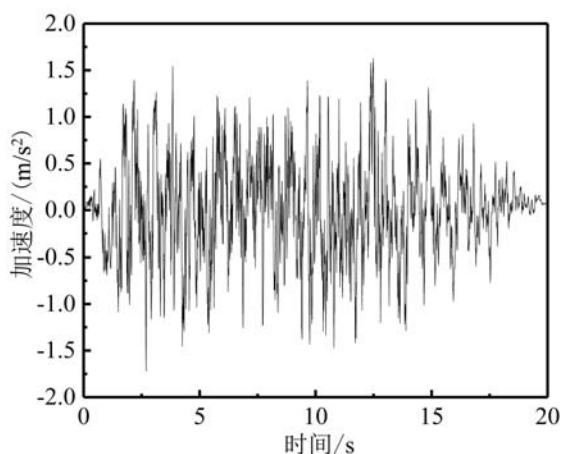


图 9 规范谱人工地震波

Fig. 9 Spectrum artificial seismic waves

3.2 高坝强震损伤分析

为明确混凝土劣化对高坝抗震性能的影响,使用 1.5 倍峰值加速度地震波进行高坝抗震响应分析,所得大坝拉伸损伤如图 10 所示。由图 10 可知,上游折坡及坝踵区域一直处于水位以下,不会受到紫外线和冻融循环的劣化影响,理想状态和考虑混凝土劣化这 2 种情况下此区域损伤基本一致;理想状态下大坝在下游折坡处出现轻微裂缝,死水位区域只有轻微损伤,劣化后大坝在下游折坡处发生贯穿至上游面的裂缝,死水位区域裂缝向内部扩展至接近下游面;当混凝土的劣化深度达到 1m 时,高坝在强震时的破坏程度大幅增加。可见,为保证高坝在强震下的安全运行,考虑混凝土劣化的影响是必要的。

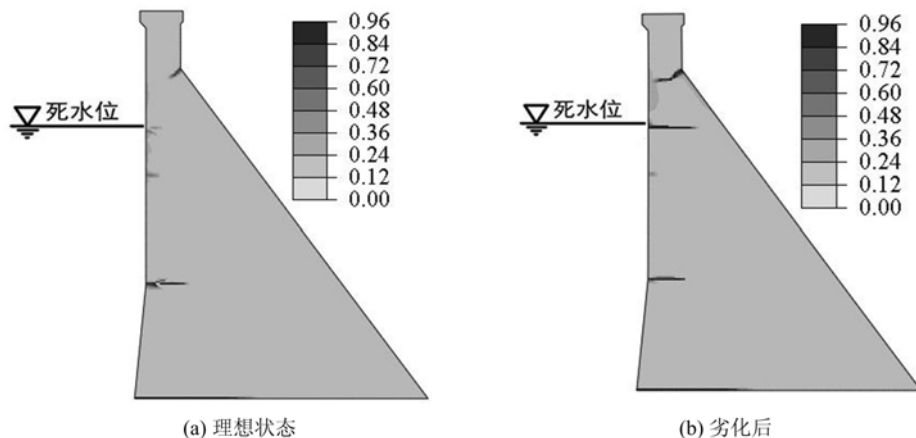


图 10 高坝拉伸损伤云图

Fig. 10 Tensile damage cloud map of high dam

4 结论

(1) 紫外线照射对混凝土质量、抗压强度和应力-应变曲线有轻微影响,且只发生在初期,达到一定时间之后,紫外线照射的影响越来越弱。

(2) 考虑双因素影响时,紫外线照射对坝体冻融循环破坏的影响在 25~50 次冻融循环时最为明显,50 次冻融循环后由于被紫外线照射的坝体表面混凝土脱落增多,紫外线对其性能的影响基本消失。但随着坝体表面混凝土暴露出新的胶凝材料和骨料,紫外线又会开始新的作用,进而对其造成新的损伤,表现在 100 次冻融循环后试块强度有较大衰减。

(3) 虽然紫外线和冻融劣化影响混凝土的深度仅 1m,但在强震时会极大增加大坝的损伤破坏程

度,特别是上游死水位附近以及下游折坡处。故而为保证高坝在强震下的安全运行,考虑混凝土劣化的影响是必要的,对大坝进行适当养护,可减轻强震作用寒区大坝的破坏程度。

参考文献:

- [1] 徐强,张天然,陈健云,等.基于ETA模型的配筋措施对于高拱坝变形损伤指标的影响[J].工程科学与技术,2021,53(3):77—88 (XU Qiang, ZHANG Tianran, CHEN Jianyun, et al. Influence of reinforcement measures on deformation damage index of high-arch dam based on endurance time analysis model[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3):77—88 (in Chinese))
- [2] Xu Q, Chen J Y, Li J, et al. A study on the contraction joint element and damage constitutive model for concrete arch dams[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2014, 15(3):208—218.
- [3] 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,2021,52(10):72—79 (ZHAO Wei, PAN Jianwen, WANG Jinting, et al. Simulative study on ice pullout damage of concrete dam insulation layer in alpine region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(10):72—79 (in Chinese))
- [4] 徐帆,贺新星,王瑞骏,等.紫外线与冻融循环作用下的混凝土耐久性研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):188—193 (XU Fan, HE Xinxing, WANG Ruijun, et al. Study on durability of concrete under ultraviolet radiation and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3):188—193 (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 王来贵,丁盛鹏,何慧娟,等.不同粒径砂粒水泥砂浆冻融破坏实验研究[J].实验力学,2019,34(1):138—148 (WANG Laigui, DING Shengpeng, HE Huijuan, et al. Experimental investigation on the influence of sand grain size in cement mortar on freeze-thaw failure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1):138—148 (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] 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))
- [9] 徐善华,聂彪.冻融损伤混凝土与光圆钢筋黏结本构关系试验研究[J].实验力学,2019,34(3):434—442 (XU Shanhua, NIE Biao. Experimental study of bond-slip constitutive relationship between freeze-thaw damaged concrete and plain round bar[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(3):434—442 (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] Wang M M, Chen J Y, Wei H, et al. Investigation on seismic damage model test of a high concrete gravity dam based on application of FBG strain sensor[J]. Complexity, 2019(1):7837386.
- [12] 张宇,冯新,齐哈兵,等.拱坝-库水相互作用的振动台破坏试验研究[J].水利学报,2020,51(10):1299—1306 (ZHANG Yu, FENG Xin, QI Hanbing, et al. Experimental study on impact of dam-reservoir interaction on dynamic failure mechanism of arch Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10):1299—1306 (in Chinese))
- [13] 张宇,范哲,周利剑,等.含缝拱坝强震失效破坏振动台试验研究[J].实验力学,2021,36(2):279—286

- (ZHANG Yu, FAN Zhe, ZHOU Lijian, et al. Shaking table test on dynamic failure mechanism of arch dam with joints[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(2):279—286 (in Chinese))
- [14] 邢丽元, 周平, 张明. 长春市太阳紫外线辐射强度变化规律[J]. 吉林农业, 2013(10):69 (XING Liyuan, ZHOU Ping, ZHANG Ming. Variation law of solar ultraviolet radiation intensity in Changchun City[J]. Agriculture of Jilin, 2013(10):69 (in Chinese))
- [15] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009 (GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009 (in Chinese))
- [16] 殷英政, 李志国. 我国代表城市混凝土冻融循环次数探讨[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(11):12—15 (YIN Yingzheng, LI Zhiguo. Discussion on the number of concrete freeze-thaw cycles in China's representative cities [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(11):12—15 (in Chinese))
- [17] 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 (LI Shouju, LIU Yingxi, CHEN Changlin, et al. Computation and analysis of fracturing problems of concrete dam owing to freezing and thawing[J]. Rock and soil Mechanics, 2004(2):189—193 (in Chinese))
- [18] 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))

Considering the effects of freeze-thaw and ultraviolet rays on the seismic performance of concrete dams in cold regions

ZHANG Yu¹, ZHANG Xue¹, LI Huanghe¹, SONG Yechuan¹, WANG Mingming²

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China;

2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: In order to analyze the effects of freeze-thaw cycles and ultraviolet rays on the seismic performance of concrete dams in cold regions, a dual-factor experimental study of the impact of dam materials on the dynamic performance and analysis of the dynamic characteristics of high dams were carried out. Based on the number of freeze-thaw cycles and ultraviolet radiation in cold areas, this paper used an ultraviolet aging box and freeze-thaw cycle testing machine to simulate actual working conditions, and obtained the law of ultraviolet radiation time and freeze-thaw cycle times and the dynamic performance of concrete materials in cold areas. Based on the test results, the numerical method was used to analyze the influence of dual factors on the dynamic damage of the dam. The results show that: compared with the ideal environment, ultraviolet rays can reduce the compressive strength and elastic modulus of concrete; compared with a single freeze-thaw cycle factor, the dual factor of ultraviolet light and freeze-thaw cycle aggravates the deterioration of concrete; during strong earthquakes, the effects of ultraviolet rays and freeze-thaw degradation increase the degree of damage to the dam. The test results provide the reference for studying the influence of multiple factors on the dynamic mechanical properties of high concrete dams, and the seismic design of dams in cold areas.

Keywords: cold area; concrete dam; ultraviolet light; freeze-thaw cycle; seismic performance