

复杂环境下水工混凝土多劣化因素耦合作用机理与寿命预测模型

刘鹏

513022*****3078

摘要: 水工混凝土结构长期服役于复杂环境中,通常同时遭受冻融循环、化学侵蚀、冲磨磨损、干湿交替等多种劣化因素的协同作用。本文系统梳理了盐侵-冻融、冻融-冲磨、化学-应力等多因素耦合作用下水工混凝土的损伤演化规律与劣化机理,总结了多场耦合本构模型的最新进展。在劣化机理层面,耦合效应通过加速微裂缝扩展、促进侵蚀性离子传输、改变水化产物稳定性等方式产生“1+1>2”的协同损伤效果。在寿命预测方法上,归纳了基于可靠度理论的概率模型、基于相似理论的多重环境时间相似法、以及基于机器学习的数据驱动模型三类主要途径。研究表明,建立考虑非均匀损伤场的多场耦合本构模型,并结合现场实测数据进行参数校准,是实现水工混凝土结构寿命精准预测的关键方向。

关键词: 水工混凝土;多因素耦合;劣化机理;本构模型;寿命预测

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.073

引言

水工混凝土结构作为水利基础设施的主体,其服役环境具有显著的复杂性与严酷性。地处西北寒旱地区的渡槽、渠道衬砌、大坝等建筑物,不仅承受冻融循环的反复作用,还面临盐湖、盐碱地环境中硫酸盐、氯盐的化学侵蚀;山溪性河流中的溢洪道、泄洪洞等过流部位,则在汛期遭受挟沙水流的强烈冲磨,在非汛期经历干湿交替与碳化作用。这些劣化因素并非孤立存在,而是以耦合作用的形式共同加速混凝土性能的退化。

近年来,随着试验技术的进步和对劣化机理认识的深入,多因素耦合作用下水工混凝土的损伤演化规律与寿命预测方法成为研究热点。国内外学者通过设计模拟实际环境的室内加速试验,结合微观测试手段,揭示了冻融-盐侵、冻融-冲磨、碳化-荷载等多种耦合工况下的劣化机理。在寿命预测方面,从传统的经验公式向概率可靠度模型、相似理论方法和机器学习模型发展,预测精度不断提高。

1 多劣化因素耦合作用机理

1.1 盐侵 - 冻融耦合作用

盐侵与冻融耦合是西北盐渍地区水工混凝土常见劣化工况。内蒙古、甘肃等地现场调查显示,渡槽下部和排架近地面处受盐离子侵蚀和冻融循环,损伤更严重。室内加速试验表明,盐侵 - 冻融耦合下,混凝土相对

动弹性模量下降、质量损失率上升,劣化速率高于清水冻融。

微观上,盐侵 - 冻融耦合非简单叠加。硫酸盐渗入与水泥石反应生成膨胀侵蚀产物,产生结晶压致微裂缝,裂缝又加剧化学侵蚀;冻融使孔隙水结冰膨胀,推动裂缝延伸。环境扫描电镜显示,耦合作用下混凝土孔隙率增加、孔径向大孔迁移,劣化远超单一因素。

1.2 冻融 - 冲磨交替作用

寒冷地区山溪性流水工过流面混凝土受冻融与冲磨交替作用。春冬冻融使表层微裂纹发育,夏秋汛期水流挟带沙石冲刷加剧剥蚀,此交替模式更贴近工程实际。

新疆农业大学李双喜团队研究揭示其多尺度损伤机制。宏观上,混凝土质量损失和动弹性模量衰减“前期缓慢、后期加速”,损伤速率高于单一冻融与冲磨加权;微观上,冻融使水泥石微裂纹萌生、界面过渡区疏松,冲磨剥离表层产物,为下轮冻融创造条件。压汞测试显示,交替作用后有害孔和多害孔占比增加、孔径向大孔移动^[1]。

1.3 化学 - 应力多场耦合

高坝、大型渡槽等水工混凝土结构,力学荷载与化学侵蚀耦合效应需重视。西南高拱坝现场监测与室内试验表明,温湿循环与盐雾侵蚀耦合下,混凝土力学性能

呈“初期上升、中期下降、后期加速劣化”三阶段特征。初期性能上升是未水化颗粒水化和侵蚀产物填充孔隙,但不可持续,侵蚀产物膨胀致微裂缝后性能下降。

本构关系上,耦合作用使混凝土应力-应变曲线改变,峰值应力降低、峰值应变增大、下降段更陡,材料脆性增强、延性降低。细观损伤模型揭示,本构变化源于内部非均匀损伤场演化,损伤由表及里呈梯度分布。

多场耦合中,湿度场和温度场也参与。干湿循环使盐溶液迁移、盐结晶产生结晶压,温度影响化学反应和水分相变。余思臻等建立的修正 THCD 多场耦合模型能较准确模拟混凝土应变演变。

2 多因素耦合损伤的表征方法与试验研究

2.1 损伤评价指标体系

多因素耦合作用下水工混凝土损伤状态需从宏观与微观层面综合评价。宏观层面常用指标有相对动弹性模量、质量损失率、抗压强度损失率和超声波波速。相对动弹性模量反映整体损伤,质量损失率表征表层剥蚀,两者结合可描述损伤演化;抗压强度衰减关系结构安全;超声波波速便于现场检测。微观层面,环境扫描电镜(ESEM)结合能谱分析(EDS)观察侵蚀产物,压汞法(MIP)表征孔隙率与孔径分布变化,X射线衍射(XRD)分析物相组成演变。多尺度表征关键是建立微观结构参数与宏观性能指标的定量关联,这是构建机理型寿命预测模型的基础。

室内加速试验是研究多因素耦合作用的主要手段,试验工况设计应模拟实际服役环境。盐侵-冻融耦合采用一定浓度盐溶液作冻融介质按快冻法循环试验;冻融-冲磨交替采用两套设备交替运行方案;温湿循环与化学侵蚀耦合可设计专门试验系统控制温湿度和盐雾喷淋^[2]。针对西南高拱坝的研究,试验系统能同步施加温湿循环与盐雾喷淋,模拟大坝上游面工况。结果显示,表层混凝土劣化程度高于芯部,梯度损伤特征对结构整体性能的影响需在本构模型中考虑。

2.2 现场检测与验证

室内加速试验的优势在于周期短、条件可控,但加速倍率的确定和结果的外推需要现场实测数据的校准。多重环境时间相似理论(METS)为此提供了一种有效方法。该理论基于相似原理,选择与目标建筑物服役环

境相似的多个不同服役年限的对照建筑物进行现场实测,获得耐久性指标随时间的衰减规律;同时开展与目标建筑物相同配合比混凝土试件的室内加速试验,得到指标随加速循环次数的衰减规律;通过对比两者建立室内外时间相似关系,进而利用该关系预测目标建筑物的剩余寿命。

景泰川电力提灌工程中渡槽结构的寿命预测研究应用了METS理论^[4]。研究者选取服役17年、27年、47年的渡槽作为对照建筑物,实测其混凝土抗压强度、动弹性模量、超声波波速等指标;同时在室内进行盐侵-冻融耦合加速试验,得到相同配合比混凝土试件的耐久性指标衰减方程。通过对比发现,渡槽排架部位的损伤较槽身严重,这与其更易接触盐渍土、冻融作用更频繁有关。基于建立的相似关系,预测得到某新建渡槽的整体可用年限约为68.6年。

3 水工混凝土寿命预测模型

3.1 基于可靠度理论的概率模型

可靠度理论将混凝土材料性能退化视为随机过程,考虑材料参数等随机性与不确定性,以失效概率或可靠指标度量结构服役状态。对于碳化致钢筋锈蚀问题,研究者建立时变可靠度计算方法:先利用碳化深度预测模型建立其随时间变化的函数,嵌入三维有限元模型获结构响应演变;再用点估计法等计算功能函数的前四阶矩,经双幂变换算时变可靠指标;最后基于可靠指标数据拟合可靠度函数,实现剩余寿命预测^[3]。该方法处理大可靠指标误差小,与蒙特卡洛模拟结果对比验证了高效性与准确性。对于盐侵-冻融耦合作用下劣化过程,采用Weibull分布对相对动弹性模量退化轨迹建模,天然浮石混凝土可靠度呈三阶段退化模型,失效机制属耗损型失效。此基于概率的方法能量化预测结果不确定性,为结构维护决策提供更全信息。

3.2 多重环境时间相似法

METS理论核心是建立室内加速试验与现场自然暴露的相似关系,即 $t=k \cdot t_a$ (t_a 为室内劣化时间, t 为现场暴露时间, k 为时间相似系数)。确定 k 值要考虑环境相似性和劣化机理一致性,具体步骤为:(1)调查目标建筑物服役环境并测定参数,确定室内加速试验条件;(2)选对照建筑物并实测耐久性指标;(3)进行室内加速试验,获耐久性指标衰减规律;(4)以抗

压强度等为关联指标,拟合确定室内外时间相似系数;

(5) 用该系数将室内试验寿命转换为现场预测寿命。景电灌区渡槽寿命预测研究中,对比室内外抗压强度衰减规律得时间相似系数,预测渡槽可用年限 68.63 年-4。不同耐久性指标可能对应不同相似系数,需综合多指标判断。

3.3 基于机器学习的寿命预测模型

随着人工智能技术的发展,机器学习模型为混凝土寿命预测提供了新的途径。与机理模型依赖明确物理方程不同,数据驱动模型从试验数据中学习输入参数(材料配比、环境条件、循环次数等)与输出变量(寿命、损伤程度等)之间的映射关系。覃源等基于 XGBoost 模型建立了盐冻耦合作用下水工混凝土的寿命预测模型。研究以粉煤灰掺量、硫酸钠溶液浓度、冻融循环次数为输入特征,以质量损失率、强度损失率等耐久性指标为输出,利用室内加速试验数据训练模型。结果表明,XGBoost 模型能够较好捕捉各因素对混凝土寿命的非线性影响,预测精度较高。特征重要性分析显示,冻融循环次数和硫酸钠溶液浓度是影响混凝土寿命的关键因素,8%浓度硫酸钠溶液造成的损伤最为严重^[4]。

机器学习模型的优势在于可以处理高维、非线性问题,且随着数据积累模型可不断优化。但其局限性在于缺乏物理可解释性,外推能力有限,且对训练数据的质量和数量要求较高。将机器学习与机理模型相结合的混合建模方法可能是未来发展方向。

3.4 多场耦合本构模型

建立能够描述多因素耦合作用下混凝土力学性能演化的本构模型,是实现精细化寿命预测的理论基础。当前研究主要沿两个方向展开:一是基于细观力学的均匀化方法,二是基于不可逆热力学的宏观唯象模型。

基于均匀化理论的本构模型将混凝土视为由骨料、砂浆及界面过渡区组成的多相复合材料,考虑各相材料在耦合作用下的损伤演化,通过均匀化方法获得宏观应力-应变响应。研究表明,多因素耦合作用下混凝土内部损伤呈非均匀分布,表层损伤严重、芯部相对完好,这种梯度损伤特征应在模型中加以反映。通过引入损伤场函数描述损伤的空间分布,可以更准确地预测结构整体性能^[5]。

对于化学-力学耦合问题,需要建立化学反应速率

与力学损伤之间的定量关系。在多化学腐蚀过程中,硫酸根离子与混凝土固相及液相的化学反应、氯离子的络合反应等均影响微结构演变,进而改变混凝土模量等力学参数。力学-化学模型通过联立化学反应速率方程和力学本构方程,能够模拟模量等参数随腐蚀时间的演化规律,并揭示不同离子侵蚀的竞争机制。类似地,考虑温度历程影响的弹性模量预测模型引入活化能和等效龄期概念,能够反映温度变化对水化进程和力学性能发展的影响。

4 结语

复杂环境下水工混凝土多因素耦合劣化是制约水利工程长期服役性能的核心问题。当前研究认识到耦合效应非单因素简单叠加,通过微裂缝扩展等机制产生协同损伤。试验层面,典型耦合工况损伤演化规律渐明,多尺度表征方法完善;寿命预测层面,从经验公式向多种模型发展,提高了预测准确性和可靠性。

然而,该领域仍有挑战。室内加速试验与现场自然暴露相似关系缺理论支撑,加速倍率确定多依赖经验;现有本构模型多假设材料均匀损伤,与实际梯度损伤特征有差距,考虑非均匀损伤场的研究待深化;多种劣化因素耦合的数学描述多为线性叠加,缺刻画非线性协同效应的理论框架。

未来研究可深入:发展基于原位监测与无损检测的现场数据积累方法,为模型验证和校准提供依据;探索多场耦合下从微观到宏观的跨尺度关联机制;融合机理模型与数据驱动方法优势,构建有物理可解释性的混合预测模型;最终形成指导水工混凝土结构耐久性设计与寿命评估的理论技术体系。

参考文献

- [1] 李毓军,王雨. 盐冻耦合作用下水工混凝土损伤演化规律研究[J]. 江西建材,2025,(09):16-20.
- [2] 蒋林华,闫菁怡,杨国辉,等. 复杂条件下水工混凝土研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(05):81-88.
- [3] 李海边. 硫酸盐侵蚀条件下水工混凝土性能研究[J]. 江西建材,2025,(08):55-59.
- [4] 黄耀英,方晨,邵成羽,等. 冻融循环下非饱和水工混凝土实测应变规律[J]. 水力发电学报,2025,44(05):147-158.