

基于概率分析的锈蚀钢筋混凝土结构寿命预测

戴永琪, 刘晓青

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 钢筋锈蚀是导致混凝土结构破坏的主要原因,合理预测锈蚀钢筋混凝土结构的使用寿命对减少工程的经济损失、保证结构的安全运行具有重要意义。针对锈蚀钢筋混凝土结构在不同寿命评估准则下的使用寿命预测问题,基于混凝土结构耐久性现状检测结果,采用概率分析可靠度方法,通过抗力和荷载效应的统计特征求得结构的时变可靠指标,从而对结构的裂缝宽度寿命和承载力寿命进行分析预测。以拱坝孔口和水电站厂房吊车梁为例进行计算,研究表明:结构的动态可靠指标随着服役时间的增加呈下降趋势,概率分析法的寿命预测结果在合理的预测区间内。研究成果可在实际工程中为钢筋混凝土结构的维修和加固提供决策依据。

关键词: 钢筋锈蚀; 钢筋混凝土结构; 寿命评估准则; 概率分析; 寿命预测

中图分类号:TV332.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0173-07

Service life prediction of corroded reinforced concrete structures based on probability analysis

DAI Yongqi, LIU Xiaoqing

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Reinforcement corrosion is the main cause of the concrete structure failures. The service life prediction of the corroded reinforced concrete structures is of great significance to the reduction of economic loss of the project and safe operation of the structure. Aiming at the problem of service life prediction under different life assessment criteria, the time-varying reliability index of the structure is obtained through the statistical characteristics of resistance and load effect using probability analysis reliability method, based on the test results of structural durability status. According to the index, the crack width life and bearing capacity life of the structure can be analyzed and predicted. The case study of an arch dam orifice and the crane girder of a hydropower house was carried out for the analysis. The results show that the dynamic reliability index of the structure decreases with the increase of service time, and the life prediction result of probability analysis method is within a reasonable prediction range. The study can provide decision-making support for the maintenance and reinforcement of reinforced concrete structures in practical projects.

Key words: reinforcement corrosion; steel reinforced concrete structure; life assessment criterion; probability analysis; service life prediction

1 研究背景

钢筋混凝土材料在水工结构、道路桥梁及房屋建筑中使用广泛,但是环境碳化或中性化会引起混凝土碱度降低,造成钢筋脱钝,进而发生锈蚀^[1],该因素是导致混凝土结构破坏的主要原因^[2-4]。由于

混凝土材料劣化和钢筋锈蚀,大量既有混凝土结构产生耐久性损伤,不能满足结构的正常使用和安全运行,其剩余使用寿命也会受到影响^[5]。因此,在考虑钢筋锈蚀的前提条件下,合理预测既有混凝土结构的使用寿命和剩余年限,科学评估其耐久性能和使用性能,能为结构的维修和加固提供决策依据,

收稿日期:2020-07-20; 修回日期:2020-11-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407102)

作者简介:戴永琪(1996-),女,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为水工结构工程。

通讯作者:刘晓青(1965-),女,四川成都人,博士,教授,研究方向为水工结构工程。

对减少工程的经济损失、保证结构的安全运行具有重要意义^[6]。

经过多年研究,国内外学者在锈蚀钢筋混凝土结构寿命预测方面取得了丰富的成果。卢木^[7]采用专家打分和指标水平的熵值确定钢筋混凝土结构耐久性评价指标的权重,然后基于灰色关联度对结构耐久性进行多层次评定,通过各构件及整体结构的恶化程度和恶化速度评定值得到结构的自然物理剩余寿命。李清富等^[8]以结构损伤系数的时间序列为基础,采用一次累加生成后的序列去推测系统的发展变化规律,应用改进的灰色模型来预测结构剩余寿命,该方法是一种动态预测,具有较强的自适应能力。孙彬等^[9]基于钢筋锈蚀过程的确定性预测模型,采用区间数描述结构参数及环境参数,提出结构锈蚀损伤和使用寿命的区间预测方法,预测结果以区间形式给出。Ahmad^[10]使用各种电化学技术对腐蚀的原因和程度进行评估,借助经验模型和实验方法来预测锈蚀钢筋混凝土结构的剩余使用寿命。Maaddawy等^[11]建立了锈蚀产物膨胀引起的钢筋质量损失与内部径向压力之间的关系,然后利用法拉第定律预测从钢筋开始锈蚀到混凝土保护层锈胀开裂的时间,该预测模型考虑了锈蚀产物在开始对钢筋周围的混凝土施加膨胀压力之前填充这两种材料之间多孔区域所需的时间,并通过与实验数据的比较验证了模型的准确性。Akiyama等^[12]通过联合概率密度函数来同时更新与锈胀裂缝宽度相关的多个随机变量,利用蒙特卡罗模拟法计算海洋环境中钢筋混凝土结构的失效概率,提出一种考虑空气中氯化物危害的时变结构可靠性分析方法。除此之外,还有学者利用混凝土断裂损伤理论^[13-14]、疲劳性能试验^[15-16]和耐久性劣化模型^[17-20]等方法对锈蚀钢筋混凝土结构进行寿命预测。但以往的研究成果在不同寿命评估准则对混凝土结构寿命预测的影响以及结构抗力衰减影响因素的退化规律方面考虑得不够全面,且计算过程较为复杂,在实际工程中难以直接应用。

本文针对上述问题,首先结合钢筋混凝土结构构件的实际工作情况,选取合适的寿命评估准则,然后确定相应的结构功能函数,通过抗力和荷载效应的统计特征求得结构的时变可靠指标,再根据目标可靠指标预测既有结构的剩余使用寿命,最后将所提出的方法应用于拱坝孔口和水电站厂房吊车梁的寿命预测中,并与区间分析法预测的结果进行比较以验证该方法的可行性与合理性。

2 混凝土结构寿命评估准则

混凝土结构寿命评估准则是结构使用寿命或耐久年限终结的标志,亦可称为混凝土结构耐久性失效准则^[21]。因此,在开始对混凝土结构进行寿命预测之前,还需要先行明确结构构件的使用要求及其预定功能,从而确定该结构构件耐久性极限状态的具体内容,这是混凝土结构耐久性评估和寿命预测的重要基础。

从实际工程中混凝土结构的外观缺陷或表面损伤检测结果可以发现,由于混凝土材料本身不均匀性较强且抗拉强度较低,钢筋混凝土结构构件基本都是带裂缝工作的,而随着外部荷载和环境等因素的持续作用,钢筋锈蚀程度增大,裂缝不断发展,结构的承载力也逐渐下降,进而影响到结构的耐久性。目前,混凝土结构寿命评估准则在考虑上述工程实际和相关规范要求的情况下,主要包括裂缝宽度寿命准则和承载力寿命准则这两种。其中,裂缝宽度寿命准则认为当混凝土锈胀裂缝宽度达到规定的限值时,结构的使用寿命就会终止;承载力寿命准则是以混凝土结构构件的承载力降低至规定的限值作为耐久性失效的极限状态。根据钢筋混凝土结构劣化过程,不同寿命评估准则的特征时间以及相互之间的关系如图1所示。

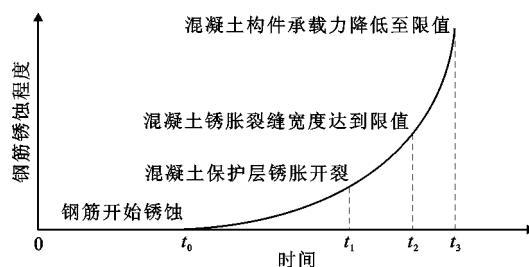


图1 混凝土结构使用寿命不同评估准则的特征时间及其相互关系

3 基于概率分析的锈蚀钢筋混凝土结构使用寿命预测方法

3.1 混凝土结构裂缝宽度寿命分析

对运行中要求限制裂缝宽度的结构构件,可将钢筋混凝土结构构件的最大裂缝宽度限值作为结构抗力,结构服役过程中产生的裂缝宽度作为荷载效应,则结构的功能函数 $Z_c(t)$ 可以表示为:

$$Z_c(t) = w_{lim} - w(t) \quad (1)$$

式中: t 为结构服役时间,a; w_{lim} 为最大裂缝宽度限值,mm; $w(t)$ 为 t 时刻产生的裂缝宽度,mm。

在公式(1)中,最大裂缝宽度限值应根据混凝土结构所处的环境条件类别来确定,并结合结构构件的荷载作用、混凝土保护层厚度以及表面防护措施等具体情况进行适当调整。对于结构在服役过程中产生的裂缝宽度,《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)^[22]在收集国内外混凝土构件锈胀试验以及实际工程调查结果并进行统计分析的基础上,给出了混凝土锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀深度关系的计算建议公式。其中,对配有角部变形钢筋的构件,可按公式(2)计算其混凝土锈胀裂缝宽度。

$$w = \begin{cases} (\delta_w - 0.008c/d - 0.00055f_{cu,e} - 0.015)/0.086 & (w \geq 0.10) \\ (\delta_w - 0.008c/d - 0.00055f_{cu,e} + 0.013)/0.350 & (w < 0.10) \end{cases} \quad (2)$$

式中: w 为混凝土锈胀裂缝宽度,mm; δ_w 为胀裂宽度达到 w 时的钢筋锈蚀深度,mm; c 为混凝土保护层厚度,mm; d 为钢筋直径,mm; $f_{cu,e}$ 为混凝土抗压强度推定值,MPa。

因为混凝土保护层锈胀开裂以后钢筋的锈蚀速度相较于开裂前会有所增大,所以构件表面裂缝宽度达到 w 时的内部钢筋锈蚀深度 δ_w 应包括开裂时的临界值和开裂以后的增加值这两部分,可分别按下述方法确定。

牛荻涛^[23]通过电化学快速锈蚀试验研究了临界状态下的钢筋锈蚀深度与主要影响参数之间的关系,在将试验数据进行回归分析的基础上得到保护层胀裂时变形钢筋锈蚀深度的经验公式为:

$$\delta_{cr} = k_{crs}(0.008c/d + 0.00055f_{cu} + 0.022) \quad (3)$$

式中: δ_{cr} 为混凝土保护层锈胀开裂时的钢筋锈蚀深度,mm; k_{crs} 为钢筋位置修正系数; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度,MPa。

混凝土保护层锈胀开裂以后增加的钢筋锈蚀深度则需要通过开裂后的钢筋平均锈蚀速率和锈蚀时间得到,可以表示为:

$$\delta_d = \lambda_1(t - t_{cr}) \quad (4)$$

式中: δ_d 为混凝土保护层锈胀开裂以后增加的钢筋锈蚀深度,mm; λ_1 为混凝土保护层锈胀开裂后年平均钢筋锈蚀速率,mm/a; t 为构件服役时间或结构建成到检测的时间,a; t_{cr} 为混凝土保护层锈胀开裂时间,a。

通过工程数据的验证^[22],混凝土保护层锈胀开裂后年平均钢筋锈蚀速率可表示为:

$$\lambda_1 = (4.5 - 340\lambda_0)\lambda_0 \quad (5)$$

$$\lambda_0 = 7.53K_{cl} \cdot m \cdot (0.75 + 0.0125T) \cdot (RH - 0.45)^{2/3} \cdot c^{-0.675} \cdot f_{cu,e}^{-1.8} \quad (6)$$

式中: λ_0 为混凝土保护层锈胀开裂前年平均钢筋锈蚀速率,mm/a,当 λ_1 小于 $1.8\lambda_0$ 时, λ_1 取 $1.8\lambda_0$; K_{cl} 为钢筋位置影响系数,钢筋位于角部时取1.6,钢筋位于非角部时取1.0; m 为局部环境系数; T 为年平均温度,℃; RH 为年平均相对湿度, $RH > 0.80$ 时,取0.80。

最后,基于上述变量的概率分布和统计特征计算各个变量对应的统计参数,并代入公式(1)求得结构随服役时间变化的动态可靠指标,再根据结构正常使用极限状态下规定的目标可靠指标与动态可靠指标时变曲线的关系,即可预测混凝土结构的裂缝宽度寿命和剩余裂缝宽度寿命。

3.2 混凝土结构承载力寿命分析

对于将承载力降低至限值作为寿命终止标准的结构构件,其抗力是随时间不断降低的,因此用 $R(t)$ 表示结构抗力随机过程, S_C 表示永久荷载效应随机变量, $S_Q(t)$ 表示可变荷载效应随机过程,则结构的功能函数 $Z_g(t)$ 可以表示为:

$$Z_g(t) = R(t) - S_C - S_Q(t) \quad (7)$$

于是,结构可靠度可以偏安全地表示为:

$$p_s = P\{\min[R(t) - S_C - S_Q(t)] > 0\} = P\{R_{\min} - S_C - S_{Q_{\max}} > 0\} \quad (8)$$

式中: R_{\min} 为结构使用期内最小抗力随机变量; $S_{Q_{\max}}$ 为结构使用期内最大可变荷载效应随机变量。

与混凝土结构裂缝宽度寿命分析不同的是,承载力寿命分析中结构抗力随时间的变化是一个复杂的随机过程,在不同的工作环境和条件下,结构的抗力衰减规律也有所不同。

由于混凝土碳化和钢筋锈蚀,结构构件在使用过程中出现材料性能和几何参数随时间劣化的现象。其中,材料性能劣化具体表现为混凝土抗压强度和钢筋屈服强度的降低以及两种材料之间粘结力的破坏,几何参数劣化具体表现为钢筋锈蚀深度不断增大所导致的钢筋截面面积逐渐减小。因此,抗力衰减模型可以表示为:

$$R_p(t) = R[f_i(t), a_i(t), k_b(t)] \quad (9)$$

式中: $R_p(t)$ 为结构的计算抗力; $f_i(t)$ 、 $a_i(t)$ 分别为第 i 种材料材料性能和几何参数; $k_b(t)$ 为考虑粘结性能退化的钢筋与混凝土协同工作系数。

又因为上述抗力衰减模型中采用的部分基本假定和计算公式可能存在近似性,所以既有结构的实

际抗力可以表示为:

$$R(t) = K_p R_p(t) \quad (10)$$

式中: $R(t)$ 为结构抗力随机过程; K_p 为计算模式不确定性系数随机变量。

根据结构抗力随机过程表达式和数理统计原理,得到结构抗力的平均值 $\mu_R(t)$ 和标准差 $\sigma_R(t)$ 分别为:

$$\mu_R(t) = \mu_{K_p} \cdot \mu_{R_p}(t) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_R(t) &= \mu_R(t) \cdot \delta_R(t) \\ &= \mu_R(t) \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \delta_{R_p}^2(t)} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\delta_R(t)$ 为结构抗力变异系数; μ_{K_p} 、 δ_{K_p} 分别为计算模式不确定性系数的平均值和变异系数; $\mu_{R_p}(t)$ 、 $\delta_{R_p}(t)$ 分别为计算抗力的平均值和变异系数,可以表示为:

$$\mu_{R_p}(t) = R[\mu_{f_i}(t), \mu_{a_i}(t), \mu_{k_b}(t)] \quad (13)$$

$$\delta_{R_p}(t) = \frac{\sigma_{R_p}(t)}{\mu_{R_p}(t)} = \frac{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial \mu_{R_p}}{\partial \mu_{X_i}} \right)^2 \sigma_{X_i}^2(t)}}{\mu_{R_p}(t)} \quad (14)$$

式中: $\mu_{f_i}(t)$ 为第*i*种材料材料性能平均值; $\mu_{a_i}(t)$ 为第*i*种材料的几何参数平均值; $\mu_{k_b}(t)$ 为钢筋与混凝土协同工作系数的平均值; $\sigma_{R_p}(t)$ 为计算抗力的标准差; μ_{X_i} 、 σ_{X_i} 分别为计算抗力中随机变量的平均值和标准差。

由公式(11)~(14)可知,抗力的统计参数可以用结构材料性能和几何参数的统计特征表示,即需要确定各种抗力衰减影响因素的退化规律和统计参数,其确定方法分述如下。

(1) 混凝土抗压强度的退化规律与统计参数。牛荻涛等^[24]基于混凝土试件暴露在一般大气环境下的试验数据以及不同年代建筑物混凝土强度的现场检测结果,利用统计回归方法得到混凝土强度的经时变化数学模型为:

$$\mu_{f_{cu}}(t) = \mu_{f_{cu0}} [1.4529 e^{-0.0246(\ln t - 1.7154)^2}] \quad (15)$$

$$\sigma_{f_{cu}}(t) = \sigma_{f_{cu0}} (0.0305t + 1.2368) \quad (16)$$

式中: $\mu_{f_{cu}}(t)$ 、 $\sigma_{f_{cu}}(t)$ 分别为服役*t*年后混凝土立方体抗压强度的平均值和标准差; $\mu_{f_{cu0}}$ 、 $\sigma_{f_{cu0}}$ 分别为混凝土28d龄期抗压强度的平均值和标准差。

(2) 锈蚀钢筋屈服强度的退化规律与统计参数。吴庆等^[25]对大量锈蚀钢筋的力学性能试验结果进行参数估计和曲线拟合,建立钢筋屈服强度随锈蚀率增大而降低的关系模型为:

$$f_{yc} = f_{y0} (1 - 1.077\eta_s) \quad (17)$$

式中: f_{yc} 为锈蚀钢筋的屈服强度,MPa; f_{y0} 为未锈蚀

钢筋的屈服强度,MPa; η_s 为钢筋锈蚀截面损失率。

根据钢筋屈服强度与锈蚀率之间的定量关系模型和数理统计原理,得到锈蚀钢筋屈服强度的平均值和标准差随服役时间的变化函数分别为:

$$\mu_{f_{yc}}(t) = \mu_{f_{y0}} [1 - 1.077\mu_{\eta_s}(t)] \quad (18)$$

$$\sigma_{f_{yc}}(t) = \sqrt{[1 - 1.077\mu_{\eta_s}(t)]^2 \sigma_{f_{y0}}^2 + (1.077\mu_{f_{y0}})^2 \sigma_{\eta_s}^2(t)} \quad (19)$$

式中: $\mu_{f_{y0}}$ 、 $\sigma_{f_{y0}}$ 分别为未锈蚀钢筋屈服强度的平均值和标准差; $\mu_{\eta_s}(t)$ 、 $\sigma_{\eta_s}(t)$ 分别为服役*t*年后钢筋锈蚀率的平均值和标准差,可通过公式(20)~(22)求得。

按照钢筋锈蚀截面损失率的定义可知钢筋锈蚀深度与锈蚀率之间的关系为:

$$\begin{aligned} \eta_s(t) &= 1 - \left[\frac{d - 2\delta(t)}{d} \right]^2 \\ &= \frac{4\delta(t)}{d} - \frac{4\delta^2(t)}{d^2} \approx \frac{4\delta(t)}{d} \end{aligned} \quad (20)$$

一般大气环境下钢筋混凝土结构锈蚀深度服从正态分布,随着腐蚀程度的增大,钢筋锈蚀深度的平均值和标准差均逐渐增大^[26],其时变模型分别为:

$$\mu_{\delta}(t) = \mu_{\delta}(t_0) \cdot e^{0.0004(t-t_0)^2} \quad (21)$$

$$\sigma_{\delta}(t) = \sigma_{\delta}(t_0) \cdot [1 + 0.025(t - t_0)] \quad (22)$$

式中: t_0 为在役结构自建成至进行耐久性现状检测的时间; $\mu_{\delta}(t)$ 、 $\sigma_{\delta}(t)$ 分别为服役*t*年后钢筋锈蚀深度的平均值和标准差; $\mu_{\delta}(t_0)$ 、 $\sigma_{\delta}(t_0)$ 分别为服役*t*₀年后实测的钢筋锈蚀深度的平均值和标准差。

(3) 锈蚀钢筋混凝土粘结性能的退化规律。锈蚀引起的钢筋与混凝土之间粘结强度降低,是影响钢筋与混凝土共同工作能力的重要因素,也是造成锈蚀钢筋混凝土结构承载力下降的主要原因,故而在计算结构承载力时需要乘以协同工作系数,以体现粘结性能退化对结构承载能力的影响,该系数可以表示为^[27]:

$$k_b = \begin{cases} 1 & (\eta_s < 1.2\%) \\ 1.0168 - 0.014\eta_s & (1.2\% \leq \eta_s \leq 6\%) \end{cases} \quad (23)$$

式中: k_b 为钢筋与混凝土的协同工作系数; η_s 为钢筋锈蚀截面损失率。

由于实际工程问题中大多数基本随机变量不服从正态分布,求得结构功能函数中抗力和荷载效应的统计参数后,宜采用一次二阶矩方法计算锈蚀钢筋混凝土构件在服役过程中的动态可靠性指标。为了预测既有结构的使用寿命,除了分析其时变可靠

度之外,还需要确定目标可靠指标,将既有结构随时间变化的可靠指标与该目标可靠指标进行比较,即可得到结构的剩余使用寿命。结合《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)和《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)的相关规定可知,结构在正常使用极限状态下的目标可靠指标应根据不同结构的特点和工程经验确定,一般取为 1.0~2.0;结构承载能力极限状态的目标可靠指标应根据结构的安全等级和破坏类型确定,一般取为 2.7~4.2。

4 算例分析

4.1 基于裂缝宽度寿命准则的结构使用寿命计算

某混凝土双曲拱坝溢流中孔,进出口高程均为 2 029.00 m,进口尺寸为 5.5 m×8.0 m(宽×高),出口尺寸为 5.5 m×7.0 m(宽×高)。孔口部位采用 C30 混凝土,保护层厚度为 10 cm,结构钢筋采用 HRB400 热轧带肋钢筋,直径为 32 mm。孔口进行耐久性现状检测时已使用了 15 a,检测结果显示角部变形钢筋已经锈蚀且锈蚀深度为 0.012 mm,但混凝土保护层未锈胀开裂。经实际检测和统计分析,孔口各随机变量的统计参数见表 1。该地区的年平均温度为 15.5 ℃,年平均相对湿度为 74%。

表 1 算例溢流孔口各随机变量的统计参数

统计参数	f_{cu}/MPa	c/mm	d/mm	δ_{cr}/mm	$\lambda_0/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	$\lambda_1/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$
平均值	32.76	100	32	0.06502	0.00125	0.00509
标准差	1.68	7.4	0.8	0.00216	0.00013	0.00048

根据《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009),该孔口所处的环境条件属于二类环境,对应的最大裂缝宽度限值为 0.30 mm,采用裂缝宽度寿命准则对拱坝孔口进行寿命评估。根据劣化模型法的计算结果,求得该孔口自建成至混凝土保护层胀裂所需的时间 $t_{cr} = (T_0 - T_{s0}) + T_{cr} = 50.17 \text{ a}$ 。

用中心点法计算溢流孔口的动态可靠指标 $\beta_1(t)$,计算公式如下:

$$\beta_1(t) = [\mu_R(t) - \mu_s(t)] / \sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_s^2(t)}$$

$$= [w_{lim} - \mu_w(t)] / \sigma_w(t) \quad (24)$$

表 2 算例吊车梁各随机变量的统计参数

统计参数	f_{cu}/MPa	δ/mm	d/mm	η_s	A_s/mm^2	f_{y0}/MPa	$R/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$S_G/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$S_{Q_{max}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
平均值	46.07	0.06	25	0.0096	2916.73	416.43	850.77	40.66	264.67
标准差	3.38	0.04	0.4	0.0064	18.85	13.57	97.09	1.75	41.46

通过计算得到可靠指标的时变曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出,孔口的动态可靠指标随服役时间的增加而减小,当目标可靠指标取 1.0 时,孔口的裂缝宽度寿命为 53 a,由于孔口进行耐久性现状检测时已使用 15 a,故孔口的剩余裂缝宽度寿命为 38 a。利用文献[9]所述的区间分析方法预测该孔口的剩余使用寿命为 33~43 a,本文概率分析法的预测结果在该区间内。

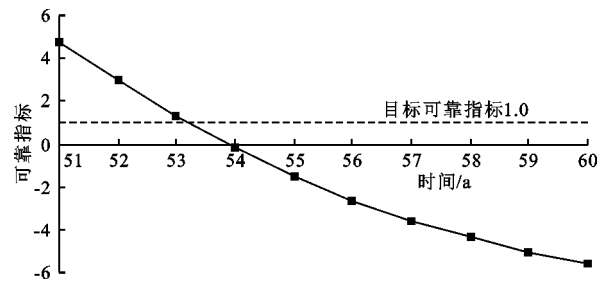


图 2 算例溢流孔口的动态可靠指标随时间变化曲线

4.2 基于承载力寿命准则的结构使用寿命计算

某水电站厂房吊车梁,结构安全级别为 II 级,采用钢筋混凝土预制构件,为以立柱牛腿为支座的单跨简支梁,跨度为 5.7 m,截面型式为 T 形,吊车梁采用 C30 混凝土及 HRB400 钢筋,截面与配筋图如图 3 所示。吊车梁上安装有一台单小车桥式起重机,大车每侧有 2 个车轮,轮距为 2.8 m,最大轮压为 256 kN。该吊车梁进行耐久性现状检测时已使用 20 a,检测结果显示钢筋已经锈蚀且锈蚀深度为 0.076 mm,但混凝土保护层未锈胀开裂。经实际检测和统计分析,吊车梁各随机变量的统计参数见表 2。

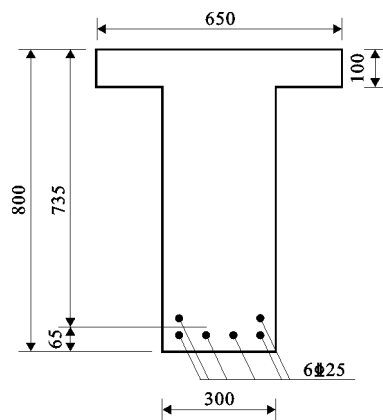


图 3 算例吊车梁截面与配筋图(单位:mm)

采用承载力寿命准则对厂房吊车梁进行寿命评估,抗力平均值和标准差的计算结果分别如图4和5所示;永久荷载效应的平均值和标准差分别为40.66 kN·m和1.75 kN·m;可变荷载效应平均值的计算结果如图6所示,其标准差为41.46 kN·m。

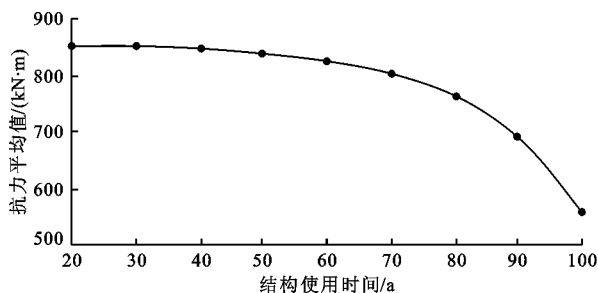


图4 抗力平均值随时间变化曲线

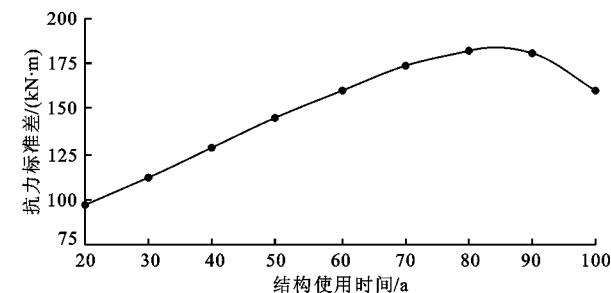


图5 抗力标准差随时间变化曲线

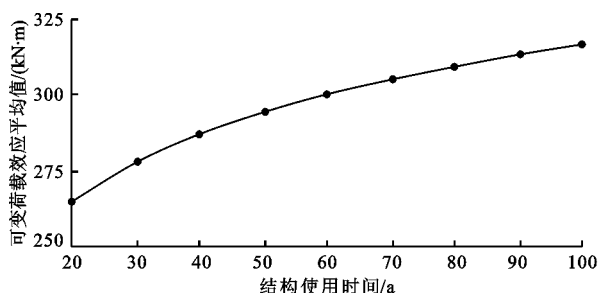


图6 可变荷载效应平均值随时间变化曲线

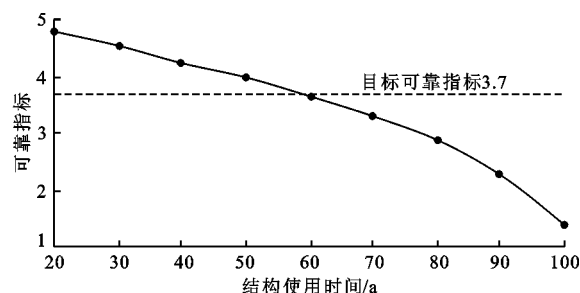


图7 可靠指标随时间变化曲线

由图7可以看出,吊车梁的动态可靠指标随服役时间的增加而减小,当目标可靠指标取3.7时,吊车梁的承载力寿命为57 a,由于吊车梁进行耐久性现状检测时已使用20 a,故吊车梁的剩余承载力寿命为37 a。利用文献[9]所述的区间分析方法预测该吊车梁的剩余使用寿命为35~42 a,本文概率分析法的预测结果在该区间内。

5 结论

本文对锈蚀钢筋混凝土结构的寿命预测方法进行研究,主要结论如下:

(1)基于钢筋锈蚀劣化模型的混凝土结构使用寿命预测方法属于确定性方法,其寿命预测结果只是均值意义上的使用寿命,而影响既有混凝土结构耐久性的许多因素都是随机的,因此采用概率分析法进行结构的寿命预测是较为合理的。

(2)算例分析表明,结构的动态可靠指标随着服役时间的增加呈下降趋势,概率分析法的寿命预测结果在合理的预测区间内。基于概率分析可靠度理论的锈蚀钢筋混凝土结构使用寿命预测方法可以结合结构构件的形式特点和使用要求,考虑不同寿

用验算点法计算吊车梁的动态可靠指标 $\beta_2(t)$,计算公式如下:

$$\beta_2(t) = \frac{[\mu_{R'}(t) - \mu_G(t) - \mu_{Q'}(t)]}{\sqrt{\sigma_{R'}^2(t) + \sigma_G^2(t) + \sigma_{Q'}^2(t)}} \quad (25)$$

通过计算得到可靠指标的时变曲线如图7所示。

命评估准则对结构寿命预测的影响以及结构抗力衰减影响因素的退化规律,通过抗力和荷载效应的统计特征求得结构的时变可靠指标从而预测既有结构的剩余使用寿命,该方法分析过程简单易行,预测结果合理可靠,适用于在役钢筋混凝土结构的剩余使用寿命预测。

(3)本文提出的寿命预测方法是针对混凝土碳化引起钢筋锈蚀的一般环境情况进行研究的,对于冻融环境、氯化物环境以及化学腐蚀环境等特殊环境,钢筋锈蚀机理和混凝土劣化规律都有所不同,因此不同环境类别下结构抗力衰减模型的建立是今后需要进一步开展的研究工作。

参考文献:

- [1] 施锦杰, 孙伟. 混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1753-1764.
- [2] 周建庭, 苏欣, 辛景舟, 等. 锈蚀钢筋混凝土结构抗力衰变综述(1): 材料层次[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 458-464.
- [3] 贾红梅, 阎贵平, 闫光杰. 混凝土中钢筋锈蚀的研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 56-59.
- [4] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理

- 及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 327-332.
- [5] 金伟良, 吕清芳, 赵羽习, 等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 7-13.
- [6] 何文敏. 混凝土结构使用寿命预测模型研究综述[J]. 材料导报, 2011, 25(8): 141-144.
- [7] 卢木. 基于耐久性评定的钢筋混凝土结构的剩余寿命预测[J]. 建筑科学, 1999, 15(2): 23-28.
- [8] 李清富, 成子桥, 刘建民. 混凝土结构剩余寿命的预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(1): 11-15.
- [9] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 基于区间分析的锈蚀钢筋混凝土结构使用寿命预测[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(6): 110-115.
- [10] AHMAD S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction: A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4-5): 459-471.
- [11] MAADDAWY T E, SOUDKI K. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(3): 168-175.
- [12] AKIYAMA M, FRANGOPOL D M, YOSHIDA I, et al. Probabilistic approach to service life prediction of concrete structures subjected to load and environmental actions [C] // ANDRADE C, MANCINI G. Modelling of Corroding Concrete Structures. Berlin: Springer, 2011.
- [13] 王显利, 李雪艳, 孟宪强. 钢筋混凝土锈胀开裂耐久寿命的预测[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(8): 54-57.
- [14] 潘洪科, 王穗平, 祝彦知, 等. 钢筋混凝土结构锈胀开裂的耐久性寿命评判与预测研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 111-116.
- [15] 欧阳祥森, 罗小勇, 万翱宙, 等. 考虑耐久性损伤的钢筋混凝土梁疲劳寿命试验研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(11): 112-120.
- [16] 易伟建, 孙晓东. 锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 6-10.
- [17] 宋福春, 安娜. 混凝土内部钢筋的腐蚀及使用寿命[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 669-674.
- [18] 王晓刚, 刘永峰. 锈蚀钢筋混凝土结构的剩余使用寿命实用计算方法[J]. 建筑技术开发, 2010, 37(6): 8-12.
- [19] 高升. 基于耐久性的混凝土寿命预测方法研究进展[J]. 混凝土, 2018, 30(6): 25-30.
- [20] 祁亚勤, 阎明阳. 一般大气环境下钢筋混凝土桥梁耐久性寿命评估[J]. 公路交通科技, 2012, 8(5): 199-201.
- [21] 屈文俊, 张誉. 侵蚀性环境下混凝土结构耐久寿命预测方法探讨[J]. 工业建筑, 1999, 29(4): 40-44.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [23] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [24] 牛荻涛, 王庆霖. 一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J]. 工业建筑, 1995, 25(6): 36-38.
- [25] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47.
- [26] 李广慧, 杜朝, 蒋晓东. 在役建筑结构的剩余寿命预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 1999, 20(3): 6-9.
- [27] 金伟良, 赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 9-11.