

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.011

基于三阶矩时变可靠指标的混凝土渡槽剩余使用寿命预测方法

张龙文^{1,2,3}, 侯杰¹, 刘倩¹, 文清柏⁴

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院; 2. 湖南省灌区工程技术研究中心;
3. 农业高效节水与水利数字建造湖南省普通高等学校重点实验室; 4. 湖南省欧阳海灌区水利水电工程管理局)

摘要: 基于混凝土碳化深度建立渡槽结构时变功能函数,采用点估计法求取前三阶统计矩,对比分析了 3 种三阶矩法的时变可靠指标计算结果,并提出了基于时变可靠指标的渡槽剩余使用寿命预测方法。以湖南省砂子背渡槽为例,计算了其在混凝土碳化失效模式下的失效概率与可靠指标,并通过数据拟合得到剩余使用寿命预测公式。结果表明:基于对数正态分布的三阶矩法精度和适用性最佳,与蒙特卡罗模拟结果高度一致,误差仅为 0.42%;基于平方正态分布与指数函数的三阶矩法计算效率较高,但误差分别为 8.23% 和 9.31%。提出的渡槽剩余使用寿命预测方法可用于渡槽碳化失效条件下的结构寿命评估及安全维护。

关键词: 渡槽; 时变可靠指标; 点估计法; 三阶矩法; 寿命预测

Remaining service life prediction method for concrete aqueducts based on third-moment time-dependent reliability index

Zhang Longwen^{1,2,3}, Hou Jie¹, Liu Qian¹, Wen Qingbai⁴

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University;
2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Irrigation District Technology;
3. Key Laboratory of Agricultural Efficient Water Conservation and Digital Construction of Water Resources of Universities in Hunan Province;
4. Water Resources and Hydropower Engineering Management Bureau of Ouyanghai Irrigation District, Hunan Province)

Abstract: A time-dependent performance function for the aqueduct structure was established based on concrete carbonation depth. The first three statistical moments were obtained using the point estimate method, and the calculation results of time-dependent reliability indices by three third-moment methods were comparatively analyzed. Furthermore, remaining service life prediction method for aqueducts based on the time-dependent reliability index was proposed. By taking the Shazibei Aqueduct in Hunan Province as an example, the failure probability and reliability index under the concrete carbonation failure mode were calculated, and the remaining service life prediction formula was obtained through data fitting. The results indicate that the third-moment method based on lognormal distribution exhibits the best accuracy and applicability, which is highly consistent with the Monte Carlo simulation results, with an error of 0.42%. The third-moment methods based on the square normal distribution and exponential function have higher calculation efficiency, but the errors are 8.23% and 9.31%, respectively. The proposed method can be used for life assessment and maintenance of aqueducts under carbonation failure conditions.

Key words: aqueduct; time-dependent reliability index; point estimate method; third-moment method; life prediction

钢筋混凝土渡槽是水利工程中输水系统的重要组成部分,其安全性与耐久性对于保障水资源的高效利用至关重要^[1]。然而,混凝土材料在长期服役过程中会受到环境因素的侵蚀和材料老化的影响^[2],其中碳化过程是导致结构劣化的主要原因之一。碳化不仅会降低混凝土的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,还会加剧裂缝的产生和扩展,最终影响渡槽的安全性和使用寿命。因此,如何准确预测渡槽的剩余使用寿命已成为工程结构可靠性分析中的重要研究课题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738001);湖南省自然科学基金项目(2022JJ40188);长沙市自然科学基金项目(kq2202234);湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0176);湖南省水利科技项目(XSKJ2025056-41);2022 年湖南省研究生科研创新项目(CX20220684);2022 年湖南农业大学研究生科研创新项目(2022XC053)

作者简介: 张龙文(1988—),男,副教授,博士,主要从事工程结构可靠性研究。E-mail:zhanglongwen@hunau.edu.cn

针对混凝土结构剩余使用寿命的预测, Lee 等^[3]采用了确定性和概率论相结合的建模方式, 依据混凝土碳化模型来评估其剩余使用寿命; Qin 等^[4]提出了一种基于熵权法的新型综合评估策略, 以量化混凝土的耐久性, 并运用灰色理论对其使用寿命进行预测; 周兰庭等^[5]针对混凝土坝变形, 使用长短期记忆神经网络 (LSTM) 和高斯拟合分析的预测结果进行叠加重构, 能更好逼近真实值; 张智梅等^[6]建立了纤维增强聚合物加固钢筋混凝土梁的有限元模型, 提出考虑钢筋应力幅和纤维增强聚合物轴向刚度的疲劳寿命预测公式; 韦芳芳等^[7]利用 LSTM 算法和时序转换算法构建机器学习模型来预测渡槽非线性地震响应, 进而预测渡槽损伤。然而, 传统寿命预测模型主要关注单一时刻的状态, 难以反映结构在长期服役过程中的动态变化。

时变可靠度分析^[8-10]能够将时间变量和环境作用纳入同一框架, 量化不同时间节点的失效概率, 从而更全面捕捉结构性能退化过程, 是实现工程结构寿命预测的有效途径之一。近年来, 已有学者围绕时变可靠度开展了大量研究, 如陈水生等^[11]综合考虑在正常大气环境下混凝土强度、钢筋强度以及混凝土与钢筋之间黏结性能的衰退现象, 构建了一个适用于普通钢筋混凝土桥梁的抗力退化时变模型; Guo 等^[12]提出了一种评估钢筋混凝土梁在海洋环境中的时变可靠度通用计算框架; 杨霖^[13]引入时间离散法计算渡槽结构时变可靠度, 基于工程实例建立了承载力与抗裂极限状态方程, 并采用蒙特卡罗模拟 (MCS) 法验证其精度; 金聪鹤等^[14]基于时变可靠度理论, 采用 Gamma 分布来描述结构抗力的非平稳劣化过程, 并用二维联合分布函数来表达相邻荷载的相关性, 基于贝叶斯原理提出了时变可靠度计算公式, 并采用 MCS 法对计算结果进行了验证。

在可靠度计算方法中, 矩法是常用且应用广泛的方法。其中, 一次二阶矩法^[15]仅利用前两阶矩描述随机性, 对非线性与偏态问题的适用性有限; 三阶矩法引入偏度信息, 在保持效率的同时可提升可靠度计算精度^[16]。目前, 三阶矩法在渡槽可靠度分析与剩余使用寿命预测中的应用仍相对较少。为此, 本文拟建立基于三阶矩法的渡槽剩余使用寿命预测方法, 并对 3 种典型三阶矩法^[17-19]的计算精度与适用性进行对比分析, 以为渡槽结构的可靠度分析与剩余使用寿命预测提供参考。

1 混凝土碳化的时变功能函数

1.1 混凝土碳化深度预测模型

混凝土碳化是指空气中的 CO₂ 与水泥中的碱性物质发生化学反应, 在碳化过程中不仅会导致混凝土内碱度降低从而破坏钢筋表面的钝化膜, 同时还会加剧混凝土的收缩产生裂缝而导致工程结构的破坏^[20]。国内外学者基于混凝土所处的环境、施工影响因素以及受力性能的变化等提出了大量预测模型, 其中潘洪科等^[21-22]构建了时间、应力水平、水灰比多种因素交叉影响下的混凝土碳化深度预测模型 (式 (1)), 本文依据该预测模型构建渡槽结构的功能函数。

$$H_t = K\sqrt{t} = \eta K_s K_\sigma \frac{c}{at + b} \sqrt{t} = \eta [msK_{\sigma-s} + n(1.5 - 0.5K_{\sigma-s})] \left[1 + p \frac{\sigma}{\sigma_f} \left(1 - K_{s-\sigma} \frac{s - s_0}{s_0} \right) \right] \frac{c}{at + b} \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: H_t 为 t 时刻结构在拉应力作用下的碳化深度; K 为碳化速度系数; t 为时间; η 为结构在拉应力作用下的钢筋影响系数, 取 0.94; K_s 为水灰比对碳化的影响系数; K_σ 为应力对碳化的影响系数; σ 为结构应力, 作为随机变量, 可通过三维有限元分析得到; σ_f 为抗拉极限强度; s 为水灰比, 为随机变量; s_0 为初始水灰比, 取 0.4; $K_{\sigma-s}$ 为结构在拉应力作用下结构应力对水灰比影响系数的交叉影响修正系数; $K_{s-\sigma}$ 为结构在拉应力作用下水灰比对结构应力影响系数的交叉影响修正系数; a 、 b 、 c 、 m 、 n 、 p 为拟合参数。

1.2 混凝土碳化深度的时变功能函数

当混凝土保护层碳化至钢筋表面时, 钢筋钝化膜失效、锈蚀加速, 渡槽结构安全性显著降低, 故可将钢筋混凝土渡槽结构的实际钢筋保护层厚 H 视为广义抗力 R , 混凝土的碳化深度 H_t 视为广义作用效应 S 。结合式 (1) 和结构力学的分析, 构建钢筋混凝土渡槽碳化深度的时变功能函数 G 如下:

$$G = R - S = H - \eta [msK_{\sigma-s} + n(1.5 - 0.5K_{\sigma-s})] \left[1 + p \frac{\sigma}{\sigma_f} \left(1 - K_{s-\sigma} \frac{s - s_0}{s_0} \right) \right] \frac{c}{at + b} \sqrt{t} \quad (2)$$

2 基于三阶矩法的渡槽剩余使用寿命预测方法

2.1 点估计法求矩

在计算可靠指标和失效概率前, 需根据基本随机变量的概率分布特征, 使用点估计法计算前三阶统计

矩,再将对应的统计矩代入理论公式进行计算。本文使用 Zhao 等^[23]在标准正态空间获取的估计点,考虑效率及精度采用 7 点估计法计算功能函数的前三阶矩,同时利用 Rosenblatt 变换和 Gauss-Hermite 积分公式并参考文献[23],功能函数 G 的前三阶矩(即均值 μ_G 、标准差 σ_G 、偏度 α_{3G})公式可表示为:

$$\mu_G = \sum_{i=1}^m w_i G(T^{-1}(u_i)) \tag{3}$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i [G(T^{-1}(u_i)) - \mu_G]^2} \tag{4}$$

$$\alpha_{3G} = \frac{1}{\sigma_G^3} \sum_{i=1}^m w_i [G(T^{-1}(u_i)) - \mu_G]^3 \tag{5}$$

式中: m 为标准正态空间的点估计数; u_i 为标准正态空间随机变量的 i 点估计值; w_i 为估计点值的权重; $T^{-1}(u_i)$ 为随机变量的 Rosenblatt 变换。7 点估计法的估计点值分别为 $0, \pm 1.154\,405\,4, \pm 2.366\,759\,4, \pm 3.750\,439\,7$, 对应权重分别为 $16/35, 0.240\,123\,3, 3.075\,71 \times 10^{-4}, 5.482\,69 \times 10^{-4}$ 。

2.2 基于对数正态分布的三阶矩法(对数三阶矩法)

对于功能函数 G ,在已知前三阶矩的情况下,Tichý^[17]假设其标准化变量服从三参数对数正态分布,参考文献[17],其三阶矩可靠指标 β_{3M-1} 表达式为:

$$\beta_{3M-1} = -\frac{\alpha_{3G}}{6} - \frac{3}{\alpha_{3G}} \ln\left(1 - \frac{1}{3}\alpha_{3G}\beta_{2M}\right) \tag{6}$$

式中: β_{2M} 为二阶矩可靠指标。

2.3 基于平方正态分布的三阶矩法(平方三阶矩法)

Zhao 等^[18]假设标准化变量服从三参数平方正态分布,其三阶矩可靠指标 β_{3M-2} 表达式为:

$$\beta_{3M-2} = \frac{1}{\alpha_{3G}} \left(3 - \sqrt{9 + \alpha_{3G}^2 - 6\alpha_{3G}\beta_{2M}}\right) \tag{7}$$

2.4 包含指数函数的三阶矩法(指数三阶矩法)

王娇等^[19]基于对数三阶矩法和平方三阶矩法推导出了—种适用性更加广泛的包含指数函数的三阶矩法,其三阶矩可靠指标 β_{3M-3} 表达式为:

$$\beta_{3M-3} = \frac{1}{3}\beta_{2M} \left[2 + e^{\frac{\alpha_{3G}}{2}(\beta_{2M} - \frac{1}{\beta_{2M}})}\right] \tag{8}$$

2.5 混凝土渡槽剩余使用寿命预测分析框架

为高效精确预测渡槽的剩余使用寿命,本文提出—种基于点估计结合三阶矩法的渡槽剩余使用寿命预测方法,其预测步骤如下:①构建钢筋混凝土渡槽碳化深度的时变功能函数;②确定影响渡槽碳化深度随机变量的分布类型和统计参数;③使用—维减维 7 点估计法计算前三阶矩;④计算功能函数各时刻的三阶矩可靠指标与失效概率;⑤对时变可靠指标数据进行拟合得到剩余使用寿命计算公式;⑥通过表达式对钢筋混凝土渡槽的剩余使用寿命进行预测。

3 实例分析

本文以湖南省欧阳海灌区砂子背渡槽为例,分别采用基于上述 3 种三阶矩法的剩余使用寿命预测方法对该渡槽进行计算,得到前三阶矩、时变可靠指标和剩余使用寿命,并采用 MCS 法验证其精度。砂子背渡槽位于湖南省耒阳市欧阳海灌区右总干渠,总长 80.1 m,槽身横断面为矩形,底宽 8 m,槽深 5.8 m,为拱式钢筋混凝土渡槽,设计纵坡为 1/2 000,设计流量为 37 m³/s,混凝土强度等级为 C30,由两个圆弧拱、17 个支墩和 3 个主墩组成,渡槽立面如图 1 所示。

3.1 渡槽有限元模型构建

砂子背渡槽为钢筋混凝土结构,采用有限元软件 Midas Civil 对渡槽进行仿真分析,分步模拟渡槽实际加载和施工过程,揭示砂子背渡槽在自重、风荷载和人群荷载耦合作用下的受力特点。有限元模型各参数为:混凝土强度等级 C30,密度 2 549 kg/m³,弹性模量 28 GPa,泊松比 0.2,钢筋屈服强度 210 MPa,自重系数

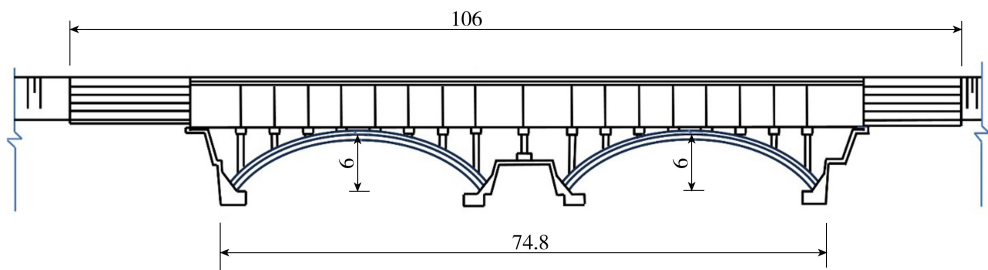


图 1 砂子背渡槽立面示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of elevation of Shazibei Aqueduct (unit: m)

-1.04,风荷载系数-0.44 kN/m,人群荷载系数 6 kN/m。整个模型采用 Midas 梁单元建模,取计算坐标系为 $Oxyz$,顺渡槽水流方向为 x 轴,水平面内垂直水流方向为 z 轴,垂直水面方向为 y 轴。有限元模型共剖分了 2955 个梁单元,2961 个节点。主要建模步骤为:首先划分节点和单元,确定几何参数和材料参数建立有限元模型,然后设置边界条件,分步施加自重、风荷载和人群荷载,最后得到在荷载组合工况(自重+水压力+人群荷载)下的内力与应力云图,进行静力分析。渡槽有限元模型如图 2 所示。

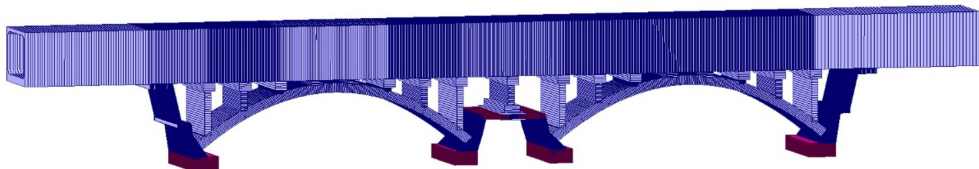


图 2 砂子背渡槽有限元模型

Fig.2 Finite element model of Shazibei Aqueduct

3.2 随机变量的确定

经有限元分析,渡槽轴向拉应力为 0.11~0.23 MPa(图 3)。通过 7 点估计法得到自重+水压力+人群荷载工况下随机变量拉应力的前三阶矩,其均值、标准差和偏度分别为 0.154 MPa、0.0357 MPa、-0.106,如图 3 所示。

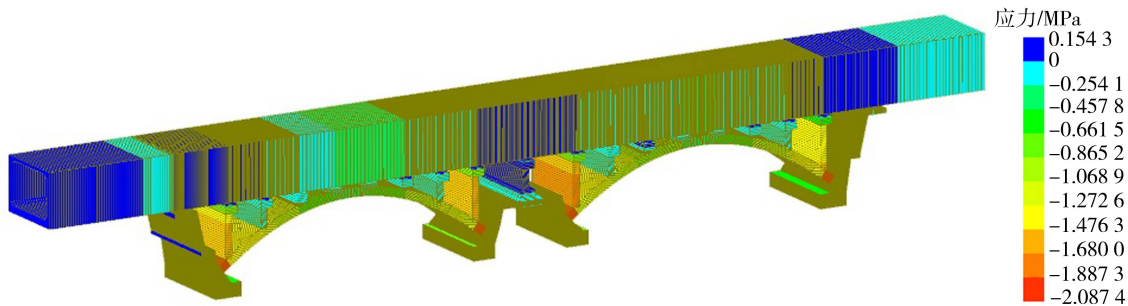


图 3 砂子背渡槽轴向拉应力云图

Fig.3 Axial tensile stress nephogram of Shazibei Aqueduct

本工程算例将渡槽拉应力(以自重、水压力及人群荷载工况为例)、水灰比^[24]以及混凝土保护层厚度作为随机变量进行考虑。依据砂子背渡槽检测报告,渡槽上、下游边墩保护层厚度在 16~31 mm 之间,中墩保护层厚度在 16~39 mm 之间,下游边墩保护层厚度在 15~25 mm 之间,由此计算得出混凝土保护层厚度的均值为 22.67 mm、标准差为 6.96 mm、偏度为 0.81,并假设其服从对数正态分布。钢筋混凝土渡槽碳化深度的时变功能函数中随机变量的统计矩与分布类型如表 1 所示,其他参数信息见表 2。建立考虑渡槽混凝土碳化深度极限状态的时变功能函数,表达式见式(2)。

表 1 基本随机变量的统计矩与分布类型

Table 1 Statistical moments and distribution types of basic random variables

随机变量	均值	变异系数	概率分布类型	数据来源
σ	0.154 MPa	0.036	正态分布	计算值
s	0.45	0.200	正态分布	文献[24]
H	22.67 mm	0.310	对数正态分布	计算值

3.3 混凝土碳化时变可靠指标计算

3.3.1 功能函数前三阶矩计算

基于标准正态空间的 7 点估计法计算随机变量的前三阶矩,利用 Mathematica 和 Matlab 软件编写渡槽混凝土碳化深度极限状态功能函数的前三阶矩计算程序。作为对比,利用 MCS 法对随机变量进行了 200 万~10 000 万次(具体见表 3)随机抽样计算渡槽混凝土碳化深度,统计超越极限状态次数来估计渡槽结构的失效概率^[26-27]。7 点估计法和 MCS 法计算的前三阶矩见表 3,MCS 法计算的渡槽失效概率见表 4,其中失效概率变异系数 V 计算公式为:

$$V = \sqrt{1 - P_f / NP_f}$$

(9)

式中: P_f 为 MCS 法计算得到的失效概率; N 为模拟次数。为保证 MCS 的精度,本文 V 控制在 0.1 以内。为了判断点估计法和 3 种不同的三阶矩法的计算精度,本文以 MCS 法为标准值,通过比较不同计算方法和标准值的相对误差来反映计算精度。

表 3 7 点估计法与 MCS 法计算的功能函数前三阶矩

Table 3 First three moments of performance function calculated by seven point estimate method and MCS method										
使用 年限/a	7 点估计法(计算 21 次)			MCS 法(计算 200 万次以上)				相对误差/%		
	均值/mm	标准差/mm	偏度	均值/mm	标准差/mm	偏度	计算次数/ 10^6	均值	标准差	偏度
10	15.226 7	7.027 7	0.959 8	15.215 3	7.036 6	0.955 9	100	0.074 9	0.126 5	0.408 0
15	13.634 2	7.049 2	0.951 0	13.638 0	7.048 7	0.946 7	20	0.027 9	0.007 1	0.454 2
20	12.327 6	7.055 9	0.948 4	12.334 8	7.051 7	0.933 1	10	0.058 4	0.059 6	1.639 7
25	11.207 1	7.062 3	0.945 8	11.206 1	7.077 2	0.955 7	10	0.008 9	0.210 5	1.035 9
30	10.220 9	7.068 5	0.943 3	10.215 0	7.040 7	0.927 2	2	0.057 8	0.394 8	1.736 4
35	9.338 0	7.074 5	0.940 9	9.347 4	7.059 0	0.937 2	2	0.100 6	0.219 6	0.394 8
40	8.537 9	7.080 2	0.938 6	8.512 4	7.079 2	0.936 4	2	0.299 6	0.014 1	0.234 9
45	7.806 2	7.085 8	0.936 4	7.787 1	7.098 3	0.934 6	2	0.245 3	0.176 1	0.192 6
50	7.132 4	7.091 1	0.934 3	7.132 3	7.083 7	0.941 6	2	0.001 4	0.104 5	0.775 3

表 4 MCS 法计算的渡槽失效概率与时变可靠指标

Table 4 Failure probability and time-dependent reliability index of aqueduct calculated by MCS method

使用年限/a	P_f	β	V	计算次数/ 10^6
10	0.000 272	3.458 1	0.085 7	100
15	0.002 300	2.835 2	0.029 5	20
20	0.008 400	2.388 9	0.024 2	10
25	0.019 889	2.050 1	0.015 7	10
30	0.036 310	1.794 8	0.016 3	2
35	0.057 770	1.573 8	0.012 8	2
40	0.083 350	1.382 9	0.010 5	2
45	0.112 480	1.213 4	0.008 9	2
50	0.140 308	1.078 9	0.007 8	2

图 4 为点估计法计算的前三阶矩相对误差。可以看出,点估计法的计算结果与 MCS 法计算结果吻合较好,均值、标准差和偏度的最大相对误差分别为 0.299 6%、0.394 8%和 1.736 4%。

3.3.2 渡槽时变可靠指标计算

首先根据第 1 节建立的混凝土碳化深度预测模型采用 7 点估计法与有限元方法计算碳化模型中随机变量的前三阶矩,然后将前三阶矩代入三阶矩法中计算渡槽混凝土碳化时变可靠指标(β)。为了对比 3 种三阶矩法的准确性,同时计算可靠指标,并运用 MATLAB 软件编写 MCS 法计算程序,得到其失效概率和时变

可靠指标用于校核比较。本工程算例的随机变量随机抽样 200 万~10000 万次,具体见表 4,计算得到的渡槽失效概率和时变可靠指标如表 5 所示。

图 5、图 6 为 3 种三阶矩法和 MCS 法的失效概率和时变可靠指标计算结果,可以看出,指数三阶矩法和 MCS 法趋势相近,但误差较大。对数三阶矩法和平方三阶矩法与 MCS 法吻合良好,但平方三阶矩法在 10~20 a 的可靠指标无法求解。如表 5 所示,计算渡槽 50 a 服役期,对数三阶矩法的可靠指标最大相对误差仅为 2.82%,平方三阶矩法、指数三阶矩法的最大相对误差则分别为 6.80%和 11.03%,说明了基于对数正态分布的三阶矩法计算高可靠度情况的精确性。

表 5 3 种三阶矩法计算的渡槽失效概率与时变可靠指标

Table 5 Failure probability and time-dependent reliability index of aqueduct calculated by three third-moment methods									
使用 年限/a	对数三阶矩法			平方三阶矩法			指数三阶矩法		
	P_f	β_{3M-1}	相对误差/%	P_f	β_{3M-2}	相对误差/%	P_f	β_{3M-3}	相对误差/%
10	0.000 689	3.526 69	1.98				0.001 382	3.076 82	11.03
15	0.002 723	2.838 30	0.11				0.005 482	2.553 75	9.93
20	0.010 035	2.384 72	0.17				0.016 807	2.180 61	8.72
25	0.021 377	2.042 90	0.35	0.016 934	2.176 8	6.18	0.032 611	1.888 51	7.88
30	0.042 973	1.770 76	1.34	0.040 787	1.795 6	0.04	0.053 546	1.650 61	8.03
35	0.062 736	1.546 18	1.75	0.064 230	1.529 2	2.83	0.075 740	1.451 52	7.77
40	0.093 341	1.356 07	1.94	0.099 715	1.321 5	4.44	0.107 084	1.281 54	7.33
45	0.123 584	1.192 06	1.76	0.131 229	1.150 6	5.18	0.134 252	1.134 21	6.53
50	0.150 057	1.048 50	2.82	0.157 986	1.005 5	6.80	0.158 089	1.004 94	6.86

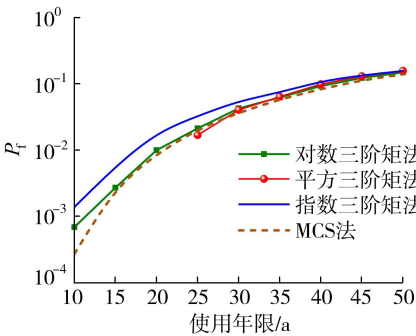


图 5 失效概率曲线
Fig. 5 Failure probability curves

由于 7 点估计法只需要计算 21 次,而要获取较高精度,MCS 法则需要计算上百万次,表明采用 7 点估计法在保证较高精度的前提下,能减少计算次数,提高计算效率。

由表 5 可以观察到,随着时间发展,钢筋混凝土渡槽的碳化失效概率不断增大,呈现正相关的增长模式,可靠指标不断降低,呈现负相关的增长模式。表明随使用年限增加,混凝土碳化速度加快,导致渡槽结构性性能退化,验证了本文点估计法结合三阶矩法计算渡槽时变可靠指标的高效性与精确性。

4 渡槽的剩余使用寿命预测

依据前面计算得到的渡槽时变可靠指标,可预测钢筋混凝土渡槽的剩余使用寿命。钢筋混凝土渡槽的剩余使用寿命采用 GB 50068—2018《建筑结构可靠性设计统一标准》的目标可靠指标 2.7 进行计算。通过对 3 种三阶矩法和 MCS 法计算得到的渡槽时变可靠指标进行数据拟合,得到低等劣化情况的拟合结果如图 7 所示,根据拟合公式可以计算得到渡槽的剩余使用寿命,如表 6 所示。

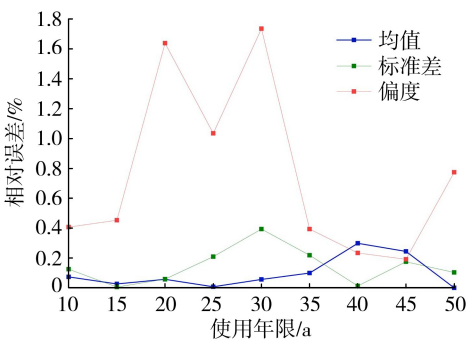


图 4 点估计法计算的前三阶矩相对误差
Fig. 4 Relative errors of first three moments calculated by point estimate method

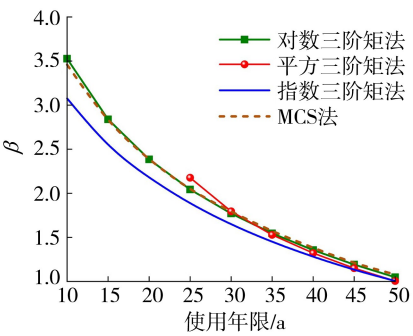


图 6 时变可靠指标曲线
Fig. 6 Time-dependent reliability index curves

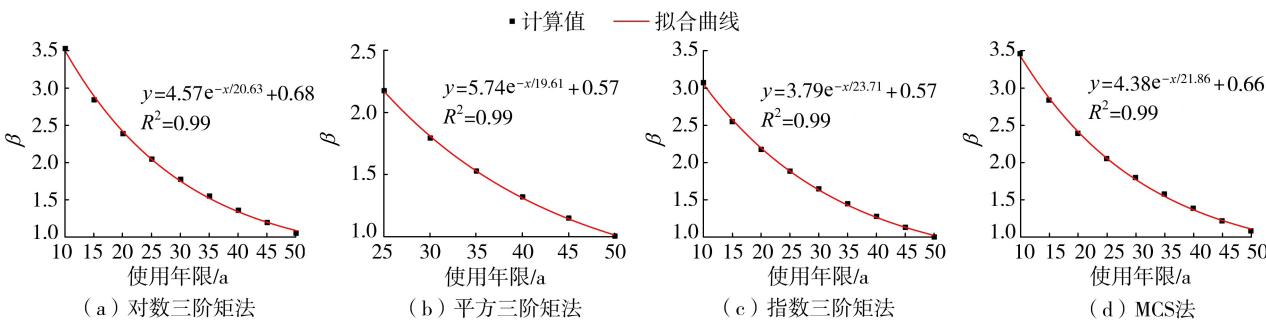


图 7 不同方法时变可靠度指标的拟合曲线

Fig. 7 Fitted curves of time-dependent reliability indices by different methods

由表 6 可知,平方三阶矩法预测结果相对误差为 8.23%,属于偏安全的预测方法,在实际工程中采用该方法进行预测,可能会浪费渡槽尚未耗尽的剩余使用寿命,导致全生命周期成本增加和资源浪费;而指数三阶矩法预测结果相对误差高达 9.31%,且剩余使用寿命偏大,在工程实际中使用可能会导致无法及时维修,产生安全隐患;基于对数正态分布的三阶矩法预测结果最为精确,相对误差仅为 0.42%,可以准确预测渡槽剩余使用寿命与维修时间。

因此,基于碳化深度时变功能函数,并将点估计法与对数正态三阶矩法相结合计算可靠指标,可高效合理地预测渡槽的剩余使用寿命,既能满足工程实践的需求,也对保障农业生产和居民生活用水安全具有重要的意义。

5 结 语

本文建立了渡槽混凝土碳化深度功能函数,对比分析了 3 种三阶矩法计算的渡槽时变可靠指标,采用 MCS 法校核准确性,并在此基础上预测渡槽剩余使用寿命。工程实例结果分析表明:采用 7 点估计法计算前三阶矩,在保证精度的同时可显著降低计算量,仅需 21 次函数调用即可获得功能函数前三阶矩,均值、标准差和偏度的最大相对误差分别为 0.2996%、0.3948%和 1.7364%。将 7 点估计法求得的前三阶矩代入 3 种三阶矩法计算可靠指标,并与 MCS 法结果对比,结果表明,对数三阶矩法精度最高,最大相对误差为 2.82%,而平方三阶矩法和指数三阶矩法相对误差较大,分别为 6.80%和 11.03%。在渡槽剩余使用寿命预测方面,对数三阶矩法与 MCS 法结果最为接近,相对误差仅为 0.42%,平方三阶矩法和指数三阶矩法相对误差分别为 8.23%和 9.31%。因此,7 点估计法结合对数三阶矩法在渡槽时变可靠指标分析与剩余使用寿命预测方面表现出较好的综合优势。

参考文献:

[1] 李昭辉,李子阳,马福恒,等. 中国大型灌区工程风险分析与安全评价研究[J]. 水利水运工程学报,2023(5):1-8. (Li Zhaohui,Li Ziyang,Ma Fuheng,et al. Research on risk analysis and safety evaluation of large-scale irrigation projects in China [J]. Hydro-Science and Engineering,2023(5):1-8. (in Chinese))

[2] 李涛,刘喜,李振军,等. 基于 BP-ANN 与 RBF-ANN 的钢筋与混凝土黏结强度预测模型研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2024,46(1):112-118. (Li Tao,Liu Xi,Li Zhenjun,et al. Research on prediction model of bond strength between reinforcement and concrete based on BP-ANN and RBF-ANN[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2024,46(1):112-118. (in Chinese))

[3] Lee H, Lee H S, Suraneni P, et al. Prediction of service life and evaluation of probabilistic life-cycle cost for surface-repaired carbonated concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(10):04020297.

[4] Qin Yuan, Guan Ke, Kou Jialiang, et al. Durability evaluation and life prediction of fiber concrete with fly ash based on entropy weight method and grey theory[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327:126918.

[5] 周兰庭,邓思源,柳志坤,等. 基于 SSA-LSTM-GF 的混凝土坝变形预测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):73-80. (Zhou Lanting, Deng Siyuan, Liu Zhikun, et al. Deformation prediction method of concrete dam based on SSA-

表 6 剩余使用寿命预测结果

Table 6 Prediction results of remaining service life

计算方法	剩余使用寿命/a	相对误差/%
对数三阶矩法	33.16	0.42
平方三阶矩法	30.56	8.23
指数三阶矩法	36.34	9.31
MCS 法	33.30	

LSTM-GF[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):73-80. (in Chinese))

[6] 张智梅,严一铭. 界面黏结性能影响下 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳寿命的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):94-100. (Zhang Zhimei,Yan Yiming. Numerical simulation of flexural fatigue life of FRP-strengthened reinforced concrete beams affected by interfacial bond performance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):94-100. (in Chinese))

[7] 韦芳芳,林澳庆,赵有正,等. 基于机器学习的简支梁式渡槽结构地震响应与易损性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):101-108. (Wei Fangfang,Lin Aoqing,Zhao Youzheng,et al. Seismic response and vulnerability analysis of simply supported beam aqueduct structure based on machine learning method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):101-108. (in Chinese))

[8] Alam J,Zhang Hao,Neves L A C,et al. Sequential Bayesian updating for time-variant reliability analysis of ageing structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2023,204:110774.

[9] 张亮,唐亚可,牛凯,等. 基于 AK-FORM 方法和降维方法的高效时变可靠度分析方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2025,47(3):162-170. (Zhang Liang,Tang Yake,Niu Kai,et al. An efficient time-varying reliability method based on AK-FORM method and dimension reduction method[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2025,47(3):162-170. (in Chinese))

[10] 杨霖,李宗利,尚洪彬. 矩形渡槽槽身结构时变可靠度分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):105-110. (Yang Lin,Li Zongli,Shang Hongbin. Time-varying reliability analysis of a rectangular aqueduct body structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):105-110. (in Chinese))

[11] 陈水生,赵辉,李锦华,等. 大气环境下的钢筋混凝土桥梁时变可靠度分析[J]. 计算力学学报,2022,39(5):591-597. (Chen Shuisheng,Zhao Hui,Li Jinhua,et al. Atmospheric environment-based time-varying reliability analysis of reinforced concrete bridges[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2022,39(5):591-597. (in Chinese))

[12] Guo Hongyuan,Jiang Chao,Gu Xianglin,et al. Time-dependent reliability analysis of reinforced concrete beams considering marine environmental actions[J]. Engineering Structures,2023,288:116252.

[13] 杨霖. 考虑温度荷载的矩形渡槽槽身结构时变可靠度分析研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.

[14] 金聪鹤,钱永久,徐望喜,等. 考虑抗力非平稳劣化和荷载相关性的桥梁可靠性分析[J]. 工程力学,2024,41(2):202-212. (Jin Conghe,Qian Yongjiu,Xu Wangxi,et al. Bridge reliability analysis considering non-stationary degradation of resistance and load dependency[J]. Engineering Mechanics,2024,41(2):202-212. (in Chinese))

[15] Ditlevesen O,Madsen H O. Structural reliability methods[M]. Chichester:Wiley,1996:75-85.

[16] 苏莱曼. 基于三阶矩法的钢-混凝土组合梁可靠性研究[D]. 长春:吉林大学,2023.

[17] Tichý M. First-order third-moment reliability method[J]. Structural Safety,1994,16(3):189-200.

[18] Zhao Yangang,Lu Zhaohui,Ono T. A simple third-moment method for structural reliability[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering,2006,5(1):129-136.

[19] 王娇,叶新颖. 基于三阶矩法的简支梁桥时变可靠度评估[J]. 建筑结构,2021,51(增刊 2):1068-1074. (Wang Jiao,Ye Xinying. Time-varying reliability evaluation of a simply-supported girder bridge based on third-moment method[J]. Building Structure,2021,51(S2):1068-1074. (in Chinese))

[20] 郑开发,卢万友,周程涛,等. 碳化对大坝混凝土细观结构及力学特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):8-15. (Zheng Kaifa,Lu Wanyou,Zhou Chengtao,et al. Effect of carbonation on mesostructures and mechanical properties of dam concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(3):8-15. (in Chinese))

[21] 潘洪科. 基于碳化作用的地下工程结构的耐久性与可靠度[D]. 上海:同济大学,2005.

[22] 潘洪科,牛季收,杨林德,等. 地下工程砼结构基于碳化作用的耐久性劣化模型[J]. 工程力学,2008,25(7):172-178. (Pan Hongke,Niu Jishou,Yang Linde,et al. The durability deterioration model based on carbonation for underground concrete structures[J]. Engineering Mechanics,2008,25(7):172-178. (in Chinese))

[23] Zhao Yangang,Ono T. New point estimates for probability moments[J]. Journal of Engineering Mechanics,2000,126(4):433-436.

[24] 常佳,祝彦知,纠永志,等. 在役钢筋混凝土渡槽多失效模式时变可靠度分析[J]. 人民黄河,2022,44(1):139-143. (Chang Jia,Zhu Yanzhi,Jiu Yongzhi,et al. Time-varying reliability analysis of multi-failure modes of reinforced concrete aqueducts in service[J]. Yellow River,2022,44(1):139-143. (in Chinese))

[25] 沈蒲生,梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社,2020.

[26] Duprat F,Vu N T,Sellier A. Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures [J]. Construction and Building Materials,2014,66(15):597-605.

[27] Zhao Yangang,Lu Zhaohui. Structural Reliability[M]. Hoboken,New Jersey,USA:Registered Offices John Wiley & Sons,2021:10-33.