

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.076



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于锈胀裂缝宽度的损伤混凝土梁可靠度分析

柏玉良, 金伟良, 余一凡, 金康成

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要:为了探究损伤混凝土梁的耐久性能退化规律,通过引入疲劳损伤因子和徐变损伤因子,建立含疲劳和徐变损伤混凝土梁保护层锈胀开裂后钢筋锈蚀深度的计算模型,并根据《混凝土结构耐久性设计标准》建立由锈胀裂缝宽度控制的耐久性极限状态方程。运用 Monte-Carlo 数值模拟方法计算 6 根混凝土试验梁在裂缝宽度限值范围内的可靠度;采用验算点法计算腐蚀电流密度、混凝土抗压强度、保护层厚度和钢筋直径等 4 项参数的灵敏度。结果表明:随着锈蚀时间的增加,可靠度从 0.9 下降到 0.1,并且在 60% 疲劳寿命次数的循环荷载作用后,持荷时间增加 3 个月对梁的可靠度影响较小;保护层厚度的增加和钢筋直径的减小均能提高梁的可靠度,减缓结构可靠度在钢筋锈蚀前期的下降速度,8 mm 的钢筋直径可以作为损伤混凝土梁耐久性设计的参照值;腐蚀电流密度、保护层厚度和钢筋直径 3 个参数的灵敏度较大,因此,这 3 个参数是耐久性极限状态可靠度的主要影响因素。

关键词:损伤混凝土梁;锈胀裂缝宽度;极限状态方程;可靠度;灵敏度

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)04-0140-08

Reliability analysis of damaged concrete beams based on the rust crack width

BAI Yuliang, JIN Weiliang, YU Yifan, JIN Kangcheng

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the degradation law of the durability of damaged concrete beams, by introducing the fatigue damage factor and the creep damage factor, the calculation model of the corrosion depth of the steel bar after corrosion cracking of the protective layer of the concrete beam with fatigue and creep damage was established. According to the durability design standard of concrete structure, the durability limit state equation controlled by the rust crack width was established. The Monte-Carlo numerical simulation method was used to calculate the reliability of six concrete test beams within the crack width limit. The sensitivity of the four parameters, including corrosion current density, concrete compressive strength, protective layer thickness and steel bar diameter, was calculated using the checkpoint method. The research results show that the reliability decreases from 0.9 to 0.1 with the increase of corrosion time and the increase of holding time for three months has little effect on the reliability of the beam after cyclic loading of 60% of the fatigue life times.

收稿日期:2023-03-21

基金项目:国家自然科学基金(51820105012)

作者简介:柏玉良(1996-),男,主要从事混凝土结构可靠性能研究,E-mail: baiyuliang@zju.edu.cn。

金伟良(通信作者),男,教授,E-mail: jinwl@zju.edu.cn。

Received: 2023-03-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51820105012)

Author brief: BAI Yuliang (1996-), main research interest: concrete structural reliability, E-mail: baiyuliang@zju.edu.cn.

JIN Weiliang (corresponding author), professor, E-mail: jinwl@zju.edu.cn.

The increase of the protective layer thickness and the decrease of the diameter of the steel bar can both improve the reliability of the beam and slow down the decline rate of the structural reliability at the early stage of corrosion of the steel bar. The steel bar diameter of 8 mm can be used as a reference value for the durability design of damaged concrete beams. The sensitivity of the three parameters of corrosion current density, protective layer thickness and steel bar diameter is so relatively large that three parameters are the main influencing factors of durability limit state reliability.

Keywords: damaged concrete beams; rust crack width; limit state equation; reliability; sensitivity

在钢筋混凝土结构服役期间,环境中的有害介质侵入混凝土内部,导致钢筋表面的钝化膜破坏,引起钢筋的锈蚀。随着锈蚀量的增加,在钢筋与混凝土交界面出现锈胀裂缝,而钢筋锈蚀引起的混凝土结构开裂被认为是钢筋混凝土结构耐久性失效的主要原因^[1]。然而,对于实际工程结构,其往往遭受环境和荷载的耦合作用,加速了混凝土结构的开裂^[2]。在环境和荷载作用的影响下,荷载裂缝的产生加速了钢筋锈蚀,而随着钢筋锈蚀程度的加深,混凝土表面锈胀裂缝宽度不断增大。当结构锈胀裂缝宽度达到限值时,严重影响结构的正常使用功能。

对于钢筋锈蚀引起的耐久性能退化问题,有学者们^[3-15]围绕混凝土保护层锈胀开裂和锈胀裂缝等方面开展了大量研究,主要集中在钢筋锈蚀量和锈胀裂缝宽度方面。在钢筋锈蚀量方面,牛荻涛^[4]通过电化学加速锈蚀试验,在试验数据的基础上进行回归分析,建立了混凝土保护层锈胀开裂时变形钢筋锈蚀深度计算模型;赵羽习等^[5]建立了钢筋锈蚀导致的混凝土保护层锈胀开裂力学模型,并应用弹性力学分析得到了混凝土保护层锈胀开裂时的钢筋锈蚀率解析式;王胜年等^[6]通过对30多座海港实体工程进行调查和长达20 a的长期暴露试验,给出了考虑影响因素较为全面的钢筋临界锈蚀深度计算公式;陆春华等^[7]假定钢筋均匀锈蚀,借助弹性力学和Faraday定律,建立了混凝土保护层锈胀开裂时刻的钢筋锈蚀率以及锈胀开裂时间计算公式;Rodriguez等^[8]通过钢筋混凝土梁的加速锈蚀试验,考虑了保护层厚度、钢筋直径和混凝土抗拉强度等变量,建立了钢筋临界锈蚀深度计算模型;吴俊^[9]考虑疲劳徐变损伤对混凝土梁的影响,通过Poly2D函数对试验数据进行了曲面双因素拟合,得到了临界锈蚀深度衰减系数。在锈胀裂缝宽度方面,Rodriguez等^[10]考虑了钢筋位置对裂纹发展的影响,建立了锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀渗透系数的关系式;Vidal等^[11]对两根在氯盐环境下自然腐蚀了14、17 a的钢筋混凝土梁纵向钢筋进行了试验,通过失重法测量计算了钢筋不同位置的锈蚀率和裂缝宽

度,建立了锈胀裂缝宽度和锈蚀钢筋截面损失面积的关系;Zhang等^[12]在文献[10-11]的基础上,选择平均截面损失参数作为裂纹扩展第二阶段钢筋锈蚀参数,建立了锈胀裂缝宽度计算模型;夏晋^[13]通过电化学加速锈蚀试验,建立了锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率的对数关系式;《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)^[14]综合考虑各种影响因素后,给出了裂缝宽度不小于0.1 mm的锈胀裂缝宽度计算模型。钟小平等^[15]通过对混凝土试件进行干湿循环、恒电流通电的加速锈蚀试验,研究了氯盐环境下混凝土力学性能的退化规律,并给出了以锈胀裂缝宽度为损伤变量的混凝土抗压强度劣化计算模型。

目前,对于钢筋锈蚀引起的耐久性能问题研究主要集中于腐蚀环境单一作用的状况,而混凝土桥梁在一定设计使用年限内(50、100 a)服役时,设备、自重等持续荷载作用会伴随整个服役周期。在持荷作用初期(5 a内)徐变发展迅速,随着持荷时间的增加,徐变进入平稳期,在此期间内,混凝土桥梁会遭受车辆、行人等疲劳荷载作用,疲劳和持续荷载的共同作用将会导致荷载裂缝,使得结构过早锈胀开裂。因此,笔者基于锈胀裂缝宽度,建立含疲劳和徐变损伤混凝土梁的耐久性极限状态方程,并采用Monte-Carlo数值模拟方法和验算点法分别对损伤混凝土梁的可靠度和灵敏度进行计算。

1 损伤梁锈胀裂缝宽度计算模型

1.1 开裂混凝土梁的锈蚀深度

钢筋开始锈蚀后,锈蚀深度能很好地反映钢筋的锈蚀程度,当钢筋锈蚀深度达到临界锈蚀深度时,混凝土保护层就会沿钢筋长度方向发生纵向开裂。假设钢筋为均匀锈蚀,根据Faraday定律^[16],钢筋锈蚀深度与腐蚀电流密度之间的关系为

$$\delta = \frac{M \cdot i_{\text{corr}} \cdot t}{\rho_s \cdot zF} \quad (1)$$

式中: δ 为锈蚀深度,mm; M 为铁的摩尔质量,56 g/mol; i_{corr} 为钢筋腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; t 为腐蚀时间,s; ρ_s 为铁的密度, $7.9 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; z 为铁离子的

化学价, $\text{Fe}^{2+}, z=2; \text{Fe}^{3+}, z=3; F$ 为 Faraday 常数, $96\,500\text{ C/mol}$ 。

当腐蚀电流密度为 $1\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ 时, 在 1 h 锈蚀时间内下钢筋锈蚀深度为

$$\delta_1 = \frac{M \cdot i_{\text{corr}} \cdot t}{\rho_s z F} = \frac{56 \times 36}{2 \times 96\,500 \times 7.9} = 1.322 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad (2)$$

则钢筋锈蚀深度与时间的关系式为

$$\delta(t) = 1.322 \times 10^{-3} \int_{t_p}^t i_{\text{corr}}(t) dt \quad (3)$$

式中: t_p 为钢筋开始锈蚀的时间, h 。

对于腐蚀电流密度, 由于受温度、湿度、保护层厚度等相关因素影响, 已有学者^[17-19]考虑不同的影响因素, 建立了不同腐蚀电流密度的时变模型。而混凝土梁由于受循环荷载和持续荷载作用, 产生荷载裂缝, 为氯离子的扩散提供了快速通道, 加速了钢筋的锈蚀。因此, 在模拟海洋环境下进行了大量荷载引起裂纹的受弯构件试验后, Li^[20]给出了混凝土保护层开裂后的腐蚀电流密度时变模型

$$i_{\text{corr}}(t) = 0.368 \ln t + 1.1305 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中, 得到开裂混凝土梁锈蚀深度计算模型

$$\delta(t) = 1.322 \times 10^{-3} \times [0.368 \ln(t - t_{\text{cr}}) + 0.762 \ln(t - t_{\text{cr}})] \quad (5)$$

式中: t_{cr} 为混凝土保护层开裂时间, h 。

1.2 含疲劳和徐变损伤混凝土梁的锈蚀深度

考虑循环荷载作用次数对混凝土结构疲劳累积损伤的影响, 基于连续介质损伤力学的疲劳损伤理论会更符合结构的破坏机理。潘华等^[21]基于损伤力学, 根据混凝土的材料性能选定合理的耗散势函数, 在分析混凝土疲劳损伤的发展规律之后, 选用合适的混凝土微塑性应变方程, 得到混凝土损伤变量与疲劳次数的关系, 从而建立了混凝土疲劳损伤模型(式(6))。同时, 根据试验数据拟合, 确定了混凝土在单级等幅循环荷载作用下疲劳损伤变量 D 的演化方程, 见式(7)。

$$D = 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{1/(1+\gamma)} \quad (6)$$

$$D = 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{1.3057(1-R^2)S^{4.9128}} \quad (7)$$

式中: γ 为参数; R 为疲劳应力比, $R = \sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$; S 为受压疲劳荷载的应力水平, $S = \sigma_{\text{max}}/f_c$, 其中, σ_{max} 、 σ_{min} 分别为混凝土梁中钢筋的最大和最小疲劳应力, MPa ; f_c 为混凝土抗压强度, MPa 。

引入疲劳损伤因子 k_f 来考虑循环荷载作用对混

凝土结构的损伤, k_f 表达式为

$$k_f = 1 - D = \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{1.3057(1-R^2)S^{4.9128}} \quad (8)$$

而在实际服役期间, 混凝土结构除遭受疲劳损伤外, 还会承受持续荷载的长期作用, 随着持续荷载作用时间的增加, 混凝土强度不断降低。混凝土的徐变损伤主要是由材料内部微裂纹和孔隙的扩展引起的。根据 Griffith 断裂理论可知, 在外荷载的作用下, 材料内部的应变能逐渐累积, 当累积的应变能超过新裂纹产生需要的表面能时, 裂缝就会发展、扩展^[22]。已有研究表明, 混凝土在长期持续荷载与短期荷载作用下的力学性能不同, 当仅考虑时间变量的影响, 不考虑与混凝土长期性能密切相关的材料组成、应力水平、环境等因素的影响时, 可以采用朱伯芳^[23]提出的徐变损伤计算模型(式(9))来考虑持续荷载作用对混凝土结构的损伤。

$$k_c = 0.849 t_c^{-0.0224}, t \geq 0.01 \text{ d} \quad (9)$$

式中: k_c 为徐变损伤因子(持续荷载作用下的强度与标准试验速率下强度的比值); t_c 为持荷时间。

在循环荷载和持续荷载长期作用后, 随着损伤程度的增加, 钢筋混凝土梁的混凝土强度不断下降, 裂缝产生并不断扩展, 荷载裂缝的存在加速了钢筋的锈蚀, 导致钢筋锈蚀深度不断增加。因此, 可以假定含疲劳和徐变损伤梁的锈蚀深度与损伤程度成正比, 则开裂后锈蚀深度可以表示为

$$\delta(t)_{\text{ic}} = \frac{\delta(t)}{k_f \cdot k_c} = 1.322 \times 10^{-3} \times \frac{[0.368 \ln(t - t_{\text{cr}}) + 0.762 \ln(t - t_{\text{cr}})]}{k_f \cdot k_c} \quad (10)$$

1.3 理论模型与试验结果对比

试验结果来自文献[9]中含疲劳和徐变损伤混凝土梁的耐久性能试验, 混凝土梁锈胀开裂后的锈蚀深度理论与试验结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 含疲劳和徐变损伤梁试验

表 1 锈蚀深度计算值与试验值

Table 1 Calculated values and test values of corrosion depth

试件编号	试验值/mm	计算值/mm	试验/计算
B _{F2.5C3E}	0.174 7	0.217 5	0.803
B _{F15C3E}	0.234 0	0.237 4	0.986
B _{F60C3E}	0.309 2	0.266 9	1.158
B _{F2.5C6E}	0.219 6	0.234 8	0.935
B _{F15C6E}	0.263 9	0.247 7	1.065
B _{F60C6E}	0.289 6	0.270 1	1.072

注: B_{F2.5C3E} 表示对混凝土试验梁先进行 2.5% 疲劳寿命次数的循环加载, 再进行持荷 3 个月的徐变堆载, 最后进行 288 h 的通电加速锈蚀试验, 其他混凝土试验梁编号含义类似。

值与计算值比值的均值为 1.003, 变异系数为 0.113。均值几乎为 1, 变异系数也较小, 表明锈蚀深度试验值与计算值吻合较好, 可以用式(10)来计算构件在疲劳、徐变损伤后的锈蚀深度。为了能清楚地了解试验值与理论值的变化情况, 将锈蚀深度的试验值与计算值绘制成散点图, 如图 1 所示。

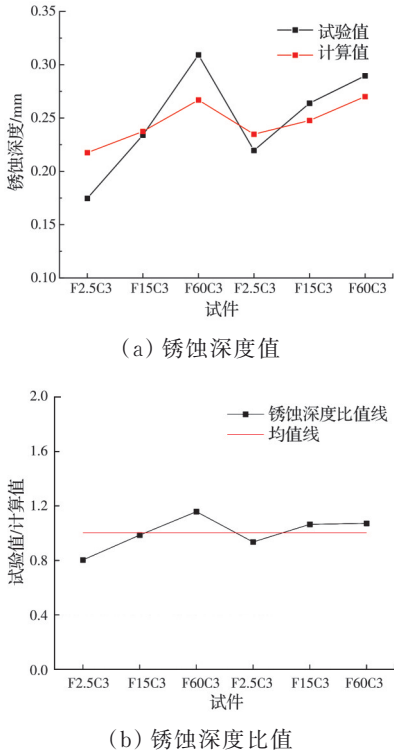


图 1 锈蚀深度试验值与计算值变化曲线
Fig. 1 Variation curve of test values and calculated values of corrosion depth

从图 1 中可以看出, 持荷时间为 3 个月时, 15% 疲劳损伤梁锈蚀深度的试验值与计算值几乎一样, 2.5% 和 60% 疲劳损伤梁试验值与计算值差值几乎一样, 分居两侧, 变化幅度较为接近; 持荷时间为 6 个月时, 试验值与计算值很接近, 变化幅度很小, 在 0.016 mm 左右, 试验值与计算值比值的均值也在 1.003 附近 10% 范围内波动, 表明计算值与试验值吻合度较高, 含疲劳和徐变损伤梁开裂后的锈蚀深度计算模型具有一定的适用性。

2 基于锈胀裂缝宽度的可靠度研究

2.1 耐久性极限状态方程

由锈胀裂缝宽度控制的耐久性极限状态的荷载效应可以根据《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)^[14]进行计算, 由于梁在通电加速前经历了循环荷载与持续荷载作用, 荷载裂缝的产生加速了锈胀裂缝的发展, 则锈胀裂缝宽度达到 0.1 mm 后的计算公式为

$$\delta(t)_{ic} = [0.1147(d \ln t - t_{cr} \ln t_{cr}) + 0.2373(t - t_{cr})] \times \frac{t_c^{0.0224}}{(1 - n/N)^{0.0896}} \quad (11)$$

$$\omega_{ic} = 11.6279\delta(t)_{ic} - 0.093\frac{c}{d} - 0.006395f_{cu}^{28} - 0.17442 \quad (12)$$

式中: n 为循环荷载作用次数; N 为疲劳寿命; c 为混凝土保护层厚度, mm; d 为钢筋直径, mm; f_{cu}^{28} 为混凝土立方体 28 d 抗压强度, MPa。

由锈胀裂缝宽度控制的耐久性极限状态抗力可由《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)^[14]规定的允许裂缝宽度值确定。

对于耐久性极限状态, 将规范要求的裂缝宽度作为混凝土结构构件的抗力, 将含疲劳和徐变损伤梁在通电加速下产生的锈胀裂缝宽度视为荷载效应, 从而建立混凝土结构构件的耐久性极限状态方程

$$Z = [\omega] - \alpha_{\omega} \omega_{ic} \quad (13)$$

式中: $[\omega]$ 为规范规定的裂缝宽度限值, 取 0.4 mm; ω_{ic} 为锈胀裂缝宽度计算值, mm; α_{ω} 为计算模式不确定系数, 取试验值与计算值比值的均值 1.003。

2.2 基于锈胀裂缝宽度的可靠度

混凝土锈胀裂缝宽度的可靠度计算基于 Monte-Carlo 数值模拟的方法, 模拟次数为 10^6 , 并利用 Matlab 编写可靠度计算程序, 最终得到 6 根含疲劳和徐变损伤梁在不同影响因素下的可靠度。在进行可靠度计算时选取腐蚀电流密度、混凝土抗压强度、混凝土保护层厚度和钢筋直径作为随机变量, 各随机变量分布类型及统计参数如表 2 所示^[24-26]。同时, 通过计算模式不确定系数考虑试验值与理论值之间的离散性。按照基本随机变量的分布类型, 利用 Matlab 生成随机数矩阵; 将随机数代入极限状态方程中, 计算得到功能函数的一个随机数, 依次进行下去, 可以产生 n 个功能函数的随机数; 如果 n 个功能函数随机数中有 m 个小于或等于 0, 当 n 足够大时 (本文为 10^6), 就可以用频率来估计结构的失效概率。

表 2 锈胀裂缝宽度随机变量的统计参数

Table 2 Statistical parameters of random variables of rust expansion crack width			
基本变量	平均值	变异系数	分布类型
计算模式不确定系数 α_{ω}	1.003	0.113	正态分布
腐蚀电流密度 $i_{corr}/(\mu A/cm^2)$	200	0.15	正态分布
混凝土抗压强度 f_{cu}^{28}/MPa	30.8	0.12	对数正态分布
保护层厚度 c/mm	15	0.02	正态分布
钢筋直径 d/mm	10	0.01	正态分布

$$P_f = P\{Z \leq 0\} = \frac{m}{n} \quad (14)$$

而结构的可靠与失效是两个对立事件,结构可靠度表示在规定时间内、规定条件下完成预定功能的概率,与失效概率的关系如式(15)所示。

$$P_s = 1 - P_f \quad (15)$$

在 0.1~0.4 mm 锈胀裂缝宽度范围内,6 根试验梁可靠度随锈蚀时间的变化情况如图 2 所示。

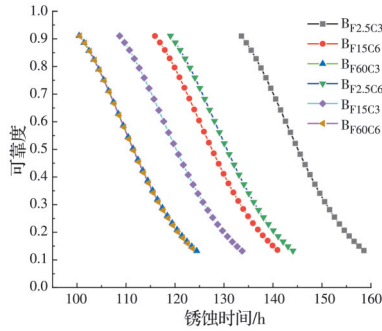


图 2 锈胀裂缝宽度可靠度时变曲线

Fig. 2 Reliability time-varying curves of rust crack width

从图 2 可以看出,随着锈蚀时间的增加,梁的可靠度逐渐下降,且下降趋势趋近于一致,都是从 0.9 下降到 0.1 左右,并且斜率较大。表明循环荷载与持续荷载的相继作用促进了裂纹的萌生与扩展,混凝土结构内部裂缝丛生,加速了腐蚀介质在混凝土内部的传输。在较小增量下,通电加速锈蚀时间也能降低梁的可靠度,增大梁的失效概率。同时,还

可以发现,试验梁 B_{F60C3E} 和 B_{F60C6E} 的可靠度时变曲线几乎重合,表明在 60% 疲劳寿命次数的循环荷载作用下,持荷时间增加 3 个月引起的徐变损伤对梁的可靠度影响较小,可能是因为梁在循环荷载作用下产生较大的荷载裂缝,较小的持荷时间增加对于荷载裂缝的发展影响较小。因此,在实际工程结构中,当结构受到循环荷载和持续荷载作用后,应做好加固措施来提高结构的疲劳寿命,从而提高在腐蚀环境下服役的混凝土结构的耐久性。

2.3 可靠度影响因素分析

由于疲劳和徐变损伤加速了结构的劣化,极大地增大了结构的失效概率。因此,在保持梁尺寸不变的情况下研究保护层厚度 c 和钢筋直径 d 对结构可靠度的影响,为混凝土结构的耐久性设计提供相应的理论依据。

1) 保护层厚度对可靠度的影响

图 3 为 0.1~0.4 mm 锈胀裂缝宽度范围内 6 根试验梁在 1 h 锈蚀时间增量下的锈胀裂缝宽度可靠度时变图。从图 3 可以看出,随着保护层厚度的增加,梁的初始可靠度和锈胀裂缝宽度达到限值时的可靠度均有所提高,并且随着锈蚀时间的增加,可靠度在前期的下降速度逐渐减缓,斜率减小,表明保护层厚度的增加延缓了腐蚀介质在荷载裂缝间的传输速度,降低了微小锈胀裂缝之间相互连结、

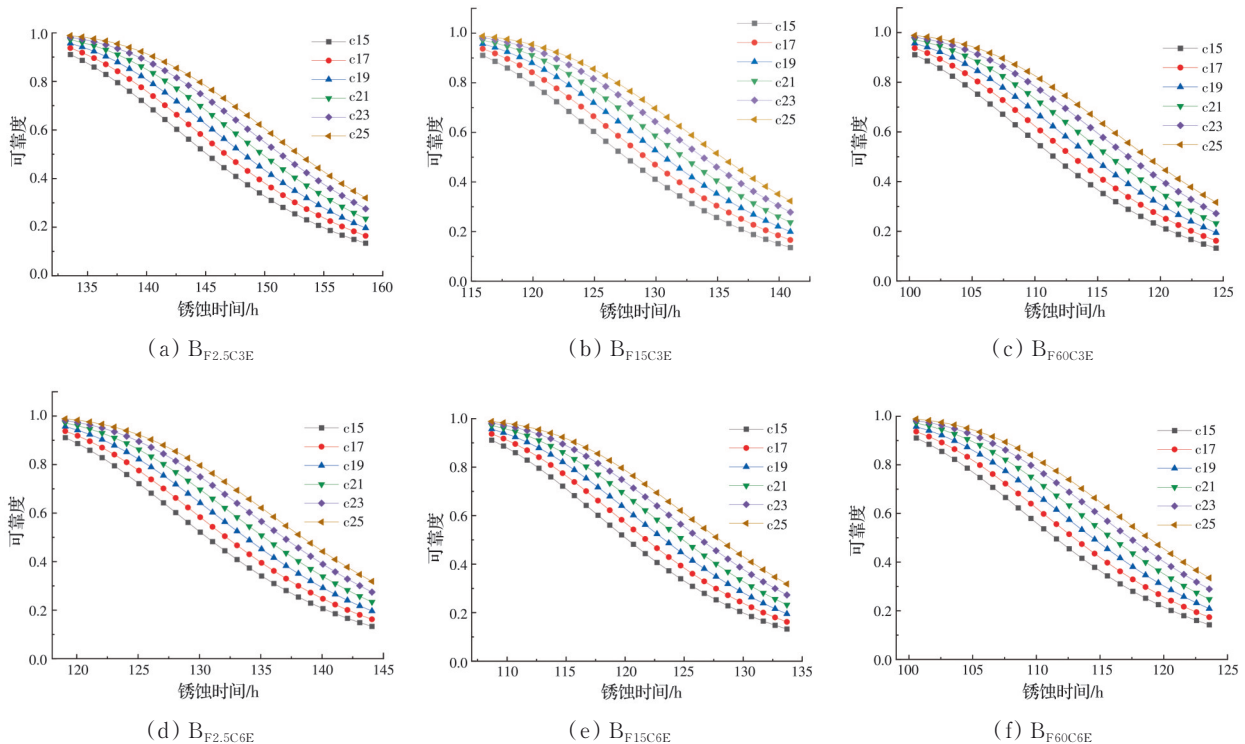


图 3 锈胀裂缝宽度可靠度随保护层厚度变化曲线

Fig. 3 Variation curves of rust crack width reliability with protective layer thickness

形成较大裂缝的概率,大大提高了混凝土结构的可靠度。

2) 钢筋直径对可靠度的影响

钢筋直径的变化对损伤混凝土梁可靠度的影响与保护层厚度类似。随着钢筋直径的减小,梁的初始可靠度和锈胀裂缝宽度达到限值时的可靠度均有所提高,并且随着钢筋直径的减小,可靠度在前期的下降速度逐渐减缓,斜率减小,这是由于钢

筋直径的减小使得蚀坑变小,锈蚀产物引起的锈胀裂缝也随之减少,降低了锈胀裂缝与荷载裂缝连通发展的机会,提高了混凝土结构的可靠度。同时,从图4中还可以看出,钢筋直径在6~8 mm时,随着直径的减小,可靠度显著提高,而当钢筋直径超过8 mm后,随着直径的增加,可靠度变化很小,因此,可以将8 mm的钢筋直径作为损伤混凝土结构耐久性设计的参照值。

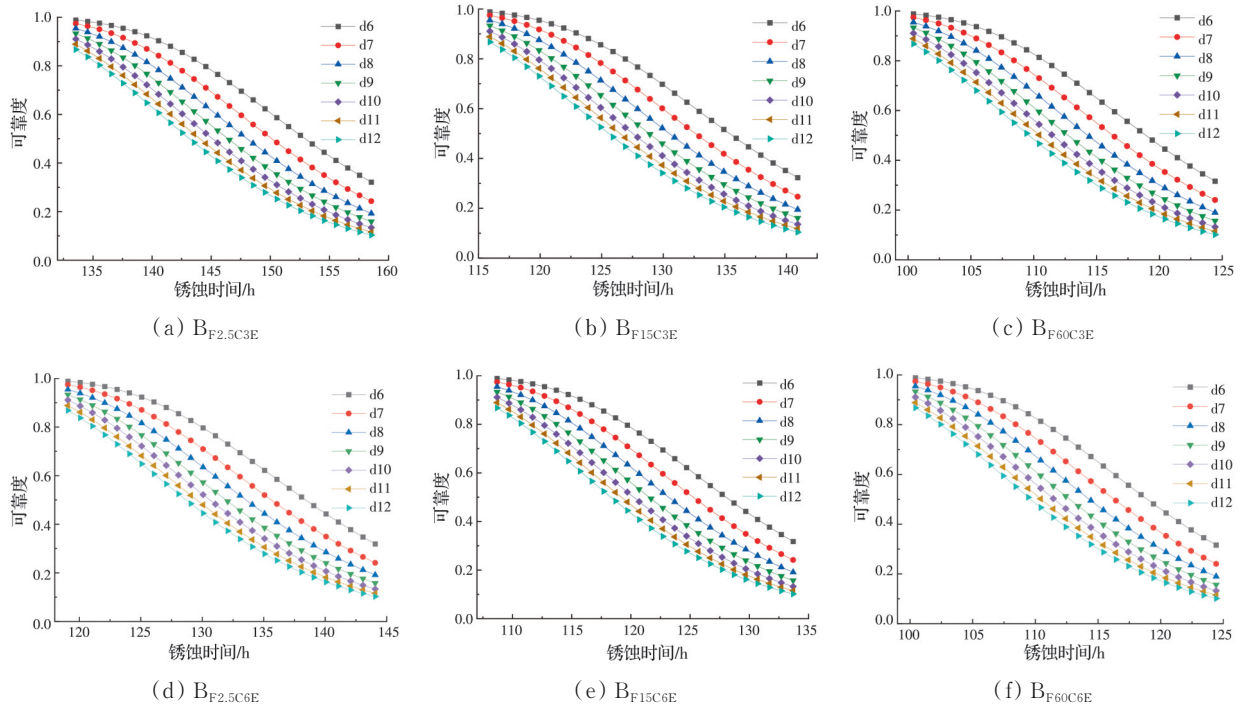


图4 锈胀裂缝宽度可靠度随钢筋直径变化曲线

Fig. 4 Variation curves of rust crack width reliability with steel bar diameter

2.4 灵敏度分析

在影响结构可靠度的随机变量中,也可以针对每种随机变量对可靠度的影响程度作出定量的测定。采用验算点法,利用Matlab软件编写灵敏度计算程序,计算各个随机变量的灵敏度系数^[27]。试验梁中锈胀裂缝宽度由腐蚀电流密度 X_1 、混凝土抗压强度 X_2 、保护层厚度 X_3 和钢筋直径 X_4 四个影响参数决定。则结构功能函数为

$$Z = g(X) = g(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (15)$$

选择设计验算点 $X^* = \{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*\}$,则各参数的灵敏度系数为

$$\alpha_i = \frac{\sigma_{X_i} \cdot \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (16)$$

式中: σ_{X_i} 为参数的标准差。

6根混凝土试验梁灵敏度系数计算结果如图5所示。图5显示了在通电加速锈蚀下含疲劳和徐变

损伤梁4个参数对于锈胀裂缝宽度可靠度的相对重要程度。从图5可以看出,钢筋直径的灵敏度最大,接近于90%,腐蚀电流密度的灵敏度其次,在30%~40%范围内波动,保护层厚度的灵敏度和腐蚀电流密度较为接近,接近于30%,由于计算模型的原因,混凝土抗压强度灵敏度未发生变化。因此,钢筋直径、腐蚀电流密度和保护层厚度是耐久性极限状态可靠度的主要影响因素。

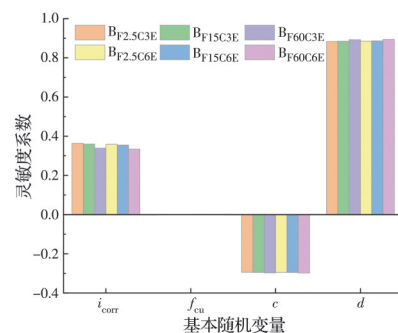


图5 基于锈胀裂缝宽度的灵敏度系数

Fig. 5 Sensitivity coefficients based on rust crack width

3 结论

通过引入疲劳和徐变损伤因子,建立了损伤混凝土梁保护层锈胀开裂后钢筋锈蚀深度计算模型,依据《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019),建立了由锈胀裂缝宽度控制的耐久性极限状态方程,对损伤混凝土梁的可靠度进行分析,得出以下结论:

1) 损伤混凝土梁的可靠度随着锈蚀时间的增加逐渐降低,在 60% 疲劳寿命次数的循环荷载作用下,持荷时间增加 3 个月引起的徐变损伤对梁的可靠度影响较小。

2) 随着锈蚀时间的增加,损伤混凝土梁的可靠度逐渐降低,且下降趋势趋于一致,都是从 0.9 下降到 0.1 左右;保护层厚度的增加和钢筋直径的减小均可以提高损伤混凝土梁的可靠度,减缓结构可靠度在钢筋锈蚀前期的下降速度,8 mm 钢筋直径可以作为损伤混凝土梁耐久性设计的参照值。

3) 钢筋直径是基于锈胀裂缝宽度的耐久性极限状态可靠度的主要影响因素,其次是腐蚀电流密度和保护层厚度。

参考文献

- [1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014.
JIN W L, ZHAO Y X. Durability of concrete structures [M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 金伟良, 张大伟, 吴柯娴, 等. 混凝土结构长期性能的若干基本问题探讨[J]. 建筑结构, 2020, 50(13): 1-6, 29.
JIN W L, ZHANG D W, WU K X, et al. Discussion on fundamental problems on long-term performance of concrete structures [J]. Building Structure, 2020, 50 (13): 1-6, 29. (in Chinese)
- [3] 赵羽习. 钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 1122-1134.
ZHAO Y X. State-of-art of corrosion-induced cracking of reinforced concrete structures [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 1122-1134. (in Chinese)
- [4] 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.
NIU D T. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 赵羽习, 金伟良. 混凝土构件锈蚀胀裂时的钢筋锈蚀率[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 97-101.
ZHAO Y X, JIN W L. Corrosion ratio of reinforcement bar in reinforced concrete construction at the moment of cracking due to corrosion expansion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 97-101. (in Chinese)
- [6] 王胜年, 潘德强. 港口水工建筑物检测评估与耐久性寿命预测技术[J]. 水运工程, 2008(4): 50-56.
WANG S N, PAN D Q. Technology on detection, assessment and service life prediction of harbor and marine structures [J]. Port & Waterway Engineering, 2008(4): 50-56. (in Chinese)
- [7] 陆春华, 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋混凝土保护层锈胀开裂时间的预测模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 85-92.
LU C H, ZHAO Y X, JIN W L. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (2): 85-92. (in Chinese)
- [8] RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, CASAL J, et al. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures [M]//Durability of Building Materials and Components 7. Routledge, London, 2018: 117-126.
- [9] 吴俊. 含疲劳和徐变损伤混凝土梁耐久性能试验研究和设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
WU J. Experimental study and design method of durability of concrete beams with fatigue and creep damage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [10] RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, CASAL J, et al. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Durability of Building Materials and Components, London, 1996:117-126.
- [11] VIDAL T, CASTEL A, FRANÇOIS R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 165-174.
- [12] ZHANG R J, CASTEL A, FRANÇOIS R. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 415-425.
- [13] 夏晋. 锈蚀钢筋混凝土结构力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
XIA J. Study on mechanical properties of corroded reinforced concrete structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [14] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for design of concrete structure durability: GB/T 50476—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 钟小平, 彭蓝鸽, 袁承斌, 等. 氯盐-锈蚀耦合损伤混凝土抗压强度试验[J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 69-75.

- ZHONG X P, PENG L G, YUAN C B, et al. Experimental research on compressive strength of concrete damaged by coupling of chlorine-corrosion [J]. Industrial Construction, 2020, 50(12): 69-75. (in Chinese)
- [16] ZHONG X P, JIN W L, XIA J. A time-varying model for predicting the life-cycle flexural capacity of reinforced concrete beams [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(1): 21-32.
- [17] YALÇYN H, ERGUN M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(10): 1593-1599.
- [18] LIU T, WEYERS R W. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(3): 365-379.
- [19] VU K A T, STEWART M G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models [J]. Structural Safety, 2000, 22(4): 313-333.
- [20] LI C Q. Reliability based service life prediction of corrosion affected concrete structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(10): 1570-1577.
- [21] 潘华, 邱洪兴. 基于损伤力学的混凝土疲劳损伤模型 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 605-608.
- PAN H, QIU H X. Fatigue model of concrete based on continuum damage mechanics [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(4): 605-608. (in Chinese)
- [22] 郑丹, 蔡昊男, 李鑫鑫. 考虑损伤的混凝土非线性徐变模型 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 75-80.
- ZHENG D, CAI H N, LI X X. Nonlinear creep model for concrete considering damage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 75-80. (in Chinese)
- [23] 朱伯芳. 论混凝土坝抗裂安全系数 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 33-37.
- ZHU B F. On coefficients of safety for crack prevention of concrete dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(7): 33-37. (in Chinese)
- [24] 赵羽习, 金伟良. 正常使用极限状态下混凝土结构构件可靠度的分析方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(6): 674-679.
- ZHAO Y X, JIN W L. Methods of reliability based on serviceability limited state for concrete structural members [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(6): 674-679. (in Chinese)
- [25] 金伟良. 工程结构全寿命设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- JIN W L. Life-cycle design on engineering structures [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [26] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 12-32.
- China Academy of Building Research. Concrete structure design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 12-32. (in Chinese)
- [27] 何敏. HRB500 钢筋混凝土并筋梁极限状态可靠度研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- HE M. Study on reliability of HRB500 reinforced concrete beams in limit state [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017. (in Chinese)

(编辑 胡玲)