

基于Gamma随机过程的西部严酷环境下钢筋混凝土可靠性评估

乔宏霞¹, 杨博¹, 路承功¹, 朱彬荣²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州, 730050;

2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京, 211189)

摘要: 针对西部盐渍土环境下钢筋混凝土结构服役寿命较短的问题, 根据盐渍土地质环境设置由氯化钠和硫酸镁组成的复合溶液, 制备不同强度等级的钢筋混凝土试件, 将试件放置于溶液中进行长期浸泡, 通过CS350电化学工作站对混凝土中钢筋进行长期跟踪研究, 探究多因素腐蚀下钢筋混凝土腐蚀规律。根据实测的部分寿命数据建立Gamma随机过程模型并对剩余寿命进行预测。研究表明: 钢筋混凝土抗腐蚀性能随强度等级的提高而提高。Gamma随机过程可以较为有效地描述混凝土中钢筋的腐蚀轨迹, 采用该方法预测的钢筋混凝土剩余寿命是可行的。

关键词: Gamma随机过程; 剩余寿命; 电化学方法; 钢筋混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2020)05-1384-07

Reliability assessment of reinforced concrete in harsh western environment based on gamma random process

QIAO Hongxia¹, YANG Bo¹, LU Chenggong¹, ZHU Binrong²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In view of the short service life of reinforced concrete structures in the western salty soil environment, a composite solution composed of sodium chloride and magnesium sulfate was set up according to the salty soil environment to prepare reinforced concrete specimens of different strength levels. The specimens were placed in the solution for long-term immersion. Long-term follow-up study was conducted on the steel in concrete through CS350 electrochemical workstation to explore the corrosion law of reinforced concrete during multi-factor corrosion. Based on the observed data, a random process model in Gamma was established and the residual life was predicted. The results show that the corrosion resistance of reinforced concrete increases with the increase of strength grade. The Gamma random process can be used to describe the corrosion trajectory of steel in concrete effectively, and the residual life of reinforced concrete predicted by this method is feasible.

收稿日期: 2019-07-27; 修回日期: 2019-09-06

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51868044) (Project(51868044) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 乔宏霞, 博士, 教授, 博士生导师, 从事钢筋混凝土耐久性评估及寿命预测研究; E-Mail:qhxlut7706@163.com

Key words: Gamma random process; residual life; electrochemical methods; reinforced concrete

我国60%以上的盐渍土区域分布于西部地区^[1],盐渍土中含有大量的腐蚀性离子,如 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等^[2],会对当地钢筋混凝土结构造成严重的侵蚀,而且西部地区气候恶劣、环境复杂,昼夜温差较大,对当地的建筑物及构筑物造成了严重的破坏^[3]。中国陆续提出“西部大开发”和“一带一路”等战略规划推动西部地区基础设施的发展,但是,由于西部地区的钢筋混凝土服役寿命较短,使得西部地区的大力发展面临很多挑战^[4],因此,研究西部盐渍土环境下钢筋混凝土耐久性并对其进行寿命预测具有很重要的现实意义。针对钢筋混凝土的腐蚀问题,国内外学者进行了大量研究。贾丙丽等^[5]通过电化学噪声技术和电化学阻抗谱共同研究干湿循环条件下不同pH的3.5% NaCl溶液中混凝土中钢筋的锈蚀过程,研究表明钢筋的锈蚀失效过程分为3个阶段,且在强酸性溶液中钢筋更易发生锈蚀。ABOSRRA^[6]通过线性极化法研究了不同强度等级的钢筋混凝土在3% NaCl溶液浸泡下的腐蚀过程,研究表明混凝土的强度等级会显著影响钢筋的锈蚀速率。陈海燕等^[7]将钢筋放置于不同pH和不同氯离子浓度的混凝土孔隙液中,并测量其电化学参数,分析钢筋的锈蚀规律,研究表明随着孔隙液pH的下降和氯离子浓度的增加,钢筋的锈蚀程度逐渐增大。然而,我国西部地区盐渍土区域中含有不同的腐蚀性离子,该地区呈现以氯盐-硫酸盐为主的多种盐类侵蚀混凝土现象,因此,应建立多种盐类腐蚀钢筋混凝土试验方案。对于混凝土中钢筋的电化学腐蚀试验研究,XU等^[8]研究了在掺有不同浓度单宁酸的NaCl溶液中Q235碳钢的腐蚀行为,发现随着单宁酸浓度的增加,其自腐蚀电位 E_{corr} 向正向移动,Q235碳钢的腐蚀进程逐渐减缓。曹光明等^[9]通过电化学腐蚀试验研究了 Cl^- 环境下不同典型氧化铁皮结构及基体钢的腐蚀行为,发现试样自腐蚀电流密度 i_{corr} 越小,其发生腐蚀的速度越慢,试样自腐蚀电流密度 i_{corr} 越大,其发生腐蚀的速度越快。对于预测混凝土剩余寿命的研究,霍俊芳等^[10]基于实验数据建立浮石混合骨料混凝土冻融损伤模型并对其剩余寿命进行了预测。王甲春等^[11]通过可靠度理论

建立了海洋环境下混凝土中钢筋锈蚀的功能函数,并推导出一定条件下钢筋混凝土结构的服役时间计算公式。然而,钢筋混凝土结构具有长寿命、可靠性较高且在实际退化过程中多种性能共同失效的特点,因此,难以采用某一特定退化公式进行描述。由于Gamma过程具有较好的统计特性,目前已经广泛运用于机械、航空等领域进行某退化部件剩余寿命预测^[12-14],但将Gamma随机过程应用于钢筋混凝土剩余寿命预测研究较少。为此,本文作者基于课题组调研的西部盐渍土特点,开展氯盐-硫酸盐复合溶液下不同强度等级的钢筋混凝土电化学腐蚀试验,分析试验结果并通过Gamma过程对混凝土中钢筋的退化失效进行建模,在此基础上,结合混凝土中钢筋的实测自腐蚀电流密度 i_{corr} 数据建立混凝土中钢筋的剩余寿命预测模型。

1 试验

1.1 试验原材料

本次试验选用甘肃祁连山水泥厂生成的P.O 42.5普通硅酸盐水泥;矿物掺合料选用兰州二热厂的II级粉煤灰;粗骨料选用兰州西固的碎卵石;细骨料选用兰州天然河砂;外加剂共有减水剂和阻锈剂,减水剂采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的SBTJM混凝土高效减水剂,其减水率为25%,阻锈剂采用LST-6系列抗硫阻锈剂;水选用兰州自来水;钢筋采用直径为8 mm的HRB335螺纹钢。

1.2 试验方案

在课题组对于西部地区盐渍土环境的现场调研并进行土质分析的基础上,发现仅西宁地区每千克土中 SO_4^{2-} 质量为904 mg, Cl^- 质量为389 mg, Mg^{2+} 质量为64 mg,并且该地区发生以硫酸盐为主的多种盐类耦合腐蚀类型^[5],基于此,本次试验选用20 g/L的氯化钠溶液和50 g/L的硫酸镁溶液复合后溶液为试验所用溶液。

本次试验所用的试件长×宽×高为100 mm×

100 mm×100 mm, 制备 C35, C40 和 C45 这 3 种强度等级的钢筋混凝土试件, 编号分别为 JP1, JP2 和 JP3, 共分为 3 组, 每组 6 块, 其编号按组内顺序设置为 JP1-1~JP1-6, JP2-1~JP2-6 和 JP3-1~JP3-6。根据测试需求, 钢筋裸露在空气中一端长为 5~8 mm, 混凝土保护层厚度为 35 mm。试件制备成型后, 为避免溶液溅至裸露钢筋表面致使其发生锈蚀, 拆模后采用环氧树脂涂料将钢筋表面刷 2 遍后进行养护, 在标准养护室养护 28 d 后, 开始浸泡试验, 试验总龄期为 720 d, 每隔 90 d 采用武汉科斯特仪器有限公司生产的 CS350 电化学工作站测量试件中钢筋的极化曲线, 并通过计算可获得钢筋的自腐蚀电流密度 i_{corr} 和自腐蚀电位 E_{corr} 。混凝土配合比如表 1 所示。

2 试验结果分析

不同强度等级的钢筋混凝土试件在不同浸泡时间下, 其 i_{corr} 和 E_{corr} 如图 1 所示。

通过混凝土中钢筋的自腐蚀电流密度 i_{corr} 可以初步判断混凝土中钢筋的锈蚀状态^[16], 其锈蚀状态与自腐蚀电流密度 i_{corr} 对照如表 2 所示。

由图 1 和表 2 可知: JP1, JP2 和 JP3 的 E_{corr} 在试验期间均呈现向负向移动趋势, 说明 3 个强度等级试件中钢筋均较易发生腐蚀; JP1, JP2 和 JP3 的 i_{corr} 在试验期间均呈现单调且增量非负的变化趋势, 有所不同的是在 0~450 d 期间, JP1 和 JP2 的 i_{corr} 变化较平缓, JP1 和 JP2 中钢筋均属于轻中度腐蚀;

表 1 混凝土配合比设计

Table 1 Mix proportion design of concrete

编号	强度等级	水泥	粉煤灰	碎卵石	砂	水	减水剂	阻锈剂	水胶比
JP1	C35	300	90	1 153	621	148.2	1.8	36	0.38
JP2	C40	320	96	1 111	681	145.6	2.1	36	0.35
JP3	C45	340	102	1 100	720	141.5	3.5	36	0.32

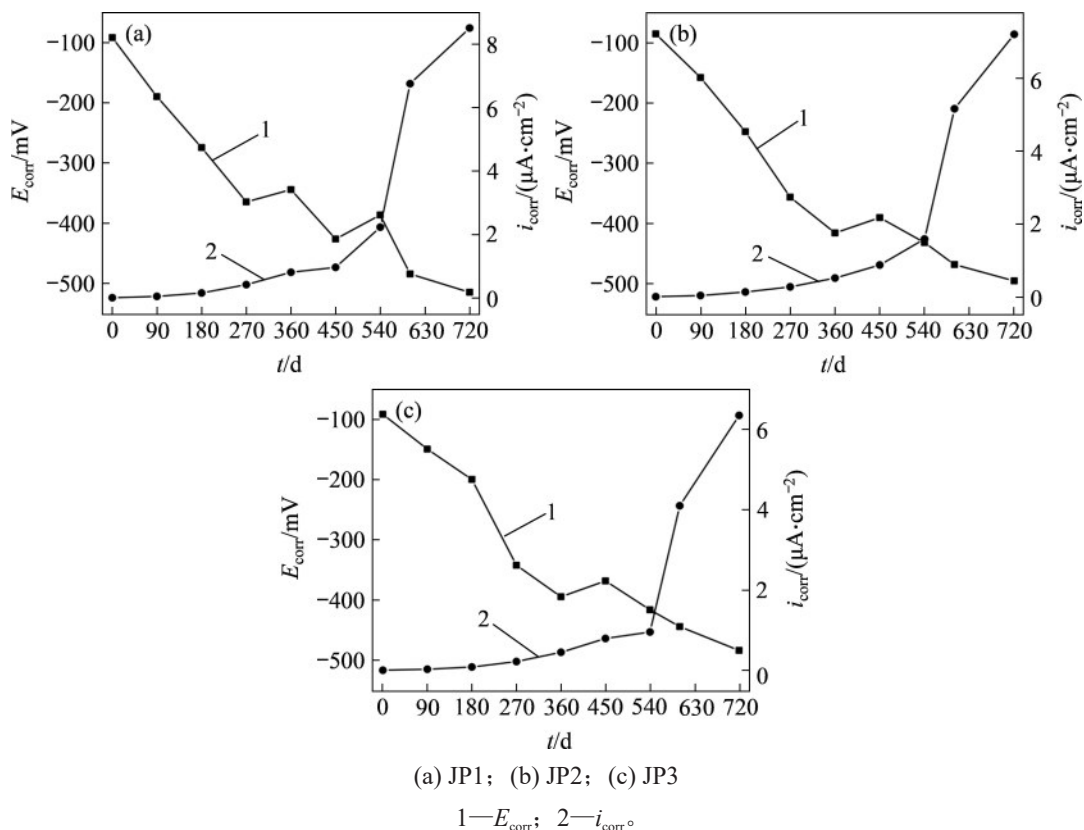


图 1 不同强度等级混凝土中钢筋的 E_{corr} 和 i_{corr} 的变化规律

Fig. 1 Change rules of E_{corr} and i_{corr} of steel in concrete with different strength grades

表2 混凝土中钢筋锈蚀状态对应腐蚀电流密度的标准^[16]

Table 2 Standard of corrosion current density corresponding to corrosion state of steel in concrete^[16]

腐蚀电流密度/($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	锈蚀状态
$i_{\text{corr}} < 0.1$	无锈蚀
$0.1 < i_{\text{corr}} < 1$	中等腐蚀速率
$1 < i_{\text{corr}} < 10$	高等腐蚀速率
$10 < i_{\text{corr}} < 100$	超高等腐蚀速率

在450~720 d期间, JP1和JP2的 i_{corr} 发生突变, JP1和JP2中钢筋属于重度腐蚀; 而JP3在0~540 d期间, 其 i_{corr} 变化较平缓, JP3中钢筋属于轻中度腐蚀; 在540~720 d期间, JP3中钢筋的 i_{corr} 发生突变, JP3中钢筋属于重度腐蚀; 在任意时刻, 各试件 i_{corr} 从小到大顺序为: JP3, JP2, JP1。经分析认为, 随着混凝土强度等级的提升, 其内部愈发密实, 在氯盐-硫酸盐复合溶液下, 试件抗盐类侵蚀能力也随之提高。综上所述, 由于强度等级不同, 试件腐蚀程度变化时间也不同, 各时刻试件 i_{corr} 也有所不同, 由此可知各试件抗腐蚀性能从强到弱依次为: JP1, JP2, JP3。

3 基于Gamma随机过程的建立

由于钢筋混凝土结构寿命较长, 其退化失效数据较难在短时间内收集。而且因试验环境、人工测量误差等因素致使钢筋混凝土在某一时刻的性能退化量也具有一定随机性。钢筋混凝土的性能退化数据(i_{corr})是单调且增量非负, 同时其退化轨迹随时间变化而变化。采用Gamma过程可以有效描述性能退化轨迹随时间变化的不确定性, 因而, 本次试验采用Gamma随机过程对钢筋混凝土性能退化数据进行建模。为了便于采用自腐蚀电流密度 i_{corr} 进行建模, 将其转化为相对腐蚀电流密度 I_{corr} 。

3.1 Gamma过程

混凝土中钢筋的相对自腐蚀电流密度 I_{corr} 会随着浸泡时间的增加而增加, 因此, 将在 t 时刻的 I_{corr} 定义为退化量 $X(t)$ 。若 $X(t)$ 满足以下3条性质, 则认为钢筋混凝土的 I_{corr} 退化轨迹符合Gamma过程^[17-18]。

- 1) $X(0)=0$ 的概率为1, 即 $t=0$ 时 $I_{\text{corr}}=0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
- 2) $X(t)$ 具有独立增量;
- 3) 对于任意时刻, $X(t_n)-X(t_{n-1})$ 服从Gamma分布 $\text{Ga}[\alpha(t_n-t_{n-1}), \beta]$ 。

JP1的 $X(t_n)-X(t_{n-1})$ 近似服从于Gamma分布。基于试件实测的 I_{corr} , 得到JP1试件频数分布直方图, 如图2所示。由于试件 I_{corr} 的退化过程是单调且增量非负的, 在 $t=0$ 时, $I_{\text{corr}}=0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 且JP1任意时刻的 $X(t_n)-X(t_{n-1})$ 频数分布直方图与Gamma分布函数曲线较为吻合, 因此, 可以认定 I_{corr} 的变化过程是一个平稳的Gamma过程。

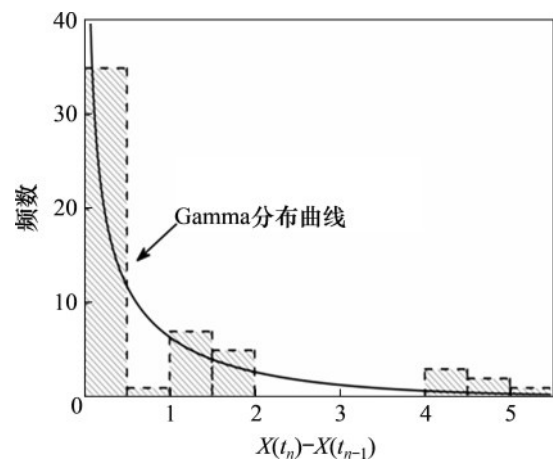


图2 JP1 $X(t_n)-X(t_{n-1})$ 频数分布直方图

Fig. 2 Histogram of frequency distribution of JP1 $X(t_n)-X(t_{n-1})$

由表2可知: 混凝土中钢筋锈蚀状态对应腐蚀电流密度 i_{corr} 的标准可以确定出混凝土中钢筋相对腐蚀电流密度 I_{corr} 的失效阈值 D_f , 本文采用失效阈值 D_f 为 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 即钢筋处于中等腐蚀速率状态, 当 $I_{\text{corr}} \geq D_f$ 时, 即判定钢筋混凝土失效。

$\text{Ga}(\alpha, \beta)$ 是形状参数为 α , 尺度参数为 β 的Gamma分布函数, 故 $\text{Ga}(\alpha(t), \beta)$ 的概率密度函数为:

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} I_{(0, \infty)}(x) \quad (1)$$

$$I_{(0, \infty)}(x) = \begin{cases} 1, & x \in (0, \infty) \\ 0, & x \notin (0, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ 为Gamma函数。

形状参数 α 描述的是外部环境等因素对钢筋混凝土性能的影响, 而尺度参数 β 描述的是随机因素对钢筋混凝土性能的影响。为了便于计算, 在本次建模过程中不考虑随机因素影响, 因此, 假设

形状参数 α 与时间相关, 即表示为 $\alpha(t)$, 在本次建模过程中, $\alpha(t) = \hat{\alpha}t$.

假设钢筋混凝土的 I_{corr} 退化失效阈值为 D_f 。定义 $X(t)$ 退化到阈值 D_f 时, 钢筋混凝土退化失效, 于是, 失效时间 T 为 $X(t)$ 首次达到或超过 D_f 的时间, 即

$$T = \inf \{t: X(t) \geq D_f\} \quad (3)$$

已知 $X(t)$ 为 Gamma 过程时, 可以得到钢筋混凝土失效分布函数为

$$F_T(t) = \Pr(T \leq t) = \Pr(X(t) \geq D_f) = \int_{D_f}^{\infty} f_{X(t)}(x) dx = \frac{\Gamma(\alpha(t), \beta D_f)}{\Gamma(\alpha(t))} \quad (4)$$

式中: $\Gamma(\alpha(t), \beta D_f) = \int_{\alpha(t)}^{\infty} u^{\beta D_f - 1} e^{-u} du$ 为不完全 Gamma 函数。

可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F_T(t) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha(t), \beta D_f)}{\Gamma(\alpha(t))} \quad (5)$$

3.2 参数估计

基于 JP1 中 $N(N=6)$ 个试件在复合溶液浸泡试验, 在时刻 t_1, \dots, t_m 分别对各试件进行 m_i 次独立测试, 记 Δt 为测试时间间隔, 本次试验中 $\Delta t=90$ d。经过测试和计算得到混凝土中钢筋的 I_{corr} , 其值为

$$X = \begin{pmatrix} X(t_{11}) & \cdots & X(t_{1m}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X(t_{n1}) & \cdots & X(t_{nm}) \end{pmatrix}$$

本次试验复合溶液下 JP1 各试件 I_{corr} 经时变化值如表 3 所示。

记 $\Delta x_{ij} = X(t_{ij}) - X(t_{i(j-1)})$, 其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m_i$ 。 Δx_{ij} 为 JP1- i 试件在时刻 t_{ij} 和 $t_{i(j-1)}$ 之间的 I_{corr} 退化量, 则其值为

$$\Delta x_{ij} = \begin{pmatrix} \Delta x_{i1} & \cdots & \Delta x_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_{i1} & \cdots & \Delta x_{ij} \end{pmatrix}$$

由表 3 可以看出: 相对自腐蚀电流密度随时间变化呈现弧形曲线, 因此, 采用指数模型 $\ln y = A + Bt$ 对其进行拟合, 拟合曲线如图 3 所示。

拟合结果为

$$\ln I_{\text{corr}} = -2.025 05 + 0.005 88 t, R^2=0.909$$

由相关系数 R^2 可知其拟合效果较好。

本次试验采用矩估计法推导 Gamma 过程的参数。

样本均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} \quad (6)$$

设 $Y_{ij} = \Delta x_{ij} - \alpha \beta \Delta t_{ij}$, 将其代入式(6)化简后得

$$\bar{Y} = \bar{x} - \alpha \beta \quad (7)$$

由 Gamma 分布的性质可知 $E(\bar{Y}) = 0$, 将式(7)

再次化简为 $\bar{x} = \alpha \beta$, 联合式(6)即为

$$\alpha \beta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} \quad (8)$$

设样本方差为 $D(x_{ij})$, 则其计算如下式所示:

$$D(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} (\Delta x_{ij} - \bar{x} \Delta t_{ij})^2 \quad (9)$$

计算该分布的方差, 化简后可得:

$$E \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} (\Delta x_{ij} - \bar{x} \Delta t_{ij})^2 \right\} = E \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} (Y_{ij}^2 - 2Y_{ij} \bar{Y} \Delta t_{ij} + \bar{Y}^2 \Delta t_{ij}^2) \right\} \quad (10)$$

将式(9)中的 $E(Y_{ij})$, $E(\bar{Y}^2)$ 和 $E(Y_{ij} \bar{Y})$ 进行计算, 计算结果如下:

$$E(Y_{ij}) = 0; E(\bar{Y}) = 0; E(Y_{ij}^2) = \alpha \beta^2 \Delta t_{ij} \quad (11)$$

表 3 相对自腐蚀电流密度 I_{corr} 的经时变化

编号	0 d	90 d	180 d	270 d	360 d	450 d	540 d	630 d	720 d
C35-1	0	0.043 31	0.148 60	0.412 88	0.803 36	0.957 59	2.225 15	6.752 72	8.506 82
C35-2	0	0.062 04	0.158 84	0.430 54	0.742 77	0.861 28	2.061 93	6.483 83	8.391 03
C35-3	0	0.078 76	0.177 95	0.458 83	0.968 24	0.995 04	2.461 41	7.147 69	8.870 09
C35-4	0	0.051 60	0.167 03	0.469 94	0.845 73	0.980 57	2.390 53	6.645 92	8.337 92
C35-5	0	0.042 11	0.143 84	0.461 95	0.856 80	1.006 04	2.431 79	7.489 48	8.965 58
C35-6	0	0.041 96	0.149 10	0.407 00	0.783 10	0.933 32	2.024 76	6.505 99	8.450 39

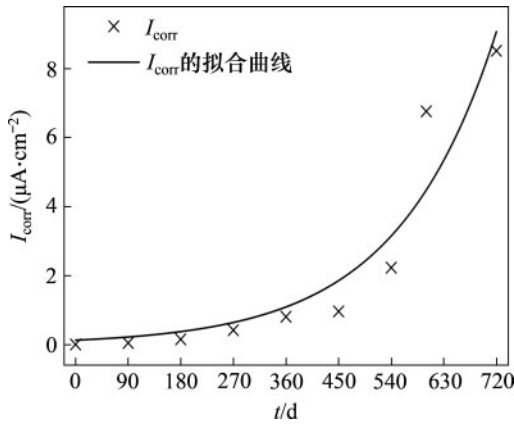


图3 相对自腐蚀电流密度 I_{corr} 拟合曲线

Fig. 3 I_{corr} fitting curve of relative corrosion current density

$$E(\bar{Y}^2) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E(Y_{ij}^2)}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}\right)^2} = \frac{\alpha\beta^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} \quad (12)$$

$$E(Y_{ij} \bar{Y}) = \frac{E(Y_{ij}^2)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} = \frac{\alpha\beta^2 \Delta t_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} \quad (13)$$

将式(11), (12)和(13)代入式(10)得到:

$$E\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} (\Delta x_{ij} - \bar{x} \Delta t_{ij})^2\right\} = \alpha\beta^2 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \Delta t_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{ij}} \right) = D(x_{ij}) \quad (14)$$

将式(8)和式(14)联立后可得到参数 α 和 β 的推断式, 将 Δt 和 I_{corr} 代入该式就可求得各试件参数估计值。

本文中, JP1 的相对自腐蚀电流密度退化 Gamma 过程参数为

$$\begin{cases} \hat{\alpha} = 0.005338069 \\ \hat{\beta} = 2.183225399 \end{cases} \quad (15)$$

3.3 可靠性分析

基于上文对于 JP1 组试件的研究, 分别以 JP1 组中 JP1-1 个体试件为例, 联合式(15)和式(5)推导出 JP1-1 试件的可靠度曲线, 如图4所示。

由表3和图4可知: 随试件浸泡时间的延长, 溶液中 SO_4^{2-} , Cl^- 和 Mg^{2+} 不断作用试件中钢筋不断发生锈蚀, 其相对自腐蚀电流密度 I_{corr} 不断增大,

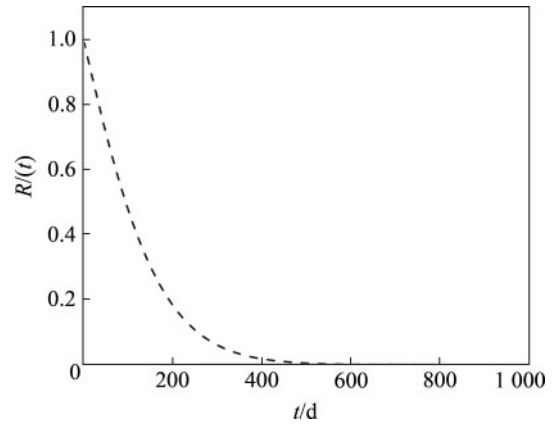


图4 JP1-1 可靠度函数曲线

Fig. 4 JP1-1 reliability function curve

可靠度不断下降, 标志着试件中钢筋腐蚀程度逐渐增加; 在 440 d 左右时, JP1-1 中钢筋达到高等腐蚀速率状态, 此时判定 JP1-1 失效。该结果与表3中 450 d 时 JP1 中钢筋也基本达到高等腐蚀速率状态一致, 说明采用 Gamma 随机过程对钢筋混凝土剩余寿命进行预测是可行的。

4 结论

1) 基于西部盐渍土区域的土质特点, 建立了多因素腐蚀下不同强度等级钢筋混凝土耐久性试验, 研究发现随混凝土强度等级提升, 其抗多种盐类腐蚀能力也逐渐加强。

2) 基于 Gamma 随机过程的分布特点, 其适用于描述单调且增量非负的退化轨迹, 并通过钢筋混凝土电化学参数(I_{corr})退化轨迹结合增量频数直方图和 Gamma 分布曲线的之间的关系, 进一步说明 Gamma 过程可以用来对混凝土中钢筋寿命进行预测。

3) 采用混凝土中钢筋的相对腐蚀电流密度(I_{corr})作为关键退化因素, 通过 Gamma 过程建立混凝土中钢筋的寿命预测模型是可行的, 并得出本次试验条件下 JP1-1 中钢筋在 440 d 左右达到高等腐蚀速率状态。

参考文献:

[1] 乔宏霞, 杨博, 路承功, 等. 基于不同涂层的镁水泥钢筋混凝土耐腐蚀性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3510-3516, 3521.

- QIAO Hongxia, YANG Bo, LU Chenggong, et al. Study on corrosion resistance of magnesium cement reinforced concrete based on different coatings[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3510–3516, 3521.
- [2] 张俊喜, 易博, 林德源, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀的电化学研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 390–396, 403.
- ZHANG Junxi, YI Bo, LIN Deyuan, et al. Electrochemical study on the corrosion of reinforced concrete under saline soil environment[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 390–396, 403.
- [3] 温利强, 杨成斌, 李士奎. 中国西北地区盐渍土分布及危害[J]. 工程与建设, 2010, 24(5): 585–587.
- WEN Liqiang, YANG Chengbin, LI Shikui. Distribution and harm of saline soil in northwest China[J]. Engineering and Construction, 2010, 24(5): 585–587.
- [4] YU Hao, LI Jianmeng, XIN Huang. Study on corrosion resistant performance of sulfoaluminate cement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 710: 362–366.
- [5] 贾丙丽, 曹发和, 陈安娜, 等. 干湿循环下混凝土中钢筋腐蚀的电化学检测[J]. 电化学, 2010, 16(4): 355–361.
- JIA Bingli, CAO Fahe, CHEN Anna, et al. Electrochemical detection for the corrosion of reinforcing steel in concrete during immersion and drying cycles[J]. Electrochemistry, 2010, 16(4): 355–361.
- [6] ABOSRRA L R. Corrosion of mild steel bars in concrete and its effect on steel-concrete bond strength[D]. Bradford, England: University of Bradford. School of Engineering, Design and Technology, 2010: 50–67
- [7] 陈海燕, 李欢园, 陈丕茂, 等. 钢筋在混凝土模拟液中的电化学腐蚀行为[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 131–137.
- CHEN Haiyan, LI Huanyuan, CHEN Pimao, et al. Electrochemical corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solution[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 131–137.
- [8] XU Wenhua, HAN Enhou, WANG Zhenyu. Effect of tannic acid on corrosion behavior of carbon steel in NaCl solution [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(1): 64–75.
- [9] 曹光明, 汤军舰, 林飞, 等. 典型氧化铁皮结构电化学腐蚀行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1366–1372.
- CAO Guangming, TANG Junjian, LIN Fei, et al. Electrochemical corrosion behavior of typical structure of oxide scale[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(6): 1366–1372.
- [10] 霍俊芳, 于乃领, 王婷. 浮石混合骨料混凝土冻融损伤模型及剩余寿命预测[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 11–14.
- HUO Junfang, YU Nailing, WANG Ting. Study on freeze-thaw damage model and residual life prediction of pumice lightweight aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1): 11–14.
- [11] 王甲春, 阎培渝. 海洋环境下钢筋混凝土中钢筋锈蚀的概率[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 352–357.
- WANG Jiachun, YAN Peiyu. Probabilistic analysis of rebar rust in concrete under marine environment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(2): 352–357.
- [12] YUAN Xianxu. Stochastic modeling of deterioration in nuclear power plant components[D]. Ontario, Canada: University of Waterloo. Department of Civil and Environmental Engineering, 2007: 81–133
- [13] LAWLESS J, CROWDER M. Covariates and random effects in a gamma process model with application to degradation and failure[J]. Lifetime Data Analysis, 2004, 10(3): 213–227.
- [14] WHITMORE G A, SCHENKELBERG F. Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation[J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3(1): 27–45.
- [15] 陈丁山. 西宁地区现场暴露混凝土耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2014: 18–47.
- CHEN Dingshan. Experimental research on the durability and life prediction of the ordinary concrete field exposure in Xining[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology. School of Civil Engineering, 2014: 18–47.
- [16] ERDOĞDU Ş, BREMNER T W, KONDRATOVA I L. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 861–867.
- [17] 吕昊, 张义民, 王倩倩. 基于 Gamma 退化过程的机械零部件可靠性灵敏度方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(11): 1610–1614.
- LÜ Hao, ZHANG Yimin, WANG Qianqian. Reliability sensitivity analysis method of mechanical parts based on Gamma process strength degradation[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2013, 34(11): 1610–1614.
- [18] 王浩伟, 徐廷学, 米巧丽, 等. 加速应力下基于 Gamma 过程的寿命预测方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10455–10459.
- WANG Haowei, XU Tingxue, MI Qiaoli, et al. Approach of lifetime prediction based on Gamma process under accelerated stresses[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10455–10459.