

文章编号:1007-9629(2021)02-0304-09

基于 Weibull 分布的钢筋混凝土通电加速可靠性评估

路承功¹, 魏智强², 乔宏霞^{1,3}, 李刊¹, 乔国斌¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050;
3. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 将3种强度等级的钢筋混凝土棱柱体置于盐渍土中进行恒电流通电加速试验,定期利用电化学工作站进行无损检测,选择 Weibull 分布进行可靠性建模,采用中位秩法、查表法和极大似然法对形状参数与尺度参数进行估计。结果表明:在盐渍土通电加速环境下,可靠度曲线表现出三阶段变化特点,失效率初期较小而后期急剧增大;3类参数估计方法中,尺度参数值受参数估计方法影响小,而形状参数值受参数估计方法影响较大,其中中位秩法所得形状参数值偏大,而查表法所得形状参数值偏小,极大似然法所得形状参数值则介于两者之间;4种中位秩法所得形状参数估计值差异较大,而4种极大似然法所得形状参数估计值则非常相近;极大似然法的4种数值求解方法中,对分法和简单迭代法需要的迭代次数较多,而牛顿-割线法和斯蒂芬森迭代法的迭代效率较高;强度等级越高,钢筋混凝土密度极值越小,失效时间越长,失效率越小。

关键词: 盐渍土; 通电加速; Weibull 分布; 钢筋混凝土; 参数估计; 可靠性

中图分类号: TU528.571

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.011

Reliability Evaluation of Reinforced Concrete under Electrified Acceleration Based on Weibull Distribution

LU Chenggong¹, WEI Zhiqiang², QIAO Hongxia^{1,3}, LI Kan¹, QIAO Guobin¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Three kinds of reinforced concrete prisms with different strength grades were placed in heavy saline soil for constant current accelerated test. The electrochemical workstation was used for nondestructive testing regularly. Weibull distribution was selected for reliability modeling. The shape parameters and scale parameters were estimated by median rank method, look-up table method and maximum likelihood method. The results show that under the electrified environment of saline soil, the reliability curve shows the characteristics of three stages, the failure rate value is small in the early stage, and increases sharply in the later stage. Among the three kinds of parameter estimation methods, the scale parameter estimation value is less affected by the parameter estimation method, while the shape parameter value is more affected by the parameter estimation method. The shape parameter value obtained by the median rank method is the largest, the shape parameter value obtained by the look-up table method is the smallest, and the shape parameter value obtained by the maximum likelihood method is between the look-up table method and the

收稿日期:2019-10-19; 修订日期:2019-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168031,51868044);中铁一勘院科研开发基金(13-24-01);兰州理工大学红柳一流学科建设计划项目

第一作者:路承功(1991—),男,甘肃平川人,兰州理工大学博士生. E-mail:lcg9296@163.com

通讯作者:乔宏霞(1977—),女,山西应县人,兰州理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:qiaohx7706@163.com

look-up table method. The parameters estimated by the four kinds of median rank are quite different, but the parameters estimated by the maximum likelihood method are very similar. Among the four methods of maximum likelihood method, bisection method and simple iteration method have more iteration times, while Newton-Secant method and Stephenson iteration method have higher iteration efficiency due to the introduction of derivatives. The strength has a significant impact on the reliability of reinforced concrete. The higher the strength grade is, the smaller the density extremum is, the longer the failure interval is, and the smaller the failure ratio is.

Key words: saline soil; electric acceleration; Weibull distribution; reinforced concrete; parameter estimation; reliability

服役于实际环境中的钢筋混凝土结构由于受到气候和环境的综合作用,使得其耐久性较早出现劣化,尤其对于东部沿海海工混凝土和中国西北内陆盐湖地区的建筑物,往往达不到设计使用寿命就过早失效,不仅造成巨大的经济损失,而且使其在使用过程中可靠性降低^[1-5]. 因此针对钢筋混凝土在实际服役环境中受到的耐久性劣化因素,设计更贴近服役环境的耐久性试验,并寻求合适的可靠性评价方法对于提升钢筋混凝土结构的安全性具有重要意义^[6].

为了探究混凝土在海洋潮汐区受到氯盐侵蚀作用的影响,韩学强等^[7]设计室内干湿循环试验,通过对不同循环次数下混凝土孔隙结构和内部氯离子浓度检测,结合微观手段,对腐蚀产物、表面形态进行了分析,揭示了潮汐区混凝土腐蚀劣化机理. 针对混凝土结构在氯盐侵蚀下的钢筋锈蚀问题,彭建新等^[8]研究者通过氯盐喷雾试验模拟氯盐侵蚀环境,指出了氯离子侵蚀扩散规律,建立了多因素氯离子扩散模型,并在考虑空间变异性的基础上得到了时空可靠度模型. 施锦杰等^[9-12]研究者则从钢筋锈蚀模型、锈蚀速率、混凝土膨胀开裂、服役寿命等方面进行了分析研究,使实际服役环境下的混凝土结构劣化规律更加清晰. 除了腐蚀性离子,自然界中的电流对混凝土结构耐久性的影响也较大,当电流流经钢筋混凝土结构时,钢筋锈蚀速率和锈胀量明显增大, Tang 等^[13-14]研究者主要从电流对混凝土结构的损伤破坏方面开展研究,丰富了钢筋混凝土耐久性的相关理论.

综上所述,影响钢筋混凝土耐久性的因素较多,所开展的耐久性试验也较多,但针对钢筋混凝土在腐蚀离子和电流耦合作用下的耐久性研究较少,尤其对于西部盐渍土地区,实际服役环境中腐蚀离子种类较多,电流的存在极大加剧了钢筋混凝土耐久性能的劣化. 因此研究盐渍土环境中钢筋混凝土在电流作用下的耐久性变化规律,并对其可靠性进行评估,对西部地区基础设施建设具有重要作用.

1 试验过程及方案设计

自然界中杂散电流的存在,对钢筋混凝土结构造成了极大的破坏,为了更加客观合理反映电流与腐蚀离子共同作用下钢筋混凝土的劣化规律,本文设计如图 1 所示的盐渍土通电加速腐蚀系统. 钢筋混凝土试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 采用直径 8 mm 的 HRB335 螺纹钢筋纵向贯穿于试件中间,且在试件纵向的底端钢筋保护层约为 50 mm ,纵向的顶端裸露约 10 mm . 同时为了便于后期测试及避免裸露钢筋养护时锈蚀,在钢筋裸露处用铜线引出,并用环氧树脂进行包裹. 试件周围用从格尔木盐渍土地区运回的盐渍土填埋,盐渍土各类离子含量如表 1 所示. 定期喷洒与表 1 中离子及其含量均相同的盐溶液使其相对湿度保持在 50% ,以保证腐蚀离子具有较好的传输媒介. 通过直流电源模拟电流输出,钢筋作为阳极,碳棒作为阴极. 混凝土配合比与基本性能如表 2 所示,其中水泥为祁连山水泥厂生产的 P·O 42.5 水泥,粉煤灰为兰州二热厂提供的 II 级粉煤灰,粗骨料及细骨料均由兰州本地商砼站提供,级配良好,含泥量及相关性能指标均符合要求.

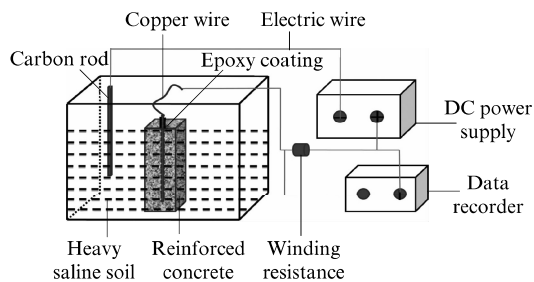


图 1 盐渍土通电加速腐蚀系统
Fig. 1 Electrically accelerated corrosion system of saline soil

表 1 盐渍土各类离子含量
Table 1 Ion content of saline soil

mg/kg					
CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}
96	153	6 591	6 609	1 472	1 566

表 2 混凝土配合比与基本性能
Table 2 Mix proportion and basic properties of concrete

Strength grade	Mix proportion/(kg · m ⁻³)						Compressive strength(28 d)/MPa	Slump/mm
	Cement	Fly ash	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water	Rust inhibitor		
C35	300	90	1 153	621	148.2	36	38.6	180
C40	320	96	1 111	681	145.6	36	43.9	175
C45	340	102	1 100	720	141.5	36	48.3	175

参考文献[15],采用恒电流加速法进行通电加速,将电流密度设定为 200 μA/cm²,对应的恒电流为 20 mA,其钢筋理论质量损失与通电时长的关系如式(1)所示,并在钢筋理论质量损失率分别为 3%、6%、9%、12%及 15%,即通电时长分别为 220、440、660、880、1 100 h 时进行电化学测试,测试系统选用电化学经典三电极体系.为避免电流损失,盛装箱选用塑料制品.

$$t_c = \frac{\Delta m \times Z \times F}{M \times I} \tag{1}$$

式中: t_c 为通电时长,单位 s; Δm 为理论钢筋质量损失,g; Z 为反应电极的化学价,取值+2; F 为法拉第常数,取值 96 500 C/mol; M 为铁的相对原子质量,取值 56; I 为电流,A.

2 耐久性试验结果分析

不同通电时刻下钢筋混凝土极化曲线如图 2 所示.其中: E 为腐蚀电位; i 为腐蚀电流密度.由图 2 可见:初始时刻,钢筋混凝土的阴阳两极极化曲线不对称,表明阳极钢筋的溶解过程阻力较大,钢筋处于钝化状态.通电开始后,电流持续通过,钢筋表面钝化膜在短时间内出现破损,环境中的腐蚀性离子,特别是氯离子与钢筋直接接触,并在氧气和水分同时存在时发生氧化还原反应,钢筋作为阳极不断被消耗,宏观表现为阴阳两极的极化曲线逐渐变得对称,去极化过程存在的阻力大大减小.同时由于持续性电流的通过,在钢筋附近也会形成磁场,促使盐渍土中的腐蚀性离子通过混凝土孔隙到达钢筋表面,在

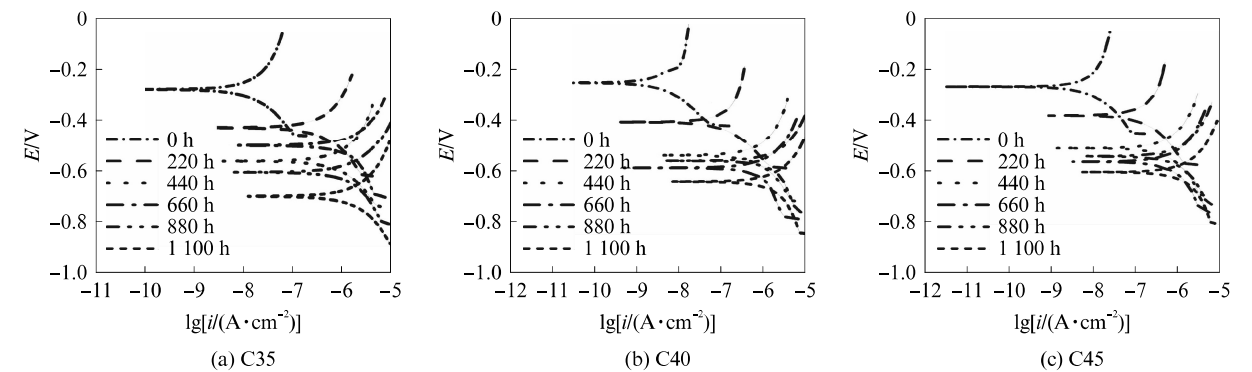


图 2 通电环境下钢筋混凝土极化曲线
Fig. 2 Polarization curves of reinforced concrete in electrified environment

增加混凝土自身导电性的同时,也会使得混凝土内部 pH 值大大降低,从而破坏钢筋稳定存在的碱性环境.

3 Weibull 分布可靠性模型

可靠性是“产品”的重要属性之一,用以衡量其在规定服役环境和时间内完成预定功能的能力. Weibull 分布是可靠性工程中一种较为常见的分布,该分布模型灵活性好,能够通过小样本得到比较精确的可靠度,常用以分析产品在加速寿命试验中

性能在时间尺度上的变化规律^[16-17].考虑到模型参数估计的难度,本文采用两参数 Weibull 分布模型进行可靠性分析. Weibull 分布模型有 2 个参数,即形状参数 U 与尺度参数 V ,其中形状参数主要影响分布曲线的形状,而尺度参数主要影响曲线在横坐标轴上的离散程度.假设钢筋混凝土在通电加速环境中的寿命即失效时间 t 服从 Weibull 分布,则其可靠度 $R(t)$ 、密度 $f(t)$ 及失效率 $\lambda(t)$ 分别通过式 2~4 计算:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{V} \right)^U \right] \tag{2}$$

$$f(t) = \frac{U}{V} \cdot \left(\frac{t}{V}\right)^{U-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{V}\right)^U\right] \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{U}{V} \cdot \left(\frac{t}{V}\right)^{U-1} \quad (4)$$

3.1 Weibull 退化分布过程建立

对表征钢筋混凝土腐蚀状况的极化曲线进行活化处理,得到钢筋混凝土在 220、440、660、880、1 100 h 通电时长下的腐蚀电流密度,并通过指数函数、幂函数及二次函数建立腐蚀电流密度与通电时长的关系.参考文献[18],当腐蚀电流密度达到 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时反推得到钢筋混凝土在盐渍土通电环境下的失效时间 t ,以此作为可靠性分析的失效数据进行 Weibull 参数估计,再将得到的参数估计值代入式(2)~(4)得到不同强度钢筋混凝土通电加速环境下的可靠度 $R(t)$ 、密度 $f(t)$ 及失效率 $\lambda(t)$.

3.2 参数估计

Weibull 分布参数估计方法较多,根据失效数据和 Weibull 分布函数的特点,并对比不同参数方法对钢筋混凝土结果可靠性的影响,本文分别采用中位秩法(MRM)、查表法(LTM)和极大似然法(MLM)进行参数估计^[19].

3.2.1 中位秩法

假定有 n 个钢筋混凝土失效时间,并将任意失效时间记为 t_i ,得到两参数 Weibull 分布函数 $F(t_i)$ 为:

$$F(t_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{V}\right)^U\right], i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

将上式移项后取双重对数,并令 $x_i = \ln t_i$, $\mu = -U \ln V$, $\sigma = U$, $y_i = \ln \ln \frac{1}{F(t_i)}$, 则有: $y_i = \mu + \sigma x_i$, 因此通过得到 μ 、 σ 的值便可得到参数 U 、 V 的值. 在 x_i 和 y_i 已知的情况下 μ 、 σ 值通过最小二乘法得到:

$$\mu = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\sigma = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6)$$

试验中每个配合比试件的个数为 9,为更加准确反映钢筋混凝土试件在盐渍土通电加速环境中的腐蚀劣化规律,扩大样本容量,退化数据分别采用指数函数、幂函数及二次函数进行回归,将失效阈值 I 代入回归函数便得到钢筋混凝土试件在盐渍土通电加速环境下的失效时间 t ,如表 3 所示,表中 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 分别为回归函数的系数.

将表 3 中的失效时间进行升序排序编号,并利用公式 $x_i = \ln t_i$ 得到 x_i 值;而 $F(t_i)$ 近似等于中位秩

$MR(t_i)$,因而可得到 y_i 的值.在统计数学理论中,中位秩计算方法主要有 4 种,如下式所示:

$$MR(t_i) = \frac{N_i}{n+0.4}, MR(t_i) = \frac{N_i-0.3}{n+0.4},$$

$$MR(t_i) = \frac{N_i-0.5}{n}, MR(t_i) = \frac{N_i-0.375}{n+0.25} \quad (7)$$

式中: N_i 为排序后腐蚀天数编号; n 为失效数据样本容量,本文中 $n=27$.

在 x_i 和 y_i 已知的情况下,通过式(6)可以得到 Weibull 分布模型的形状和尺度参数 U 、 V ,如表 4 所示.由表 4 可见:对于 3 种强度等级的钢筋混凝土,采用 4 种中位秩法计算参数时的相关性都较好,但是得到的参数值略有差异,其中第 3 类中位秩形状参数估计值最大,第 4 类方法次之,第 1 类方法形状参数估计值最小;且 2 类参数中,形状参数的值变化较大,而尺度参数的值变化较小.

3.2.2 查表法

中位秩与 $F(t_i)$ 之间属于近似代替,这在一定程度上对计算结果有所影响.为了避免这种误差,通过查表法对中间参数 μ 和 σ 进行估计.由于样本容量为 $27 > 25$,因此采用查表法中的简单线性无偏估计方法对中间参数 μ 和 σ 进行估计^[20],结果如表 5 所示.

3.2.3 极大似然法

为了判断中位秩法和查表法所得参数的准确性,本文还从 Weibull 分布函数的密度函数(式(3))出发,构造似然函数,完全从数值计算角度来求解参数值,即最大似然法.

对于样本容量为 n 的 Weibull 分布,形状参数 U 与尺度参数 V 的似然函数 L 为:

$$L\left(\frac{t}{U}, \beta\right) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{U}{V}\right) \left(\frac{t_i}{V}\right)^{U-1} \exp\left[-\left(\frac{t_i}{V}\right)^U\right] \quad (8)$$

对式(8)两边取对数,得到对数似然函数,并对 U 和 V 分别求偏导,则有:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial U} = \frac{n}{U} + \sum_{i=1}^n \ln \frac{t_i}{V} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{V}\right)^U \ln \frac{t_i}{V} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial V} = -\frac{n}{V} - \frac{n(U-1)}{V} - \frac{U}{V} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{V}\right)^U \quad (10)$$

令式(9)、(10)结果为零,得到 2 个似然方程:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^U \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^U} - \frac{1}{U} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = 0 \quad (11)$$

$$V^U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^U \quad (12)$$

式(11)、(12)是参数 U 的超越方程,直接求解

表 3 钢筋混凝土试件在盐渍土通电加速环境下的失效时间
Table 3 Failure time of reinforced concrete specimens in the accelerated environment of saline soil electrification

Strength grade	Specimen number	Exponential function $I=a_1b_1t^{c_1}$		Power function $I=a_2+b_2t^{c_2}$		Quadratic function $I=a_3+b_3t+c_3t^2$	
		t	R^2	t	R^2	t	R^2
C35	1	957.2	0.916 5	912.6	0.962 0	923.3	0.967 7
	2	953.0	0.900 0	905.3	0.947 0	918.3	0.955 4
	3	966.3	0.897 3	922.4	0.942 6	932.6	0.952 6
	4	956.2	0.901 2	913.1	0.951 2	923.2	0.958 4
	5	957.6	0.932 1	919.0	0.972 9	927.7	0.976 4
	6	956.2	0.916 0	909.1	0.964 2	920.4	0.969 6
	7	955.1	0.908 4	909.6	0.954 6	920.2	0.961 7
	8	959.6	0.899 2	916.3	0.945 5	924.8	0.954 6
	9	947.1	0.863 6	893.1	0.912 9	907.3	0.931 2
C40	1	1 130.8	0.965 1	1 175.1	0.990 3	1 180.3	0.992 2
	2	1 126.1	0.969 7	1 160.0	0.995 0	1 164.0	0.995 3
	3	1 156.1	0.973 2	1 198.5	0.992 5	1 210.9	0.992 1
	4	1 169.8	0.952 0	1 240.7	0.978 0	1 238.6	0.984 5
	5	1 171.2	0.958 3	1 238.1	0.985 7	1 240.3	0.989 1
	6	1 146.3	0.968 1	1 183.4	0.986 3	1 194.7	0.988 8
	7	1 128.4	0.968 0	1 167.3	0.993 4	1 171.0	0.994 3
	8	1 140.5	0.969 3	1 176.5	0.989 9	1 183.3	0.991 1
	9	1 123.2	0.952 8	1 155.9	0.967 0	1 159.4	0.975 5
C45	1	1 642.6	0.954 2	2 120.1	0.998 7	2 448.8	0.992 1
	2	1 607.7	0.949 9	1 750.6	0.975 5	2 208.8	0.966 7
	3	1 648.9	0.950 6	1 794.5	0.985 7	2 307.7	0.966 8
	4	1 586.4	0.963 5	1 702.2	0.993 2	2 062.6	0.974 3
	5	1 597.1	0.963 3	1 888.6	0.994 6	2 175.9	0.986 4
	6	1 636.7	0.957 1	1 991.7	0.996 7	2 348.2	0.987 8
	7	1 627.0	0.956 0	1 938.6	0.992 2	2 313.6	0.984 0
	8	1 623.3	0.951 2	1 756.2	0.982 0	2 253.2	0.967 7
	9	1 653.9	0.947 5	2 066.3	0.985 4	2 430.1	0.982 4

表 4 中位秩法参数估计汇总表
Table 4 Summary table of median rank method parameter estimation

Strength grade	Parameter	$MR(t_i)=\frac{n(t_i)}{n+0.4}$	$MR(t_i)=\frac{n(t_i)-0.3}{n+0.4}$	$MR(t_i)=\frac{n(t_i)-0.5}{n}$	$MR(t_i)=\frac{n(t_i)-0.375}{n+0.25}$
C35	U	48.045 4	49.257 9	51.416 2	50.011 9
	V	941.069 2	940.113 0	939.957 2	939.964 5
	R^2	0.870 4	0.852 1	0.840 7	0.848 3
C40	U	36.675 5	37.504 2	39.111 8	38.067 6
	V	1 190.392 0	1 192.097 6	1 191.852 9	1 192.005 9
	R^2	0.885 2	0.862 1	0.849 1	0.857 9
C45	U	7.008 2	7.149 5	7.428 1	7.247 6
	V	2 048.649 0	2 064.436 8	2 062.825 7	2 063.823 8
	R^2	0.850 2	0.824 2	0.805 6	0.815 0

表 5 简单线性无偏估计参数汇总表 Table 5 Summary table of simple linear unbiased estimation parameters				
Specimen	σ	μ	U	V
C35	0.020 8	6.837 3	46.723 9	931.924 4
C40	0.036 3	7.074 2	26.753 9	1 181.151 0
C45	0.144 2	7.572 5	6.728 9	1 944.081 0

较为困难,因此需要采用数值求解方法求得近似解,为对比不同数值求解方法的收敛速度及求解精度,本文选用对分法(bisection method)、简单迭代法(simple iteration method)、牛顿-割线法(Newton-Secant method)及斯蒂芬森迭代法(Stephenson it-

eration method),并利用 Matlab 程序实现对上述方程的参数估计.

为充分说明各数值求解方法的优劣,令迭代初始值和控制迭代结束的精度水平均相同,极大似然方法中不同数值求解方法的具体迭代次数、计算结束时的精度及参数估计值如表 6 所示.由表 6 可见,极大似然法中所得参数值非常相近,4 种数值求解方法中以斯蒂芬森迭代法的迭代效率最高,精度水平最大,牛顿-割线法迭代效率紧随其后,而简单迭代法的迭代效率最差,尤其对于 C40 钢筋混凝土试件,其斯蒂芬森迭代次数仅是简单迭代法次数的 8.89%.

表 6 极大似然法参数估计汇总表 Table 6 Summary table of maximum likelihood method parameter estimation					
Specimen	Parameter	Bisection method	Simple iteration method	Newton-Secant method	Stephenson iteration method
C35	U	47.773 4	47.757 3	47.743 1	47.743 2
	V	940.153 2	940.150 1	940.147 4	940.147 4
	Iteration times	10	16	5	4
	Iterative precision	8.177×10^4	7.155×10^4	3.361×10^4	6.101×10^7
C40	U	33.320 3	33.298 1	33.312 7	33.313 5
	V	1 192.607 4	1 192.582 0	1 192.589 8	1 192.590 2
	Iteration times	11	45	5	4
	Iterative precision	1.616×10^6	9.49×10^4	9.504×10^4	9.539×10^6
C45	U	7.222 7	7.223 4	7.220 6	7.220 6
	V	2 060.970 47	2 060.984 0	2 060.933 4	2 060.933 4
	Iteration times	10	12	5	3
	Iterative precision	$5.408 2 \times 10^4$	$9.749 0 \times 10^4$	$6.793 1 \times 10^5$	$3.215 2 \times 10^4$

与其他 3 类迭代方法相比,对分法虽然迭代原理简单,易于实现 Matlab 编程,但是效率较差;简单迭代法则主要从方程本身出发求解变量,易于理解,是 4 种方法中迭代效率最低的方法;牛顿-割线法利用导数思想,使得参数估计值的收敛速度大于线性收敛速度,同时利用增量比来代替导数,也避免了求解导数的困难,是一种简单高效的数值计算方法.整体来看,对分法和简单迭代法原理简单,易于实现编程,但是迭代次数较多;而牛顿-割线法和斯蒂芬森迭代法的迭代次数明显减少,但需引入导数及中间参量,提高了 Matlab 编程难度.在程序可实现的情况下,后 2 种方法大大提高了运算效率.

综上,对比 Weibull 分布的 3 种估计方法所得参数值可知:4 种中位秩法所得形状参数估计值差异较大,而极大似然法的 4 种数值计算方法所得形状参数值非常相近,表明极大似然法在 Weibull 退

化分布参数估计中更具稳定性;并且中位秩法所得形状参数值偏大,而查表法所得形状参数值偏小,尤其对于较高强度的 C40、C45 试件,其偏差程度更大.这主要是因为中位秩法及查表法主要从数理统计方面着手,中位秩及查表所得参数是在大量统计基础上得到的,是一种近似解;而极大似然法完全从数值角度出发,所需数据均是真实的样本数据.此外,不同参数估计方法中,形状参数变化更为敏感,而尺度参数变化较小,这与参数估计过程及分布函数的移项等价有关.在整个参数估计方法中,首先得到形状参数,而形状参数的估计值与多项指标及参数有关;在得到形状参数值后可直接根据相关公式计算出尺度参数,尺度参数与其他参数取值无关,因而尺度参数值波动较小.

4 可靠度结果分析

为形象反映各参数估计方法及混凝土强度等级

对钢筋混凝土在盐渍土通电加速环境中可靠性的影响,将各方法所得参数值取平均值后分别代入式

(2)~(4),得到可靠度 $R(t)$ 、密度 $f(t)$ 及失效率 $\lambda(t)$,曲线如图 3~5 所示。

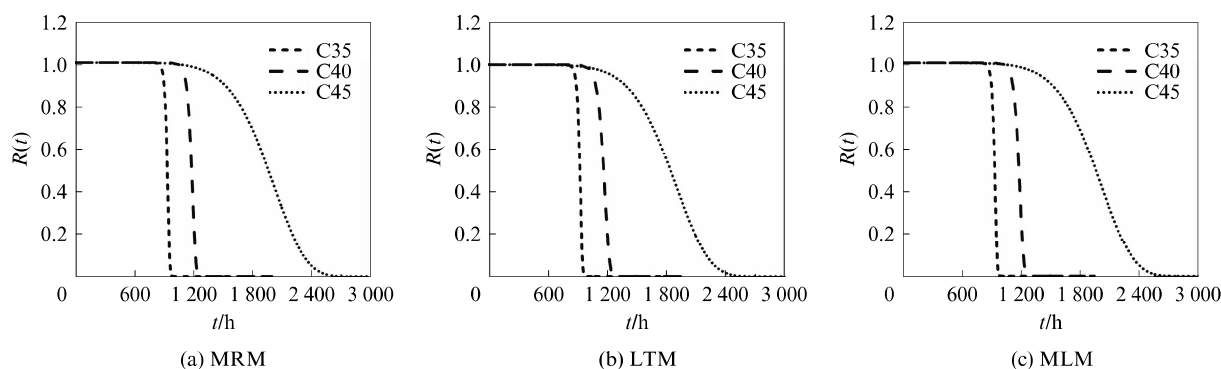


图3 不同参数估计方法的可靠度曲线

Fig. 3 Reliability curves of different parameter estimation methods

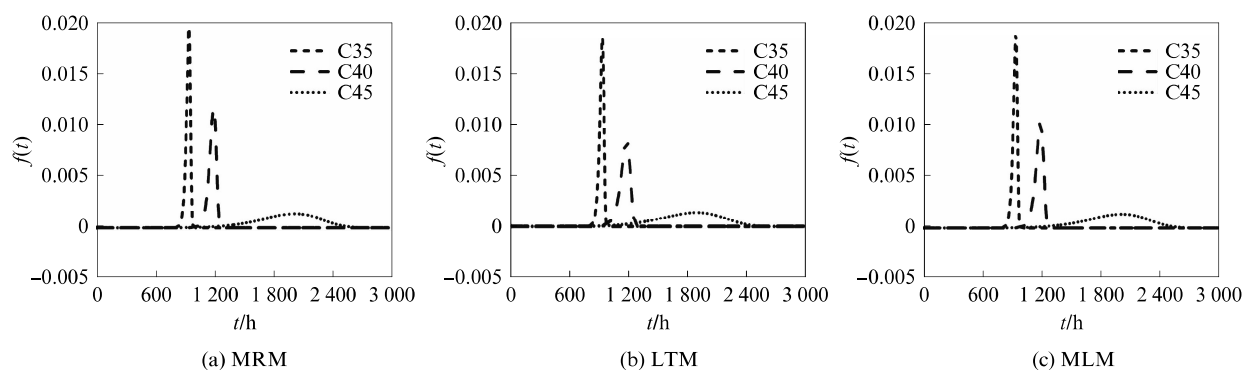


图4 不同参数估计方法的密度曲线

Fig. 4 Density curves of different parameter estimation methods

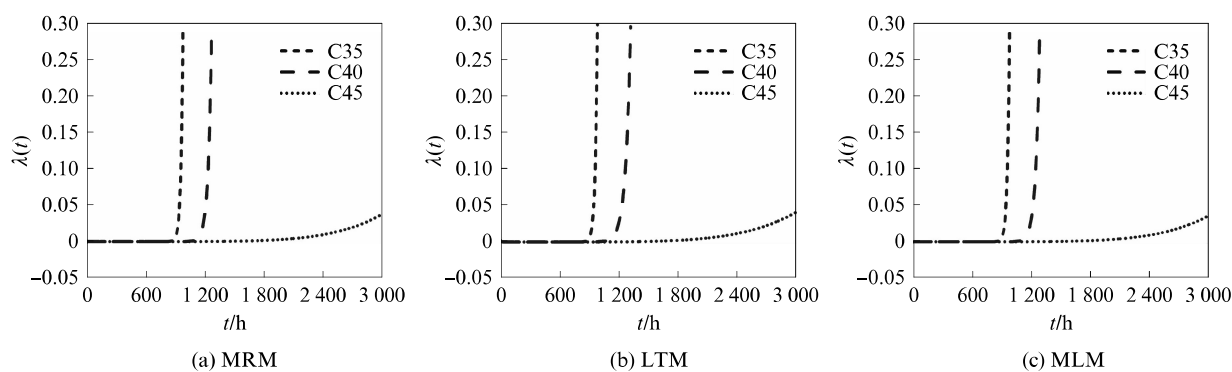


图5 不同参数估计方法的失效率曲线

Fig. 5 Failure ratio curves of different parameter estimation methods

由图 3 可见:盐渍土通电加速环境下不同强度等级钢筋混凝土试件的可靠度曲线均表现出明显的 3 个阶段,即可靠度保持为 1 基本不变,可靠度加速下降与可靠度完全为零;且第 1 阶段持续时间长,第 2 阶段持续时间短. 这表明盐渍土通电加速环境下钢筋混凝土试件在较长的时间内可保持较高的可靠

度,该过程中腐蚀离子不断向混凝土内部及钢筋表面迁移,但受到钢筋表面钝化膜和混凝土保护层的影响,氧气、水分等腐蚀介质需要经过一段时间才能抵达钢筋表面发生氧化还原反应,因而具有较高的可靠度. 当盐渍土中的腐蚀性离子浓度达到钢筋腐蚀临界值且腐蚀介质充足时,钢筋锈蚀速度大大加

快,钢筋混凝土试件可靠度急速下降至零,试件完全破坏.由图3还可知:与C45试件相比,C35、C40试件在第2阶段的持续时间明显减少,这是因为高强度混凝土具有更好的密实性,使腐蚀离子穿过混凝土到达钢筋表面更加困难,大大减缓了钢筋锈蚀劣化程度.

密度函数能够表征产品在 t 时刻的单位时间里发生失效的概率,从密度函数曲线(图4)可以看到:3类试件的失效时间明显不同,其中C35试件最先发生失效,失效时间为820~1 000 d,其次是C40试件,失效时间为1 000~1 300 d,C45试件失效时间最迟,为1 100~2 700 d;从密度极值来看,C35试件极值最大,C40试件次之,C45试件最小,表明盐渍土通电加速环境下C35试件失效速率最大,而C45试件最小,这从3类试件可靠度曲线的第2阶段也可以得到证实.整体来看,强度最大的C45试件失效时间最长,密度极值最低,失效程度较为缓慢.对比中位秩法和极大似然法,其失效时间基本相同,但中位秩法的密度极值略高于极大似然法,表明极大似然法可靠度失效程度较中位秩法稍大.

失效率曲线不仅能够反映失效机理,而且可以定量描述产品失效率的快慢.由失效率曲线(图5)可见:不同强度钢筋混凝土试件的失效率曲线变化相似,均呈现出逐渐增大的趋势,且初始较长的时间段内失效率增加极为缓慢,当接近于可靠度曲线第2阶段(即失效开始发生)时,失效率急剧增加.这表明3类试件的失效机理相同,均为耗损型失效,在通电初始时刻失效率高,可靠度降低程度小,随着通电腐蚀时间增加,腐蚀性离子不断向钢筋表面聚集,钢筋锈蚀加剧,试件失效率逐渐增大,直至试件破坏.

综上所述,强度等级对钢筋混凝土在盐渍土环境中的抗腐蚀影响显著,强度等级越高,相同腐蚀时间下的可靠性越高.参数估计方法对可靠性曲线影响略有差异,其中中位秩法和极大似然法所得钢筋混凝土试件在盐渍土通电加速环境下的可靠度较查表法要高.

5 结论

(1)Weibull分布的3种参数估计方法中:中位秩法所得形状参数估计值差异较大,极大似然法参数估计值非常相近;且中位秩法所得形状参数值偏大,而查表法所得形状参数值偏小,极大似然法所得形状参数值则介于两者之间且稳定性较高;形状参数值受各估计方法的影响较大,而尺度参数值波动较小.

(2)极大似然法利用分布函数的密度函数,所得参数估计值差异性较小,其中对分法和简单迭代法原理简单,易于实现Matlab编程,但迭代次数较多,牛顿-割线法和斯蒂芬森迭代法迭代效率较高,但提高了编程难度.

(3)盐渍土通电加速环境下强度对钢筋混凝土可靠性影响显著,C35和C40试件的可靠度曲线类似,第1阶段的持续时间较C45试件略短,且一旦可靠度开始下降,就迅速降至0,C45试件可靠度第2阶段持续时间显著增加.3类试件中,C35试件最先发生失效,且其密度极值最大,失效时间最短.随着强度等级的增加,钢筋混凝土密度极值变小,失效时间延长,失效率减小.

参考文献:

- [1] DE LARRARD T, BASTIDAS-ARTEAGA E, DUPRAT F, et al. Effects of climate variations and global warming on the durability of RC structures subjected to carbonation[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2014, 31(2): 153-164.
- [2] LIU J L, FANG Z. Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions and CO₂ emissions on the corrosion of RC structures subjected to carbonation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 503/504: 780-784.
- [3] 李镜培,李鹤.海洋环境下混凝土方桩使用寿命预测模型[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(9):1371-1376.
LI Jingpei, LI He. Service life prediction model of concrete square piles in marine environment[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(9): 1371-1376. (in Chinese)
- [4] 乔宏霞,巩位,程千元,等.盐湖地区镁水泥钢筋混凝土耐久性试验[J].煤炭学报,2015,40(增刊2):346-352.
QIAO Hongxia, GONG Wei, CHENG Qianyan, et al. Durability of magnesium cement reinforced concrete in saline soil area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(Suppl 2): 346-352. (in Chinese)
- [5] PENG L, STEWART MARK G. Climate change effects on carbonation-induced corrosion and damage risks of RC infrastructure in china[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10):61-69.
- [6] 赵华宁,刘兆强.氯离子侵蚀下钢筋混凝土耐久性寿命评估[J].工业建筑,2010,40(增刊1):851-855,888.
ZHAO Huaning, LIU Zhaoqiang. Assessment on service life of reinforced concrete in chloride erosion environment[J]. Industrial Building, 2010, 40(Suppl 1): 851-855, 888. (in Chinese)
- [7] 韩学强,詹树林,徐强,等.干湿循环作用对混凝土抗氯离子渗透侵蚀性能的影响[J].复合材料学报,2020,37(1):198-204.
HAN Xueqiang, ZHAN Shulin, XU Qiang, et al. Effect of dry wet cyclic action on chloride ion penetration resistance of con-

- crete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 198-204. (in Chinese)
- [8] 彭建新, 王华, 张建仁, 等. 氯盐侵蚀下钢筋混凝土氯离子扩散系数试验及其概率分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(6): 77-83.
- PENG Jianxin, WANG Hua, ZHANG Jianren, et al. Experimental study on chloride ion diffusion coefficient in concrete and probabilistic analysis of its influence on deterioration performance of RC structures[J]. *Journal of China Highway*, 2014, 27(6): 77-83. (in Chinese)
- [9] 施锦杰, 孙伟. 混凝土中钢筋腐蚀速率模型研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(4): 620-630.
- SHI Jinjie, SUN Wei. Models for corrosion rate of steel in concrete—A short review[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(4): 620-630. (in Chinese)
- [10] VAL D V, STEWART M G. Reliability assessment of ageing reinforced concrete structures—current situation and future challenges[J]. *Structural Engineering International*, 2009, 19(2): 211-219.
- [11] 许泽启, 麻海燕, 余红发, 等. 海洋混凝土结构表面自由氯离子含量时变规律及对其寿命影响[J]. *海洋工程*, 2017, 35(4): 126-134.
- XU Zeqi, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. Time variation law of free chlorine ion content in the surface of marine concrete structure and its influence on life[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(4): 126-134. (in Chinese)
- [12] 赵羽习. 钢筋锈蚀引起混凝土结构开裂综述[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5): 1122-1134.
- ZHAO Yuxi. State-of-art of corrosion-induced cracking of reinforced concrete structures[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science)*, 2013, 43(5): 1122-1134. (in Chinese)
- [13] TANG K K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100: 445-456.
- [14] 王雪松, 金贤玉, 田野, 等. 开裂混凝土中钢筋加速锈蚀方法适用性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(4): 565-574, 580.
- WANG Xuesong, JIN Xianyu, TIAN Ye, et al. Applicability of accelerated corrosion method of steel bars in cracked concrete structure[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2013, 47(4): 565-574, 580. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] PINDER J E, WIENER J G, SMITH M H. The Weibull distribution: A new method of summarizing survivorship data[J]. *Ecology*, 1978, 59(1): 175-179.
- [17] MING D, NASSIF A B. Combining modified Weibull distribution models for power system reliability forecast[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1610-1619.
- [18] 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.
- [19] 周丹, 李成榕, 王忠东. 变压器 Weibull 寿命建模参数估计方法的比较(英文)[J]. *高电压技术*, 2013, 39(5): 1170-1177.
- ZHOU Dan, LI Chengrong, WANG Zhongdong. Comparison of parameter estimation methods for transformer Weibull lifetime modelling[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(5): 1170-1177. (in Chinese)
- [20] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002: 163-177.
- ZHANG Zhihua. Accelerated life test and its statistical analysis[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002: 163-177. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 295 页)

- [13] ZHAO S J, SUN W. Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 150-160.
- [14] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [15] BISHOP C M. Pattern recognition and machine learning[M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc. 2006: 293-313.
- [16] BECKMANN N, KRIEGER H P, SCHNEIDER R, et al. R-tree. An efficient and robust access method for points and rectangles[J]. *SIGMOD Record*, 1990, 19(2): 322-331.
- [17] 孙伟, 缪昌文. 现代混凝土理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 708.
- SUN Wei, MIAO Changwen. Modern concrete theory and technology[M]. Beijing: Science Press, 2012: 708. (in Chinese)
- [18] 廉慧珍. 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 63-75
- LIAN Huizhen. Phase research foundation of building materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 63-75. (in Chinese)
- [19] 王龙强. K 均值聚类算法初始聚类中心的选取与改进[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- WANG Longqiang. Selection and improvement of initial clustering center of K-means clustering algorithms[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)