

文章编号:1007-9629(2023)11-1192-08

基于 Wiener 过程理论的盐渍土中混凝土 损伤演化及寿命预测

张学鹏¹, 张戎令^{1,2,*}, 王小平¹, 胡锐鹏³, 宋毅¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术
国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 中铁西安勘察设计研究院有限
责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要:基于新疆若羌盐渍土环境, 对水胶比为 0.32、0.35 和 0.38 的混凝土试件, 进行硫酸盐溶液浸泡腐蚀(标准养护 28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护 28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护 3 d)这 3 种腐蚀制度下的耐久性试验, 分析腐蚀制度与水胶比交互作用下混凝土动弹性模量经时演变规律与作用机制. 并基于混凝土动弹性模量动态变化过程, 通过 Wiener 过程理论, 建立了盐渍土环境下混凝土服役寿命预测模型, 以定量表征混凝土损伤劣化规律. 结果表明: 在各腐蚀制度下, 随腐蚀龄期增加, 混凝土损伤度均出现先减小后增大的规律; 在腐蚀终期, 混凝土水胶比与其损伤度呈负相关; 在相同水胶比下, 硫酸盐溶液浸泡腐蚀(标准养护 28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护 28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护 3 d)对混凝土损伤程度的影响依次增加; 由 Wiener 过程理论建立的混凝土服役寿命预测模型可知, 混凝土预测寿命退化呈 3 阶段变化趋势, 其趋势与试验中混凝土劣化过程保持一致.

关键词:混凝土; 西北盐渍土; 动弹性模量; Wiener 过程理论; 寿命预测

中图分类号: TU528.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.007

Damage Evolution and Life Prediction of Concrete in Saline Soil Based on Wiener Process Theory

ZHANG Xuepeng¹, ZHANG Rongling^{1,2,*}, WANG Xiaoping¹, HU Ruipeng³, SONG Yi¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Bridge Engineering National Local Joint Engineering Laboratory of Disaster Prevention and Control Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. China Railway Xi'an Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the saline soil environment in Ruoqiang, Xinjiang, durability tests were conducted on concrete specimens with water cement ratios of 0.32, 0.35 and 0.38 under three erosion regimes, namely, sulphate solution immersion corrosion (standard curing for 28 d), saline soil corrosion (standard curing for 28 d), saline soil corrosion (standard curing for 3 d). The evolution of the dynamic elastic modulus of concrete under the interaction of the erosion regimes and water cement ratios over time was analyzed. Based on the dynamic change process of concrete dynamic elastic modulus, a service life prediction model of concrete in saline soil environment was established base on Wiener

收稿日期: 2023-03-19; 修订日期: 2023-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068042); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(K2021G025); 甘肃省杰出青年科学基金资助项目(21JR7RA344)

第一作者: 张学鹏(1998—), 男, 甘肃武威人, 兰州交通大学硕士生. E-mail: 2249850776@qq.com

通讯作者: 张戎令(1984—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 兰州交通大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: mogzrlggg@163.com

process theory to quantitatively characterize the damage deterioration law of concrete. The results show that: under each erosion regime, with the increase of erosion age, the damage degree of concrete is first reduced and then increased; in the final erosion period, the water cement ratio of concrete is negatively correlated with its damage degree; under the same water cement ratio, the effects of sulfate solution immersion corrosion (standard curing 28 d), saline soil corrosion (standard curing 28 d), saline soil corrosion (standard curing 3 d) on the degree of damage to the concrete are successively increased; by Wiener process theory, a model is established to predict the service life of concrete in the saline soil environment, to quantitatively characterize the damage deterioration law. It can be seen that the predicted life degradation of concrete is a 3-stage trend, and its trend is consistent with the deterioration process of concrete in the test.

Key words: concrete; northwest salty soil; dynamic elastic modulus; Wiener process theory; life prediction

中国西北地区分布着大面积的盐渍土与盐湖^[1-2],通过研究西北盐渍土环境特征可知:盐渍土环境中混凝土结构受多种离子耦合作用,但主要以硫酸盐腐蚀为主^[3],其化学腐蚀与物理结晶双重作用导致混凝土结构出现服役寿命下降等问题^[4].因此通过研究盐渍土环境对混凝土耐久性的劣化演变规律,对该区域混凝土材料设计与结构服役状态评价具有重要意义.

在混凝土材料劣化机理方面,现有研究在硫酸盐、干湿循环等单一或耦合作用下,对各类混凝土材料的抗压强度变化、微裂缝产生与离子扩散现象进行了分析,明确硫酸盐对混凝土材料的影响机制.Haufe等^[5-6]通过研究硫酸盐环境下混凝土力学性能和微结构变化特征,认为硫酸盐腐蚀作用下水泥石微结构演变对混凝土损伤具有重要影响;并且,有研究表明硅酸盐水泥水化过程中,混凝土膨胀开裂与石膏形成过程中的拉伸应力有关^[7].混凝土结构服役过程中膨胀开裂由多种原因引起,比如:单一及两者环境耦合作用^[8]、材料内部缺陷^[9]、外掺料^[10]等均会引起微孔隙产生,导致混凝土结构服役性能下降.另外,有研究^[11]指出高延性水泥基材料(ECC)中PVC纤维可显著减少硫酸盐腐蚀损伤.

现有研究主要通过拟合、不确定性理论及神经网络模型等方法,量化表征混凝土结构腐蚀损伤状态,并预测其服役寿命.基于硫酸盐全浸泡、半浸泡等环境下混凝土耐久性数据,通过线性/非线性方法,预测分析硫酸盐环境中混凝土结构剩余服役寿命^[12-14].同时,也有研究^[15-16]指出混凝土结构服役过程受多种因素影响,可建立基于不确定性理论的混凝土服役寿命预测模型,该类模型可较好地预测硫酸盐环境下混凝土结构剩余使用

寿命.另外,随人工智能发展,研究^[17]表明神经网络模型可无限逼近于任何函数,因此基于支持向量机^[18]和BP神经网络^[17,19]等,结合硫酸盐腐蚀试验及盐渍土实际工程中混凝土劣化数据,建立硫酸盐腐蚀环境下混凝土服役寿命预测模型,经实际数据验证,发现其可预测同类环境下混凝土服役寿命.

西北盐渍土条件下混凝土耐久性研究较少,且该类环境下混凝土服役寿命预测模型缺乏相关研究.本文基于新疆若羌地区盐渍土环境,在硫酸盐溶液浸泡腐蚀(标准养护28d)、盐渍土腐蚀(标准养护28d)、盐渍土腐蚀(标准养护3d)这3种腐蚀制度下,对水胶比¹⁾(m_w/m_b)为0.32、0.35、0.38的混凝土开展了耐久性试验,分析了3种腐蚀制度对不同水胶比混凝土动弹性模量的演变规律,探究不同腐蚀环境工况与混凝土强度工况交互作用对于混凝土动弹性模量的作用机制.同时,考虑到盐渍土环境下混凝土劣化过程受众多因素影响,通过Wiener过程理论,建立了盐渍土环境下混凝土服役寿命预测模型,以期对西北盐渍土地区混凝土结构服役状态评价和寿命预测提供理论支撑.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用P·O 42.5硅酸盐水泥,性能指标见表1;粗骨料采用5~20mm连续级配碎石;细骨料采用天然河砂,细度模数2.9,属Ⅱ区中砂;减水剂采用聚羧酸系高性能减水剂,减水率为27%;无水硫酸钠,烧失量0.2%,20℃时溶解度195g/L.基于格库铁路现场配合比,混凝土设计3种强度等级,即C50(水胶比0.32)、C40(水胶比0.35)、C35(水胶比0.38),详见表2.

1)文中涉及的水胶比、减水率等均为质量比或质量分数.

表1 水泥性能指标
Table 1 Cement performance index

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
330	5.5	8.7	28.1	42.4

表2 混凝土配合比设计
Table 2 Concrete mix proportions

Strength grade	Water	Cement	Sand	Stone	kg/m ³
					Water reducer
C50	150	465	764	1 056	5.58
C40	147	420	850	1 083	5.04
C35	136	360	832	882	3.60

1.2 试验设计

为研究西北盐渍土地区强腐蚀条件下混凝土材料的劣化损伤规律,以新疆若羌地区工程结构所处典型的格库铁路环境为背景,设置A、B、C这3种腐蚀制度,分别为硫酸盐溶液浸泡腐蚀(标准养护28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护28 d)、盐渍土腐蚀(标准养护3 d),来模拟硫酸盐浸泡环境中混凝土、盐渍土环境中混凝土、盐渍土环境中早龄期混凝土的劣化状态,以明确盐渍土环境下不同水胶比混凝土的耐久性劣化规律,试验工况设计见表3。为了控制环境温湿度,在大气温湿度模拟箱中进行相关试验,并基于实际环境调研参数,温度设置为年平均温度(24℃左右),湿度设置为年平均相对湿度(30%左右)。课题组通过对现场工程水样及其附近环境进行调研(台特玛湖附近土壤中主要离子类型及其基本参数如表4所示),得到硫酸根离子平均质量分数为3%,因此本试验采用质量分数为3%的Na₂SO₄溶液作为腐蚀溶液。混凝土试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,根据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验

表3 试验工况设计
Table 3 Design of test conditions

Group	m_w/m_b	Strength grade	Curing method	Erosion method
A1	0.32	C35	Standard curing 28 d	3%Na ₂ SO ₄
A2	0.35	C40	Standard curing 28 d	3%Na ₂ SO ₄
A3	0.38	C50	Standard curing 28 d	3%Na ₂ SO ₄
B1	0.32	C35	Standard curing 28 d	Saline soil
B2	0.35	C40	Standard curing 28 d	Saline soil
B3	0.38	C50	Standard curing 28 d	Saline soil
C1	0.32	C35	Standard curing 3 d	Saline soil
C2	0.35	C40	Standard curing 3 d	Saline soil
C3	0.38	C50	Standard curing 3 d	Saline soil

表4 台特玛湖附近土壤中主要离子类型及其基本参数
Table 4 Major ions in soil near Lake Taitma and their basic parameters

Major ion	Ion content in water/(mg·L ⁻¹)	Ion content in soil/(mg·kg ⁻¹)
SO ₄ ²⁻	11 000.5	23 000.5
Cl ⁻	760.3	193.1
Mg ²⁺	242.5	55.6

方法标准》测定不同腐蚀龄期(*t*)下混凝土的动弹性模量,每隔30 d测定1次。

(1)腐蚀制度A:西北地区盐渍土环境中混凝土材料主要受硫酸盐腐蚀作用^[20-21],通过在试验室中设置混凝土硫酸盐腐蚀试验,可同步模拟混凝土材料劣化状态。混凝土放入标准养护室中养护24 h脱模,继续养护28 d后,将混凝土试件浸泡到3%Na₂SO₄溶液中,并按每月1次的周期更换腐蚀溶液。

(2)腐蚀制度B:模拟盐渍土环境中混凝土劣化状态,混凝土放入标准养护室中养护24 h脱模,将养护至28 d的混凝土试件半埋于腐蚀介质(从格库铁路沿线典型盐渍土区域——台特玛湖取回的含硫酸盐土壤)中,并添加3%Na₂SO₄溶液使之高出土面约1 cm,待溶液蒸发至土壤表面时继续添加3%Na₂SO₄溶液,溶液更换周期为2月1次。

(3)腐蚀制度C:模拟盐渍土试验环境中早龄期混凝土劣化状态,混凝土放入标准养护室中养护24 h脱模,继续养护3 d后,半埋到从台特玛湖取回的含硫酸盐土壤中,并添加3%Na₂SO₄溶液使之高出土面约1 cm,待溶液蒸发至土壤表面时继续添加3%Na₂SO₄溶液,溶液更换周期为2月1次。

1.3 评价指标

混凝土动弹性模量与混凝土抗冻性存在较强相关关系,且可较好地量化表征混凝土抗冻损伤程度^[22-23]。因此,本文参照GB/T 50082—2009标准,以混凝土试件的动弹性模量作为损伤变量,进行混凝土损伤度分析,计算式如下:

$$D = \frac{\bar{E}_d - E_{di}}{\bar{E}_d} = 1 - \frac{E_{di}}{\bar{E}_d} \quad (1)$$

式中:*D*为混凝土损伤度; \bar{E}_d 为混凝土初始动弹性模量; E_{di} 为混凝土腐蚀*i*天后的动弹性模量。

2 结果及分析

2.1 不同水胶比对混凝土损伤度的影响

图1给出了各腐蚀制度下不同水胶比的混凝土损伤度演变规律。由图1可知:在各腐蚀制度下,随着腐蚀龄期的增加,混凝土损伤度均出现先减小后增

大的规律;在混凝土损伤度增加阶段,混凝土损伤度的主要发展趋势为A3>A2>A1、B3>B2>B1、C3>C2>C1.如图1(a)所示:在腐蚀制度A下,当腐蚀龄期为300 d时,A2、A3条件下混凝土损伤度分别为A1条件下的1.91、2.87倍;A1、A2、A3条件下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期分别为270、210、180 d.如图1(b)所示:在腐蚀制度B下,当腐蚀龄期为300 d时,B2、B3条件下混凝土损伤度分别为B1条件下的2.31、2.65倍;B1、B2、B3条件下混凝土开始出现损伤

的腐蚀龄期分别为210、180、150 d.如图1(c)所示:在腐蚀制度C下,当腐蚀龄期为300 d时,C2、C3条件下混凝土损伤度分别为C1条件下的2.15、3.14倍;C1、C2、C3条件下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期分别为210、120、60 d.分析可得:在各腐蚀制度下,当腐蚀龄期为300 d(腐蚀终期)时,混凝土水胶比与混凝土损伤度呈负相关;混凝土水胶比与混凝土开始损伤时对应龄期呈负相关.即在各腐蚀制度下,低水胶比混凝土抗硫酸盐腐蚀性能更好.

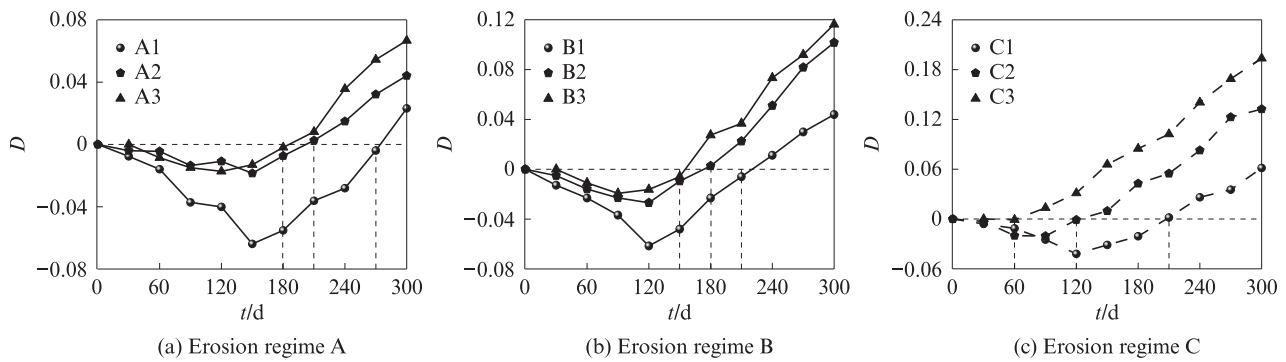
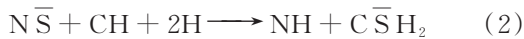


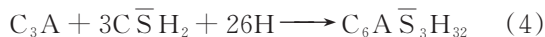
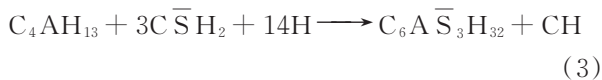
图1 各腐蚀制度下不同水胶比的混凝土损伤度演变规律

Fig. 1 Evolution of concrete damage degree for different water-cement ratios under each corrosion regime

在腐蚀前期,硫酸根离子扩散至混凝土内部,与水泥浆体中的氢氧化钙反应生成石膏,如式(2)所示.



混凝土体系中钙矾石活化能较低,石膏继续与水泥浆体中的水化铝相、含铝胶体以及未水化的铝酸三钙反应生成二次钙矾石固体,如式(3)、(4)所示.



随着反应进行,铝相类物质逐渐被消耗,同时伴随着石膏晶体的不断析出,固体腐蚀产物体积增大了124%^[21].硫酸盐腐蚀产物可填充混凝土孔隙,并细化孔隙结构,导致混凝土中毛细孔体积减少、孔隙连通性降低,使其内部孔隙结构更加密实,宏观表现为混凝土动弹性模量增加.在腐蚀后期,随着腐蚀龄期的增加,硫酸盐腐蚀产物持续增加,导致混凝土部分孔壁产生膨胀拉应力,当其超过孔壁的极限抗拉应力时,混凝土内部出现微裂缝,造成混凝土劣化;并且,由于硫酸盐的腐蚀,混凝土内部氢氧化钙被消耗,引起混凝土内部中性化,界面过渡区的胶凝材料分解,混凝土与骨料的黏结力下降,宏观表现为混凝土动弹性模量降低.同时,由于不同水胶比混凝土试

件的水泥含量存在显著差异,在预养护阶段,其水化程度及密实程度不同,导致试件抗硫酸盐腐蚀性能存在显著梯度差异,因此,在各腐蚀制度下混凝土劣化程度与水胶比呈负相关.

2.2 不同腐蚀制度对混凝土损伤度的影响

由图1可分析相同水胶比、不同腐蚀制度下的混凝土损伤度演变规律:当水胶比相同时,在混凝土损伤度增加阶段,混凝土损伤度主要变化规律为C1>B1>A1, C2>B2>A2, C3>B3>A3;当水胶比为0.32、腐蚀龄期为300 d时,B1、C1条件下混凝土损伤度分别为A1条件下的1.89、2.66倍,在腐蚀终期,B1与A1条件下混凝土损伤度的最大相对差值达到0.06,A1、B1、C1条件下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期分别为270、210、210 d;当水胶比为0.35、腐蚀龄期为300 d时,B2、C2条件下混凝土损伤度分别为A2条件下的2.3、3.0倍,在腐蚀终期,B2与A2条件下混凝土损伤度的最大相对差值达到0.09,A2、B2、C2条件下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期分别为210、180、120 d;当水胶比为0.38、腐蚀龄期为300 d时,B3、C3条件下混凝土损伤度分别为A3条件下的1.74、2.91倍,腐蚀终期B3与A3条件下混凝土损伤度的最大相对差值达到0.13,A3、B3、C3条件下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期分别为180、150、60 d.

综上所述,在相同水胶比下,腐蚀制度对混凝土

的劣化影响程度为: $C > B > A$; 相较于腐蚀制度 A, 腐蚀制度 B、C 下的混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期均有不同程度的“提前”, 且腐蚀制度 C 下混凝土开始出现损伤的腐蚀龄期最短. 即在相同水胶比下, 腐蚀制度 C 对于混凝土的劣化程度影响较大.

3 基于 Wiener 理论的混凝土服役寿命预测模型

3.1 Wiener 过程理论

基于 Wiener 理论对混凝土服役寿命 (T) 建模, 可较好描述混凝土劣化过程中的不确定因素^[24]. 考虑到混凝土耐久性评价指标具有远离初始点的趋势, 采用具有漂移性质的 Wiener 理论进行建模^[21], 见式(5).

$$X_k(t) = \mu t + \sigma W(t) \quad (5)$$

式中: $X_k(t)$ 为混凝土退化指标; μ 为漂移参数; σ 为扩散参数; $W(t)$ 为标准 Wiener 过程函数; $t > 0$.

同时, 依据文献[25]的研究, 根据 Fokker-Planck 方程可知概率密度函数 $f(x_k, t)$ 为:

$$f(x_k, t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x_k - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] - \exp\left(\frac{2\mu D_f}{\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{(x_k - 2D_f - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \right\} \quad (6)$$

式中: x_k 为退化指标; D_f 为耐久性阈值.

基于上式, 得到可靠度函数 $R_k(t)$:

$$R_k(t) = \Phi\left(\frac{D_f - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\mu D_f}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-D_f - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (7)$$

式中: $\Phi(x)$ 为 x 的标准正态分布函数.

对式(7)进行推导, 可得 T 的分布函数 $F_k(t)$ 和概率密度函数 $f(t)$:

$$F_k(t) = 1 - R_k(t) = \Phi\left(\frac{\mu t - D_f}{\sigma \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu D_f}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-D_f - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (8)$$

$$f(t) = \frac{D_f}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(D_f - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \quad (9)$$

3.2 Wiener 过程理论增量检验

基于 Wiener 过程理论, 对于不同工况下的混凝土损伤增量进行正态分布假设检验. 绘制不同工况下混凝土损伤度增量 P - P 图及其频率分布直方图, 如图 2 所示. 由图 2 可见, P - P 图中数据点在对角线附近离散分布. 计算不同工况下混凝土损伤度增量正态分布显著性 P 值, 如表 5 所示. 由表 5 可见, 各工况下混凝土损伤度增量正态分布显著性 P 值均大于 0.05.

可见混凝土损伤度增量服从正态分布, 可以运用 Wiener 过程理论对混凝土进行服役寿命预测.

3.3 Wiener 过程理论参数估计

由于概率密度函数为连续型函数, 采用极大似然估计法对 Wiener 过程理论中的关键未知参数 μ 、 σ^2 进行估计. 通过概率密度函数可以推导出极大似然函数 $L(\mu, \sigma^2)$:

$$L(\mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2 \pi \Delta t_i}} \exp\left[-\frac{(\Delta x_i - \mu \Delta t_i)^2}{2\sigma^2 \Delta t_i}\right] \quad (10)$$

式中: n 为样本数量; Δx_i 为试件在 $[t_i, t_{i+1}]$ 区间的混凝土损伤度退化量; $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$.

对式(10)双侧同时取对数, 求得 μ 、 σ^2 的一阶偏导数, 并且令其为 0, 即可得到 μ 、 σ^2 的极大似然估计值:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta x_i)^2}{\Delta t_i} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \Delta x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \right] \quad (12)$$

将各试件在不同工况下的混凝土损伤度退化量带入式(11)、(12), 计算可得各工况下试件 Wiener 过程理论的关键参数 μ 、 σ^2 , 如表 6 所示.

3.4 基于 Wiener 过程理论的混凝土服役寿命预测

基于 Wiener 过程理论建模时, 失效阈值是判断混凝土是否能够正常工作的重要边界条件. 根据 GB/T 50082—2009 标准可知: 混凝土的失效阈值为混凝土动弹性模量损失率达 40%, 即混凝土损伤度失效阈值取 0.4. 通过建立 Wiener 过程理论混凝土服役寿命预测模型, 对不同工况下的混凝土试件进行服役寿命预测.

图 3 为混凝土预测寿命可靠度函数及概率密度函数. 由图 3 可知, 在 3 种水胶比条件下, 不同腐蚀制度下的混凝土预测寿命可靠度函数曲线相似, 但各个阶段持续的时间不同, 呈现 3 阶段的变化趋势: 前期可靠度基本保持在 1.0 左右, 此阶段硫酸盐结晶体不断积累, 混凝土内部密实度增加; 中期可靠度快速下降, 此阶段混凝土中硫酸盐结晶体对孔壁产生膨胀拉应力, 当其超过孔壁极限抗拉应力时, 混凝土产生微裂缝, 同时, 混凝土内部中性化, 混凝土骨料与胶凝材料失去胶结能力; 后期可靠度下降至 0 附近, 此阶段混凝土耐久性失效. 综上可知: 不同腐蚀制度下混凝土预测寿命可靠度函数曲线可与试验中混凝土劣化过程保持较好的一致性.

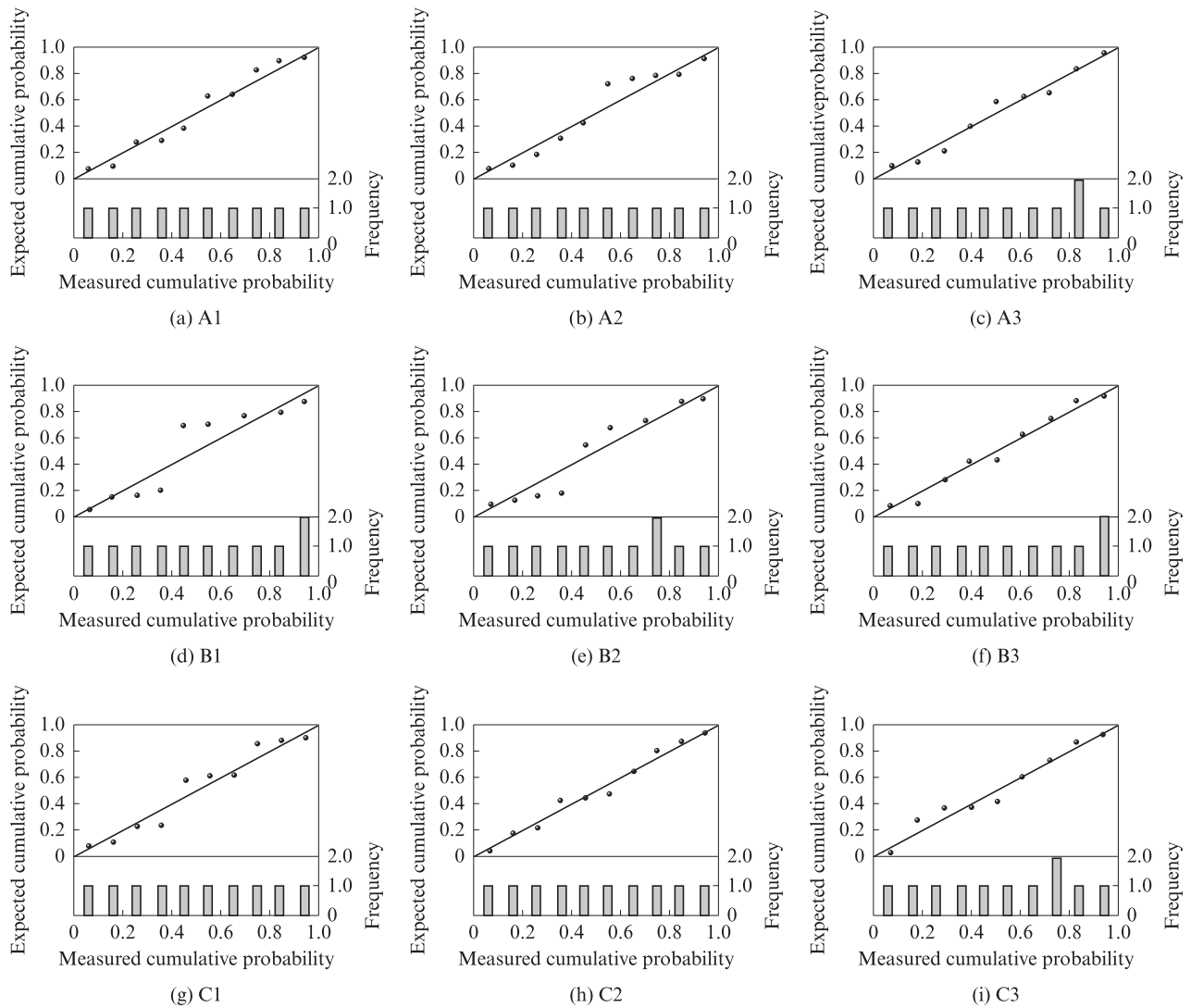


图 2 不同工况下混凝土损伤度增量 P-P 图及其频率分布直方图

Fig. 2 P-P plots of incremental concrete damage degree under different working conditions and their frequency distribution histograms

表 5 混凝土损伤度增量正态分布显著性 P 值

Table 5 Significant P-values for normal distribution of incremental concrete damage degree

A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
0.707	0.529	0.814	0.096	0.208	0.721	0.426	0.947	0.779

Note: Hypothesis testing within 95% confidence intervals.

表 6 Wiener 过程理论的关键参数

Table 6 Key parameters of Wiener process theory

Parameter	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$\mu \times 10^4$	0.772	1.471	2.222	1.463	3.387	3.877	2.049	4.415	6.451
$\sigma^2 \times 10^6$	8.852	2.386	3.932	8.521	6.576	8.122	6.847	8.320	5.013

由图 3 中不同工况下混凝土预测寿命可靠度函数及概率密度函数可知:

(1) A1、A2、A3 的预测寿命分别为 14 600、4 230、2 850 d, B1、B2、B3 的预测寿命分别为 5 990、1 910、1 690 d, C1、C2、C3 的预测寿命分别为 3 610、

1 450、840 d.

(2) A1、A2、A3 条件下混凝土预测寿命分别为 B1、B2、B3 条件下的 2.43、2.21、1.69 倍. 这是由于腐蚀制度 B 下盐渍土环境中的混凝土不仅受硫酸盐腐蚀作用, 还受干湿循环作用, 因此其服役寿命显著降低.

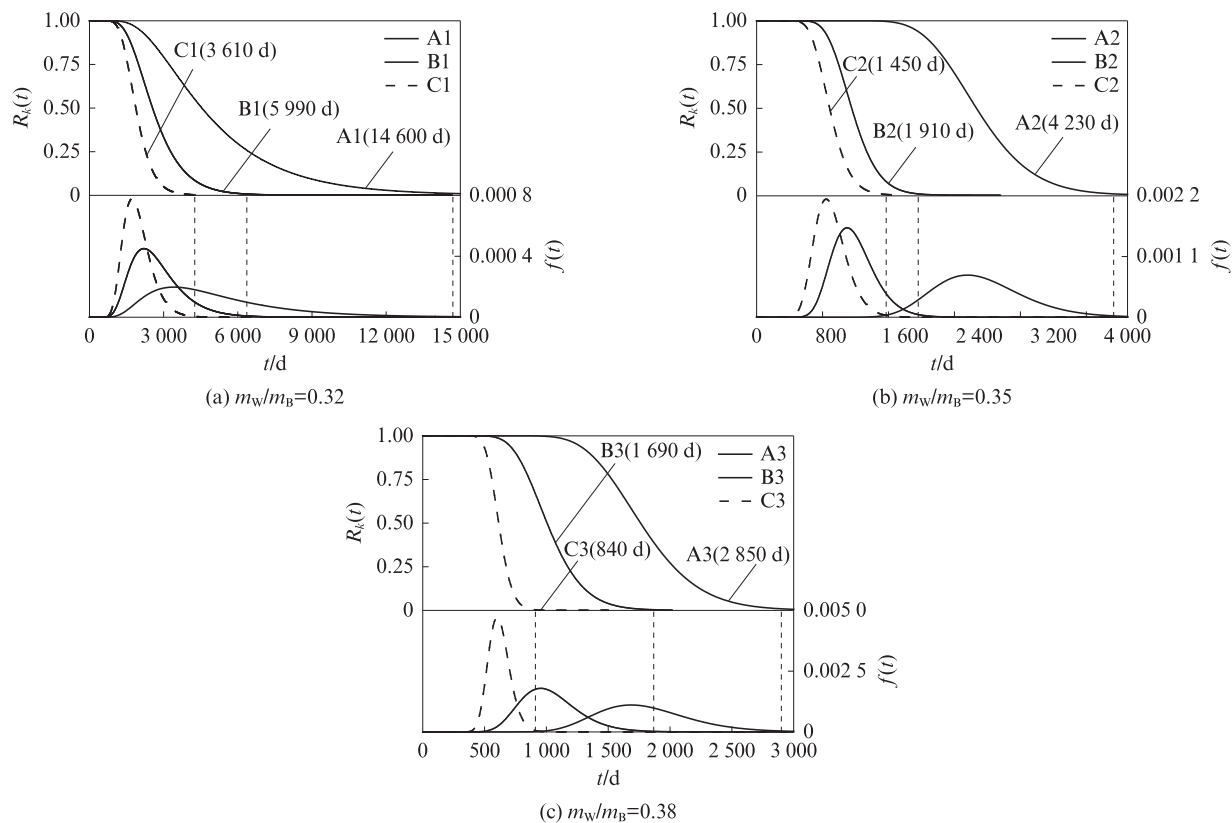


图3 混凝土预测寿命可靠度函数及概率密度函数
Fig. 3 Predicted life reliability function and probability density function of concrete

(3) B1、B2、B3条件下混凝土预测寿命分别为C1、C2、C3条件下的1.66、1.31、2.02倍。这是由于腐蚀制度C下混凝土为早龄期混凝土，水化程度较低，内部孔隙较多，因而易受硫酸盐腐蚀。

(4) A1、A2、A3条件下混凝土预测寿命分别为C1、C2、C3条件下的4.04、2.90、3.43倍。这是由于腐蚀制度C为盐渍土环境，且混凝土预养护时间不足，因而C条件下混凝土劣化程度更高。

4 结论

(1) 在各腐蚀制度下，随腐蚀龄期增加，混凝土损伤度均出现先减小后增大的变化规律。在腐蚀终期，混凝土损伤度与水胶比呈负相关；另外，混凝土开始损伤对应龄期也与水胶比呈负相关。

(2) 在相同水胶比条件下，硫酸盐溶液浸泡腐蚀（标准养护28 d）、盐渍土腐蚀（标准养护28 d）、盐渍土腐蚀（标准养护3 d）这3种腐蚀制度对混凝土劣化程度的影响依次增加。

(3) 基于Wiener过程理论可以较好地描述不同工况下混凝土动弹性模量退化过程：前期混凝土内部腐蚀物质积累；中期可靠度快速下降，混凝土内部产生损伤，开始劣化；后期混凝土耐久性失效。其变化趋势与试验中混凝土劣化过程保持较好的一致性。

(4) 各工况下混凝土预测寿命存在显著差异，相较于硫酸盐溶液浸泡腐蚀（标准养护28 d）、盐渍土腐蚀（标准养护3 d）条件下混凝土劣化程度更高。

参考文献：

- [1] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 氯盐对混凝土硫酸盐损伤的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3): 43-46.
JIN Zuquan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Effect of chloride on damage of concrete attacked by sulfate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(3): 43-46. (in Chinese).
- [2] 谢超, 王起才, 于本田, 等. 低温硫酸盐侵蚀下水泥砂浆抗折强度预测模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1520-1527.
XIE Chao, WANG Qicai, YU Bentian, et al. Prediction model of flexural strength of cement mortar under sulfate attack at low temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1520-1527. (in Chinese).
- [3] 孟祥晖, 冯琼, 张云升, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀劣化行为及竞争失效分析[J]. 材料导报, 2023, 37(14): 44-53.
MENG Xianghui, FENG Qiong, ZHANG Yunsheng, et al. Analysis of corrosion-induced deterioration behavior and competing failure of reinforced concrete in saline soil environment [J]. Materials Reports, 2023, 37(14): 44-53. (in Chinese).
- [4] 张广泰, 张路杨, 陈勇, 等. 荷载-硫酸盐共同作用下纤维混凝土柱受压性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 102-112.
ZHANG Guangtai, ZHANG Luyang, CHEN Yong, et al.

- Compression behavior of fiber concrete column under combined action of load and sulfate attack[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2022, 49(1):102-112. (in Chinese).
- [5] HAUFE J, VOLLPRACHT A. Tensile strength of concrete exposed to sulfate attack[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 116:81-88
- [6] 张晓佳,张高展,孙道胜,等.水泥基材料硫酸盐侵蚀机理的研究进展[J].材料导报,2018,32(7):1174-1180.
ZHANG Xiaojia, ZHANG Gaozhan, SUN Daosheng, et al. Progress of the mechanism of sulfate attack on cement-based materials[J]. Materials Reports, 2018, 32(7):1174-1180. (in Chinese).
- [7] TIAN B, COHEN M D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1):117-123.
- [8] 杨永敢,康子豪,詹炳根,等.带初始损伤的混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J].建筑材料学报,2022,25(12):1255-1261.
YANG Yonggan, KANG Zihao, ZHAN Binggen, et al. Sulfate resistance of concrete with initial damage[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1255-1261. (in Chinese).
- [9] 刘超,姚羿舟,刘化威,等.硫酸盐干湿循环下再生复合微粉混凝土的劣化机理[J].建筑材料学报,2022,25(11):1128-1135.
LIU Chao, YAO Yizhou, LIU Huawei, et al. Deterioration mechanism of recycled composite powder concrete under dry-wet cycles of sulfate[J].Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1128-1135. (in Chinese).
- [10] 邓德华,肖佳,元强,等.石灰石粉对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性的影响及其机理[J].硅酸盐学报,2006,34(10):1243-1248.
DENG Dehua, XIAO Jia, YUAN Qiang, et al. Effect of limestone powder on the sulfate-resistance of materials based on cement and its mechanism[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(10):1243-1248. (in Chinese).
- [11] 王振波,孙鹏,刘伟康,等.硫酸盐侵蚀下 ECC 轴拉力学性能与微观结构[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(7):31-36.
WANG Zhenbo, SUN Peng, LIU Weikang, et al. Tensile performance and microstructure of ECC under sulfate attack[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 49(7):31-36. (in Chinese).
- [12] 张新博,张戎令,宁贵霞,等.水胶比对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响[J].铁道科学与工程学报,2021,18(6):1471-1478.
ZHANG Xinbo, ZHANG Rongling, NING Guixia, et al. The influence of water-binder ratio on the sulfate corrosion resistance of concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6):1471-1478. (in Chinese).
- [13] 关博文,陈拴发,李华平,等.疲劳荷载作用下混凝土硫酸盐腐蚀寿命预测[J].建筑材料学报,2012,15(3):395-398.
GUAN Bowen, CHEN Shuanfa, LI Huaping, et al. Sulfate corrosion life of cement concrete under fatigue load[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3):395-398. (in Chinese).
- [14] 乔宏霞,乔国斌,路承功.硫酸盐环境下基于 COMSOL 混凝土损伤劣化模型[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(3):119-125.
QIAO Hongxia, QIAO Guobin, LU Chengong. Damage and deterioration model of concrete based on COMSOL in sulfate environment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 49(3):119-125. (in Chinese).
- [15] 李北星,袁晓露,崔巩,等.应用灰色系统理论预测硫酸盐侵蚀环境下混凝土的强度劣化规律及服役寿命(英文)[J].硅酸盐学报,2009,37(12):2112-2117.
LI Beixing, YUAN Xiaolu, CUI Gong, et al. Application of the grey system theory to predict the strength deterioration and service life of concrete subjected to sulfate environment[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12):2112-2117. (in Chinese).
- [16] 关宇刚,孙伟,缪昌文.基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I:模型阐述与建立[J].硅酸盐学报,2001,29(6):530-534.
GUAN Yugang, SUN Wei, MIAO Changwen. One service life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories I: Narration and establishment of the model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(6):530-534. (in Chinese).
- [17] 谢渊,高玮,汪义伟,等.基于哈里斯鹰优化遗传规划的钢筋混凝土地下结构硫酸盐腐蚀寿命预测[J].土木工程学报,2022,55(4):33-41.
XIE Yuan, GAO Wei, WANG Yiwei, et al. Life prediction of RC underground structure by sulfate attack based on harris hawks optimizing genetic programming [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(4):33-41. (in Chinese).
- [18] CHEN H C, QIAN C X, LIANG C Y, et al. An approach for predicting the compressive strength of cement-based materials exposed to sulfate attack[J]. PloS ONE, 2018, 13(1):e0191370.
- [19] DIAB A M, ELYAMANY H E, ABD ELMOATY A E M, et al. Prediction of concrete compressive strength due to long term sulfate attack using neural network[J]. Alexandria Engineering Journal, 2014, 53(3):627-642.
- [20] LONG Z F, ZHANG R L, WANG Q C, et al. Mechanism analysis of strength evolution of concrete structure in saline soil area based on 15-year service [J]. Construction and Building Materials, 2022, 332:127281.
- [21] 乔宏霞,朱彬荣,陈丁山.西宁盐渍土地区混凝土劣化机理试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):805-815.
QIAO Hongxia, ZHU Binrong, CHEN Dingshan. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete in Xining saline soil area[J].Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4):805-815. (in Chinese).
- [22] 高鑫,孔祥振,申向东.基于 GM(1,1) 的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估[J].工程科学与技术,2021,53(4):184-190.
GAO Chu, KONG Xiangzhen, SHEN Xiangdong. Freeze-thaw resistance evaluation of lightweight aggregate concrete with stress damage based on GM(1,1)[J].Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4):184-190. (in Chinese).
- [23] 董伟,王雪松,计亚静,等.碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理及寿命预测[J].建筑材料学报,2023,26(6):623-630.
DONG Wei, WANG Xuesong, JI Yajing, et al. Damage deterioration mechanism and life prediction of aeolian sand