

文章编号:1007-9629(2022)09-0910-07

基于 GM(1,1)-Markov 模型盐雾侵蚀对纤维 混凝土耐久性能的影响

于剑桥¹, 乔宏霞^{1,2,*}, 朱飞飞¹, 王新科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 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:以玄武岩-聚乙烯醇(PVA)纤维体积分数为变化参数,对纤维混凝土进行室内盐雾侵蚀加速试验,通过抗压耐蚀系数 K_t 、相对质量评价参数 ξ_1 、相对动弹性模量评价参数 ξ_2 以及扫描电镜(SEM)照片,分别从宏观、微观层面对纤维混凝土耐久性损伤劣化进行评价分析,并基于GM(1,1)-Markov模型对其寿命进行预测.结果表明:在盐雾环境下,纤维混凝土的 K_t 先上升后下降, ξ_1 波动性较大, ξ_2 可作为评价纤维混凝土损伤劣化的决定性因素;GM(1,1)-Markov模型与实测数据吻合较好,纤维混凝土的最佳玄武岩、PVA纤维体积分数分别为0.10%、0.05%,其在盐雾环境下的服役时间最长,达到680 d.

关键词:盐雾环境;损伤劣化;GM(1,1)-Markov;纤维混凝土

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.004

Effect of Salt Spray Corrosion on Durability Performance of Fiber Concrete Based on GM(1,1)-Markov Model

YU Jianqiao¹, QIAO Hongxia^{1,2,*}, ZHU Feifei¹, WANG Xinke¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation Engineering Research Center, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking the volume fraction of basalt-polycynyl alcohol(PVA) fiber as the variable parameter, the indoor salt spray accelerated corrosion test was carried out. The damage and deterioration was evaluated and analyzed from the macro and micro aspects through the compressive corrosion resistance coefficient K_t , relative quality evaluation parameter ξ_1 , relative dynamic elastic modulus evaluation parameter ξ_2 and scanning electron microscope (SEM) images, and the life of the fiber concrete was predicted based on GM(1,1)-Markov model. The results show that the K_t of the fiber concrete increases first and then decreases in the salt spray environment, ξ_1 fluctuates greatly, and ξ_2 can be used as the decisive factor for evaluate the damage and deterioration of fiber concrete. The data based on GM(1,1)-Markov model agrees well with the test data. The optimum volume fraction of basalt and PVA fiber is 0.10% and 0.01% respectively. The specimen with the optimum volume fraction has the longest service time under the salt spray environment, reaching 680 d.

Key words: salt spray environment; damage and deterioration; GM(1,1)-Markov; fiber concrete

收稿日期:2021-08-09; 修订日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168031,51868044)

第一作者:于剑桥(1995—),男,河北围场人,兰州理工大学硕士生.E-mail: 1815200102@e.gzhu.edu.cn

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

中国西部盐湖中富含碳酸盐、硫酸盐、氯盐等多种腐蚀性离子,受当地环境影响其极易被卷入空中形成大气盐雾.与内陆地区建筑物相比,盐雾中的 SO_4^{2-} 对混凝土材料的寿命影响巨大.目前,将纤维掺入混凝土中提高其抗硫酸盐侵蚀能力这一做法得到了建筑行业的普遍认可^[1-2].Guo等^[3]指出玄武岩纤维可以发挥桥联基体的功能,使水泥砂浆具有优异的抗腐蚀性能.王振山等^[4]研究发现0.1%体积分数的玄武岩纤维,可以减缓混凝土在 MgSO_4 溶液中孔隙率的增加速率.Guo等^[5]研究发现在混凝土中加入聚乙烯醇(PVA)纤维可确保其具有很强的抗硫酸盐侵蚀能力.此外,纤维间距较近的多种纤维试样比单纤维试样具有更高的耐久性能^[6],因此亟需对混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能进行进一步的研究.

盐雾侵蚀对混凝土材料来说是个长期过程,判定混凝土能否在设计参考期内完成预定使用功能尤为重要.GM(1,1)模型以“小样本、差信息”的不确定系统为研究对象,为混凝土寿命预测提供了强有力的技术支持.然而,传统GM(1,1)模型考虑的因素过于单一,预测精度有一定缺陷^[7].鉴于此,本文以玄武岩-PVA纤维混凝土为研究对象,进行了盐雾侵蚀加速试验,根据耐久性试验数据及扫描电镜(SEM)观察到的侵蚀产物对混凝土损伤劣化规律进行分析,并基于GM(1,1)-Markov模型对混凝土寿命进行预测,最终评估了纤维混凝土抗盐雾侵蚀的可靠性.

1 试验

1.1 原材料与配合比

甘肃祁连山水泥厂提供的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,安定性合格;比表面积为 $440\text{ m}^2/\text{kg}$ 的Ⅱ级粉煤灰;细骨料为细度模数2.73的天然河砂;粗骨料为表观密度 $2\,780\text{ kg}/\text{m}^3$ 的碎石子;最大减水率(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等除特殊说明外均为质量分数或质量比)为20%的聚羧酸系高效减水剂;自来水;单丝分散玄武岩纤维(BF),长度为12 mm,等效直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$,弹性模量为100 GPa,抗拉强度不低于4 500 MPa,密度为 $2\,700\text{ kg}/\text{m}^3$;束状单丝聚乙烯醇(PVA)纤维,密度为 $1\,300\text{ kg}/\text{m}^3$,长度为12 mm,等效直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$,抗拉强度为1 830 MPa,弹性模量为40 GPa.胶凝材料的化学组成见表1.

察尔汗盐湖卤水的pH值为9.60,采用称量滴定法测试其离子含量,结果见表2.根据表2,配制质量浓度为23 g/L的 Na_2SO_4 溶液.

表1 胶凝材料化学组成
Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	Al_2O_3	CaO	K_2O	MgO	MnO	SO_3	Fe_2O_3	SiO_2	IL
Cement	9.2	50.5	1.2	3.3	0.3	2.1	4.2	26.5	1.8
Fly ash	31.2	6.0	1.5	1.1	0.2	0.6	6.5	48.5	2.2

表2 察尔汗盐湖卤水中的离子含量
Table 2 Mass concentration of ions in brine of Chaerhan Salt Lake

Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
5 840	397	22 887	59	81 016	15 648	181

设计混凝土的强度等级为C40,水胶比为0.4,其 $m(\text{水泥}):m(\text{天然河砂}):m(\text{碎石子}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{水}):m(\text{减水剂})=400.00:635.00:1\,165.00:100.00:200.00:0.65$.纤维混凝土的纤维体积分数及抗压强度见表3(表中 φ_{BF} 、 φ_{PVA} 分别为BF、PVA纤维的体积分数; φ 为混杂纤维BF和PVA的总体积分数).

表3 纤维混凝土的纤维体积分数及抗压强度
Table 3 Fiber volume fraction and compressive strength of fiber concretes

Specimen	$\varphi_{\text{BF}}/\%$	$\varphi_{\text{PVA}}/\%$	$\varphi/\%$	Compressive strength at 28 d / MPa
OPC	0	0	0	44.8
B0.05P0.05	0.05	0.05	0.10	46.5
B0.05P0.10	0.05	0.10	0.15	46.8
B0.05P0.15	0.05	0.15	0.20	45.2
B0.10P0.05	0.10	0.05	0.15	47.0
B0.10P0.10	0.10	0.10	0.20	47.2
B0.10P0.15	0.10	0.15	0.25	45.0
B0.15P0.05	0.15	0.05	0.20	45.5
B0.15P0.10	0.15	0.10	0.25	44.7
B0.15P0.15	0.15	0.15	0.30	43.2

1.2 试验方法

试件为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 的立方体,试验流程图见图1.采用YSYW-60型盐水喷雾机,每隔20次循环测试立方体试件的质量、相对动弹性模量和抗压强度.200次循环(侵蚀200 d)后,选取OPC和B0.10P0.05的混凝土碎片,进行SEM测试.

采用耐久性评价参数(抗压耐蚀系数 K_t 、相对质量评价参数 ξ_1 、相对动弹性模量评价参数 ξ_2)对混凝土材料在盐雾侵蚀环境中的损伤劣化程度进行评估.当 K_t 达到75%、 ξ_1 达到5%或 ξ_2 超过40%时,混凝土材料耐久性失效.评价参数的计算公式为:

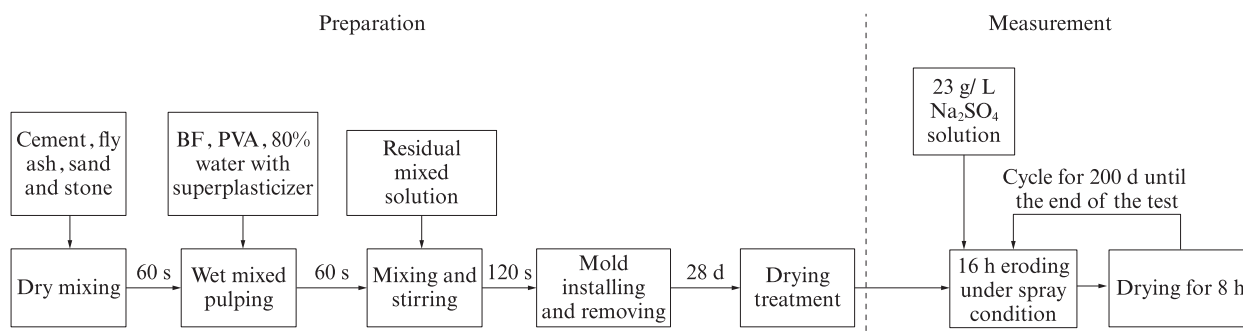


图1 试验流程图

Fig. 1 Test flow chart

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\xi_1 = \frac{m_n/m_0 - 0.05}{0.95} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_r = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} = \frac{v_n^2}{v_0^2} \quad (3)$$

$$\xi_2 = \frac{E_r - 0.6}{0.4} \times 100\% \quad (4)$$

式中: f_{c0} 、 f_{cn} 分别为初始阶段和 n 次循环后试件的抗压强度; m_0 、 m_n 分别为初始阶段和 n 次循环后试件的质量; E_r 为试件的相对动弹性模量; E_{d0} 、 E_{dn} 为初始阶段和 n 次循环后试件的动弹性模量; v_0 、 v_n 分别为初始阶段和 n 次循环后试件中的超声波速。

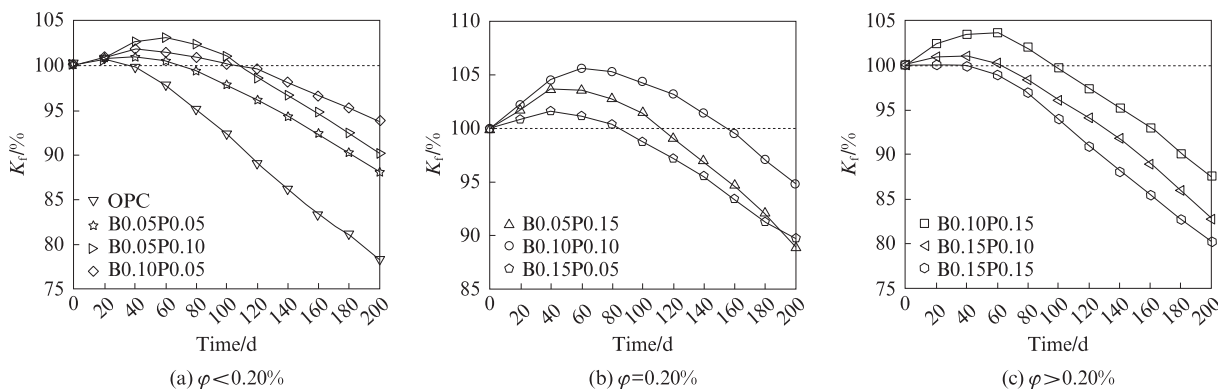
2 耐久性结果分析

盐雾侵蚀作用下纤维混凝土抗压耐蚀系数的经时变化曲线见图2。由图2可见: 侵蚀200 d时, OPC的 K_f 降至78.27%, 损伤最为严重; 纤维混凝土的 K_f 早期增长幅度较 OPC 更大, 且后期下降速率也更低; 当 $\varphi=0.20\%$ 时, 试件的 K_f 早期增长最为显著, 其中 B0.10P0.10 在侵蚀80 d时 K_f 为105.29%, 远高于其他试件; 当 $\varphi>0.20\%$ 时, 混杂纤维对混凝土 K_f 的增益效果将大幅度降低, 其中 B0.15P0.15 在侵蚀200 d

时 K_f 降至80.25%, 仅比 OPC 高1.98%, 增益效果最差。这和 Wang 等^[8] 的试验结果类似, 是由于过高分数的纤维不易在混凝土内部搅拌均匀, 容易形成新的缺陷, 难以减缓侵蚀离子对水泥基体造成的损害。

盐雾侵蚀作用下纤维混凝土相对质量评价参数的经时变化曲线见图3。由图3可见: ξ_1 波动性很大, 纤维混凝土试件在很长一段侵蚀时间内 ξ_1 均大于100%; OPC 的 ξ_1 在侵蚀200 d时为8.85%, 损伤最为严重; B0.10P0.05 的劣化趋势远低于其他试件, 侵蚀早期 ξ_1 随侵蚀时间延长不断增大, 在侵蚀80 d时达到峰值151.86%, 远高于 OPC。这是由于混凝土内部孔隙中的硫酸盐侵蚀产物具有膨胀性, 产生的张力使水泥剥落, 导致混凝土试件的质量减小^[9], 而纤维可以较好地分担孔隙中积存的膨胀应力, 使得混凝土进一步水化, 密实度持续增加, 纤维混凝土的 ξ_1 得到有效提升。

盐雾侵蚀作用下纤维混凝土相对动弹性模量评价参数的经时变化曲线见图4。由图4可见, 盐雾侵蚀对混凝土 ξ_2 的影响类似于对其对 K_f 的影响, 均经历了增长和下降2个阶段。乔宏霞等^[10] 通过 Comsol 模拟研究表明, 由于盐雾侵蚀环境早期沉积的硫酸盐类

图2 盐雾侵蚀作用下纤维混凝土抗压耐蚀系数 K_f 的经时变化曲线Fig. 2 Time variation curves of K_f of fiber concretes under salt spray corrosion

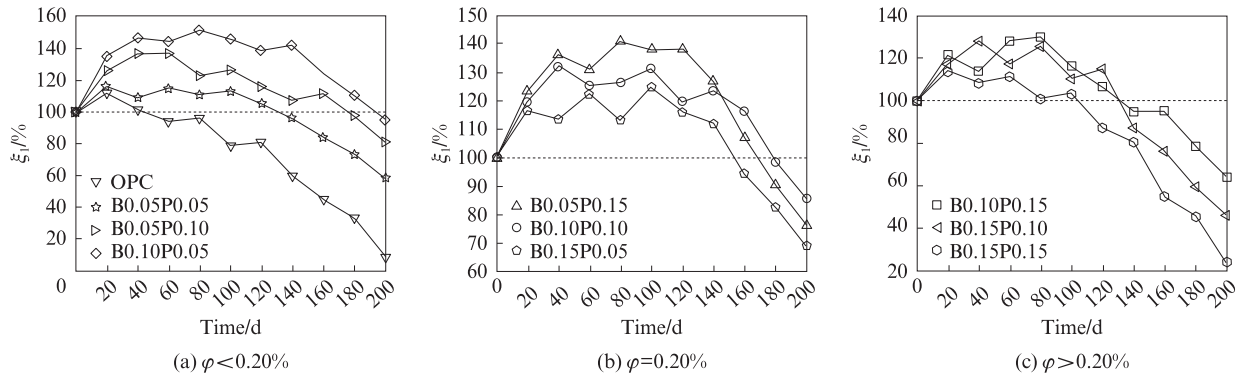


图3 盐雾侵蚀作用下纤维混凝土相对质量评价参数的经时变化曲线

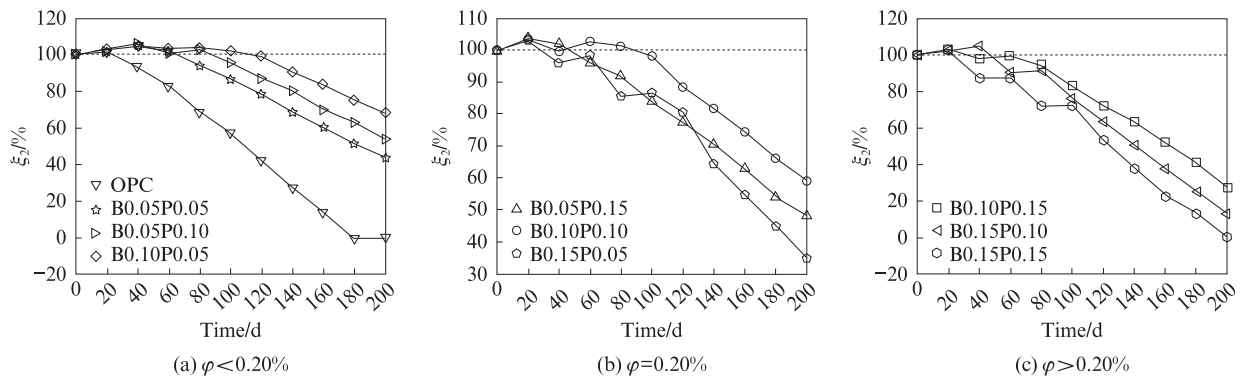
Fig. 3 Time variation curves of ξ_1 of fiber concretes under salt spray corrosion

图4 盐雾侵蚀作用下纤维混凝土相对动弹性模量评价参数的经时变化曲线

Fig. 4 Time variation curves of ξ_2 of fiber concretes under salt spray corrosion

晶体提高了混凝土的密实度,因此其相对动弹性模量有所增加,且随着侵蚀的不断进行,生成的膨胀产物和硫酸盐结晶促使微裂缝发展,最终导致其相对动弹性模量下降. OPC在侵蚀180 d时已经达到失效标准,而纤维混凝土在侵蚀200 d时仍具有服役能力. 侵蚀200 d时, B0.10P0.05的 ξ_2 降至68.15%. 此外,随着混杂纤维体积分数 φ 的提高,纤维混凝土 ξ_2 的提升效果逐渐降低. 以B0.15P0.15为例,侵蚀200 d时其 ξ_2 降至0.26%,已接近耐久性破坏状态,这表明对混凝土的抗盐雾侵蚀性能,混杂纤维体积分数存在临界值:当纤维体积分数达到临界值时,纤维之间可以形成具有最佳搭接长度的三维空间结构,此时混凝土抵抗盐雾侵蚀的能力最强;当纤维体积分数超过临界值时,单位体积水泥基体中所分布的纤维数量过多、纤维间距过小,易使相邻纤维发生团聚,造成薄弱面数量增多,对纤维混凝土的密实度产生不利影响,最终导致其抗盐雾侵蚀性能降低. 综上,纤维混凝土中纤维的最佳体积分数为: $\varphi_{BF}=0.10\%$; $\varphi_{PVA}=0.05\%$.

由前文可知,侵蚀200 d后,出现了部分试件的相对动弹性模量评价参数 $\xi_2 < 60\%$,而此时其相对质量评价参数 $\xi_1 > 95\%$,抗压耐蚀系数 $K_t > 75\%$. 因此, K_t

和 ξ_1 只能作为盐雾环境下纤维混凝土耐久性劣化的参考因素,而由其相对动弹性模量 E_r 所推导出的 ξ_2 可作为关键指标.

盐雾侵蚀200 d后, OPC和B0.10P0.05的SEM照片见图5. 由图5可见: OPC表面存在大量多孔结构和爆米花状、短杆状侵蚀产物,且其分布松散,并带有大厚度的微裂纹. 侵蚀产物大多为钙矾石和石膏:一方面,此类物质的力学性能不同于水泥水化产物,这将影响混凝土材料的抗压强度;另一方面,侵蚀产物会产生不均匀附加应力并作用于混凝土内部,从而引起较大的膨胀应变,导致裂缝大量生成,并造成耐久性损伤. 由图5还可见: B0.10P0.05的结构明显比OPC紧密;纤维均匀定向分布在基体中,形成大量微加强筋;纤维与基体间存在很强的黏结效应,使应力均匀分散在纤维单丝上,界面结合强度的提高带来了较大的纤维桥接能力,从而增强了混凝土的抗压强度,抑制了裂缝的产生和发展; B0.10P0.05的表面也存在少量钙矾石等侵蚀产物,但明显可以看出其内部存在致密的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶. 由此可见,纤维混凝土对盐雾侵蚀的耐受性比普通混凝土更好.

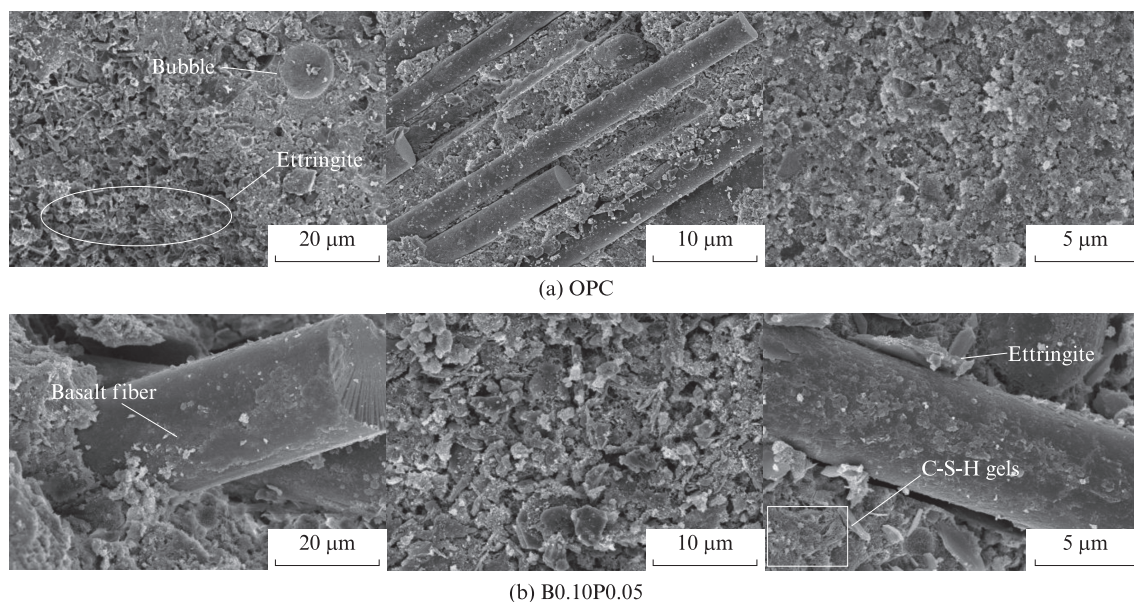


图5 盐雾侵蚀200 d后 OPC 和 B0.10P0.05 的 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of OPC and B0.10P0.05 after salt spray corrosion for 200 d

3 模型的建立

对混凝土劣化时间的准确预测有助于在建筑工程中作出重要决策,灰色系统理论已成为解决离散

数据、不完全信息及不确定问题的一种有效方法.

假设 $X^{(0)}(t) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ ($n > 0, t$ 为时间序列系数) 是不规则分布的原始数据序列, 进行累加生成运算处理后, 得到累加生成序列 $X^{(1)}(t)$:

$$X^{(1)}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^1 X^{(0)}(t), \sum_{i=1}^2 X^{(0)}(t), \dots, \sum_{i=1}^n X^{(0)}(t) \right\}, n > 0 \quad (5)$$

GM(1,1)模型可用一阶微分方程表示为:

$$X^{(0)}(t) + aZ^{(1)}(t) = u \quad (6)$$

式中: a 为发展系数; u 为灰色输入系数; $Z^{(1)}(t)$ 为关于 $X^{(1)}(t)$ 的背景值.

将 $Z^{(1)}(t) = 0.5 \times [X^{(1)}(t) + X^{(1)}(t+1)]$ 代入式(6), 通过拉普拉斯逆变换, 即可得到 GM(1,1) 模型的通解为:

$$\hat{X}^{(1)}(t) = [X^{(0)}(1) - u/a]e^{-a(t-1)} + u/a \quad (7)$$

单一 GM(1,1) 模型不能将盐雾侵蚀环境下所有影响因素都考虑在内, 当试验数据随机性较大时, GM(1,1) 模型的预测精度并不理想. 因此本文将 Markov 链与 GM(1,1) 模型相结合得到 GM(1,1)-Markov 模型, 以提高预测精度. GM(1,1)-Markov 模型首先通过计算得到 GM(1,1) 预测值和原始数据之间的残差, 并建立序列预测模型; 然后利用 Markov 转移矩阵判断残差的转移行为; 最后根据修正后的残差得出 GM(1,1)-Markov 预测值.

由于残差预测模型的推导步骤与 GM(1,1) 模型推导过程相似, 详细计算过程参考文献[11], 其结果

如下:

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}^{(1)}(t) = \left[\epsilon^{(0)}(2) - \frac{u}{a} \right] e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a} \\ \hat{\epsilon}^{(0)}(t) = \hat{\epsilon}^{(1)}(t) - \hat{\epsilon}^{(1)}(t-1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\hat{\epsilon}^{(1)}(t)$ 为残差预测模型; $\hat{\epsilon}^{(0)}(t)$ 为残差预测值.

对于残差中存在的一些规律性信息, 可建立 Markov 转移矩阵规定其状态: 残差是正数时为状态 1; 负数时为状态 2. 根据状态的正负性可得到状态转移概率 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_i}, i = 1, 2; j = 1, 2 \quad (9)$$

式中: P_{ij} 是从状态 i 到状态 j 的转移概率; M_{ij} 是从状态 i 到状态 j 的过渡时间; M_i 是属于第 i 个状态的数据数量.

由状态转移概率可得到状态概率转移矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

最终可获得 GM(1,1)-Markov 模型计算结果

$\hat{Y}^{(1)}(t)$ 及预测值 $\hat{Y}^{(0)}(t)$:

$$\begin{cases} \hat{Y}^{(1)}(t) = \hat{X}^{(1)}(t) + 1_{\{P(+)\geq P(-)\}} \hat{\epsilon}^{(1)}(t) - 1_{\{P(+)<P(-)\}} \hat{\epsilon}^{(1)}(t) \\ \hat{Y}^{(0)}(t) = \hat{Y}^{(1)}(t) - \hat{Y}^{(1)}(t-1) \end{cases} \quad (11)$$

4 预测结果分析

以耐久性能较好的B0.10P0.05为例,用GM(1,1)、GM(1,1)-Markov模型分别对其相对动弹性模量 E_r 进行预测,当 $E_r < 0.6$ 时,认为达到该混凝土的寿命。GM(1,1)、GM(1,1)-Markov模型拟合结果见图6。由图6可见:Markov的引入明显提高了GM(1,1)模型的预测精度;GM(1,1)-Markov模型能够较好地匹配试验数据的波动性变化,其拟合值的相对误差整体上明显低于GM(1,1)模型。

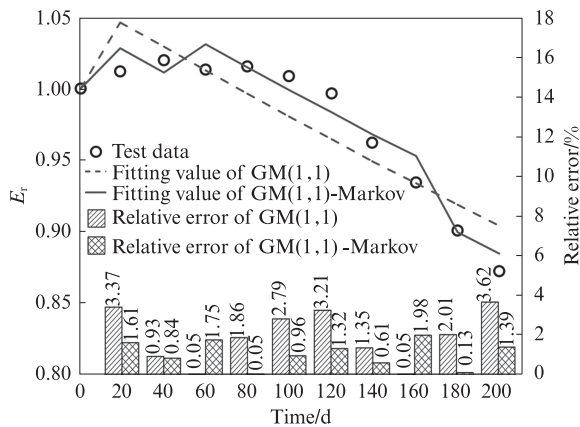


图6 B0.10P0.05的GM(1,1)、GM(1,1)-Markov模型拟合结果

Fig. 6 Model fitting results of GM(1,1) and GM(1,1)-Markov of B0.10P0.05

准确预测纤维混凝土的寿命,将有助于提前对处于盐雾侵蚀环境中的纤维混凝土进行检测和维护。为了进一步了解其他配合比纤维混凝土的劣化趋势,通过GM(1,1)-Markov模型对其 E_r 进行预测,结果如图7

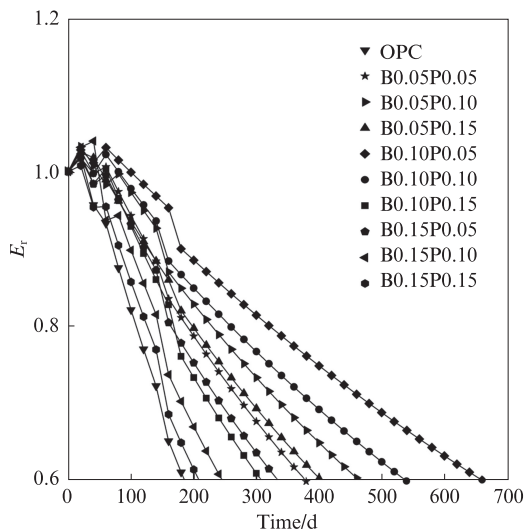


图7 基于GM(1,1)-Markov模型预测混凝土的相对动弹性模量

Fig. 7 Prediction of E_r of concrete based on GM(1,1)-Markov model

所示。由图7可见:在侵蚀180 d时,OPC遭到破坏,这和试验过程中 E_r 的数据相吻合,侧面印证了GM(1,1)-Markov模型具有很高的预测精度;侵蚀220 d时,B0.15P0.15达到失效标准,即当纤维总体积分数达到0.30%时,纤维对混凝土耐久性能的提升效果显著降低,这说明尽管混掺BF和PVA纤维可以提高混凝土在盐雾环境中的服役寿命,但纤维总体积分数不宜过多;盐雾侵蚀环境下耐久性能最好的为B0.10P0.05,其服役时长为680 d,远超其他试件。

5 结论

(1)盐雾侵蚀加速试验中的侵蚀溶液质量浓度参考了察尔汗盐湖卤水中 SO_4^{2-} 的质量浓度,较好地还原了西部盐湖地区混凝土材料的破坏过程,明确了混掺玄武岩纤维和聚乙烯醇(PVA)纤维对混凝土在该地区耐久性能显著提升的可行性。

(2)在盐雾环境下,纤维混凝土的抗压耐蚀系数 K_t 先上升后下降,相对质量评价参数 ξ_1 波动性较大,相对动弹性模量评价参数 ξ_2 可作为评价纤维混凝土损伤劣化的决定性因素。混掺纤维可以延缓 SO_4^{2-} 对混凝土内部的侵蚀速率,从而提高混凝土的抗盐雾侵蚀能力。

(3)将相对动弹性模量 E_r 作为关键劣化因素,所建立的GM(1,1)-Markov模型与实测数据吻合较好,能够有效预测纤维混凝土的损伤劣化趋势。当玄武岩纤维体积分数为0.10%、PVA纤维体积分数为0.05%时,纤维混凝土在盐雾环境中的耐久性能最佳,可服役时间达到680 d。当纤维的总体积分数达到0.30%时,纤维对混凝土耐久性能的提升效果显著降低。

参考文献:

- [1] 张广泰,张晓旭,田虎学.盐冻环境下混杂纤维锂渣混凝土梁受弯承载力研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):831-837.
ZHANG Guangtai, ZHANG Xiaoxu, TIAN Huxue. Bending bearing capacity of hybrid fiber lithium slag concrete beam under salt freezing environment[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):831-837.(in Chinese)
- [2] MENG C M, LI W Z, CAI L C, et al. Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262:120055.
- [3] GUO X L, XIONG G Y. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269:121326.
- [4] 王振山,李浩炜,吴波,等.玄武岩纤维混凝土的耐碱腐蚀性

- 及力学性能试验研究[J].应用力学学报, 2019, 36(5): 1088-1095, 1258-1259.
- WANG Zhenshan, LI Haowei, WU Bo, et al. Experimental research on durability and mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete in sodium hydroxide environment[J]. Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(5):1088-1095, 1258-1259.(in Chinese)
- [5] GUO L, WU Y Y, XU F, et al. Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites[J]. Composites Part B, 2020, 183:107689.
- [6] 王力,徐礼华,邓方茜,等.波纹型钢纤维-混杂纤维混凝土界面黏结性能[J].建筑材料学报, 2020, 23(4):865-874.
- WANG Li, XU Lihua, DENG Fangqian, et al. Interfacial bonding performance between corrugated steel fiber and hybrid fiber concrete matrix[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):865-874.(in Chinese)
- [7] YOUSUF M, AIB, AVCI E. A modified GM(1,1) model to accurately predict wind speed [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 43:100905.
- [8] WANG Q S, YI Y, MA G W, et al. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97:357-368.
- [9] CHENG H B, LIU T J, ZOU D J, et al. Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123550.
- [10] 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 Chenggong. 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)
- [11] JIA Z Q, ZHOU Z F, ZHANG H J, et al. Forecast of coal consumption in Gansu province based on Grey-Markov chain model[J]. Energy, 2020, 199:117444.

(上接第909页)

- [20] MONTERRO P, RASHED A I, BASTACKY J, et al. Ice in cement paste as analyzed in the low-temperature scanning electron microscope[J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19(2): 306-314.
- [21] USHEROV-MARSHAK A V, ZLATKOVSKI O A. Relationship between the structure of cement stone and the parameters of ice formation during stone freezing[J]. Colloid Journal, 2002, 64(2):217-223.
- [22] WANG K J, MONTEIRO P, RUBINSKY B, et al. Microscopic study of ice propagation in concrete[J]. Aci Materials Journal, 1997, 93(4):370-377.
- [23] MONTEIRO P J, RASHED A L, BASTACKY J, et al. Ice in cement paste as analyzed in the low-temperature scanning electron microscope[J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19(2): 306-314.
- [24] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料UHPC的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(12): 86-97.
- SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Changyu, et al. The basic mechanical properties and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(12):86-97. (in Chinese)
- [25] LEE G C, SHIH T S, CHANG K C. Mechanical properties of concrete at low temperature [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1988, 2(1):13-24.
- [26] YAMANA S, KASAMI H, OKUNO T. Properties of concrete at very low temperatures[J]. Aci Special Publication, 1978, 55: 1-12.
- [27] GUINEA G V, PASTOR J Y, PLANAS J, et al. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point-bend beam [J]. International Journal of Fracture, 1998, 89(2):103-116.