

文章编号:1673-2049(2014)01-0063-05

基于灰色理论的 PVA-FRCC 抗盐冻性能分析

刘曙光¹, 王志伟¹, 闫长旺¹, 张 菊¹, 闫 敏²

(1. 内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 鄂尔多斯市建设工程质量监督站, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:运用灰色系统预测理论,在试验数据基础上对聚乙烯醇纤维水泥基复合材料(PVA-FRCC)盐冻性能进行预测,得到了预测模型,并对模型进行检验。结果表明:灰色系统预测理论应用于 PVA-FRCC 盐冻环境下抗盐冻性能的预测具有较高精度和可靠性;在基体中掺入一定量的 PVA 纤维能够提高抗盐冻性能,PVA 纤维的掺入改善了材料的抗盐冻剥蚀能力和阻裂能力。

关键词:PVA-FRCC; 灰色理论; 相对动弹性模量; 盐冻循环; GM(1,1)模型

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

Salt Frozen Resistance Performance Analysis of PVA-FRCC Based on Grey Theory

LIU Shu-guang¹, WANG Zhi-wei¹, YAN Chang-wang¹, ZHANG Ju¹, YAN Min²

(1. School of Mining and Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Construction Quality Monitoring Station of Ordos, Ordos 017000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The salt frozen resistance performance of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites (PVA-FRCC) was predicted based on the test data using gray system prediction theory, and the prediction model was got and the model was tested. The results show that the gray system prediction theory is accurate and reliable on predicting the salt frozen resistance of PVA-FRCC. The salt frozen resistance performance of PVA-FRCC can be improved through blending certain amount of PVA-FRCC, and the salt frozen corrode resistance performance and crack resistance performance of the material can be improved.

Key words: PVA-FRCC; grey theory; relative dynamic elastic modulus; salt frozen cycle; GM(1,1) model

0 引言

冻融、盐侵蚀等是导致混凝土及其他水泥基材料和结构性能退化、服役寿命缩短的重要影响因素^[1-2]。近年来,各国学者非常关注混凝土在化学腐蚀和冻融循环共同作用下的耐久性问题^[3-5],改善混凝土的抗盐冻性能对提高其耐久性意义重大。聚乙

烯醇纤维水泥基复合材料(PVA-FRCC)因具有强度高、韧性好、良好耐久性能等优点,受到了广大学者和研究人员的重视。笔者采用日本开发的 K-II 型 PVA 纤维进行了表面涂油处理,该型号 PVA 纤维具有分散性较好的特点,受到国外学者高度重视^[6-7]。本文中以快速冻融法研究了盐冻环境下 PVA-FRCC 的抗盐冻性能,试验结果表明,一定纤

收稿日期:2013-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51368041,50968011,51168033);内蒙古自治区自然科学基金项目(2012MS0706,2013MS0709);内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY12058);内蒙古工业大学科学研究基金项目(ZS201137)

作者简介:刘曙光(1960-),男,内蒙古赤峰人,教授,博士研究生导师,工学硕士,E-mail:liusg6011@126.com。

维掺量的 PVA-FRCC 具有普通混凝土难以达到的良好抗盐冻性能^[8]。

灰色系统理论是一种研究某些既含有已知信息又含有未知信息的系统理论和方法,其突破经典数学的限制,将一切随机变量视为在一定范围内变化的灰色量。灰色系统理论自创立以来,广泛应用于社会、经济、工业、农业、生态等各个领域^[9-11]。本文中运用灰色系统预测理论,在试验数据基础上对 PVA-FRCC 盐冻性能进行预测,得到预测模型,并对模型进行检验,结果表明,灰色系统预测理论应用于 PVA-FRCC 盐冻环境下抗盐冻性能的预测具有较高的精度和可靠性。

1 灰色 GM(1,1)模型

建立 GM(1,1)模型,将一些随机上下波动的时间序列离散数据通过累加生成方法建立具有微分、差分近似规律的兼容方程。灰色预测通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度,对原始数据进行生成处理,形成有较强规律性的数据序列以探寻系统的变化规律。

GM(1,1)模型是生成数列的模型,给定序列为

$$x^{(0)}(k) = (x^{(0)}(0), x^{(0)}(1), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (1)$$

式中: $x^{(0)}$ 为在盐冻环境下某一掺量的 PVA-FRCC 经过 0~300 次(试验中以 25 次为 1 个循环)冻融循环后材料的相对动弹性模量。

设 $x^{(1)}(k)$ 为采用一次累加生成算法将原始数据序列进行处理生成的一阶累加生成序列, $x^{(1)}(k)$ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} x^{(1)}(k) &= (x^{(1)}(0), x^{(1)}(1), \dots, x^{(1)}(n)) \\ x^{(1)}(k) &= \sum_{i=1}^k (x^{(0)}(i)) \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

累加生成的试验变量 $x^{(1)}(k)$ 对时间 t 求导数,得 GM(1,1)的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \quad (3)$$

则微分方程矩阵表达式可写为

$$x^{(0)}(k) + \frac{1}{2}a[x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)] = u \quad (4)$$

式中: a 为灰色发展系数; u 为灰色作用量; a, u 均由已知序列确定,按最小二乘法求解。

$$a = (a, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_N = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) - x^{(1)}(1) \\ x^{(1)}(3) - x^{(1)}(2) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) - x^{(1)}(n-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

原微分方程变为 $\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u$ 。将

式(1)与式(2)代入式(3),求解得到盐冻环境下 PVA-FRCC 抗盐冻性能随时间的相应函数,即

$$x^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

式中: k 为正整数;当 $a < 0.3$ 时,模拟精度在 98% 以上。

通过精度检验的式(7)便可作为某一纤维体积掺量 PVA-FRCC 盐冻环境下抗盐冻性能预测的数学模型。

2 应用实例

2.1 试验材料及配合比

PVA 纤维选用日本 Kuraray 公司生产的 K-II 可乐丽纤维,其基本特性如表 1 所示;水泥选用冀东牌 P. O 42.5R 级普通硅酸盐水泥,其化学成分如表 2 所示,物理力学性能如表 3 所示。石英砂选用 40~70 目坚硬、耐磨、化学性能稳定的优质硅砂(主要成分 SiO_2);减水剂选用大连西卡建筑材料有限公司生产的高效减水剂;粉煤灰选用内蒙古呼和浩特市电厂生产的一级粉煤灰;硅粉选用挪威挨肯微硅粉,灰白色粉末,具有较大的比表面积;增稠剂选用羟丙基甲基纤维素(HPMC),白色粉末物或颗粒物,具有增稠能力,且具有排盐性、pH 稳定性、保水性等特点。本试验采用水胶比为 0.45,试验配合比如表 4 所示。

2.2 盐冻试验方法

盐冻试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中抗冻性能

表 1 PVA 纤维的基本特性

Tab. 1 Basic Properties of PVA Fiber

型号	密度/(g·cm ⁻³)	直径/mm	长度/mm	长径比	细度(70 mm 筛余)/%	延伸率/%	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
K-II 可乐丽	1.3	0.04	12	300	15	6	1 600	40

表 2 水泥的化学成分

Tab. 2 Chemical Components of Cement								%
胶凝材料	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SO ₃)	w(MgO)	w(I. L)	
水泥熟料	55. 01	23. 44	7. 19	2. 96	2. 87	2. 24	2. 86	

注:w(·)为各化学成分质量分数;w(I. L)为烧失量的质量分数。

表 3 水泥的物理力学性能

Tab. 3 Physical and Mechanical Properties of Cement								
比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
345	155	210	26. 5	35. 7	52. 1	4. 0	5. 3	7. 9

表 4 试验配合比

Tab. 4 Test Mix Proportions						
试件 编号	水泥	水	石英砂	减水剂 掺量/%	增稠剂 掺量/%	纤维体 积率/%
F-1	1	0. 45	0. 6	2	0. 05	1. 0
F-1. 5	1	0. 45	0. 6	2	0. 05	1. 5
F-2	1	0. 45	0. 6	2	0. 05	2. 0

注:减水剂掺量和增稠剂掺量均为质量分数。

试验的快速冻融法进行,试验仪器采用 TDR 型混凝土快速冻融机,试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体,试件共 3 组,每组 3 个;试件成

表 5 不同冻融循环次数下的相对动弹性模量试验值

Tab. 5 Test values of Relative Dynamic Elastic Moduli in Different Salt Frozen Cycle Times														
试件 编号	累加 序列	不同冻融循环次数下的相对动弹性模量/%												
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
F-1	$x_1^{(0)}$	100.00	100.63	98.21	94.02	77.06	75.03	68.60	67.21	65.04	63.01	58.10	56.12	52.10
F-1.5	$x_2^{(0)}$	100.00	99.10	97.12	93.20	85.20	80.03	73.50	70.80	69.85	68.00	66.04	58.04	56.20
F-2	$x_3^{(0)}$	100.00	98.13	93.04	85.32	74.60	72.20	65.54	64.12	62.00	57.30	55.10	49.70	44.90

表 6 一次 GAO 累加序列

Tab. 6 1-GAO Sequences														
试件 编号	累加 序列	不同冻融循环次数下的相对动弹性模量/%												
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
F-1	$x_1^{(1)}$	100.00	200.63	298.84	392.86	469.92	544.95	613.55	680.76	745.80	808.81	866.91	923.03	975.13
F-1.5	$x_2^{(1)}$	100.00	199.10	296.22	389.42	474.62	554.65	628.15	698.95	768.80	836.80	902.84	960.88	1 017.08
F-2	$x_3^{(1)}$	100.00	198.13	291.17	376.49	451.09	523.29	588.83	652.95	714.95	772.25	827.35	877.05	921.95

表 7 a, u 值

Tab. 7 Values of a and u			
参数	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	$x_3^{(1)}$
a	0. 062 6	0. 053 6	0. 070 2
u	109. 86	108. 18	106. 99

GM(1,1)的时间响应式(7)经累减还原为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=(1-e^a)[x^{(0)}(1)-\frac{u}{a}]e^{-ak} \quad (8)$$

式中: $\hat{x}^{(0)}$ 为弹性模量预测值。

代入 a 值与 u 值的时间响应式(8)为各纤维掺量 PVA-FRCC 盐冻剩余相对动弹性模量与时间

型之后放入标准养护室中养护 28 d,然后将试件放入体积分数为 3. 5%的 NaCl 溶液浸泡,溶液漫过试件顶面 3 cm,浸泡 4 d 后进行冻融试验。试验采用定水灰比,以不同纤维体积掺量条件下的试件动弹性模量(用 DT-12 动弹性模量仪测得)相对损失量为基本参数,以冻融循环前后相对动弹性模量表征 PVA-FRCC 的盐冻破坏。根据规范中规定,当试件的动弹性模量下降到 60%时,认定试件已经发生冻融破坏。不同冻融循环次数下的相对动弹性模量试验值如表 5 所示。

3 检验与分析

根据原序列做一次 GAO 累加,得到一次累加序列 $x_i^{(1)}(i=1,2,3)$,如表 6 所示。由最小二乘法经过计算可得 a, u 的值,结果如表 7 所示。

函数。

表 8 中给出了基于灰色理论的 GM(1,1)模型的相对动弹性模量预测值与试验值的对比。从表 8 可以看出,试件 F-1 的最大相对误差为 8. 04%,相对误差均值为 3. 42%;试件 F-1. 5 的最大相对误差为 6. 33%,相对误差均值为 2. 51%;试件 F-2 的最大相对误差为 6. 85%,相对误差均值为 2. 87%;各试件相对误差均值均小于 5%,经过以上检验可见,用 GM(1,1)模型预测 PVA-FRCC 盐冻性能是可行的,且具有较高的精度。

图 1~3 中分别给出了试件 F-1, F-1. 5, F-2 相

表 8 相对动弹性模量预测值与试验值的对比

Tab. 8 Comparisons of Predicted Values and Test Values of Relative Dynamic Elastic Moduli

试件 编号	比较项	不同冻融循环次数下的相对动弹性模量/%												
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
F-1	预测值	100.00	100.48	94.37	88.64	83.26	78.21	73.47	69.01	64.82	60.89	57.19	53.73	50.46
	试验值	100.00	100.63	98.21	94.02	77.06	75.03	68.60	67.21	65.04	63.01	58.10	56.12	52.10
	相对误差	0.00	0.16	3.91	5.72	8.04	4.24	7.10	2.68	0.34	3.36	1.56	4.26	3.14
F-1.5	预测值	100.00	100.12	94.90	89.96	85.26	76.62	77.12	72.62	68.84	65.26	61.86	58.64	55.57
	试验值	100.00	99.10	97.12	93.20	85.20	80.03	73.50	70.80	69.85	68.00	66.04	58.04	56.20
	相对误差	0.00	1.03	2.29	3.48	0.08	4.26	4.93	2.58	1.44	4.03	6.33	1.03	1.11
F-2	预测值	100.00	96.54	89.99	83.89	78.21	72.91	67.97	63.36	59.06	55.05	51.32	47.76	44.61
	试验值	100.00	98.13	93.04	85.32	74.60	72.20	65.54	64.12	62.00	57.30	55.10	49.70	44.90
	相对误差	0.00	1.62	3.27	1.67	4.84	0.98	3.70	1.19	4.74	3.92	6.85	3.90	0.63

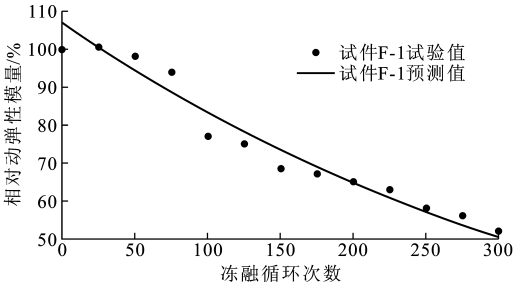


图 1 试件 F-1 相对动弹性模量试验值与预测值对比

Fig. 1 Comparison of Test Values and Predicted Values of Relative Dynamic Elastic Moduli for Specimen F-1

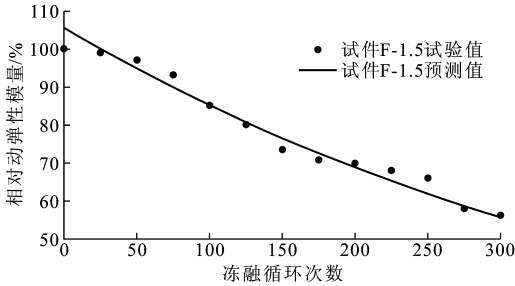


图 2 试件 F-1.5 相对动弹性模量试验值与预测值对比

Fig. 2 Comparison of Test Values and Predicted Values of Relative Dynamic Elastic Moduli for Specimen F-1.5

对动弹性模量试验值与预测值对比。从图 1~3 可以看出,3 种配合比试件的预测曲线变化趋势大体一致。从试件的抗盐冻衰减趋势来看,试件 F-1.5 的抗盐冻性能在三者中最佳,其经过约 264 次冻融循环后破坏;试件 F-1,F-2 分别经过 231,194 次冻融循环后破坏。基于试验值与预测值观察,PVA 纤维掺量为 1.5%的试件 F-1.5 抗盐冻性能较其他掺量的好,其可能原因有 2 种:①向水泥基体中掺入一定量的 PVA 纤维能够改善 PVA-FRCC 盐冻后的抗剥蚀能力,从而提高抗盐冻性能;②纤维有阻裂作

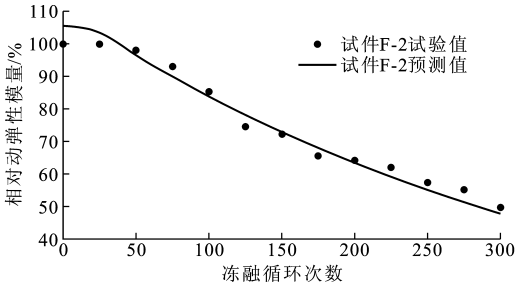


图 3 试件 F-2 相对动弹性模量试验值与预测值对比

Fig. 3 Comparison of Test Values and Predicted Values of Relative Dynamic Elastic Moduli for Specimen F-2

用,加之 PVA 纤维与水泥界面结合较好,分散均匀,这都使得 PVA-FRCC 经盐冻后的裂缝数量、裂缝长度、裂缝宽度不同程度受到抑制,降低了裂缝贯通,进而导致破坏的可能性,从而提高抗盐冻性能。

为了便于计算,本文中的冻融循环次数 0~300 次在函数中对应取为正整数 k 。若预测 0~300 次及 300 次以上某次冻融循环后 PVA-FRCC 盐冻损伤程度,可按上述比例对 k 进行插值,然后计算其冻融后的相对动弹性模量。PVA-FRCC 抗冻性能可参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中有关冻融破坏标准确定其损伤程度,具体损伤程度本文中不再赘述。

4 结 语

(1)基于灰色理论的 GM(1,1)模型用于预测 PVA-FRCC 抗盐冻性能是可行的,且各试件在各冻融循环下试验值与预测值的相对误差均值均小于 5%,具有较高的精度,这种方法为定量研究包括抗盐冻性能在内的复杂环境下 PVA-FRCC 的耐久性能提供了一种有效的方法。

(2)在基体中掺入一定量的 PVA 纤维能够提

高PVA-FRCC的抗盐冻性能,PVA纤维的掺入改善了PVA-FRCC的抗盐冻剥蚀能力与阻裂能力。

参考文献:

References:

- [1] 祝金鹏,李术才,刘宪波,等.冻融环境下混凝土力学性能退化模型[J].建筑科学与工程学报,2009,26(1):62-67.
ZHU Jin-peng, LI Shu-cai, LIU Xian-bo, et al. Mechanical Property Deterioration Model for Concrete in Environment with Freezing-thawing [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(1): 62-67.
- [2] 余红发,慕儒,孙伟,等.弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及其复合对混凝土抗冻性的影响[J].硅酸盐学报,2005,33(4):492-499.
YU Hong-fa, MU Ru, SUN Wei, et al. Effects of Flexural Loads, Chemical Attack, Carbonation and Their Combination on Freezing-thawing Durability of Concretes[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(4): 492-499.
- [3] WU R, MIAO C W, LIU J P. Properties of Concrete Subjected to Freezing and Thawing Under Sulphate Attack[J]. Indian Concrete Journal, 2001, 75(7): 451-455.
- [4] 叶英华,马彬,孙洋.盐冻损伤钢筋混凝土纯弯构件截面非线性分析[J].交通运输工程学报,2009,9(6):16-20,25.
YE Ying-hua, MA Bin, SUN Yang. Section Nonlinear Analysis of Salt-freezing Reinforced Concrete Pure Bending Component Based on Damage Theory [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 16-20, 25.
- [5] 张云清,余红发,王甲春.盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究[J].中国公路学报,2009,22(4):57-63.
ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of Surface Damage Rule of Concrete Structure Exposed to Salt Freezing Condition[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 57-63.
- [6] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J].硅酸盐学报,2007,35(4):531-536.
LI V C. Progress and Application of Engineering Cementitious Composite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531-536.
- [7] SAHMARAN M, LI V C. Durability Properties of Micro-cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11):1033-1043.
- [8] 刘曙光,闫敏,闫长旺,等.聚乙烯醇纤维强化水泥基复合材料的抗盐冻性能[J].吉林大学学报:工学版,2012,42(1):63-67.
LIU Shu-guang, YAN Min, YAN Chang-wang, et al. Deicing Salt Resistance of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composite[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(1): 63-67.
- [9] 李悦,王敏,隋晓明,等.基于GM(1,1)对橡胶混凝土干缩的灰色预测[J].建筑材料学报,2008,11(6):653-656.
LI Yue, WANG Min, SUI Xiao-ming, et al. Grey Prediction of Drying Shrinkage of Crumb Rubber Concrete Based on GM(1,1)[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 653-656.
- [10] 张英姿,范颖芳,赵颖华.受盐酸腐蚀混凝土抗压强度的灰色预测模型[J].建筑材料学报,2007,10(4):397-401.
ZHANG Ying-zi, FAN Ying-fang, ZHAO Ying-hua. Grey Prediction Model for Compressive Strength of Concrete Corroded by Hydrochloric Acid[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4): 397-401.
- [11] 赵志明.南昆铁路某滑坡变形的灰色预测[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(4):22-24.
ZHAO Zhi-ming. Grey Prediction on Deformation of the Slide Slope in Nan Kun Railway[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(4): 22-24.

