

基于 GM(1,1)模型的混凝土碳化寿命预测

叶 永^{1,2}, 宋 航¹, 卢 强¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:碳化是影响混凝土结构耐久性的一个重要因素。利用灰色理论中 GM(1,1)模型,以碳化深度为特征序列,进行老信息、新信息及新陈代谢3种不同模型模拟分析。选择相对平均误差最小的新陈代谢模型预测混凝土碳化寿命。分析表明,该模型原理简单实用,预测精度高,能够反映一般大气环境下混凝土碳化发展规律,可为实际工程混凝土结构耐久性分析提供有效方法。

关键词:碳化; GM(1,1)模型; 特征序列; 混凝土

中图法分类号: TV431

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.018

混凝土碳化是导致内部钢筋锈蚀的主要起因之一,直接影响结构耐久性。当混凝土内部 pH 值降至 9.5 左右时,钢筋表面的钝化膜将会遭到破坏,在氧气和水作用下,钢筋产生锈蚀且体积膨胀,进而引起混凝土开裂、剥落,严重影响结构的安全性与适用性^[1]。因此,展开对混凝土碳化深度的预测,对了解钢筋锈蚀程度和结构耐久性有重要意义。

国内外对混凝土碳化机理和影响因素已经有了较深刻的认识,碳化深度与碳化时间平方根成正比的规律已经得到大家公认^[2]。目前,混凝土结构碳化寿命基本上是以碳化深度达到钢筋表面的时间作为结构寿命终结的标志。为此,前苏联学者阿列克谢耶夫等人基于 Fick 第一扩散定律及 CO₂ 多孔介质中扩散和吸收特点建立了相关数学预测模型^[3],张誉等也给出了考虑多因素的碳化寿命预测模型^[4]。但这些模型参数不易确定,不利于工程实际应用。

本文选取相同外界环境、不同水灰比、不同水泥用量和无任何外加剂掺量情况下的试验数据^[5],以其中 3 组数据构成训练集,以碳化时间为因素序列、碳化深度为特征序列建立 GM(1,1)模型群,对混凝土的碳化过程进行了老信息、新信息及新陈代谢 3 种不同模型的模拟分析,评价模型的适用性,并利用最优模型进行

混凝土碳化寿命预测,方法简便而实用。

1 GM(1,1)模型

1.1 模型介绍

GM(1,1)模型是灰色理论中最基础的预测模型,模型中(1,1)分别指 1 阶方程和 1 个变量^[6-7]。首先建立一阶 GM(1,1)模型,对有限数据进行拟合,得到反应数据变化关系模型,利用模型可预测后续数据。模型优势在于它需要的实验数据量不大,也不需要满足典型的概率分布,是一个动态灰色微分方程,可以加入新信息取代旧信息,模型的预测精度较高。

GM(1,1)模型的基本方程为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (1)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (2)$$

式中, a 为发展系数; b 为灰色作用量。

1.2 建模过程

(1) 研究特征序列,对特征序列进行一次累加生成 1-AGO 序列 $X^{(1)}$ 。

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (3)$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (4)$$

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (5)$$

(2) 对特征序列 $X^{(0)}$ 进行光滑性检查,并且判断 $1 - AGO$ 序列 $X^{(1)}$ 是否具有准指数规律。条件满足,则可以对 $X^{(1)}$ 建立 GM(1,1)模型。

(3) 对 $X^{(1)}$ 作紧邻均值生成得到 $Z^{(1)}$ 。

$$Z^{(1)} = [z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)] \quad (6)$$

(4) 对参数列 $\hat{a} = [a, b]^T$ 进行最小二乘估计。

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

(5) 确定模型,建立白化方程,其时间响应函数为

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

$$\hat{X}^{(1)} = [\hat{x}^{(1)}(1), \hat{x}^{(1)}(2), \dots, \hat{x}^{(1)}(n)] \quad (9)$$

(6) 还原求出特征序列 $X^{(0)}$ 的模拟值 $\hat{X}^{(0)}$ 。

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (10)$$

$$\hat{X}^{(0)} = [\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)] \quad (11)$$

(7) 检验误差,将模拟值 $\hat{X}^{(0)}$ 与真实值 $X^{(0)}$ 比较,计算两者的相对误差,确定精度是否满足要求;如果精度超出可接受的范围,就应当对模型进行残差修正,提高 GM(1,1)模型的精度。

(8) 利用已建的 GM(1,1)模型计算得出所需要的预测值。

1.3 三类 GM(1,1) 模型

一般情况下,在建模过程中选取的数据不同,模型的参数值就不一样,模型的精度也会存在差异。本文选取老信息、新信息及新陈代谢 3 类不同 GM(1,1)模型对混凝土碳化深度进行模拟,并将 3 类模型的精度进行分析对比,评价出最优模型。

实测数据碳化序列为

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6)] \quad (12)$$

其中,令 $x^{(0)}(6)$ 为最新信息。

利用实测碳化序列前 5 个数据建立老信息 GM(1,1)模型为

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5)] \quad (13)$$

在老信息模型序列的基础上置入新信息 $x^{(0)}(6)$,建立新信息 GM(1,1)模型为

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6)] \quad (14)$$

在新信息模型序列的基础上去掉最老信息 $x^{(0)}(1)$,建立新陈代谢 GM(1,1)模型为

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6)] \quad (15)$$

2 模型对比

2.1 实验

参照文献[5],在相同外界环境下进行了不同水灰比、不同水泥用量和无任何外加剂掺加条件下混凝土碳化深度试验。本文选取水灰比为 0.4、0.5、0.65,相应的水泥用量分别为 400、325 kg/m³ 和 250 kg/m³ 三组代表性的数据构成训练集,如表 1 所示。

表 1 实测碳化深度试验数据 mm

暴露 时间/a	实测碳化深度/mm			暴露 时间/a	实测碳化深度/mm		
	第一组	第二组	第三组		第一组	第二组	第三组
5	3.06	6.47	13.61	20	6.11	12.95	27.21
10	4.32	9.15	19.24	25	6.84	14.47	30.44
15	5.29	11.21	23.57	30	7.83	15.86	33.32

2.2 碳化深度对比

利用上节建模方法,以表 1 中的实测碳化深度试验数据为基础进行碳化计算,得到 3 组试验数据的预测碳化深度样本值,并与试验结果进行比较,结果见表 2。

由表 2 可知,3 种模型得到的碳化深度模拟值精度均较高,相对误差都在 10% 的允许范围内,具有适用性。通过比较相对平均误差值可知:新陈代谢模型精度高于新信息模型,新信息模型精度又高于老信息模型,尤其是对最新信息 $x^{(0)}(6)$ 的模拟(每组数据最后一行)。同时,根据 3 种模型的预测值与实测值对比(见图 1)可以看出:新陈代谢模型预测曲线与实测曲线最为接近,优于新信息模型和老信息模型,这与表 2 得到的结论一致。当水灰比分别为 0.5 和 0.65 时,试验结果表明,3 种模型预测值与上述结论一致。

3 碳化寿命预测

3.1 新陈代谢模型参数

选择新陈代谢模型进行混凝土碳化深度预测,对上述 3 组试验数据进行模拟,得到模型参数见表 3。

新陈代谢模型的时间响应序列还原式为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^{-a})[\hat{x}^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} \quad (16)$$

式中, $-a$ 均小于 0.3,且具有好的模型精度和适用性。这与文献[6]经过大量的实例和分析研究得到的结论一致,当 $-a$ 不大于 0.3 时,GM(1,1)模型可以用于中长期碳化深度预测。

3.2 预测结果

以混凝土保护层厚度 35 mm 为例,利用新陈代谢模型预测 3 种不同水灰比条件下混凝土碳化寿命,结

表 2 3 种模型预测碳化深度与实测值对比

试验数据	暴露时间/a	$X^{(0)}$ 实验值/mm	老信息模型			新信息模型			新陈代谢模型		
			$\hat{X}^{(0)}$ 预测/mm	相对误差/%	平均误差/%	$\hat{X}^{(0)}$ 预测/mm	相对误差/%	平均误差/%	$\hat{X}^{(0)}$ 预测/mm	相对误差/%	平均误差/%
第一组	10	4.32	4.458	3.20	2.272	4.498	4.13	1.912			0.563
	15	5.29	5.162	2.42		5.174	2.18				
	20	6.11	5.978	2.16		5.952	2.59		5.312	0.41	
	25	6.84	6.922	1.20		6.846	0.09		6.039	1.16	
	30	7.83	8.016	2.38		7.874	0.57		6.867	0.39	
第二组	10	9.15	9.436	3.13	3.234	9.671	5.69	2.948	7.807	0.29	1.33
	15	11.21	10.927	2.53		10.999	1.88				
	20	12.95	12.652	2.30		12.510	3.40		11.400	1.70	
	25	14.47	14.650	1.25		14.228	1.67		12.760	1.46	
	30	15.86	16.964	6.96		16.183	2.10		14.282	1.30	
第三组	10	19.24	19.863	3.24	3.228	20.460	6.34	2.848	15.986	0.86	1.33
	15	23.57	22.994	2.45		23.266	1.29				
	20	27.21	26.617	2.18		26.458	2.76		23.970	1.70	
	25	30.44	30.813	1.22		30.088	1.16		26.826	1.41	
	30	33.32	35.669	7.05		34.216	2.69		30.021	1.38	
									33.597	0.83	

果如表 4 所示。

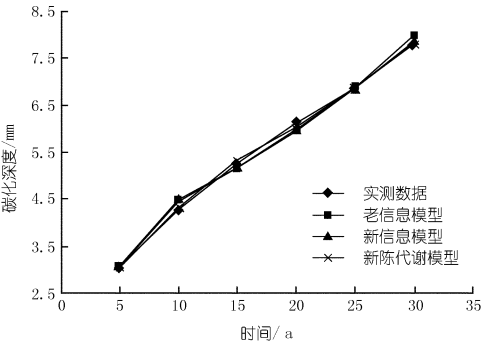


图 1 水灰比为 0.4 时 3 种模型碳化数据预测曲线

表 3 新陈代谢模型参数

参数	第一组	第二组	第三组
$-a$	0.128381	0.112693	0.112540
b	4.423441	9.738954	20.481463

表 4 碳化寿命预测

水灰比	水泥用量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	白化方程的模拟解 $\hat{x}^{(0)}(k)$	预测碳化 寿命/a
0.40	400	$\hat{x}^{(0)}(k+1) = 4.671759e^{0.128381k}$	88.4
0.50	325	$\hat{x}^{(0)}(k+1) = 10.185396e^{0.112693k}$	64.7
0.65	250	$\hat{x}^{(0)}(k+1) = 21.41881e^{0.11254k}$	31.8

注： k 为碳化时间，以 5 a 为单位；同时 k 又是 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 的序列号。

由表 4 可知，当水灰比分别为 0.50 和 0.65 时，预测的碳化寿命与文献[9]中预测数据大致相当。同时，水灰比越大其碳化寿命越短，符合混凝土碳化规律，这与文献[5]中所研究的水灰比对碳化程度影响结论一致。进一步说明在混凝土构件中，水灰比对碳化的影响很大，在实际施工过程中要注意控制水灰比，以提高混凝土的耐久性。

文中试验数据是在不同水灰比、不同水泥用量和

无任何外加剂掺加条件下得到的，通过建立 GM(1,1) 模型对混凝土碳化寿命进行了预测。实际工程混凝土中会掺有外加剂或其他掺和料等，只要采集的试验数据序列满足光滑性且其序列具有准指数规律，也可在本文提出的 GM(1,1) 模型基础上，进一步进行残差修正，即可达到实际工程容许范围。

4 结 语

分析表明，利用 3 种 GM(1,1) 模型对混凝土碳化寿命进行中长期预测具有可行性和适应性，基本能够反映一般大气环境下混凝土碳化发展规律，具有一定现实意义。新陈代谢模型是最优预测模型，事实上，在系统的发展过程中，不断会有一些新因素进入系统，将不可避免影响系统发展，越是远离时间点，预测精度就越小。在实际应用中，应及时补充新信息，去掉老信息，不断进行新陈代谢，使建模序列更能反映系统目前特征。

本文建立的碳化寿命预测模型仅考虑了时间因素影响，多因素耦合作用下混凝土碳化寿命预测模型有待进一步研究。

参考文献：

[1] 袁群,赵国藩.混凝土碳化深度随机时间序列预报模型[J].大连理工大学学报,2000,40(3):344-347.
[2] 李润记,刁波.混凝土结构碳化寿命预测模型分析[J].混凝土,2009,(2):4-7.
[3] 阿列克谢耶夫著,黄可信译.钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
[4] 张誉,蒋利学.基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J].工业建筑,1998,28(1):16-19.

项目风险大小的情况下,结合 AHP 以及 ABC 分析法,分析确定采购项目的主要风险。通过算例分析验证了该方法的可行性,为项目采购风险管理提供了依据。

参考文献:

[1] 刘东海,宋洪兰.水电工程 EPC 项目总承包商风险分析与综合评价[J].水科学与工程技术,2010,(1):74-76.
[2] 张苗苗,张水波,王越.国际 EPC/交钥匙工程项目的采购管理[J].国际经济合作,2008,(12):54-59.
[3] 古海林.采购风险成因及其防范险[J].中国物流与采购,2002,(22):40-41.
[4] 苏志娟,杨正,时舰.国际 EPC 工程物资采购风险分析及应对[J].国际经济合作,2010,(5):48-52.
[5] 赵保强,郭晨,叶卫群.我国工程总承包项目的采购风险预警研究

[J].项目管理技术,2010,(4):85-88.
[6] 姜南,吴群.制造企业供应链采购风险的度量方法[J].统计与决策,2012,(11):175-177.
[7] 袁晓波,吴文峰.基于层次分析法的中亚石油工程 EPC 项目采购风险管理[J].国际石油经济,2012,(12):49-52,104.
[8] 舒欢,马玉国.基于 Vague 集的工程项目采购风险评价[J].项目管理技术,2013,11(1):57-62.
[9] 阮欣,尹志逸,陈艾荣.风险矩阵评估方法研究与工程应用综述[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(3):381-385.
[10] 陈健,李忠民,汤淑春,等.基于改进风险矩阵方法的武器装备采购风险评估[J].系统工程与电子技术,2008,30(10):1918-1923.

(编辑:邓玲)

Risk assessment for EPC procurement of hydropower projects

CHEN Zhiding, LIU Hao, XIAO Fang

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In EPC hydropower projects, the procurement has significant influence on the cost, construction quality and duration of the whole project. Combined with some relevant researches of EPC project procurement risk, the risk factors evaluation system of EPC procurement is established, and in the light of the impact degree and occurrence probability of the risks, the risk matrix is built. Then, for deriving the comprehensive level of procurement risk, the risk weights are calculated by using AHP method. The main influential factors of the procurement risk corresponding to different risk degree are determined by introducing the cumulative contribution rate of the risk. The feasibility of the method is verified by an engineering example to offer the guidance and reference for the risk management of EPC projects.

Key words: EPC procurement risk; risk assessment; risk matrix; hydropower projects

(上接第 80 页)

[5] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学技术出版社,2002.
[6] 刘思峰,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学技术出版社,2010.
[7] 邓聚龙.灰色理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.

[8] 赵根田,解建喜.钢筋混凝土构件碳化规律研究[M].包头钢铁学院学报,2002,21(1):69-72.
[9] 华建兵.一般大气环境下钢筋混凝土构件耐久性灰色评估[D].泉州:华侨大学,2005.

(编辑:胡旭东)

Prediction of concrete carbonation life based on GM (1,1) model

YE Yong^{1,2}, SONG Hang¹, LU Qiang¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, China)

Abstract: Concrete carbonation is one of the important factors that affect the durability of concrete structures. According to the theory of grey GM (1,1) model, taking the carbonation depth as the feature sequence, three different models of old information, new information and metabolism information were analyzed and simulated. And then the metabolism model with the minimum relative mean error was selected to predict the concrete carbonation life. The analysis result shows that the model theory is simple and practical, and can reflect the law of concrete carbonation development under the general atmospheric environment with high prediction accuracy, which can provide an effective method for analyzing the durability of concrete structure in practical engineering.

Key words: carbonation; GM (1,1) model; feature sequence; concrete