

聚丙烯纤维混凝土强度冻融 损失率灰色关联分析

王金圳

(黎明职业大学 土木建筑工程学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 利用灰色系统理论的灰色关联分析, 在文献数据基础上, 对影响聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的 4 个主要参数(水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量)的关联度大小进行分析, 并利用灰色预测模型建立关于聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率 $GM(1, N)$ 方程. 结果表明: 对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率影响因素关系为水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量, 可利用灰色关联分析的方法有效预测聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率. 灰色预测模型 $GM(1, 5)$ 的冻融损失率的预测结果有较好精度.

关键词: 聚丙烯纤维混凝土; 强度冻融损失率; 灰色关联分析; 预测模型

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.017

Grey relational analysis on strength loss rate in freeze-thaw cycles of polypropylene fiber concrete

WANG Jin-zhen

(College of Civil and Architectural Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Using the grey relational analysis of grey system theory, the correlation of four main parameters of the effect strength loss rate of polypropylene fiber concrete on freeze-thaw cycles: water-cement ratio, volume fraction of fiber, fly ash content, and superplasticizer content was analyzed based on literature, and using the grey prediction model, the $GM(1, N)$ equation of the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles was established. The results showed that influencing factors of the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles were as follows: water-cement ratio > superplasticizer content > fly ash content > volume fraction of fiber. The results of grey forecasting model $GM(1, 5)$ showed good agreement with the experimental results. It was shown that could effectively predict the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles by using the method of grey relational analysis.

Key words: polypropylene fiber concrete; the strength loss rate in freeze-thaw cycles; grey relational analysis; prediction model

0 引言

寒冷地区,混凝土的冻融破坏是影响混凝土耐久性的主要因素之一,在普通混凝土中掺入聚丙烯纤维能有效改变混凝土的品质,提高混凝土抗冻性能.聚丙烯纤维作为混凝土的次要加强筋与混凝土的水泥基体有较好的握裹力,能够补偿由外界温差变化引起混凝土变形而产生的应力作用.由于聚丙烯纤维的优异性能,在工程上被广泛应用^[1].在国外,从1960年代就开始对聚丙烯纤维混凝土进行研究,并在军工工程、市政工程及高层建筑工程中大量应用.在国内,对聚丙烯纤维混凝土的研究起步较晚,目前的研究主要是针对其力学性能、物理性能及工作性能等方面^[2].部分学者对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损伤进行了试验研究^[1,3],也有学者采用正交设计,对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率进行了专门研究^[4].

本文将基于文献[4]的试验数据,采用灰色理论中GM模型预测,建立关于聚丙烯纤维混凝土水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量的GM(1,5)灰色模型,以期对聚丙烯纤维混凝土的合理配置提供参考.

1 灰色关联分析

灰色关联分析是系统因素作用大小分析的一种方法,能分析数据灰度较大的各系统因素.其基本思想是分析各序列曲线的几何形状,根据序列曲线的接近程度,来衡量它们之间的关联性大小:若两者之间同步变化较大,曲线较接近,关联系数较大;反之,关联系数较小^[5].

文献[4]采用正交设计进行实验,得出聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的影响因素大小为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量.本文基于文献[4]的实验数据,运用灰色关联分析进行关联度求解,选择以聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率为母序列,用 X_0 表示.以水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量为子序列,用 X_1, X_2, X_3, X_4 表示.灰色关联分析的步骤如下:

原始数据预处理 → 求差序列 → 取差值绝对值中的最大值和最小值 → 求母序列和子序列的关联性系数 → 求关联度

在求解关联系数时,应注意以下几点:

1) 在原始数据中,各指标数据量纲不同,数量级也悬殊,因此采用数据初值化变换,消除量纲,合并数量级,使其具有可比性.

2) 一般情况下分辨系数取值 $\xi = 0.5$.

关联系数的平均值即为关联度,通过求解,可得出聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率各影响因素的关联度为:0.827 2(水灰比)、0.597 1(纤维含量)、0.735 9(粉煤灰含量)、0.746 6(减水剂含量).因此,对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率的影响因素,用关联系数表示为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量.与文献[4]的试验结果比较一致,表明用灰色关联理论方法分析聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率是可行的.

2 建立灰色系统预测模型 GM(1, N)

灰色系统预测是在分析研究系统因子之间相互影响与协同作用的基础上,建立系统主行为特征量与关联因子的灰色动态模型群,然后通过求解进行预测.所采用的数学方法是建立状态方程并求解,即以数学的形式把系统的状态和它的历程及系统的输入联系起来,并突出系统内部变化特征.GM(1, N)是描述多变量一阶线性动态模型,可反映的是N个关联因素对其中某个因素变化率的影响,即其增量的动态关系^[6].

本文采用GM(1, 5)建立聚丙烯纤维混凝土冻融损失率与水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量的灰色模型,GM(1, 5)模型为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = b_2x_2^{(1)} + b_3x_3^{(1)} + b_4x_4^{(1)} + b_5x_5^{(1)}$$

模型参数求解如下:

1) 给出原始数据列为

$$X_5^{(0)} = \begin{bmatrix} X_1^{(0)}(1) & X_2^{(0)}(1) & X_3^{(0)}(1) & X_4^{(0)}(1) & X_5^{(0)}(1) \\ X_1^{(0)}(2) & X_2^{(0)}(2) & X_3^{(0)}(2) & X_4^{(0)}(2) & X_5^{(0)}(2) \\ X_1^{(0)}(3) & X_2^{(0)}(3) & X_3^{(0)}(3) & X_4^{(0)}(3) & X_5^{(0)}(3) \\ X_1^{(0)}(4) & X_2^{(0)}(4) & X_3^{(0)}(4) & X_4^{(0)}(4) & X_5^{(0)}(4) \\ X_1^{(0)}(5) & X_2^{(0)}(5) & X_3^{(0)}(5) & X_4^{(0)}(5) & X_5^{(0)}(5) \\ X_1^{(0)}(6) & X_2^{(0)}(6) & X_3^{(0)}(6) & X_4^{(0)}(6) & X_5^{(0)}(6) \\ X_1^{(0)}(7) & X_2^{(0)}(7) & X_3^{(0)}(7) & X_4^{(0)}(7) & X_5^{(0)}(7) \\ X_1^{(0)}(8) & X_2^{(0)}(8) & X_3^{(0)}(8) & X_4^{(0)}(8) & X_5^{(0)}(8) \\ X_1^{(0)}(9) & X_2^{(0)}(9) & X_3^{(0)}(9) & X_4^{(0)}(9) & X_5^{(0)}(9) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.069\ 93 & 0.37 & 0.6 & 0.20 & 0.002\ 0 \\ 0.069\ 72 & 0.40 & 0.6 & 0.10 & 0.001\ 5 \\ 0.067\ 59 & 0.45 & 0.6 & 0.15 & 0.002\ 5 \\ 0.069\ 82 & 0.37 & 0.9 & 0.15 & 0.001\ 5 \\ 0.069\ 65 & 0.40 & 0.9 & 0.20 & 0.002\ 5 \\ 0.055\ 85 & 0.45 & 0.9 & 0.10 & 0.002\ 0 \\ 0.069\ 25 & 0.37 & 1.2 & 0.10 & 0.002\ 5 \\ 0.069\ 06 & 0.40 & 1.2 & 0.15 & 0.002\ 0 \\ 0.068\ 01 & 0.45 & 1.2 & 0.20 & 0.001\ 5 \end{bmatrix}$$

2) 做一次累加(1-AGO)生成一阶累加序列,即

$$X_5^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.069\ 93 & 0.37 & 0.6 & 0.20 & 0.002\ 0 \\ 0.139\ 65 & 0.77 & 1.2 & 0.30 & 0.003\ 5 \\ 0.207\ 24 & 1.22 & 1.8 & 0.45 & 0.006\ 0 \\ 0.277\ 06 & 1.59 & 2.7 & 0.60 & 0.007\ 5 \\ 0.346\ 71 & 1.99 & 3.6 & 0.80 & 0.010\ 0 \\ 0.402\ 56 & 2.44 & 4.5 & 0.90 & 0.012\ 0 \\ 0.471\ 81 & 2.81 & 5.7 & 1.00 & 0.014\ 5 \\ 0.540\ 87 & 3.21 & 6.9 & 1.15 & 0.016\ 5 \\ 0.608\ 88 & 3.66 & 8.1 & 1.35 & 0.018\ 0 \end{bmatrix}$$

3) 求解模型参数构造系数矩阵

$X_1^{(1)}$ 的紧邻均值序列为

$$Z_1^{(1)} = [Z_1^{(1)}(2) \quad Z_1^{(1)}(3) \quad Z_1^{(1)}(4) \quad Z_1^{(1)}(5) \\ Z_1^{(1)}(6) \quad Z_1^{(1)}(7) \quad Z_1^{(1)}(8) \quad Z_1^{(1)}(9)] = \\ [0.104\ 8 \quad 0.174\ 3 \quad 0.242\ 2 \quad 0.311\ 9 \\ 0.374\ 6 \quad 0.437\ 2 \quad 0.506\ 3 \quad 0.574\ 9]$$

于是有

$$B = \begin{bmatrix} -Z_1^{(1)}(2) & X_2^{(1)}(2) & X_3^{(1)}(2) & X_4^{(1)}(2) & X_5^{(1)}(2) \\ -Z_1^{(1)}(3) & X_2^{(1)}(3) & X_3^{(1)}(3) & X_4^{(1)}(3) & X_5^{(1)}(3) \\ -Z_1^{(1)}(4) & X_2^{(1)}(4) & X_3^{(1)}(4) & X_4^{(1)}(4) & X_5^{(1)}(4) \\ -Z_1^{(1)}(5) & X_2^{(1)}(5) & X_3^{(1)}(5) & X_4^{(1)}(5) & X_5^{(1)}(5) \\ -Z_1^{(1)}(6) & X_2^{(1)}(6) & X_3^{(1)}(6) & X_4^{(1)}(6) & X_5^{(1)}(6) \\ -Z_1^{(1)}(7) & X_2^{(1)}(7) & X_3^{(1)}(7) & X_4^{(1)}(7) & X_5^{(1)}(7) \\ -Z_1^{(1)}(8) & X_2^{(1)}(8) & X_3^{(1)}(8) & X_4^{(1)}(8) & X_5^{(1)}(8) \\ -Z_1^{(1)}(9) & X_2^{(1)}(9) & X_3^{(1)}(9) & X_4^{(1)}(9) & X_5^{(1)}(9) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -0.104\ 8 & 0.770\ 0 & 1.200\ 0 & 0.300\ 0 & 0.003\ 5 \\ -0.173\ 4 & 1.220\ 0 & 1.800\ 0 & 0.450\ 0 & 0.006\ 0 \\ -0.242\ 2 & 1.590\ 0 & 2.700\ 0 & 0.600\ 0 & 0.007\ 5 \\ -0.311\ 9 & 1.990\ 0 & 3.600\ 0 & 0.800\ 0 & 0.010\ 0 \\ -0.374\ 6 & 2.440\ 0 & 4.500\ 0 & 0.900\ 0 & 0.012\ 0 \\ -0.437\ 2 & 2.810\ 0 & 5.700\ 0 & 1.000\ 0 & 0.014\ 5 \\ -0.506\ 3 & 3.210\ 0 & 6.900\ 0 & 1.150\ 0 & 0.016\ 5 \\ -0.574\ 9 & 3.660\ 0 & 8.100\ 0 & 1.350\ 0 & 0.018\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Y = [X_1^{(0)}(2) \quad X_1^{(0)}(3) \quad X_1^{(0)}(4) \quad X_1^{(0)}(5) \\ X_1^{(0)}(6) \quad X_1^{(0)}(7) \quad X_1^{(0)}(8) \quad X_1^{(0)}(9)] = \\ [0.069\ 72 \quad 0.067\ 59 \quad 0.069\ 82 \quad 0.069\ 65 \\ 0.558\ 50 \quad 0.692\ 50 \quad 0.069\ 06 \quad 0.068\ 01]$$

采用最小二乘法结合 Matlab 软件求解灰色系数

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} = B^T B^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} 2.650\ 1 \\ 0.231\ 0 \\ -0.001\ 9 \\ 0.340\ 0 \\ 16.719\ 6 \end{bmatrix}$$

4) 参数优化

把计算参数代入模型时间响应方程,考虑通过参数优化,使预测模型得到优化^[7],根据前面关联度分析得知,水灰比是影响聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率的最主要因素.现考虑能否通过调整水灰比参数使模型精度上升,记模型为^[8]

$$\hat{x}^{(1)}(a, u) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-au} + \frac{u}{a}$$

$$\text{则 } \frac{\partial \hat{x}^{(1)}(a, u)}{\partial u} = \frac{1}{a} (1 - e^{-au}) > 0.$$

上述公式中对所有的 $a (a \neq 0)$ 及任意的 $t (t > 0)$ 都成立,所以当 a, t 不变时, $\hat{x}^{(1)}$ 随 u 的增加而增加^[9].将原模型参数 u 增大,即其他参数不变调整参数 b_2 ,其模型值将增大,使得计算出的损伤率与试验数据更接近.经过调整最终 (a, b_2, b_3, b_4, b_5) 取值为 $(2.650\ 1, 0.242, -0.001\ 9, 0.343, 16.719\ 6)$,把模型参数带入方程,于是得估计模型为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + 2.650\ 1x_1^{(1)} = 0.242x_2^{(1)} -$$

$$0.001\ 9x_3^{(1)} + 0.34x_4^{(1)} + 16.719\ 6x_5^{(1)}$$

近似时间响应函数为

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (0.069\ 93 - 0.091\ 3x_2^{(1)} + \\ 0.000\ 7x_3^{(1)} - 0.128\ 3x_4^{(1)} - 6.309\ 0x_5^{(1)}) e^{-2.650\ 1k} + \\ 0.091\ 3x_2^{(1)} - 0.000\ 7x_3^{(1)} + 0.128\ 3x_4^{(1)} + 6.309\ 0x_5^{(1)}$$

损失率的计算值与试验值比对见表 1.

从表 1 可知,聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率 GM(1,5) 模型的预测值相对误差绝对值的平均值为 8.17%,由于个别试验数据离散性较大影响相对误差的大小,模型的预测精度为 II 级,能够满足预测要求.利用灰色系统理论建立的预测模型能简

便地预测水灰比、减水剂含量、粉煤灰含量、纤维含量对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的影响。

表1 损失率的计算值与试验值比对

编号	试验值	计算值	残差	相对误差
1	0.069 93	0.069 9	0.000 0	0.000 0
2	0.069 72	0.055 8	0.013 9	0.198 9
3	0.067 59	0.065 6	0.002 0	0.029 7
4	0.069 82	0.060 3	0.009 5	0.136 8
5	0.069 65	0.067 8	0.001 8	0.026 5
6	0.055 85	0.064 1	-0.008 2	0.146 9
7	0.069 25	0.069 7	-0.000 5	0.007 0
8	0.069 06	0.068 0	0.001 0	0.015 2
9	0.068 01	0.074 3	-0.006 3	0.092 6

3 结论

1) 基于已有的试验数据,对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率进行灰色关联度分析,得出影响聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率因素的关联度关系为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量。

2) 利用 GM(1,5) 模型建立聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的预测方程,模型具有较好的预测精度,其预测结果具有一定的参考价值,为聚丙烯纤维混凝土冻融损失率的预测提供了一种有效的

方法。

参考文献:

[1] 程红强,高丹盈.聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(S II):197.

[2] 阎利,万朝均,王绍东.聚丙烯纤维增强混凝土概述[J].化学建材,2003(1):52.

[3] 姚武.纤维混凝土的低温性能和冻融损伤机理研究[J].冰川冻土,2005,27(4):545.

[4] 霍俊芳,申向东,曹喜.聚丙烯纤维混凝土正交试验研究[C]//纤维混凝土的技术进展与工程应用——第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集,大连:[s. n.]2006.

[5] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2010.

[6] 王学萌,张继忠,王荣,等.灰色系统分析及其实用计算程序[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.

[7] 商怀帅,宋玉普.灰色系统理论的优化方法及其在结构寿命预测中的应用[J].混凝土,2004(10):25.

[8] 路晓峰,贾小林,崔先强.灰色系统理论的优化方法及其在卫星钟差短期预报中的应用[J].测绘工程,2006,15(6):12.

[9] 陈举华,史岩彬.GM预测模型的模糊-灰色优化方法[J].农业机械学报,2003,34(2):129.

(上接第62页)

3) 节点极限承载力随着β值的增大而增大,极限承载力的模拟结果与IIW规范最为接近。

4) 节点在腹杆轴力和平面内弯矩共同作用下,受弯极限承载力下降。

5) 通过与试验结果比对,可知该试件在极限承载力、破坏模式等方面与试验值均吻合良好,可以作为参数分析的基础。

参考文献:

[1] GB 50017—2003,钢结构设计规范及条文说明[S].

[2] 陈以一,陈扬骥.钢管结构相贯节点的研究现状[J].建筑结构,2002,32(7):52.

[3] Packer J A, Henderson J E.空心管结构连接设计指南[M].曹俊杰,译.北京:科学出版社,1997.

[4] Wardenier J. Hollow sections in structural applications [M]. Netherlands: Bouwen Met Staal, 2002.

[5] 刘飞飞,陈誉.不同受力状态下N型圆钢管完全搭接节点力学性能研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(1):37.

[6] 武振宇,谭慧光.不等宽T型方钢管节点初始抗弯刚度计算[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(10):1517.

[7] 王伟,陈以一.圆钢管相贯节点的非刚性能与计算公式[J].工业建筑,2005,11(35):5.

[8] 吴颖,陈誉.方支管-H型钢主管T型节点轴压性能数值分析[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):15.

[9] GB/T 228—2002, Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature [S].

[10] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.

[11] 曹金凤,石亦平.ABAQUS有限元分析常见问题解答[M].北京:机械工业出版社,2009.

[12] 陈栋芬.X型方钢管节点平面内受弯性能试验报告[R].厦门:华侨大学,2012.

[13] EN1993—1—8 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1—8: Design of Joint [S].

[14] XV—E—07—378. International institute of welding (IIW). Static design procedure for welded hollow section joints—recommendations (IIW Doc) [S].