

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.03.010

基于正交试验和灰色系统理论的混杂纤维 混凝土抗压强度的研究

沈恒祥, 孔云, 庞建勇

(安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232000)

摘要: 随着混杂纤维混凝土应用的增多,探究影响其抗压强度的因素就显得尤为重要。为了研究陶粒、钢纤维和聚丙烯纤维三种因素对混杂纤维混凝土抗压性能影响,对钢-聚丙烯纤维混凝土的抗压强度进行灰色关联分析、极差分析和方差分析。结果表明:灰色关联分析、极差分析和方差分析的三种分析的结果一致,对钢-聚丙烯纤维混凝土抗压强度影响最大的是钢纤维掺量,其次为陶粒掺量,影响最小的是聚丙烯纤维掺量。最后,就这三种因素对钢-聚丙烯纤维混凝土的抗压强度的影响进行了机理分析;同时根据灰色系统理论建立钢-聚丙烯纤维混凝土抗压强度的GM(1,N)灰色预测模型。

关键词: 混杂纤维混凝土;灰色关联分析;正交试验法;抗压强度

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0054-05

Analysis of Compressive Strength of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Based on Orthogonal Experiment and Grey System Theory

SHEN Hengxiang, KONG Yun, PANG Jianyong

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232000, China)

Abstract: With the increasing application of hybrid fiber reinforced concrete, it is very important to explore the factors affecting its compressive strength. In order to analyze the influence of ceramsite, steel fiber and polypropylene fiber on the compressive strength of hybrid fiber concrete, grey correlation analysis, range analysis and variance analysis were adopted in this paper. The results show that grey correlation analysis, range analysis and ANOVA show similar results. The most important influencing factors on compressive strength of steel-polypropylene fiber concrete is steel fiber, the second is ceramsite, and the smallest is polypropylene fiber. Finally, this paper analyzed the mechanism Based on grey system, the GM(1, N) prediction model of compressive strength of steel-polypropylene fiber reinforced concrete is proposed.

Keywords: hybrid fibre concrete; grey correlation analysis; orthogonal test method; compressive strength

陶粒混凝土是一种轻质混凝土材料,其中的页岩陶粒为页岩的主要成分,是通过页岩高温焙烧所制成的人造轻骨料,将其用作混凝土的轻骨料与普通混凝土相比有自重小、保温性能好、环保经济、抗震性良好、节约自然骨料资源等优点,较为突出的轻质特点能有效降低建筑物的重量,可以降低常规钢

筋混凝土建筑40%左右的自重^[1-4]。

纤维混凝土是一种由水泥、粉煤灰、细集料和随机分布的短纤维组成的复合材料。由于纤维在水泥基体中呈乱象分布,在基体受力时其与基体间的摩擦和滑移作用可以有效阻止裂缝的生成和扩展,抑制损伤积累和发展,从而能够在提高混凝土的韧性

收稿日期:2020-01-20

修稿日期:2020-02-17

作者简介:沈恒祥(1999—),男,安徽亳州人,本科生,所学专业为岩土工程。E-mail:2012208840@qq.com

通讯作者:庞建勇(1964—),男,河北保定人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail:pangjyong@163.com

和力学性能^[5-6]。将纤维按照一定的掺量加入混凝土中能有效的增强混凝土的力学性能^[7];张颖^[8]、吴振华^[9]提出掺加一定量的钢纤维能够有效改善轻骨料混凝土的力学性能。大量的研究表明^[10]在轻骨料混凝土中掺入聚丙烯纤维,在一定程度上有助于增强轻骨料混凝土的抗压强度。

相对于考虑各因素和众多取值水平的全面试验而言,正交试验可以大大减少试验次数,并能够在设定的水平中找到最优组合^[11]。为了进一步研究钢纤维和聚丙烯纤维对轻骨料混凝土的力学性能的影响,对陶粒、钢纤维和聚丙烯纤维进行三因素三水平的正交试验的设计以研究其抗压强度。

灰色系统理论的主要研究对象是系统或事件具有模糊、不确定性,或“部分已知、部分未知”^[12]。而在钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的正交试验中,各因素与试验目标的影响属于灰色系统。因此,可以用灰色关联分析对其进行评价,同时建立起GM(1,N)灰色模型对其抗压强度进行预测。

1 试验部分

1.1 原材料

试验所用的水泥为淮南八公山牌P·O·42.5级普通水泥;砂子选普通中砂,系度模数为2.8,并在其中掺杂最大粒径是5 mm,表观密度大小为2 543 kg/m³的陶砂,其目的是减少建筑物重度,并增加建筑物抗酸雨、保温隔热的能力。粗骨料选取平均粒径为12 mm的卵石,以满足混凝土的流动性。在粗骨料中掺入部分的陶粒以减少建筑物的重度并增加隔水保气的能力。陶粒的粒径大小在5 mm~20 mm之间,陶粒为页岩陶粒,由淮南市金瑞建材厂生产,其松散密度为600 kg/m³,筒压强度为3 MPa,孔隙率大于37%,吸水率小于16%。

钢纤维采用的是铣削型钢纤维,长度28 mm,抗拉强度 $f_t=634$ MPa,密度为7.9 g/cm³。玻化微珠采用淮南某公司生产,其密度为100 kg/m³,闭孔率大于85%,成球率60%~80%,粒径0.15 mm~0.50 mm,其吸水率在200%左右,由于吸水率过高在使用前需进行淋水处理,防止由于玻化微珠吸水率过高导致在搅拌混凝土时过度吸水。粉煤灰采用淮南某电厂生产的一级粉煤灰,其作用是为了节省大量的水泥和细骨料,同时降低用水量,增强了混凝土拌和物的和易性,减少了混凝土的徐变,提高混凝土抗渗能力。为了提高早期混凝土强度,使用聚羧酸高性能减水剂作为外加剂。

聚丙烯纤维采用山东泰安市现代塑料有限公司开发生产的束状单丝聚丙烯纤维。其物理及力学性能如表1所示。

表1 束状单丝聚丙烯纤维物理及力学性能

密度 /(g·cm ⁻³)	断裂强度 /MPa	纤维规格 /mm	弹性模量 /MPa	泊松比	相量直径 /mm
2.63	≥300	10~51	≥2500	0.29~0.46	0.048

1.2 试验设计

根据混凝土设计规范计算得到基准混凝土的配比为水泥:砂子:石子:水=1:1.75:1.75:0.45。正交试验是安排多因素多水平试验的一种有效方法,其原理是根据正交性从全面试验中挑出有代表性、典型性的点进行试验,以达到高效、快速和经济为目的^[13]。查找大量文献后,确定本次试验其主要考虑因素和水平为:(1)陶粒掺量 A_r (7%、14%、21%);(2)钢纤维掺量 B_g (0.1%、0.2%、0.3%);(3)聚丙烯纤维掺量 C_v (0.1%、0.2%、0.3%)。按照正交试验的要求取用9组配合比,设计三因素三水平的正交试验,其1 m³混凝土配比如表2所示。

表2 混凝土配比

单位:kg/m³

组号	陶粒量	陶砂量	钢纤维量	聚丙烯纤维量	水泥量	粉煤灰量	石子量	砂子量	玻化微珠量	水量
A ₇ B _{0.1} C _{0.1}	58.1	33.2	7.81	2.60	427.5	47.5	772.5	797.4	32	214
A ₇ B _{0.2} C _{0.2}	58.1	66.5	15.60	5.20	427.5	47.5	772.5	764.2	32	214
A ₇ B _{0.3} C _{0.3}	58.1	100.0	23.40	7.80	427.5	47.5	772.5	730.9	32	214
A ₁₄ B _{0.2} C _{0.3}	116.3	33.2	15.60	5.20	427.5	47.5	714.3	797.4	32	214
A ₁₄ B _{0.3} C _{0.1}	116.3	66.5	23.40	7.80	427.5	47.5	714.3	764.2	32	214
A ₁₄ B _{0.1} C _{0.2}	116.3	100.0	7.81	2.60	427.5	47.5	714.3	730.9	32	214
A ₂₁ B _{0.3} C _{0.2}	174.4	33.2	23.40	7.80	427.5	47.5	656.2	797.4	32	214
A ₂₁ B _{0.1} C _{0.3}	174.4	66.5	7.81	2.60	427.5	47.5	656.2	764.2	32	214
A ₂₁ B _{0.2} C _{0.1}	174.4	100.0	15.60	5.20	427.5	47.5	656.2	730.9	32	214

1.3 试块制备

按照《混凝土结构设计规范》^[14] (GB 50010—2010)的要求,依次加入砂石、钢纤维与各种胶材对其进行干拌,再加入水和减水剂的同时均匀的撒入聚丙烯纤维进行湿拌。每组配合比制备三块 100 mm × 100 mm × 100 mm 标准立方体,在室温条件下,浸泡经 28 d 标准养护后,使用 SYE-2000 型压力试验机进行抗压强度试验。

1.4 正交优化实验的灰色关联分析

灰色关联分析的基本原理是通过对系统数据序列几何关系的比较来分清系统中诸多技术指标的关联程度,序列曲线的几何形状越接近,则它们之间的关联度越大,反之越小^[15]。但是,由于判断几何形状的相似性具有一定人为因素的影响,可能会存在较大的误差。为了进一步的减小人为因素所造成的误差,增加关联性判断的准确性,采用下列的计算方法来衡量因素间关联度的大小。

由于计算关联系数时需要所有的数据具有统一的量纲。因此,在计算前对所有的数列进行无量纲化处理。除此之外,要求所有的数列有共同的交点。为了解决上述两个问题,将由参考数列和对比数列所形成的数列 1 按照公式(2)进行初值化处理得到初始化数列 Y 。

$$x = (x(1), x(2), \dots, x(n)) \quad (1)$$

$$\bar{x} = \left(1, \frac{x(2)}{x(1)}, \dots, \frac{x(n)}{x(1)}\right) \quad (2)$$

将初始化数列 Y 代入公式(3)中建立比较数列 Y_i 与对应的参考数列 Y_0 在 k 时刻的关联系数矩阵 $Z, \rho \in [0, 1]$ 为分辨系数。通常情况下,分辨系数 ρ 越大,分辨率越大; ρ 越小,分辨率越小。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|} \quad (3)$$

$\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 、 $\max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 分别代表两级最小极差和两级最大极差。

公式(3)给出的定义是某一时刻的比较数列相

$$R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.8289 & 0.8094 & 0.4950 & 0.4636 & 0.5029 & 0.3617 & 0.3475 & 0.3464 \\ 1.0000 & 0.4879 & 0.3423 & 0.4950 & 0.3333 & 0.8731 & 0.3617 & 0.8390 & 0.4893 \\ 1.0000 & 0.2879 & 0.3423 & 0.3492 & 0.7611 & 0.5029 & 0.5204 & 0.3475 & 0.8329 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由关联系数矩阵计算出各系数的关联度如表 4 所示。

由表 4 分析结果可知,关联度具有一定的有序

对于参考数列的关联系数,其数值多且数值较为分散不易比较,为此将关联系数矩阵 Z 带入公式(4)中经行处理得到比较数列 Y_i 与对应的参考数列 Y_0 关联度。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

由公式(4)可知,关联度是把各个时刻的关联系数集中为一个平均值,即将分散化的数据进行集中处理,利用关联度这个概念,我们可以对各种问题进行因素分析。

在公式(3)中由于 $|x_0(t) - x_s(t)|$ 含有绝对值,无法确定比较因素与参考因素之间为正关联还是为负关联,为此采取公式(5)对数列进行处理:

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^n kx_i(k) - \sum_{k=1}^n x_i(k) \sum_{k=1}^n \frac{k}{n}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

则:

(1) $\text{sign}(\sigma_i) = \text{sign}(\sigma_j)$, 则 x_i 和 x_j 为正关联。

(2) $\text{sign}(\sigma_i) = -\text{sign}(\sigma_j)$, 则 x_i 和 x_j 为负关联。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

钢-聚丙烯纤维混凝土的抗压强度如表 3 所示。

表 3 钢-聚丙烯纤维正交试验抗压强度

组号	A ₇ B _{0.1} C _{0.1}	A ₇ B _{0.2} C _{0.2}	A ₇ B _{0.3} C _{0.3}	A ₁₄ B _{0.2} C _{0.3}	
抗压强度 /MPa	29.0	21.9	20.9	22.9	
组号	A ₁₄ B _{0.3} C _{0.1}	A ₁₄ B _{0.1} C _{0.2}	A ₂₁ B _{0.3} C _{0.2}	A ₂₁ B _{0.1} C _{0.3}	A ₂₁ B _{0.2} C _{0.1}
抗压强度 /MPa	18.2	24.0	26.3	22.4	22.1

2.2 抗压强度的灰色关联分析

按照灰色关联分析法,取 9 组抗压强度为参考数列,对应的陶粒掺量、钢纤维掺量、聚丙烯纤维掺量为对比数列,根据灰色关联公式计算出关联系数矩阵:

性,对于钢-聚丙烯纤维混凝土 28 d 抗压强度而言,关联度大小顺序为 0.580 2 > 0.572 8 > 0.571 6,其中根据公式(5)得到陶粒掺量对于混凝土的抗压

强度之间呈负相关联,即随着陶粒掺量的增加,抗压强度随之减小。由于陶粒替代部分石子作为粗骨料,而陶粒本身结构疏松多孔,物理性质显脆性。当替代部分卵石担任粗骨料时,对于混凝土的抗压强度能力有一定的减弱。

表 4 关联度及关联极性

性能指标	陶粒掺量	钢纤维掺量	聚丙烯纤维掺量
关联度	0.5728	0.5802	0.5716

2.3 抗压强度的极差值分析

数据中极差值越大,说明该因素对于抗压强度的影响越大。由图 1、表 5 可知,钢纤维掺量对混杂纤维混凝土的抗压强度影响最大,极差(R)为 3.33 MPa;陶粒掺量其次,极差(R)为 2.23 MPa;聚丙烯纤维掺量对混杂纤维混凝土抗压强度的影响最小,极差(R)为 2.00 MPa。 B_g 从 0.1% 增长到 0.2%,其抗压强度降低了 11.3%; B_g 从 0.1% 增长到 0.3%,其抗压强度降低了 13.3%。 A_f 从 7% 增长到 14%,其抗压强度降低了 9.3%; A_f 从 7% 增长到 21%,其抗压强度降低了 1.4%。由于陶粒代替了部分石子作为粗骨料,在减轻混凝土自重的同时也降低了混凝土本身的抗压强度。 C_v 从 0.1% 增长到 0.2%,其抗压强度降低了 4.2%; C_v 从 0.1% 增长到 0.3%,其抗压强度降低了 4.5%。是由于聚丙烯纤维本身弹性模量较低,不能较明显的提高混凝土的力学性能,而随着陶粒掺量的增加影响了混凝土的抗压强度。从而随着聚丙烯纤维掺量的增加而混杂纤维混凝土表现出抗压强度的降低。

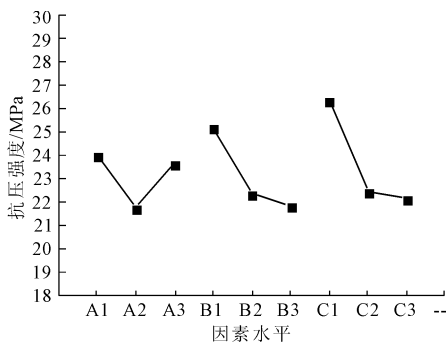


图 1 28 d 抗压强度效应曲线图

2.4 抗压强度的方差值分析

如表 6 所示,根据方差分析所得到的关于混杂纤维混凝土的抗压强度影响结果与极差分析一致:钢纤维掺量 > 陶粒掺量 > 聚丙烯纤维掺量。其中钢纤维掺量对于抗压强度的影响为高度显著,陶粒与聚丙烯纤维对于抗压强度的影响为显著。

表 5 28 d 抗压强度极差值

类别	28 d 抗压强度/MPa		
	陶粒掺量	钢纤维掺量	聚丙烯纤维掺量
K1	23.93	25.13	23.10
K2	21.70	22.30	24.07
K3	23.60	21.80	22.07
R	2.23	3.33	2.00
影响顺序	钢纤维掺量 > 陶粒掺量 > 聚丙烯纤维掺量		

表 6 抗压强度方差分析

因变量	因素	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
抗压强度	陶粒	29.067	2	14.533	1.663	*
	钢纤维	45.483	2	22.741	2.602	**
	聚丙烯纤维	23.306	2	11.653	1.333	*
	误差	17.482	2	8.741		
	总计	4870.930	8			

注:○表示不显著;*表示显著;**表示高度显著。

2.5 灰色模型 GM(1, N) 模型的建立

根据灰色系统理论可知,GM(1, 1) 预测模型必须建立在离散且光滑的数据基础上。但是在现实中各种原始数据往往不能满足要求。对原始数据进行生成处理,既可以为建模提供中间信息,又可以弱化原随机序列的随机性。所以,在建立模型时,应将原始数列按时间序列进行累加,使原来杂乱无序的数据具有一定的规律性^[16]。而 GM(1, N) 表示模型为一阶,且含有 N 变量的灰色模型。本文采用 GM(1, 4) 建立起混杂纤维混凝土 28 d 抗压强度与陶粒掺量、钢纤维掺量和聚丙烯纤维掺量的灰色预测模型为:

$$\frac{dx}{dt} + ax_1 = b_1x_2 + b_2x_3 + b_3x_4 \quad (7)$$

同时,通过模型求解得到灰系数:

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.452 \\ 0.960 \\ 44.395 \\ 34.377 \end{bmatrix}$$

于是得到抗压强度估计模型为:

$$\frac{dx}{dt} + 1.452x_1 = 0.96x_2 + 44.395x_3 + 34.377x_4 \quad (8)$$

抗压强度预测模型标准式为:

$$x(t+1) = 0.661x_2 + 30.579x_3 + 23.678x_4 - e^{-1.452}(0.661x_2 + 30.579x_3 + 23.678x_4 - 29) \quad (9)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表陶粒掺量、钢纤维掺量以及聚丙烯纤维掺量。

根据上述灰色预测模型 GM(1,4) 可得到抗压强度预测值,其残差值、相对误差、平均相对误差和相对平均偏差如表 7 所示。

表 7 预测值与误差检验表

组别	抗压强度/MPa		抗压强度 残差值 /MPa	抗压强度 相对误差 /%
	实测值	灰色预测值		
1	29.0	29.000	0.000	0.0
2	21.9	18.652	3.248	-14.8
3	20.9	21.351	-0.451	2.2
4	22.9	22.561	0.339	-1.5
5	18.2	20.824	-2.624	14.4
6	24.0	17.060	6.940	-28.9
7	26.3	27.797	-1.497	5.7
8	22.4	24.049	-1.649	7.4
9	22.1	22.371	-0.271	1.2
平均相对误差			8.5%	
相对平均偏差			<0.1%	

从表 7 可知,灰色预测值的平均相对误差 <10%,则模型精度为三级;同时可得相对平均偏差小于 <0.1%,则模型精度为一级。预测模型具有良好的精度,根据 GM(1,4) 模型可以简单快速的预测出不同钢纤维掺量、陶粒掺量和聚丙烯纤维掺量所形成的混杂纤维混凝土试块的抗压强度。

3 结 论

(1) 陶粒掺量、钢纤维掺量和聚丙烯纤维掺量对于混杂纤维混凝土的抗压强度均有显著影响,对降低混凝土密度有着显著的帮助。但陶粒掺量与混杂纤维混凝土的抗压强度呈现出负相关性,而钢纤维掺量和聚丙烯纤维掺量与混杂纤维混凝土的抗压强度呈现出正相关性。

(2) 当钝削型钢纤维掺量较少时,会降低混杂纤维混凝土本身的抗压强度,当钝削型钢纤维掺量从 0.1% 增长到 0.3% 时,抗压强度降低了 13.3%。在掺杂钢纤维用来提高混凝土的抗压强度的时候要避免使用该类型的钢纤维。

(3) 根据灰色关联度分析和极差值法的结果分析,在三因素三水平的正交试验中对于抗压强度的影

响顺序为钢纤维掺量 > 陶粒掺量 > 聚丙烯纤维掺量。

参考文献:

- [1] 黄金坤,姚文杰,严 旺,等. 卵石及粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):59-62.
- [2] 童伟光,黄锦恒,许松宜. 纤维掺量对聚丙烯粗纤维陶粒混凝土力学性能的影响[J]. 广西工学院学报,2014,25(2):17-20.
- [3] 朱楚翔,夏多田,吕开清,等. 玄武岩纤维掺量对页岩陶粒混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2018(1):50-53.
- [4] 邓 海,肖 妞. 轻质陶粒混凝土配合比设计与优化[J]. 江西建材,2019(9):23-24.
- [5] 崔 涛,何浩祥,闫维明,等. 混杂纤维混凝土单轴受压本构模型[J]. 北京工业大学学报,2019,45(10):967-977.
- [6] 李 艳,刘泽军. 高韧性 PVA-FRCC 单轴受压力学性能及本构关系[J]. 建筑材料学报,2014,17(4):606-612.
- [7] 张海鹏,陈 猛,白 帅,等. 层布式混杂纤维混凝土抗压及抗拉性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(5):131-135.
- [8] 张 颖. 高强钢纤维轻骨料混凝土力学性能研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(2):29-31.
- [9] 吴振华. 钢纤维轻骨料粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2019(8):54-57.
- [10] 郭荣鑫,郭佳栋,颜 峰,等. 聚丙烯纤维轻骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(5):1323-1330.
- [11] 冉 川. 灰色关联分析在水泥砂浆正交试验的应用[J]. 山西建筑,2015(12):107-109.
- [12] 杨星宇. 灰色模型改进及其局部受载边坡稳定性预测应用研究[D]. 武汉:长江科学院,2018.
- [13] 权长青,焦楚杰,杨云英,等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J]. 建筑材料学报,2019,22(3):363-370.
- [14] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 刘 锋,魏光辉. 基于灰色关联的水利工程方案模糊优选[J]. 水力发电学报,2012,31(1):10-14,26.
- [16] 贾得海,曾建初. 灰色系统理论 GM(1,1) 预测模型的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2013,38(6):115-120.