

粒化高炉矿渣作细骨料自密实混凝土 试验研究

石东升^{1,2*}, 李行行¹, 张鹏¹, 韩平^{1,3}, 贺培源¹

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区土木与力学重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010051; 3. 兴泰建设集团有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要: 基于全计算法配合比设计方法计算了粒化高炉矿渣自密实混凝土的配合比, 通过研究其工作性能确定最终配合比并测试其抗压强度, 而后利用 GM(1, 1) 灰色预测模型预测其抗压强度。结果表明, 通过合理调整砂率 and 外加剂的用量, 可以制备出满足工作性能要求的粒化高炉矿渣作细骨料的自密实混凝土; 7 天龄期的抗压强度呈现随着代砂率的提高不断降低的趋势, 由于粒化高炉矿渣具有一定的水硬性, 28~180 天龄期粒化高炉矿渣自密实混凝土抗压强度和强度增长率要高于普通自密实混凝土; GM(1, 1) 灰色预测模型可以较好地预测其抗压强度。

关键词: 粒化高炉矿渣; 自密实混凝土; 配合比; 工作性能; 抗压强度

中图分类号: X757

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)02-0108-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Experimental study on granulated blast furnace slag as fine aggregate self-compacting concrete

Shi Dongsheng^{1,2*}, Li Hanghang¹, Zhang Peng¹, Han Ping^{1,3}, He Peiyuan¹

(1. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Xingtai Construction Group Co., Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The mix ratio of granulated blast furnace slag self-compacting concrete was designed based on the full calculation method. By studying its working performance to determine the final mix ratio and test its compressive strength, and then use the GM (1,1) grey prediction model can predict its compressive strength. The results show that self-compacting concrete that meets the requirements of working performance can be prepared by reasonably adjusting the sand ratio and the amount of admixture. The compressive strength of the 7 day age shows a decreasing trend with the increase of the sand replacement rate. The compressive strength and strength growth rate of granulated blast furnace slag self-compacting concrete at 28-180 days are higher than those of ordinary self-compacting concrete. This is because the granulated blast furnace slag has certain hydraulicity, which makes its strength change accordingly. GM (1,1) grey prediction model can better predict the compressive strength.

Key words: granulated blast furnace slag, self-compacting concrete, mix design, working performance, compressive strength

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(52068058); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2023YFHH0358)。

作者简介: 石东升, 1971 年出生, 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事工业固废高效利用、绿色建材以及新型混凝土结构等的研究, E-mail: 20211100321@imut.edu.cn。

0 引言

随着我国国民经济的不断发展, 城市化进程不断加快, 我国钢铁的产量早在 20 世纪末就已超过其他国家, 跃居世界第一^[1]。按每吨生铁生产矿渣 0.4 t 计, 平均每年矿渣排放量达 3.4 亿 t 以上, 而粒化高炉矿渣 (Granulated blast furnace slag, GBFS) 排放量约占高炉矿渣排放量 70% ~ 80%, 粒化高炉矿渣是冶炼生铁过程中产生的副产品, 它是由熔融状态的高炉矿渣经水淬快速冷却形成的不规则的玻璃相颗粒, 其物理性质与普通天然砂类似, 化学成分类似于硅酸盐水泥熟料, 具有较高的潜在活性^[2-4]。有效利用工业固废, 减少对环境的影响是全世界建筑业的主要目标^[5-6], 将冶炼生铁的副产品作混凝土细骨料^[7-9]有利于降低混凝土的成本, 节约天然砂用量, 同时减少大量开采天然细骨料对环境的影响^[10]。在 20 世纪八十年代后期 Okamura 提出自密实混凝土 (Self-compacting concrete, SCC) 的概念^[11]以来, 自密实混凝土作为高性能混凝土的一种得到了快速发展。1988 年 Ozawa 等人成功配制出免振捣自密实混凝土^[12]。近年来何翔^[13]和张灵灵^[14]等其他学者开展了固废在自密实混凝土领域的研究, 证明了固废自密实混凝土的可行性。

笔者对粒化高炉矿渣代替天然砂作细骨料制备自密实混凝土开展了试验研究。基于全计算法^[15]进行粒化高炉矿渣自密实混凝土 (Granulated blast furnace slag self-compacting concrete, GBFS-SCC) 配合比设计, 随后开展实验室现场试配, 通过调整外加剂和砂率的方式, 得出满足工作稳定性要求的优化配合比。通过工作性能、抗压强度及灰色预测模型探究其变化规律, 为加快粒化高炉矿渣自密实混凝土的工程应用提供了参考。

1 试验

1.1 材料

天然砂来自于呼和浩特市大黑河水洗砂, 碎石来自呼和浩特市大青山破碎的一级花岗岩碎石, 粒径在 5 ~ 20 mm, 表 1 为骨料基本性能指标, 水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥且其物理力学性能符合规范要求, 粉煤灰来自呼和浩特某发电厂生产的二级粉煤灰, 减水剂为聚羧酸高效减水剂。粒化高炉矿渣来自内蒙古某钢铁有限责任公司, 粒化高炉矿渣在级配上虽然没有天然砂的级配良好, 但是却依然处于 II 区中砂范畴, 筛分试验结果见表 2, 计算可得天然砂和粒化高炉矿渣的细度模数分别为 2.79 和 2.60。表 3 为粒化高炉矿渣、水泥熟料的化学成分, 粒化高炉矿渣与水泥熟料类似, 具有一定的水硬性 (波特兰活性), 通过水浸法测得粒化高炉矿渣颗粒 pH 值为 8.7。

表 1 骨料参数指标
Table 1 Index of aggregate parameters

材料	松散堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	紧密堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎 值/%
GBFS	1 058	1 230	2 308	39.0
天然砂	1 460	1 620	2 660	6.9
碎石	1 310		2 760	9.9

表 2 筛分试验结果
Table 2 Screening test results

筛孔尺寸/ mm	分计筛余/%		累计筛余/%		II 级级 配/%
	粒化高炉 矿渣	天然砂	粒化高炉 矿渣	天然砂	
5.00	0.00	9.25	0.00	9.25	0 ~ 10
2.50	1.20	15.35	1.20	24.61	0 ~ 25
1.25	14.83	15.96	16.03	40.57	10 ~ 50
0.63	42.14	21.72	58.17	62.29	41 ~ 70
0.32	31.04	26.35	89.20	88.64	70 ~ 92
0.16	6.29	7.77	95.49	96.40	90 ~ 100

表 3 粒化高炉矿渣、水泥熟料的化学成分
Table 3 Chemical compositions content

材料	化学成分/%								
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	S	MnO	P ₂ O ₅
GBFS	35.82	0.58	33.39	7.59	12.92	0.40	0.80	0.30	<0.10
水泥熟料	64.20	1.50	23.44	2.96	7.19	3.00	2.00		

1.2 试验方法

1.2.1 配合比及工作稳定性试验

采用全计算法进行配合比设计, 得出计算配合

比见表 4。针对不同指标 JGJ/T 283-2012《自密实混凝土应用技术规程》、CECS02-2004《自密实混凝土设计与施工指南》、EFNARC《The European

Guidelines for Self-compacting Concrete》给出了相应的性能量化指标与测试方法。

表4 配合比计算结果
Table 4 Calculation results of mixing proportion

组别	配合比/(kg·m ⁻³)							砂率/%
	水	水泥	粉煤灰	天然砂	碎石	减水剂	GBFS	
1	170	341	85.2	883.5	900.3	5.115	0	49.50
2	170	341	85.2	883.5	900.3	2.667	0	49.50
3	170	341	85.2	937	846.7	2.91	0	52.50
4	170	341	85.2	937	846.7	1.53	0	52.50
5	170	341	85.2	937	846.7	2.15	0	52.50
6	170	341	85.2	937	846.7	3.5	0	52.50
7	170	341	85.2	937	846.7	2.86	0	52.50
8	170	341	85.2	937	846.7	3.145	0	52.50
9	170	341	85.2	937	846.7	2.925	0	52.50
10	170	341	85.2	937	846.7	2.257	0	52.50
11	170	341	85.2	458.5	846.7	2.257	458.5	52.50
12	170	341	85.2	458.5	846.7	3.327	458.5	52.50
13	170	341	85.2	0	846.7	7.785	937	52.50

1.2.2 力学性能试验

根据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。将普通 SCC 试件 (对照组) 和 GBFS-SCC 试件放入标准养护室中进行标准养

护 7、14、28、180 d 后, 测试 SCC 的立方体抗压强度。

2 试验结果与讨论

2.1 工作稳定性试验结果与讨论

自密实混凝土的工作稳定性是其重要特点, 主要分为动态工作稳定性和静态工作稳定性两方面。静态稳定性是指混凝土浇筑完成后至初凝前, 粗集料能稳定悬浮在砂浆中的能力; 动态稳定性是指新拌自密实混凝土在运输、浇筑、泵送等工程操作中粗集料保持与砂浆同步流动的能力。进行动态稳定性试验指的是坍落扩展度、T500 流动时间、V 型漏斗流出时间、U 型箱、L 型仪和 J-环扩展度试验, 静态稳定性试验指的是湿筛分离试验、圆柱离析试验^[6]。由表 5 拌合物动态稳定性试验结果可知, 动态稳定性试验里, 整体呈现前期离散性大, 后期逐渐趋于稳定的趋势, 在多次适配后最终动态稳定性各项指标符合规范要求。动态稳定性试验符合规范要求的三组试验进行静态稳定性试验, 整体呈现相对稳定的状态。由图 1 静态稳定性试验结果可知, 拌合物的湿筛分离试验结果均在控制指标要求范围内, 证明拌合物的抗离析性能良好。拌合物的骨料离析系数与抗离析性能呈现相同的变化规律, 骨料离析系数(I_{seg})越低, 代表拌合物的粗骨料分布越均匀^[7]。

表5 拌合物动态稳定性试验结果
Table 5 Dynamic stability test results

组别	t_{500}/s	扩展度/mm	J环扩展度/mm	V型漏斗流出时间/s	L型箱($H_1 \cdot H_2^{-1}$)	U型箱 $\Delta H/mm$	备注
1	3.83	885		14.9	0.88	阻塞	离析
2	6.39	495	483	10.4	0.67	99	粘稠
3	5.98	530	500	9.8	0.85	70	快凝
4	7.31	535	495	8.7	0.75	75	粘稠
5	3.98	610	570	7.5	0.78	35	略粘
6	4.31	900	885	6.3	0.98	0	离析
7	2.20	580	565	7.8	0.75	290	泌水
8	4.79	750	660	5.9	0.88	91	U型箱高差较高
9	4.10	615	600	6.6	0.81	28	良好
10	5.71	820		7.8	0.71	11	降雨影响
11	3.99	595	550	7.3	0.83	44	粘稠
12	3.27	703	655	13.3	0.97	16	良好
13	4.21	625	593	14.2	0.98	23	良好

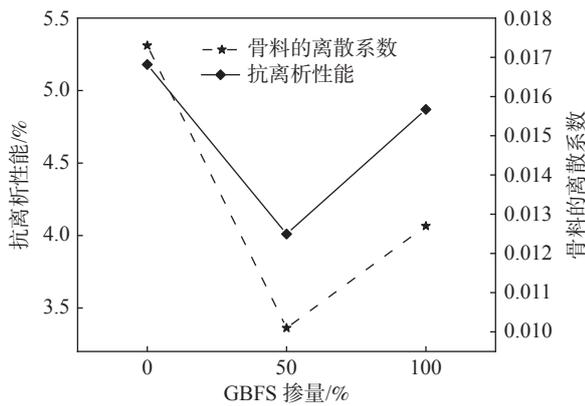


图 1 静态稳定性试验结果
Fig. 1 Static stability test results

根据上述试验结果, 优化后满足工作稳定性要求的配合比如表 6 所示。下文混凝土抗压强度测试所用试件配合比同样来自于表 6。

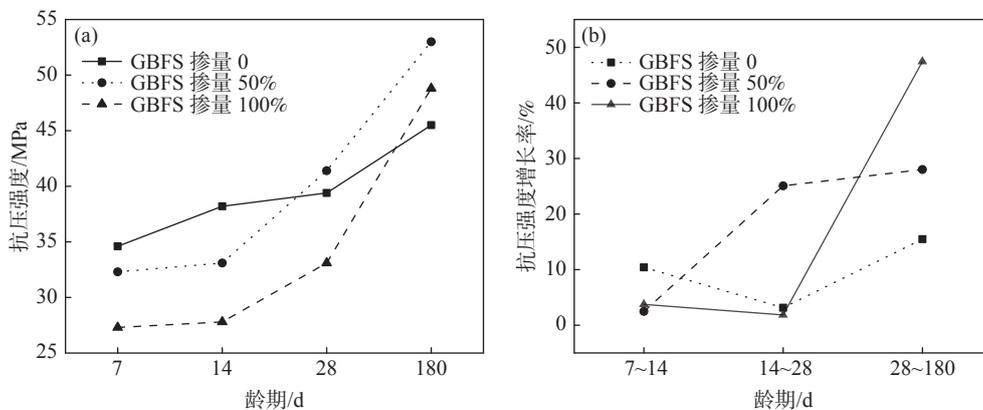
2.2 抗压强度试验结果与讨论

如图 2 立方体抗压强度试验结果所示, 粒化高炉矿渣自密实混凝土与普通自密实混凝土均会随着龄期的增加, 抗压强度逐渐增加。7 天龄期的强度呈现随着代砂率的提高抗压强度逐渐降低, 原因是粒化高炉矿渣形状不规则, 在不振捣的情况下,

GBFS-SCC 的孔隙密度比普通自密实混凝土大, 进而使得强度随代砂率的提高而降低。在 28 天龄期抗压强度呈现 50% > 0 > 100%, 180 天龄期的强度变化规律呈现 50% > 100% > 0, 强度增长率呈现 100% > 50% > 0 的变化规律, 经过长龄期的标准养护, 代砂率为 100% 的 GBFS-SCC 的强度和强度增长率都得到了明显提升, 在 14 ~ 180 天的养护过程中激发了粒化高炉矿渣潜在的水硬性^[18], 进而表现在强度和强度增长率上。同时短龄期混凝土抗压强度低的最主要原因与骨料特性有一定关系。在前期水化程度较低的情况下, 粒化高炉矿渣较天然砂含有较多的针片状颗粒, 这些颗粒很容易产生应力集中, 在骨料界面上发生破坏, 因此粒化高炉矿渣混凝土的前期强度一般略低于天然砂混凝土的抗压强度。粒化高炉矿渣自密实混凝土的后期抗压强度达到了普通混凝土的后期抗压强度。究其原因是粒化高炉矿渣是高炉炼铁的副产物, 水淬后具有较高的活性, 可以优化混凝土的组成结构, 而混凝土的后期抗压强度增长正是由于粒化高炉矿渣的活性逐渐的发挥而实现了增长。

表 6 粒化高炉矿渣自密实混凝土优化配合比设计
Table 6 Optimal mix proportion design of self-compacting concrete

代砂率/%	组成物用量/(kg·m ⁻³)							水胶比
	水	水泥	粉煤灰	天然砂	碎石	减水剂	GBFS	
0	170.0	341.0	85.0	937.0	847.0	2.9	0	0.40
50	170.0	341.0	85.0	459.0	847.0	3.3	459.0	0.40
100	170.0	341.0	85.0	0	847.0	7.8	937.0	0.40



(a) 抗压强度; (b) 强度增长率

图 2 立方体抗压强度试验结果

Fig. 2 Cubic compressive strength test results

3 利用 GM(1, 1) 模型预测自密实混凝土强度

3.1 GM(1, 1)灰色预测模型

1982年,灰色系统理论由邓聚龙教授创立,该理论是一种主要研究少数据、贫信息的不确定性系统的新方法^[19],灰色系统理论以灰色系统方法和模型技术为基础。通过对少量“已知信息”的分析,挖掘系统中的关键信息和关系,预测系统未来的发展趋势^[20]。而粒化高炉矿渣自密实混凝土强度预测模型正呈现出信息不完全、小数据不准确、信息不确定性系统差的特点。所以试用GM(1, 1)模型,以标准养护下抗压强度与劈裂抗拉强度实测数据为依据,预测粒化高炉矿渣自密实混凝土的抗压强度变化。

3.1.1 模型建立与精度检验

设序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, 其中, $x^{(0)}(k) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n$; $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列:

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

其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n$, 称:

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (2)$$

式(2)中的参数向量 $\hat{a} = [a, b]^T$ 可以运用最小二乘法估计:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

其中 Y, B 分别为:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -x^{(1)}(2) & 1 \\ -x^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -x^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(2)对时间 t 求导,得:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (5)$$

式(5)为GM(1, 1)模型均值形式 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的白化微分方程。

均值GM(1, 1)模型的时间响应式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a}, k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

进一步求出式(6)的累减还原式:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \alpha^{(1)}\hat{x}^{(1)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1), k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

则原始数据模拟值为:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^{-a}) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-a(k-1)}, k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中 $-a$ 为发展系数,反映了 $\hat{x}^{(1)}$ 及 $\hat{x}^{(0)}$ 的发展态势; b 为灰色作用量,用来反映数据的变化关系。

1) $C = \frac{S_2}{S_1}$ 称为均方差比值,对于给定的 $C_0 > 0$, 当 $C < C_0$ 时,称模型为均方差比合格模型。

2) $p = P(|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745S_1)$ 称为小误差概率,对于给定的 $p_0 > 0$, 当 $p < p_0$ 时,称模型为小误差概率合格模型。

3) 给定 α , 当 $\bar{\Delta} < \alpha$ 且 $\Delta_n < \alpha$ 成立时,称模型为残差合格模型,表7为精度检验等级参照。

表7 精度检验等级参照
Table 7 Precision inspection grade reference table

精度等级	指标临界值			
	相对误差 α	关联度 ε	均方差比 C_0	小误差概率 p_0
一级	0.01	0.90	0.35	0.95
二级	0.05	0.80	0.50	0.80
三级	0.10	0.70	0.65	0.70
四级	0.20	0.60	0.80	0.60

3.2 抗压强度预测与分析

根据上述方法,以不同龄期的抗压强度为灰色序列 $X(0)$, 计算步骤如下:

第一步:设置初始化原始序列,见表8。

表8 初始化建模原始序列
Table 8 Initialization modeling original sequence

代砂率/%	累加序列	抗压强度/MPa			
		7 d	14 d	28 d	180 d
0	$X_1^{(1)}$	34.6	38.2	39.4	45.5
50	$X_2^{(1)}$	32.3	33.1	41.4	53.0
100	$X_3^{(1)}$	27.3	27.8	33.1	48.8

第二步:将各组试件的抗压强度进行累加,得到原始序列的1-AGO生成,如表9。

表9 原始序列的1-AGO生成
Table 9 1-AGO generation of original sequences

代砂率/%	抗压强度/MPa			
	7 d	14 d	28 d	180 d
0	34.600 0	72.800 0	112.200 0	157.700 0
50	32.300 0	65.400 0	106.800 0	159.800 0
100	27.300 0	55.100 0	88.200 0	137.000 0

第三步: 得到 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成结果, 如表 10。

表 10 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成结果

Table 10 1-AGO generating the sequence of adjacent mean generation

代砂率/%	抗压强度/MPa		
	7 ~ 14 d	14 ~ 28 d	28 ~ 180 d
0	53.700 0	92.500 0	134.950 0
50	48.850 0	86.100 0	133.300 0
100	41.200 0	71.650 0	112.600 0

第四步: 依据最小二乘法原理, 计算得出发展系数 a 、灰色作用量 b 及平均模拟相对误差, 即灰色预测模型, 如表 11 抗压强度灰色预测模型。

第五步: 使用灰色预测模型进行预测, 如图 3 GM(1, 1)模型计算结果所示。

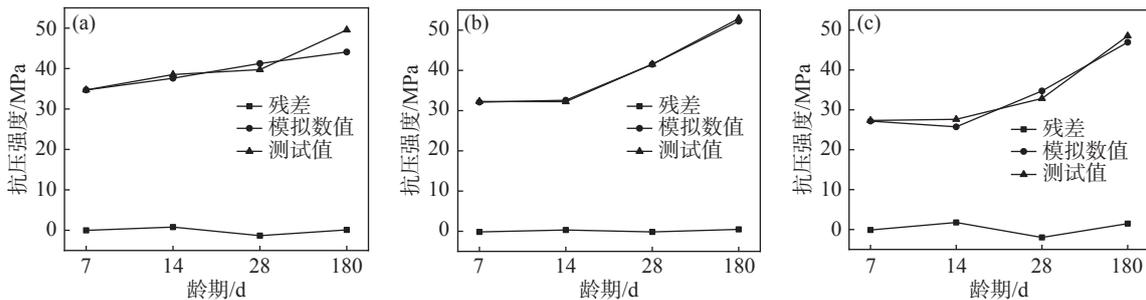
如表 12 模型精度检验所示, 不同代砂率的自密

实混凝土的均方差比均低于 0.012, 这远低于所要求的 0.35, 小误差概率均为 1, 这同样符合一级精度要求的大于 0.95, 代砂率为 0 的相对误差低于 0.05, 高于 0.01, 模型精度为二级; 代砂率为 50% 相对误差低于 0.01, 模型精度为一级; 代砂率为 100% 的相对误差低于 0.10, 高于 0.05, 模型精度为三级。在这三项精度指标表征下, 各组模型预测精度均为三级及以上, 说明使用均值 GM(1,1)模型可以预测粒化高炉矿渣自密实混凝土在标准养护下的抗压强度。

表 11 抗压强度灰色预测模型

Table 11 Grey prediction model of compressive strength

代砂率/%	发展系数 a	灰色作用量 b	平均相对模拟误差
0	-0.090 7	32.534 3	2.54%
50	-0.236 1	21.390 1	0.74%
100	-0.299 1	14.089 2	5.23%



(a) 0%; (b) 50%; (c) 100%

图 3 不同代砂率下 GM(1, 1)模型计算结果

Fig. 3 Calculation results of GM(1,1) model at different sand replacement rates

表 12 模型精度检验

Table 12 Model accuracy test

代砂率/%	均方差比 C_0	小误差概率 p_0	相对误差	精度等级
0	0.011 62	1	0.025 400	二级
50	0.000 37	1	0.007 400	一级
100	0.011 83	1	0.052 300	三级

4 结论

1) 运用全算法配合比设计方法, 并通过合理调整砂率和外加剂用量的方式试配, 可以配制出满足工作稳定性要求的粒化高炉矿渣自密实混凝土。

2) 短龄期(0 ~ 14 d)的粒化高炉矿渣自密实混

凝土的抗压强度值要低于普通自密实混凝土, 但经过长龄期(14 ~ 180 d)的标准养护后, 粒化高炉矿渣自密实混凝土的强度和强度增长率均有明显提高, 这是由于粒化高炉矿渣具有一定潜在的水硬性, 粒化高炉矿渣可以促进水化, 使得抗压强度在一定程度上得到提高。

3) GM(1, 1)模型可以较好地预测粒化高炉矿渣自密实混凝土和普通自密实混凝土标准养护后的抗压强度, 均方差比均低于所要求的 0.35, 小误差概率均为 1, 模型预测值与试验值相对误差均低于 0.10, 预测精度均在三级及以上。

参考文献

[1] He Liangyu, Qiao Lige, Zhao Rixu, *et al.* Study on the preparation of high performance mortar with steel slag as cementitious material and fine aggregate[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2019(6): 94-100.

- (何良玉, 谯理格, 赵日照, 等. 钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(6): 94-100.)
- [2] Liu Yang, Zhang Chunxia. Comprehensive utilization status and development trend of iron and steel slag[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2019(2): 21-25.
(刘洋, 张春霞. 钢铁渣的综合利用现状及发展趋势 [J]. 矿产综合利用, 2019(2): 21-25.)
- [3] Liu Shulong, Li Gongcheng, Liu Guolei, *et al.* Research on early strength characteristics and microstructure evolution of backfill based on blast furnace slag cementitious materials[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 71-75.
(刘树龙, 李公成, 刘国磊, 等. 基于高炉矿渣胶凝材料的充填体早期强度特性研究及微观结构演化 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11): 71-75.)
- [4] Wang Lijuan, Liu Yujuan. Experimental study on fluidity and mechanical properties of alkali-activated slag/fly ash system[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(6): 141-147.
(王丽娟, 刘玉娟. 碱激发矿渣/粉煤灰体系流动性及力学性能试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(6): 141-147.)
- [5] Alzaza A, Ohenoja K, Shaikh F U A, *et al.* Mechanical and durability properties of C-S-H-seeded cement mortar cured at fluctuating low temperatures with granulated blast furnace slag as fine aggregates[J]. Journal of Building Engineering, 2022(57): 14-21.
- [6] Hao Baichuan, Li Ziyue, Jia Dongfang, *et al.* Comprehensive utilization of titanium-bearing blast furnace slag[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2020(6): 1-6.
(郝百川, 李子越, 贾东方, 等. 含钛高炉渣的综合利用 [J]. 矿产综合利用, 2020(6): 1-6.)
- [7] Yang He, Chen Wei, Ma Shuangshi, *et al.* Experimental study on mechanical properties of high-titanium heavy slag tunnel shotcrete.[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 118-122.
(杨贺, 陈伟, 马双狮, 等. 高钛重矿渣隧道喷射混凝土力学性能试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 118-122.)
- [8] Wang Jie, Li Gen, Liang Yuehua, *et al.* Experimental study on the prediction model of carbonization depth in high Ti-bearing blast furnace slag concrete[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(2): 101-106.
(汪杰, 李根, 梁月华, 等. 高钛型高炉渣混凝土碳化深度试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(2): 101-106.)
- [9] Osman Hulusi Oren, Aliakbar Gholampour, Osman Gencel, *et al.* Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117774.
- [10] Kolisetty R K, Chore H S. Utilization of waste materials in construction activities: A green concept[C]// International Conference on Green Computing and Technology, 2013.
- [11] Hajime O, Masahiro O. Self-compacting concrete: development, present use and future[C]//First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Rilem Publications SARL, 1999: 3-14.
- [12] Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, *et al.* Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures[C]// The Second East-Asia and Pacific Concrete on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Tokyo, Japan, 1989: 445-450.
- [13] He Xiang, Qiao Xiantao, Yu Peng, *et al.* Effect of industrial solid waste powder on the properties of self-compacting high performance concrete[J]. Silicate Bulletin, 2023, 42(11): 4017-4026.
(何翔, 乔险涛, 喻鹏, 等. 工业固废粉末对自密实高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(11): 4017-4026.)
- [14] Zhang Lingling, Wang Haichao, Jiang Peixian, *et al.* Experimental study on the effect of particle shape of solid waste aggregate on the mechanical properties of self-compacting rockfill concrete[J]. Concrete, 2023(10): 201-205.
(张玲玲, 王海超, 姜佩弦, 等. 固废骨料粒形对自密实堆石混凝土力学性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2023(10): 201-205.)
- [15] Chen Jiankui, Wang Dongmin. A new method for mix proportion design of high performance concrete (HPC) -total calculation method[J]. Journal of Silicate, 2000(2): 194-198.
(陈建奎, 王栋民. 高性能混凝土 (HPC) 配合比设计新法——全算法 [J]. 硅酸盐学报, 2000(2): 194-198.)
- [16] Wang Zhen, Li Huajian, Yi Zhonglai, *et al.* New research progress on the stability mechanism and influencing factors of self-compacting concrete[J]. Material introduction, 2017, 31(S1): 379-383.
(王振, 李化建, 易忠来, 等. 自密实混凝土稳定性机理及其影响因素研究新进展 [J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 379-383.)
- [17] Wu Z M, Zhang Y G, Zheng J J, *et al.* An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2087-2092.
- [18] Pal S C, Mukherjee A, Pathak S R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9): 1481-1486.
- [19] Liu Sifeng. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2010.
(刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.)
- [20] Li B, Cai L, Zhu W. Predicting service life of concrete structure exposed to sulfuric acid environment by grey system theory [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(9): 1017-1027.