

基于RSM的新型亲水性橡胶复合水泥混凝土目标优化研究*

Objective Optimization Study of New Hydrophilic Rubber Composite Cement Concrete based on RSM

王旭^{1,2}, 张政¹, 霍志强¹, 夏金刚^{1,2}, 文安飞^{1,2}, 杨征勋^{1,2},

(1. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130;

2. 新疆农业大学交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 橡胶混凝土的配合比设计对其性能及寿命具有重要意义。基于RSM的Box-Behnken中心组合设计, 运用新型亲水性橡胶, 以水泥、粉煤灰、亲水性橡胶掺量作为影响因素, 对亲水性橡胶复合水泥混凝土进行配合比优化, 并以响应值建立预测模型。结果表明: 水泥、粉煤灰、亲水性橡胶掺量分别为 360 kg/m^3 、 65 kg/m^3 和 50 kg/m^3 时, 所得28d抗弯拉强度值最大, 预测模型适应性良好; 水泥、粉煤灰、亲水性橡胶三者交互作用明显, 三者对混凝土抗弯强度的影响依次为亲水性橡胶掺量、水泥掺量、粉煤灰掺量。研究结论可以为亲水性橡胶复合混凝土的配合比设计提供参考。

关键词: 普通硅酸盐水泥; RSM响应模型; 抗弯拉强度; 预测模型

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2023)03-0011-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.011

WANG Xu^{1,2}, ZHANG Zheng¹, HUO Zhiqiang¹, XIA Jingang^{1,2}, WEN Anfei^{1,2}, YANG Zhengxun^{1,2}

(1. Sichuan Transportation Vocational and Technical College, Chengdu 611130, China;

2. College of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The design of rubber concrete ratio is important for its performance and lifetime. Based on the Box-Behnken central combination design of response surface method, a new hydrophilic rubber is used to optimize the ratio of hydrophilic rubber composite cement concrete with cement, fly ash and hydrophilic rubber admixture as influencing factors, and a prediction model is established with response values. The results show that the 28d flexural tensile strength values of cement, fly ash and hydrophilic rubber are the largest when the amounts of cement, fly ash and hydrophilic rubber are 360 kg/m^3 , 65 kg/m^3 and 50 kg/m^3 respectively, and the prediction model is well adapted; the interaction of cement, fly ash and hydrophilic rubber is obvious, and the effects of the three on the flexural strength of concrete are in the order of hydrophilic rubber the amount of cement, and fly ash. The conclusion of the study can provide a reference for the design of the ratio of hydrophilic rubber composite concrete.

Keywords: ordinary portland cement; RSM response model; flexural strength; prediction model

* 基金项目: 成都市科技局重点研发支撑计划(2022-YF05-01051-SN) 四川交通职业技术学院科技项目(2022-QN-KJ-05)

作者简介: 王旭(1997—), 男, 硕士。研究方向: 路基路面工程。

通信作者: 杨征勋(1982—), 男, 博士, 教授。研究方向: 无机非金属材料。

收稿日期: 2023-03-19

0 引言

2020年, 我国所产生的废旧橡胶轮胎达1390万吨^[1], 每年至少仍以8%的速度在增长。废旧轮胎数量的激增对我国生态环境带来了新的挑战, 若不及时处理, 将会引发一系列健康、安全、

环境等问题。将废旧橡胶磨碎后制成橡胶颗粒应用于混凝土是一种新的思路，既可以解决混凝土脆性大、易开裂、低耐久性等问题，也有利于处理“黑色污染”，减少天然砂的需求^[2]。

目前，已有研究表明，疏水性橡胶应用于混凝土会导致强度下降^[3]。但橡胶经过改性后，混凝土性能有所改观^[4]，并且不同的配合比对混凝土的性能及寿命都有影响^[5,6]，现有的研究多考虑单因素之间的影响，对因素之间的交互作用重视不足，因此，对于不同类型的橡胶应用于混凝土的研究仍然有必要进行。鉴于此，本文提出响应面法（Response Surface Methodology, RSM）对多组分、多目标的亲水性橡胶复合混凝土进行配合比优化。相比正交试验法，响应面法具有试验次数少、周期短、精度高，预测效果好等优点，是一种有效地优化基础试验条件的技术^[7]；并且对试验的随机误差有一定的考虑^[8]，能够将复杂未知函数关系在小区域内用简单的多项式关系进行拟合，计算简单。针对亲水性橡胶，以高性能混凝土试验经验为参考^[9]，利用粉煤灰、矿粉作为矿物掺合料，基于 RSM-BBD 模型对橡胶混凝土目标配合比优化，以期亲水性橡胶混凝土的实际工程应用提供参考。

1 试验情况

1.1 原材料

水泥（OPC）：四川峨胜 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥；粉煤灰（FA）：四川金摩尔环保新材料有限责任公司提供的 I 级粉煤灰；矿粉（SF）：四川金摩尔环保新材料有限责任公司提供的 S95 级矿粉；碎石：四川某碎石厂，5~26.5 级配碎石；河砂：四川某砂场，细度模数 2.87，表观密度 2537.47 kg/m³；亲水性橡胶集料（HRA）：具体指标见表 1，基本形貌见图 1；减水剂：聚羧酸高性能减水剂，胶凝材料 1% 添加，减水率 30%；水：自来水。

表 1 橡胶集料的基本性能指标

Table 1 Basic performance indicators of rubber aggregate

橡胶种类	平均粒度 / μm	Zeta 电位 / mv	堆积密度 / (kg/m ³)	接触角 / °
50 目	330	-38.04	615.2	0



图 1 亲水性橡胶基本形貌图

Fig. 1 Basic morphology of hydrophilic rubber

1.2 基本配合比设计

参照规范设计混凝土配合比，选择路用混凝土抗弯拉强度作为指标，设计标准取中等交通量荷载，矿物掺合料取 20%，粉煤灰采用超量取代法^[10]，矿粉为等量取代法，占比分别为 1:1，减水剂按胶凝材料的 1% 添加，基本配合比见表 2。

表 2 混凝土基本配合比

Table 2 Basic concrete ratio / (kg/m ³)				
胶凝材料	粗集料	细集料	水	水胶比
460	1178	633	179	0.39

2 RSM 方案设计

以 OPC、FA、HR 的掺量作为影响因素，采用 BBD 设计试验，因素水平范围见表 3，复合混凝土 28d 抗弯拉强度作为响应指标。结合 Design-expert 13[®] 进行 RSM 分析，研究不同因素及其交互作用对复合混凝土 28d 抗弯拉强度的影响规律，并由此得出最佳优化参数。实验中心设计及结果见表 4。试件尺寸 100 mm×100 mm×400 mm，参照 JTG 3420-2020 《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》测定抗弯拉强度。

表 3 试验影响因素编码及水平

Table 3 Codes and levels of experimental influences

编码	影响因素	水平范围		
		-1	0	1
X	OPC (kg/m ³)	330	360	390
Y	FA (kg/m ³)	50	65	80
Z	HRA (kg/m ³)	50	85	120

表 4 试验中心组合设计方案及结果

Table 4 Experimental center combination design scheme and results

试验组	影响因素			响应指标
	OPC (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	HR (kg/m ³)	28d 抗弯拉强度 (MPa)
1	360	65	85	5.98
2	360	65	85	6.47
3	360	50	50	6.24
4	390	65	50	6.05

材料科学

续表

5	360	65	85	6.50
6	360	80	50	6.14
7	390	65	120	5.00
8	360	80	120	4.70
9	360	65	85	6.30
10	330	65	120	4.20
11	330	80	85	4.40
12	330	50	85	4.57
13	330	65	50	6.47
14	360	65	85	5.88
15	360	50	120	4.30
16	390	50	85	5.10
17	390	80	85	5.42

3 试验结果分析与讨论

3.1 模型检验

基于 Design-expert 13[®]对试验结果的拟合,得到以 28d 抗弯强度为响应值,以 OPC、FA、HR 的掺量作为影响因素的响应曲面模型计算式:

$$28 \text{ d 抗弯拉强度} = -84.09669 + 0.473057X + 0.301079Y - 0.121529Z + 0.000272XY + 0.000290XZ + 0.000238YZ - 0.000705X^2 - 0.003197Y^2 - 0.000132Z^2 \quad (1)$$

上述抗弯拉强度预测模型回归误差统计结果见表 5,方差分析检验结果见表 6。

表 5 模型回归误差统计分析结果

Table 5 Results of statistical analysis of model regression errors

标准差	R ²	Adj. R ²	Pred R ²	Adeq. precision	C. V. %
0.2658	0.9567	0.9009	0.7117	11.2070	4.82

表 6 响应面模型方差分析结果

Table 6 Response surface model ANOVA results

变异来源	平方和	自由度	均方	F-value	p-value
模型	10.92	9	1.21	17.17	0.0006
X	0.4656	1	0.4656	6.59	0.0372
Y	0.0253	1	0.0253	0.3582	0.5684
Z	5.61	1	5.61	79.40	<0.0001
XY	0.0600	1	0.0600	0.8494	0.3874
XZ	0.3721	1	0.3721	5.27	0.0554
YZ	0.0625	1	0.0625	0.8844	0.3783
X ²	1.69	1	1.69	23.97	0.0018
Y ²	2.18	1	2.18	30.82	0.0009
Z ²	0.1102	1	0.1102	1.56	0.2520

取 0.05 作为统计学显著水平值,即当 $p < 0.05$ 时认为模型和因子具有显著性。F 值可表明二次模型中回归系数的重要性,值越大说明该回归系数作用越明显。由表 5 可知,该模型 $p = 0.0006 <$

0.05, R² 为 0.9031,表明该模型的相关性良好; Adj R² 为 0.7786, Pred R² 为 0.7117,且 Adj R² - Pred R² < 0.2 则认为回归模型对其过程解释良好; Adeq. precision 值为 5.760,说明模型中信号与噪声的比值优异; C. V. % 为 4.82,认为该模型准确度较高。由表 6, 28d 抗弯拉强度受影响因素的程度依次为: Z > X > Y。

3.2 模型应用于分析

通过试验实测后,将实测值映射后即可得到制备因素之间的影响曲线,即可得到中心点附近因素对混凝土 28 d 抗弯拉强度的影响曲线图,见图 2。图中曲线 A 代表因素 X,曲线 B 代表因素 Y,曲线 C 代表因素 Z。线条的弯曲程度可说明因素对响应指标的影响。曲线 A 在图中弯曲程度最大,在图中呈现二次抛物线形状,表明因素 X 对响应指标的影响较为显著;因素 Y 则对响应值指标影响相对较小;随着因素 Z 掺量的增加,混凝土 3 d 抗弯拉强度随之减小。

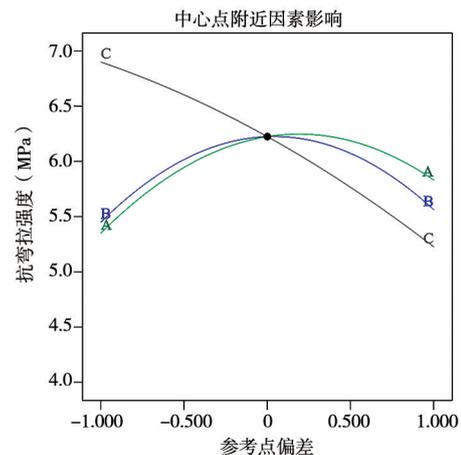


图 2 中心点附近因素对 28 d 抗弯拉强度的影响曲线

Fig. 2 Curve of the effect of factors near the center point on 28 d flexural tensile strength

图 3 表示的是 HRA 掺量 85 kg/m³时, OPC 掺量和 FA 掺量交互作用对亲水性橡胶复合混凝土 28 d 的抗弯拉强度的响应面图。随着 OPC 掺量的增加,抗弯拉强度先增大后减小,三维响应曲面出现扭曲,表明该条件作用下,两者交互作用显著。这是因为水胶比不变,过量的增加 OPC 掺量并不能使之完全水化产生胶凝物质。此时适量的 FA 与 SF 作用相比等量的水泥对混凝土强度增加更为有效,在后期与水泥水化产物发生二次反应,细化混凝土内部孔隙,从而实现强度增长。但 FA 作为

辅助胶凝材料，过量的掺入会导致水化反应隔绝，

坍落度损失严重，从而抑制混凝土强度增长^[11]。

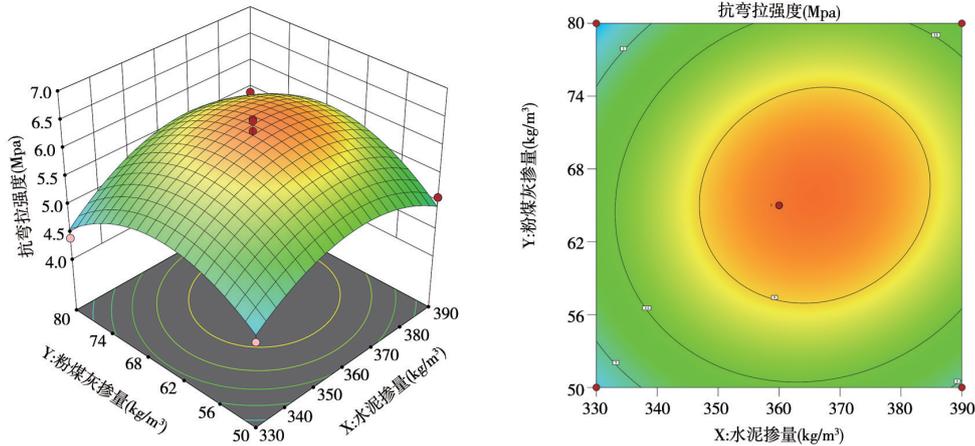


图 3 因素 X 与 Y 交互作用响应曲面图

Fig. 3 Response surface of the interaction between factor X and Y

图 4 表示的是 FA 掺量 $65\text{kg}/\text{m}^3$ 时，影响因素 OPC 与 HRA 交互作用时的响应面图。图中，响应曲面图受两者掺量作用变化幅度较大。随着水泥掺量的增加，混凝土抗弯拉强度先增加后减小。增加橡胶集料掺量后，混凝土抗弯拉强度呈现逐渐减小的趋势。这是由于 OPC 掺量增加后能够促进水化产物的生成，从而促进骨料之间的粘结，

但此时 FA 与 SF 掺量固定，OPC 掺量进一步增大会产生 AFt 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的大量堆积膨胀，胶凝材料浆体中孔隙增加，内部结构破坏。而 HRA 掺量增加后，天然细骨料数量减少，HRA 自身刚度不如天然细骨料，导致混凝土粗、细骨料与胶凝材料之间界面强度削弱，从而强度下降。

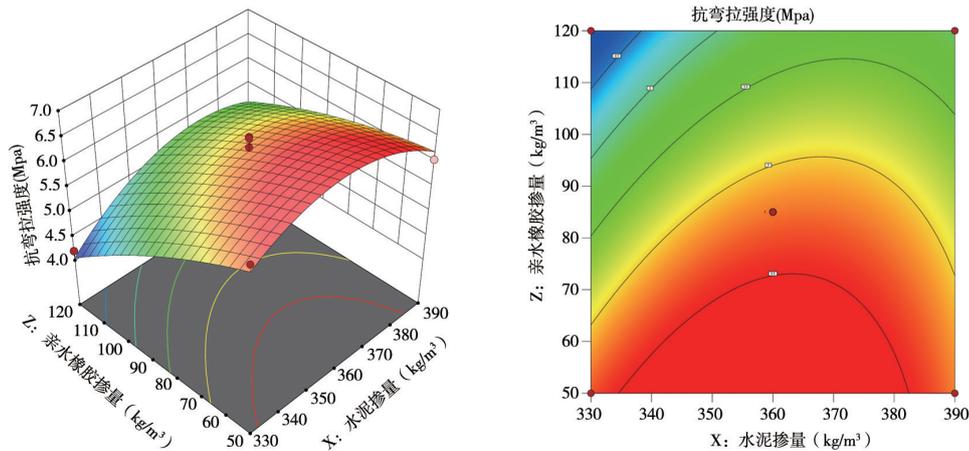


图 4 因素 X 与 Z 交互作用响应曲面图

Fig. 4 Factor X and Z interaction response surface

图 5 表示的是 OPC 掺量在 $360\text{kg}/\text{m}^3$ 时，FA 与 HRA 之间的交互作用。图中，FA 掺量对抗弯强度呈现先增后减的趋势。FA 作为矿物掺合料，一方面具有微粒作用，能够分散胶凝材料浆体中水泥熟料的颗粒，从而改善了 OPC 水化产物的生成场所及浆体的初始结构^[12]。另一方面，FA 自身玻璃微珠表面稳定，具有火山灰效应，不能直接

发生水化反应，加上 OPC 掺量固定，并不是给 FA 提供足够 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激活性，从而限制了 C-S-H 和 AFt 的生成量，此时 FA 的物理效应起主要作用，过量的掺入并不能提高强度。HRA 的掺入则会使混凝土中胶凝体系薄弱点数量增加，致使强度下降。

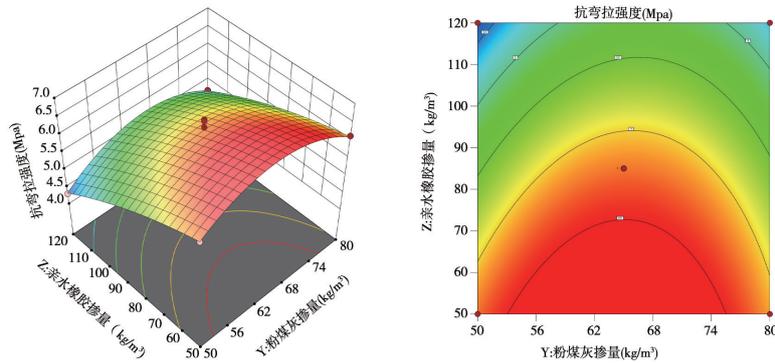


图 5 因素 Y 与 Z 交互作用对抗弯强度的响应曲面图

Fig. 5 Response surface of the interaction of factors Y and Z on flexural strength

4 模型验证

以路用混凝土为研究对象, 28 d 抗弯拉强度值作为目标优化值, 选取 OPC、FA、HR 的掺量作为影响因素, 在 RSM 范围内寻找最优解。其中, 得出其满足目标的条件为: OPC 掺量 363.324~374.827 kg/m³、FA 掺量 65.771~69.366 kg/m³、HRA 掺量 53.231~68.480 kg/m³。为后续试验方便进行, 此处取 OPC 掺量 360 kg/m³、FA 掺量 65 kg/m³、HRA 掺量 50 kg/m³。并且, 以平行试验对优化方案进行验证, 结果见表 7。模型预测值与实测值误差 < 5%, 表明模型参考性较强。

表 7 预测及验证试验结果

Table 7 Prediction and validation experimental results

	预测值	实测值	误差 (%)
28 d 抗弯强度 (MPa)	6.54	6.85	4.75

5 结论

(1) 基于 RSM-BBD 方案设计试验, 测定 17 组配合比亲水性橡胶复合混凝土 28d 抗弯拉强度, 结果表明 OPC 与 FA、HRA 之间交互作用明显, 三因素对亲水性橡胶混凝土抗弯拉强度影响程度如下: HRA 影响最明显, OPC 次之, FA 影响最小。

(2) 通过 Box-Behnken 中心组合设计, RSM 目标得出的最佳配合比为 OPC 掺量 360 kg/m³、FA 掺量 65 kg/m³、HRA 掺量 50 kg/m³。

(3) 基于 RSM 建立 OPC、FA、HRA 掺量为影响因素的复合混凝土抗弯拉强度回归模型, 通过试验验证, 预测结果准确有效, 表明 RSM 对亲水性橡胶复合水泥混凝土配合比优化具有可行性。可以为亲水性橡胶的配合比设计提供相关参考。

参 考 文 献

- [1] 岳红亚, 毕玉峰, 徐润, 等. 废旧轮胎在道路工程中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2022, (016): 036.
- [2] 蒋泽宇, 宋少民, 林海超. 菲律宾天然河砂的优化及其混凝土制品性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (06): 81-86.
- [3] AMIRI M, HATAMI F, GOLAFSHANI E M. Evaluating the synergic effect of waste rubber powder and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of concrete [J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00639.
- [4] KASHANI A, NGO T D, HEMACHANDRA P, et al. Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 467-473.
- [5] 宋少民, 刘娟红, 张希清. 回归设计在粉煤灰高强泵送混凝土配合比设计中的应用 [J]. 粉煤灰综合利用, 1998, (3): 34-36.
- [6] 郭威, 刘娟红. 新疆沙漠细砂混凝土配合比及混凝土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2014, (4): 28-31.
- [7] KELECHI S E, U O U, ADAMU M, et al. Modeling and optimization of high-volume fly ash self-compacting concrete containing crumb rubber and calcium carbide residue using response surface methodology [J]. Arabian Journal for Science and Engineering,
- [8] 李亚齐, 倪文, 徐东, 等. 正交试验法在低掺量碱渣全固废混凝土中的应用 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017, (1): 29-32+38.
- [9] 马天柱, 姚佳良, 姚丁. 水泥路面混凝土配合比优化设计 [J]. 公路工程, 2015, 40 (1): 152-155+169.
- [10] 聂庆科, 于俊超, 李华伟, 等. 抗硫酸盐腐蚀混凝土中粉煤灰临界掺量的估算方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2018, (6): 70-73+80.
- [11] 马士宾, 许艳伟, 杨鑫玮, 等. 基于响应面的路用高性能水泥混凝土配合比优化研究 [J]. 混凝土, 2017, (12): 164-168.
- [12] 吴建华. 高强高性能大掺量粉煤灰混凝土研究 [D]; 重庆大学, 2005.