

基于响应曲面法的废胶粉-玄武岩纤维复合改性水泥稳定碎石性能研究

盛 森

(四川乐西高速公路有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 为了提高水泥稳定碎石的干缩性能和力学性能,采用玄武岩纤维和废胶粉对其进行复合改性。基于响应曲面法中的Box-Behnken模块进行了3因素3水平的正交实验,研究胶粉掺量、玄武岩纤维长度及掺量对7 d抗压强度、7 d弯拉强度和28 d干缩系数的影响。结果表明:玄武岩纤维能显著提升水泥稳定碎石的抗压和弯拉强度,对干缩性能也有一定改善;胶粉则主要改善干缩性能,但对力学性能有减弱作用。综合性能最优时的配比为:8.58%玄武岩纤维+12 mm玄武岩纤维+4.48%胶粉,且性能优于普通水泥稳定碎石。

关键词: 废胶粉;玄武岩纤维;水泥稳定碎石;性能研究

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0236-07

Study on the Performance of Waste Rubber Powder-basalt Fiber Composite Modified Cement Stabilized Macadam Based on Response Surface Methodology

SHENG Sen

(Sichuan Lexi Expressway Co., Ltd., Chengdu City, Chengdu 610000, China)

Abstract: To enhance the dry shrinkage resistance and mechanical properties of cement-stabilized macadam, a composite modification approach was employed utilizing basalt fibers and waste rubber powder. A three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted based on the Box-Behnken module within the response surface methodology, investigating the effects of rubber powder content, basalt fiber length, and basalt fiber content on 7-day compressive strength, 7-day flexural tensile strength, and the 28-day dry shrinkage coefficient. The results indicated that the incorporation of basalt fibers significantly elevated both the compressive and flexural tensile strengths of the cement-stabilized macadam, while also exhibiting a moderate improvement in dry shrinkage behavior. Conversely, the addition of rubber powder primarily targeted the enhancement of dry shrinkage performance but had a weakening effect on the mechanical properties. The optimal blend ratio for comprehensive performance was determined to be 8.58% basalt fiber content with 12 mm basalt fibers, complemented by 4.48% rubber powder, achieving performance superior to that of conventional cement-stabilized macadam.

Keywords: waste rubber powder; basalt fiber; cement stabilized macadam; performance research

0 引 言

传统水泥稳定碎石易干缩、抗冻性差、抗冲击性能弱,在车辆荷载与环境温度变化下易产生裂缝,并引发反射裂缝,损害公路性能,缩短使用寿命。众多学者尝试采用纤维类和橡胶类改性剂提升水泥稳定碎石基层的路用性能,并取得了积极的效果。

舒洪波等^[1]基于正交试验研究了玄武岩纤维掺

量对不同工况混合料的劈裂强度和无侧限抗压强度,发现掺入玄武岩纤维后,水泥稳定碎石的抗压性能和劈裂强度均得到显著提升。吴启一等^[2]利用间接拉伸试验、弯拉强度试验、无侧限抗压试验研究了水泥稳定碎石的力学性能在不同短切玄武岩纤维掺量下的影响,结果表明,在水泥稳定碎石中适量掺入短切纤维,能够有效增强其使用性能。张清峰等^[3]利用玄武岩纤维改性透水水泥稳定碎石的力学性能和透水性能,研究表明,玄武岩纤维可以显著提高透水水泥稳定碎石的劈裂强度和抗压强度和强压强度,其中掺在0.7‰时性能最佳,且对其透水性影响

收稿日期: 2024-06-30

作者简介: 盛森(1990—),男,硕士,工程师,从事试验检测、高速公路建设管理等工作。

较小。周志刚等^[4]为解决基层易开裂的问题,尝试以胶粉和纤维作为复合改性剂,与水泥稳定碎石进行混合搅拌,以提升其抗裂性能,结果发现掺入胶粉可以显著改善水泥稳定碎石的干缩性能而掺入纤维可以改善水泥稳定碎石的强度和抗冲击韧性。胡勇勇等^[5]对比研究了纤维、胶粉和胶纤复合三种改性水泥稳定碎石,发现胶粉可以有效改善其抗冻性能和抗干缩性能,纤维对水泥稳定碎石的抗冲击韧性优于橡胶,复合改性水泥稳定碎石在路用性能上得到较大改善。

当前,对水泥稳定碎石性能提升研究大多使用单一改性剂,无法使得其路用性能得到全面提升,偶有复和改性但评价指标较为单一,对于综合提升水泥稳定碎石还需要做进一步研究。本文利用玄武岩纤维和胶粉对水泥稳定碎石进行复合改性,利用7 d无侧限抗压强度、7 d弯拉强度和28 d干缩系数作为评价指标进行响应曲面分析,从而确定了最佳水平的纤维掺量和胶粉掺量,最后验证在最佳改性剂掺量下水泥稳定碎石的力学性能和干缩性能。

1 试验

1.1 试验材料

废胶粉采用常州某建材有限公司利用废汽车轮胎所生产的粒径为60目的胶粉,如图1所示。本研究将废胶粉掺量与细集料进行等体积替换,废胶粉的相关性能指标如表1所列。



图1 玄武岩纤维

表1 废胶粉相关性能指标

性能指标	灰分/ %	炭黑/ %	丙酮抽 出物/%	密度/ (g·cm ⁻³)	天然胶 质量/%
实测指标	7	30	7	1.26	45.23
规范要求	≤8	≥28	≤22	1.10~1.30	≥25.00

玄武岩纤维采用湖州某公司生产的短切纤维,如图2所示,并根据规范要求对其进行质量检测,均符合规范要求,详细指标见表2。



图2 废胶粉

表2 玄武岩纤维物理性能指标

纤维长度/ mm	单线直径/ μm	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ GPa	拉伸强度/ MPa
6、9、12	7~15	2.63~2.65	91~110	3 000~4 800

试验选用普通硅酸盐水泥(P.042.5)进行水泥稳定碎石的制备,基本性能指标测试结果如表3所示,本研究选用5%的固定水泥掺量。集料采用玄武岩矿石作为级配碎石,共4档矿料(19~31.5 mm)、(9.5~19 mm)、(4.75~9.5 mm)、(0~4.75 mm),技术指标测试结果均规范要求。

表3 废胶粉相关性能指标

试验项目		测试结果	技术要求
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)		357	≥300
密度/(kg·m ⁻³)		3 070	—
凝结 时间/min	初凝时间	191	≥45
	终凝时间	278	≤600
3 d抗折强度/MPa		5.4	≥3.5
3 d抗压强度/MPa		30.3	≥17
安定性			
烧失量/%		363	≥300

1.2 级配

依据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T-F20—2015)中规定的水泥稳定碎石级配范围,并兼顾普遍适用性,本文选取规范内推荐的C-B-3级配作为基准,并采用该级配的中值作为本文级配,如表4所列。

表4 水泥稳定碎石级配

筛孔尺寸/mm	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配	100	77.0	48.0	27.0	22.0	11.5	1.5

1.3 响应曲面法试验设计

已有研究表明橡胶粉可显著改善水泥稳定碎石的干缩性能、抗疲劳性能、抗冻性能等,在另一方面还能减少废旧轮胎对环境产生的污染。针对水泥稳定碎石易开裂的特性,我们采用玄武岩纤维对其进行改性,通过变化玄武岩纤维的掺量和长度研究其

对水泥稳定碎石的影响。因此本文以废胶粉、玄武岩纤维掺量和玄武岩纤维长度 3 个自变量作为响应曲面法的影响因素,并在参考相关文献^[6-7]的基础上分别设置了 3 个合适的水平等级,自变量及其水平见表 5。

表 5 自变量及其水平

水平	因素		
	A 废胶粉掺量/%	B 纤维掺量/‰	C 纤维长度/mm
1	0.3	0.3	6
2	0.5	0.6	9
3	0.7	0.9	12

1.4 击实试验

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009),选着丙法进行击实试验,确定出不同配比的最佳含水率和最大干密度,试验结果如表 6 所列。

表 6 击实试验结果

试验号	因素			最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
	A 废胶粉掺量/%	B 纤维掺量/‰	C 纤维长度/mm		
1	3	3	9	4.7	2.383
2	7	3	9	4.5	2.379
3	3	9	9	4.4	2.375
4	7	9	9	4.4	2.386
5	3	6	6	4.5	2.390
6	7	6	6	4.6	2.384
7	3	6	12	4.7	2.378
8	7	6	12	4.6	2.388
9	5	3	6	4.8	2.378
10	5	9	6	4.5	2.366
11	5	3	12	4.3	2.373
12	5	9	12	4.5	2.367
13	5	6	9	4.6	2.382

2 试验方法

2.1 试件的成型与养护

本文采用两种尺寸的试件进行水泥稳定碎石混合料的性能测定。圆柱形试件用于测定其 7 d 的无侧限抗压强度,尺寸为直径 150 mm×高 150 mm。梁式试件则用于评估该混合料的 7 d 抗弯拉强度及进行 28 d 的干缩试验,尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。试件在脱模后,立即用塑料袋密封,随后被置于温度控制在(20±2)℃、相对湿度高于 95% 的养护室内,按标准时长进行养护。养护完成后,试件需在水中浸泡 24 h,之后进行相应的性能测试。

2.2 试验方案

使用压力机对试件做 7 d 抗压测试,加载速度为 1 mm/min,记录破坏时的峰值压力。利用 MTS 万能试验机进行弯拉强度试验,试验采用四点弯曲法进行,加载速率设定为 50 mm/min;采用千分表对试件进行干缩变形测量,并称量出试件的质量变化,从而计算出每个阶段下的干缩系数。前 7 d 每天读数一次并且记下每个试件的表读数,并确保读数精确到 0.001 mm,7 d 后读数频率可调整为每 2 d 一次。每种配比设置三个平行试件,当一组测试值与平均值之差大于标准差的 1.15 倍时,重新补做试件,最后取平均值进行响应曲面分析。

3 试验结果与分析

3.1 试验设计及结果

本次试验是利用 Design-Expert 13.0 软件中的 Box-Behnken 模型,对胶粉掺量、玄武岩纤维掺量、玄武岩纤维长度进行 3 因素 3 水平设计,并以对应 7 d 无侧限抗压强度、7 d 弯拉强度、第 28 d 时的干缩系数值作为响应变量进行响应曲面设计,试验设计与结果见表 7 所示。

表 7 试验设计与结果

编号	胶粉掺量/%	纤维量/‰	纤维长度/mm	7 d 无侧限抗压强度/MPa	7 d 弯拉强度/MPa	28 d 干缩系数/10 ⁻⁶
1	3	3	9	4.37	1.82	176
2	7	3	9	4.21	1.66	161
3	3	9	9	4.73	2.16	172
4	7	9	9	4.42	1.82	155
5	3	6	6	4.62	2.07	171
6	7	6	6	4.31	1.78	159
7	3	6	12	4.68	2.12	169
8	7	6	12	4.37	1.76	152
9	5	3	6	4.34	1.77	166
10	5	9	6	4.58	2.03	161
11	5	3	12	4.36	1.85	164
12	5	9	12	4.63	2.06	158
13	5	6	9	4.66	1.93	162
14	5	6	9	4.66	1.93	162
15	5	6	9	4.66	1.93	162
16	5	6	9	4.66	1.93	162
17	5	6	9	4.66	1.93	162

3.2 试验结果分析

3.2.1 回归模型的方差分析

以 7 d 无侧限抗压强度为例,利用 Design-Expert 13.0 软件中的方差和显著性检验功能,分析 A(胶粉

掺量)、 B (玄武岩纤维掺量)、 C (玄武岩纤维长度)对针入度的影响程度,得到针入度与 A 、 B 、 C 三因素的模型方程如式(1)所示,回归模型的方差分析如表8所列。

$$\begin{aligned} \text{无侧限抗压强度} = & 4.66 - 0.136A + 0.135B \\ & + 0.0238C - 0.0375AB \\ & + 0.001AC + 0.0075BC \\ & - 0.105A^2 - 1.225B^2 - 0.06C^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A 代表胶粉掺量,%; B 代表纤维掺量,%; C 代表纤维长度。

表8 无侧限抗压强度的方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
模型	0.442 6	9.00	0.049 2	96.3	<0.000 1	显著
A -PPA 掺量	0.148 5	1.00	0.148 5	290.79	<0.000 1	
B -SBR 掺量	0.145 8	1.00	0.145 8	285.48	<0.000 1	
C -剪切时间	0.004 5	1.00	0.004 5	8.84	<0.000 1	
AB	0.005 6	1.00	0.005 6	11.01	0.012 8	
AC	0.000 1	1.00	0.000 1	0.02	0.999	
BC	0.000 2	1.00	0.000 2	0.4406	0.528 1	
A^2	0.046 4	1.00	0.046 4	90.89	<0.000 1	
B^2	0.063 2	1.00	0.063 2	123.72	<0.000 1	
C^2	0.015 2	1.00	0.015 2	29.68	0.001	
残差	0.003 6	7	0.000 5			
失拟误差	0.003 6	3	0.001 2			
纯误差	<0.001	4	<0.001			
总和	0.446 2	16				
R^2	0.992 0	C.V.%	0.499			

由表8可知,模型的 P 值<0.000 1,证明采用响应面法预测无侧限抗压强度值具有很好的可行性。另外三个影响因素 P 值均<0.000 1,说明三个因素对水泥稳定碎石的抗压强度都有较大影响。 R^2 为0.992说明试验实际值与模型方程拟合精度较高,实际值与预测值具有很好的相关性。实验针入度 $CV=0.499\%$,远低于一般变异系数15%,说明该模型具有较高的精度,可以完全用该模型解释。为了更加直观体现模型预测曲线与实际值之间的关系,将无侧限抗压强度值的预测值与实际值进行了对比,如图3所示。

由图3可知,实测值均在模型预测值附近,拟合精度较高,说明所选择的模型能够准确地反映无侧限抗压强度响应变量与 A 、 B 、 C 3个自变量之间的相关关系。

3.2.2 各因素交互作用分析

为更直观展现不同影响因素对水泥稳定碎石性能的影响变化趋势,将不同改性剂掺量下的7 d无侧限抗压强度、7 d弯拉强度、28 d干缩系数试验数据

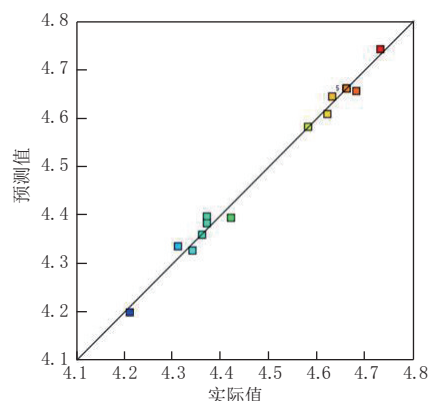


图3 无侧限抗压强度预测值与实际值

绘制出响应曲面。

(1) 7 d无侧限抗压强度

按照前文的试验设计进行了不同改性剂配比下的无侧限抗压强度试验,7 d无侧限抗压强度与各自变量间的交互作用响应曲面图如图4所示。

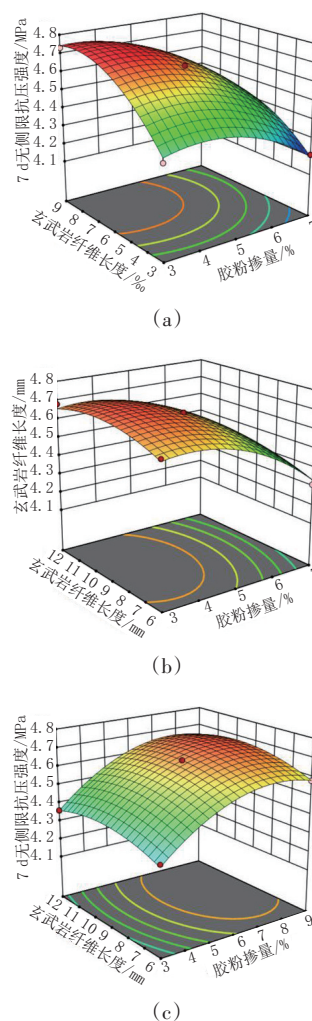


图4 7 d无侧限抗压强度与自变量之间的响应曲面图

从图4可知,纤维长度与抗压强度正相关,纤维越长,抗压强度越大。但胶粉掺量增加会导致抗压强度下降。特别地,抗压强度随纤维掺量的增加呈

现先增后减趋势,凸显了纤维长度的重要性。分析表明,均匀分散的纤维在混合料中形成空间网状结构,起桥联作用,类似加筋效果,能“箍锁”水泥砂浆并隔离损坏区域,有效控制裂纹扩展,缓解应力集中,延缓裂纹发展。适量玄武岩纤维能显著提升抗压强度,过量则会降低水泥与集料黏结效果,削弱抗压强度。相比之下,胶粉掺入会减弱抗压强度,可能是因其模量低于水泥稳定碎石,无法提供足够强度支持。

(2) 7 d 弯拉强度

7 d 弯拉强度与各因素之间的对应试验结果如图 5 所示。

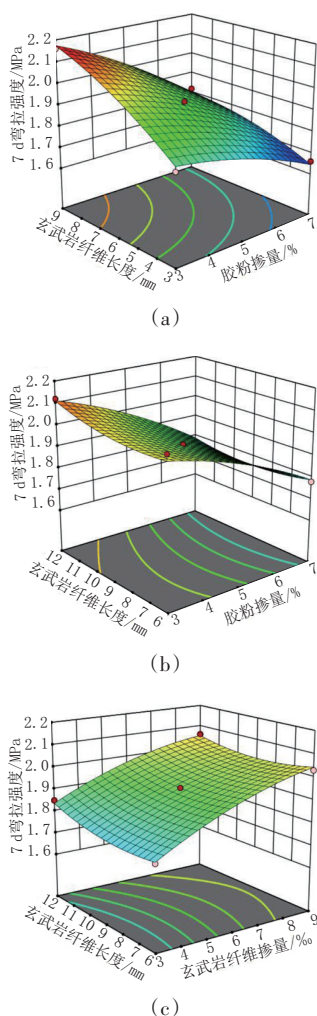


图 5 7 d 弯拉强度与自变量之间的响应曲面图

由图 5 可知,7 d 弯拉强度随玄武岩纤维长度增加而逐渐提升,且长度越长效果越显著;随胶粉掺量增加而逐渐降低。与无侧限抗压强度不同,弯拉强度随玄武岩纤维掺量增加也呈现上升趋势。这表明:短纤维范围内,玄武岩纤维长度对弯拉强度提升作用较弱,但随着纤维长度增加,提升作用持续增

强。这可能是因为纤维长度增加导致纤维与基体材料界面面积增大,提高了纤维与基体的粘结力,进而增强了弯拉强度。玄武岩纤维掺量越多,加筋效果越显著,弯拉强度越高。另一方面,胶粉掺量增加导致弯拉强度明显降低,这可能是由于胶粉改变了基体材料的力学性能和微观结构,降低了基体材料的强度和韧性。

(3) 28 d 干缩系数

为评价自变量对水泥稳定碎石干缩性能的改善情况,本文以第 28 d 时的干缩系数作为水泥稳定碎石的干缩性能评价指标,各因素对干缩系数的影响如图 6 所示。

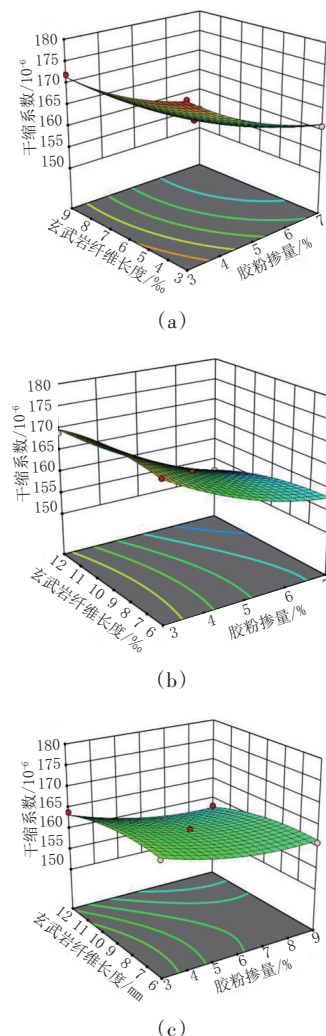


图 6 28 d 干缩系数与自变量之间的响应曲面图

由图 6 可知,虽然水泥稳定碎石的干缩性能随着纤维掺量和长度的增加,能够起到改善作用,但胶粉的改善效果更为显著。分析表明,虽然玄武岩纤维能改善干缩性能,但因其不具备膨胀和填充能力,相比之下胶粉效果更显著。这可能是因为胶粉能有效填充水泥颗粒间空隙,减少水分蒸发导致的体积收

缩,同时其黏结性也能增强水泥稳定碎石的内部结构稳定性。

3.2.3 改性剂掺量确定

从上述分析可知:胶粉掺量、玄武岩纤维掺量和长度均能对水泥稳定碎石的干缩系数、抗压强度、弯拉强度产生较大影响,在已有组合中无法得到一个工艺组合使得各响应指标综合性能最优,需要通过软件进一步计算找到最佳组合。拟合方程如式(2)~(3)所示。

$$\begin{aligned} 7\text{ d弯拉强度} = & 1.93 - 0.144A + 0.121B \\ & + 0.0175C - 0.045AB \\ & - 0.0175AC - 0.0125BC \\ & - 0.03A^2 - 0.035B^2 - 0.033C^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 28\text{ d干缩系数} = & 162 - 7.62A - 2.62B \\ & - 1.75C - 0.5AB \\ & - 1.25AC - 0.25BC \\ & + 2.25A^2 - 1.75B^2 - 1.5C^2 \end{aligned} \quad (3)$$

以7 d无侧限抗压强度、7 d弯拉强度值最大、28 d干缩系数最小为目标,采用响应面法模拟得到在综合响应值最优时对应的最佳改性剂掺量和纤维长度,如图7所示。

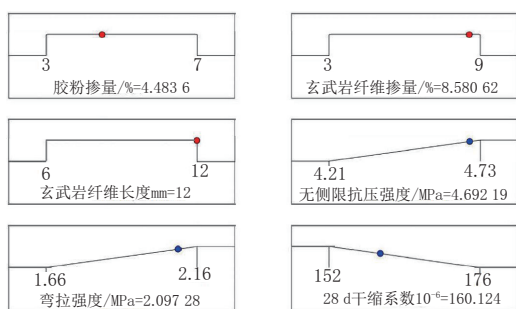


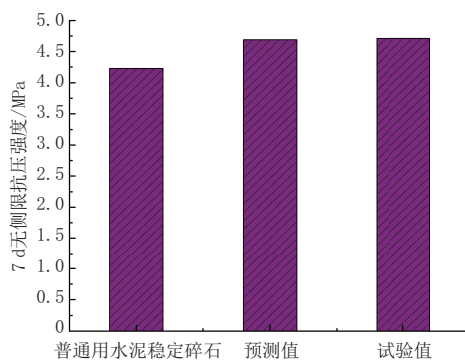
图7 响应值综合最优所对应的自变量因素值

由图7可知,在综合3个性能响应值最优时软件给出胶粉掺量为4.48%,玄武岩纤维掺量为8.58‰,玄武岩纤维长度为12 mm,对应最优响应值为:抗压强度=4.69 MPa,弯拉强度=2.097 MPa,干缩系数=160.12×10⁻⁶。

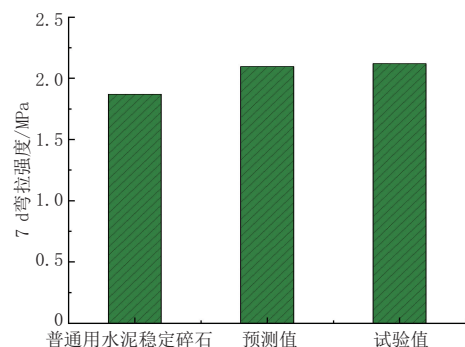
3.2.4 验证分析

为验证拟合的最佳影响因素水平下的响应预测值与试验值是否相符,在胶粉掺量为4.48%,玄武岩纤维掺量为8.58‰,纤维长度为12 mm时制备圆柱试件和小梁试件进行抗压强度试验、弯拉强度试验、干缩试验,每组试验测试5个试件取其平均值为最终试验数据,以保证数据可靠性,并将响应试验值与拟合值进行分析对比,如图8所示。

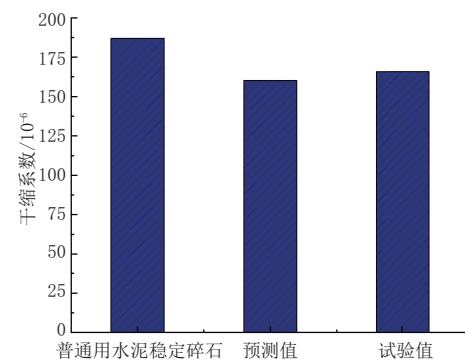
由图8可知,采用拟合得到的综合性能最优条件下的制备工艺,制备得到的水泥稳定碎石的抗压强



(a) 7 d无侧限抗压强度



(b) 7 d弯拉强度



(c) 28 d干缩系数

图8 试验值与预测值对比

度、弯拉强度、累计干缩系数与模型预测值误差均不超过1%,表明响应曲面法可以用于胶粉-玄武岩纤维复合改性水泥稳定碎石的设计,并且可以利用此方法寻找到满足实际需要的胶粉掺量、玄武岩纤维掺量、纤维长度三者之间的最佳组合,同时也说明响应曲面法对复合改性水泥稳定碎石工艺优化具有一定的可靠性,此外改性后的水泥稳定碎石性能显著高于普通水泥稳定碎石。

4 结 语

(1)玄武岩纤维长度的增加会提升7 d无侧限抗压强度,但其掺量则存在最佳值,过多会导致强度下降;胶粉掺入会削弱抗压强度。

(2)玄武岩纤维的长度和掺量均能有效增强弯

拉强度,尤其是长度因素更为显著;而胶粉则对弯拉强度有负面影响。

(3)玄武岩纤维的掺量和长度均有助于改善水泥稳定碎石的干缩性能,但胶粉的掺量在改善干缩性能上表现更为突出。

(4)水泥稳定碎石在胶粉掺量4.48%、玄武岩纤维掺量8.58%、纤维长度12 mm的条件下,展现出最佳的抗压强度、弯拉强度和干缩性能。

参考文献:

- [1] 舒洪波,唐正光,张燕红,等.玄武岩纤维对水稳碎石基层强度的影响[J/OL].中外公路,2024:1-8(2024-10-29)[2024-11-12].
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=olAaYX60CNKZmer1xsvcUnZdXEPmN2Yte35cB54BErRdl0D1nO-a_5g00Fk80GCqqwVQeei7rw

8Ves9APY8p8UzYpU6DzZXZcs2AC7KHHfKkl050QJUveHvVLQTTpoqlWS_YLHl3-l0LL6WigfFDqcHtMC7NPFrz_Mg7MoUR4iMuKKZfvD8f-MdRxw7ZOb6&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

- [2] 吴启一,姚华彦,扈惠敏,等.玄武岩纤维对水泥稳定多孔玄武岩碎石力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(1):192-198.
- [3] 张清峰,张昌伟,林雄,等.玄武岩纤维改性透水水泥稳定碎石试验研究[J].铁道工程学报,2020,37(7):18-22.
- [4] 周志刚,李振威,陶正文,等.胶粉纤维改性水泥稳定碎石抗裂性能研究[J].交通科学与工程,2024,40(2):28-37.
- [5] 胡勇勇,陶正文,周志刚,等.胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石路用性能研究[J].公路,2024,69(4):36-42.
- [6] 曹航.橡胶-玄武岩纤维复合改性水泥稳定碎石力学性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [7] 范志新.复合改性水泥稳定碎石抗裂性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2021.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

