

PVA 纤维水泥基复合材料配合比优化及工程应用研究

林华明¹, 罗毅², 李红中², 赵令豪¹, 徐凯燕²

(1. 广东交科检测有限公司, 广东 广州, 510550; 2. 广东交通职业技术学院, 广东 广州, 510650)

摘要: 为合理设计 PVA 纤维水泥基复合材料配合比, 借助 Design Expert 软件, 以 PVA 纤维掺量、粉煤灰掺量和水胶比为变量, 抗压强度与抗折强度为响应变量, 采用 Central Composite Design 响应面设计法, 建立 PVA 纤维水泥基复合材料的力学性能回归模型, 并对模型进行显著性分析、方差分析以及响应面综合分析, 预测最佳材料组成并进行试验验证, 开展工程应用。结果表明: 借助响应面法建立的回归模型能较为准确地反映各影响因素与性能之间的相关关系, 可信度达到 97% 以上; 各因素对抗压强度的影响顺序为: 水胶比 > PVA 纤维掺量 > 粉煤灰掺量, 对抗折强度的影响顺序为: PVA 纤维掺量 > 粉煤灰掺量 > 水胶比; 经优化, PVA 纤维水泥基复合材料最佳配合比为: PVA 纤维掺量 1.5%、粉煤灰掺量 40%、水胶比 0.25, 综合性能最佳; 工程应用效果显著, 具有借鉴意义。

关键词: 工程材料; PVA 纤维; 水泥基复合材料; 配合比优化; 力学性能; 工程应用

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Mix Proportion Optimization and Engineering Application of PVA Fiber Cement-based Composites

LIN Huaming¹, LUO Yi², LI Hongzhong², ZHAO Linghao¹, XU Kaiyan²

(1. Guangdong Transportation Technology Testing Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China;

2. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: To reasonably design the mix proportion of PVA fiber engineered cementitious composites, with the help of Design Expert software, the PVA fiber content, fly ash content, and water-binder ratio were used as variables, and the compressive strength and flexural strength were used as response variables. The Central Composite Design response surface design method was used to establish the regression model of mechanical properties of PVA fiber engineered cementitious composites. The models were subjected to the significance analysis, variance analysis and the comprehensive analysis of response surface figure, and predicted the optimal material composition and carried out experimental validation. And the engineering application was carried out. The results show that the regression model established by the response surface methodology can accurately reflect the correlation between the influencing factors and the performance, and the reliability is more than 97%. The order of influence of various factors on compressive strength is: water-binder ratio > PVA fiber content > fly ash content, and the order of influence on flexural strength is: PVA fiber content > fly ash content > water-binder ratio. After optimization, the best mix ratio of PVA fiber engineered cementitious composites is: PVA fiber content 1.5%, fly ash content 40%, water-binder ratio 0.25, and the comprehensive performance is the best. The engineering application effect is remarkable and has reference significance.

Key words: engineering material; PVA fiber; engineered cementitious composites; mix proportion optimization; mechanical property; engineering application

收稿日期: 2025-01-10

作者简介: 林华明, 工程师, 本科, 研究方向为道路桥梁试验检测

基金项目: 广东省普通高校重点科研平台项目 (编号: 2024GCZX023; 2023CJPT003); 广东省高职教育质量工程项目 (编号: 2023JG185); 广东省高等职教委教改项目 (编号: GDGX202401012); 广东交通职业技术学院教科研项目 (编号: GDGP-ZX-2025-016-N1; GDGP-ZX-2024-001-N1; GDGP-ZX-2023-003-N5); 广东交通职业技术学院校级大学生创新创业训练计划项目 (编号: ZC-AB-34-0102-124; ZC-AB-34-0102-131)

传统混凝土材料力学性能和耐久性表现优异,但韧性不足,这一缺点严重制约了工程结构的安全性和耐久性^[1-2]。当前,聚乙烯醇纤维(PVA 纤维)水泥基复合材料因其高韧性和窄裂纹而备受瞩目,对于建筑物的性能提升、寿命周期延长具有重要现实意义^[3]。

现有研究表明 PVA 纤维技术指标、粉煤灰掺量、水胶比等是影响 PVA 纤维水泥基复合材料性能优劣的关键因素。Said 等^[4]指出当 PVA 纤维长度为 8 mm 时,水泥基复合材料抗压强度高达 62.98 MPa。Noushini 等^[5]则发现在 6 mm 长度下,材料抗压强度更是高达 67.0 MPa,是普通混凝土的 1.12 倍。Bheel 等^[6]发现 1.0% PVA 纤维最佳掺量下,材料抗弯强度高达 11.15 MPa。吴立朋等^[7]发现在 2.2% PVA 纤维掺量下,材料冻融损伤程度最低,质量损失率仅为 1.97%。Cai 等^[8]设计了 50%~80% 粉煤灰掺量下 PVA 纤维水泥基复合材料抗弯试验,发现材料极限抗拉强度为 3.1~5.4 MPa,但与普通混凝土相比,能耗降低 38.7%,碳排放降低 44.6%。Shabakhty 等^[9]指出掺入粉煤灰会降低 PVA 纤维水泥基复合材料的强度。Cai 等^[10]发现随着水胶比从 0.25 增大至 0.35,材料极限抗拉强度增大,极限抗拉应变逐渐减小。姚淇耀等^[11]观察了不同水胶比下海砂-PVA 纤维水泥基复合材料拉伸破坏断面的 SEM 图像,发现随着水胶比的增加,基体的强度逐渐提升。综上所述,现有研究多采用对 PVA 纤维水泥基复合材料性能影响因素逐步优化的方法以优化材料配合比,此过程通常伴随着较大的试验工作量;且既有研究局限于单一因素的影响规律研究,材料性能的演变规律往往是由因素间的交互作用决定的,从而造成逐步优化的试验设计会错失因素间的最优组合。当前,响应面法是一种综合性试验设计和数学建模优化的方法,可建立拟合全局范围内各因素与结果间的函数关系,获得各因素最优水平值,并且能够研究多种因素间交互作用对目标响应值的影响。

鉴于此,本文借助 Design Expert 软件,以 PVA 纤维掺量、粉煤灰掺量和水胶比为影响因素,抗压强度与抗折强度为响应目标值,采用响应面中心复合设计法,建立了 PVA 纤维水泥基复合材料的力学性能预测模型,并对模型进行了显著性分析、方差分析以及响应面综合分析,预测了最佳材料组成并进行了试验验证,以期为后续 PVA 纤维水泥基复合材料的进一步研究与推

广应用提供有益借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

优选外观为淡黄色的高强高模 PVA 纤维,其技术参数见表 1。水泥采用 P-O 42.5 级硅酸盐水泥,粉煤灰为 I 级,化学成分见表 2。细骨料采用粒径在 80~100 目的石英砂,减水剂为高效聚羧酸减水剂,试验拌合用水为本地自来水。

表 1 PVA 纤维相关技术参数

颜色	长度/ mm	直径/ μm	密度/ (g/cm ³)	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	伸长率/ %
淡黄色	12	39	1.3	42	1600	6

表 2 凝胶材料的相关化学成分

单位:%								
化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
水泥	21.6	5.85	2.84	59.80	2.24	2.06	0.21	0.67
粉煤灰	46.43	38.02	3.11	7.51	0.23	0.68	0.34	0.89

1.2 试验方法

不同工况下 PVA 纤维水泥基复合材料的 28 d 抗压强度与 28 d 抗折强度均依据《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JC/T 2461—2018)的相关规定执行。

2 PVA 纤维水泥基复合材料试验研究

2.1 响应面试验设计

本研究以 PVA 纤维掺量(A)、粉煤灰掺量(B)与水胶比(C)为影响因素,28 d 抗压强度和 28 d 抗折强度为响应目标值,采用 Design Expert 13.0 软件中的 CCD 设计三因素五水平试验方案,共计 20 组试验,其中,14 组为析因点,6 组为中心点重复试验组。试验因素与水平的取值见表 3,试验设计及结果见表 4。

表 3 响应面试验因素及水平设计

影响因素	水平				
	-α	-1	0	1	α
PVA 纤维掺量(A)/%	0	0.5	1.0	1.5	2.0
粉煤灰掺量(B)/%	30	40	50	60	70
水胶比(C)	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40

表 4 响应面试验设计与试验结果

编号	编码			28 d 抗压 强度	28 d 抗折 强度
	A/%	B/%	C		
1	0.5	40	0.25	46.18	6.45
2	1.5	40	0.25	48.97	9.17
3	0.5	60	0.25	44.26	5.14

编号	编码			续表	
	A/%	B/%	C	28 d 抗压强度	28 d 抗折强度
4	1.5	60	0.25	47.82	8.32
5	0.5	40	0.35	39.82	6.22
6	1.5	40	0.35	45.22	8.07
7	0.5	60	0.35	37.42	4.56
8	1.5	60	0.35	43.62	7.66
9	0.0	50	0.30	36.54	3.87
10	2.0	50	0.30	45.48	9.78
11	1.0	30	0.30	47.02	8.89
12	1.0	70	0.30	42.88	6.74
13	1.0	50	0.20	50.34	6.02
14	1.0	50	0.40	38.55	5.78
15	1.0	50	0.30	44.64	7.27
16	1.0	50	0.30	42.35	7.09
17	1.0	50	0.30	44.11	6.87
18	1.0	50	0.30	45.39	6.94
19	1.0	50	0.30	43.56	7.32
20	1.0	50	0.30	43.92	7.13

2.2 响应面回归模型建立及显著性检验

进一步借助 Design Expert 13.0 软件对表 4 中的试验数据进行多元回归拟合分析,得到 28 d 抗压强度与 28 d 抗折强度的二元多相回归模型,见式(1)、式(2)。

$$Y_1 = 44.1 + 2.24A - 0.96B - 2.80C + 0.20AB + 0.66AC - 0.12BC - 0.70A^2 + 0.29B^2 + 0.16C^2$$
(1)

$$Y_2 = 7.11 + 1.42A - 0.53B - 0.19C + 0.21AB - 0.12AC + 0.01BC - 0.07A^2 + 0.18B^2 - 0.30C^2$$
(2)

式中: Y_1 、 Y_2 分别代表 PVA 纤维水泥基复合材料 28 d 抗压强度和 28 d 抗折强度响应预测值; A 、 B 、 C 分别代表 PVA 纤维掺量、粉煤灰掺量与水胶比的实际值。

对上述所建立的回归模型进行方差分析和可信度分析,见表 5。以 28 d 抗压强度回归模型为例:模型 F 值为 37.840、 p 值 $<0.000\,1$,说明该模型呈极显著性且可信度高,具备较佳的统计学意义;相关系数 R^2 为 0.971 50,表明模型相关性较好;校正后的决定系数 Adj. R^2 为 0.945 80,说明所选试验因素有 94.58% 的概率造成响应面的变化,且预测决定系数 Pre. R^2 为 0.910 90,两者差值小于 0.2,说明该模型具有较好的可解释性;信噪比 SNR 为 22.628,远大于 4,说明该模型可靠、有效;变异系数 C_v 为 1.920 0%,远小于

10%,说明本试验的精度较高。同理可知,28 d 抗折强度回归模型同样通过了显著性检验。

表 5 回归模型的显著性分析					
变异来源	自由度	28 d 抗压强度		28 d 抗折强度	
		F 值	p 值	F 值	p 值
模型	9	37.84 0	$<0.000\,1^{***}$	80.630	$<0.000\,1^{***}$
A	1	112.63	$<0.000\,1^{***}$	560.43	$<0.000\,1^{***}$
B	1	20.670	$0.001\,1^{***}$	79.430	$<0.000\,1^{***}$
C	1	175.33	$<0.000\,1^{***}$	10.140	$0.009\,7^{***}$
AB	1	0.432 50	$0.525\,6^*$	6.380 0	$0.030\,1^{***}$
AC	1	3.450 0	$0.052\,5^*$	1.970 0	$0.190\,9^*$
BC	1	0.108 1	$0.705\,0^*$	0.0177 0	$0.896\,9^*$
A^2	1	12.140	$0.002\,0^{**}$	1.920 0	$0.196\,1^*$
B^2	1	2.110 0	$0.115\,6^*$	14.430	$0.003\,5^{***}$
C^2	1	0.674 20	$0.353\,6^*$	38.800	$<0.000\,1^{***}$
R^2			0.971 50		0.986 40
Adj. R^2			0.945 80		0.974 20
Pre. R^2			0.910 90		0.914 70
SNR			22.628		33.479
$C_v/\%$			1.920 0		3.440 0

注:*** p 值 $<0.000\,1$,非常显著;** p 值 <0.05 ,显著;* p 值 >0.05 ,不显著。

2.3 响应面模型结果分析

2.3.1 各因素对抗压强度的影响及交互作用

为进一步明晰 PVA 纤维掺量、粉煤灰掺量、水胶比三者间的交互作用对 PVA 纤维水泥基复合材料 28 d 抗压强度的影响规律,借助 Design Expert 13.0 软件获取 28 d 抗拉强度的三维响应面及等高线图,见图 1。

由图 1(a)可知:当粉煤灰掺量较高时,PVA 纤维掺量由 0.5% 增加至 1.5% 时,PVA 纤维水泥基复合材料 28 d 抗压强度由 40.3 MPa 提升至 45.2 MPa,增幅高达 12.16%。分析认为,掺入的 PVA 纤维发挥了桥接作用,有效抑制了裂缝在基体内部扩展的速度和尺寸,保证了基体结构的一致性与整体性,提高了水泥基复合材料的受压变形能力,使其并不会发生类似于混凝土材料的极脆性破坏^[12]。此外,图中在 PVA 纤维掺量坐标轴上的等高线密集程度高于粉煤灰掺量坐标轴,这说明 PVA 纤维掺量对抗压强度的影响程度大于粉煤灰掺量,且响应面较为平坦,表明两者之间的交互作用并不明显。

由图 1(b)可知:在试验选定因素范围内,28 d 抗压强度随着水胶比的增加而减小。分析认为,水泥基复合材料孔结构与孔隙率主要取决于水胶比,随着水胶比的增加,基体内部的平均孔

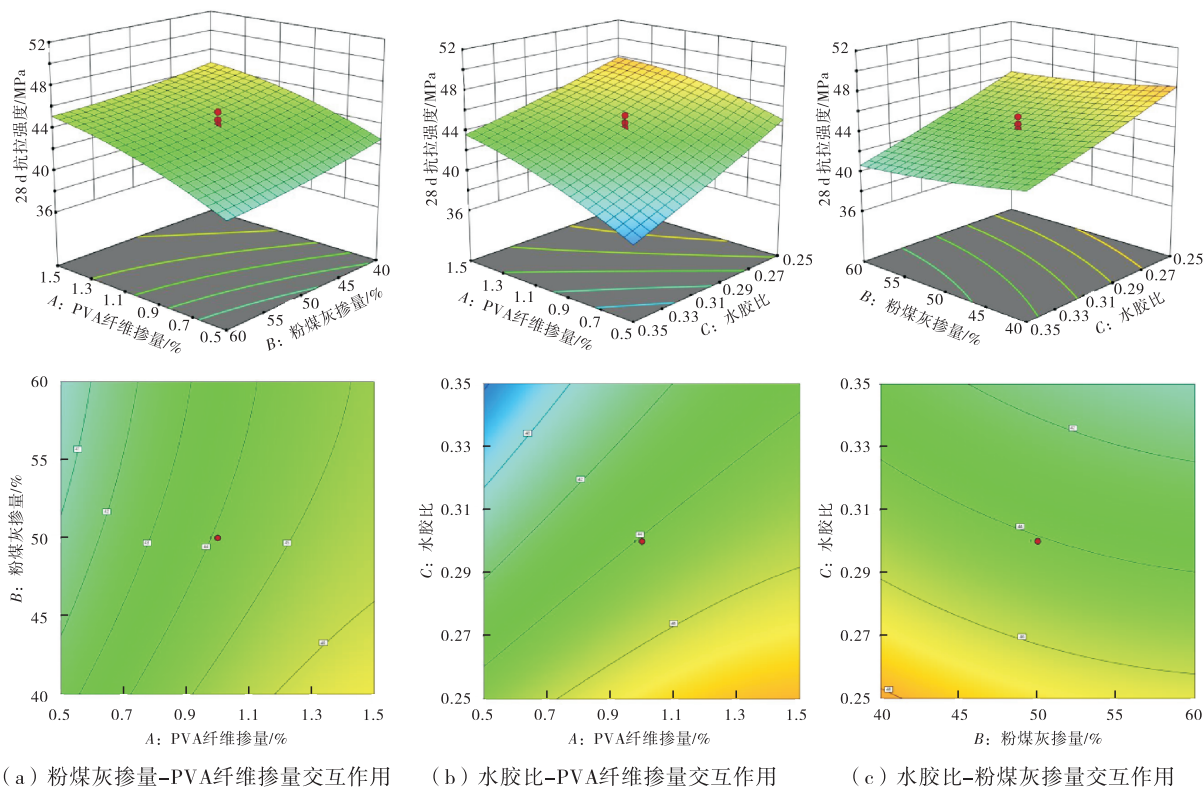


图1 28 d 抗压强度三维响应面及等高线图

径与孔隙率随着增大,造成基体结构由致密转向疏松,此时密实度不佳,导致基体内部不良缺陷增加,最终削弱了水泥基复合材料的抗压强度^[13-14]。此外,等高线密集分布在水胶比坐标轴上,说明水胶比对抗压强度的影响显著。

由图1(c)可知:同一水胶比工况下,随着粉煤灰掺量的减少,28 d 抗压强度呈逐渐增大趋势。分析认为,水泥基复合材料中采用粉煤灰部分替代水泥后,水泥含量减少,而粉煤灰二次水化反应有限,造成生成的水化产物较少,且存在部分未水化的粉煤灰,导致水泥基复合材料抗压强度降低^[13,15]。其次,从等高线图可以看出,水胶比对28 d 抗压强度影响程度大于粉煤灰掺量,且随着水胶比的降低,抗压强度明显增加。等高线图上的等高线未围成椭圆,等高线曲率小,说明两因素对抗压强度的交互作用并不显著。

2.3.2 各因素对抗折强度的影响及交互作用

同理,为进一步阐明PVA纤维掺量、粉煤灰掺量、水胶比三者间的交互作用对PVA纤维水泥基复合材料28 d 抗折强度的影响规律,借助Design Expert 13.0 软件获取28 d 抗折强度的三维响应面及等高线图,见图2。

由图2(a)可知:40%粉煤灰掺量下,PVA纤维掺量从0.5%增加至1.5%时,PVA纤维水泥基复合材料28 d 抗折强度由6.5 MPa 提升至

8.8 MPa,增幅高达35.38%。分析认为,PVA纤维桥接作用有效抑制了裂缝的发展并限制裂缝的宽度,使得材料受拉部位显示出多缝开裂的应变硬化特征,材料变形能力显著提升,从而具有较好的弯曲韧性^[3]。此外,图中在PVA纤维掺量坐标轴上的等高线密集程度高于粉煤灰掺量坐标轴,说明相较于粉煤灰掺量,PVA纤维掺量对抗折强度的影响更大;且当PVA纤维掺量一定时,抗折强度随粉煤灰掺量的降低而逐渐增强,但随着PVA纤维掺量的增加,抗折强度对粉煤灰掺量的敏感性降低,说明两者之间具有显著的交互作用。

由图2(b)可知:在试验选定因素范围内,28 d 抗折强度随着水胶比的增加呈先增大后减小趋势,说明水胶比存在临界值,高于或低于临界值,均无法最大程度上改善水泥基复合材料的抗折性能。分析认为,处于临界值时,水泥基复合材料浆体的流动性得到提升,有利于PVA纤维在基体内部的均匀分布,从而一定程度上保证了PVA纤维桥接作用的充分发挥;且此时基体整体结构的密实程度状况良好,水泥基复合材料具有良好的强度^[13,16]。此外,等高线密集分布在PVA纤维掺量坐标轴上,说明PVA纤维掺量对抗折强度的影响显著,而水胶比的影响相对较小,且曲面没有出现明显的扭曲,说明两者的交互作用并不明显。

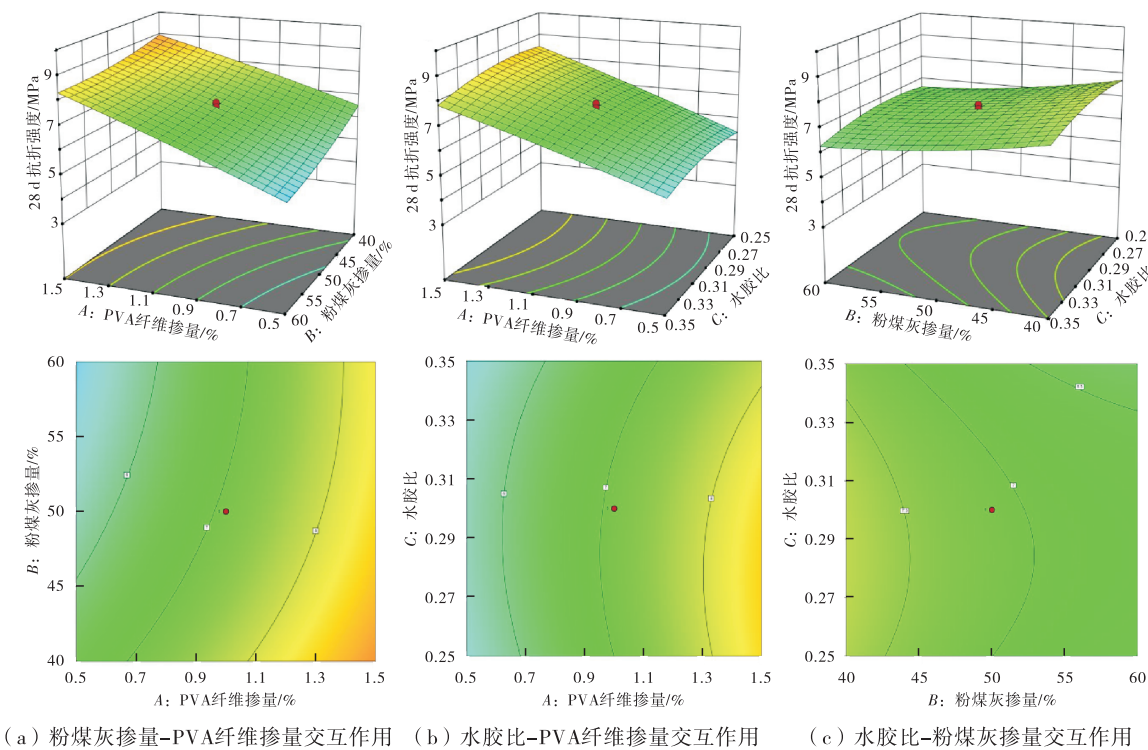


图2 28 d 抗折强度三维响应面及等高线图

由图2(c)可知:同一水胶比工况下,随着粉煤灰掺量的减小,28 d 抗折强度呈逐渐增大趋势。分析认为,粉煤灰掺量过高时,不仅减少了水化产物数量,造成水泥基复合材料强度减弱,而且削弱了PVA纤维与基体间的化学黏结力,限制了PVA纤维桥接作用的发挥^[17]。但是,粉煤灰掺量的增加有利于水泥基复合材料应变硬化,具体表现为:水泥基复合材料在荷载作用下大量开裂,具有较大变形能力及较高韧性^[18]。且由等高线图可以看出,水胶比对28 d 抗折强度影响程度小于粉煤灰掺量,且随着水胶比的降低,抗折强度明显增加,响应面较为平整,说明两因素对抗压强度的交互作用并不显著。

2.4 配合比优化及验证

基于上述PVA纤维水泥基复合材料性能回归模型,以28 d 抗压强度、28 d 抗折强度最大值为目标响应值,以PVA纤维掺量、粉煤灰掺量及水胶比为自变量,借助CCD模块中的Numerical功能优化该模型自变量参数值,获取最优配合比。为验证预测结果的准确性,重新制备PVA纤维水泥基复合材料试件进行试验验证,结果见表6。由表6可知,与模型计算的预测值相比,28 d 抗压强度和28 d 抗折强度的相对偏差较小,分别为1.87%和-2.39%,均小于5%。因此,可认为本文所建立的PVA纤维水泥基复合材料

性能回归模型对目标参数进行预测和优化的可靠度较高,可为相关工程提供参考借鉴。

表6 响应面设计配合比最优方案及试验验证

PVA 纤维 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	水胶比	28 d 抗压 强度/MPa		28 d 抗折 强度/MPa	
			预测值	实测值	预测值	实测值
1.5	40	0.25	48.88	49.81	8.99	8.78

3 工程应用

基于上述最优方案下PVA纤维水泥基复合材料的优良性能,依托广东省某高速公路项目收费站广场路面工程,开展该材料在无切缝水泥混凝土路面中的工程应用,示意图见图3。该道路修建于2012年,原路面结构为:15 cm 未筛分碎石+20 cm 水泥稳定石屑+20 cm 水泥稳定碎石+28 cm 水泥混凝土,K23+600处收费站广场处加宽车道(宽度3.0~4.5 m、长度60 m)。设计方案为:宽度3.0 m处10个延性段,延性段长度4.0 m;宽度4.5 m处1个延性段,延性段长度5.0 m;钢筋锚固间距0.15 m,锚固长度0.12 m。详细施工流程见图4。

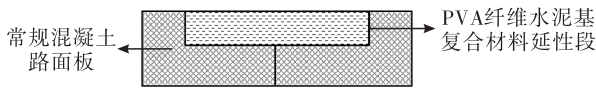


图3 无切缝水泥混凝土路面示意图

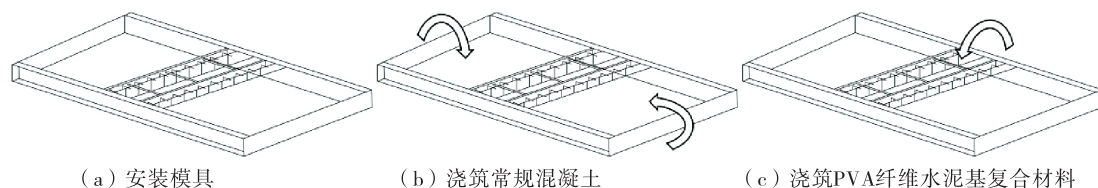


图4 无切缝水泥混凝土路面的施工流程

试验工程完工后,参照《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014)进行了性能检验和质量评价,施工质量合格,满足工程应用要求。服役2年后,对试验工程进行了跟踪观测,发现常规混凝土路面板与PVA纤维水泥基复合材料延性段外观差异微小、整体性良好;PVA纤维水泥基复合材料延性段观察到些许裂纹,但裂纹宽度与长度均较小,而常规混凝土路面板未出现裂纹。整体而言,试验工程服役状态处于较高水平,这是因为界面锚固设计能够将荷载-温度耦合作用下常规混凝土路面板的变形引入PVA纤维水泥基复合材料延性段,而PVA纤维水泥基复合材料具有高韧性特点,最终使得常规混凝土路面板不出现裂缝病害,这说明PVA纤维水泥基复合材料延性段应用于无切缝水泥混凝土路面建设是成功的,对提升道路服役性能和延长寿命周期具有积极意义。

4 结论

借助响应面法对PVA纤维水泥基复合材料的配合比设计进行优化,建立的二元多相回归模型较好地描述了PVA纤维掺量、粉煤灰掺量、水胶比与28d抗压强度、28d抗折强度之间的关系,其回归模型决定相关系数 R^2 均大于0.97,可以指导多目标下PVA纤维水泥基复合材料配合比设计。

响应面模型结果表明,对PVA纤维水泥基复合材料28d抗压强度的影响程度为水胶比>PVA纤维掺量>粉煤灰掺量,且各因素之间对抗压强度的交互作用一般;对28d抗折强度的影响程度为PVA纤维掺量>粉煤灰掺量>水胶比,且PVA纤维掺量与粉煤灰掺量对抗折强度的交互作用较好。经优化,PVA纤维水泥基复合材料最佳配合比设计参数为:PVA纤维掺量1.5%、粉煤灰掺量40%、水胶比0.25时,综合性能最佳,且实际值与预测值吻合度较高,相对偏差小于3%,模型预测结果准确、有效。经验证,其在无切缝水泥混凝土路面中的工程应用效果显著,可为此类材料在土木建筑、大型水利水电工

程中的工程应用提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] GAO S L, ZHANG J Y, ZHANG H B, et al. Study on biaxial bending fatigue performance of Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. Journal of building engineering, 2024, 84: 108478.
- [2] SZETO C, KURTIS K E. Sulphate resistance of low-clinker engineered cementitious composites examined by MicroXRF imaging [J]. Journal of microscopy, 2024, 294 (2): 239-250.
- [3] 卫颖颖, 刘超群, 罗林. 多尺度纤维对水泥基复合材料性能的影响 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41 (2): 145-151.
- [4] SAID S H, RAZAK H A, OTHMAN I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers [J]. Construction and building materials, 2015, 75: 176-188.
- [5] NOUSHINI A, SAMALI B, VESSALAS K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 49: 374-383.
- [6] BHEEL N, MOHAMMED B S, ALI M O A, et al. Effect of polyvinyl alcohol fiber on the mechanical properties and embodied carbon of engineered cementitious composites [J]. Results in engineering, 2023, 20: 101458.
- [7] 吴立朋, 宋建新, 冯宇, 等. 掺废弃陶瓷纤维增强水泥基复合材料抗冻性能 [J]. 铁道建筑, 2024, 64 (2): 124-128.
- [8] CAI X H, YANG D, ZHANG D, et al. Development of high-early-strength low-carbon engineered cementitious composites with calcium sulfoaluminate cement incorporating high-volume fly ash [J]. Case studies in construction materials, 2023, 18: e01959.
- [9] SHABAKHTY N, KARIMI H R, BAKHTIARY A Y. Statistical evaluation of fracture and mechanical performance of engineered cementitious composites (ECC), containing different percentages of glass, polypropylene, polyvinyl-alcohol fibers, and fly ash [J]. Construction and building materials, 2024, 417: 135247.

(下转第25页)

5.5 路面结构强度

根据表9可知,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面路面结构强度较为稳定,工后5年,PSSI无明显衰减,工后五年PSSI>90,评级为“优”,相对于工后1年,PSSI仅下降0.1。和热拌ATB-25沥青混合料柔性基层进行对比,两者之间路面结构强度无明显区别,工后5年热拌ATB-25沥青混合料柔性基层PSSI为99.4,相对于工后1年,仅下降0.4。因此,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的路面结构强度,路面结构强度衰减规律和热拌ATB-25沥青混合料柔性基层无明显区别。

6 结论

通过对湿热地区高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面路用性能进行检测与评价研究,得到以下结论:

湿热地区乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面工后5年,路面状况指数仍较好,无明显水损坏问题,可用于多雨地区。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的抗车辙性能,工后5年,RDI>90,无明显的高温车辙问题,可用于高温气候地区。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的RQI相对较低,工后5年,RQI衰减较小,但应注意施工时平整度控制。采用连续式拌合工艺生产的乳化沥青厂拌冷再生混合料材料性能和耐久性能可满足使用要求。和热拌

ATB-25沥青混合料柔性基层沥青路面对比,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的路面破损、路面车辙、路面行驶质量和路面结构强度衰减无明显差别,湿热地区乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的耐久性。

参考文献:

- [1] 欧阳亮西,王文新. 乳化沥青厂拌冷再生技术在高速公路改扩建工程中的应用[J]. 工程建设与设计,2024(24):154-156.
- [2] 孙军,王元庆. 厂拌冷再生路面基层减排分析及敏感性要素研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(4):139-144.
- [3] 邓滔,杨梦,宋涛. 机场高速公路沥青路面大修改造试验研究[J]. 湖南交通科技,2022,48(4):82-85.
- [4] 万超,俞鹏飞. 高速公路乳化沥青厂拌冷再生技术实施效果评价及应用经验总结[C]//中国公路学会养护与管理分会. 中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集,2021:274-278.
- [5] 孙艳华,李泉,吴超凡. 乳化沥青厂拌冷再生混合料性能研究与应用[J]. 湖南交通科技,2021,47(4):49-54.
- [6] 杨彦海,钱百通,安中华,等. 乳化沥青厂拌冷再生技术使用效果评价研究[J]. 公路工程,2021,46(4):129-137,156.
- [7] 武其学. 乳化沥青厂拌冷再生路面结构应用效果分析[J]. 化工管理,2019(20):125.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.
- [10] CAI J M, PAN J L, LIN Y Z, et al. Effect of temperature on the low-velocity impact behaviors of engineered cementitious composite [J]. Journal of materials in civil engineering,2023,35(7):04023167.
- [11] 姚洪耀,陆宸宇,滕晓丹,等. 纤维类型及水胶比对海砂ECC宏观力学性能的影响机理分析[J]. 材料科学与工程学报,2023,41(2):222-228,246.
- [12] CHENG L, CHEN S, CHEN F, et al. Research Progress and Performance Evaluation of Polyvinyl Alcohol Fiber Engineered Cementitious Composites[J]. Sustainability, 2023,15(14):10991.
- [13] 张品乐,朱昊天,胡静,等. 高性价比混杂纤维工程水泥基复合材料的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(11):3816-3826.
- [14] 吕林女,陈垚俊,肖静,等. PVA纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):97-101,160.
- [15] GAO S L, WANG Z, WANG W C, et al. Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 172-185.
- [16] 郝彤,汤晨,王永海,等. 不同配合比参数对高延性纤维增强水泥基复合材料的性能影响[J]. 混凝土,2020(7):1-4.
- [17] 巩妮娜,柳文淑,蔡小宁,等. 工程用水泥基复合材料抗拉及抗弯性能研究与评估[J/OL]. 采矿与安全工程学报,1-12[2025-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.td.20240526.1043.002.html>.
- [18] SHI L, LIN S T K, LU Y, et al. Artificial neural network based mechanical and electrical property prediction of engineered cementitious composites[J]. Construction and building materials,2018,174:667-674.

(上接第12页)