

涂覆椰壳纤维水泥基复合材料水泥基体配合比设计

黄小琴 董奕凌 蒋必凤 李淑敏
 三亚学院, 中国·海南 三亚 572011

摘要: 椰壳纤维增强水泥基复合材料具有隔热、吸音、轻质、韧性, 可在建筑材料的轻质隔墙方向上有一定的应用前景。水泥基复合材料整体性能由水泥基体性质与涂覆纤维两方面共同决定, 合适的水泥基体要满足和易性与强度的要求。本实验探究涂覆椰壳纤维水泥基材料水泥基体配合比的设计, 结果表明当涂覆椰壳纤维水泥基复合材料的配合比为 1 : 0.51 : 2.91 (水泥 : 水 : 砂), 达到和易性与强度要求。

关键词: 配合比设计; 椰壳纤维; 涂覆处理; 水泥基体

Mix Proportion Design of Cementitious Matrix for Surface-Coated Coconut Fiber Reinforced Cementitious Composites

Xiaoqin Huang Yiling Dong Bifeng Jiang Shumin Li
 Sanya University, Sanya, Hainan, 572011, China

Abstract: Coconut fiber reinforced cementitious composites exhibit properties such as thermal insulation, sound absorption, lightweight nature, and toughness, showing potential for application in lightweight partition walls for building materials. The overall performance of cementitious composites is determined by both the properties of the cementitious matrix and the surface-coated fibers. An appropriate cementitious matrix must meet requirements for workability and strength. This study investigates the mix proportion design of the cementitious matrix for surface-coated coconut fiber reinforced composites. Results indicate that when the mix proportion is 1 : 0.51 : 2.91 (cement : water : sand), the composite achieves the desired workability and strength.

Keywords: mix proportion design; coconut fiber; surface coating treatment; cementitious matrix

0 前言

椰壳纤维 (CF) 表面涂覆改性是提升其与水泥基体界面相容性的有效手段, 而水泥基体配合比的科学设计是调控复合材料综合性能的核心。近五年来, 国内外学者围绕涂覆 CF 水泥基复合材料的基体配比优化, 在多元胶凝体系构建、水胶比调控、掺合料协同效应及数字化设计方法等方面取得显著突破, Alengaram 等^[1] (2021) 通过响应面法分析表明, 涂覆 CF 增强轻质混凝土的力学强度与水胶比呈显著负相关, 最优 W/B 范围为 0.30~0.35。超过 0.40 时, 界面过渡区 (ITZ) 孔隙率增大, 涂覆层与基体粘结失效风险升高。王等^[2] (2022) 发现, W/B=0.32 时, 纳米 SiO₂ 涂覆 CF 复合材料的 28d 抗折强度较未涂覆组提高 46%, 证实低水胶比可强化涂覆层—基体化学键合。张等^[3] (2023) 提出“FA 20%+SF 8%”复掺体系, 基体密实度提高 30%, 显著降低涂覆 CF 的碱性侵蚀速率。李等^[4] (2024) 引入 0.5% 纳米 TiO₂, 基体水化产物取向生长, 与聚合物涂覆 CF 形成互锁结构, 抗压强度提升 22%。黄等^[5] (2023) 研究粉煤灰替代率和椰壳纤维长度对复合材料性能的影响, 发现长纤维的加入和较低粉煤灰替代率有助于提高材料的整体性能, 特别是抗折强度。综上所述, 椰壳纤维水泥基复合材料在建筑结构轻质墙体填充材料

方面具有广阔的应用前景, 对其配合比进行研究有助于提高该复合材料整体性能。

1 实验材料准备

实验用水为饮用自来水。水泥为普通硅酸盐水泥 P·O 42.5 (旋窑); 执行标准: GB175—2023《通用硅酸盐水泥》; 砂为河砂; 细度模数: 3.44; 堆积密度: 1450kg/m³; I 区粗砂。砂的级配对照标准文件 GB/T 14684—2022《建设用砂》中章节 6.1《颗粒级配》经实验得出, 过程如下。

细度模数 (μ_f):

$$\mu_f = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1}$$

依照表 1 实验数据, 根据试样砂细度模数可得, 该试样砂为粗砂; 对照砂颗粒级配区可得, 该试样砂为: I 类砂。

堆积密度实验: 实验需通过测量其在干燥状态下平整堆满标准测量器具 (容积升) 时砂的质量, 并使用测量数据比上容积升体积, 最终得出堆积密度。

砂的堆积密度通过公式计算得出:

$$\rho_0' = \frac{m}{V_0}$$

故依照表 2 实验数据可得: 该试样砂堆积密度 = (1448.1 + 1452.3 + 1449.7) ÷ 3 = 1450.033kg/m³ ≈ 1450kg/m³。

表 1 筛余数据统计分析表

筛网上的颗粒质量 (各粒径颗粒质量) 记录与处理								
第一组	公称直径	5mm	2.5mm	1.25mm	0.63mm	0.315mm	0.16mm	0.08mm+ 筛底
	筛余质量	49.5g	194.8g	236.8g	324.5g	130.3g	56.9g	7.4g
分计筛余量	4.95%	19.48%	23.68%	32.44%	13.03%	5.69%	-	
累计筛余量	4.95%	24.43%	48.10%	80.54%	93.57%	99.26%	-	
细度模数 =3.378773535								
筛网上的颗粒质量 (各粒径颗粒质量) 记录与处理								
第二组	公称直径	5mm	2.5mm	1.25mm	0.63mm	0.315mm	0.16mm	0.08mm+ 筛底
	筛余质量	61.9g	198.8g	238.9g	335.4g	122.3g	38.6g	3.8g
分计筛余量	6.19%	19.88%	23.89%	33.53%	12.23%	3.86%	-	
累计筛余量	6.19%	26.06%	49.95%	83.48%	95.71%	99.57%	-	
细度模数 =3.451987637								
筛网上的颗粒质量 (各粒径颗粒质量) 记录与处理								
第三组	公称直径	5mm	2.5mm	1.25mm	0.63mm	0.315mm	0.16mm	0.08mm + 筛底
	筛余质量	43.4g	167.5g	228.7g	336.5g	146.5g	67.2g	9.8g
分计筛余量	4.34%	16.75%	22.87%	33.64%	14.65%	6.72%	-	
累计筛余量	4.34%	21.09%	43.95%	77.59%	92.24%	98.96%	-	
细度模数 =3.262959866								
误差分析处理 (筛余质量与原质量差):				第一组: +0.2g		第二组: -0.3g		第三组: -0.4g

表 2 砂的堆积密度数据分析表

实验组	砂重	容积升体积	堆积密度
第 1 组	2896.2g	2L	1448.1kg/m ³
第 2 组	2904.6g	2L	1452.3kg/m ³
第 3 组	2899.4g	2L	1449.7kg/m ³

表 3 每立方米水泥砂浆材料用量 (kg/m³)

强度等级	水泥	砂	用水量
M5	200~230		
M7.5	230~260		
M10	260~290		
M15	290~330	砂的堆积密度值	270~330
M20	340~400		
M25	360~410		
M30	430~480		

2 实验室配合比确定

实验室配合比的确定是制备椰壳纤维水泥基材料的关键环节,其科学性和合理性直接影响材料性能和工程应用效果。由于该复合材料水泥基体的组成成分与砂浆相同,故在确定实验室配合比时,遵循 JGJ 98—2010《砌筑砂浆配合比设计规程》等相关标准文件的要求,采用该配合比设计流程做初步设计,同时综合考虑水泥品种、强度等级,骨料种类、粒径和级配,以及椰壳纤维的特性、涂覆处理方式和预期的纤维含量等因素。在基准配合比的试配、调整与确定实验过程中,实际操作时均需将实验室配合比换算为施工配合比进行实验。

2.1 基准配合比计算

依照标准文件要求(见表 3)确定基准配合比范围。

因为拟定砂浆强度等级为 M15,实验砂采用粗砂,且实验现场气候炎热。所以,根据规范,用水量应取对应数据下限后,再酌量增加。故最终确定基准配合比范围 = 水泥 : 水 : 砂 = [290, 330] : [270, 300] : 1450。

又因为本实验水泥砂浆并不用作传统砌筑胶结作用,且采用的原材料中水泥强度高于标准要求,故本实验参考规范中现场配制水泥混合砂浆的试配规定进行计算,减少水泥用量,调整基准配合比。

根据:

$$f_{m,0} = f_2 + 0.645\sigma$$

∴ 作为实验室实验,所以施工水平为优良,同时拟定

砂浆强度等级为 M15。故参考 JGJ 98—2010《砌筑砂浆配合比设计规程》表 5.1.3 可得：砂浆强度标准差选用值为 3.00MPa，砂浆抗压强度平均值 f_2 选用值为 15MPa。

$$\therefore f_{m,0} = 15 + 0.645 \times 3 = 16.935 \text{MPa}。$$

根据：

$$f_{ce} = \gamma_c \cdot f_{ce,k}$$

\therefore 实验选用 P·O 42.5 水泥。

$$\therefore f_{ce,k} = 42.5 \text{MPa}。$$

又 \therefore 水泥强度等级值无统计资料。

\therefore 其富余系数 γ_c 可取 1.0。

\therefore 经公式计算可得：水泥的实测强度 $f_{ce} = 1.0 \times 42.5 = 42.5 \text{MPa}$ 。

根据：

$$Q_c = \frac{1000(f_{m,0} - \beta)}{\alpha \cdot f_{ce}}$$

\therefore 查阅 JGJ 98—2010《砌筑砂浆配合比设计规程》得：砂浆的特征系数 $\alpha = 3.03$ ， $\beta = -15.09$ 。

$$\therefore Q_c = \frac{1000 \times (16.935 + 15.09)}{3.03 \times 42.5} = 248.69 \text{kg/m}^3。$$

\therefore 实验砂干燥状态的堆积密度为 1450kg/m^3 。

$$\therefore Q_s = 1450 \text{kg/m}^3。$$

\therefore 选用的实验砂是粗砂，同时现场环境炎热干燥。

$$\therefore Q_w = 260 \text{kg/m}^3。$$

调整数据得出砌筑砂浆基准配合比：

根据上述实验研究所得的基准配合比范围及调整计算过程，最终确定基准配合比 = 水泥：水：砂 = 250：260：1450。

2.2 配合比试配、调整与确定

根据标准文件要求，设置实验组时，应保持其他材料参数不变，通过将基准配合比水泥用量分别增加及减少 10%，设置三个实验组进行试配（见表 4）。

表 4 实验组砂浆配合比数据

水泥用量	配合比
+10%	水泥：水：砂 = 275：260：1450
基准	水泥：水：砂 = 250：260：1450
-10%	水泥：水：砂 = 225：260：1450

实验结果：实验中可见砂浆粘结力较差，且振捣后浆体泌水现象严重。

实验结论及调整方向：根据实验结果初步分析为水灰比过大，因此后续实验中将通过增加水泥含量降低水灰比。

所以，根据实验结果应降低水灰比，调整基准配合比为 500：260：1450（水泥：水：砂）。在此基础上设置实验组（见表 5）实验。

表 5 实验组砂浆配合比数据

水泥用量	配合比
+10%	水泥：水：砂 = 550：260：1450
基准	水泥：水：砂 = 500：260：1450
-10%	水泥：水：砂 = 450：260：1450

实验结果如表 6 所示。

表 6 实验组砂浆配合比抗折抗压数据

水泥用量	抗折强度	抗折平均值	抗压强度	抗压平均值
+10%	7.0 (无效)	5.1	52.4	49.5
	5.2		49.7	50.7
	5.0		48.7	50.4
基准	5.0	5.56	46.4	41.4
	6.1		43.8	39.6
	5.6		43.5	44.5
-10%	6.7 (无效)	5.35	39.6	42.2
	5.1		38.0	43.0
	5.6		44.3	43.6

实验结论及调整方向：根据实验结果总结不同配合比抗折、抗压强度的平均值折线图（见图 1、图 2），分析折线图中抗折、抗压强度平均值随着水灰比增加而产生的波动走向可得：经过调整的配合比均已符合砂浆基本要求，能确定最佳配合比的水泥用量应小于调整后的基准配合比，因此后续实验中将以此为参考，通过增加配合比实验组，同时降低调整幅度来调整配合比，以确定适合实验研究的最佳配合比。

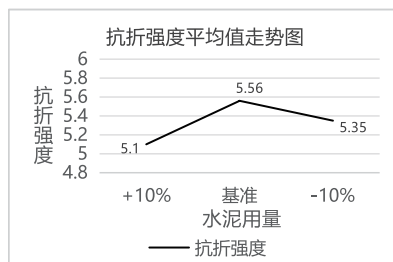


图 1 抗折强度平均值趋势图

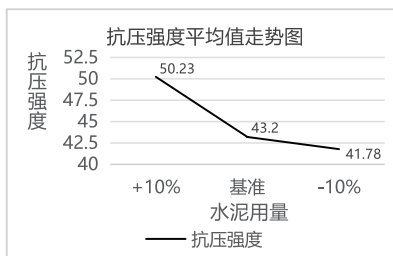


图 2 抗压强度平均值趋势图

根据上述实验结果，基于基准配合比调整实验的结论增加实验组数量，同时降低变量增幅程度。拟定此次实验

的基准配合比为 1000 : 510 : 2910 (水泥 : 水 : 砂), 并在此之上, 以 5% 为配合比水泥用量调整幅度, 每减少 5% 为一组, 向下增设两组; 每增加 5% 为一组, 向上增设三组, 最终设置水泥用量为基准配合比 90%、95%、100%、105%、110%、115% 的六个实验组 (见表 7、表 8) 进行实验。

表 7 实验组砂浆配合比数据

水泥用量	配合比
+15%	水泥 : 水 : 砂 = 1150 : 510 : 2910
+10%	水泥 : 水 : 砂 = 1100 : 510 : 2910
+5%	水泥 : 水 : 砂 = 1050 : 510 : 2910
基准	水泥 : 水 : 砂 = 1000 : 510 : 2910
-5%	水泥 : 水 : 砂 = 950 : 510 : 2910
-10%	水泥 : 水 : 砂 = 900 : 510 : 2910

实验结果如表 8 所示。

表 8 实验组砂浆强度测定数据

组别	砂浆稠度	抗折数据		抗压数据		抗压平均值
		抗折数据	抗折平均值			
+15%	4.05	7.2	6.2	55.1	54.7	54.5
		6.0		57.6	46.9 (无效)	
		6.4		53.2	51.7	
+10%	4.65	6.3	6.2	54.1	51.2	51.3
		6.1		47.9	46.3	
		6.3		54.8	53.7	
+5%	5.00	6.2	6.1	47.5	54.1	51.1
		6.1		52.8	49.3	
		6.0		52.1	50.8	
基准	5.70	5.4	6.3	39.3 (无效)	50.2	48.5
		6.6		39.6 (无效)	44.9	
		6.1		50.2	48.7	
-5%	6.10	6.1	5.7	44.7	45.6	44.2
		5.3		44.4	43.3	
		5.6		44.8	42.5	
-10%	3.20	4.6	4.4	38.4	40.4	39.1
		4.3		39.1	38.9	
		4.2		38.0	39.6	

实验结论: 根据实验结果总结出不同配合比抗折、抗压强度的平均值折线图 (见图 3、图 4)。而后, 因为纤维的加入, 本实验设计需要较好流动性, 故砂浆稠度应在 5~7cm, 抗压强度不应小于 15Mpa。所以, 经筛选, “+5%” “基准” “-5%” 三组符合规范要求。而其中, 通过折线图的走向趋势分析可得, 抗折强度峰值约为 6.2MPa, 而抗压强度峰值则大约在 51MPa 以上; 故进一步分析可得, 在规范要求下, 达到材料抗折强度上限的有 “+5%” 与 “基准” 两组, 而达到材料抗压强度上限的仅有 “+5%” 一组。

考虑到最终实验添加的涂层纤维体积占比范围较大, 才能全面探究含量因素对该复合材料的影响, 对照组砂浆稠

度应尽可能的偏高; 同时, 水泥胶砂材料抗折性能较差, 为更好的体现涂层纤维对其抗折性能的影响, 应保证对照组抗折强度达到材料上限。故最终选用配合比为 1 : 0.51 : 2.91 (水泥 : 水 : 砂)。

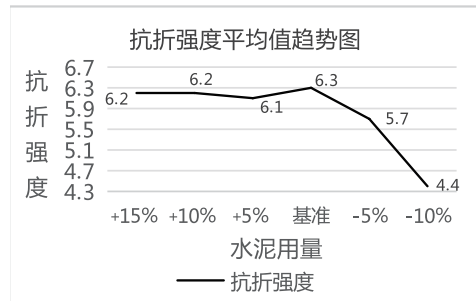


图 3 抗折强度平均值趋势图

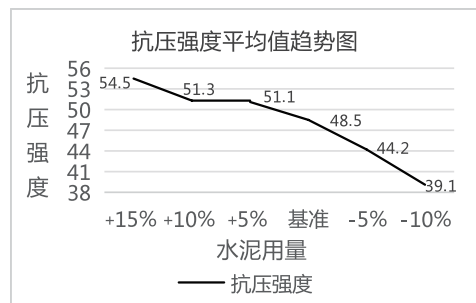


图 4 抗压强度平均值趋势图

3 结论

本实验探究涂覆椰壳纤维水泥基材料水泥基体配合, 着重考虑椰壳纤维涂覆后不吸水且表面光滑因素对水泥基体性能的要求, 对实验组水泥砂浆基体的和易性、抗压强度和抗折强度进行测试和配合比设计, 结果表明当涂覆椰壳纤维水泥基复合材料的配合比为 1 : 0.51 : 2.91 (水泥 : 水 : 砂), 达到和易性与强度要求。

参考文献:

- [1] Alengaram U J. Cement and Concrete Composites[J].2021(123): 104199.
- [2] 王.基于密实堆积理论的涂覆CF混凝土设计[J].硅酸盐学报,2022, 50(5):1320-1328.
- [3] 张.FA20%+SF8%复掺体系对基体密实度的影响[J].建筑材料学报,2023,26(2):301-308.
- [4] 李.纳米TiO₂增强聚合物涂覆CF水泥基复合材料界面结构研究 [J].复合材料学报,2024,41(3):1452-1460.
- [5] 黄.粉煤灰共掺椰壳纤维增韧水泥基材料性能研究[J].江苏建材, 2023(3):40-42.

课题项目: 海南省高等学校科学研究项目: 椰壳纤维增韧轻质水泥基新型复合材料设计与开发研究 (项目编号: Hnky2022-42)。