

影响超高性能砂浆使用性能的关键制备参数

严哲德¹, 林上顺¹, 陈宝春¹, 何建华²

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建第一公路工程集团有限公司, 福建 泉州 362123)

摘要: 超高性能砂浆(UHPM)具有的和易性差、凝结时间短等特点,是制约其在实际工程中推广应用的主要原因。开展11组UHPM的使用性能试验,分析制备参数(水胶比3组、砂灰比3组、石英砂级配2组、钢纤维掺量2组、缓凝剂掺量1组)的变化对UHPM的稠度、保水性、和易性、凝结时间、抗压强度及抗折强度的影响,结果表明:UHPM的保水性能优异,各组砂浆试块的保水率均超过99%;水胶比是影响UHPM稠度的关键参数,与水胶比为0.14的UHPM相比,水胶比为0.16的UHPM稠度提高了81%;采用级配石英砂的UHPM,其抗压强度、抗折强度均大于未采用级配石英砂的UHPM;与不掺钢纤维的UHPM相比,掺入体积分数为2%的钢纤维的UHPM的抗压强度提高了25%,达到114 MPa,抗折强度提高了104%,达到29 MPa;掺入质量分数为0.06%的缓凝剂,延长了UHPM 39%的凝结时间,提高了UHPM的和易性。相关研究结论可为UHPM的制备提供参考。

关键词: 超高性能砂浆; 砂浆制备; 配合比优化; 材料性能

中图分类号: TQ177.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0052-08

Key preparation parameters affecting performance of ultra-high performance mortars

YAN Zhede¹, LIN Shangshun¹, CHEN Baochun¹, HE Jianhua²

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian First Highway Engineering Group Co., Ltd., Quanzhou 362123, China)

Abstract: The problems of poor workability and short setting time of ultra-high performance mortar (UHPM) are the bottleneck restricting its popularization and application in practical engineering. In view of this, eleven groups of UHPM performance tests were carried out, considering the changes of key preparation parameters (three groups of water to binder ratio, three groups of sand to cement ratio, two groups of quartz sand gradation, two groups of steel fibre content, one group of retarder content), and analyzing the effects of the changes of these parameters on the consistency, water retention, workability, setting time, compressive strength and flexural strength. Results show that: UHPM has excellent water retention performance, and the water retention rate of each group of mortar is more than 99%; the water to binder ratio is the key parameter affecting the consistency of UHPM, and the consistency of UHPM with a water to binder ratio of 0.16 is increased by 81% compared with that of UHPM with a water to binder ratio of 0.14; the compressive and flexural strengths of the UHPM with gradation quartz sand are greater than those of the UHPM without gradation quartz sand; compared with UHPM without steel fiber, the compressive strength of UHPM with a volume fraction of 2% of steel fiber rose by 25% to 114 MPa, and the flexural strength increased by 104% to 29 MPa. The addition of a retarder with a mass fraction of 0.06% prolonged the setting time of UHPM by 39% and enhanced the workability of UHPM. The relevant research conclusions can offer references for the preparation of UHPM.

Keywords: ultra-high performance mortar; mortar preparation; mix proportion optimization; material performance

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 福建省交通运输科技示范项目(SF20230207)

第一作者简介: 严哲德(2000—), 男, 福建三明人, 硕士研究生, 研究方向: 桥梁工程。

通信作者: 林上顺(1972—), 男, 福建永泰人, 教授, 博士, 研究方向: 桥梁工程。

砌体结构在实际工程中得到广泛的应用,其块材多采用石块、混凝土预制块、砖(含烧结多孔砖、烧结空心砖、蒸压粉煤灰砖等),砌筑材料多采用普通砂浆^[1]。然而,大量研究表明,采用普通砂浆砌筑的砌体结构,其破坏一般始于砌缝的破坏,块材的强度难以发挥^[2-4]。这些固有缺陷使得砂浆成为砌体结构中的薄弱环节。

针对这个问题,国内外学者已开展一些研究,陈宝春等^[5-6]通过优化超高性能砂浆(ultra-high-performance mortar, UHPM)骨料的粒径与级配,并结合活性矿物掺合料和高效外加剂,降低砌体的孔隙率,提升了砌体的耐久性和力学性能;卢绍斌^[7]采用 UHPM 作为砌筑材料,进行石砌体受压承载力试验,结果表明,砌缝与砌块应变变化规律类似,能够协同受力,UHPM 砌体极限荷载是普通砂浆砌体的 1.87 倍,砌体的承载能力得到显著提升,竖向砌缝的应力集中现象获得有效改善,曹俊峰^[8]进行普通砂浆石砌体拱与 UHPM 石砌体拱的面内极限承载力对比试验,结果表明,相较于普通砂浆石砌体拱,UHPM 石砌体拱的极限荷载提升了 238%,主要是因为 UHPM 与砌块粘合紧密,提高了结构的整体性与稳定性。

相关研究表明,UHPM 配合比设计理论和相关方法仍处于探索阶段^[7]。卢绍斌^[8]通过 UHPM 材性试验,研究不同材料掺量对 UHPM 的稠度、保水性、强度等的影响;Chen Y 等^[9]通过单纯形质心设计,研究材料成分、水胶比等对 UHPM 强度和流动性的影响;Yang J 等^[10]采用铁尾矿(iron tailings, IT)替代石英砂,研究 IT 掺量对 UHPM 的粘性、流动性等的影响;Supit W S M 等^[11]通过试验发现,纤维素能有效提高 UHPM 的抗折性能与韧性,但材料价格较高。

本研究在收集既有相关文献的基础上,探讨水胶比、砂灰比、石英砂级配、钢纤维掺量、缓凝剂掺量等制备参数对 UHPM 使用性能的影响,为 UHPM 的工程应用提供参考。

1 试验

1.1 试验设计

在文献[7]的基础上,以硅灰与减水剂含量为定值,设计不同水胶比(3组)、砂灰比(3组)、石英砂级配(2组)、钢纤维掺量(2组)及缓凝剂掺量(2组)的 UHPM,进行共 11 组 UHPM 材性试验。依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70-2009)^[12]相关规定,进行 UHPM 的 7 d 与 28 d 抗压强度、稠度、保水性、凝结时间试验,其中抗压试块尺寸为 70 mm×70 mm×70 mm,每组 3 个试块,加载速率为 0.5 MPa/s,测量精度为 0.1 MPa;依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671-2021)^[13]相关规定,进行 UHPM 抗折强度试验,试块尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,每组 3 个试块,试验前清除试块表面水分和杂质,试验中以 0.25 MPa/s 匀速加载至破坏。鉴于工程实践中石砌体的强度通常在 100 MPa 左右,而混凝土预制块的强度一般不超过 50 MPa,因此制备的 UHPM 抗压强度为 100 MPa,以期达到充分发挥块材强度的目的。

1.2 原材料

采用 P·O42.5、比表面积 343 m²/kg 的普通波特兰水泥;采用 10 000 目、比表面积 2.0 m²/g 的高性能微硅灰;采用表观密度 2 650 kg/m³ 的 20~40 目中砂和 40~70 目细砂;采用长 13 mm、Φ 0.22 mm、密度 7 810 kg/m³ 的镀铜钢纤维;采用 HLX 聚羧酸减水剂,减水率为 25%~30%,密度为 1.06 g/cm³;采用 FK-6 水泥缓凝剂;采用普通自来水。水泥、硅灰性能指标与化学成分见表 1、表 2。

1.3 试验设备

采用转速 45 r/min、型号为 15 L 的单卧轴砂浆搅拌机;砂浆保水率试模;HCT 微机控制油电混合伺服压力试验机;砂浆凝结时间测定仪(ZKS-100 型、指针款);SC-145 砂浆稠度测定仪。

表 1 水泥的性能指标及化学成分^[7,14]

Tab.1 Performance indexes and chemical composition of cement^[7,14]

水泥强度等级	表观密度/kg·m ⁻³	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		烧失量/%	w _{MgO} /%	w _{SO₃} /%
		3 d	28 d	3 d	28 d			
P·O42.5	3 050	≥5.0	≥7.5	≥25	≥45	2.51	≤3.0	≤3.0

表 2 硅灰的性能指标及化学成分

Tab.2 Performance indexes and chemical composition of silica powder

性能指标及化学成分	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$w_{\text{SiO}_2}/\%$	$w_{\text{K}_2\text{O}}/\%$	$w_{\text{Na}_2\text{O}}/\%$	$w_{\text{R}_2\text{O}}/\%$	含水量/ $\%$	烧失量/ $\%$	活性指数/ $\%$
含量	280	93	0.4	0.13	0.41	0.98	3.97	117

数据来源:成都朗天腾飞建材有限公司。

1.4 超高性能砂浆的制备

参照文献[7],考虑工程实际及试验条件有限,在室外预制场采用 15 L 单卧轴砂浆搅拌机制备 UHPM,其配合比如表 3 所示。UHPM 的制备步骤:首先对搅拌机进行“润锅”处理,然后依次加入石英砂、水泥、硅灰及钢纤维干拌 8~10 min;再倒入 3/4 由水、减水剂与质量分数为 0.06%的缓凝剂组成的混合物湿拌 2~3 min,待砂浆呈湿润变黑状态时倒入剩下的 1/4 混合物,搅拌 7 min,搅拌时间可根据搅拌量和搅拌机搅拌速度调

整,将制备完成的砂浆倒入模具中,人工振捣密实,用刮刀将表面磨平之后,对试件编号,最后用塑料薄膜覆盖保湿,待 24 h 后拆模,并进行 28 d 户外自然养护。选定 0.14~0.16 水胶比作为对照,测量其试块 7 d 强度,确保其强度达标的同时,符合《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/T 98-2010)^[15]规定的砂浆稠度要求(见表 4),UHPM 制备试验在 20 ℃ 环境下进行,采用修正的 Andrease 和 Anndersen 方法对 1.0、1.2、1.4 砂灰比进行石英砂级配设计^[16],如公式(1)所示。

表 3 超高性能砂浆制备配合比

Tab.3 Ultra-high performance mortar preparation ratios

编号	水胶比 W/B	胶凝材料 B/ $\%$		$w_{\text{石英砂}}/\%$		$w_{\text{减水剂}}/\%$	$\varphi_{\text{钢纤维}}/\%$	$w_{\text{缓凝剂}}/\%$
		$w_{\text{水泥}}$	$w_{\text{硅灰}}$	20~40 目	40~70 目			
A1	0.14	100	30	65	55	2.5	0	0
A2	0.15	100	30	65	55	2.5	0	0
A3	0.16	100	30	65	55	2.5	0	0
B1	0.15	100	30	54	46	2.5	0	0
B2	0.15	100	30	100	0	2.5	0	0
B3	0.15	100	30	120	0	2.5	0	0
B4	0.15	100	30	75	65	2.5	0	0
B5	0.15	100	30	140	0	2.5	0	0
C1	0.15	100	30	65	55	2.5	78.1	0
C2	0.15	100	30	65	55	2.5	156.2	0
D1	0.15	100	30	65	55	2.5	0	0.06(20℃)

注:A2 为对照组,钢纤维以砂浆体积计算体积含量,其它材料以水泥质量计算质量百分含量。

表 4 砌筑砂浆的施工稠度^[15]Tab.4 Construction consistency of masonry mortar^[15]

砌体种类	施工稠度/mm
烧结普通砖砌体、粉煤灰砖砌体(A类)	70~90
混凝土砌体、普通混凝土小型空心砌块砌体、灰砂砖砌体(B类)	50~70
烧结多孔砖砌体、烧结空心砖砌体、轻集料混凝土小型空心砌块砌体、蒸压加气混凝土砌块砌体(C类)	60~80
石砌体(D类)	30~50

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (1)$$

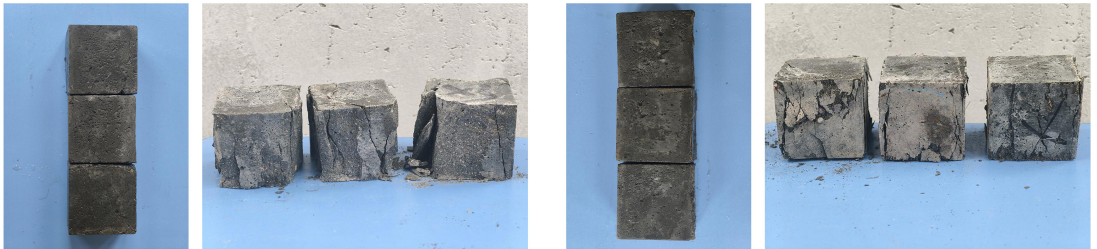
式中, $P(d)$ 为石英砂粒径小于 d 的累计百分比, %; d 为石英砂粒径, μm ; d_{\min} 和 d_{\max} 分别为石英砂的最小和最大粒径, μm ; q 为石英砂粒度分布模量, 取 0.23; 通过级配计算, 1.0、1.2 和 1.4 砂灰比对应的中砂与细砂比分别为 0.54 : 0.46、0.65 : 0.55 和 0.75 : 0.65。

2 试验现象

图 1 为是否掺入钢纤维 UHPM 抗压试件的破坏模式。如图 1(a) 所示, 无钢纤维 UHPM 受压构件的破坏过程与普通混凝土相似: 初期无明显变化, 加载至接近极限荷载时, 发出较大声响并伴有混凝土剥落, 加载曲线未出现应力下降区段, 破坏

发生在达到极限荷载时, 表现为细骨料劈裂破坏, 呈现脆性破坏特征, 与文献 [7] 试验结果类似。如图 1(b) 所示, 含钢纤维 UHPM 受压构件因钢纤维的桥联作用, 整体性增强, 破坏过程中仅出现较小声响, 加载曲线出现应力下降区段, 有裂缝和蜕皮但无碎块掉落。

图 2 为是否掺入钢纤维 UHPM 抗折试件的破坏模式。如图 2(a) 所示, 加载初期, 无钢纤维 UHPM 处于弹性变形阶段, 随着荷载增加, 裂缝在试件中部、底部形成并逐渐向上扩展, 达到极限荷载时, 试件突然折断, 从裂缝出现到试件破坏的时间较短, 为脆性断裂, 与文献 [7] 试验现象一致。如图 2(b) 所示, 掺钢纤维 UHPM 抗折试件裂缝相对发展缓慢, 达到极限荷载后裂缝延展至试件中上部, 试件破坏, 但仍保持连接, 未完全断裂。



(a) 不掺钢纤维超高性能砂浆抗压试块

(b) 掺钢纤维超高性能砂浆抗压试块

图 1 超高性能砂浆抗压构件破坏形态

Fig.1 Failure mode of ultra-high performance mortar compressive members



(a) 不掺钢纤维超高性能砂浆抗折试块

(b) 掺钢纤维超高性能砂浆抗折试块

图 2 超高性能砂浆抗折构件破坏形态

Fig.2 Failure mode of ultra-high performance mortar flexural members

3 结果分析

依据文献[12]和文献[13]进行 UHPM 材性试验,测得各组 UHPM 试块的 7 d、28 d 平均抗压强度和抗折强度、稠度与保水率,数据见表 5。根据文献[15],砌筑砂浆的保水率宜大于 80%。由表 5 可知,由于 UHPM 制备水胶比远低于普通砂浆,各组 UHPM 试块保水率均超过 99%,几乎不会产生泌水、离析现象,保水性能极佳;水胶比、砂灰比、石英砂级配、钢纤维及缓凝剂掺量不影响其保水性。此结果与文献[7]的研究结果一致。

表 5 各组砂浆指标测试结果

Tab.5 Test results of mortar index of each group

编号	抗压强度		抗折强度		保水率/%	稠度/mm
	平均值/MPa		平均值/MPa			
	7 d	28 d	7 d	28 d		
A1	86.5	98.0	13.8	14.6	99.95	49.0
A2	83.3	91.0	12.8	14.2	99.94	66.0
A3	80.0	87.4	12.2	13.0	99.89	89.0
B1	83.6	86.3	11.3	13.5	99.96	77.0
B2	80.7	76.7	9.6	13.2	99.98	82.0
B3	79.6	80.7	9.7	13.3	99.96	74.0
B4	77.6	88.9	10.9	16.2	99.92	54.0
B5	72.0	88.8	10.6	14.0	99.98	69.0
C1	96.8	105.2	18.5	24.1	99.99	61.0
C2	109.5	114.0	24.8	29.0	99.99	45.5
D1	77.1	87.6	10.8	14.5	99.95	67.0

注:A2 为对照组。

3.1 水胶比因素的影响

由表 5 可知,UHPM 对应的稠度随着水胶比的提高而显著增加,与水胶比为 0.14 的 UHPM 相比,水胶比为 0.16 的 UHPM 稠度提高了 81%。结合表 4 可知,当 UHPM 水胶比为 0.14~0.16 时,其稠度能够满足各类砌体砌筑要求,因此,UHPM 的水胶比可在 0.14~0.16 的范围内选取。鉴于 0.15 水胶比所制备的混凝土稠度符合 B 类和 C 类砌筑的要求,因此,其它试验组 UHPM 的水胶比取 0.15,并将 A₂ 设为对照组,从而优化配合比设计过程。水胶比对 UHPM 立方体抗压强度影响见

图 3,由图 3 可见,UHPM 的抗压强度随着水胶比的增加而减小,在龄期 28 d 条件下,与水胶比为 0.16 的 UHPM 相比,水胶比为 0.14 的 UHPM 的抗压强度提升了 12%,其原因是水胶比增大,降低了 UHPM 的密实度。

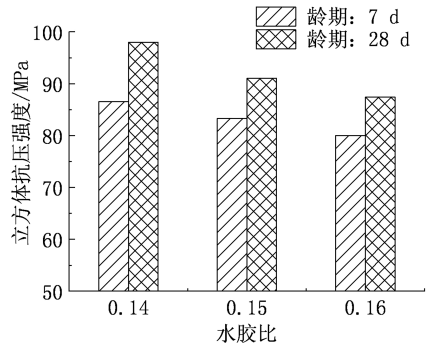


图 3 水胶比对超高性能砂浆抗压强度影响

Fig.3 Effect of water to binder ratio on compressive strength of ultra-high performance mortar

水胶比对 UHPM 抗折强度的影响见图 4,由图 4 可知,与 UHPM 立方体抗压强度相似,UHPM 抗折强度随着水胶比增加而呈现减小的趋势,在龄期 28 d 时,与水胶比为 0.16 的 UHPM 相比,水胶比为 0.14 的 UHPM 的抗折强度提升了 12%。

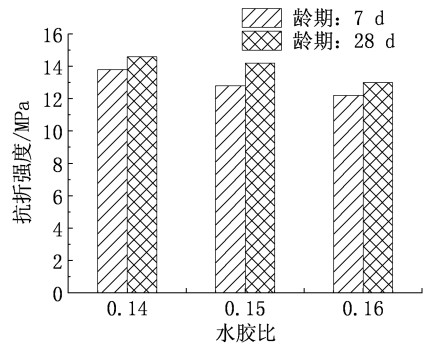


图 4 水胶比对超高性能砂浆抗折强度影响

Fig.4 Effect of water to binder ratio on flexural strength of ultra-high performance mortar

综上所述,水胶比对 UHPM 的抗压强度和抗折强度有一定影响,但不显著,原因可能是制备 UHPM 的水胶比较低或水胶比试验组数较少。龄期 7 d 的 UHPM 抗压、抗折强度为最终强度的 90% 左右,具有较高的早期强度。水胶比对 UHPM 的影响趋势与文献[7]类似,但文献[7]中龄期 7 d 的 UHPM 抗压强度随水胶比的增大而略有增加(总体变化不大),与试验结果存在差异,其原因可能是制作环境、养护环境不同或试验误差等。

3.2 砂灰比与级配因素的影响

砂灰比与级配对 UHPM 稠度的影响规律如图 5。由图 5 可见,UHPM 的稠度随着砂灰比的减小呈现增大的趋势。与砂灰比为 1.4 的 UHPM 相比,在无级配的条件下,砂灰比为 1.0 的 UHPM 稠度提高了 19%;在有级配的条件下,砂灰比为 1.0 的 UHPM 稠度提高了 42.5%。这表明砂灰比对稠度的影响显著,尤其是在优化级配的条件下。优化级配同样对 UHPM 稠度有较大影响,当砂灰比为固定值时,优化级配的 UHPM 稠度最大为无级配的 UHPM 稠度的 1.27 倍。其主要原因是,随着砂灰比的增大,级配 UHPM 中细砂量增多,石英砂的总表面积增大,所需水量增加,导致对稠度的影响逐渐增大。因此,结合表 5,无级配 UHPM 的砂灰比应控制在 1.2 至 1.4 之间,级配 UHPM 的砂灰比则应控制在 1.0 至 1.2 之间。

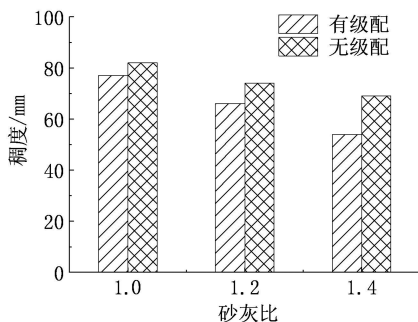


图 5 砂灰比与级配对超高性能砂浆稠度的影响

Fig.5 Effect of sand to cement ratio and gradation on consistency of ultra-high performance mortar

砂灰比与级配对 UHPM 立方体抗压强度的影响见图 6。从图 6 可知,优化级配能够提高 UHPM 的抗压强度,原因是级配 UHPM 中加入细砂增强了整体密实度,减少了孔隙。7 d 龄期的 UHPM 的立方体抗压强度随着砂灰比的增大呈现下降的趋势。在固定级配或无级配的条件下,7 d 龄期的 UHPM 试块在砂灰比为 1.0 时强度最高,而 28 d 龄期的 UHPM 试块则在砂灰比为 1.2 或 1.4 时强度最高。其原因在于,UHPM 的早期强度主要依赖于水泥水化反应,砂灰比越低,胶凝材料相对越多,早期水泥水化反应越充分;随着龄期的增加,硅灰促进水泥的二次水化,使得砂灰比较高的 UHPM 在后期水泥水化过程中表现出较好的强度发展。在级配的条件下,龄期 28 d UHPM 的抗压强度随砂灰比变化总体稳定,而在无级配、

龄期 28 d 条件下,与砂灰比为 1.0 的 UHPM 相比,砂灰比为 1.4 的 UHPM 的抗压强度提高了 15%。其原因为,级配 UHPM 中掺入细砂填充孔隙,结构密实度差距不大,而在无级配 UHPM 中掺入一定量的石英砂利于增强其密实度,从而使其强度增加。同时,在无级配的条件下,砂灰比为 1.0 的 UHPM 早期强度高于后期强度。其原因在于,低水胶比、高胶凝材料用量使得后期二次水化缺水,无粗骨料易干燥收缩,导致强度早缩。

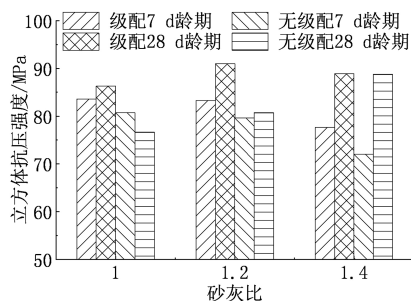


图 6 砂灰比与级配对超高性能砂浆抗压强度的影响

Fig.6 Effect of sand to cement ratio and gradation on compressive strength of ultra-high performance mortar

砂灰比与级配对 UHPM 抗折强度的影响见图 7。从图 7 可知,与 UHPM 抗压强度类似,优化级配能够提高 UHPM 的抗折强度。在龄期 7 d 时优化级配的 UHPM 抗折强度随砂灰比的增加先提高后降低,无级配的 UHPM 抗折强度则相差不大,无明显规律。龄期 28 d UHPM 的抗折强度随砂灰比的增大而增大,其中,在级配条件下,与砂灰比为 1.0 的 UHPM 相比,砂灰比为 1.4 的级配 UHPM 的抗折强度提高了 20%。

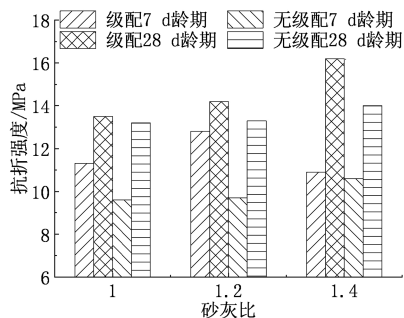


图 7 砂灰比与级配对超高性能砂浆抗折强度的影响

Fig.7 Effect of sand to cement ratio and gradation on flexural strength of ultra-high performance mortar

砂灰比与级配对 UHPM 稠度、抗压强度及抗折强度影响总体变化趋势与文献[7]类似。

3.3 钢纤维掺量的影响

钢纤维掺量对 UHPM 稠度的影响见表 5, UHPM 的稠度随钢纤维掺量的增加呈现下降的趋势,与不掺入钢纤维的 UHPM 相比,掺入体积分数为 2% 的钢纤维的 UHPM 稠度降低了 31%, 主要是因为钢纤维的桥联作用提高了水泥水化产物之间的结合力;加入过量的钢纤维会使 UHPM 的流动性显著下降,降低和易性。钢纤维掺量对 UHPM 立方体抗压强度的影响见图 8, UHPM 抗压强度随着钢纤维掺量的增加呈现增加的趋势。龄期 28 d 时,与不掺入钢纤维的 UHPM 相比,掺入体积分数为 2% 的钢纤维的 UHPM 抗压强度达到 114 MPa,增加了 25%,原因是掺入的钢纤维不与水泥等材料发生反应,但通过桥联作用使得 UHPM 之间的结合力增大,桥接微裂缝,从而使 UHPM 整体性增强,改善了 UHPM 的强度与韧性^[17]。

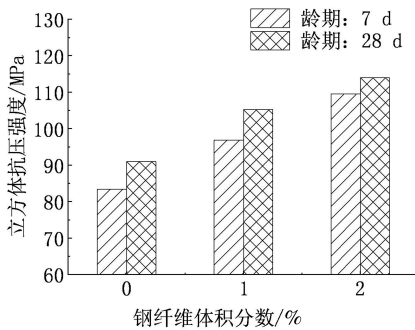


图 8 钢纤维体积分数对超高性能砂浆立方体抗压强度的影响

Fig.8 Effect of steel fiber volume fraction on cube compressive strength of ultra-high performance mortar

钢纤维掺量对 UHPM 抗折强度的影响如图 9 所示。

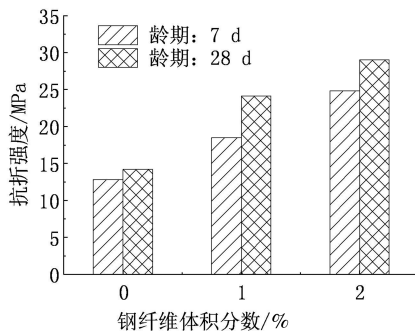


图 9 钢纤维体积分数对超高性能砂浆抗折强度的影响
Fig.9 Effect of steel fiber volume fraction on cube flexural strength of ultra-high performance mortar

由图 9 可见,掺入钢纤维对 UHPM 抗折强度影响显著;龄期 28 d 的情况下,与不掺入钢纤维的 UHPM 相比,掺入体积分数为 2% 钢纤维的 UHPM 抗折强度达到 29 MPa,提高了 104%,原因是钢纤维通过合理搅拌,能够均匀分布在 UHPM 中,增强其内部结合力,有效阻断裂纹的产生和扩展,提升了 UHPM 的抗折强度。

综上所述,UHPM 中钢纤维体积分宜为 1%至 2%之间。

3.4 缓凝剂掺量的影响

依据文献[12],在 20 °C 室内环境下,使用砂浆凝结时间测定仪测定 UHPM 凝结时间,当贯入深度达 25 mm 且静压力达 15 N 时,所需时间即为 UHPM 凝结时间。由图 10 可知,A2 试件(对照组,未掺缓凝剂)的凝结时间约为 283 min,D1 试件(掺入质量分数为 0.06% 缓凝剂)凝结时间为 390 min,相较于 A2 试件延长了 39%,改善了 UHPM 的和易性。从表 5 可知,D1 试件抗折与抗压强度相对于 A2 试件早期强度降低了 10%,但后期强度与其相差无几,原因是 D1 试件早期因缓凝剂减缓了水泥的水化速率,延长了凝结时间,使得 UHPM 早期强度下降。尽管加入缓凝剂会降低 UHPM 早期强度,但适当加入缓凝剂有助于提高 UHPM 和易性,提高施工效率与施工便利性。

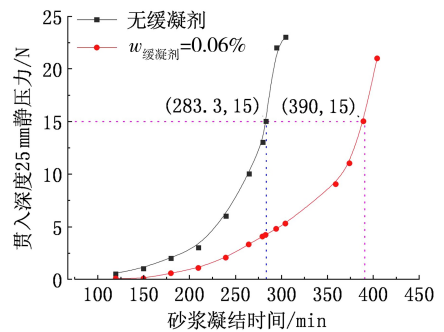


图 10 超高性能砂浆凝结时间

Fig.10 Setting time of ultra-high performance mortar

4 结论

- 1) UHPM 的保水性高于 99%,几乎无泌水和离析现象。
- 2) UHPM 的整体稳定性高;水胶比、砂灰比、石英砂级配、钢纤维及缓凝剂掺量对保水性影响可忽略不计。
- 3) 水胶比是影响 UHPM 稠度的主要因素,与

水胶比为0.14的UHPM相比,水胶比为0.16的UHPM稠度提高了81%。砂灰比也对稠度有较大影响,在级配条件下,与砂灰比为1.4的UHPM相比,砂灰比为1.0的UHPM稠度提高了42.5%。

4) 掺入钢纤维与优化级配能够增强UHPM的抗压与抗折强度,其中掺入钢纤维效果更为突出。与未掺入钢纤维的UHPM相比,掺入体积分数为2%的钢纤维的UHPM抗压强度提高了25%;抗折强度显著提升了约104%;但掺入过量钢纤维会使UHPM稠度和流动性大幅度下降,不利于施工操作。

5) 优化级配和添加缓凝剂均有效改善UHPM的和易性。优化级配可以改善UHPM的颗粒分布,增强UHPM的密实度;掺入缓凝剂可以有效延长UHPM的凝结时间,掺入质量分数为0.06%缓凝剂能够延长39%的UHPM凝结时间,尽管缓凝剂会使UHPM的早期强度有所下降,但有利于施工操作,提高施工效率。

6) UHPM制备参数建议:水胶比0.14~0.16;无级配砂灰比1.2~1.4;级配砂灰比1.0~1.2;钢纤维的体积分数1%~2%;缓凝剂根据工程需求适量添加,以优化UHPM的使用性能。

参考文献:

- [1] 徐建,梁建国,杨春侠. 砌体结构的现状与发展建议[J]. 土木工程学报,2022,55(5):1-6.
- [2] GUL A, SHAHZADA K, ALAM B, et al. Innovative no-cure mortar for enhanced brick masonry performance: a mechanical properties analysis[J]. Construction and Building Materials, 2024, 451: 138659.
- [3] 许秀林,郭子雄,柴振岭,等. 条石砌体轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(12):148-153.
- [4] 黄卿维,廖妙星,陈宝春,等. 超高性能砂浆砌体短柱轴压试验[J]. 交通运输工程学报,2022,22(1):93-102.
- [5] 陈宝春,苏家战,李聪. 一种用于建筑砌缝的超高性能砂浆:CN106747124A[P]. 2017-05-31.
- [6] 陈宝春,季韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [7] 曹俊峰. 超高性能砂浆石砌体拱承载力试验与计算方法研究[D]. 福州:福州大学,2022.
- [8] 卢绍斌. 超高性能砂浆制备及其石砌体受压承载力研究[D]. 福州:福州大学,2021.
- [9] CHEN Y, LIU P, SHA F, et al. Preparation and performance of the ultra-high performance mortar based on simplex-centroid design method[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 3060-3077.
- [10] YANG J, ZHU M D, HE X Y, et al. Converting iron mine tailings into composite aggregates for ultrahigh-performance mortar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(1): 04024460.
- [11] SUPIT S W M, NISHIWAKI T, SHAIKH F U A, et al. Influences of hybrid fiber-reinforcement using wollastonite and cellulose nanofibers on strength and microstructure characterization of ultra-high-performance mortar[J]. Construction and Building Materials, 2024, 423: 135802.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [14] 施鹏,杨政险,张勇,等. 不同淤泥掺量免烧砖在碱粉煤灰矿渣体系下的性能研究[J]. 新型建筑材料,2020,47(9):40-44.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌筑砂浆配合比设计规程:JGJ/T 98—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29-39.
- [17] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, OZBAKKALOGLU T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(14): 6517-6551.

(责任编辑:马晓磊)