

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.006

基于 DIC 的珊瑚粉高强砂浆裂纹演化 与强度阈值分析

李鹏鑫¹, 陈浩林², 周海峰², 熊潇³, 刘永亮¹, 郑超², 王刚^{2*}

(1. 中国葛洲坝集团第一工程有限公司, 湖北宜昌 443002; 2. 绍兴文理学院土木工程学院,
浙江绍兴 312000; 3. 四川大渡河双江口水电开发有限公司, 四川马尔康 624000)

摘要:为了研究适用于岛礁建设的低碳、低成本高强砂浆(HSM),以珊瑚粉(CP)等质量替代水泥,替代率分别为0%,5%,10%,15%,20%,25%,通过单轴抗压和巴西劈裂试验,结合数字图像相关(DIC)方法,系统研究 CP 替代率对 HSM 力学性能的影响。结果表明:HSM 强度随着 CP 替代率的增加呈“增强-拐点-劣化”三段式演化,5%为拐点,此时抗压、劈裂抗拉强度分别为 123.30,29.98 MPa,较无掺 CP 基准组提高了 8.6% 和 6.2%;当替代率 \geq 15%时,强度显著降低,替代率为 20% 时,强度已低于基准组。破坏模式由低替代率的单一脆断(平直裂纹、应变带集中)转变为高替代率的拉-剪复合破坏(主裂纹分叉、次生裂纹密集,DIC 显示局部化显著增强)。建议岛礁 HSM 的 CP 替代率控制在 5%~10%,以兼顾结构安全、韧性与材料利用率。

关键词:珊瑚粉;高强砂浆;单轴压缩;巴西劈裂;数字图像相关

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

随着全球海洋工程建设的蓬勃发展,跨海大桥、岛礁开发等重大项目持续涌现,对建筑材料的力学性能、耐久性和抗腐蚀性提出了极高要求^[1-2]。高强砂浆(high strength mortar, HSM)凭借其优异的抗压强度、抗折强度、耐久性和体积稳定性,已成为海洋工程的理想材料^[3-4]。然而,传统 HSM 面临原材料供应受限、成本高昂等问题,难以满足海洋工程的广泛应用需求^[5-6]。因此,研发新型、高效且经济的替代材料,是推动海洋工程可持续发展的迫切需求。

海洋环境中存在大量珊瑚岛礁,其资源丰富且分布广泛。珊瑚岛礁的成分主要为碳酸钙,具有较高的活性和良好的填充效应^[7-8]。目前,珊瑚资源主要被用作建筑混凝土的骨料。Yu 等^[9]研究了珊瑚骨料混凝土在热带海洋环境中的应用案例,认为其

可以作为早期军事基地建设的备选材料。Ehlert 等^[10]考察了 20 世纪 50 年代美国在 Marshall 群岛比基尼环礁修建的珊瑚混凝土建筑,发现经过如此长的时间这些珊瑚混凝土仍具有良好的性能。珊瑚混凝土已广泛应用于道路、机场及建筑基础等工程^[11-13]。

近年来,研究人员将珊瑚骨料加工制成珊瑚粉(coral powder, CP),并发现这种微粉具有独特的物理和化学属性。徐彬彬等^[14]研究了 CP 的吸水动力学和释水行为,发现其多孔结构可实现缓慢吸水与长期释水。Zeng 等^[15]利用 CP 高孔隙率特征,充分发挥其“吸水”“返水”作用以提高珊瑚砂浆的密实性。He 等^[16]等发现用少量 CP 替代水泥可提高混凝土的耐久性能。韩超等^[17]通过试验发现,适量掺

收稿日期:2025-11-19

基金项目:中国博士后科学基金项目(2023M732689);精细爆破国家重点实验室开放基金项目(PBSKL25B01);绍兴市科技计划项目(2022A13003)

作者简介:李鹏鑫(1993—),男,高级工程师,主要从事高性能水工混凝土材料与大坝结构健康监测的研究(2021000077@usx.edu.cn)。

*通信作者:王刚(1989—),男,副教授,博士,主要从事UHPC的高温损伤评估及深部硬岩脆性破坏机制的研究(gangw277842@whut.edu.cn)。

引用格式:李鹏鑫,陈浩林,周海峰,等.基于DIC的珊瑚粉高强砂浆裂纹演化与强度阈值分析[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):42-51.

入CP可显著增强界面黏结力,使珊瑚砂浆劈裂抗拉强度与抗压强度的比值明显高于普通混凝土。李诚等^[18]研究了掺入CP后混凝土的微观结构和水化产物。结果表明,CP可通过其独特的微纳米结构调控水泥水化进程,选择性吸附并引导水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的成核与生长,从而优化水泥基材料的微观结构。Zhao等^[19]利用X射线衍射(XRD)与扫描电子显微镜(SEM)证实,CP可诱导水泥浆体中水化铝酸钙(如Friedel盐)的定向生长。其缓释特性使CP在长期阻锈应用中更具优势。综上,CP兼具替代传统胶凝材料、降低运输成本及提升砂浆物理-力学性能的多重优势,在海洋工程中应用前景广阔。

本研究以CP为研究对象,采用CP等质量替代水泥,替代率分别为0%,5%,10%,15%,20%,25%,制备高强砂浆(HSM)试件,系统测试其抗压强度、劈裂抗拉强度等关键力学性能,并结合数字图

像相关(DIC)技术定量分析破坏过程与裂纹演化特征。研究成果可为CP在海洋建筑工程中的应用提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试件的制备

1.1.1 试验原材料 本试验原材料主要包括胶凝材料(水泥、CP、硅灰(silica fume, SF))、海砂、钢纤维、添加剂及水。

水泥采用P·II 52.5R硅酸盐水泥。CP由珊瑚骨料经过破碎、研磨、筛分制备而成。珊瑚骨料宏观呈不规则白色条状,表面粗糙且分布蜂窝状凹坑(图1a),微观上可见扇状文石晶体排列与胶结物桥接颗粒。CP宏观呈松散白色粉末状(图1b),微观上呈不规则碎片状或棱柱状,保持了原有珊瑚的微孔结构,表面粗糙且可见蜂窝状断面,比表面积较大。

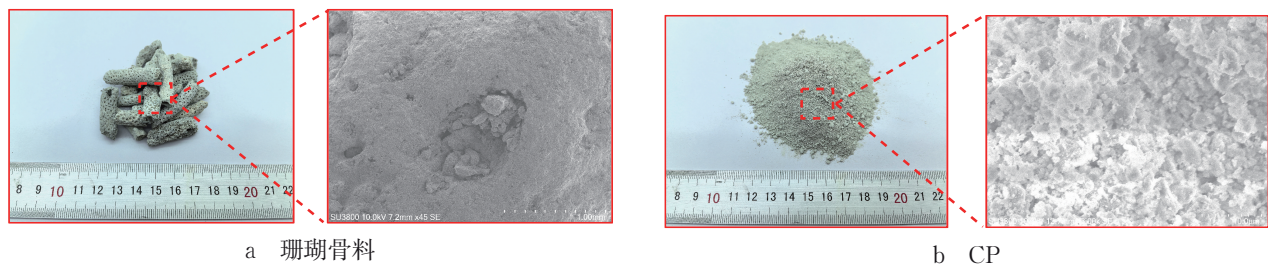


图1 珊瑚骨料与CP宏-微观形貌

Fig. 1 Macro-micro morphology of coral aggregate and CP

水泥、SF和CP的基本参数如表1所示。采用Mastersizer-3000型激光颗粒分析仪测试胶凝材料的粒径分布,结果如图2所示。由图2可知:CP粒径主要分布在0.2~700 μm, D_{50} 为7.003 μm,粒径

分布区间较宽且各粒径分布相对均匀;水泥粒径主要分布在0.3~100 μm, D_{50} 为13.726 μm,分布较为集中;SF粒径主要分布在0.2~1.0 μm, D_{50} 为0.601 μm,分布区间窄且各粒径分布相对均匀。

表1 水泥、SF和CP的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of cement, SF, and CP

类别	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	烧失量/%	产地
水泥	3 150.33	368.29	2.12	中国安徽芜湖
SF	1 650.48	19 100.72	3.92	中国河南郑州
CP	900.31	550.77	41.27	中国海南

综合考虑海洋地质条件、海砂特性及开采可行性等方面因素,本试验选用淡化处理后的海砂作为细骨料,其氯离子质量分数 $\leq 0.015\%$,符合《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)标准要求。钢纤维采用镀铜钢纤维,宏观为针状形态(长13 mm、直径0.3 mm),密度为7 900 kg/m^3 ,抗拉强度为2 850 MPa,弹性模量为180~210 GPa,产自河北衡水。减水剂采用山西飞科新材料科技有限

公司生产的聚羧酸高性能减水剂,固含量为38.2%,减水率为27%。拌合水为城市自来水。

1.1.2 制备流程 试验中保持胶凝材料总量不变,水胶比固定为0.16。CP等质量替代0%,5%,10%,15%,20%,25%的水泥,对应试样编号为CG0,CG5,CG10,CG15,CG20,CG25,其中CG0为不掺加CP的基准组。具体配合比如表2所示。为确保结果的可靠性,每组进行2次重复试验;当数据出

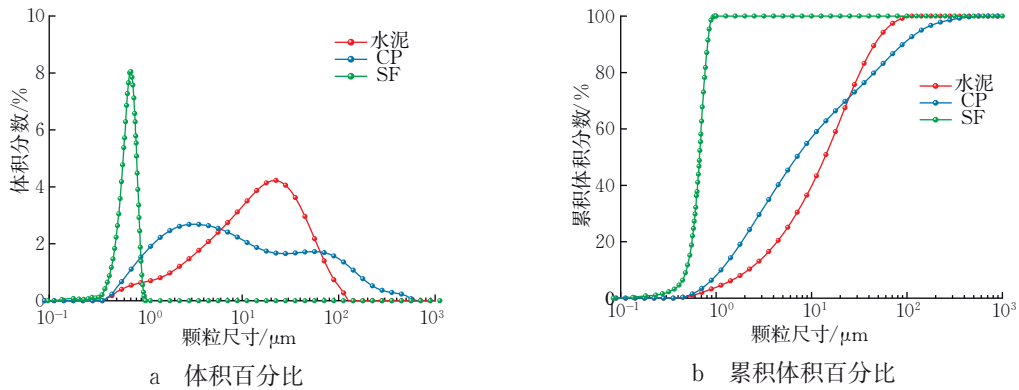


图2 水泥、SF和CP粒度图

Fig.2 Particle size distribution of cement, SF, and CP

表2 HSM配合比方案

Tab.2 Mix proportions of HSM

编号	水泥/ (kg·m ⁻³)	SF/ (kg·m ⁻³)	CP/ (kg·m ⁻³)	海砂/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	钢纤维 体积比/%	水胶比	CP替代 率/%
CG0	800	200	0	1 000	160	2.5	0.16	0
CG5	760	200	40	1 000	160	2.5	0.16	5
CG10	720	200	80	1 000	160	2.5	0.16	10
CG15	680	200	120	1 000	160	2.5	0.16	15
CG20	640	200	160	1 000	160	2.5	0.16	20
CG25	600	200	200	1 000	160	2.5	0.16	25

现显著离散时,将增加样本量进行补充试验,以确认其有效性。

试件制备流程如图 3 所示。首先将海砂投入搅拌机中,随后依次加入水泥、SF 和 CP 进行干拌处理,持续 5 min,直至干料混合均匀;然后,将外加剂和水加入搅拌体系,继续搅拌 5 min,以获得均匀的浆体;最后,掺入钢纤维并搅拌 3 min,以确保纤维均匀分散于浆体中。试件浇筑完成后,置于温度(20±2)℃、相对湿度≥95%的标准养护箱内进行保湿预养 24 h,拆模后转移至全自动恒温恒湿养护室,控制温度为(20±1)℃,相对湿度为(95±2)%,继续养护至规定龄期。养护过程中试件分层放置于养护架,保证气流均匀,避免局部温湿度偏差。

1.2 试验方案

力学性能试件尺寸(直径×高)分别为 φ50 mm×100 mm(单轴抗压试验)和 φ50 mm×25 mm(巴西劈裂试验)。养护至 28 d 龄期后,采用 MTS 815.04 高刚性岩石力学试验机进行加载试验(图 4),加载速率为 0.1 mm/s。加载前设置预加载阶段,确保试件与加载板接触良好,消除安装间隙影

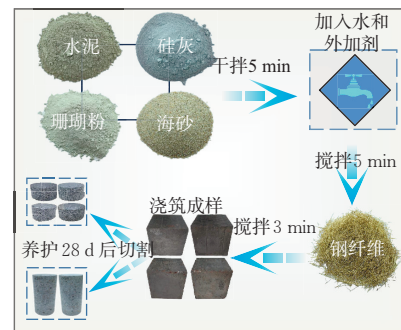


图3 试件制备流程

Fig.3 Specimen preparation process

响;试验全程自动记录荷载-位移曲线,并同步触发 DIC 图像采集,保障力学数据与应变场数据的时间同步性。

DIC 测试方案如下:试验前对试件表面制作随机散斑场(白底黑点分层喷涂,确保高对比度与散斑尺寸适宜),采用 Basler acA2500-14gm 工业相机(分辨率为 2 592 px×1 944 px,8 mm 镜头)双机对称布置,全程监测试件破坏过程。图像采集设置为常规阶段 1 帧/s、失稳阶段 10 帧/s;系统标定使用标定板,重投影误差<0.05 px。通过划分计算网格和生成指定形状测量区域,获取试件应变分布及裂

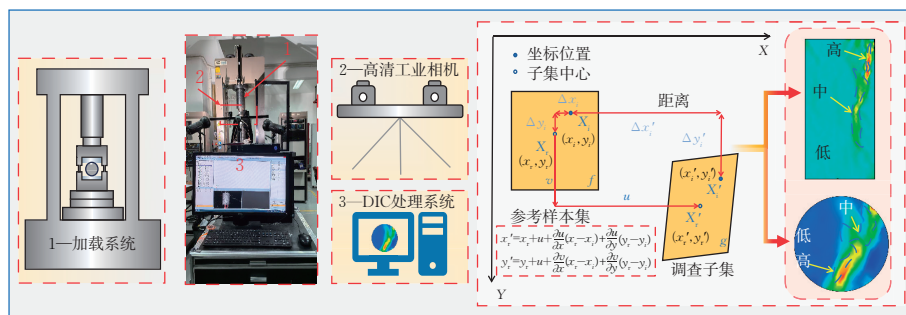


图4 加载试验系统

Fig. 4 Experimental loading system

缝扩展路径等关键信息。DIC 分析参数:子区大小 29 px×29 px,步长 7 px,采用滑动平均滤波与最小二乘法计算拉格朗日应变。

2 力学特性与破坏特征

2.1 抗压力学特性与破坏特征

CP 替代率对 HSM 抗压特性的影响如图 5 所示, HSM 试样在单轴压缩条件下的力学参数统计如表 3 所示。由图 5 可知, 当 CP 等质量替代水泥时, HSM 的抗压强度(σ_c)和峰值抗压应变(ϵ_c)均随着 CP 替代率的增加呈先升后降的趋势, 最优替代率为 5%。抗压强度试验结果表明, 基准组(CG0)的 σ_c 和 ϵ_c 分别为 113.53 MPa 和 0.86%。当 CP 替代率为 5% 时, σ_c 提升至 123.30 MPa, ϵ_c 增至 0.88%, 增幅分别为 8.6% 和 2.3%。当 CP 替代率增至 10% 时, σ_c 和 ϵ_c 分别为 118.36 MPa 和 0.86%, 仍高于基准组水平; 当替代率达到 15% 时, 其性能与基准组基本持平(σ_c 为 113.75 MPa, ϵ_c 为 0.85%)。值得注意的是, 当 CP 替代率进一步增至 20% 与 25% 时, HSM 的抗压性能显著劣化, σ_c 分别降至 111.19, 104.61 MPa, ϵ_c 分别降至 0.83%, 0.78%。由此可见, 15% 的 CP 替代率可视为 CP 增强效应向削弱效应转变的临界阈值。

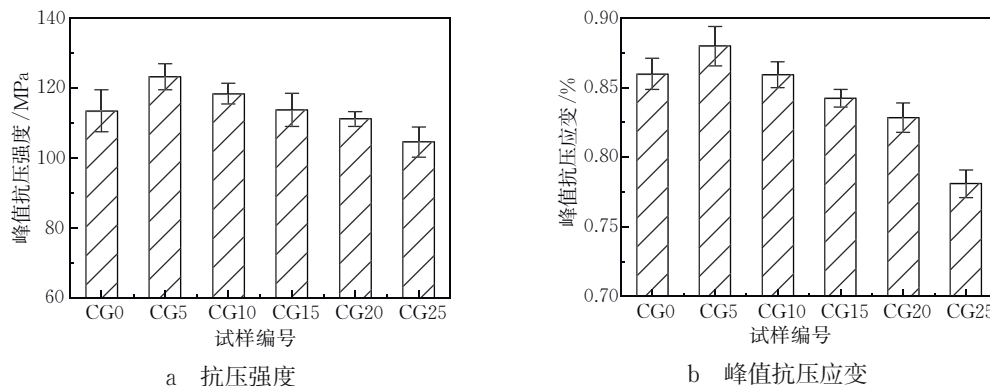


图5 CP替代率对HSM抗压特性的影响

Fig.5 Effect of CP replacement rate on the compressive properties of HSM

图 6 展示了 HSM 在压缩荷载下应力-应变曲线及 DIC 全场应变演化过程。所有曲线均呈现 4 个典型阶段: 孔隙压密阶段、弹性变形阶段、裂纹稳态扩展阶段与峰后破坏阶段。

孔隙压密阶段(I): 初始低应力加载时, 应力-应变曲线均呈典型上凹形态, 对应原生孔隙与微裂隙的渐进闭合过程^[18]。DIC 全场应变测量显示, 该阶段无新生裂纹对应的应变集中带, 仅表现为零星分布的局部高应变点, 印证了上述压密过程。整体轴向应变水平较低($<0.60\%$), 且以轴向压缩为主。当 CP 替代率为 0%~10% 时, 应变场分布相对均匀, 最大主应变均低于 0.39%, 并在 CP 替代率为 5%(CG5) 时达到最小值 0.281%; 该条件下高应变点的空间聚集度低, 表明材料内部缺陷较少、结构致密。相反, 当 CP 替代率超过 10%(CG15, CG20, CG25), 应变场出现弥散性高应变斑块, 最大主应变增至 0.581%, 提示孔隙率升高、结构疏松。该差异清晰映射出 CP 替代率对孔隙结构及早期压密响应的影响。

弹性变形阶段(II): 应力超越压密阈值后, 应力-应变关系呈近似线性增长, 表明原生孔隙、微裂隙已充分闭合, 材料内部形成连续稳定的弹性承载骨架。DIC 全场应变呈均匀连续分布, 最大主应变

表3 HSM试样在单轴压缩条件下的力学参数统计

Tab. 3 Statistical mechanical parameters of HSM specimens under uniaxial compression

试件编号	组别	抗压强度/MPa	均值/MPa	标准差	峰值抗压应变/%	均值/%	标准差
CG0	A	117.76	113.53	5.98	0.85	0.86	0.01
	B	109.30			0.87		
CG5	A	125.94	123.30	3.73	0.87	0.88	0.01
	B	120.65			0.89		
CG10	A	120.45	118.36	2.96	0.85	0.86	0.01
	B	116.27			0.87		
CG15	A	117.06	113.75	4.69	0.85	0.85	0.01
	B	110.43			0.84		
CG20	A	109.73	111.19	2.06	0.82	0.83	0.01
	B	112.64			0.84		
CG25	A	107.65	104.61	4.30	0.77	0.78	0.01
	B	101.56			0.79		

约 1.231%, 云图色差过渡平滑, 无宏观损伤局部化迹象; 轴向与侧向应变保持恒定比例, 应变场对称性良好, 进一步验证了材料处于弹性变形状态。不同 CP 替代率(0%~25%)试样在该阶段力学行为较为一致, 说明弹性范围内 CP 替代率对材料基体刚度等参数尚未造成显著影响。

裂纹稳态扩展阶段(Ⅲ): 荷载超过弹性极限后, 应力-应变曲线斜率显著降低, 试样由线弹性转入塑性变形, 微裂纹大量成核、聚集并扩展。DIC 全场应变分析表明, 局部主应变急剧升高(最高可达 6.898%), 形成明显的应变集中带(高亮红色区域), 标志宏观裂纹的发展。CP 替代率对该阶段裂纹模式具有显著影响: 当 CP 替代率为 0%~10% 时, 试样内仅出现一条贯穿断面的单一剪切应变带, 其外侧区域应变骤降, 呈现典型脆性剪切失稳前兆; 当 CP 替代率超过 15% 时, 应变集中带逐渐转向与加载轴平行, 形成显著拉伸带, 并伴随多条次生裂纹同步扩展。

峰后破坏阶段(Ⅳ): 应力达到峰值后, 应变局部化急剧加剧, 优势主裂纹内最大主应变剧增(高达 8.937%)。高应变带迅速演化扩展, 其时空扩展主导了宏观裂纹的贯通路径, 驱动裂纹面产生瞬时滑移; 随后承载力陡降, 试样沿已形成的破裂面发生滑移或劈裂失稳, 进入完全破坏状态。CP 替代率对峰后行为具有显著调控作用: 当 CP 替代率 > 15% (CG20, CG25) 时, 过量 CP 削弱基体黏结力, 导致主裂纹周围出现多级次应变集中区, 试件破坏模式

由单一剪切破坏转变为拉伸-剪切复合破坏, 裂纹路径趋于复杂曲折。

2.2 劈裂抗拉力学特性与破坏特征

CP 替代率对 HSM 抗拉特性的影响如图 7 所示, HSM 试样在巴西劈裂条件下的力学参数统计如表 4 所示。由图 7 可知, HSM 劈裂抗拉强度(σ_t)与峰值抗拉应变(ϵ_t)均随着 CP 替代率的增加呈先升后降的趋势, 最优替代率为 5%。劈裂抗拉强度试验结果表明, 与基准组 CG0 相比($\sigma_t=28.22$ MPa, $\epsilon_t=2.51\%$), 当 CP 替代率为 5% 时, σ_t 和 ϵ_t 分别提升至 29.98 MPa 和 2.87%, 对应增幅分别为 6.2%, 14.3%。当 CP 替代率增至 10% 时, HSM 的 σ_t 和 ϵ_t 分别为 29.23 MPa 和 2.66%, 仍显著高于基准组 CG0。当替代率提高至 15% 时, σ_t 降至 28.04 MPa, 与基准组 CG0 基本持平, 而 ϵ_t 进一步增至 2.60%, 提升了 3.59%。当 CP 替代率继续增长, σ_t 呈显著下降趋势: 当替代率为 20% 和 25% 时, σ_t 分别为 27.15, 26.82 MPa。相比之下, ϵ_t 在 20% 替代率时维持在 2.57%, 在 25% 替代率时回落至 2.35%, 与基准组持平。由此可见, CP 替代率超过 5% 后, 材料 σ_t 持续衰减, 而 ϵ_t 在高替代率区间内仍具有一定增长潜力, 直至替代率为 25% 时, 才回落至基准水平。

图 8 展示了 HSM 在拉伸荷载下的应力-应变曲线及 DIC 全场应变演化过程。与单轴压缩结果一致, HSM 曲线同样呈现 4 个典型阶段: 孔隙压密阶段、弹性变形阶段、裂纹稳态扩展阶段与峰后破坏

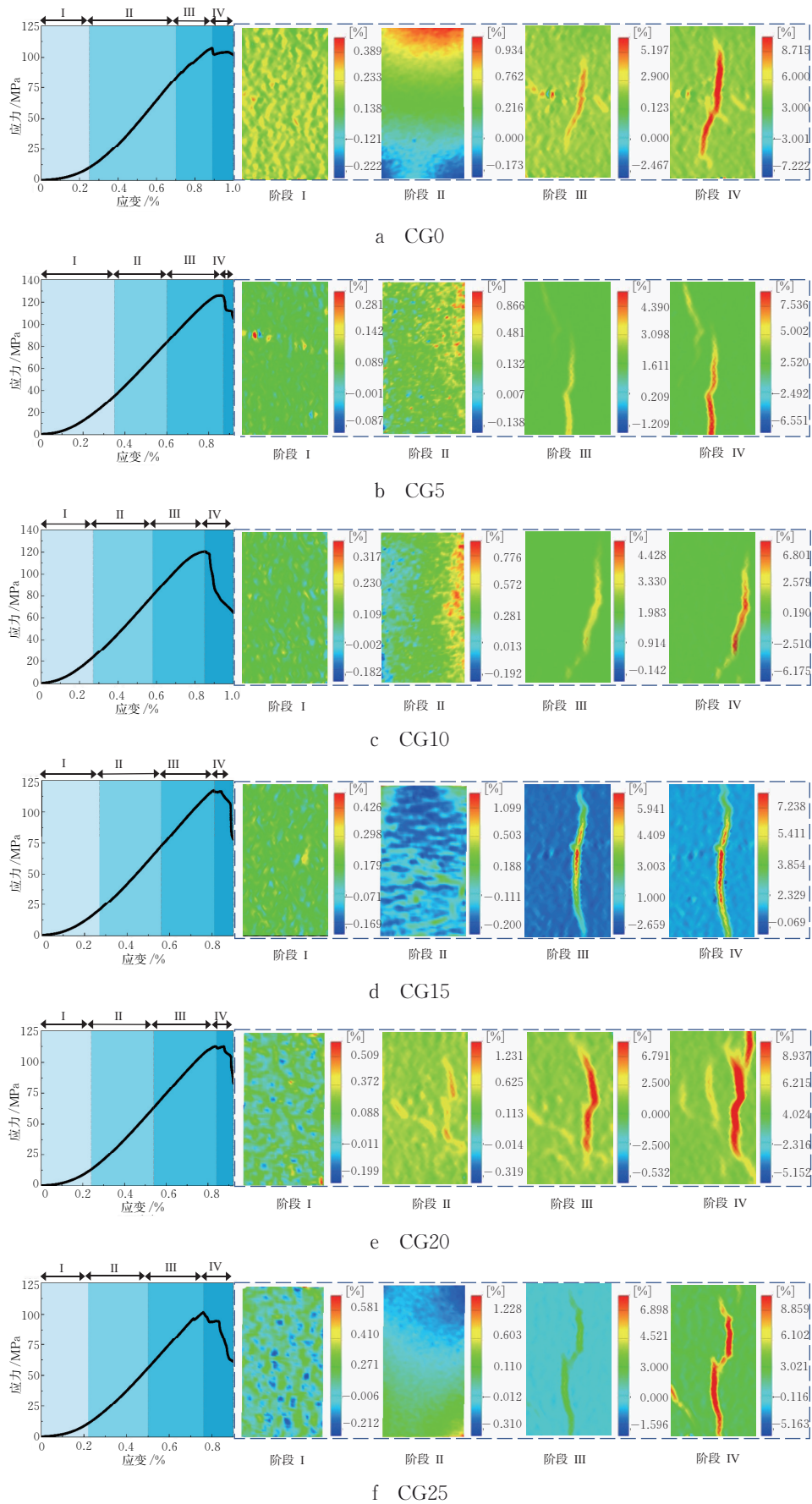


图 6 压缩荷载下应力-应变曲线及DIC演化过程

Fig. 6 Stress-strain curves and DIC evolution process under compressive load

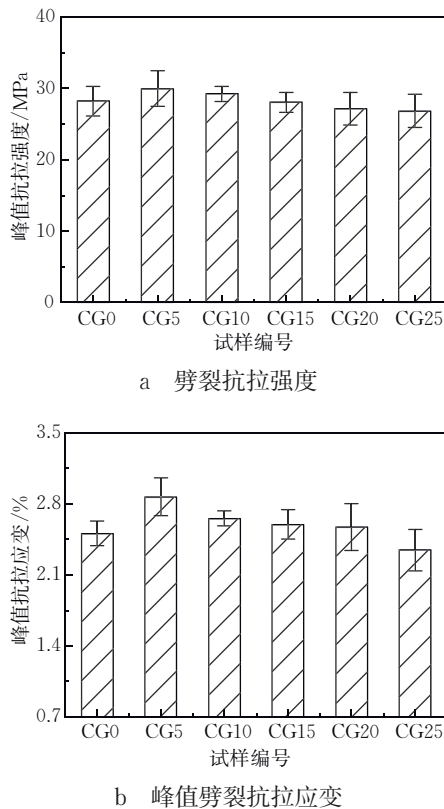


图7 CP替代率对HSM抗拉特性的影响

Fig.7 Effect of CP replacement rate on the tensile properties of HSM

阶段。结合应力-应变曲线与DIC全场应变演化过程,可揭示CP替代率对抗拉强度、变形特性及破坏模式的调控作用。

孔隙压密阶段(I):初始低应力加载时,应力-

应变曲线呈上凹形态,表明试样内部原生孔隙与微裂纹逐步闭合。DIC全场应变分析显示:试件整体应变水平较低($<0.673\%$),分布相对均匀;局部高应变点零星分布于中心区域及加载边界附近,前者归因于微缺陷的空间非均匀性,后者主要受加载端部效应影响。该阶段为孔隙结构调适与微缺陷闭合过程,为后续弹性变形提供致密稳定的微结构基础。当CP替代率为0%~10%时,应变场均匀,最大主应变均 $<0.304\%$,并于5%替代率时降至最低(0.256%);当替代率超过15%时,最大主应变增至0.673%,表明高CP替代率导致孔隙率升高、基体疏松。

弹性变形阶段(II):随着荷载持续增长,应力-应变曲线进入典型的弹性变形阶段。最大拉应变集中于圆盘中心且沿加载直径方向递减,试件零星出现弥散的高应变区;整体应变处于较低水平($<1.9\%$),区域应力水平仍低于材料起裂阈值,基体内部微结构较为完整,尚未发生明显损伤。不同CP替代率(0%~25%)试样在该阶段未表现较为明显的差异。

裂纹稳态扩展阶段(III):荷载超过弹性极限后,应力-应变曲线斜率迅速减小并呈明显凸形特征,标志着试件由线弹性响应转入不可逆损伤演化阶段。此阶段,试件内部微裂纹快速萌生、扩展。DIC全场应变监测显示,应变场沿加载方向形成贯穿试样的高应变带,可作为材料临近拉伸破坏的重要前兆特征。值得注意的是,CP替代率显著改变裂纹扩

表4 HSM试样在巴西劈裂条件下的力学参数统计

Tab. 4 Statistical mechanical parameters of HSM specimens under Brazilian splitting

试件编号	组别	劈裂抗拉强度/MPa	均值/MPa	标准差	峰值抗拉应变/%	均值/%	标准差
CG0	A	26.73	28.22	2.10	2.42	2.51	0.12
	B	29.71			2.59		
CG5	A	28.23	29.98	2.47	2.74	2.87	0.21
	B	31.72			3.00		
CG10	A	28.46	29.23	1.08	2.71	2.66	0.07
	B	29.99			2.60		
CG15	A	27.03	28.04	1.42	2.50	2.60	0.14
	B	29.04			2.70		
CG20	A	25.55	27.15	2.26	2.41	2.57	0.23
	B	28.75			2.73		
CG25	A	25.18	26.82	2.32	2.20	2.35	0.20
	B	28.46			2.49		

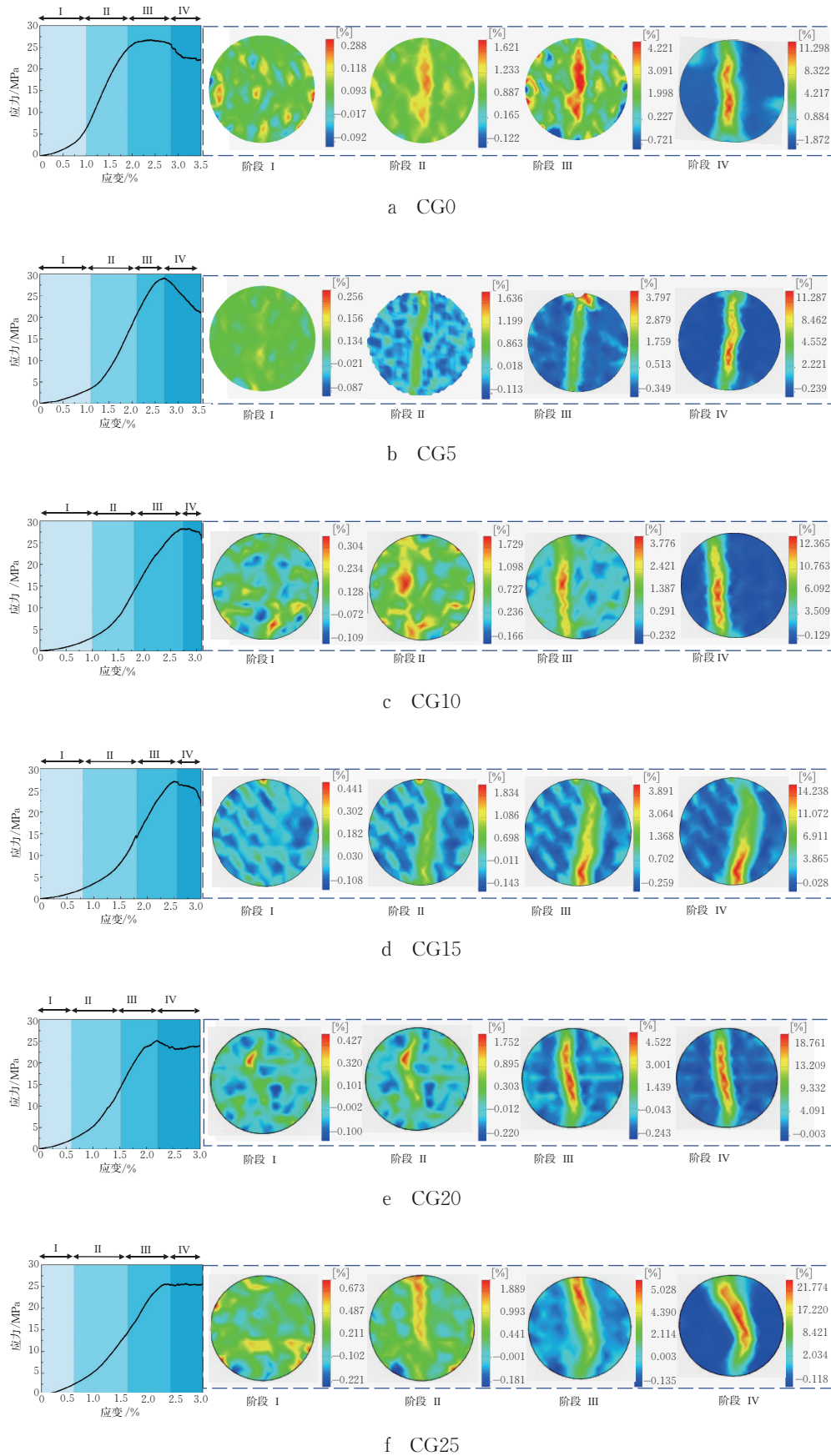


图 8 拉伸荷载下应力-应变曲线及DIC演化过程

Fig. 8 Stress-strain curves and DIC evolution process under tensile load

展路径及应变局部化模式:低替代率组(0%~10%)因基体致密均匀,形成单一且近乎平直的应变集中带,应力传递路径高度集中;高替代率组(15%~25%)则因过量 CP 削弱界面黏结力并引入额外孔隙,导致基体致密性下降、局部刚度不均,应力场非均匀分布,促使高应变带发生明显偏移与分叉,裂纹路径显著曲折。

峰后破坏阶段(Ⅳ):荷载越过峰值应力后,应力-应变曲线迅速下降,材料内部应变集中区域的应变急剧增长,并沿加载方向快速扩展;微裂纹持续扩展并快速贯通,最终导致结构失稳破坏。其中,CG20 和 CG25 表现出较上一阶段更为明显的裂纹路径偏移现象,裂纹扩展呈现明显的曲折特征。过量 CP 掺入导致颗粒间连接松散、微观结构非均匀性增强,局部应力集中效应显著改变裂纹扩展轨迹,HSM 微观结构完整性劣化,进而导致宏观力学性能衰减。

3 结论

本文采用等质量替代法,以 CP 替代水泥,研究了不同 CP 替代率对 HSM 的力学性能与破坏演化规律的影响,结合 DIC 技术全程监测应变场演化,主要得出以下结论。

(1)单轴压缩性能呈“增强-拐点-劣化”三段式演化,5% 替代率时抗压强度达峰值 123.30 MPa,较基准提升了 8.6%。DIC 显示,低替代率下应变场均匀、裂纹呈单一剪切带形式。替代率 $\geq 15\%$ 后强度递减,替代率为 20% 时已低于基准组,主裂纹由剪切转为拉伸并伴生多条次生裂纹,破坏模式由脆性剪切转为拉-剪复合,表明 CP 替代率通过调控孔隙结构改变了压缩破坏机制。

(2)巴西劈裂结果与压缩趋势一致,5% 替代率使劈裂抗拉强度提升至 29.98 MPa,峰值抗拉应变增至 2.87%,裂纹平直集中。替代率 $\geq 15\%$ 后强度回落,裂纹由单一拉伸转为多分叉曲折,DIC 显示高替代率下出现多条高应变带,应变局部化程度增强,说明高替代率 CP 削弱界面黏结性能,诱发拉伸应变分散与路径偏折,破坏模式由脆断向延性转变。

(3)基于 HSM 抗压强度、抗拉强度及峰值应变均不低于基准组(无掺入 CP)的综合考量,建议岛礁工程 HSM 的 CP 替代率控制在 5%~10%。该区间可同步提升承载能力与抗变形能力,有效抑制裂纹分叉及界面缺陷,兼顾结构安全、韧性与材料利用

率,实现珊瑚废料的绿色高值化利用。

参考文献:

- [1] 沈骏,袁梦,闫敏,等.海洋环境下干湿循环对结构混凝土性能影响的研究现状、存在问题及其发展趋势[J].硅酸盐通报,2017,36(6):1929-1938.
- [2] 刘华华.环氧树脂/地聚物改性水工混凝土抗氯盐侵蚀性能研究[J].广东建材,2025,41(4):18-21.
- [3] Zhang J T. Application of ultra-high performance concrete in the marine environment[J]. E3S Web of Conferences, 2025, 606: 04008.
- [4] 邝晓,蹇守卫,孙诗兵,等.岛礁工程用功能材料关键制备技术研究与应用[J].建设科技,2021(13):133-135.
- [5] 梅军帅,吴静,王罗新,等.珊瑚砂浆的力学性能与微观结构特征[J].建筑材料学报,2020,23(2):263-270.
- [6] Hussain A, Yu T, Zou F X. Durability analysis of nano-carbon black-based self-strain sensing ultra-high-performance concrete (UHPC): Effects of moisture content and sea-salt solution exposure[J]. Construction and Building Materials, 2025, 473: 141031.
- [7] 王磊,赵艳林,吕海波.珊瑚骨料混凝土的基础性能及研究应用前景[J].混凝土,2012(2):99-100,113.
- [8] 刘天宝,范建华,朱晓亮,等.某海域生物钙质砂冲击试验研究[J].人民长江,2015,46(增刊2):104-105,111.
- [9] Yu H F, Da B, Ma H Y, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment[J]. Ocean Engineering, 2017, 135: 1-10.
- [10] Ehlert R A. Coral concrete at bikini atoll[J]. Concrete International, 1991, 13(1): 19-24.
- [11] 刘特,雷学文,孟庆山.吹填礁砂层状地基水平推剪试验研究[J].人民长江,2020,51(9):183-188.
- [12] Zhou W, Feng P, Yang J Q. Advances in coral aggregate concrete and its combination with FRP: A state-of-the-art review[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(6): 1161-1181.
- [13] 韩超.海水拌养珊瑚混凝土基本力学性能试验研究[D].南宁:广西大学,2011.
- [14] 徐彬彬,欧忠文,罗伟,等.海水干湿循环下玄武岩纤维增强珊瑚混凝土耐久性[J].合成纤维,2020,49(3):23-27.
- [15] Zeng Z J, Miao C W, Shi M L, et al. Study on the dense structure and properties of cement-stabilized coral aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129465.
- [16] He Z H, Shen M L, Shi J Y, et al. Recycling coral

- waste into eco-friendly UHPC: Mechanical strength, microstructure, and environmental benefits [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155424.
- [17] Ni Y Q, Shi J Y, He Z H, et al. Synergistic effect of coral sand and coral powder on the performance of eco-friendly mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134468.
- [18] 李诚. 掺珊瑚粉超高性能混凝土的力学性能和微观结构研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- [19] Zhao R Q, Li C F, Guan X M. Advances in modeling surface chloride concentrations in concrete serving in the marine environment: A mini review [J]. *Buildings*, 2024, 14(6): 1879.

Crack Evolution and Strength Threshold of Coral Powder High-Strength Mortar Based on Digital Image Correlation

LI Pengxin¹, CHEN Haolin², ZHOU Haifeng², XIONG Xiao³,
LIU Yongliang¹, ZHENG Chao², WANG Gang^{2*}

(1. China Gezhouba Group No.1 Engineering Co., Ltd., Yichang 443002, China;

2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

3. Sichuan Dadu River Shuangjiangkou Hydropower Development Co., Ltd., Maerkang 624000, China)

Abstract: This study aims to develop a low-carbon and cost-effective high-strength mortar (HSM) suitable for island reef construction by partially replacing cement with coral powder (CP) at substitution rates of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% by mass. The mechanical properties of HSM were systematically investigated through uniaxial compression and Brazilian splitting tests, complemented by the digital image correlation (DIC) method. The results indicate that the strength of HSM follows a three-phase evolution pattern of “enhancement, inflection, and deterioration”, as the CP content increases. The inflection point occurs at a 5% replacement rate, where the compressive and splitting tensile strengths are recorded at 123.30 and 29.98 MPa, respectively, reflecting increases of 8.6% and 6.2% compared to the control group without CP. When the replacement rate reaches 15% or more, a significant decrease in strength is observed; at a 20% replacement rate, the strength falls below that of the control group. The failure mode transitions from a single brittle fracture (characterized by straight cracks and concentrated strain bands) at lower replacement rates to a combined tension-shear failure (characterized by bifurcation of primary cracks and a dense formation of secondary cracks, with DIC indicating significant localization) at higher replacement rates. To ensure structural safety, toughness, and optimal material efficiency, it is recommended that the CP replacement rate for HSM in island reef construction be maintained between 5% and 10%.

Keywords: coral powder; high-strength mortar; uniaxial compression; Brazilian splitting; digital image correlation

(责任编辑 王德平)