

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240904003

海水环境下全轻陶粒混凝土与普通混凝土粘结 界面抗剪强度演化研究*

朱红兵^{1,2}, 何浩^{1,2}, 段亦雪^{1,3}, 付正昊^{1,2}

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉 430065; 2. 武汉科技大学高性能工程结构研究院, 湖北武汉 430065;
3. 襄阳职业技术学院, 湖北襄阳 441050)

摘要:全轻陶粒混凝土用于加固混凝土构件具有结构自重增幅小的优点,其与既有混凝土粘结界面的性能退化规律对海洋环境下加固构件耐久性损伤评估很重要。对3种类型界面剂(环氧树脂、水泥净浆、丙烯酸)、3种粗糙度(1、3、5 mm)的轻骨料混凝土-普通混凝土粘结界面试件进行0~150 d人工海水溶液高温加速侵蚀,然后对经历侵蚀的界面试件进行斜剪试验,分析试件形貌变化、剪切破坏形态及粘结强度退化规律。结果表明:在海水环境侵蚀过程中,试样的界面剪切破坏模式随时间增长逐渐从混合内聚破坏向粘结破坏转变;界面粘结强度随侵蚀天数增加先缓慢升高后显著降低,侵蚀60 d时,粗糙度3 mm、环氧树脂界面的斜剪强度最大,为19.95 MPa,侵蚀150 d后的混凝土界面斜剪强度最大下降23%;经过150 d海水溶液侵蚀后,1、3、5 mm粗糙度下界面斜剪强度较侵蚀前分别下降了22.65%、21.75%、22.93%。适当进行界面粗糙处理可以提高混凝土界面的耐腐蚀性,在侵蚀过程中采用相同粗糙度时使用环氧树脂界面试件最大斜剪强度均大于水泥净浆和丙烯酸。无论是采用何种粗糙度和界面剂,海水环境对界面斜剪强度的影响都非常显著(影响值 F 均大于 $F_{0.025}$)。试验结论对海洋环境下轻骨料混凝土加固既有混凝土结构的界面耐久性能退化评估具有重要意义。

关键词:全轻陶粒混凝土;普通混凝土;界面粘结;抗剪强度;海水环境

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0303-10

Shear Strength Evolution of Bond Interface between Full-lightweight Ceramsite Concrete and Ordinary Concrete in Seawater Environment

ZHU Hongbing^{1,2}, HE Hao^{1,2}, DUAN Yixue^{1,3}, FU Zhenghao^{1,2}

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Institute of High Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Xiangyang Vocational and Technical College, Xiangyang 441050, China)

Abstract: Full-lightweight ceramsite concrete has the advantage of causing only a small increase in structural self-weight when used to reinforce concrete components. The degradation behavior of the bond interface between it and existing concrete is crucial for evaluating the durability deterioration of reinforced components in the seawater environment. Lightweight aggregate concrete-ordinary concrete

* 收稿日期:2024-09-04;修回日期:2024-12-30

基金项目:国家自然科学基金(51778630)、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划基金项目(T2022002)、武汉科技大学湖北省“十四五”优势特色学科(群)基金项目(2023D0501)资助

作者简介:朱红兵(1977—),男,教授,博导,博士。主要从事高性能混凝土材料、混凝土结构耐久性等方面的研究。

E-mail: hnhzyhb@163.com

bond interface specimens with three types of interfacial agents (epoxy resin, cement paste, acrylic acid) and three roughness levels (1, 3, and 5 mm) were subjected to high-temperature accelerated erosion in artificial seawater solution for 0 to 150 days. Slant shear tests were then conducted on the eroded interface specimens to analyze the morphological changes of the specimens, shear failure modes, and the degradation patterns of bond strength. The results showed that during the erosion process in the seawater environment, the interfacial shear failure mode of the specimens gradually changed from mixed cohesive failure to bond failure with increasing erosion time. The interfacial bond strength first increased slowly and then decreased significantly with increasing erosion time. At 60 days of erosion, the epoxy resin interface with roughness of 3 mm had the highest slant shear strength of 19.95 MPa. The maximum reduction in slant shear strength of the concrete interface after 150 days of erosion was 23%. After 150 days of erosion in the seawater solution, the slant shear strength of the interface under the roughness levels of 1, 3, and 5 mm decreased by 22.65%, 21.75%, and 22.93%, respectively, compared with that before erosion. Appropriate interfacial roughening treatment can improve the corrosion resistance of the concrete interface. During the erosion process, under the same roughness level, the maximum slant shear strengths of the specimens using epoxy resin interfacial agents were greater than those using cement paste and acrylic acid. Regardless of the roughness level and interfacial agent used, the effect of the seawater environment on the interfacial slant shear strength was very significant (all F-values were greater than F0.025). The findings are significant for evaluating the degradation of interfacial durability performance of existing concrete structures reinforced with lightweight aggregate concrete in the seawater environment.

Keywords: full-lightweight ceramsite concrete; ordinary concrete; interface bonding; shear strength; seawater environment

0 引言

混凝土是海洋环境下基础设施建设的常用材料。海水中存在的硫酸根离子、氯离子和镁离子会与水泥混凝土发生复杂的化学反应^[1],随着使用年限的增长,暴露于海水环境的混凝土结构逐渐发生劣化和损伤,对混凝土结构的强度和耐久性产生不利影响^[2]。对海水环境下受损的建(构)筑物修复加固以延长现有混凝土结构的使用寿命,对保障海洋工程结构安全具有重要意义^[3]。

与普通混凝土相比,全轻陶粒混凝土(LWAC)强度高、自重轻,能够在保持目标强度要求的同时减轻结构重量,是一种潜在的修补加固材料^[4]。在结构加固后,新旧混凝土之间的界面是整个组合结构中最脆弱的部分,新旧混凝土界面粘结性能将直接影响加固结构的可靠性和耐久性^[5]。轻骨料混凝土与普通混凝土之间的界面特性引起了人们的广泛关注。诸成烽等^[6]认为人工凿毛可有效改善轻骨

料混凝土和普通混凝土在浇筑结合面区域的粘结性能。朱红兵等^[7]通过劈裂抗拉试验发现涂抹界面剂可以显著改善全轻陶粒混凝土与普通混凝土之间的界面抗拉强度。王建民等^[8]考虑了轻骨料混凝土和普通混凝土的材料性能差异及剪切破坏面的组成,建立了叠合浇筑剪切破坏机构模型并发现轻骨料混凝土与普通混凝土界面的劈裂抗拉强度为1.70~4.22 MPa,均满足规范要求^[9],验证了轻骨料混凝土与普通混凝土之间具有良好的粘结性能,能避免加固工程中新老混凝土的脱粘,是一种较好的加固材料。然而,上述研究集中于常规环境下轻骨料混凝土与普通混凝土界面力学性能,关于耐久性损伤过程中界面力学强度演变的研究较少,缺少对海水环境中轻骨料混凝土与普通混凝土界面力学性能演变的研究成果,难以为轻骨料混凝土在沿海地区混凝土结构修复加固工程中的应用提供可靠的参考。

海水环境下有害离子透过混凝土表面的缺陷和孔隙渗透至内部,与其中的氢氧化钙和水化铝酸

钙发生反应,生成难溶盐类物质。由于这些反应引起体积膨胀,导致内部应力增大,长期累积下来会导致混凝土出现裂缝^[10]。现有研究已证明海水环境对混凝土有一定的有害影响:在海洋环境暴露270 d后,混凝土试块总体呈黄灰色,且产生微裂缝^[11];经海水侵蚀180 d的水泥基砂土注浆材料力学强度较90 d最大下降了44.55%^[12]。可见海水环境会对混凝土材料的外观和力学性能产生一定的损害。尤其是新老混凝土界面相较于整浇混凝土材质疏松、孔隙大,当遇到化学盐蚀时,界面为有害离子提供了额外的渗透通道,在海洋环境中新老混凝土界面的劣化速率可能要快于整浇混凝土^[13]。虽然在常规工况下LWAC与普通混凝土间表现出较好的粘结力,但是LWAC与普通混凝土界面在海水侵蚀过程中是否会快速失效,界面粘结强度如何演化尚未可知,开展海水环境下LWAC与普通混凝土界面粘结强度演化研究很有必要。

受海洋环境的影响,我国沿海地区建筑物受侵蚀严重,对受侵蚀损伤建筑物进行加固补强任务繁重,如何增强加固结构的耐久性同样刻不容缓。因此,本文采用普通混凝土作为老混凝土,全轻陶粒混凝土作为新混凝土(修补和加固材料)制备新老混凝土试件,用斜剪强度表征新老混凝土界面的粘结强度。测试不同界面粗糙度和界面剂类型的新老混凝土试件分别经历0、30、60、90、120、150 d模拟海水环境在40℃高温加速侵蚀后的界面斜剪强度,分析试件形貌变化、剪切破坏形态及粘结强度退化规律,评估海水环境侵蚀对全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面粘结强度的影响,促进全轻陶粒混凝土应用于海水环境的工程结构加固修复。

1 试验概况

1.1 试验原材料

(1)普通混凝土:采用湖北“华新牌”P.O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料为河砂,表观密度为2.65 g/cm³,细度模数为2.7;粗集料采用粒径在5~25 mm的普通碎石;使用武汉市自来水。

(2)全轻陶粒混凝土:水泥和水与普通混凝土相同;细骨料采用800级页岩陶砂,粒径为0.16~4.75 mm;粗骨料为800级页岩陶粒,粒径为5~

20 mm;采用高性能聚羧酸酯型高效减水剂。

(3)界面剂:采用水泥净浆、环氧树脂和丙烯酸复配乳液三种界面剂。其中水泥净浆水灰比 $w/c=0.28$,使用P.O 42.5水泥制备;环氧树脂界面剂为北京家晟建材有限公司生产;丙烯酸复配乳液采用深圳吉田化工有限公司产品。

1.2 配合比

经过多次试配得到新老混凝土的配合比见表1^[14-16]。

表1 普通混凝土和全轻陶粒混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of ordinary concrete and full-lightweight ceramsite concrete 单位:kg/m³

混凝土种类	水泥	水	河砂	碎石	陶粒	陶砂	减水剂母液
C45	605	230	565	1 050	—	—	—
LC50	550	185	—	—	620	600	0.005 1

养护28 d后,测得普通混凝土和全轻陶粒混凝土的力学性能^[17],见表2。

表2 普通混凝土和全轻陶粒混凝土28 d力学性能

Table 2 Basic mechanical parameters of ordinary concrete and full-lightweight ceramsite concrete at 28 days

混凝土种类	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	直剪强度/ MPa	弹性模量/ GPa
C45	49.70	3.94	5.39	31.10
LC50	52.54	3.21	5.31	32.43

1.3 试件制备

共制作162个试样,分为9组,“R1-R5”分别代表界面粗糙度为1、3 mm和5 mm,“B1-B3”分别代表界面剂种类为环氧树脂、水泥净浆和丙烯酸,见表3。

斜剪试验试件尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体^[17],如图1所示。

在普通混凝土浇筑过程中,将木楔子放入模具中,以形成从样品纵轴测量的30°倾斜表面。普通混凝土在标准养护室中养护28 d后,试件表面通过人工凿毛露出粗骨料,用灌砂法测量界面粗糙度^[18],首先,将试件周围用塑料板围起来,塑料板的高度

表3 试件分组

Table 3 Grouping of specimens

组号	界面剂类型	试件个数/个	界面粗糙度/mm	侵蚀天数/d
R1B1	环氧树脂	18		
R1B2	水泥净浆	18	1	
R1B3	丙烯酸	18		
R3B1	环氧树脂	18		0、30、60、
R3B2	水泥净浆	18	3	90、120、150
R3B3	丙烯酸	18		
R5B1	环氧树脂	18		
R5B2	水泥净浆	18	5	
R5B3	丙烯酸	18		

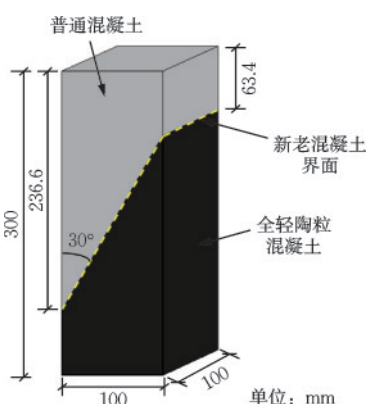


图1 全轻陶粒混凝土-普通混凝土试样设计

Fig.1 Design of full-lightweight ceramsite concrete-ordinary concrete specimens

和混凝土表面的最高点二者平齐,倒入细砂(粒径0.25~0.35 mm)后刮平,用量筒测量所用细砂的体积。重复以上操作程序三次,记录测量结果并取平均值。细砂体积与界面面积比值为灌砂的平均深度(单位:mm)。最后,测量细砂体积,并根据式(1)计算表面粗糙度。

$$h = \frac{V}{S} \quad (1)$$

式中, h 为粗糙度,mm; V 为细砂体积, mm^3 ; S 为界面面积, mm^2 。

将养护足期的老混凝土装入100 mm×100 mm×300 mm的塑料模具,在经过界面处理后的老混凝土粘结面均匀涂抹界面剂,厚度按1.5 mm控制,待稍微收浆后灌入搅拌好的新混凝土,标准养护28 d,养护完成后进行力学试验。

1.4 试验方法

参考《ASTM D1141》^[19]确定人工模拟海水各

成分及含量。采用(24.53 g NaCl+5.20 g MgCl₂+4.09 g Na₂SO₄+1.16 g CaCl₂+0.695 g KCl+0.201 g NaHCO₃+0.101 g KBr)/L及0.2 mol/L的NaOH配制模拟海水,pH=8.2,模拟海水腐蚀环境。采用室内加速腐蚀环境预处理方法,将温度保持在40±2℃^[20],加温加速盐溶液侵蚀。将养护28 d的试件移至配好人工海水的恒温水箱里浸泡,使溶液始终保持浸没试件,每30 d更换一次溶液以防盐含量下降。

通常认为斜剪试验的受力状态较符合工程实际^[21]。界面斜剪强度试验采用数显式压力试验机进行测量,如图2所示。

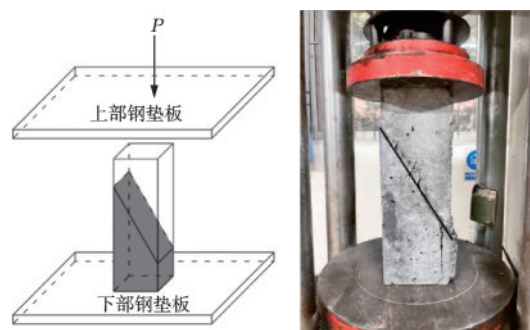


图2 斜剪试验

Fig.2 Slant shear test

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[17]进行试验,加载速率控制在0.03~0.05 MPa/s。试件的斜剪试验实际是混凝土受压、粘结面处受压剪的破坏过程,根据混凝土立方体抗压强度公式,推算得到混凝土粘结斜剪强度以及剪切面上的压应力,按式(2)、式(3)计算:

$$f = \sin 30^\circ \cos 30^\circ \frac{P}{A} = 0.433 \frac{P}{A} \quad (2)$$

$$N = \sin 30^\circ \sin 30^\circ \frac{P}{A} = 0.25 \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中, f 为混凝土粘结斜剪强度,MPa; N 为破坏时粘结面上压应力,MPa; P 为试件破坏荷载,N; A 为试件粘结面积, mm^2 。

2 结果与分析

2.1 试验现象

试验过程中每隔30 d记录一次试件表面形貌变化,观察是否有开裂剥落现象,如图3所示。

随着侵蚀天数的增加,海水环境中的试件表面

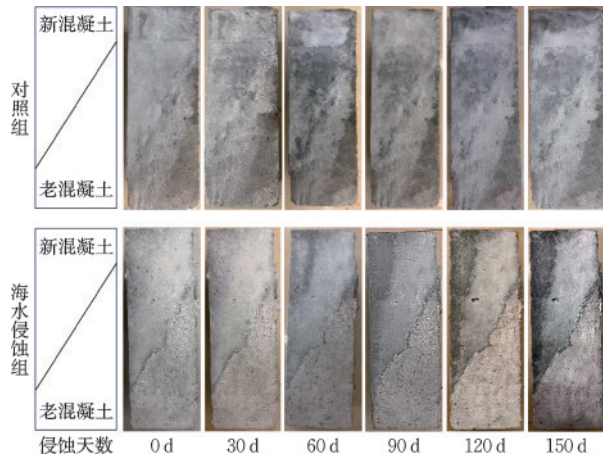


图3 试件表面形貌变化

Fig.3 Changes in surface morphology of specimens

逐渐形成一层白色产物,同时表面生成大量密集孔隙,甚至发展出细微裂缝。经过150 d的海水侵蚀,混凝土表面水泥浆脱落,伴随棱角处有一定损坏,质量下降约为0.85%。由此可见,海水环境会对全轻陶粒混凝土与普通混凝土试样产生明显影响。这是因为在侵蚀环境中,硫酸盐与水泥基材料发生反应,产生钙矾石(Aft),在混凝土的内部产生应力,导致内部构造损伤。硫酸盐浓度较高时则不仅生成钙矾石而且还会有石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)结晶析出,石膏的生成使固体体积增大124%引起混凝土膨胀开裂^[22]。海水中 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 对混凝土都具有侵蚀性,两种离子共存时,对混凝土的侵蚀作用相互叠加,导致混凝土损伤劣化更为严重^[23]。 Cl^- 侵入混凝土的孔隙后,不稳定的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会析出,形成 CaCl_2 , Mg^+ 会加速水泥的水化,促进Aft、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成进而形成复合盐,造成盐结晶侵蚀^[24]。

2.2 界面剪切性能

2.2.1 破坏模式

图4为试件在经历0 d和150 d海水环境浸泡后的斜剪破坏模式。

当试件未被侵蚀,界面两侧的新老混凝土均破坏,破坏平面穿过整个界面,老混凝土基体的损伤比新混凝土基体的更严重,这种破坏模式为混合内聚破坏,如图4(a)所示。

当试件经过海水环境侵蚀150 d后,新老混凝土试件裂缝沿界面发展,并从老混凝土基体上切断尖端,新混凝土一部分附着在旧混凝土表面,新混凝土表面覆盖着旧混凝土,这种破坏模式为界面粘结破坏,如图4(b)所示。

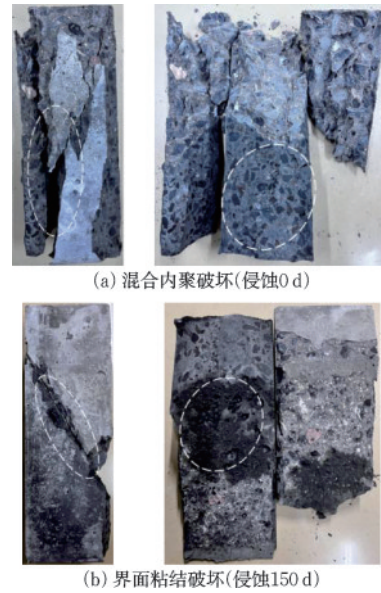


图4 斜剪试验中全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面破坏形态

Fig.4 Failure modes of interface between full-lightweight ceramsite concrete and ordinary concrete in slant shear test

上述现象表明,在海水环境浸泡侵蚀的过程中,海水环境导致全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面破坏模式发生了转变,从混合内聚破坏转变为界面粘结破坏。现有研究表明,全轻陶粒混凝土具有良好的流动性,浇筑过程中能够充分填充老混凝土粗糙表面,确保新老混凝土界面之间良好的机械连锁^[25],这使得界面的粘结强度大于新混凝土和老混凝土强度,导致全轻陶粒混凝土和普通混凝土粘结试样在压剪过程中不会因为界面破坏而失效,即混合内聚破坏。此外,在微观层面新老混凝土界面相较于整浇混凝土存在更多的孔隙,这为氯离子和硫酸盐离子的侵蚀提供了额外的渗透通道^[13],使界面的劣化速率要快于新混凝土和老混凝土两部分,导致界面逐渐成为新老混凝土粘结体系中最薄弱的部分。

2.2.2 界面抗剪强度的演化

随着侵蚀天数增加,各组试件的界面抗剪强度呈现先增长后下降的变化趋势,如图5所示。

为了确保新老混凝土之间有足够的粘结力,对于斜剪强度,ACI-2006要求28 d界面压剪强度在14~21 MPa^[26],在侵蚀前各组试件的斜剪强度均高于ACI-2006所要求的最小值14 MPa,说明了LWAC与普通混凝土具有较好的粘结力。相较于未经过海水环境侵蚀的试样,在侵蚀前期界面的抗剪强度均有所提升,最多为15.38%(试件R3B1);但

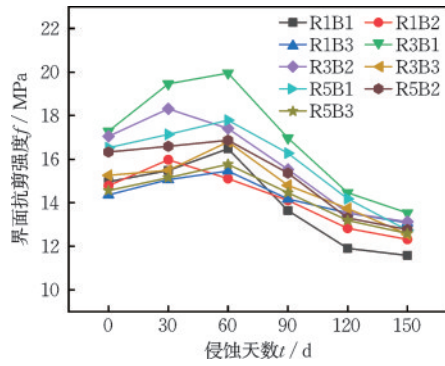


图5 界面抗剪强度演化规律

Fig.5 Evolution patterns of interfacial shear strength

当侵蚀天数大于60 d时,新老混凝土试件界面抗剪强度呈现下降的趋势;试件在被侵蚀30~60 d时界面抗剪强度达到最大值。然而,当新老混凝土界面经过了90~120 d的海水环境侵蚀后,绝大部分组试件界面抗剪强度都低于规范值。经过海水环境侵

蚀150 d后,各组界面抗剪强度均低于侵蚀前,下降幅度为13.4%~23%。上述现象表明,海水环境侵蚀对界面抗剪强度影响较大,先轻微的改善再显著下降。这是前期由于 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的存在加速了混凝土水化过程,产生更多Friedel盐和Aft,这些腐蚀产物不断填充混凝土界面的孔隙,从而产生更致密的微观结构。因而增强了界面黏结强度,混凝土前期强度升高^[27];随着侵蚀时间不断增加,大量膨胀性水化产物在混凝土内部孔隙和界面处积聚并产生膨胀应力,导致了混凝土微观结构的损伤,从而导致混凝土耐久性能劣化,强度随之下降^[28]。此外,经过拟合发现所有试样的强度演化与先升后降的双折线模型具有较高的拟合度, R^2 为0.80~0.99,如图6所示。因此,在工程实际中可按此模型对海水侵蚀下全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面抗剪强度进行预测。

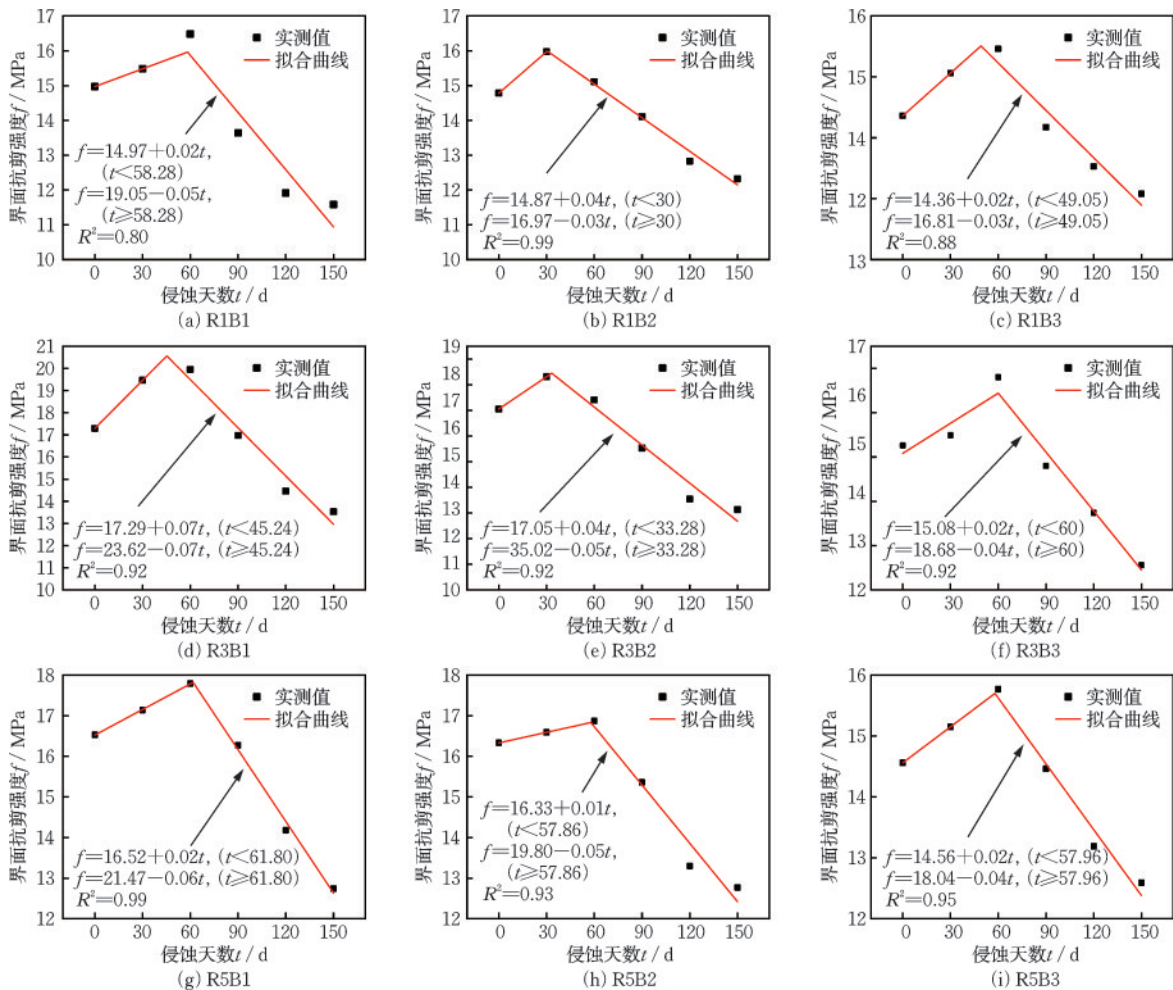


图6 界面抗剪强度拟合模型

Fig.6 Fitting models of interfacial shear strength

现有研究已报道并解释了在硫酸盐或氯盐侵蚀条件下,随着侵蚀天数的增加新老混凝土之间粘结强度的降低现象。在经历 150 d 的硫酸盐浸泡后,新老混凝土界面的抗剪强度降低了 32.4%^[29];而在氯盐环境中,随着浸泡时间的延长,经过 100 d 侵蚀时,新老混凝土界面的抗剪强度降低了 15.35%^[30]。在本研究中,在 150 d 海水浸泡侵蚀下(硫酸盐和氯盐耦合侵蚀)界面抗剪强度最多仅下降 23%。它低于上述两个研究中粘结强度下降幅度之和。这意味着单一盐溶液侵蚀的规律并不适用于海水环境下界面抗剪强度的演化。

(1) 界面粗糙度的影响

图 7 显示了不同侵蚀龄期时,三种界面剂试件的界面粗糙度对界面斜剪强度的影响。总体而言,随着粗糙度的增加,界面斜剪强度先增加后减少。

以环氧树脂界面剂为例,对比在三种界面粗糙度的新老混凝土试样在海水环境侵蚀 0 d~150 d 的界面斜剪强度,发现界面粗糙度为 3 mm 组的试样斜剪强度均大于 5 mm 组,5 mm 组均大于 1 mm 组。在侵蚀天数为 60 d 时,界面粗糙度为 3 mm 时斜剪强度为 19.95 MPa,粗糙度为 5 mm 时斜剪强度 18.12 MPa(比 3 mm 的减少了 9.17%),粗糙度为 1 mm 的试件斜剪强度为 16.48 MPa(比 3 mm 的减少了 17.39%)。经过 150 d 海水环境侵蚀,1、3、5 mm 粗糙度的界面斜剪强度相较于侵蚀前分别下降了 22.65%、21.75%、22.93%。水泥净浆界面和丙烯酸界面具有类似规律。

上述分析表明,适当进行界面粗糙处理可以改善新老混凝土试样的耐腐蚀性,本文试验显示 3 mm 粗糙度具有较好的效果。造成这种现象的原因是,适当的界面粗糙度可以提供足够的机械咬合力,从而改善界面的剪切性能^[31]。然而,过度处理界面粗糙度会损伤混凝土表面,并产生细微裂缝,这会造成基体损坏,破坏混凝土结构的完整性,削弱界面的粘结强度^[32]。

(2) 界面剂类型的影响

图 8 展示了相同粗糙度时,三种界面剂对斜剪强度的影响情况。

以粗糙度 3 mm 为例,经过 30 d 的海水环境侵蚀后,使用环氧树脂界面剂的界面的斜剪强度由 17.29 MPa 提高到了 19.46 MPa,提高了 12.55%。使用水泥净浆和丙烯酸两组试样的斜剪强度分别由 17.05 MPa 和 15.26 MPa 提高到了 18.31 MPa 和

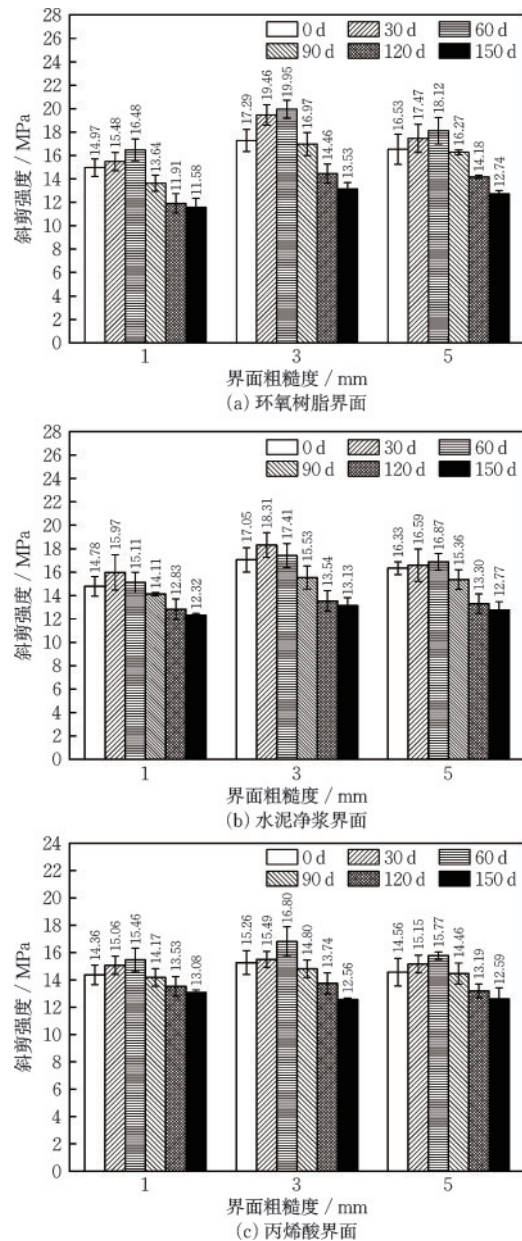


图 7 不同界面粗糙度下平均斜剪强度演化规律

Fig.7 Evolution patterns of average slant shear strength under different interfacial roughness levels

15.49 MPa,分别提高了 7.39%和 1.50%。当侵蚀天数到 60 d 时,使用环氧树脂界面剂组的试样斜剪强度达到 19.95 MPa,达到最大值。而水泥净浆和丙烯酸两组试样的界面斜剪强度则已处于下降阶段。简而言之,在侵蚀过程中使用环氧树脂的试件最大斜剪强度均大于水泥净浆和丙烯酸。表明环氧树脂可改善海水环境对新老混凝土界面粘结性能的影响。这种现象可以归因于,环氧树脂界面剂是高分子化合物,可渗透到老混凝土孔隙中,环氧树脂可与老混凝土的水化硅酸钙产生较好的键合作用,

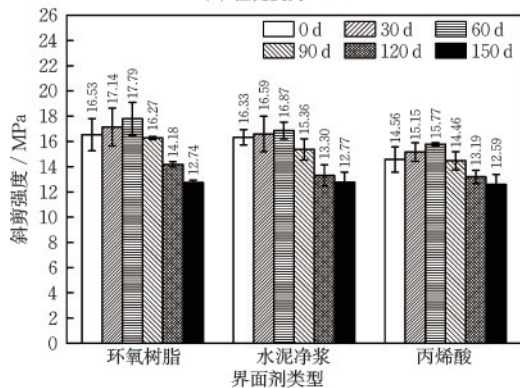
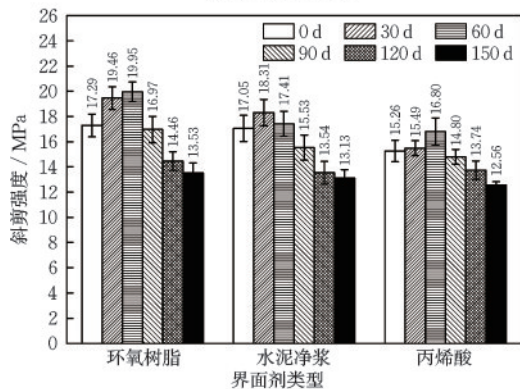
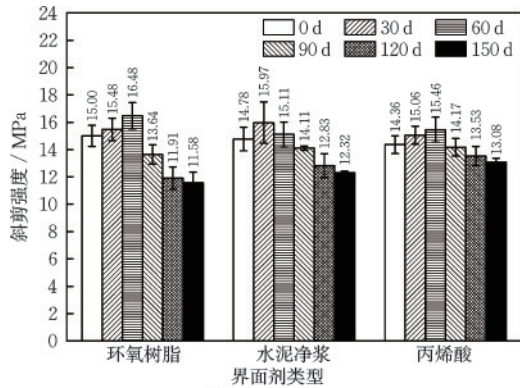


图8 不同界面剂类型下平均斜剪强度演化规律

Fig.8 Evolution patterns of average slant shear strength under different types of interfacial agents

增强界面过渡区与老混凝土间的粘结^[7]。同时,界面粘结强度衰减速度发展较为缓和,这归因于环氧树脂对全轻陶粒混凝土和普通混凝土界面的良好封闭性。

(3) 单因素方差分析

根据测试数据和显著性检验标准,对影响全轻陶粒混凝土和普通混凝土界面的两个因素进行单变量方差分析^[33],计算出的 F 值可以分别量化不同粗糙度和界面剂下海水侵蚀天数对新老混凝土界面斜剪强度的影响程度。表4和表5给出了相关计

表4 计算参数与计算公式

Table 4 Calculation parameters and formulas

计算参数	计算公式
影响因素水平数	m
各级试验次数之和	n
组内平方和	$S_{SE} = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]$
组间偏差平方和	$S_{SA} = \sum_{j=1}^m n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$
组内均方差	$M_{SE} = \frac{S_{SE}}{n - m}$
组间均方差	$M_{SA} = \frac{S_{SA}}{m - 1}$
F 值	$F = \frac{M_{SA}}{M_{SE}}$
$F \geq F_{0.025}(m-1, n-m)$	影响非常显著
$F_{0.025}(m-1, n-m) > F \geq F_{0.05}(m-1, n-m)$	影响显著
$F_{0.05}(m-1, n-m) > F \geq F_{0.10}(m-1, n-m)$	影响不大
$F \leq F_{0.10}(m-1, n-m)$	几乎没有影响

表5 影响程度 F 值

Table 5 F values of influence degree

界面剂类型	粗糙度 1 mm	粗糙度 3 mm	粗糙度 5 mm	显著性
环氧树脂	60.06	76.47	14.32	$F > F_{0.025}$ 影响非常显著
水泥净浆	20.27	35.58	22.26	$F > F_{0.025}$ 影响非常显著
丙烯酸	20.26	34.80	26.24	$F > F_{0.025}$ 影响非常显著

注: $m=6, n=18, F_{0.025}(5, 12)=3.89, F_{0.05}(5, 12)=3.106, F_{0.10}(5, 12)=2.39$

算参数和公式以及计算结果。

当界面剂和粗糙度不同时,海水侵蚀天数对界面斜剪强度的影响程度也会发生改变,但是由于它们都远大于 $F_{0.025}(5, 12)=3.89$,因此,无论是采用何种粗糙度和界面剂,海水环境对界面斜剪强度的影响都是极为显著的。

3 结论

(1) 40 °C海水浸泡侵蚀过程中,全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面破坏模式会随时间增长发生转变,逐渐从混合内聚破坏转变为界面粘结破坏。

随着侵蚀天数的增加,界面抗剪强度先轻微的改善再显著下降,强度峰值出现在30~60 d内。海水环境侵蚀150 d时新老混凝土试样界面抗剪强度最大下降23%。

(2) 经过40℃海水侵蚀150 d,1、3、5 mm粗糙度的界面斜剪强度相较于侵蚀前分别下降了22.65%、21.75%、22.93%。适当进行界面粗糙处理可以提高新老混凝土试样的耐腐蚀性。在侵蚀过程中使用环氧树脂的试件最大粘结强度均大于水泥净浆和丙烯酸,证明了环氧树脂良好的粘结性能。

(3) 在侵蚀过程中无论是采用何种粗糙度和界面剂,海水环境对界面斜剪强度的影响都非常显著。对海水环境的服役混凝土结构进行加固时,需要重点考虑界面性能退化问题。

海洋环境分为水下区、浪溅区和潮汐区,其中在浪溅区和潮汐区现有混凝土结构不仅会遭受到海水环境侵蚀,还会伴随着干湿循环耦合作用。本文对全轻陶粒混凝土和普通混凝土的研究仅局限于40℃高温海水浸泡侵蚀。在未来,我们会进行模拟海水环境干湿循环下的界面耐久性损伤研究,以此来巩固和完善全轻陶粒混凝土作为修补加固材料在海水环境工程中的应用。

参考文献:

[1] 车志豪,王家滨,张凯峰,等. 多元胶凝材料体系再生混凝土复合盐侵蚀耐久性退化规律[J]. 硅酸盐通报, 2023,42(8):2733-2742.
Che Z H, Wang J B, Zhang K F, et al. Durability degradation law of recycled aggregate concrete with multiple cementitious materials system subjected to compound salt erosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023,42(8):2733-2742. (in Chinese)

[2] 罗大明,李凡,牛荻涛. 人工智能时代混凝土结构耐久性诊断研究进展[J]. 建筑结构学报,2024,45(2):1-13.
Luo D M, Li F, Niu D T, et al. Research progress on durability diagnosis of concrete structures based on artificial intelligence[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(2):1-13. (in Chinese)

[3] 陈阳,胡翔,吴泽媚,等. 海洋环境下FRP增强混凝土构件结构劣化和性能退化的研究综述[J]. 材料导报, 2023,37(18):83-93.
Chen Y, Hu X, Wu Z M, et al. Review on the deterioration of FRP reinforced concrete structures subjected to

marine environment [J]. Materials Reports, 2023, 37 (18):83-93. (in Chinese)

[4] Wu X G, Wang S, Yang J, et al. Experimental study on mechanical performances of different fiber reinforced lightweight concretes [J]. Romanian Journal of Materials, 2019,49(3):434-442.

[5] He Y, Zhang X, Hooton R, et al. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding [J]. Construction and Building Materials, 2017,151:582-590.

[6] 诸成烽,范奕涛,肖自强,等. 梯度混合混凝土叠浇面粘结性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31 (5):201-206.
Zhu C F, Fan Y T, Xiao Z Q, et al. Bonding performance experiments of gradient hybrid concrete [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31 (5):201-206. (in Chinese)

[7] 朱红兵,付正昊,王烨,等. 界面剂对全轻陶粒混凝土与普通混凝土粘结界面力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2024,41(6):3154-3167.
Zhu H B, Fu Z H, Wang Y, et al. Effect of interfacial agents on the mechanical properties of the interface between full lightweight ceramsite concrete and ordinary concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024,41 (6):3154-3167. (in Chinese)

[8] 王建民,李鹏飞,冯楚祥,等. 陶粒轻骨料与普通混凝土的黏结剪切性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(7):700-707.
Wang J M, Li P F, Feng C X, et al. Interfacial shear performance of ceramsite lightweight aggregate and normal concrete cold joint [J]. Journal of Building Structures, 2022,25(7):700-707. (in Chinese)

[9] Products and systems for the protection and repair of concrete structures-Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity-Part3: structural and non-structural repair: EN 1504-3: 2005 [S]. Brussels:Comite Europeen de Normalisation, 2006.

[10] 贡力,梁颖,宫雪磊,等. 硫酸盐环境下再生混凝土抗冻耐久性及其界面微观结构研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(4):1006-1017.
Gong L, Liang Y, Gong X L, et al. Study on frost resistance durability and interface microstructure of recycled concrete in sulfate environment [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023,31(4):1006-1017. (in Chinese)

[11] 陈宗平,黎盛欣,周济,等. 海洋环境GFRP筋海水海砂混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J]. 材料导

- 报,2023,37(20):113-122.
- Chen Z P, Li S X, Zhou J, et al. Test on mechanical properties and bearing capacity calculation of GFRP bars reinforced seawater sea-sand concrete beams exposed to marine environment [J]. Materials Reports, 2023, 37(20): 113-122. (in Chinese)
- [12] 林久卿,牛昊,刘致延,等. 水泥基砂土注浆材料抗海水侵蚀性能研究[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(3): 551-559.
- Lin J Q, Niu H, Liu Z Y, et al. Study on Seawater Erosion Resistance of Cement-Based Silica Grouting Material [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 551-559. (in Chinese)
- [13] 覃源,姬文哲,梁达,等. 硫酸盐干湿-盐蚀下混凝土冷缝面损伤分析[J]. 水力发电学报,2023,42(1):19-29.
- Tan Y, Ji W Z, Liang D, et al. Damage analysis of concrete cold joint surface under sulfate wet-dry-salt corrosion cycling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(1): 19-29. (in Chinese)
- [14] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [15] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] 轻骨料混凝土应用技术标准(附条文说明):JGJ/T 12—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [17] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18] Zhu H B, Fu Z H, Wen S Y, et al. Evolution of LWAC-OC interfacial properties during sulfate dry-wet cycles: Bonding strength and micro-properties [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92: 109780.
- [19] ASTM C882/C882M-20. Standard test method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear [S]. United States: ASTM International, 2020.
- [20] Xie J H, Wei M W, Huang P Y, et al. Fatigue behavior of the basalt fiber-reinforced polymer/concrete interface under wet-dry cycling in a marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 117065.
- [21] 张阳,吴洁,邵旭东,等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2021,54(7):81-89.
- Zhang Y, Wu J, Shao X D, et al. Experiment on interfacial shear properties between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7): 81-89. (in Chinese)
- [22] 张风杰,袁迎曙,杜健民. 硫酸盐腐蚀混凝土构件损伤检测研究[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(3): 373-378.
- Zhang F J, Yuan Y S, Du J M, et al. Ultrasonic detection in concrete structures of damage from sulfate attack [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 373-378. (in Chinese)
- [23] 朱红兵,李咏灿,姚晨,等. 复合盐溶液侵蚀与环境因素影响下混凝土耐久性研究进展[J]. 科学技术与工程,2021,21(14):5641-5649.
- Zhu H B, Li Y C, Yao C, et al. Research progress on durability of concrete under the action of multiple factors of compound salt solution erosion and environment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5641-5649. (in Chinese)
- [24] 侯卫星,秦磊,郭盼盼,等. 海水-海砂混凝土研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版),2024,38(2): 184-193.
- Hou W X, Qin L, Guo P P, et al. Research progress on seawater-sea sand concrete [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2024, 38(2): 184-193. (in Chinese)
- [25] Fu Z H, Zhu H B, Guo Z H, et al. Shear strength of the interface between full lightweight ceramsite concrete and normal concrete: Effect of interfacial roughness and pouring time interval [J]. Construction and Building Materials, 2024, 452: 138911.
- [26] Aaleti S, Sritharan S. Quantifying bonding characteristics between UHPC and normal-strength concrete for bridge deck application [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 24(6): 04019041.
- [27] 耿欧,孙倩,李大贺. 氯盐对再生混凝土硫酸盐侵蚀的抑制作用研究[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(6): 108-116.
- Geng O, Sun Q, Li D H, et al. Study on inhibitory effect of chlorine salt on sulfate corrosion of recycled concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 108-116. (in Chinese)
- [28] 张嘉成,万旭升,路建国,等. 硫酸盐侵蚀作用下纳米混凝土力学特性及微观结构劣化机制研究[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(6):1425-1433.
- Zhang J C, Wan X S, Lu J G, et al. Study on mechanical properties and microstructure deterioration mechanism of nano-concrete under sulfate attack [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1425-1433. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

(下转第 336 页)