

文章编号:1007-9629(2021)03-0516-09

珊瑚混凝土骨料-净浆界面区强度

刁益彤^{1,2}, 麻海燕^{1,2}, 余红发^{1,2}, 张丽芳^{1,2}, 华实³

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 江苏省机场基础设施安全工程研究中心, 江苏 南京 210016; 3. 绿城乐居建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 采用纳米压痕和劈裂试验方法, 研究了珊瑚骨料与水泥净浆界面试件在不同养护龄期的纳米压痕弹性模量、纳米压痕硬度、界面黏结劈拉强度、水泥净浆抗压强度和劈拉强度, 以及它们之间的相关性。结果表明: 与普通混凝土类似, 珊瑚混凝土存在薄弱的界面过渡区(ITZ), 内掺10%珊瑚微粉能够强化珊瑚骨料-水泥净浆界面的宏观和纳米力学性能, 界面黏结劈拉强度不仅与水泥净浆抗压强度、劈拉强度间存在显著线性关系, 还与ITZ、水泥净浆基体的纳米力学性能有显著相关性。

关键词: 珊瑚混凝土; 界面过渡区; 抗压强度; 纳米压痕; 劈拉强度

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.010

Strength of Aggregate-Paste Interface Transition Zone of Coral Concrete

DIAO Yitong^{1,2}, MA Haiyan^{1,2}, YU Hongfa^{1,2}, ZHANG Lifang^{1,2}, HUA Shi³

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Airport Infrastructure Safety Engineering Research Center, Nanjing 210016, China;

3. Greentown Leju Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Nano indentation and splitting test were used to study the nano indentation elastic modulus, nano indentation hardness, interface bond splitting tensile strength, cement paste tensile strength and compressive strength and correlation of coral aggregate and cement paste interface specimens at different ages. The results show that similar to ordinary concrete, coral concrete has a weak interface transition zone(ITZ). Adding 10% coral micro powder can strengthen the macro and nano mechanical properties of ITZ. The interface bond splitting tensile strength is not only linearly related to the compressive strength or splitting tensile strength of the cement paste matrix, but also to nanometer mechanical properties of interface transition zone and cement paste matrix.

Key words: coral concrete; interface transition zone(ITZ); compressive strength; nano indentation; splitting tensile strength

珊瑚混凝土是由珊瑚原石、珊瑚砂、水泥、化学外加剂、矿物掺合料和海水为主要原料的混凝土。国内外学者针对珊瑚混凝土已有大量研究和工程应用。如美国在西太平洋海岛上大量使用珊瑚混凝土修建机场、公路和建筑物^[1]; Duke^[2]提出了珊瑚礁材料工程

特性知识系统化的基础; Dempsey^[3]和 Narver^[4]对珊瑚混凝土建筑物进行了广泛的实验室评估; 王以贵等^[5-8]在西沙工程建设中采用强度等级C15~C25的珊瑚混凝土修建港池与道路; 李林等^[9-11]对C20~C30珊瑚混凝土的力学性能开展了深入研究; 袁银峰

收稿日期:2020-01-22; 修订日期:2020-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078250, 51878350, 11832012)

第一作者:刁益彤(1996—),女,江苏连云港人,南京航空航天大学硕士生。E-mail:19852830855@163.com

通讯作者:麻海燕(1976—),女,南京航空航天大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail:mahaiyan@nuaa.edu.cn

等^[12-20]对珊瑚混凝土的配合比设计方法及力学性能等开展了系统的试验研究.对于普通混凝土,骨料与水泥硬化基体之间的界面过渡区(ITZ)是其最薄弱区域,其性能比混凝土基体弱.Ollivier 等^[21]最早开展混凝土 ITZ 的研究,提出了“界面环”的概念;Bentz 等^[22]研究发现 ITZ 孔隙尺寸较大;连丽等^[23-26]采用显微硬度、扫描电镜、能谱分析和背散射等方法,研究了 ITZ 的性能及结构特征.

近年来,随着海洋混凝土研究的深入,ITZ 在珊瑚混凝土力学性能上的影响程度亟待解决,因此有必要开展珊瑚混凝土 ITZ 力学性能的研究.目前,关于珊瑚混凝土 ITZ 微观力学与宏观力学性能的研究工作较少,华实^[27]只初步探索了珊瑚混凝土 ITZ 的微观结构与力学性能.鉴于此,本文在其基础上,进一步系统研究了珊瑚混凝土 ITZ 的宏观黏结强度与 ITZ 纳米力学性能,并尝试建立界面宏观力学性能与水泥净浆、ITZ 微观力学性能之间的定量关系.

表 2 P·I 52.5 硅酸盐水泥的物理力学性能
Table 2 Physical and mechanical property of P·I 52.5 Portland cement

Fineness (by mass)/%		Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Water consumption for standard consistency (by mass)/%	Stability	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
80 μm	45 μm				Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
0.5	2.9	368.9	27.4	Qualified	127	182	38.4	70.5	38.4	70.5

表 3 珊瑚微粉的化学组成
Table 3 Chemical composition of coral micro powder

Ca	CO ₃	Mg	Na	K	Li	Ba	Mn	Fe	Sn	Sr	Zn	B ₂ O ₃	Acid insoluble
37.540 00	56.310 00	1.000 00	0.290 00	0.013 00	0.013 00	0.000 84	0.002 50	0.130 00	0.460 00	0.530 00	0.000 42	0.018 00	0.340 00

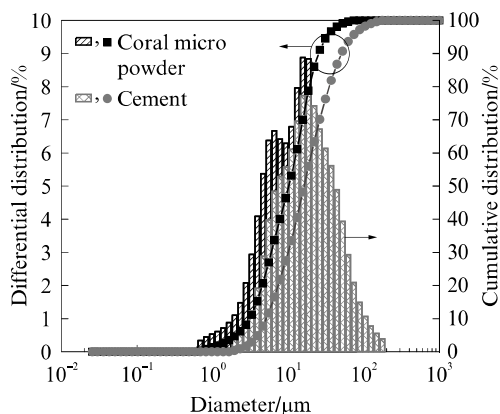


图 1 珊瑚微粉与水泥的粒度分布曲线
Fig. 1 Particle size distribution curves of coral micro powder and cement

1.2 试验配合比及样品制备

水泥净浆配合比及界面试件编号见表 4.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用湖北华新水泥有限公司产 P·I 52.5 硅酸盐水泥,其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比等均为质量分数或质量比)和物理力学性能分别见表 1、2. 骨料采用南海岛礁的珊瑚原石,将其切割成为 20 mm×20 mm×10 mm 的片体.矿物掺合料采用珊瑚微粉,珊瑚微粉由珊瑚原石经碎裂、粉磨、筛分而成,粒径为 13 μm(1 000 目),其化学组成见表 3. P·I 52.5 硅酸盐水泥与珊瑚微粉的粒度分析曲线见图 1.

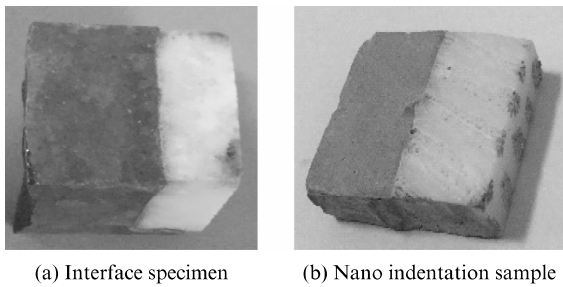
表 1 P·I 52.5 硅酸盐水泥的化学组成
Table 1 Chemical composition of P·I 52.5 Portland cement

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	IL
64.47	20.87	4.87	3.59	0.11	0.65	2.13	2.52	0.77

表 4 水泥净浆配合比及界面试件编号
Table 4 Mix proportion of cement paste and interface specimen number

Serial No.	Mix proportion(by mass)/%		Aggregate	m _w /m _b
	Cement	Coral micro powder		
I-CO	100	0	Coral	0.35
II-CO	90	10	Coral	0.35
III-CO	80	20	Coral	0.35
IV-CO	70	30	Coral	0.35

每组分别制作 20 个尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的水泥净浆立方体试件、20 个尺寸为 20 mm×20 mm×80 mm 的水泥净浆长方体试件和 20 个尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的界面试件.其中界面试件由水泥净浆和珊瑚骨料组成(见图 2(a));纳米压痕试样为 5 mm 厚、含有 ITZ 的薄片,由界面试件用自动切割机切割而成(见图 2(b)),参考表 4 中界面试件编号,将其依次编号为 I、II、III 和 IV.



(a) Interface specimen (b) Nano indentation sample

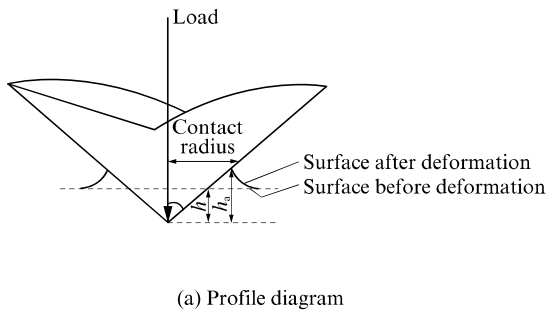
图2 界面试件和纳米压痕试样实物图

Fig. 2 Pictures of interface specimen and nano indentation sample

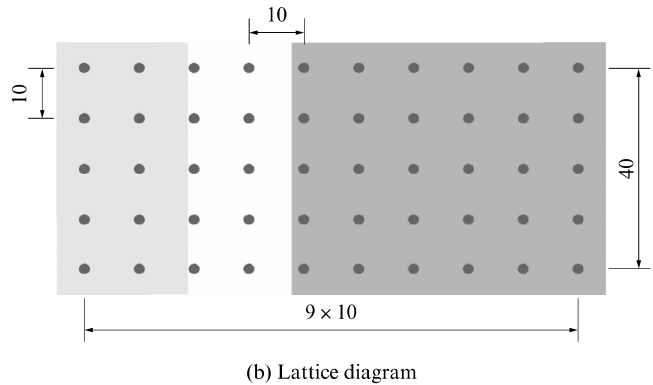
1.3 试验装置及测试方法

1.3.1 纳米压痕力学试验

试验采用 Nano Test TM 型纳米压痕仪. 通过



(a) Profile diagram



(b) Lattice diagram

图3 纳米压痕试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of nano indentation experiment (size: μm)

1.3.2 ITZ 的水化产物组成测试

采用 D/MAX-III C 型 X 射线衍射仪 (XRD) (Cu 靶, 管压 35 kV, 电流 30 mA, 界面层析扫描速率 $2(^{\circ})/\text{min}$) 测试 ITZ 的水化产物组成. X 射线层析衍射采用逐层减薄方法. 首先, 测量试件的长、宽、高, 得到测试面面积 S_1 和初始体积; 然后用分析天平称重, 质量记为 m_1 , 计算得到试件的初始平均密度 ρ ; 接着用 $6.5 \mu\text{m}$ (2 000 目) 的砂纸均匀、轻微地磨去 1 层, 再次称重, 质量记为 m_2 , 则磨掉的试样厚度 $d = \frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot S_1}$; 最后, 再次打磨并称重, 测试第 2 层, 如此循环.

1.3.3 力学性能测试

采用 HG-YH100D 型 I 级微机电液伺服压力试验机测定水泥净浆立方体试件的抗压强度 (f_c)、水泥净浆长方体试件的劈拉强度 (f_{ts}) 及界面试件的界面黏结劈拉强度 (f_{ts-ITZ}). 抗压强度试验加载速

压头上的荷载和压入试样的压痕深度得到纳米压痕试样的载荷-位移曲线. 试样弹性模量 (E_r) 和压痕硬度 (H) 的计算表达式^[28]为:

$$E_r = \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} \times \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

$$H = P_{\max} / A \quad (2)$$

式中: A 为接触面积; β 为与压头几何形状相关的参数, 本文 β 取为 1.00; S 为弹性接触刚度, 通过卸载曲线斜率求得; $P_{\max}$ 为荷载最大值.

图 3 为纳米压痕试验示意图^[27]. 其中 h 为压痕最深处到初始平面 (形变前) 的距离, h_a 为压痕最深处到受压后形变平面的距离. 试验每隔 $10 \mu\text{m}$ 取 1 个点, 在骨料-净浆平面上同 1 条线上取 10 个点, 同一试样上取线数不少于 5 条.

率为 2.4 kN/s , 劈裂试验加载速率为 2.2 kN/s . 试验机量程为 100 kN , 灵敏度为 0.01 kN .

2 珊瑚混凝土的界面黏结劈拉强度

2.1 界面黏结劈拉强度的发展规律

图 4 为不同珊瑚微粉掺量界面试件界面黏结劈

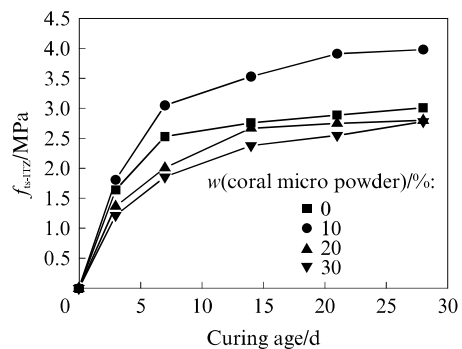


图4 界面试件界面黏结劈拉强度随养护龄期的变化曲线
Fig. 4 Change curves of bond splitting tensile strength with curing age of interface specimens

拉强度随养护龄期的变化曲线. 由图4可见:珊瑚微粉掺量相同条件下,随着养护龄期的延长,界面试件的界面黏结劈拉强度逐渐增大,这是由于随着养护龄期的延长,水泥水化反应不断进行,试件的界面黏结劈拉强度增大,ITZ的性能有所优化;当珊瑚微粉掺量为10%时,界面黏结劈拉强度达到最大值;当珊瑚微粉掺量增大到20%或30%时,界面黏结劈拉强度反而较未掺珊瑚微粉的试件低.

图5为通过界面层析试验得到的试件界面过渡

区(ITZ)在28d龄期时的XRD图谱,图中每条曲线表示与珊瑚骨料不同距离处水化产物的成分,对应的长度数据表示每1层的距离. 由图5可见,掺入珊瑚微粉后,在ITZ界面处产生了更多的单碳水化碳铝酸钙晶体(简称单碳水化物)和钙矾石(AFt)^[27],优化了界面的黏结劈拉强度,当珊瑚微粉掺量达到20%~30%时,虽然在ITZ处仍然形成单碳水化物和钙矾石,但水泥水化产物相对减少,因此弱化了水泥净浆的强度,影响了界面的黏结劈拉强度.

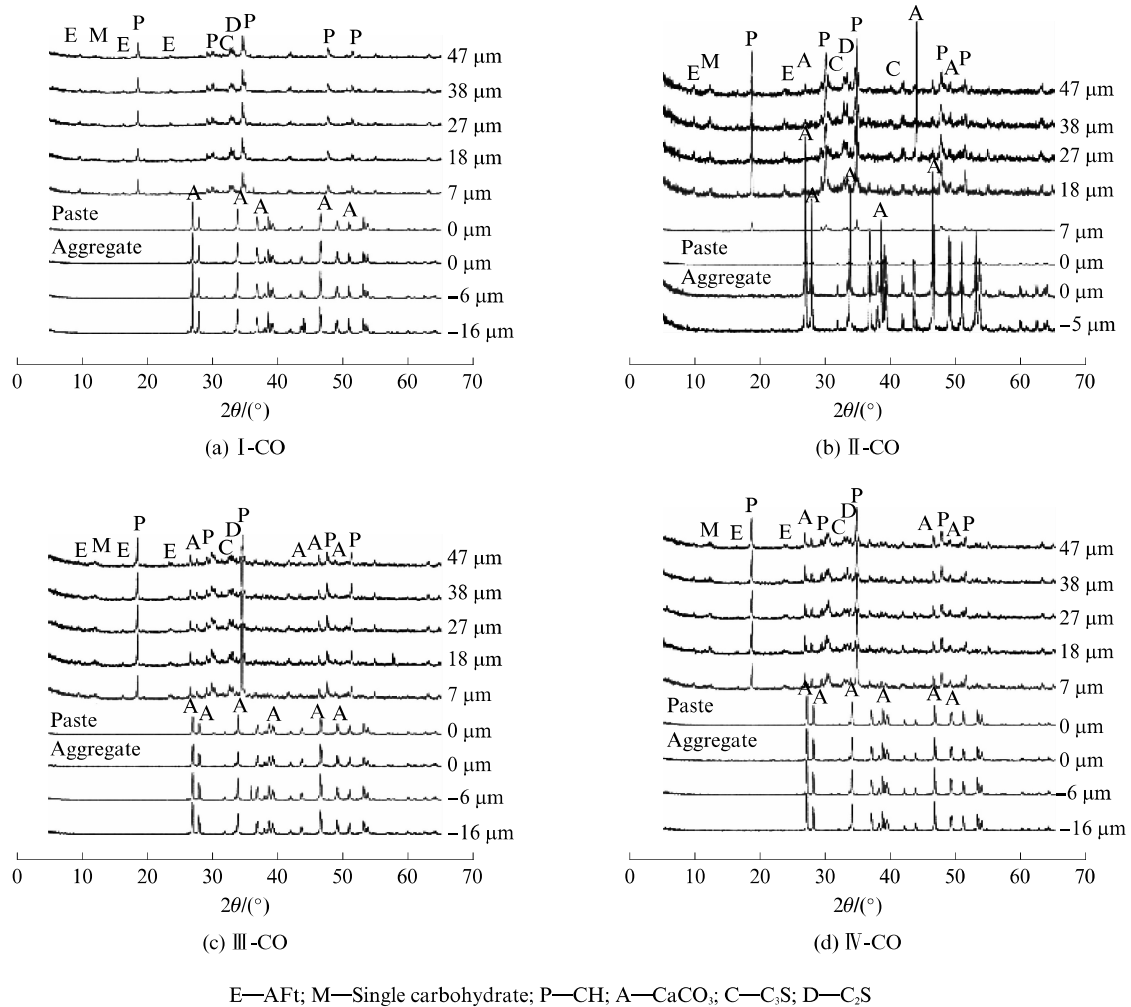


图5 ITZ在28d龄期时的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of ITZ at 28 d

2.2 珊瑚混凝土界面黏结劈拉强度与水泥净浆强度间的关系

2.2.1 水泥净浆的抗压强度和劈拉强度

图6为水泥净浆试件养护3、7、14、21、28d的抗压强度和劈拉强度. 由图6可见:随着养护龄期的延长,水泥净浆试件的抗压强度和劈拉强度均逐渐增大;在相同养护龄期下,随着珊瑚微粉掺量的增加,水泥净浆试件的抗压强度和劈拉强度先增大后

减小;当珊瑚微粉掺量为10%时,试件的抗压强度和劈拉强度达到最大值. 与ITZ类似,在内掺珊瑚微粉的水泥净浆中,珊瑚微粉同样参与了水泥的早期水化反应,珊瑚微粉的主要成分CaCO₃致使半碳水化物和单碳水化物产生,从而形成更多的水化产物;当珊瑚微粉掺量达20%后,水泥用量相对减少,水泥形成的水化硅酸钙凝胶(C-S-H)等水化产物数量也相对减少,从而削弱了水泥净浆的强度.

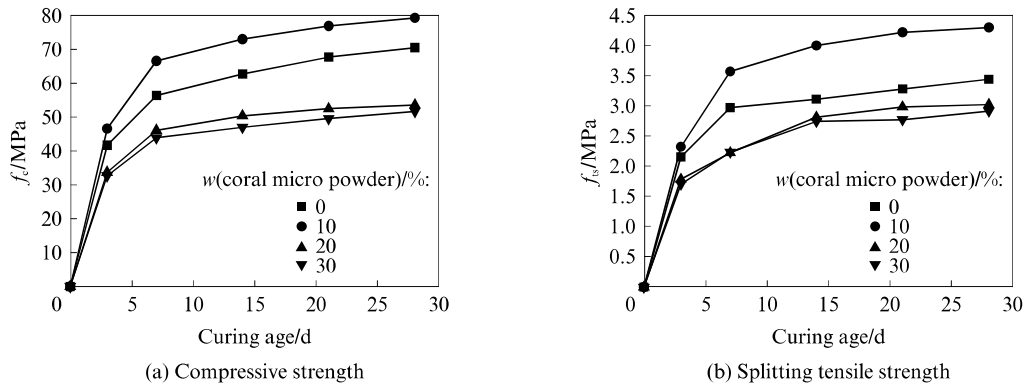


图6 水泥净浆试件在不同养护龄期下的强度
Fig. 6 Strength of cement paste at different curing ages

2.2.2 水泥净浆劈拉强度与其抗压强度的关系

图7为水泥净浆试件劈拉强度与抗压强度的关系.图7显示两者间具有非常显著的线性相关关系:

$$f_{ts} = 0.05284f_c + 0.02279 \quad (3)$$

本文样本数量 $n=20$, 相关系数 R 为 0.9725, 显著性水平 $\alpha=0.01$ 时的临界相关系数 $R_{0.01}$ 为 0.56144, R 远远大于 $R_{0.01}$, 表明式(3)表示的相关关系特别显著.由图7和式(3)可见,水泥净浆的劈拉强度和其抗压强度间的关系,与珊瑚微粉掺量和养护龄期无关,因此,可以根据水泥净浆的抗压强度计算其劈拉强度.

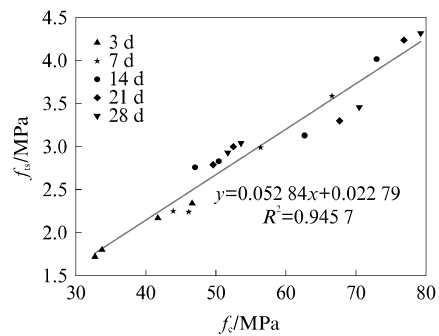


图7 水泥净浆劈拉强度与抗压强度的关系
Fig. 7 Relationship between splitting tensile strength and compressive strength of cement paste

2.2.3 界面黏结劈拉强度与水泥净浆强度的关系

图8为界面黏结劈拉强度与水泥净浆强度的关系.

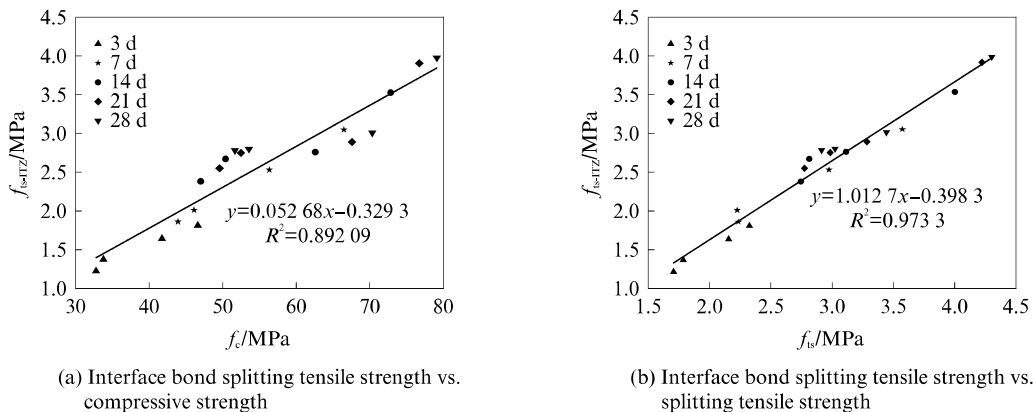


图8 界面黏结劈拉强度与水泥净浆强度的关系
Fig. 8 Relationship between interface bond splitting tensile strength and cement paste strength

由图8(a)可见,界面黏结劈拉强度与水泥净浆抗压强度之间具有显著的线性相关关系,其拟合公式为:

$$f_{ts-ITZ} = 0.05268f_c - 0.3293 \quad (4)$$

由图8(b)可见,界面黏结劈拉强度与水泥净浆

劈拉强度之间也具有显著的线性关系,其拟合公式为:

$$f_{ts-ITZ} = 1.0127f_{ts} - 0.3983 \quad (5)$$

图8和式(4)、(5)表明,界面黏结劈拉强度和水泥净浆强度间的关系,与珊瑚微粉的掺量和养护龄

期无关,因此,可根据水泥净浆强度来计算界面黏结劈拉强度。

3 珊瑚混凝土界面过渡区的纳米压痕力学性能

3.1 界面过渡区的纳米压痕弹性模量及压痕硬度

图9为纳米压痕试样Ⅱ的纳米压痕弹性模量

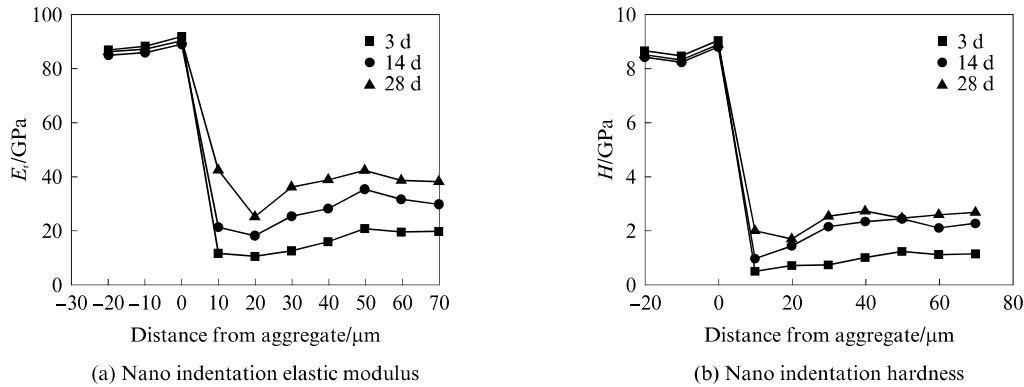


图9 纳米压痕试样Ⅱ的纳米压痕试验结果
Fig. 9 Nano indentation test results of sample II

2.1和3.1分析了不同配合比界面试件的界面黏结劈拉强度和纳米压痕力学参数,由数据分析可知,对于不同配合比试件,二者的大小顺序相一致.为研究界面黏结劈拉强度和纳米压痕力学参数的关系,将纳米压痕试验测试得到的最小值定义为纳米压痕谷底值,图10为各纳米压痕试样在28 d龄期时的弹性模量和压痕硬度分布.由图

和压痕硬度在养护龄期3、14、28 d的变化曲线.由图9可见,试样Ⅱ的纳米压痕弹性模量和压痕硬度在3个养护龄期的变化趋势相同,二者均先迅速降低后缓慢增加,最终趋于稳定,两值迅速降低区域即为ITZ,稳定区域即为水泥净浆基体区域.结果表明,珊瑚混凝土存在ITZ,且贯穿于整个养护龄期.

10(a)可见:随着珊瑚微粉掺量的增加,纳米压痕试样弹性模量谷底值越来越小;各纳米压痕试样弹性模量大小依次为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ.由图10(b)可见:纳米压痕试样Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ的压痕硬度谷底值均比试样Ⅰ大;随着珊瑚微粉掺量的增加,ITZ处的纳米压痕硬度谷底值降低,当掺量为10%时,压痕硬度谷底值达到最大.

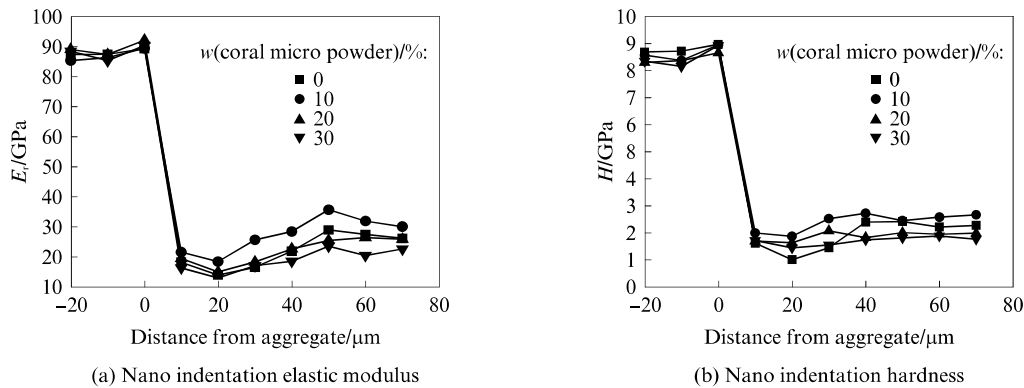


图10 各界面试件28 d龄期时的纳米压痕试验结果
Fig. 10 Nano indentation results of interface specimens at 28 d age

图11为各纳米压痕试样弹性模量谷底值和压痕硬度谷底值占水泥基体平均值的百分比.由图11可见:(1)当珊瑚微粉掺量不大于20%时,随着珊瑚微粉掺量的增加,纳米压痕弹性模量和压痕硬度在界面处的谷底值占水泥基体平均值的百分比有所增

加.(2)当珊瑚微粉掺量大于20%时,上述百分比有所减小.结果表明,珊瑚微粉的掺入缩小了ITZ强度与水泥基体强度的差距,优化了界面性能,当珊瑚微粉掺量超过一定量时,珊瑚微粉弱化了界面强度,界面强度与基体强度的差距随之增大.

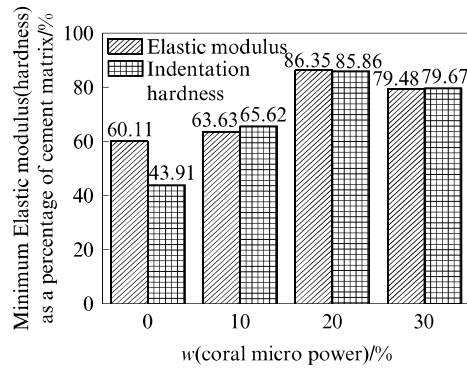


图 11 ITZ 纳米压痕(谷底值)占水泥基体的百分比
Fig. 11 Percentage of nano indentation parameters at ITZ(minimum) to cement matrix

3.2 基于纳米压痕力学特征的界面过渡区厚度

图 10 中纳米压痕参数的分布均先平稳,再骤降,然后逐步上升,最后趋于平稳.将骤降再逐步上升的区域定义为 ITZ 厚度.表 5 为分别根据图 10(a)、(b)得到的纳米压痕试样 II 的 ITZ 厚度.结果表明,随着养护龄期的增大,ITZ 厚度变薄,ITZ 性能变得更加稳定.

表 5 纳米压痕试样 II 的 ITZ 厚度
Table 5 Thickness of ITZ of sample II

Influence factor	3 d	14 d	28 d
Based on modulus of elasticity	40 - 50	35 - 40	25 - 35
Based on indentation hardness	40 - 50	30 - 40	20 - 30

3.3 珊瑚骨料-水泥净浆界面黏结劈拉强度与 ITZ 纳米压痕力学参数的关系

由于 ITZ 薄弱,与宏观性能建立联系应选最薄弱位置,因此选取纳米压痕试验结果的谷底值和界面黏结劈拉强度进行分析,结果如图 12 所示.图 12 表明,界面过渡区纳米压痕参数对其宏观力学性能存在直接影响,界面黏结劈拉强度与其纳米压痕弹性模量、纳米压痕硬度之间具有不同程度的相关关系:

$$f_{ts-ITZ} = -0.01017E_r^2 + 0.46244E_r - 1.92197 \quad (6)$$

$$f_{ts-ITZ} = 1.0264H + 1.49419 \quad (7)$$

这里,样本数量 $n = 12$,相关系数 R 分别为 0.9177 和 0.6529;显著性水平 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$ 时临

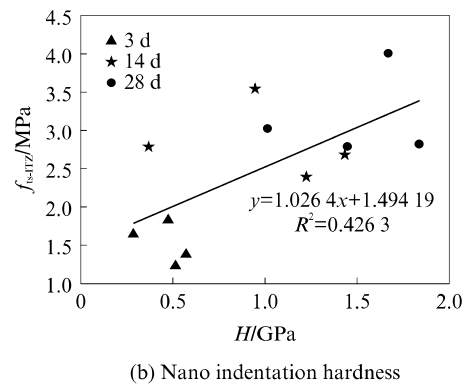
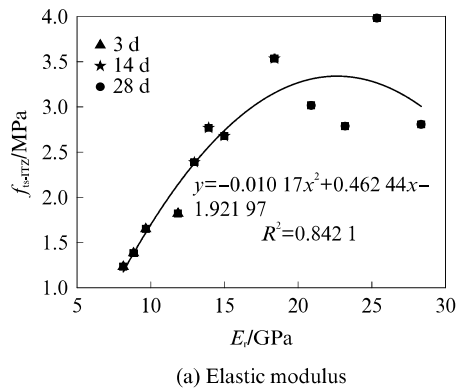


图 12 界面黏结劈拉强度与纳米压痕谷底值的关系

Fig. 12 Relationship between interface bond splitting tensile strength and nano indentation bottom value

界相关系数分别 $R_{0.01} = 0.70789$ 和 $R_{0.05} = 0.57598$,表明式(6)表达的相关关系特别显著,式(7)表达的相关关系显著.由于相关性程度不同,无法通过测量纳米力学参数准确计算界面黏结劈拉强度.

为了探讨界面劈裂抗拉强度和水泥净浆基体的纳米压痕力学参数之间的关系,取距离骨料 50 μm 区域的纳米压痕力学参数来表示水泥净浆基体的纳米压痕力学参数,并与界面黏结劈拉强度进行分析(图 13),发现界面黏结劈拉强度与基体的纳米压痕力学参数之间具有非常显著的线性

相关关系:

$$f_{ts-ITZ} = 0.0944E_r - 0.0701 \quad (8)$$

$$f_{ts-ITZ} = 1.3676H + 0.1608 \quad (9)$$

式(8)、(9)中的参数同式(6)、(7),相关系数 R 分别为 0.9635 和 0.9638,均远大于临界相关系数 $R_{0.01}$,这表明式(8)、(9)特别显著.可见,由于 ITZ 微结构的复杂性和不均匀性,界面的宏观强度并不直接取决于 ITZ 最薄弱处的纳米力学参数,而是与 ITZ 区域附近的水泥净浆基体的纳米力学性能有更加密切的相关性.

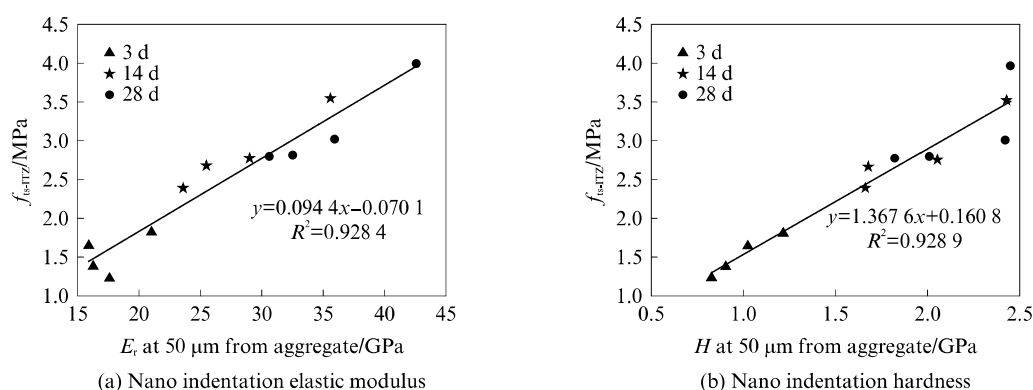


图13 界面黏结劈拉强度与基体纳米压痕的关系

Fig. 13 Relationship between interface bond splitting tensile strength and nano indentation of matrix

4 结论

(1)界面过渡区是珊瑚混凝土的薄弱环节,其性能决定珊瑚混凝土构件的服役寿命.珊瑚微粉掺量对界面过渡区的厚度和力学性能存在较大影响,随着珊瑚微粉掺量的增大,界面过渡区减薄,珊瑚混凝土的微观力学性能提高,当珊瑚微粉掺量为10%时,其力学性能最好.

(2)界面黏结劈拉强度与水泥净浆抗压强度、劈裂抗拉强度间具有显著的线性相关关系.可根据水泥净浆基体的强度来计算界面的黏结劈拉强度.界面过渡区宏观力学性能与其纳米力学性能具有一定的相关性,其中界面黏结劈拉强度与纳米压痕弹性模量的相关性较好.

(3)界面过渡区是不均匀的三维空间结构,同一界面各处的厚度并非完全一致.由于水泥净浆基体相对均匀,界面黏结劈拉强度与水泥净浆基体的纳米力学参数(弹性模量和压痕硬度)具有非常显著的线性相关关系.因此,根据水泥净浆基体的纳米力学性能可计算得到界面过渡区的宏观力学性能.

参考文献:

- [1] NUTTER B E. The use of coral aggregate[J]. ACI Journal Proceedings, 1944, 40(1): 61-65.
- [2] DUKE C M. Engineering properties of coral reef materials[J]. American Soc Testing & Materials Proc, 1949, 49(1): 964-976.
- [3] DEMPSEY J G. Coral and salt water as concrete materials[J]. Journal Proceedings, 1951, 48(10): 157-166.
- [4] NARVER D L. Good concrete made with coral and water[J]. Civil Engineering, 1964, 24(1): 654-658.
- [5] 王以贵. 珊瑚混凝土在港工中应用的可行性[J]. 水运工程, 1988(9): 46-48.
WANG Yigui. The feasibility of coral concrete applied in port engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 1988(9): 46-48. (in Chinese)
- [6] 陈兆林, 陈天月, 曲勤明. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. 海洋工程, 1991, 9(3): 67-80.
CHEN Zhaolin, CHEN Tianyue, QU Jiming. Feasibility study on application of coral reef sand concrete[J]. The Ocean Engineering, 1991, 9(3): 67-80. (in Chinese)
- [7] 卢博, 梁元博. 海水珊瑚砂混凝土的试验研究 I[J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 69-74.
LU Bo, LIANG Yuanbo. Experimental study on sea water coral sand concrete I[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(5): 69-74. (in Chinese)
- [8] 卢博, 李起光. 海水-珊瑚砂屑混凝土的研究与实践[J]. 广东建材, 1997, 13(4): 8-10.
LU Bo, LI Qiguang. Research and practice of the sea-coral sand concrete[J]. Guangdong Building Materials, 1997, 13(4): 8-10. (in Chinese)
- [9] 李林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
LI Lin. Research on basic characteristic of coral concrete[D]. Nanning: Guangxi University, 2012. (in Chinese)
- [10] 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.
WANG Lei, ZHAO Yanlin, LÜ Haibo. Prospect on the properties and application situation of coral aggregate concrete[J]. Concrete, 2012(2): 99-100. (in Chinese)
- [11] 赵艳林, 韩超, 张栓柱, 等. 海水拌养珊瑚混凝土抗压龄期强度试验研究[J]. 混凝土, 2011(2): 43-45.
ZHAO Yanlin, HAN Chao, ZHANG Shuanzhu, et al. Experimental study on compressive age strength of seawater coral concrete[J]. Concrete, 2011(2): 43-45. (in Chinese)
- [12] 袁银峰. 全珊瑚海水混凝土的配合比设计和基本性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
YUAN Yinfeng. Mixdesign and property of coral aggregate concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [13] 糜人杰. 全珊瑚海水混凝土的材料应力-应变关系与受弯构件力学性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

- MI Renjie. Material stress-strain relationship and mechanical properties of flexural members of all coral sea water concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [14] 章艳. 全珊瑚海水混凝土的静、动态力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- ZHANG Yan. Research on dynamic and static mechanical properties of coral aggregate concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [15] DA B, YU H, MA H, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 81-89.
- [16] 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术、耐久性 & 构件力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- DA Bo. Research on preparation technology, durability and mechanical properties of high strength all coral sea water concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [17] 窦雪梅. 岛礁环境下珊瑚混凝土耐久性 & 其结构寿命的可靠性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- DOU Xuemei. Research on the durability of coral concrete and the reliability of its structure life under the environment of islands and reefs [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [18] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的试验研究与数值模拟 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- YUE Chengjun. Research on experiment and numerical simulation of high-speed impact mechanical properties of coral aggregate seawater concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [19] 吴彰钰. 高强全珊瑚海水混凝土结构的钢筋锈蚀 & 服役寿命研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- WU Zhangyu. Research on corrosion and service life of steel bars of high strength all coral sea water concrete structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [20] WU Zhangyu, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Rebar corrosion in coral aggregate concrete: Determination of chloride threshold by LPR [J]. Corrosion Science, 2020, 163: 108238-11.
- [21] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete [J]. Advanced Cement Based Materials, 1995, 2(1): 30-38.
- [22] BENTZ D P, STUTZMAN P E, GARBOCZI E J. Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete [J]. Pergamon, 1992, 22(5): 891-902.
- [23] 连丽, 印海春, 廖卫东. 混凝土界面区的显微硬度研究 [J]. 国外建材科技, 2005(2): 8-11.
- LIAN Li, YIN Haichun, LIAO Weidong. Study on microhardness of concrete interface zone [J]. The World of Building Materials, 2005(2): 8-11. (in Chinese)
- [24] 陈志源, 程蓓, 吴时敏. 粉煤灰颗粒-水泥浆体界面特征的研究 [J]. 混凝土世界, 2012(3): 48-52.
- CHEN Zhiyuan, CHENG Bei, WU Shimin. Study on interface characteristics between fly ash particles and cement paste [J]. China Concrete, 2012(3): 48-52. (in Chinese)
- [25] 尚建丽, 邢琳琳. 钢渣粗骨料混凝土界面过渡区的研究 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 217-220.
- SHANG Jianli, XING Linlin. Study on interface transition zone of steel slag coarse aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 217-220. (in Chinese)
- [26] 郭凯, 马浩辉, 杨丰硕, 等. 冻融循环作用下 GO-RC 界面过渡区的微观力学性能 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 230-238.
- GUO Kai, MA Haohui, YANG Fengshuo, et al. Micromechanical properties of GO-RC interfacial transition zone under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 230-238. (in Chinese)
- [27] 华实. 珊瑚混凝土界面过渡区的微结构与力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- HUA Shi. Research on the microstructure and the mechanical property of interface transition zone of coral concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [28] 李雪松. 纳米金属材料的制备 & 性能 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 122-123.
- LI Xuesong. Preparation and properties of nanometer metallic materials [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012: 122-123. (in Chinese)