

文章编号:1007-9629(2019)01-0007-08

珊瑚骨料混凝土动态压缩性能的试验研究

吴文娟^{1,2,3}, 汪 稔^{1,2}, 朱长歧^{1,2}, 孟庆山^{1,2}, 刘海峰^{1,2,3}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究珊瑚骨料混凝土在冲击荷载下的动态力学响应, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统, 建立了珊瑚骨料混凝土的动态应力-应变关系曲线, 讨论了以珊瑚礁、砂为粗细骨料的混凝土动态强度增长因子、能耗密度、破损形态与应变率的关系, 并与同强度等级的普通砂石混凝土进行对比分析. 结果表明: 珊瑚骨料混凝土的动态强度增长因子对应变率表现出更强的敏感性; 2 类混凝土的动态强度增长因子与应变率均呈对数函数关系, 能耗密度与应变率呈线性关系; 相同应变率条件下, 珊瑚骨料混凝土由于骨料自身强度低、结构疏松且多内孔隙而使其能量吸收能力更强, 表现出更好的抗冲击性能, 但破碎程度稍大于普通砂石混凝土.

关键词: 珊瑚骨料混凝土; 分离式霍普金森压杆; 动态强度增长因子; 能耗密度; 应变率; 抗冲击性能
中图分类号: TU528. 2; TU317. 1 **文献标志码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2019. 01. 002

Experimental Study on Dynamic Compression Performance of Coral Aggregate Concrete

WU Wenjuan^{1,2,3}, WANG Ren^{1,2}, ZHU Changqi^{1,2}, MENG Qingshan^{1,2}, LIU Haifeng^{1,2,3}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the dynamic mechanical properties of coral aggregate concrete under impact loading, the split Hopkinson pressure bar(SHPB) test system was used to study the relationship between the dynamic strength increase factor and energy density and the strain rate of the concrete using coral reefs and sand as coarse and fine aggregates. Compared with ordinary sandstone concrete with the same strength grade, the results show that: the dynamic strength increase factor of coral aggregate concrete shows stronger sensitivity to the corresponding variability; the dynamic strength increase factor and the strain rate of the two types of concrete show logarithmic relation, the functional relationship shows a linear relationship between energy density and strain rate. Under the same strain rate conditions, coral aggregate concrete has higher ability for impact energy absorption, and the crushing degree is weaker than ordinary sandstone concrete, showing better impact resistance.

Key words: coral aggregate concrete; split Hopkinson pressure bar(SHPB); dynamic strength increase factor; energy density; strain rate; impact resistance

珊瑚礁是造礁石珊瑚群体死亡后的遗骸经过漫长的物理化学和生物化学作用而形成的特殊岩土体,

收稿日期:2018-03-24; 修订日期:2018-05-18

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010201);国家自然科学基金资助项目(41330642,41472287,41372316,41602314)

第一作者:吴文娟(1991—),女,山东寿光人,中国科学院武汉岩土力学研究所博士生. E-mail: ellina_wenjuan@163. com

通讯作者:孟庆山(1974—),男,河北玉田人,中国科学院武汉岩土力学研究所研究员,博士生导师,博士. E-mail: qsmeng@whrsm. ac. cn

主要成分是碳酸钙,含量(质量分数)在96%以上。随着“一带一路”沿线珊瑚礁国家基础设施建设的不断推进,用珊瑚礁碎块、珊瑚砂代替普通碎石、河砂作为粗细骨料制成的混凝土,在远海珊瑚岛礁工程建设中作为一种新型建筑材料已经成为一种趋势,并引起国内外学者的广泛关注。1974年 Howdysheill^[1]指出,将珊瑚礁块作为混凝土粗骨料时,需控制珊瑚骨料含盐量。1991年 Rick^[2]对太平洋比基尼岛的3座珊瑚骨料混凝土建筑物的耐久性进行了调查研究。1996年 Arumugam等^[3]对海水拌养珊瑚骨料混凝土的立方体抗压强度特征进行了研究。中国学者陈兆林等对海水拌养珊瑚骨料混凝土的可行性^[4]以及不同强度等级珊瑚骨料混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度和弹性模量等力学性能^[5]进行了试验研究。韩超等^[6-8]对海水拌养珊瑚礁砂混凝土的抗压强度、力学性能影响因素、疲劳特性与微观机理等方面开展了较为全面的研究。此外,糜人杰等^[9-11]系统研究了珊瑚骨料混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、单轴受压应力-应变曲线,并对南海海域珊瑚骨料混凝土结构耐久性的影响因素等方面进行了初步分析。上述众多关于珊瑚礁砂混凝土的研究主要集中在其静态物理力学性能和耐久性等方面,而远海岛礁自然条件复杂,经常遭受强震、撞击甚至爆破等动荷载的作用,因此,对珊瑚骨料混凝土动态力学性能的研究非常重要。目前关于珊瑚骨料混凝土动态力学特性方面的研究尚处于起步阶段,有了一些初步研究成果^[12]。本文利用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统对珊瑚骨料混凝土与普通砂石混凝土进行冲击加载对比试验,研究这2类混凝土动态力学性能的差异,旨在为珊瑚骨料混凝土服役性能评价及其推广应用提供重要的科技支撑。

1 试验

1.1 原材料

水泥为华新牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其

基本物理力学性能和化学组成(质量分数,本文所涉及的组成、减水率和比值等除特别指明外均为质量分数或质量比)如表1,2所示。拌和与养护用水均为自来水。减水剂为高效聚羧酸盐系液态减水剂,减水率达40%。珊瑚骨料混凝土的粗细骨料分别为破碎的珊瑚礁碎块和珊瑚砂(见图1),珊瑚礁碎块粒径为5~10 mm,珊瑚砂最大粒径为4.75 mm,细度模数为2.90;普通砂石混凝土的粗细骨料分别为普通碎石和天然河砂,其中的天然河砂与珊瑚砂保持相同的粒度分布(见图2)和细度模数,普通碎石也为5~10 mm的连续级配。混凝土所用骨料的基本物理性质如表3所示。图3是采用扫描电子显微镜观察到的珊瑚骨料微观结构,由图3可见,与普通骨料相比,珊瑚骨料疏松多孔、表面粗糙。

表1 水泥的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

Density/ (kg·m ⁻³)	Specific surface area/ (m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
3 100	350	240	300	29.5	54.7	5.7	8.9

表2 水泥熟料的化学组成

Table 2 Chemical composition of cement

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	SO ₃	IL
23.55	5.64	1.67	2.85	64.17	0.26	0.49	1.37

表3 骨料的基本物理性质

Table 3 Physical properties of aggregates

Material	Bulk density/ (kg·m ⁻³)	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	1 h water absorption (by mass)/ %	Porosity(by volume)/ %	Crush index(by mass)/%
Coral sand	1 131	2 750	1.96		
River sand	1 469	2 563	0.45		
Coral reef rubble	999	1 921	13.17	25.85	38.99
Conventional gravel	1 463	2 756	0.86	0.60	15.14

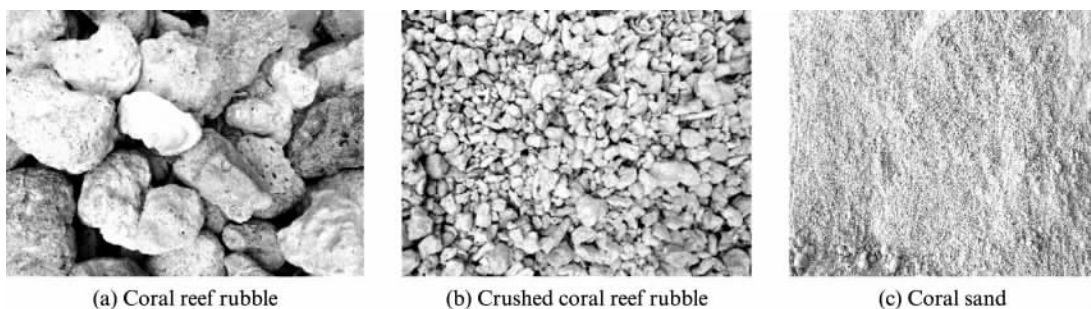


图1 珊瑚礁碎块与珊瑚砂

Fig. 1 Coral reef rubble and coral sand

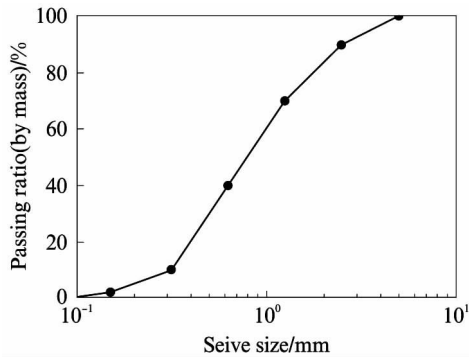


图 2 细骨料级配分布

Fig. 2 Size distribution of fine aggregate

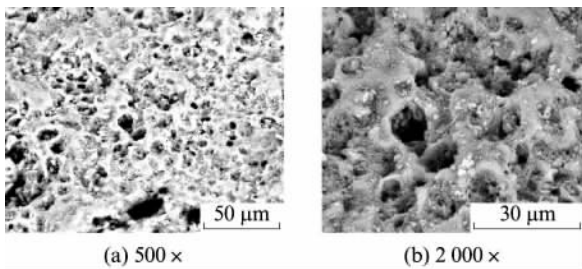


图 3 珊瑚骨料 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of coral aggregate

1. 2 配合比设计

分别采用珊瑚礁碎块和珊瑚砂、普通碎石和天然河砂配制强度等级为 C30 的混凝土,配合比见表 4. 其中,编号 CAC 为珊瑚骨料混凝土, NAC 为普通砂石混凝土. 表中所示 2 类混凝土的粗细骨料用量是按照同体积分数替代的,因此根据堆积密度换算出来的骨料质量有所不同. 考虑到珊瑚骨料本身的性质,设计珊瑚骨料混凝土的水灰比略低于普通砂石混凝土的水灰比,以获得相同的强度等级^[13].

表 4 混凝土配合比

Table 4 Mix proportions of concretes kg/m³

Sample code	m_w/m_c	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Superplasticizer
CAC	0.50	430.00	215.00	735.20	649.40	2.15
NAC	0.52	430.00	223.60	950.95	954.85	0

1. 3 试验方法

1. 3. 1 单轴抗压试验

按照表 4 所示配合比分别制备珊瑚骨料混凝土和普通砂石混凝土试样,在标准条件下养护至 28 d 龄期后取出,按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》规定方法测试其静态单轴抗压强度,试样尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 RMT-150C 多功能岩石力学试验系统上进行.

1. 3. 2 动力学试验

动态压缩试验采用 $\phi 75$ 的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验系统,该系统主要由发射腔、冲头(子弹)、入射杆、透射杆、吸收杆和数据采集系统组成,如图 4 所示. 测试系统采用 CS-10 型超动态应变仪,具有校准和自动平衡功能;加载应力波为半周期正弦波,以延长应力波上升沿的时间,实现试样内应力均匀的要求^[14]. 试样为 $\phi 75 \times 40$ mm 的圆柱样,试验所得的入射波、透射波和反射波信号如图 5 所示. 设计的 3 组冲击气压分别为 0.5, 0.7, 0.9 MPa, 每组冲击气压下完成 4 个平行试验;试验时在试样两端均匀涂抹少量凡士林,置于入射杆及透射杆之间压紧,以减小端部摩擦效应.



图 4 SHPB 试验装置示意图

Fig. 4 SHPB testing device

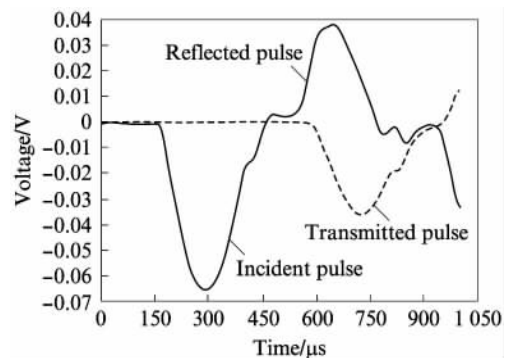


图 5 试样破坏时的波形图

Fig. 5 Waveform of sample destruction

2 结果与讨论

SHPB 试验的有效性是基于一维应力波传播和应力均匀性 2 个基本假设. 应力均匀性的目的在于将加载过程中试样的惯性效应和率效应解耦,实现试样的准静态加载. 本文采用三波法^[15]进行数据处理,通过入射杆和透射杆上的应变信号计算试样的应力、应变率和应变,所得结果如表 5 所示(其中的 DIF 为试样的动态强度增长因子,即动态抗压强度

与静态抗压强度之比值)。由表5可见,珊瑚骨料混凝土的静态抗压强度小于普通砂石混凝土,这与其他研究人员的结果^[3,16-17]吻合,原因主要是珊瑚骨料本身疏松多孔、多棱角、易碎,压碎值远高于普通

碎石,从而降低了混凝土的整体强度;相同冲击气压下,CAC和NAC试样获得的应变率大致相同,且随着应变率的增大,2类混凝土试样的峰值应力和峰值应变均呈增大趋势,破坏程度渐趋严重。

表5 CAC和NAC冲击压缩试验测试结果平均值
Table 5 Average values of impact compression test results of CAC and NAC samples

Sample code	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Compressive strength at 56 d/MPa	Impact pressure/MPa	Strain rate/ s^{-1}	Dynamic failure stress/MPa	DIF	Failure strain/%	Energy density/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Broken size/mm
CAC	2 023	39.75	0.5	27.9	41.9	1.05	0.56	0.17	62.67
			0.7	61.3	98.0	2.47	0.67	1.07	12.73
			0.9	116.0	110.3	2.77	1.22	1.59	9.73
NAC	2 276	43.88	0.5	30.0	50.5	1.15	0.51	0.15	62.33
			0.7	61.2	82.8	1.89	0.52	0.90	10.80
			0.9	113.8	89.4	2.04	0.86	1.43	9.18

2.1 应力均匀性评价

试样两端的应力均匀性是 SHPB 试验有效性的重要影响因素,因此试验结果处理前需对采集到的数据进行应力均匀性分析,检验其是否满足应力平衡条件。一般认为当不平衡应力(即入射应力+反射应力-透射应力)小于应力均值(入射端应力与透

射端应力的均值)的5%时,试样基本达到应力平衡^[18]。应力均匀性检验结果如图6所示。由图6可见,2类混凝土试样在冲击过程中的入射波与反射波叠加结果大致与透射波相等,可以认为2类混凝土试样在冲击过程中基本处于应力平衡状态。

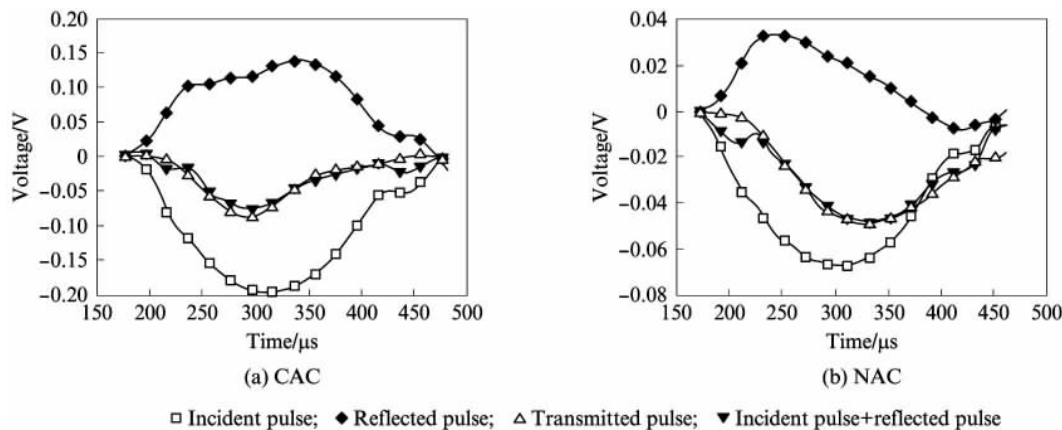


图6 2类混凝土试样的应力平衡检测曲线
Fig. 6 Stress balance test curves of samples

2.2 动态应力-应变特性(曲线)

图7给出了珊瑚骨料混凝土(CAC)和普通砂石混凝土(NAC)试样在不同应变率下的应力-应变曲线。从图7可以看出,不同应变率下CAC和NAC试样的动态应力-应变曲线形状相似:在应变率较低时,应力-应变曲线在卸载阶段有回弹现象,表现为应变随应力减小而减小,曲线呈闭口趋势;当应变率增大时,混凝土中储备的弹性应变能更多地转化为试样的破碎耗能,加卸载回路中因能量耗散形成的滞回圈增大,曲线呈开口趋势。此外,图中所示CAC和NAC试样的动弹性模量均表现为高应变率下较

低应变率下大,且应变率相近时CAC试样的动弹性模量较NAC试样低;随着应变率的增加,2类混凝土试样的刚度有增加的趋势。

2.3 应变率对2类混凝土动力学性能的影响

表5中CAC和NAC试样的动态破坏应力随应变率增大而增大,这是由于静态荷载作用时,试样的破坏是裂纹扩展贯通引起的;随着应变率的提高,冲击的速度越大则新生裂纹产生得越多,在短时间冲击荷载作用下,试样会吸收大量能量,根据能量守恒原理,此时需要通过增大应力来抵消外部的能量,因此试样的动态破坏应力随着应变率的增大而增大。

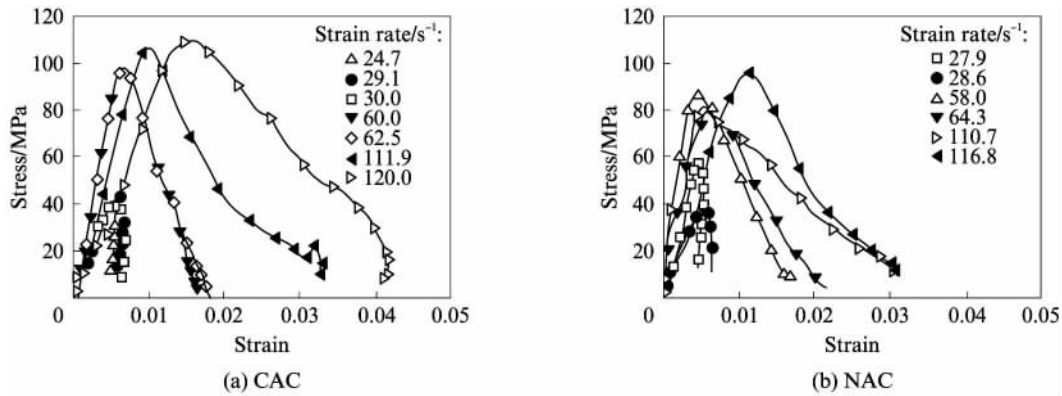


图 7 2 类混凝土试样的动态应力-应变曲线
Fig. 7 Dynamic stress-strain curves of samples

在混凝土强度与应变率关系的研究中,人们更为关心的是特定应变率下动态强度相对于静态强度的提高值.动态强度相对于静态强度的提高用动态强度增长因子 DIF 来表示^[19].图 8 表示的是 CAC 和 NAC 试样在不同应变率下 DIF 的变化曲线.由图 8 可见,珊瑚骨料混凝土的动态单轴抗压强度对应变率的敏感性比普通砂石混凝土强.虽然由于珊瑚骨料自身多孔、强度低的特点,造成珊瑚骨料混凝土在静载和较低应变率下的强度较小,但随着应变率的提高,珊瑚骨料混凝土的动态抗压强度迅速增大,且增大幅度比普通砂石混凝土大得多,证明了珊瑚骨料混凝土的 DIF 高于同等强度等级的普通砂石混凝土^[12],这对珊瑚骨料混凝土抗震抗爆工程的设计和施工具有重要的指导意义.图 9 将本文与相关文献^[20-25]中的动态强度增长因子 DIF 随应变率变化的试验结果进行了比较.由图 9 可见,与以往文献试验结果相比,本文试验结果与其规律一致;NAC 试样的相关试验数据处于以往文献的典型试验数据范围内,但略有偏高,而 CAC 试样的试验数据明显偏高.

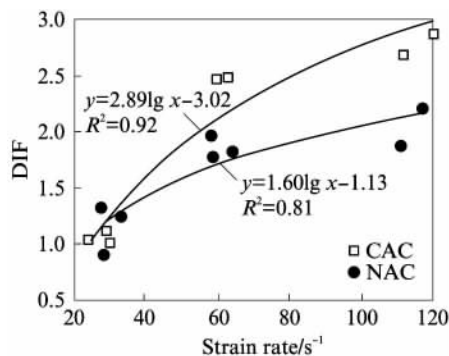


图 8 CAC 与 NAC 试样的动态强度增长因子与应变率的关系
Fig. 8 Relationship between DIF and strain rate of samples

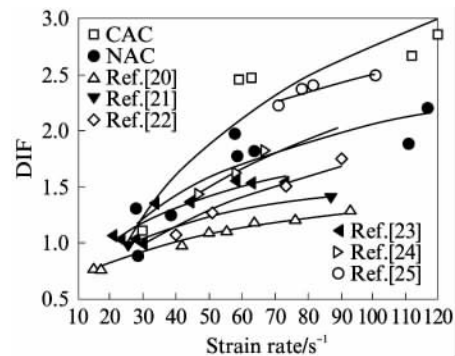


图 9 本文试验数据与文献数据比较
Fig. 9 Comparison of experimental and reference data

表 5 给出的不同应变率下 CAC 和 NAC 试样的破坏应变结果表明:CAC 和 NAC 试样的破坏应变均存在应变率敏感性,随应变率的增大而增大;不同应变率下,CAC 试样的破坏应变均比 NAC 试样略大,并且随着应变率的增大,CAC 试样破坏应变的增大程度较 NAC 试样略高.这表明珊瑚骨料混凝土在冲击荷载作用下抵抗破坏的能力较普通砂石混凝土略强,结构的安全系数较高.

2.4 能量耗散

根据能量守恒原理,在一次 SHPB 冲击试验中,试样吸收的能量 W_A 可由下式计算:

$$W_A = W_I - W_R - W_T \quad (1)$$

式中: W_I , W_R , W_T 分别为入射能量、反射能量和透射能量.

诸多学者在研究中指出^[26-27],试样的破碎耗能 W_{de} 约为总吸收能量 W_A 的 95%,而碎块破碎动能 W_v 和其他耗能 W_o (电磁能、热能、声能等) 所占比例约为 5%,在弹速不是特别高时,一般可近似认为 $W_A = W_{de}$;同时引入能耗密度 e ,即单位体积耗散的能量这一参数,以忽略试样尺寸造成的耗能差异.能耗密度 e 计算公式如下:

$$e = W_A/V \quad (2)$$

式中: V 为试样体积。

图 10 为 2 类混凝土试样应变率与能耗密度的关系。由图 10 可见, CAC 和 NAC 试样的能耗密度与应变率呈现出较好的线性关系。在冲击荷载作用下, 加载速率的提高导致荷载作用时间变短, 试样应变率增大, 裂纹来不及沿其最薄弱界面扩展贯通, 而是在各自区域同时萌生大量新的微裂缝以吸收外部荷载能量, 而裂纹产生所消耗的能量远比裂纹扩展所消耗的能量要高, 因此随着应变率的增大, 试样中的裂纹数目增多, 耗散能增大。CAC 试样的能耗密度均较 NAC 试样略大, 说明 CAC 试样的冲击吸收能力较 NAC 试样好, 且 CAC 试样与 NAC 试样的能耗密度差值在高应变率下较低应变率下大, 这为 CAC 试样的动态力学性能(破坏应力和应变)应变率敏感性均较 NAC 试样强作了解释。究其原因是由于珊瑚骨料具有较高的孔隙率且具有丰富的内孔隙, 在受到冲击荷载时负担并吸收了部分应力, 从而提高了珊瑚骨料混凝土的抗冲击性能。

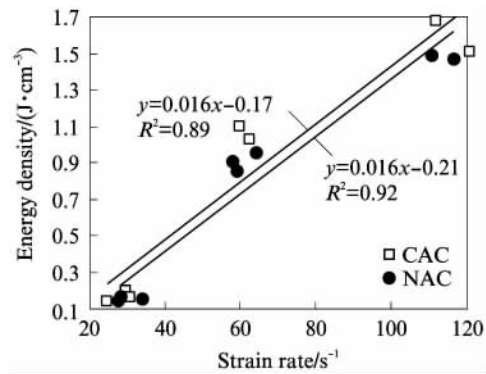


图 10 2 类混凝土试样应变率与能耗密度的关系
Fig. 10 Relationship between strain rate and energy density of samples

2.5 动态破坏特征

材料的破碎程度反映了其损失的状态。图 11 给出了不同冲击荷载(不同应变率)下珊瑚骨料混凝土和普通砂石混凝土的破坏形态。由图 11 可见, 随着冲击荷载(即应变率)的增大, 2 类混凝土试样的破碎程度逐渐增大, 并且与表 5 所示相同, 试样的平

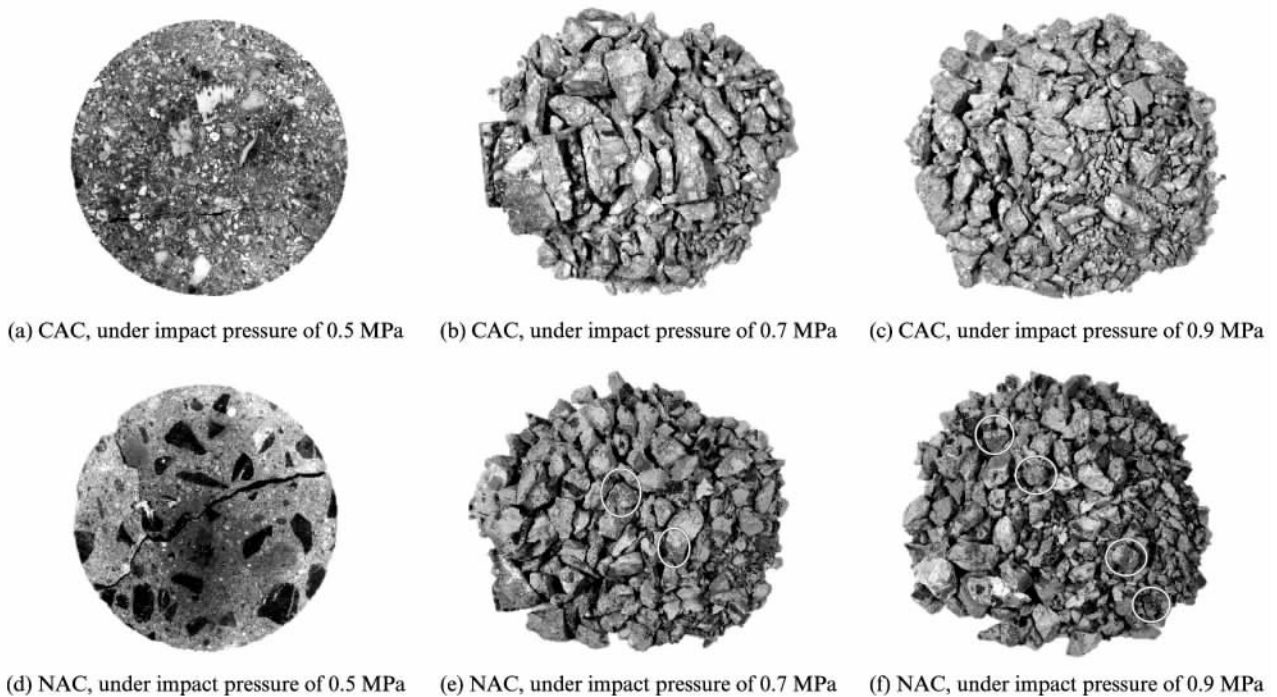


图 11 2 类混凝土试样在不同冲击荷载下的破坏形态
Fig. 11 Failure characteristics of samples under different impact loadings

均破碎尺寸随着应变率增大而减小, 表现出明显的应变率相关性。

由表 5 可见, 在同一冲击荷载下, CAC 试样的平均破碎尺寸比 NAC 试样稍大; 同时, 对比图 11 中 2 类混凝土试样的破坏形态可以发现, CAC 试样破碎后的形态偏条状、块状的大粒碎块, 表现出张拉破坏的特征, 而 NAC 试样是相对偏块状的中粒碎块,

说明 CAC 比 NAC 有更强的动态脆性; 此外, 通过观察发现, 在冲击荷载较大时, 破碎后的 NAC 试样中有明显的浆体脱落后碎石体, 浆体与碎石分离, 仅有极少量浆体粘附在碎石体表面(见图 11(e), (f)圈出部分), 而在破碎后的 CAC 试样中只发现礁块破碎的现象, 并未出现骨料与浆体分离的现象。

图 12 给出了冲击加载后 NAC 试样和 CAC 试

样界面过渡区的 SEM 图像. 由图 12 可见, NAC 试样在试验后骨料与浆体界面处出现了明显宽大的裂纹, 且裂纹沿着该处向外发展, 这为 NAC 试样中出

现浆-石分离现象作了较好的解释; CAC 试样的骨料与浆体界面处仍紧密嵌合在一起, 未有明显的裂纹出现.

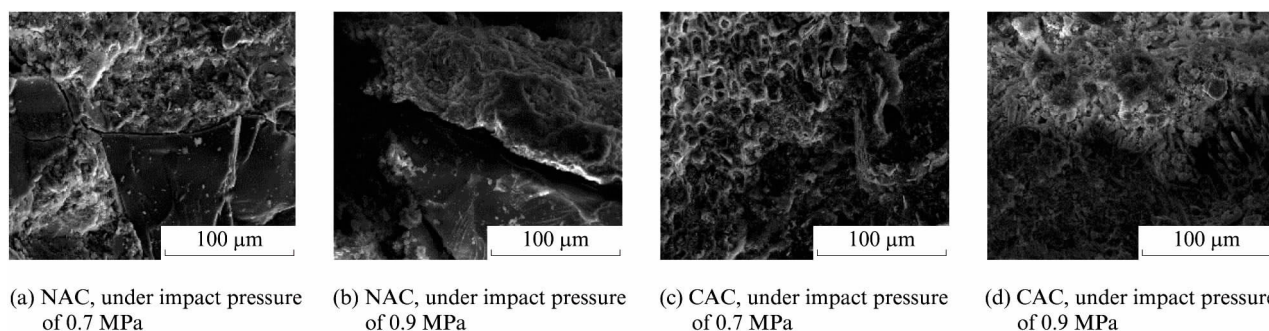


图 12 2 类混凝土试样界面过渡区的破坏特征

Fig. 12 Destruction characteristics of interface transition zone of samples(600×)

分析原因是由于多孔和粗糙表面的珊瑚骨料特性使得水泥浆容易渗透到珊瑚骨料表面的空腔或大孔中并充满孔隙, 使得珊瑚骨料与浆体相互之间咬合嵌固、紧密连接, 而普通碎石和河砂表面致密、平整, 与水泥浆体之间易形成性能薄弱的界面过渡区, 在冲击荷载作用下容易出现浆体与石料分离的现象. 显然, 表面粗糙、多孔的特性使得珊瑚骨料在混凝土抗冲击压缩性能方面更具优势. 因此, 相较于普通砂石混凝土, 珊瑚骨料混凝土在冲击荷载作用下抵抗破坏的能力更好.

3 结论

(1) 珊瑚骨料混凝土静态抗压强度和低应变率下的动态抗压强度低于普通砂石混凝土, 但较高应变率下的强度增长较快, 表现出其动态强度增长因子对应变率的敏感性要强于普通砂石混凝土.

(2) 同一应变率下, 珊瑚骨料混凝土的能量吸收能力强于普通砂石混凝土.

(3) 同一应变率下, 与普通砂石混凝土相比, 珊瑚骨料混凝土破碎后的平均尺寸较大, 且动态破坏特征多表现为轴向张拉破坏, 而普通砂石混凝土以压碎破坏形式为主; 珊瑚骨料表面粗糙多孔的结构特性使得其与浆体之间嵌固咬合, 在冲击荷载作用下浆-石不易分离, 抗冲击性能更好.

参考文献:

[1] HOWDYSHELL P A. The use of coral as an aggregate for Portland cement concrete structures[R]. [S. l.]: Army Construction Engineering Research Laboratory, National Technical Information Service U. S. Department of Commerce, 1974.
[2] RICK A E. Coral concrete at bikini atoll[J]. Concrete Inter-

national, 1991, 13(1): 19-24.

[3] ARUMUGAM R A, RAMAMURTHY K. Study of compressive strength characteristics of coral aggregate concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48(9): 141-148.
[4] 陈兆林, 陈天月, 曲勤明, 等. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. 海洋工程, 1991(8): 67-80.
CHEN Zhaolin, CHEN Tianyue, QU Jiming, et al. Application feasibility study of coral reef sand concrete[J]. The Ocean Engineering, 1991(8): 67-80. (in Chinese)
[5] 陈兆林, 孙国峰, 唐筱宁, 等. 岛礁工程海水拌养珊瑚礁、砂混凝土修补与应用研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(4): 60-69.
CHEN Zhaolin, SUN Guofeng, TANG Xiaoning, et al. Study on applications of concretes from coral reef sand mixed with seawater for patching-up in reef engineering[J]. Coastal Engineering, 2008, 27(4): 60-69. (in Chinese)
[6] 韩超. 海水拌养珊瑚礁混凝土基本力学性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
HAN Chao. Experimental study on basic mechanical properties of coral reef concrete with seawater[D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)
[7] 李林, 赵艳林, 吕海波. 珊瑚骨料混凝土力学性能的影响因素研究[J]. 福建建材, 2011(1): 10-11.
LI Lin, ZHAO Yanlin, LÜ Haibo. Coral aggregate concrete mechanical properties factors affecting [J]. Fujian Building Materials, 2011(1): 10-11. (in Chinese)
[8] 张拴柱. 珊瑚礁混凝土的疲劳特性及微观机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
ZHANG Shuanzhu. Experimental study on the fatigue property and microscopic mechanism of coral concrete[D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)
[9] 糜人杰, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚骨料海水混凝土力学性能试验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 47-54.
MI Renjie, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Study on the mechanical property of coral concrete[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(4): 47-54. (in Chinese)
[10] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土单轴受压应力-

- 应变全曲线试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 144-151.
- DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Experimental research on whole stress-strain curves of coral aggregate seawater concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 144-151. (in Chinese)
- [11] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 253-260.
- DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Factors influencing durability of coral concrete structure in the South China Sea [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 253-260. (in Chinese)
- [12] 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, 2017.
- ZHANG Yan. Study on static and dynamic mechanical properties of coral seawater concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [13] 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 basis characteristics of coral concrete [D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)
- [14] 谢友均, 傅强, 龙广成, 等. 基于 SHPB 试验的高速铁路 CRTS II 型 CA 砂浆动态性能 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 672-680.
- XIE Youjun, FU Qiang, LONG Guangcheng, et al. Dynamic mechanical properties of CRTS II type CA mortar for high-speed railway based on SHPB test [J]. Science Sinica Technologica, 2014, 44(7): 672-680. (in Chinese)
- [15] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法和三波法 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368-373.
- SONG Li, HU Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368-373. (in Chinese)
- [16] 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 applying coral concrete in port engineering [J]. Water Transportation Engineering, 1988(9): 46-48. (in Chinese)
- [17] WANG Qiankun, LI Peng, TIAN Yapo, et al. Mechanical properties and microstructure of portland cement concrete prepared with coral reef sand [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016, 31(5): 996-1001.
- [18] 丰平, 张庆明, 陈利, 等. SHPB 测试中斜坡加载对应力均匀性和恒应变率的影响分析 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 513-516.
- FENG Ping, ZHANG Qingming, CHEN Li, et al. Influence of incident pulse of slope on stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(5): 513-516. (in Chinese)
- [19] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603-2608.
- XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. Preliminary study on energy analysis of rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603-2608. (in Chinese)
- [20] JIAO C, SUN W, HUAN S, et al. Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete at medium strain rate [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2009, 3(2): 131-136.
- [21] LAI J, SUN W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11): 1044-1051.
- [22] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能 [J]. 复合材料学报, 2008(2): 135-142.
- LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Liujun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008(2): 135-142. (in Chinese)
- [23] 郭永昌, 刘锋, 陈贵炫, 等. 橡胶混凝土的冲击压缩试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 139-144.
- GUO Yongchang, LIU Feng, CHEN Guixuan, et al. Experimental investigation on impact resistance of rubberized concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 139-144. (in Chinese)
- [24] 龙广成, 李宁, 薛逸骅, 等. 冲击荷载作用下掺橡胶颗粒自密实混凝土的力学性能 [J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(8): 1081-1090.
- LONG Guangcheng, LI Ning, XUE Yihua, et al. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating rubber particles under impact load [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(8): 1081-1090. (in Chinese)
- [25] 何远明, 霍静思, 陈柏生, 等. 高温下混凝土 SHPB 动态力学性能试验研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(9): 200-208.
- HE Yuanming, HUO Jingsi, CHEN Baisheng, et al. Impact tests on dynamical behavior of concrete at elevated temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 200-208. (in Chinese)
- [26] LIU S, XU J. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 62(5): 51-58.
- [27] ZHANG Z X, KOU S Q, JIANG L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: Fracture characteristics and energy partitioning [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(5): 745-762.