

文章编号:1007-9629(2021)02-0283-08

全珊瑚海水混凝土冲击压缩性能试验研究与数值模拟

岳承军, 余红发, 麻海燕, 梅其泉, 刘 婷

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211100)

摘要:采用直径为75 mm的霍普金森压杆对强度等级为C30和C50的全珊瑚海水混凝土(CASC)以及剑麻纤维增强全珊瑚海水混凝土(SFCASC)进行了冲击压缩试验,并使用LS-DYNA软件对CASC的冲击性能进行了模拟.结果表明:CASC与SFCASC的动态增强因子DIF与应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 、立方体抗压强度 f_{cu} 有关,建立了DIF关于 $\dot{\epsilon}_s$ 与 f_{cu} 的二元函数模型;通过试件的破坏形态分析可知剑麻纤维能够有效增强CASC的抗冲击性能,当应变率为 52.4 s^{-1} 时,CASC-C50试件破坏较为严重,而SFCASC-C50试件在应变率为 56.9 s^{-1} 时仍能保持完整的形态,只在边缘处出现少量裂缝;采用LS-DYNA软件对CASC-50的冲击压缩过程进行数值模拟,通过试验数据确定了HJC模型参数,模拟的动态抗压强度与试验值的误差在 $1.0\% \sim 4.9\%$,模拟动态临界应变与试验值的误差在 $4.3\% \sim 18.3\%$.

关键词:全珊瑚海水混凝土;霍普金森压杆;剑麻纤维;应变率效应;数值模拟

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.008

Experimental Study and Simulation of Impact Compression of Coral Aggregate Seawater Concrete

YUE Chengjun, YU Hongfa, MA Haiyan, MEI Qiquan, LIU Ting

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Coral aggregate seawater concrete(CASC) with strength grade of C30 and C50 and sisal fiber reinforced coral aggregate seawater concrete(SFCASC) were tested using Hopkinson pressure bar of 75mm diameter. The finite element software LS-DYNA was used to simulate the mechanical response of CASC under impact loading. The results show that the dynamic increase factor(DIF) of CASC and SFCASC is related to strain rate ($\dot{\epsilon}_s$) and cubic compressive strength (f_{cu}), and the binary function model of DIF with $\dot{\epsilon}_s$ and f_{cu} is established. According to the failure morphology analysis of the specimens, sisal fiber can effectively enhance the impact resistance of CASC. When the strain rate is 52.4 s^{-1} , the CASC-C50 specimens are more severely damaged, while the SFCASC-C50 specimens can maintain complete shape at strain rate of 56.9 s^{-1} , with only a few cracks appearing at the edges. The impact process is simulated by LS-DYNA software, and the parameters of HJC model are determined by experimental data. The error between the simulated dynamic compressive strength and the test value is $1.0\% \sim 4.9\%$, and the error of the dynamic critical strain is $4.3\% \sim 18.3\%$.

Key words: coral aggregate seawater concrete; Hopkinson pressure bar; sisal fiber; strain rate effect; simulation

收稿日期:2019-11-10; 修订日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11832013,51878350,51678304,51508272)

第一作者:岳承军(1993—),男,河南信阳人,南京航空航天大学硕士生. E-mail:yuecj993@163.com

通讯作者:余红发(1964—),男,湖北武穴人,南京航空航天大学教授,博士生导师,博士. E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn

珊瑚礁是一种特殊的岩土类型,其主要的矿物成分是文石和高镁方解石,碳酸钙含量在96%以上^[1].这些特殊的岛礁堆积物可以作为一种新型的建筑材料^[2]——珊瑚骨料(CA).近些年由于南海争端问题日趋严重,南海岛礁工程的建设成为中国南海开发的当务之急.全珊瑚海水混凝土(CASC)的配制采取就地取材的原则,利用当地岛礁丰富的珊瑚资源作为原材料,为南海岛礁工程建设提供了便捷的建筑原材料.在南海复杂的自然环境中,建筑物除受到基本准静态荷载外,可能还会受到剧烈的冲击荷载,如防护堤会受到海浪冲击力,机场跑道要承受飞机降落的冲击力,高层建筑会受到风荷载的作用,地震区建筑会受到地震荷载作用等.因此,对CASC的研究具有非常重要的现实意义和实用价值.

美国是最早研究和利用珊瑚混凝土的国家.早在二战期间,美国和日本都曾在太平洋岛礁上,大量使用珊瑚混凝土修建防御工程、道路和机场.20世纪50年代,美国海军土木工程实验室^[3-4]报道了有关珊瑚骨料开采和加工、珊瑚混凝土配合比和搅拌标准等研究.英国、丹麦、澳大利亚等国家也使用珊瑚混凝土作为建筑材料.中国最早于20世纪80年代开始对珊瑚混凝土进行研究.珊瑚混凝土从骨料类型上可分为3类:(1)以珊瑚砂作为细骨料,普通碎石作为粗骨料的混凝土;(2)以普通河砂作为细骨料,珊瑚作为粗骨料的混凝土;(3)以珊瑚作为粗骨料,珊瑚砂作为细骨料,并采用海水拌和的全珊瑚海水混凝土.2013年以前,国内对珊瑚混凝土的研究大多集中在其基本力学性能及疲劳性能等方面^[5-11].自2013年起,南京航空航天大学余红发课题组^[12-22]对全珊瑚海水混凝土的配合比优化、基本力学性能、冲击、侵彻与爆炸等动态力学行为及其数值模拟、氯离子扩散行为、珊瑚混凝土中的钢筋锈蚀、梁柱构件的力学性能、珊瑚混凝土结构寿命可靠度等方面展开了系统性的研究,为珊瑚混凝土在岛礁工程中的应用奠定了坚实的基础.

本文采用分离式霍普金森压杆(SHPB)研究了CASC在高速冲击荷载作用下的力学性能响应,比较了不同强度等级的CASC动态压缩应力-应变曲线的特点,使用剑麻纤维改善CASC的脆性,并采用数值模拟的方法对CASC的动态力学性能展开讨论,以揭示CASC在应变率荷载下的动态响应机理.

1 试验

1.1 原材料及其基本性能

粗骨料采用南沙某岛礁的珊瑚,经人工破碎筛分成5~15 mm连续级配;细骨料采用南沙某岛礁的珊瑚砂,细度模数2.44,Ⅱ区级配,属于中砂;水泥采用南京江南小野田公司生产的P·Ⅱ52.5型硅酸盐水泥,其性能指标符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》;粉煤灰(FA)采用南京电热厂生产的I级粉煤灰,性能符合GB/T 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》;矿渣(SG)采用江苏江南粉磨公司S95级磨细矿渣,比表面积为461 m²/kg;减水剂采用西卡生产的3301C型聚羧酸高性能减水剂,性能符合GB 8076—2008《混凝土外加剂》,固含量¹⁾30%,减水率达20%以上,Na₂SO₄含量0.18%,氯离子含量0.01%;海水按照美国ASTM D1141—2003《Standard practice for the preparation of substitute ocean water》规定配制;剑麻纤维(SF)采用广西剑麻集团生产的剑麻纤维,性能符合GB/T 15031—2009《剑麻纤维》,直径0.03 mm,束纤维断裂力780 N,回潮率小于13%^[23],使用时将剑麻纤维切割成15 mm长的短丝.

1.2 试件配合比

基于高性能轻骨料混凝土配合比设计原理及富浆混凝土理论^[13]得出,总胶凝材料质量、预吸水性、质量砂率(S_p)、水胶比(m_w/m_c)是影响CASC强度的主要指标,而JGJ 51—1990《轻骨料混凝土技术规程》中轻骨料混凝土采用的是体积砂率.珊瑚骨料具备多孔的性质,使得珊瑚砂很容易进入珊瑚内,因此在进行配合比设计时,质量砂率比体积砂率效果更好.本文设计了C30和C50强度等级的全珊瑚海水混凝土(CASC)和剑麻纤维增强全珊瑚海水混凝土(SF-CASC),参照文献[24],确定剑麻纤维的用量为3 kg/m³,CASC与SFCASC的配合比及拌和性能见表1.

采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试件来测试全珊瑚海水混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} ;冲击压缩试件为 $\phi 70 \times 35$ mm的圆柱体;此外增加1组尺寸为 $\phi 70 \times 70$ mm的圆柱体试件,测定其准静态抗压强度 f_{cy} ,作为计算动态增强因子(DIF)的静态抗压强度,测试方法参照GB/T 5008—2008《普通混凝土力学性能试验方法标准》.

1.3 试验设备

冲击试验采用霍普金森压杆(SHPB),杆件直径为75 mm,弹性模量为210 GPa,密度为7 850 kg/m³,

1)文中涉及的含量、减水率、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表 1 CASC 与 SFCASC 的配合比及拌和性能
Table 1 Mix proportion and mixing performance of CASC and SFCASC

Specimen	Mix proportion/(kg · m ⁻³)								Slump/ mm	<i>m_w</i> / <i>m_c</i>
	Cement	SG	FA	Coral	Coral sand	Water reducer	Total water	SF		
CASC-C30	275	150	75	582	873	8.25	296	0	125	0.59
SFCASC-C30	275	150	75	582	873	8.25	296	3	115	0.59
CASC-C50	620	120	60	369	860	16.00	221	0	90	0.28
SFCASC-C50	620	120	60	369	860	16.00	221	3	85	0.28

入射杆长为 5 000 mm,透射杆长为3 000 mm,子弹长为 600 mm. 试验时记录入射波信号 $\epsilon_i(t)$ 、反射波信号 $\epsilon_r(t)$ 及透射波信号 $\epsilon_t(t)$,其中 t 为信号采集时间.

2 结果与分析

2.1 试验结果

CASC 与 SFCASC 的抗压强度见表 2,其中立方体抗压强度 f_{cu} 均为乘以折减系数 0.9 后的值. 由表 2 可知:剑麻纤维对水灰比较大($m_w/m_c=0.59$)的 CASC 不具增强作用,对水灰比较小($m_w/m_c=0.28$)的 CASC 具有增强作用;未掺剑麻纤维的 CASC-C50 试件 28 d 立方体抗压强度为 55.1 MPa,掺入剑麻纤维后,SFCASC-C50 的 28 d 立方体抗压强度为 60.2 MPa,比未掺剑麻纤维的试件增长了

9.3%;在 90 d 龄期时,CASC-C50 的 f_{cu} 较 28 d 时增长了 8.6 MPa,SFCASC-C50 的 f_{cu} 较 28 d 时增长了 9.4 MPa. 可见,在后期的强度发展中,SF-CASC 的强度增长量略高于 CASC. 图 1 为 CASC 与 SFCASC 的冲击压缩应力-应变曲线,应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 26.2~157.3 s⁻¹.

表 2 CASC 与 SFCASC 的抗压强度
Table 2 Compressive strength of CASC and SFCASC

Specimen	f_{cu} /MPa		f_{cy} /MPa
	28 d	90 d	90 d
CASC-C30	34.0	38.1	40.8
SFCASC-C30	32.3	35.6	38.4
CASC-C50	55.1	63.7	60.4
SFCASC-C50	60.2	69.6	67.6

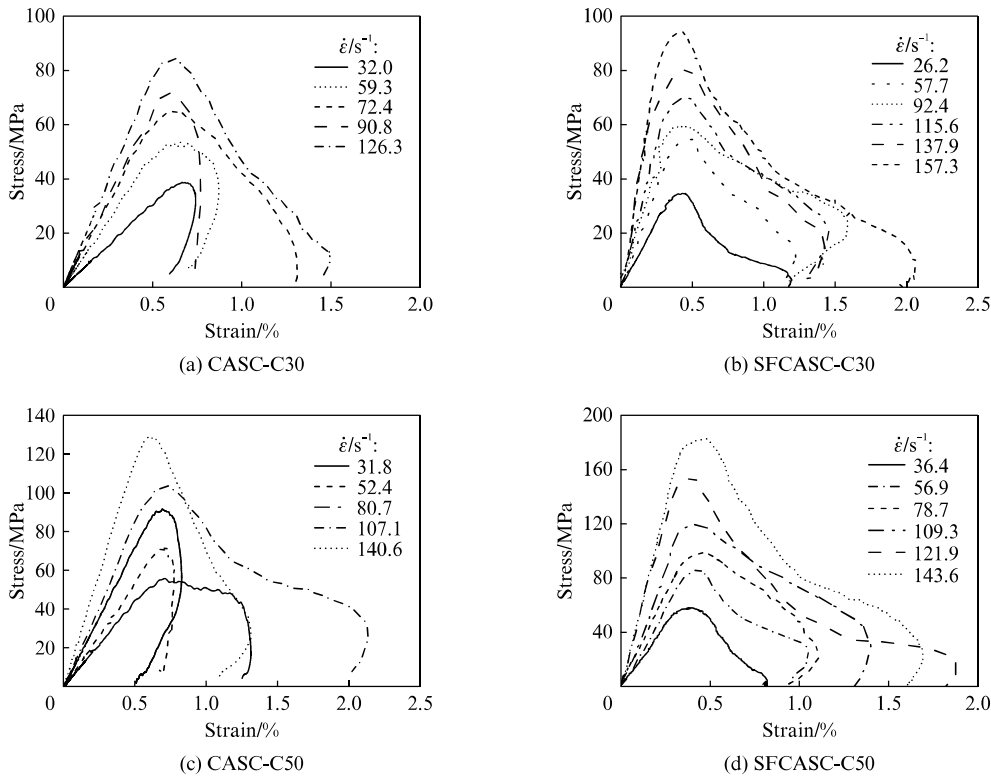


图 1 CASC 与 SFCASC 的冲击压缩应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves of CASC and SFCASC

2.2 应变率效应

从图1可以看出,CASC与SFCASC具有明显的应变率效应,即峰值应力随着应变率的提高而不断增大.动态增强因子(DIF)用以表征材料在动态荷载作用下引起的强度变化.图2汇总了本文、章艳^[16]论文以及普通C50强度等级混凝土^[22]的DIF与应变率的关系.从图2可以看出,在相同应变率下,随着静态抗压强度的增大,CASC的DIF值减小.可见DIF是关于应变率和静态抗压强度的二元函数.此外,CASC的DIF随应变率变化的敏感性比普通混凝土要高,即在相同的应变率增长量下,CASC的DIF增长量要高于普通混凝土.欧洲混凝土委员会(CEB)^[25]推荐的混凝土DIF拟合模型是在大量普通混凝土数据下建立的,在建立CASC的DIF拟合模型时若采用CEB推荐公式则会存在较大误差.

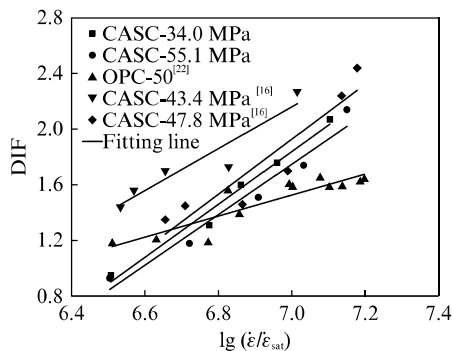


图2 DIF与应变率(对数形式)的关系
Fig. 2 Relationship between DIF and strain rate(logarithmic)

基于以上规律,本文采用文献[26]中提出的DIF计算模型,拟合出CASC的DIF与应变率、静态抗压强度的关系式如下:

$$DIF = \frac{f_{cy,d}}{f_{cy,s}} = \left(\frac{15.79}{f_{cu}} \right)^{5.195} \times \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sat}} \right)^{0.54}, \quad \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

式中: $f_{cy,d}$ 为动态抗压强度; $f_{cy,s}$ 为圆柱体静态抗压强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_{sat}$ 为准静态应变率,取 $\dot{\epsilon}_{sat} = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

2.3 破坏形态分析

图3给出了各试件典型的冲击破坏形态.由图3可见:掺加剑麻纤维的试件SFCASC能够抵抗更高应变率下的冲击荷载.以CASC-C50为例,当应变率($\dot{\epsilon}$)为 31.8 s^{-1} 时试件还未出现明显破坏,说明混凝土内部引起微裂纹损伤的拉伸应力小于微裂纹生成的阈值应力,此时试件能够保持完整的形态;当应变率为 52.4 s^{-1} 时,试件破坏较为严重,边缘区域出现较多碎块;随着应变率的提高,试件破坏程度增

大.当应变率达到 140.6 s^{-1} 时,试件全部破碎成小碎块及粉粒状.掺加剑麻纤维的试件SFCASC-C50在应变率为 56.9 s^{-1} 时仍能保持完整的形态,只在边缘处出现少量裂缝;当应变率为 78.7 s^{-1} 时,试件边缘区域发生损伤破坏,中心区域损伤程度低于边缘区域;随着应变率的继续增大,试件损伤程度增大,但其碎块数量远少于相同应变率下试件CASC-C50的碎块数量.

造成以上破坏形态差异的主要原因是:CASC自身脆性较大,其破坏呈现出典型的脆性破坏,多数碎块从整体中剥离;掺入剑麻纤维后,试件内部各个小单元之间的协调作用与约束作用增强,在承受相同冲击荷载时,其破坏程度比未掺剑麻组试件要小.因此,从破坏形态分析可知,剑麻纤维能有效增强CASC的抗冲击性能.

3 数值模拟

本文采用动力有限元软件LS-DYNA对SHPB冲击试验进行模拟,选用软件模型库中的HJC模型作为CASC的本构模型,HJC模型能够较为准确地反映混凝土在高应变率荷载作用下的力学性能响应^[27].

3.1 模型建立

采用Ls-prepost建立简化模型,其中入射杆和透射杆长均为 1.5 m ,直径为 70 mm ,试件尺寸为 $\phi 70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,使用的单位制为 kg-m-s ,采用八节点六面体(Solid 164)单元.为了保证模拟结果的精确度,在应力波脉冲持续时间内,其传播的路径上应有足够数量(n)的单元网格^[28],相关文献^[29]中建议使用 $n \geq 10$,本文取 $n = 20$.将入射杆和透射杆在杆长方向上分为100等份,周长方向上分为80等份.试件在长度方向上分为20等份,周长方向上分为80等份,模型共639 731个节点、422 400个单元.杆件及子弹为同种类型的钢材,采用理想的弹性材料本构模型* MAT_ELASTIC,弹性模量为 210 GPa ,密度为 $7 840 \text{ kg/m}^3$.杆件与试件的接触类型选择面面接触进行定义,关键字为* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE.

3.2 模型参数及模拟结果

根据文献[30]中的方法,混凝土最关键的属性是静态抗压强度,可以利用有限的试验数据得到复杂模型的计算参数.HJC模型参数主要由材料的基本参数(ρ 、 f_c 、 G),强度参数(A 、 B 、 C 、 N 、 T 和 $S_{f,max}$),损伤参数(D_1 、 D_2 、 $\epsilon_{f,min}$)和压力参数(K_1 、 K_2 、 K_3 、 P_{crush} 、 U_{crush} 、 P_{clock} 、 U_{clock})4个部分组成.各符号含义在LS-

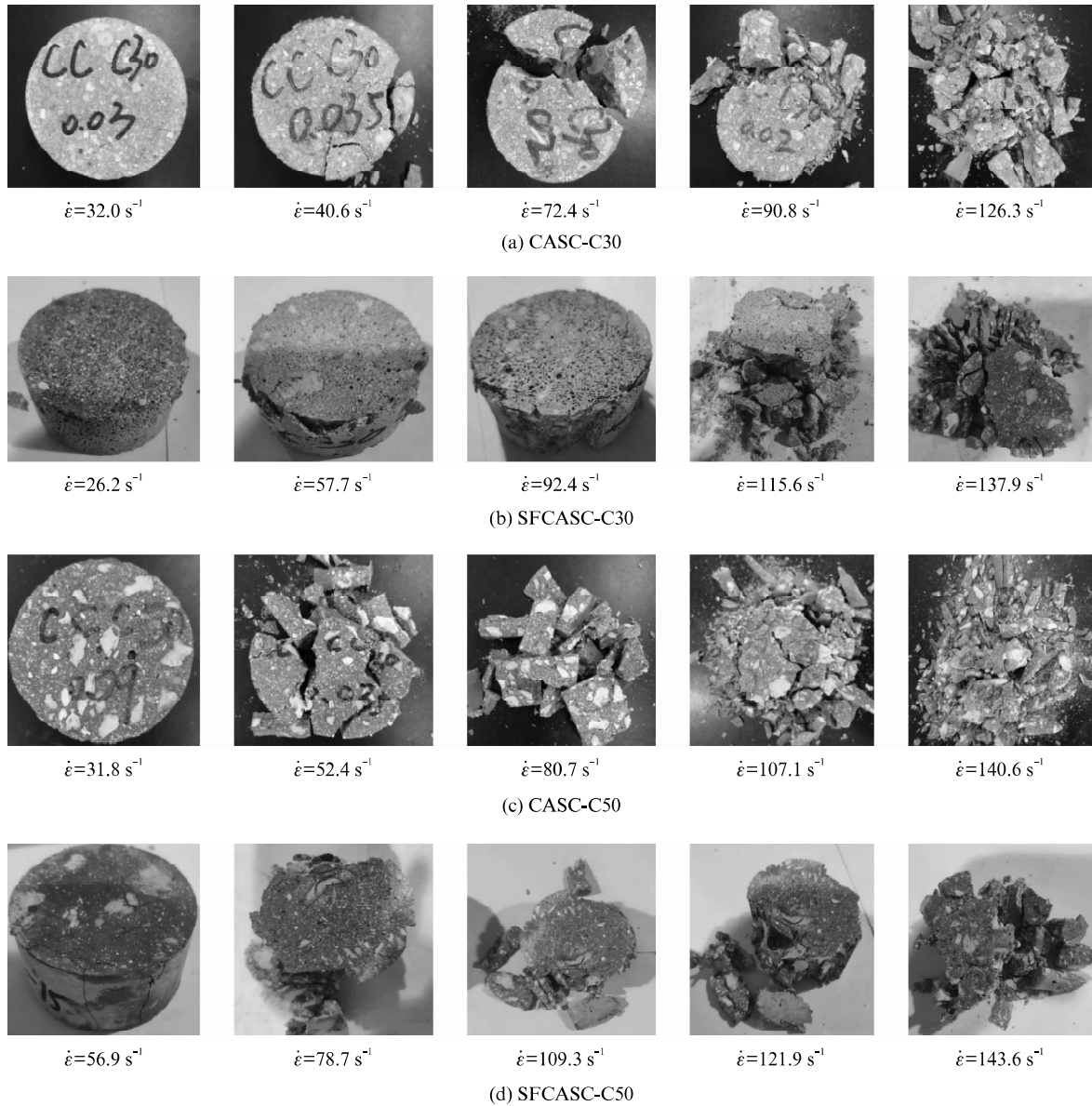


图3 各试件典型的冲击破坏形态

Fig. 3 Typical impact damage patterns of specimens

DYNA 用户手册中有说明,文中不再赘述。其中 ρ 、 f_c 、 G 、 T 均可由较为简单的静态试验获得;损伤参数由于缺少已有试验数据,且 Holmquist 等^[30]假定损伤参数与混凝土强度无关,仍取原始文献^[31]值 $D_1=0.04$, $D_2=1.0$, $\epsilon_{f,\min}=0.01$; $P_{\text{crush}}=f'_c/3$, $\mu_{\text{crush}}=P_{\text{crush}}/K_{\text{elastic}}$, $\mu_{\text{clock}}=\rho_{\text{grain}}/\rho_0-1$, ρ_{grain} 为 CASC 压实密度, ρ_0 为表观密度; P_{clock} 可根据插值法确定,已知 $f'_c=48$ MPa 时 $P_{\text{clock}}=0.8$ GPa, $f'_c=140$ MPa 时 $P_{\text{clock}}=1$ GPa,则 $P_{\text{clock}}=0.8+(1-0.8)\times(f'_c-48)/(140-48)$ 。

本文模拟了应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 52.4、80.7、107.1、140.6 s^{-1} 下 CASC-C50 的冲击过程,为尽可能与试验条件相同,将试验采集的入射波数据作为加载曲线。根据文

献^[32]对参数 A 、 B 、 C 、 N 进行调试,得到应力-应变试验与模拟曲线对比图,见图 4。由图 4 可见,应力上升段试验值与模拟值吻合较好,下降段偏差较多,主要原因是下降段试件出现损伤导致应力平衡失效。因此模拟时只需看曲线在上升段的吻合情况。CASC 的模型参数见表 3。

为了能够模拟试件的冲击破坏形态,在定义混凝土材料参数时添加关键字 *MAT_ADD_EROSION 来计算混凝土的侵蚀失效单元。图 5 为 CASC-C50 试件模拟破坏形态图。结合图 3 和图 5 可以看出,模拟图与实际破坏形态较为相似。

3.3 冲击压缩模拟结果与试验结果对比

表 4 为 CASC-C50 冲击试验结果与模拟结果的

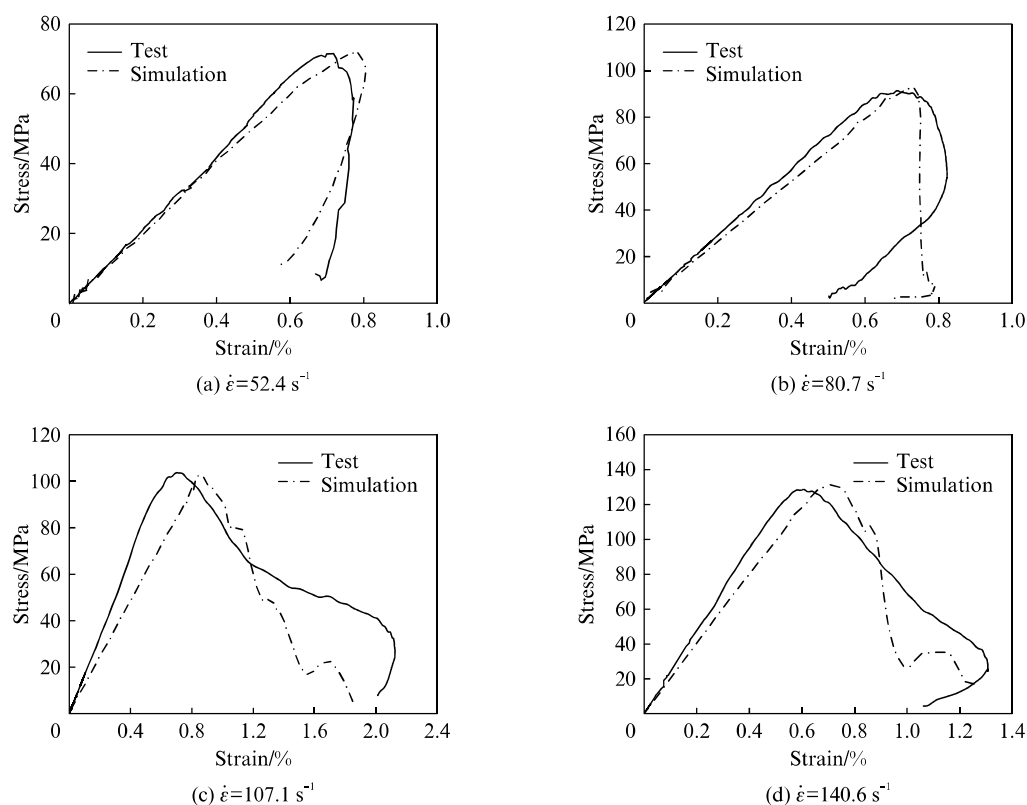


图4 CASC-C50 的应力-应变试验与模拟曲线对比图

Fig. 4 Comparison of test and simulated stress-strain curves of CASC-C50

表3 CASC-C50 冲击压缩数值模拟 HJC 模型参数

Table 3 CASC impact compression numerical simulation HJC model parameters

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/Pa	A	B	C	N	f_c/Pa
2 200	1.04×10^{10}	0.79	1.85	0.008	0.61	5.51×10^7
T/Pa	EPS0	$\epsilon_{f,\min}$	$S_{f,\max}$	$P_{\text{crush}}/\text{Pa}$	U_{crush}	P_{clock}
5.14×10^6	1	0.01	7	1.47×10^7	0.000 75	8.00×10^8
U_{clock}	D_1	D_2	K_1/Pa	K_2/Pa	K_3/Pa	FS
0.1	0.04	1.0	1.2×10^{10}	1.35×10^{11}	6.98×10^{11}	0

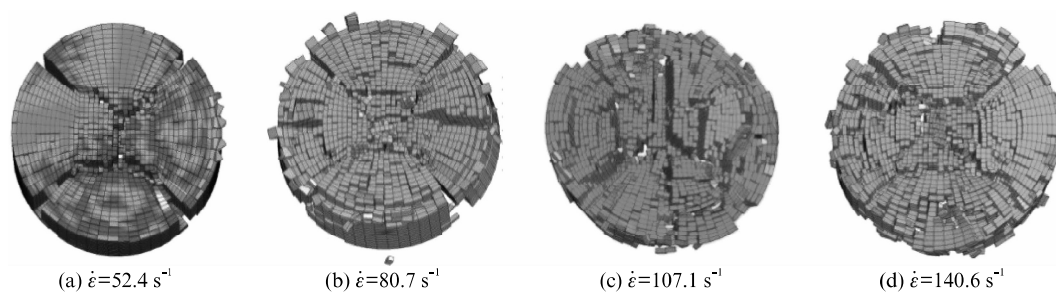


图5 CASC-C50 试件模拟破坏形态图

Fig. 5 Specimen simulated failure pattern diagram of CASC-C50

表 4 CASC-C50 冲击试验结果与模拟结果对比
Table 4 Comparison of test results and simulation results of CASC-C50

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	f_{cy}/MPa	Peak stress/MPa			Critical strain/%		
		Experiment	Simulation	Error/%	Experiment	Simulation	Error/%
52.4	61.7	71.6	73.1	2.1	0.72	0.78	8.3
80.7		91.5	96.0	4.9	0.69	0.72	4.3
107.1		103.5	102.5	1.0	0.71	0.84	18.3
140.6		128.7	131.4	2.1	0.61	0.71	16.4

对比.由表 4 可见,在模拟的 4 个工况下,模拟动态抗压强度与试验值的误差为 1.0%~4.9%,模拟动态临界应变与试验值的误差为 4.3%~18.3%,模拟效果较好.

4 结论

(1)剑麻纤维对水灰比较大($m_w/m_c=0.59$)的 CASC 抗压强度不具增强作用,对水灰比较小($m_w/m_c=0.28$)的 CASC 抗压强度具有增强作用.

(2)CASC 与 SFCASC 具有明显的应变率效应,且动态增强因子 DIF 对应变率的敏感度比普通混凝土高,拟合出 DIF 与应变率、立方体抗压强度的计算模型参数.

(3)从试件破坏形态分析剑麻纤维能够有效增强 CASC 的抗冲击性能,CASC 自身脆性较大,其破坏呈典型的脆性破坏形态,掺入剑麻纤维后,试件内部各个小单元之间的协调作用与约束作用增强,在承受相同冲击荷载时,其破坏程度比未掺剑麻组试件要小.

(4)采用 LS-DYNA 软件对 CASC 冲击过程进行模拟,混凝土模型选用 HJC 模型,通过试验测得的参数值及调试参数确定了 HJC 模型参数,模拟动态抗压强度与试验值的误差范围为 1.0%~4.9%,动态临界应变的误差范围为 4.3%~18.3%.

参考文献:

[1] 孙宗勋.南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J].热带海洋,2000,19(2):1-8.
SUN Zongxun.Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J].Tropic Oceanology,2000,19(2):1-8.(in Chinese)

[2] HOWDYSHELL P A.The use of coral as aggregate for Portland cement concrete structures[R].[S.l.]:Army Construction Engineering Research Laboratory,1974.

[3] NARVER D L.Good concrete made with coral and water[J].Civil Engineering,1964,24:654-858.

[4] DEMPSEY G.Coral and salt water as concrete materials[J].Journal of ACI,1951(23):157-166.

[5] 梁元博,卢博,黄韶健.热带海洋环境与海工混凝土[J].海洋

技术,1995,14(2):58-66.

LIANG Yuanbo,LU Bo,HUANG Shaojian.On the tropical environment and the concrete for marine engineering[J].Ocean Technology,1995,14(2):58-66.(in Chinese)

[6] 李林.珊瑚混凝土的基本特性研究[D].南宁:广西大学,2012.

LI Lin.Basic characteristics of coral concrete[D].Nanning:Guangxi University,2012.(in Chinese)

[7] WANG L,ZHAO Y L.The comparison of coral concrete and other light weight aggregate concrete on mechanics performance[J].Advanced Materials Research,2012,446-449:3369-3372.

[8] 王磊,王国旭,邓雪莲.不同掺量碳纤维珊瑚混凝土力学性能试验研究[J].中国农村水利水电,2014(9):148-151,156.

WANG Lei,WANG Guoxu,DENG Xuelian.Research on the mechanical properties of different content carbon fiber coral concrete[J].China Rural Water and Hydropower,2014(9):148-151,156.(in Chinese)

[9] 周杰.珊瑚混凝土制备技术与物理力学性能试验研究[D].南京:河海大学,2015.

ZHOU Jie.Experimental study on preparation technology and physical and mechanical properties of coral concrete[D].Nanjing:Hohai University,2015.(in Chinese)

[10] 王磊,范蕾.珊瑚碎屑混凝土的强度特性及破坏形态分析[J].混凝土与水泥制品,2015(1):1-4.

WANG Lei,FAN Lei.Analysis of strength characteristics and failure pattern of coral concrete[J].China Concrete and Cement Products,2015(1):1-4.(in Chinese)

[11] 李仲欣,韦灼彬,沈锦林.基于 BP 神经网络的珊瑚混凝土抗压强度预测模型[J].混凝土,2016(1):64-69,74.

LI Zhongxin,WEI Zhuobin,SHEN Jinlin.Forecast model of compressive strength of coral concrete based on BP neural network[J].Concrete,2016(1):64-69,74.(in Chinese)

[12] 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.Preparation technology, durability and mechanical properties of high-strength all-coral seawater concrete[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017.(in Chinese)

[13] 余红发,达波,袁银峰,等.全珊瑚海水混凝土的配合比设计与抗压强度规律[R].南京:解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,开放课题年度进展报告,2014.

YU Hongfa,DA Bo,YUAN Yinfeng,et al.Mixing ratio design and compressive strength law of coral aggregate seawater

- concrete [R]. Nanjing: State Key Laboratory of Explosion Shock Prevention and Mitigation, PLA University of Science and Technology, Annual Progress Report of Open Project, 2014. (in Chinese)
- [14] 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. Mixing ratio design and basic performance of coral aggregate seawater concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [15] YU H F, DA B, MA H Y, et al. Mixture proportions design and performance study of coral concrete [C] // The 3rd International RILEM Conferences on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites (Microdurability 2016). Nanjing: [s. n.], 2016.
- [16] 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. Static and dynamic mechanical properties of coral aggregate seawater concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [17] 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. Stress-strain relationship of material and mechanical properties of flexural members of coral aggregate concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [18] 窦雪梅. 岛礁环境下珊瑚混凝土耐久性及其结构寿命的可靠度研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
DOU Xuemei. Research on the durability of coral concrete and reliability of structure life under island reef circumstance [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [19] 吴彰钰. 高强全珊瑚海水混凝土结构的钢筋锈蚀与服役寿命研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WU Zhangyu. Study on steel corrosion and service life of high strength coral aggregate seawater concrete structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [20] 余红发, 达波, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土及其梁柱构件的力学性能与耐久性研究 [C] // 第二届全国可持续混凝土理论与应用技术学术交流会. 上海: [s. n.], 2019.
YU Hongfa, DA Bo, MA Haiyan, et al. Study on mechanical behavior and durability of coral aggregate seawater concrete and its beam-column member [C] // The Second National Sustainable Concrete Theory and Application Technology Academic Exchange Conference. Shanghai: [s. n.], 2019. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的实验研究与数值模拟 [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)
- [23] LI Y, MAI Y W, YE L. Sisal fiber and its composites: A review of recent developments [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(11): 2037-2055.
- [24] 邓雪莲, 刘存鹏, 陈宜虎. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土抗拉性能研究 [J]. 山西建筑, 2016, 42(8): 137-138.
DENG Xuelian, LIU Cunpeng, CHEN Yihu. On tensile performance of coral concrete strengthened by sisal fiber [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(8): 137-138. (in Chinese)
- [25] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP Model Code 1990 [M]. Trowbridge: Redwood Books, 1993.
- [26] MA H Y, YUE C J, YU H F, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137.
- [27] 李耀. 混凝土 HJC 动态本构模型的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
LI Yao. Research on dynamic constitutive model of concrete-HJC [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [28] BATHE K J, SAUNDERS H. Finite element procedures in engineering analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1982, 106(4): 735.
- [29] 庄茁. ABAQUS 非线性有限元分析与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 25-27.
ZHUANG Zhuo. ABAQUS nonlinear finite element analysis and instance [M]. Beijing: Science Press, 2005: 25-27. (in Chinese)
- [30] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C] // Proc. of the 14th International Symposium on Ballistics. Quebec: [s. n.], 1993: 591-600.
- [31] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. 弹道学报, 2001, 13(4): 12-16, 23.
ZHANG Fengguo, LI Enzheng. A method to determine the parameters of the model for concrete impact and damage [J]. Journal of Ballistics, 2001, 13(4): 12-16, 23. (in Chinese)
- [32] 吴赛, 赵均海, 王娟. 基于砧 SHPB 试验数值分析的 HJC 模型参数研究 [J]. 计算力学学报, 2015, 32(6): 789-795.
WU Sai, ZHAO Junhai, WANG Juan, et al. Study on parameters of HJC constitutive model based on numerical simulation of concrete SHPB test [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(6): 789-795. (in Chinese)