

文章编号:1007-9629(2023)11-1158-08

全珊瑚海水混凝土静动态力学性能与数值模拟

麻海燕¹, 余红发^{1*}, 郭建博¹, 梅其泉², 刘婷¹

(1.南京航空航天大学民航学院,江苏南京 211106; 2.三江学院土木工程学院,江苏南京 210012)

摘要:采用试验和三维随机骨料细观模型,研究了全珊瑚海水混凝土(CASC)在高温前后的静动态力学性能、抗侵入和防爆性能。结果表明:添加剑麻纤维能有效改善CASC的脆性;随着温度的提高,CASC的残余抗压强度先增后减;经历高温后CASC的静动态力学性能明显降低,温度越高,高温弱化效应越明显。提出了描述CASC高温后受压应力-应变关系的两段式方程,建立了一种适用于CASC的三维随机骨料细观模型,数值模拟结果与试验结果较为吻合。

关键词:全珊瑚海水混凝土;准静态力学性能;动态力学性能;应变率效应;数值模拟

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.003

Static and Dynamic Mechanical Properties of Coral Aggregate Seawater Concrete and Their Numerical Simulation

MA Haiyan¹, YU Hongfa^{1*}, GUO Jianbo¹, MEI Qiquan², LIU Ting¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautic and Astronautic, Nanjing 211106, China;

2. School of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: The static and dynamic mechanical properties, intrusion resistance and explosive performance of coral aggregate seawater concrete (CASC) before and after high temperature, and their numerical simulation of a three-dimensional random aggregate mesoscopic model were studied. The results show that the addition of sisal fibers can effectively improve the brittleness of CASC. The residual compressive strength of CASC increases and then decreases as the temperature increases. A two-part equation describing the stress-strain relationship of CASC after high temperature was proposed; the static and dynamic mechanical properties of CASC after high temperature are significantly reduced, and the higher the temperature, the more obvious the high temperature weakening effect. A three-dimensional random aggregate mesoscopic model was established for CASC, and the numerical simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words: coral aggregate seawater concrete (CASC); quasi-static mechanical property; dynamic mechanical property; strain rate effect; numerical simulation

中国南海诸岛大部分为珊瑚岛礁,具有丰富的珊瑚资源。自中国提出“一带一路”和“海洋强国”等战略后,对南海诸岛基础设施的建设已初具规模。为降低成本,缩短建设周期和解决原材料来源等问题,在不破坏岛礁现有生态环境的前提下,就地取材,充分利用珊瑚碎屑和珊瑚砂来代替普通砂石骨

料,用海水加以拌和制备全珊瑚海水混凝土(CASC)。在对工程结构,尤其是一些军事防护工程及重要设施进行设计和分析时,既要考虑基本受力情况,也要考虑冲击、爆炸等因素。因此,深入研究CASC高温前后的静动态力学性能、抗侵入和防爆性能,对保证岛礁工程的结构安全具有重要理论意

收稿日期:2023-03-19; 修订日期:2023-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078250,51878350,11832013,51678304,51508272)

第一作者:麻海燕(1976—),女,湖南花垣人,南京航空航天大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: mahaiyan@nuaa.edu.cn

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

义和较高实用价值.

鉴于此,本文介绍了本课题组自 2018 年以来开展的 CASC 系列研究成果,其中包括 CASC 的静态力学性能^[1-8]、动态力学性能^[2-3,9-13]、抗侵入与抗爆炸性能^[14-16]和数值模拟^[17-23]等.这些研究不仅为岛礁工程建筑的多维度评定提供参考依据,还为 CASC 在岛礁工程中的应用提供了基础数据和理论支持.

1 试验

1.1 原材料

水泥选用南京江南-小野田水泥有限公司产 P·II 52.5 硅酸盐水泥和沈阳市嘉宝环球实业有限公司产 52.5 型碱式硫酸镁水泥,其中后者的主要成分是轻烧氧化镁、硫酸镁、磨细矿渣与核心外加剂,具有较高的韧性.粉煤灰(FA)为南京电电厂生产的 I 级粉煤灰.矿渣(SG)为江苏江南粉磨公司 S95 级磨细矿渣.珊瑚和珊瑚砂均来自南海某岛礁,其中珊瑚为 5~15 mm 连续级配,珊瑚砂为中砂,细度模数 2.44.减水剂为江苏苏博特新材料有限公司聚羧酸高效减水剂.人工海水为 3.5% 的 NaCl 溶液.剑麻纤维为广西剑麻集团产剑麻纤维,直径为 0.03 mm.

1.2 配合比

基于高性能轻骨料混凝土(采用轻骨料配制出的混凝土,其表观密度不大于 1 950 kg/m³)配合比设计原理及富浆理论^[1],来配制 C30~C70 强度等级的 CASC.试件制备及试验方法参考文献[1].

2 结果与讨论

2.1 准静态单轴受压试验

2.1.1 常温下的力学性能

2.1.1.1 弹性模量

图 1 为 4 种混凝土弹性模量 E_c 与轴心抗压强度 f_c 的关系.图中 CASC 为全珊瑚海水混凝土、SFCASC 为剑麻纤维全珊瑚海水混凝土、BMSCCASC 为碱式硫酸镁水泥全珊瑚海水混凝土、BMSCC 为碱式硫酸镁水泥混凝土.由图 1 可见:4 种混凝土的弹性模量均随着轴心抗压强度的增大逐渐增大;由于 C30 强度等级的 SFCASC 存在剑麻上浮现象,导致试件承载力降低,从而使得其弹性模量偏小;BMSCCASC 的弹性模量增速明显高于 CASC 和 SFCASC,说明碱式硫酸镁水泥 BMSC 对 CASC 的弹性模量增强效果较为明显;CASC 的弹性模量整体远低于 BMSCC,这是由于珊瑚骨料相对于普通石子来说强度较低,内部存在很多孔洞,容易发生脆性破坏.

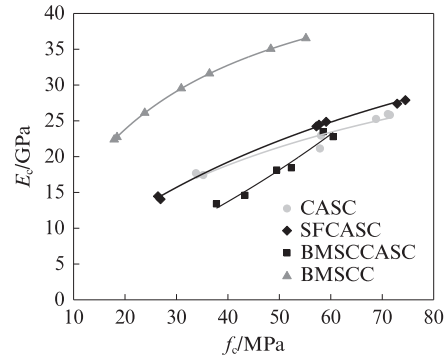


图 1 4 种混凝土弹性模量与轴心抗压强度的关系
Fig. 1 Relationship between elastic modulus and axial compressive strength of four kinds of concretes^[13]

2.1.1.2 压缩韧性

图 2 为 CASC 与 SFCASC 的静态压缩韧性指数 η_{c10} .由图 2 可见,SFCASC 的 η_{c10} 为 CASC 的 1.12~1.18 倍,表明剑麻纤维对 CASC 的静态压缩性能具有明显增韧作用,当混凝土破坏时,试件内部的剑麻纤维拉力会抑制裂纹扩展,提升整体韧性.

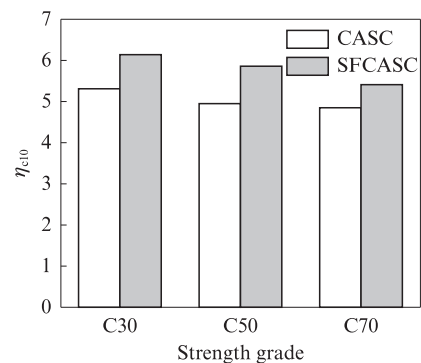


图 2 CASC 与 SFCASC 的静态压缩韧性指数
Fig. 2 Static compression toughness indices of CASC and SFCASC^[10]

2.1.1.3 不同种类混凝土的应力-应变全曲线对比

图 3 为 C50 强度等级 CASC^[3]、SFCASC^[4]、LAC (火山岩、黏土、页岩石轻骨料混凝土)^[24]和 OPC (普通混凝土)的应力-应变全曲线.图中 ϵ 和 ϵ_{pr} 分别为混

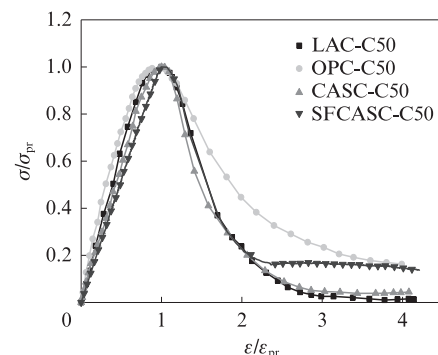


图 3 不同种类混凝土的应力-应变全曲线
Fig. 3 Stress-strain curves for different types of concretes^[4]

混凝土的应变和最大应变, σ 和 σ_{pr} 分别为混凝土的应力和最大应力. 由图3可见: CASC和SFCASC的应力-应变曲线上升段比LAC和OPC的线弹性阶段长; CASC和SFCASC下降段比OPC和LAC陡, 说明CASC有着较高的脆性, 通过增添纤维和使用高韧性水泥, 可以降低CASC的脆性.

2.1.2 高温后的力学性能

2.1.2.1 相对残余轴心抗压强度

图4为不同强度等级(C35、C55、C70和C80)CASC的相对残余轴心抗压强度 f_c^T/f_c^{25} 与温度 T 的关系. 其中 f_c^T 和 f_c^{25} 分别为混凝土在不同温度 T 和 25°C 时的轴心抗压强度. 由图4可见: 在 $25\sim 100^\circ\text{C}$ 区间内, CASC的相对残余轴心抗压强度随着温度的升高而增大; 当温度超过 100°C 后, CASC的相对残余轴心抗压强度随着温度的升高而快速降低.

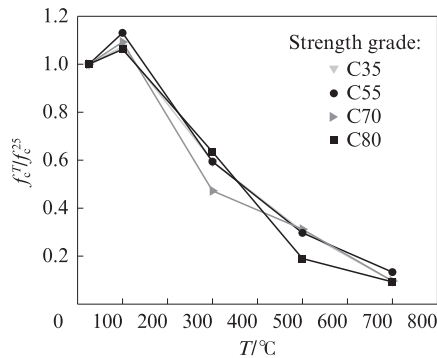


图4 CASC的相对残余轴心抗压强度与温度的关系
Fig. 4 Relationship between relative residual axial compressive strength and temperature of CASC^[2]

2.1.2.2 弹性模量

弹性模量是衡量混凝土材料变形能力的重要指标. 图5为CASC的初始弹性模量 E_0^T 随温度 T 的变化曲线. 由图5可见: 随着温度的提高, CASC初始弹性模量的下降幅度高于其抗压强度的下降幅度, 这是因为在高温作用下水泥浆体收缩而粗骨料膨胀, 两者界面过渡区出现裂缝, 且珊瑚骨料自身也存在高温损伤.

2.1.2.3 应力-应变全曲线方程

图6为高温后3种强度等级(C30、C50和C70)CASC的应力-应变(σ - ϵ)全曲线. 由图6可见: CASC应力-应变全曲线的上升段和下降段有各自明显特征, CASC作为轻骨料混凝土, 与普通混凝土相比, 具有较大的脆性, 其应力-应变曲线上升段的直线段较长, 下降段较陡; 随着温度的升高, CASC的应力先增加后降低, 应变持续增大, 说明高温导致CASC变得酥脆, 力学性能显著降低.

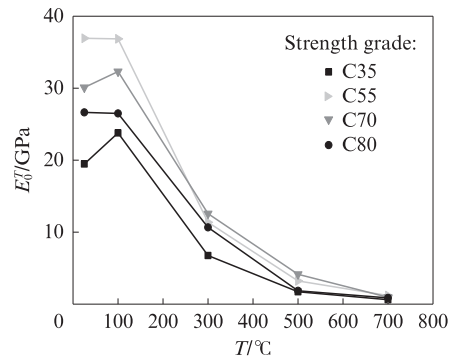


图5 CASC的初始弹性模量随温度的变化曲线
Fig. 5 Variation curves of the initial elastic modulus with temperature of CASC^[2]

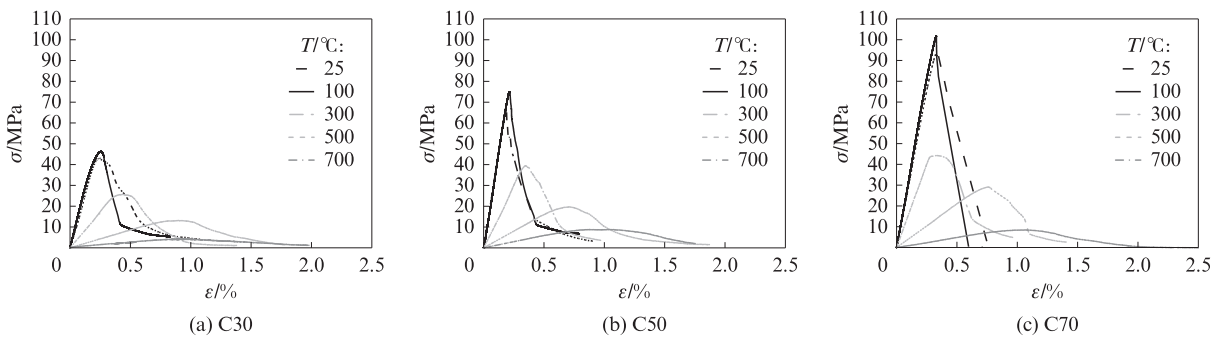


图6 高温后3种强度等级CASC的应力-应变全曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of CASCs with three strength grades after high temperature

根据试验数据曲线具体情况, 确定高温后CASC的准静态单轴压应力-应变全曲线, 表达式如下:

$$\begin{cases} \text{上升段: } y = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}ax\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}a\right)}, 0 \leq x < 1 \\ \text{下降段: } y = \frac{x}{b(x-1)^2 + x}, x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \epsilon/\epsilon_0$, ϵ_0 为峰值应变; $y = \sigma/\sigma_0$, σ_0 为峰值应力; a 、 b 分别为上升段和下降段曲线的控制参数.

2.2 准静态单轴受拉试验

图7为CASC、SFCASC和OPC的静态轴心抗拉应力-应变曲线. 由图7可见: 随着强度等级的提高, 各混凝土的轴心抗拉强度增长率均逐渐降低; 相同强度等级下, CASC的轴心抗拉强度比OPC高, 主

要原因是珊瑚骨料多孔结构使得骨料具有吸水和返水作用,导致后期骨料附近水化更充分,增强了骨料与水泥浆体的机械咬合力,而普通砂石骨料表面较为光滑,与水泥石的咬合力远小于珊瑚骨料。

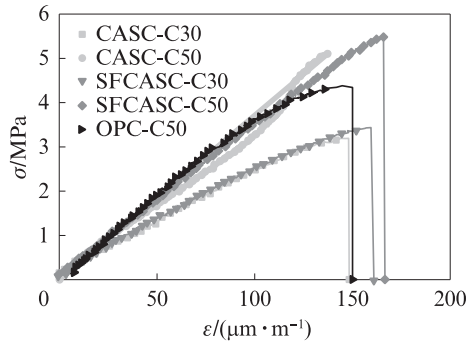


图 7 各混凝土的静态轴心抗拉应力-应变曲线
Fig. 7 Static axial tensile stress-strain curves of various concretes^[11]

2.3 动态力学试验

2.3.1 常温下动态冲击压缩力学性能

图 8 为 C30 强度等级 CASC 和 SFCASC 的应力-应变曲线。由图 8 可见:随着应变率 $\dot{\epsilon}$ 的增加, CASC 表现出明显的应变率硬化效应;添加剑麻纤维后, CASC 的峰值应力有所下降,但韧性有所提高,且应变率越大,韧性提高越明显。

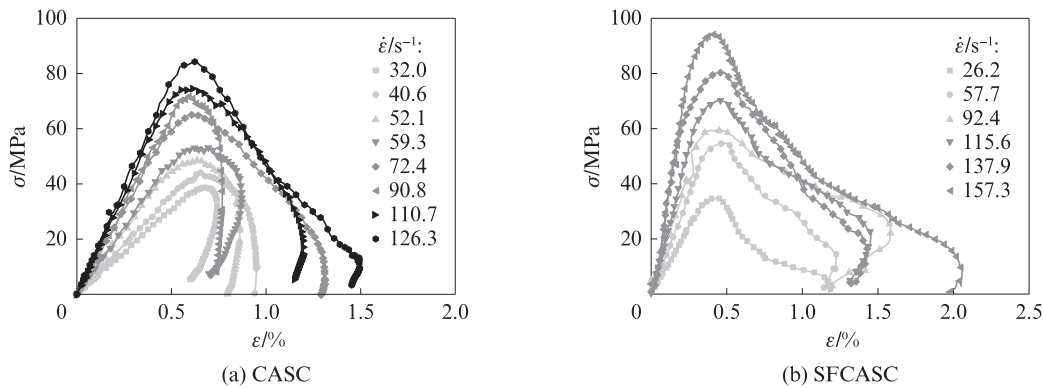


图 8 C30 强度等级 CASC 和 SFCASC 的应力-应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curves of C30 strength grade CASC and SFCASC^[10]

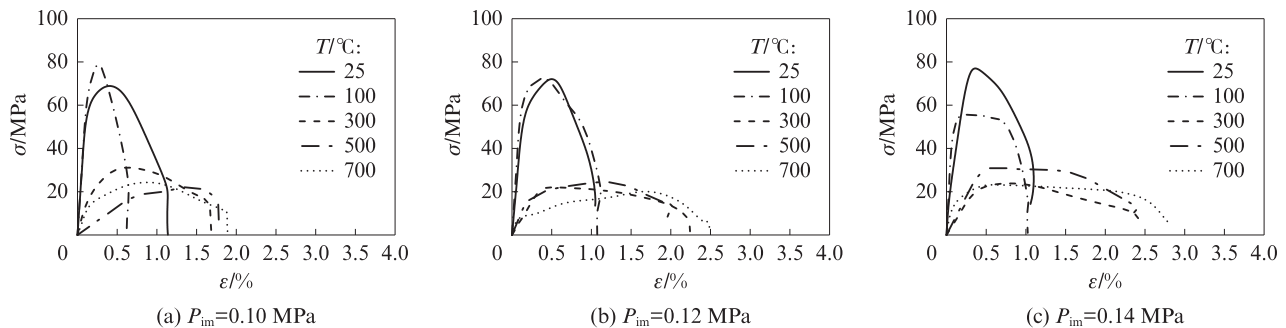


图 9 CASC 在不同冲击气压下的应力-应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of CASC at different impact air pressures of CASC

2.3.2 高温后动态冲击压缩力学性能

2.3.2.1 应力-应变曲线

图 9 为 CASC 在不同冲击气压 p_{im} 下的应力-应变曲线。由图 9 可见:当温度超过 300 °C 后,随着温度的升高, CASC 的峰值应力减小而峰值应变增大;当温度超过 300 °C 后,高温软化效应与应变率增强效应相比,前者占主导地位。

2.3.2.2 高温后峰值应力随应变率的发展规律

图 10 为高温后 CASC 动态峰值应力 σ_d 随应变率 $\dot{\epsilon}$ 的变化规律。由图 10 可见:随着高温温度的升高, CASC 的动态峰值应力的增长率随着应变率的增加而降低,即高温弱化效应越来越明显,表明在高温动态冲击试验中存在应变率和高温温度的耦合作用,且当温度超过 300 °C 后,高温弱化效应较显著。

2.3.3 动态冲击劈拉力学性能

图 11 为 C50 强度等级 CASC、SFCASC 和 OPC 的冲击劈拉强度 σ^T 对比。由图 11 可见:在相同应变率下, SFCASC 的冲击劈拉强度明显高于 CASC 与 OPC,说明剑麻纤维在高应变率冲击荷载作用下,仍能发挥其增强劈裂抗拉性能的作用,使得混凝土整体韧性提升;因 OPC 骨料强度和刚度均优于珊瑚,其劈拉强度高于 CASC; CASC 劈拉裂缝直接贯穿珊瑚

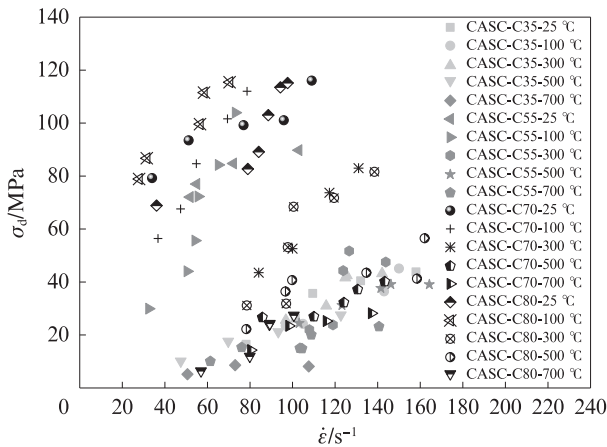
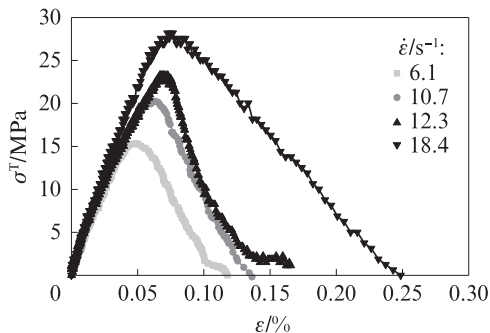


图10 高温后CASC动态峰值应力随应变率的变化
Fig. 10 Variation of dynamic peak stress with strain rate of CASC after high temperature^[2]

骨料,其冲击劈拉强度最小.

2.3.4 冲击拉伸力学性能

图12为CASC与SFCASC的冲击轴拉应力-应变曲线,纵坐标为冲击轴拉强度 σ^T .由图12可见:(1)CASC的冲击轴拉强度具有明显的应变率



(a) CASC

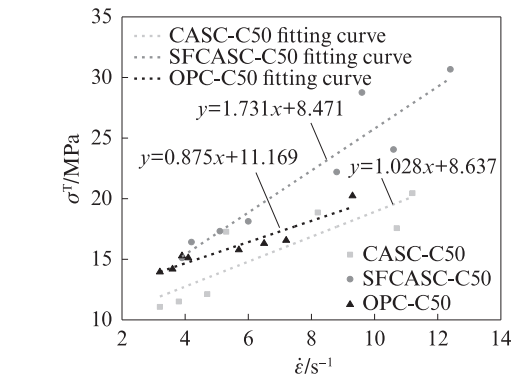
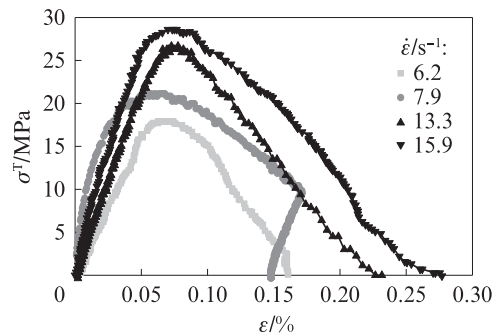


图11 C50强度等级CASC、SFCASC与OPC的冲击劈拉强度对比

Fig. 11 Comparison of the impact split strength of C50 strength grade CASC, SFCASC and OPC^[10]

效应,其峰值强度随着应变率的增大而增大;CASC的冲击轴拉与冲击压缩和冲击劈拉表现出相同的规律,但冲击轴拉强度对应变率的敏感度比冲击压缩高.(2)SFCASC在冲击轴拉下具有更强的韧性,证明剑麻纤维在混凝土中起到很好的约束作用.



(b) SFCASC

图12 CASC和SFCASC冲击轴拉应力-应变曲线

Fig. 12 Impact axis tensile stress-strain curves of CASC and SFCASC^[11]

2.4 侵彻试验

CASC侵彻试验中,子弹的总质量为(180.0±1.5)g,子弹速率基本保持在300m/s.通过高速摄影机确定弹丸在着靶前的弹姿为水平状态,弹丸仅对靶体侵彻面形成宏观破坏,破坏形态呈漏斗状,靶体侵彻背面和侧面无任何变化.不同强度等级的CASC靶体被侵彻后,弹坑直径及深度均随着混凝土强度等级的提高有所减小.

图13为CASC侵彻试验的高速摄影照片.由图13可见,当子弹接触CASC靶体时,靶体表面形成大面积破碎剥落,携带大块混凝土材料大量喷射而出.

2.5 爆炸试验

图14为C50强度等级CASC爆炸试验.CASC靶板尺寸为500mm×500mm×150mm,

内部配双层钢筋,钢筋直径为10mm、间距为150mm,保护层厚度为20mm;爆炸形式为接触性爆炸,炸药为8701型炸药,其直径为35mm、高为41mm,质量为67g,约100gTNT当量.由图14可见,爆炸后,CASC迎爆面上产生了不规则的爆坑,而背爆面形成若干以板中心向外扩散的径向裂纹.

混凝土强度等级对CASC靶板的爆坑直径有显著影响,随着强度等级的升高,弹坑直径减小;而强度等级对弹坑的深度影响较小.从背爆面的破坏破坏情况可以看出,高强CASC背爆面不仅会产生以板中心向外扩散的径向裂纹,还存在多条横裂纹,部分区域甚至出现层裂现象.由此说明珊瑚混凝土强度等级越高,脆性就越大,背爆面的破坏效果也越显著.

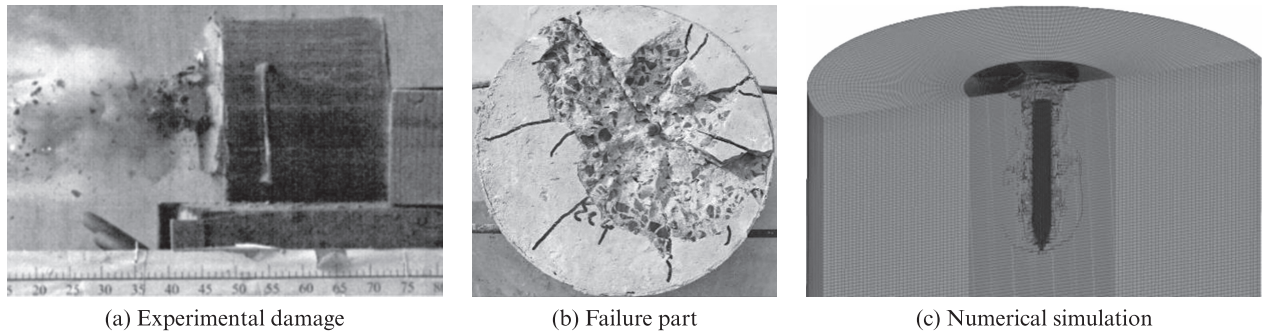


图 13 CASC 侵彻试验及模拟
Fig. 13 Penetration experiment and numerical simulation of CASC^[14]

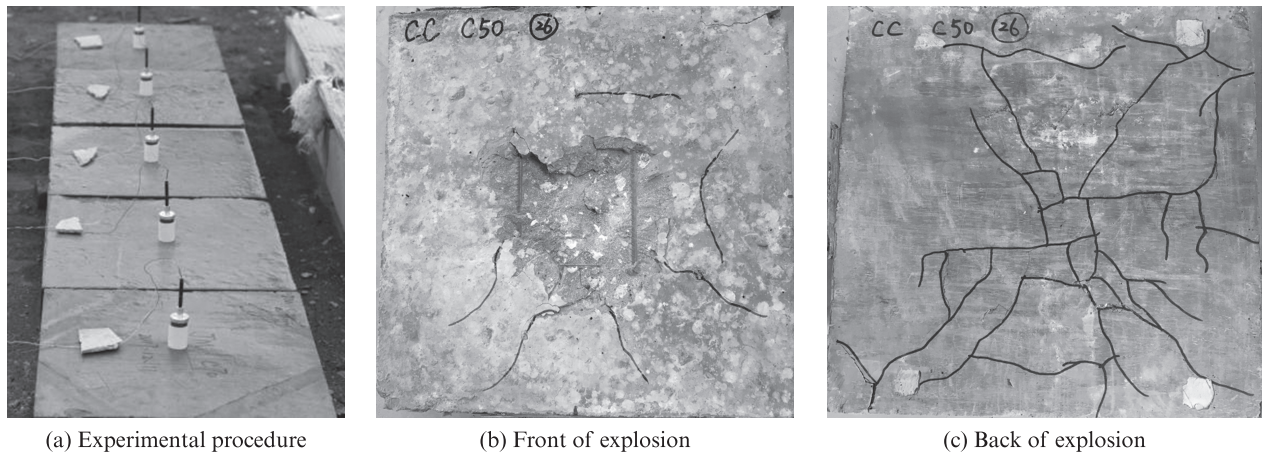


图 14 CASC 爆炸试验
Fig. 14 Explosion experiment of CASC^[16]

2.6 数值模拟研究

2.6.1 静态模拟

CASC 的细观建模方法可参考文献[17, 21]. 基于三维随机细观模拟方法, 对课题组研究的 CASC 准静态压缩性能进行数值模拟. 图 15 为 C30 强度等级 CASC 数值应力-应变曲线^[17], 其中 v 代表准静态应变速率, 控制在 $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. 由图 15 可见, 在单轴压缩荷载作用下, CASC 的应力-应变曲线大致可分为 4 个阶段——孔隙压实阶段、弹性阶段、屈服阶段

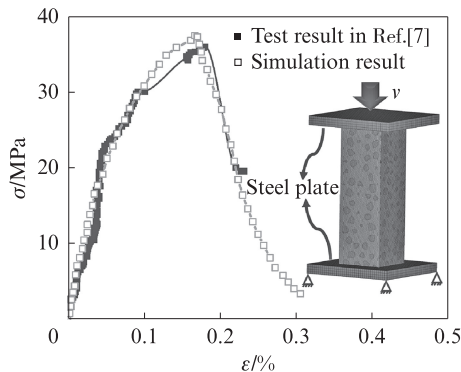


图 15 C30 强度等级 CASC 准静态压缩应力-应变曲线
Fig. 15 Quasi-static compression stress-strain curves of C30 strength grade CASC^[17]

和失效破坏阶段. 图 16 为 CASC 的准静态压缩破坏过程^[17]. 由图 16 可见: 当 CASC 完全发生破坏后, 内部出现大量斜向裂缝, 这些裂缝从试件顶面贯穿到试件底面, 使得 CASC 模型呈现典型的劈裂破坏模式, 与课题组的试验结果相同. 表明上述三维随机细观模型可以很好地模拟单轴压缩荷载作用下 CASC 的破坏形态.

2.6.2 动态模拟

针对 CASC 圆柱体试件进行冲击压缩试验, 采用细观模型模拟不同应变速率下 CASC 的破坏形态和破坏过程, 研究其动态应力-应变关系及应变速率效应. 图 17 为基于三维随机细观模拟方法, 得到的不同应变速率 ($1 \sim 200 \text{ s}^{-1}$) 压缩荷载作用下 CASC 的应力-应变曲线. 图 17 显示, 随着应变速率的增大, CASC 的峰值强度不断增大.

图 18 为不同应变速率下 CASC 的动态压缩破坏形态和破坏过程. 由图 18 可见: 在冲击压缩荷载作用下, CASC 圆柱体试件最终破坏形式为条状碎块崩裂; 随着应变速率的提高, CASC 的破坏程度逐渐加剧, 表现为裂缝数量和宽度增大, 碎块数量增多且体积减小, 各细观组分的开裂程度加剧.

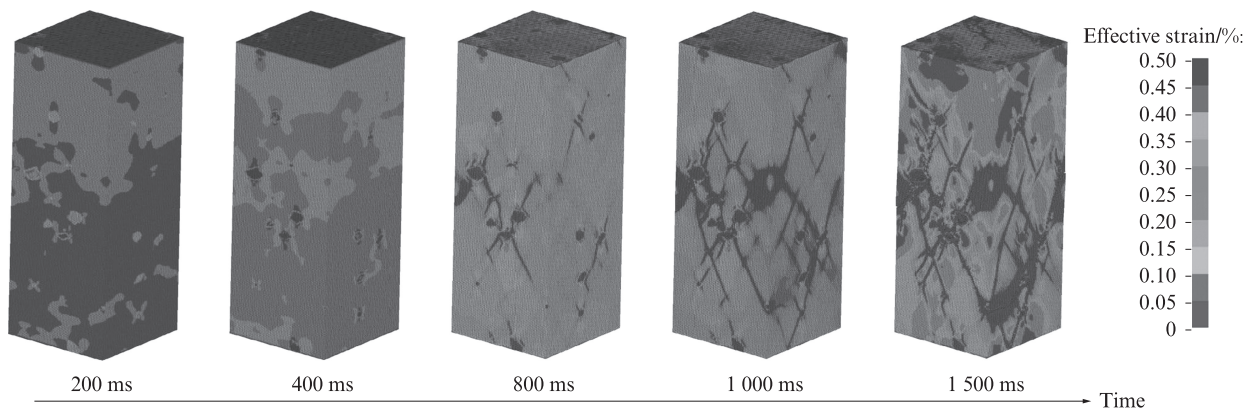


图16 CASC 准静态压缩破坏过程

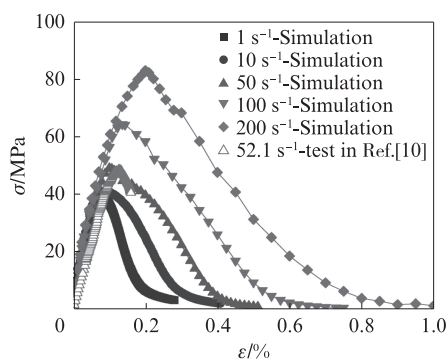
Fig. 16 Quasi-static compression damage process of CASC^[13]

图17 CASC 的动态压缩应力-应变曲线

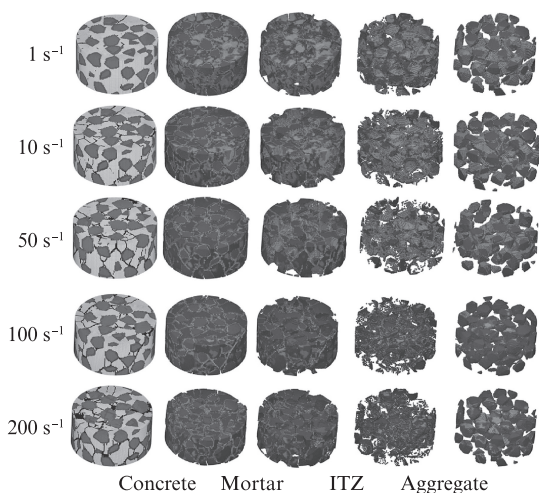
Fig. 17 Dynamic compression stress-strain curves of CASC^[17]

图18 不同应变率作用下CASC的压缩破坏形态

Fig. 18 Compression damage patterns of CASC under different strain rates^[17]

3 结论

(1) 得到不同强度等级全珊瑚海水混凝土(CASC)的应力-应变全曲线,其上升段斜直线线段较长,在应力达到峰值应力90%以上时出现拐点,呈现出明显脆性;添加剑麻纤维可有效增强CASC的韧性。

(2) 随着温度的升高,CASC的残余抗压强度和弹性模量均呈现先增后减趋势,温度越高,高温弱化越明显;CASC力学性能的临界温度是300℃,对于岛礁工程中防火防灾具有重要意义.建立了高温后的CASC应力-应变全曲线方程,可反映CASC在高温后受压后的全部特征。

(3) CASC在动态冲击压缩、动态冲击劈拉及动态直接拉伸试验中均表现出明显的应变率硬化效应,应变率越高,其应力越大.剑麻纤维的添加可以有效改善CASC的脆性,增加CASC的韧性,使其破坏程度明显降低。

(4) 随着混凝土强度等级的提升,CASC靶体侵彻深度和开坑面积不断减小,且伴随大量破碎剥落;爆炸弹坑直径减小,但弹坑深度变化较小。

(5) 建立了一种适合于CASC的具有随机形状和尺寸的三维随机骨料模型,并模拟了CASC在动静态作用下的破坏形态与破坏机理。

参考文献:

- [1] 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术、耐久性及其力学性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
DA Bo. Study on preparation technology, durability and mechanical properties of components of high strength whole coral seawater concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [2] 刘婷. 高温后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,2021.
LIU Ting. Study on static and dynamic mechanical properties of coral seawater concrete after high temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [3] 郭建博. 碱式硫酸镁水泥珊瑚混凝土的高温后静动态力学性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
GUO Jianbo. Study on static and dynamic mechanical properties of basic magnesium sulfate cement coral concrete after high

- temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [4] YUE C J, YU H F, MA H Y, et al. Uniaxial compression of sisal fiber reinforcing coral concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2020, 117(5):251-262.
- [5] 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[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(6):993-998. YU Hongfa, DA Bo, MA Haiyan, et al. Mechanical properties and durability of coral seawater concrete and its beam-column members [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(6):993-998. (in Chinese)
- [6] GUO J B, YU H F, MA H Y, et al. Damage and deterioration characteristics of basic magnesium sulfate cement coral aggregate concrete exposed to elevated temperature[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137:106275.
- [7] 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 study on full stress-strain curve of coral seawater concrete under uniaxial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(1):144-151. (in Chinese)
- [8] 苏晨, 麻海燕, 余红发, 等. 不同珊瑚骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11):1771-1780. SU Chen, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. Effects of different coral aggregates on mechanical properties of coral concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(11):1771-1780. (in Chinese)
- [9] 岳承军, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土冲击压缩性能试验研究与数值模拟[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2):283-290. YUE Chengjun, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Experimental study and numerical simulation on impact compression performance of coral seawater concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):283-290. (in Chinese)
- [10] 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. Experimental research and numerical simulation of high speed impact mechanical properties of coral concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [11] YUE C J, MA H Y, YU H F, et al. Experimental and three-dimensional mesoscopic simulation study on coral aggregate seawater concrete with dynamic direct tensile technology [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150:103776.
- [12] 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*, 2019, 137:103466.
- [13] 吴彰钰. 珊瑚混凝土材料本构关系与梁柱构件性能的若干细观力学问题[D]. 南京:南京航空航天大学, 2022. WU Zhangyu. Mesoscopic study on stress-strain relationship and beam-column structural performance of coral aggregate concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022. (in Chinese)
- [14] 夏成杰. 3D编织纤维增强BMSC砂浆与混凝土复合靶体的抗侵彻性能[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020. XIA Chengjie. Penetration resistance of 3D braided fiber reinforced BMSC mortar and concrete composite target [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [15] MEI Q Q, YU H F, MA H Y, et al. Experimental and numerical investigation on the penetration for basic magnesium sulfate cement [J]. *Materials*, 2023, 16 (11):4024.
- [16] 梅其泉. 强动载作用下珊瑚混凝土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, 2023. MEI Qiquan. Experimental study and numerical simulation of mechanical properties of coral aggregate concrete under extensive dynamic loads[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. (in Chinese)
- [17] 吴彰钰, 张锦华, 余红发, 等. 基于三维随机细观模型的珊瑚混凝土力学性能模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11):2518-2528. WU Zhangyu, ZHANG Jinhua, YU Hongfa, et al. Simulation of mechanical properties of coral concrete based on three-dimensional stochastic mesoscopic model [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11):2518-2528. (in Chinese)
- [18] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F et al. 3D mesoscopic investigation of the specimen aspect-ratio effect on the compressive behavior of coral aggregate concrete[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2020, 198:108025.
- [19] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Coupling effect of strain rate and specimen size on the compressive properties of coral aggregate concrete: A 3D mesoscopic study [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2020, 200:108299.
- [20] GUO J B, ZHANG J H, YU H F, et al. Experimental and 3D mesoscopic investigation of uniaxial compression performance on basic magnesium sulfate cement-coral aggregate concrete (BMSC-CAC) [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2022, 236:109760.
- [21] MA H Y, WU Z Y, YU H F, et al. Experimental and three-dimensional mesoscopic investigation of coral aggregate concrete under dynamic splitting-tensile loading [J]. *Materials and Structures*, 2020 53(1):12.
- [22] GUO J B, ZHANG J H, YU H F, et al. Dynamic compressive behaviour of basic magnesium sulfate cement-coral aggregate concrete(BMSC-CAC)after exposure to elevated temperatures: Experimental and analytical studies [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 382:131336.
- [23] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Experiment and mesoscopic modelling on the dynamic compressive behaviors of a new carbon fiber-reinforced cement-based composite [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130:104519.
- [24] 王振宇, 丁建彤, 郭玉顺. 结构轻集料混凝土的应力-应变曲线 [J]. *混凝土*, 2005(3):39-41 WANG Zhenyu, DING Jiantong, GUO Yushun. Stress-strain curves of structural lightweight aggregate concretes [J]. *Concrete*, 2005(3):39-41. (in Chinese)