第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210124

基于三维随机细观模型的珊瑚混凝土力学性能模拟

吴彰钰[1]，张锦华[2]，余红发[1]，麻海燕[1]，方 秦[3]

(1. 南京航空航天大学民航学院，南京 211100；2. 东南大学土木工程学院，南京 211189；
3. 陆军工程大学国防工程学院，南京 210007)

摘 要：为了研究珊瑚混凝土(CAC)的静、动态力学行为及损伤破坏机理，基于 CAC 的细观组成及结构特点，建立了包含珊瑚骨料、砂浆及二者之间界面过渡区(ITZ)的三相随机细观混凝土模型。根据破碎珊瑚骨料细观结构特征，提出采用三维随机多面体模型来表征其在形状和空间分布方面的随机特性的新思路。基于所建立的三维随机细观模型，结合 CONCRETE_DAMAGE_REL3 和 HOLMQUIST-JOHNSON-COOK 材料模型，利用 ANSYS 软件研究了静、动态荷载作用下 CAC 的力学响应，如应力–应变关系、细观破坏特征及破坏过程、应变率效应等，并分析了其细观破坏机理。结果表明：三维随机细观模型及相关材料模型参数在模拟 CAC 静、动态力学性能方面具有很高的可靠性，可以有效描述 CAC 的损伤破坏过程及形态，对于分析不同荷载作用下 CAC 失效机理具有重要意义。

关键词：珊瑚混凝土；三维细观模拟；随机凸多面体模型；静态力学性能；动态力学性能；应变率效应
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2518–11
网络出版时间：2021–10–11



Numerical Analysis on Mechanical Properties of Coral Aggregate Concrete Using 3D Random Mesoscale Model

WU Zhangyu[1], *ZHANG Jinhua*[2], *YU Hongfa*[1], *MA Haiyan*[1], *FANG Qin*[3]
(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. College of National Defence Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: To investigate the mechanical behavior and failure mechanism of coral aggregate concrete (CAC) under static and dynamic load, this paper proposed a 3D random mesoscale model composed of three mesoscale components, *i.e*., aggregate, mortar matrix and interfacial transition zone (ITZ). Using the 3D random convex particle model into the characterization of the random features of broken coral aggregates, *i.e*., shape and spatial distribution, was proposed. Based on the developed model and corresponding material models, *i.e*., CONCRETE_DAMAGE_REL3 and HOLMQUIST-JOHNSON-COOK, the static- and dynamic responses of CAC were analyzed in terms of stress-strain relation, failure pattern and process, strain rate effect, *etc*. The failure mechanism of CAC under different loading conditions was discussed as well. The results indicate that there is a high reliability for the developed 3D random mesoscale model in simulating the static- and dynamic properties of CAC, particularly in its failure patterns and fracture processes, which is of great significance for the failure mechanism analysis of CAC under various loading conditions.

Keywords: coral aggregate concrete; 3D mesoscale modelling; random convex particle model; static mechanical property; dynamic mechanical property; strain rate effect

收稿日期：2021–01–23。　修订日期：2021–03–24。
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(52078250，51878350)；国家自然科学基金重点资助项目(11832013)；国家自然科学基金青年基金资助项目(51508272)；江苏省研究生科研创新基金(KYCX20-0212)；南京航空航天大学研究生拔尖创新人才“引航计划”跨学科创新基金(KXKCXJJ202005)。
第一作者：吴彰钰(1994—)，男，博士研究生。
通信作者：张锦华(1981—)，男，博士，教授；
余红发(1964—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–01–23.　**Revised date:** 2021–03–24.
First author: WU Zhangyu(1994–), male, Doctoral candidate.
E-mail: wuzy@nuaa.edu.cn
Correspondent author: ZHANG Jinhua(1981–), male, Ph. D., Professor.
YU Hongfa(1964–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: zjh982038@163.com; yuhongfa@nuaa.edu.cn

南海岛礁远离大陆，砂石及淡水资源匮乏，很大程度地制约了南海岛礁工程的建设质量和施工进度。因此，采用珊瑚礁(砂)、海水或淡化海水、水泥和矿物掺合料等作为原材料所制备的珊瑚混凝土(CAC)，已逐步开始应用于包括岛礁防波堤和港池护坡等在内的基础设施工程及防护工程[1]。近年来，国内外学者从配合比设计[2]、制备技术[3]、基本力学性能[4]和耐久性[5]等角度出发，对 CAC 材料及结构开展了大量试验研究工作，取得了丰硕的研究成果。然而，除了常见的静载作用外，岛礁混凝土结构难免要经受诸如地震、海啸、冲击等动载作用的考验[6]。达波等[3–5]研究发现 CAC 具有类似于其他轻骨料混凝土的脆性大等力学性能缺陷，对于其与防护工程设施密切相关的抗冲击、爆炸和侵彻等动态力学行为存在一定的影响。因此，针对 CAC 力学性能提升的需求，需要对静、动态荷载作用下的 CAC 力学性能变化规律及其损伤破坏机理进行探究。

混凝土作为一种非匀质材料，在细观层面可以简化为由粗骨料、砂浆及二者之间的界面过渡区(ITZ)组成的三相复合材料[7–8]。随着计算机技术和数值模拟方法的快速发展，国内外学者发展不同的细观模拟方法对混凝土材料的力学行为及破坏机理进行数值研究[9–10]。例如，Wittmann 等[11]首次建立了用来表征混凝土骨料随机形态的随机多边形模型，并利用该模型对混凝土的单轴抗压强度及破坏形态进行了模拟。Zhou 等[12]采用细观模拟的方法研究了动态荷载作用下混凝土的劈裂抗拉行为及破坏机理，该研究中混凝土骨料被简化为大小随机的圆形颗粒。考虑到骨料体积对混凝土强度的影响，Wriggers 等[13]提出了一种能够有效提升骨料体积的骨料投放算法，将大小随机的球体颗粒随机投放在预先设定的三维空间内，最终建立了三维混凝土细观模型。通过试验和模拟结果的对比，发现该模型可以对混凝土失效断裂过程进行较好的描述。近年来，国内外学者逐步开始尝试建立包含随机骨料模型的三维混凝土细观模型，以此来探究不同荷载作用下混凝土力学响应及损伤破坏机理。例如，Jin 等[14–15]基于由尺寸随机的圆形和球体颗粒组成的 2D/3D 混凝土细观模型，开展了一系列静、动态荷载作用下混凝土力学性能的尺寸效应行为的数值模拟工作；Xu 等[16]基于一种高效的椭球体接触算法，实现了三维空间内椭球颗粒位置信息的定量表征，从而建立了胶凝复合材料的三维随机细观模型；为了解决以往混凝土细观模型中的骨料含量较低的问题(30%~35%)，Zhou 等[17]提出了一种基于三维凸多面体骨料的骨料“补充”算法，有效提升了混凝土细观模型中骨料投放效率。综上所述，从细观尺度研究混凝土力学性能和破坏规律，并构建其宏观力学性能与细观结构的内在联系，对于研究不同荷载条件下混凝土力学行为和损伤破坏机理具有重要意义。然而，目前有关 CAC 的细观力学模拟相关研究很少，尝试采用细观模拟的方法开展不同荷载作用下 CAC 力学行为及破坏模式的研究工作，对于研究 CAC 的力学响应及破坏机理提供了一种新的研究思路。

基于课题组已有的 CAC 静、动态试验数据[5,18]，采用 ANSYS 软件和自编 Fortran 程序，提出了一种可以表征破碎珊瑚骨料棱角尖锐、大小随机等细观特征的三维随机凸多面体骨料模型，并利用空间随机投放算法和映射网格划分算法，最终建立了随机混凝土细观模型；基于该细观模型，对 CAC 的静、动态力学行为进行了数值模拟，研究内容包括：应力–应变关系、破坏形态和过程、动态增长因子(DIF)等。通过数值结果和已有试验数据的对比分析，验证了使用该三维细观模型来研究 CAC 静、动态力学性能的可行性，对于探究不同荷载作用下 CAC 力学响应和损伤破坏机理具有重要意义。

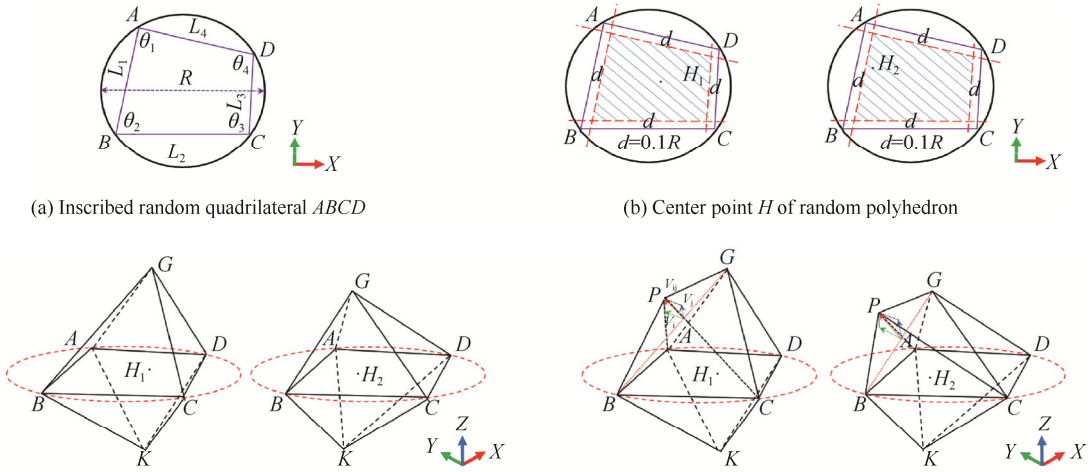
1　三维随机细观模型

1.1　随机骨料模型

混凝土中的粗、细骨料的总体积占混凝土体积的 60%~80%，其中粗集料约占 60%，构成混凝土的主要空间骨架结构，粗骨料的形状、尺寸、体积、强度等参数直接影响着混凝土的基本力学性能。常用的粗骨料根据形状主要分为碎石和卵石骨料，前者表面粗糙、棱角尖锐，是工程中常见的粗骨料材料。为了模拟混凝土中粗骨料的随机分布特征，国内外学者采用不同形状的几何模型对骨料进行数值模拟，从二维空间的圆形[12, 14–15]、椭圆形[19]和多边形[11]发展到三维空间球体[12]、椭球体[20]和随机多面体[16–17]，以及借助 X 射线、激光扫描等图像处理技术重构得到的具有真实形态的骨料模型[21–23]。同时，借助蒙特卡罗随机分布算法，根据预先确定的骨料级配曲线，将生成的骨料模型随机投放到混凝土模型中，就可以得到理想的混凝土细观模型。然而，上述骨料模型大多均属于规则几何模型，无法准确反映实际骨料的空间几何特征及混凝土的细观结构，在混凝土破坏形态模拟及破坏机理分析方面

也存在着很大的局限性。同时基于图像处理所得到的骨料模型在进行高应变率数值模拟时，难免会增大计算成本，降低计算效率。因此，在综合考虑计算精度和效率的前提下，本研究结合前期建立的随机细观模型算法[10]，基于自编 Fortran 和 APDL 程序，使用 ANSYS 软件建立一种具有随机形状和尺寸的三维随机颗粒模型，来模拟破碎珊瑚骨料的空间随机特征。随机颗粒的建模算法如下：

1) 确定随机四边形。根据骨料粒径 D，在 XOY 平面生成 1 个半径为 r=0.5D 的圆，再在圆内确定一个随机四边形 $ABCD$(见图 1a)；为避免生成的四边形出现尖角，要求其边长 L_i(i=1, 2, 3, 4)需满足：L_i＞0.25r；2) 确定随机多面体中心点。在生成的随机四边形 $ABCD$ 中确定 1 个随机点 H，要求点 H 到四边形 $ABCD$ 任一边的距离 d＞0.1r(见图 1b)，确定该点为拟生成随机多面体的中心点；3) 建立随机八面体。经过 H 点沿 Z 轴方向确定线段 GK，而点 G 和点 K 分别位于四边形 $ABCD$ 所在平面两侧，作为八面体 $ABCD$-GK 的上下顶点，见图 1c。此外，为了避免八面体中出现尖角，要求 GH 和 KH 的长度均在 0.5r ~ 1.5r 范围内；4) 生成随机凸多面体。在八面体 $ABCD$-GK 的最长边(设为 GB)上任取一点 G'，要求 0.2r＜$G'G$＜0.8r；根据 GB 所在的 2 个平面的外法线向量($\boldsymbol{V}_i$ 和 $\boldsymbol{V}_j$)，定义向量 $\boldsymbol{V}_{ij}$= $\boldsymbol{V}_i$ + $\boldsymbol{V}_j$；通过点 G'，沿着向量 $\boldsymbol{V}_{ij}$ 方向确定点 P 为多面体新顶点，要求 0.1r＜$G'P$＜0.5r；将点 P 与 A、B、C、G 依次连接，即得到随机十面体 $ABCD$-PGK，如图 1d 所示。



(a) Inscribed random quadrilateral $ABCD$

(b) Center point H of random polyhedron

(c) Random octahedron $ABCD$-GK

(d) Random polyhedron $ABCD$-PGK

图 1 随机多面体建模过程示意图[16]

Fig. 1 Modeling process of 3D random particles[16]

基于文献[10]提出的多面体凸性判定准则，对上述生成的空间随机凸多面体进行凸性判定；当满足凸性要求后，重复执行上述步骤(3)~(4)，直至获得更加真实的随机多面体。图 2 为生成的随机凸十八面体颗粒模型与破碎珊瑚骨料的对比图。由图 2 可知，三维随机多面体模型与实际珊瑚骨料在空间形状、表面轮廓等方面具有很高的相似度，说明所建立的随机多面体模型可以很好地模拟典型珊瑚骨料。因此，采用该三维随机骨料模型来模拟 CAC 中的珊瑚粗骨料是合理的。

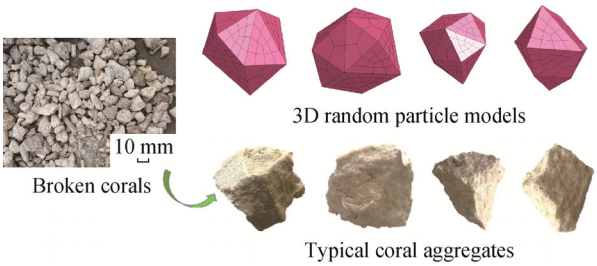


图 2 三维随机多面体模型与珊瑚骨料对比

Fig. 2 Comparison of 3D random particles and broken coral aggregates

1.2 骨料随机投放算法

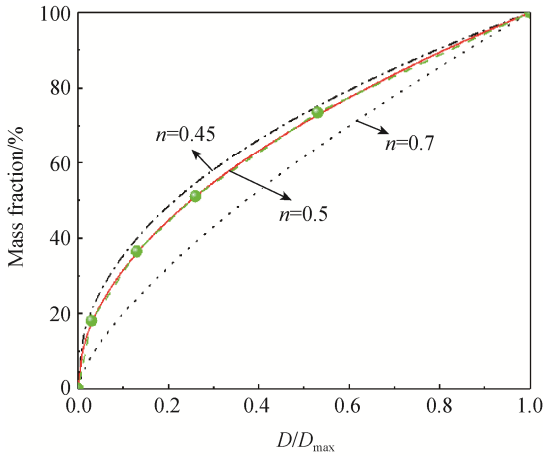
为了满足混凝土粗骨料的级配要求，一般采用 Fuller 级配曲线(式 1)来确定混凝土细观模型中随机多面体骨料的级配关系。

$$P(D)=100(D/D_{\max})^n \tag{1}$$

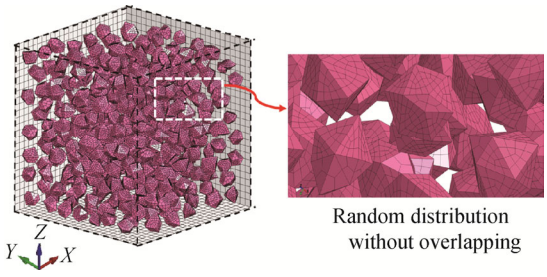
式中：$P(D)$表示粒径为骨料粒径小于 D 的累计百分比，%；$D_{\max}$ 为最大骨料粒径，mm；n 为指数常数，其中 0.45＜n＜0.70。为了获得粗骨料的最大密度理想级配，参照文献[10]中的骨料级配确定方法，选

取 n=0.5 时的级配曲线来确定 CAC 中珊瑚骨料含量，如图 3a 所示。

根据珊瑚骨料的级配曲线，确定所选粒径范围内不同粒径骨料的数量；基于随机多面体生成算法，建立目标骨料库；然后按照“Take & Place”随机投放准则[11]，从骨料库中按照“从大到小”的顺序选取骨料，并投放到预先设置的投放区域；骨料投放过程中，结合骨料交叉重叠和边界入侵判定准则，采用文献[10]中提出的空间“有限平移”和“随机投放算法”对骨料的空间位置进行调整，最终得到满足理想骨料体积分数的三维随机骨料模型。图 3b 为边长 100 mm 的立方体区域内骨料随机分布，骨料粒径范围 5~20 mm，体积分数为 42.3%。



(a) Fuller grading curves



(b) Random distribution of particle models

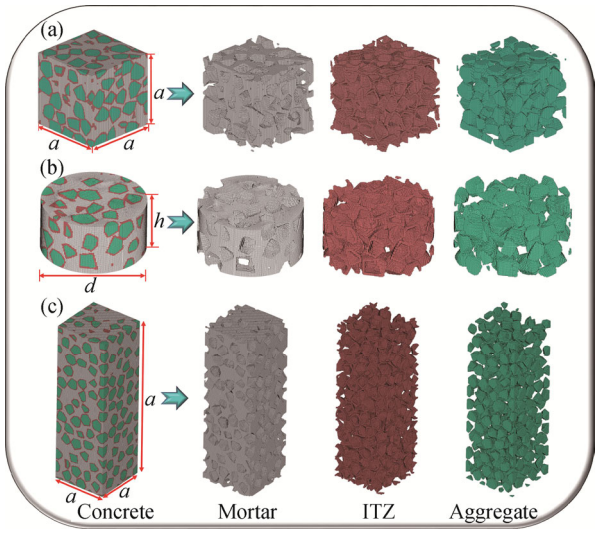
Note: The selected aggregate gradation curve in this work is shown as the green dot line in Fig. 3(a).

图 3　三维随机骨料模型空间随机分布示意图

Fig. 3　Random distribution of 3D random particles in cube specimen domain

1.3　有限元网格划分

为了从数值角度研究荷载作用下混凝土的应力–应变行为，需要在有限元模型的基础上赋予混凝土基本材料属性，进而开展数值模拟计算。然而，从细观层次来看，混凝土是一种由不同细观组分(骨料、砂浆和 ITZ)组成的非匀质材料，不同细观组分在混凝土中存在着高度的随机分布特性。因此，如何识别混凝土细观模型中不同细观组分，对于建立混凝土有限元模型、开展有限元计算具有重要意义。采用三维映射网格划分算法，首先对混凝土空间区域进行网格离散，获得均质网格；然后，将均质网格投影到已生成的随机骨料模型上，根据文献[10]提出的材料识别算法，分别确定骨料、砂浆和 ITZ 单元。此外，由文献[10]可知：细观有限元模型中单元特征尺寸(有限元网格)的取值范围应为最小骨料粒径的 1/4~1/8。根据文献[14–15]中常用的网格尺寸范围(1~2 mm)，初步选定单元尺寸为 1 mm 的空间八节点六面体单元对所用细观模型进行网格剖分。然而，由文献[14–15，17，24]可知，数值模拟结果(强度和破坏形态)对网格尺寸存在一定的依赖性。图 4a~图 4c 分别为立方体、圆柱体和棱柱体混凝土试件及细观组分的有限元模型。



(a) Cube sample model (b) Cylinder sample model (c) Prism sample model

图 4　混凝土有限元模型

Fig. 4　Finite element model

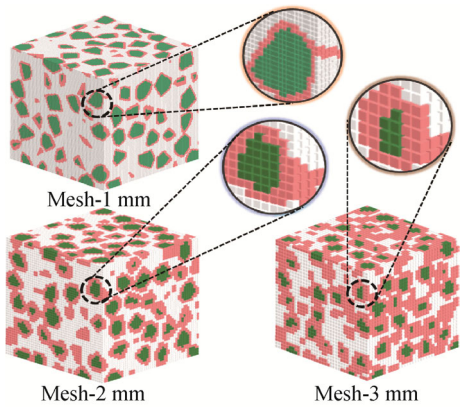
1.4　混凝土材料模型及参数

分别采用 CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_072R3) 材料模型和 HOLMQUIST-JOHNSON-COOK 材料模型(简称 HJC 模型)来描述砂浆/ ITZ 和珊瑚骨料的力学性能响应。MAT_072R3 模型是基于混凝土材料行为的宏观现象描述而建立的，将应力分为静水压力和偏应力两部分。其中，静水压力采用状态方程来描述，偏应力则由 3 个独立的剪切破坏面来定义，能够综合考虑材料的应变率效应、损伤效应和弹塑性行为。此外，通过输入混凝土密度 ρ、单轴抗压强度 f_c 和 Poisson 比 μ 等基本力学性能

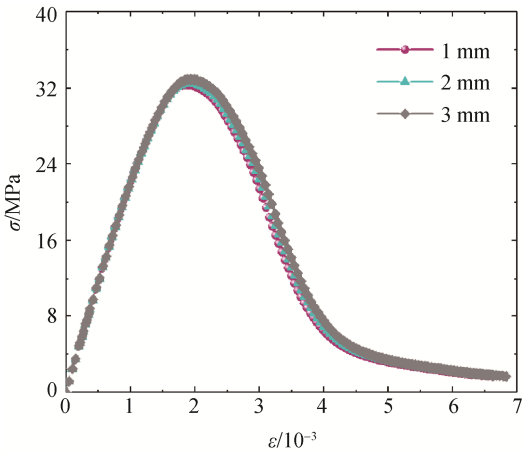
参数，MAT_072R3 模型能够完成模型参数的自动生成和检查。根据文献[25]中不同水胶比珊瑚砂浆的试验数据，可以得到强度等级为 C30 的 CAC 砂浆的材料模型参数为：ρ=2 350 kg/m^3，f_c =30.0 MPa，μ = 0.21。研究表明，ITZ 是一层附着在骨料表面、厚度为 20~50 μm 的疏松薄弱结构[26]，也是混凝土内部裂缝产生和扩展的主要区域，因此 ITZ 的断裂破坏是决定混凝土力学性能的重要因素之一。然而，受到 ITZ 尺寸、实验方法和技术等多方面原因的限制，很难通过宏观力学性能试验获取混凝土中 ITZ 的抗压、拉强度、弹性模量等基本力学性能指标。为了准确描述混凝土模型中 ITZ 材料行为，国内外学者一般将 ITZ 看作一层性能稳定的多孔弱化砂浆，且根据等效 ITZ 理论，假设 ITZ 抗压强度和弹性模量比砂浆低 20%~25%左右[12, 27]。因此，初步选取 ITZ 的材料模型参数为：ρ = 2 350 kg/m^3，f_c = 23.0 MPa，μ = 0.20，其可靠性将通过以下算例进行验证。通过大量试验验证，HJC 模型适用于描述冲击、爆炸等高应变率荷载作用下混凝土类材料的力学性能响应。因此，选用 HJC 模型来模拟静、动态荷载作用下珊瑚骨料的力学行为。根据文献[28–29]中的珊瑚骨料基本物理和力学性能试验结果，初步确定珊瑚骨料模型的 HJC 模型参数，见文献[30]。

1.5 模型验证

上述三维细观模型及材料模型参数在 CAC 力学行为模拟方面的可靠性验证，将从以下两方面进行：1) 有限元网格敏感性验证；2) 数值计算结果的可靠性验证。首先，采用不同网格尺寸(1/ 2/ 3 mm)的六面体单元对边长为 100 mm 的立方体细观模型进行网格划分，得到不同的有限元模型，如图 5a 所示。基于选定的 CAC 材料模型参数，对 CAC 进行了准静态单轴抗压性能模拟，得到不同 CAC 模型单轴抗压应力–应变曲线，如图 5b 所示。由图 5 可知，网格尺寸(1、2、3 mm)对 CAC 的峰值强度和应力–应变曲线的影响较小(图 5b)，但是相较于采用较粗网格(2/3 mm)的细观模型，选用小尺寸单元(1 mm)的细观模型的更加真实，这更有利于后续混凝土破坏形态的分析。综上可知，所用的 1 mm 网格是较为可靠的。其次，采用文献[31]中报道的 CAC 单轴压缩试验数据与所得数值结果进行对比分析。根据文献[31]中的粗骨料含量(约为 48%)，采用尺寸为 1 mm 的空间六面体单元对边长为 100 mm 的立方体模型进行有限元网格划分，共计得到 1 000 000 个实体单元，其中珊瑚骨料、ITZ 和砂浆单元分别为 443 044、162 589 和 394 367 个，所得的立方体有限元模型如图 6a 所示。在混凝土模型上、下表面建立 2 个对称的刚体模型(110 mm×110 mm×5 mm)，采用关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 来定义刚体和试件表面的接触效应，二者间静摩擦力设为 0.9。通过控制刚体的位移来实现混凝土模型的等位移加载，加载速率为 10^{-6} m/s。此外，为了描述混凝土的开裂破坏形态，采用关键字*MAT_ADD_EROSION 来计算荷载作用下混凝土的侵蚀失效单元。根据文献[24]确定砂浆(ITZ)和珊瑚骨料的失效准则分别为 0.15 和 0.12 倍的最大主应变，即当单元最大主应变超过预先设定的失效准则时，则判定单元发生失效破坏。



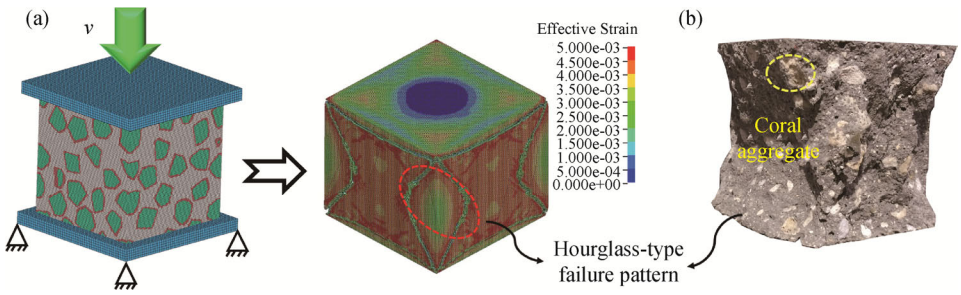
(a) Finite element model



(b) Uniaxial stress-strain (σ-ε)curves

图 5 网格尺寸对细观模型及数值模拟结果的影响

Fig. 5 Mesh-size sensitivity analysis on mesoscopic results

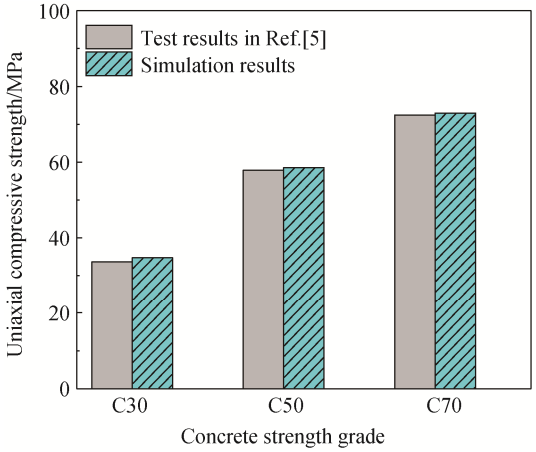


(a) Schematic diagram of numerical loading and numerical failure pattern　　(b) Typical failure pattern of CAC

图 6　单轴压缩荷载作用下 C30CAC 数值模拟和试验结果[31]

Fig. 6　Comparison of numerical and experimental results of C30CAC under uniaxial compression[31]

基于三维随机细观模型，并结合 CAC 细观模型参数，对强度等级为 C30 的 CAC 的静态单轴压缩力学行为进行数值模型，CAC 数值破坏形态如图 6a 所示。由图 6a 可见，单轴压缩荷载作用下的立方体模型呈现出典型的“沙漏”型破坏模式，即混凝土侧面出现对称的斜向主裂缝，将立方体试件分割成——核心完整，边缘破坏的“沙漏”形状。上述现象与图 6b 中 CAC 的实际破坏形态具有高度相似性，表明该细观模型可以有效模拟 CAC 破坏特征。图 7 为不同强度等级 CAC 的单轴静态抗压强度数值结果和试验结果对比图。由图 7 可知，通过细观数值模拟所得到的 CAC 抗压强度值与试验值误差在 3.5%范围内，说明上述细观模型及材料模型参数具有很高的可靠性。



The standard deviation (SD) of C30/ C50/ C70 CAC is 56.00%, 34.50% and 25.49%, respectively.

图 7　不同强度等级 CAC 抗压强度值[31]

Fig. 7　Compressive strengths of CAC with different strength grades[31]

2　CAC 准静态抗压力学性能

采用上述三维随机细观模型来研究 CAC 准静态抗压力学性能，包括应力–应变曲线、破坏形态和过程。采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱柱体模型，加载方式为等位移加载，加载速率为 3×10^{-6} m/s。CAC 强度等级为 C30。

2.1　准静态压缩应力应变曲线

达波等[4]采用等位移加载方法测定了强度等级为 C30 的 CAC 的准静态抗压力学行为，得到了 C30CAC 的准静态压缩应力应变曲线(图 8)；采用相同尺寸 CAC 棱柱体三维细观模型，基于上述三维随机细观模拟的方法，对其准静态压缩性能进行数值模拟，得到 C30CAC 的数值应力应变曲线，如图 8 所示。由图 8 可知，单轴压缩荷载作用下 CAC 的应力–应变曲线大致可分为 4 个阶段：1) 孔隙压实阶段：加载初期，珊瑚骨料和 CAC 内部的孔隙逐渐被压实，混凝土应力随应变呈现短暂的非线性增长；2) 弹性阶段：CAC 受压密实后，混凝土应变会随着应力的呈线性增长趋势，此时 CAC 基本处于弹性应变状态，可取该阶段的弹性模量作为 CAC 的初始弹性模量；3) 屈服阶段：当应力达到CAC峰值应力的70%左右时，混凝土内部很快出现大量微细裂缝，导致混凝土内部损伤加剧、发生塑性变形，应力–应变曲

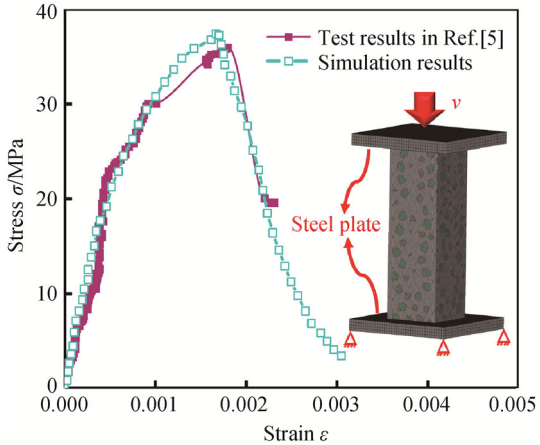


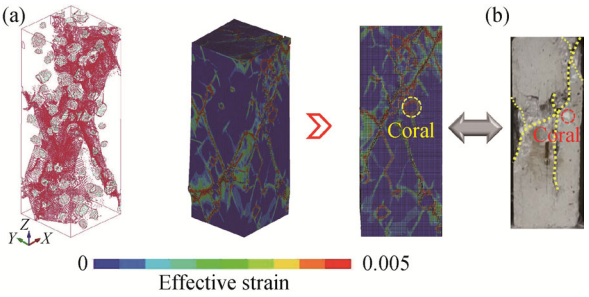
图 8　CAC 准静态压缩应力应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curves of CAC under quasi-static compressive load

线斜率降低，应力增长速率减慢；4) 失效破坏阶段：加载应力达到 CAC 峰值强度后，CAC 内部裂缝快速连通、贯穿试件，导致 CAC 应力在较小变形条件下出现急剧下降，直至试件发生劈裂破坏，表明单轴压缩荷载条件下 CAC 具有典型的脆性破坏特征。此外，由图 8 可以看出，无论是峰值应力/应变，还是曲线的变化趋势，CAC 数值应力-应变曲线和 Da 等[4]测得的试验曲线都具有很好的吻合度，进一步证明了上述三维细观模型及细观模型参数的可靠性。

2.2 细观破坏形态

图 9 为单轴压缩荷载作用下 CAC 棱柱体试件的破坏形态。由图 9a 可以看出，当 CAC 完全发生破坏后，内部会出现大量斜向裂缝，这些裂缝从试件顶面贯穿到距离试件底面，使得 CAC 模型呈现出典型的劈裂破坏模式，这与 Da 等[3]的试验结果相同(见图 9b)。从图 9a 还可观察到，CAC 模型侧面裂缝与竖向荷载(z 轴)方向夹角在 60°~75°范围内变化，这与文献[5]报道的试验结果(65°~75°)基本一致，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 CAC 的破坏形态。此外，从 CAC 模型内部断裂带位置可以发现，CAC 内部大多裂缝直接穿过了珊瑚骨料，导致骨料发生断裂破坏，这与很多试验中所描述的珊瑚骨料断裂破坏行为一致[5, 31]。造成上述现象的原因为：珊瑚骨料内部疏松多孔，使得其强度低于一般砂石骨料，易于发生断裂破坏；同时珊瑚骨料表面粗糙，其“吸水返水”特性使得珊瑚骨料与砂浆间的 ITZ 区域会发生二次水化，进而使得 CAC 的 ITZ 强度要高于普通混凝土 ITZ 强度，所以内部裂缝可能会趋向多孔的珊瑚骨料处扩展，最终导致珊瑚骨料易于发生断裂破坏[32]。



(a) Mesoscopic failure pattern (b) Actual failure pattern in Ref.[5]

图 9 棱柱体 CAC 准静态压缩破坏形态

Fig. 9 Failure patterns of prismatic CAC specimen

2.3 细观破坏过程

采用三维细观模型模拟 CAC 的细观破坏过程，不同时间点(200~1 500 ms)C30CAC 的细观形态如图 10 所示。从图 10 可以看出：在荷载作用初期(200~400 ms)，CAC 内部珊瑚骨料发生明显的应变集中现象，这与珊瑚骨料的早期压实行为相一致，对应着 CAC 应力应变曲线的孔隙压实阶段；随着应力进一步增加(800~1 000 ms)，CAC 内部经历了初生裂缝的出现、扩展和连通行为，混凝土侧面逐渐生成大量斜向裂缝，对应着 CAC 的弹性变形和塑性变形 2 个阶段；当 CAC 达到的极限抗压强度后(1 500 ms)，混凝土内部裂缝快速发展和贯穿，致使试件失去承载能力，此时裂缝宽度增大，使试件发生验证劈裂破坏。其中，大量珊瑚骨料在断裂面发生断裂破坏，属于 CAC 破坏的典型特征。

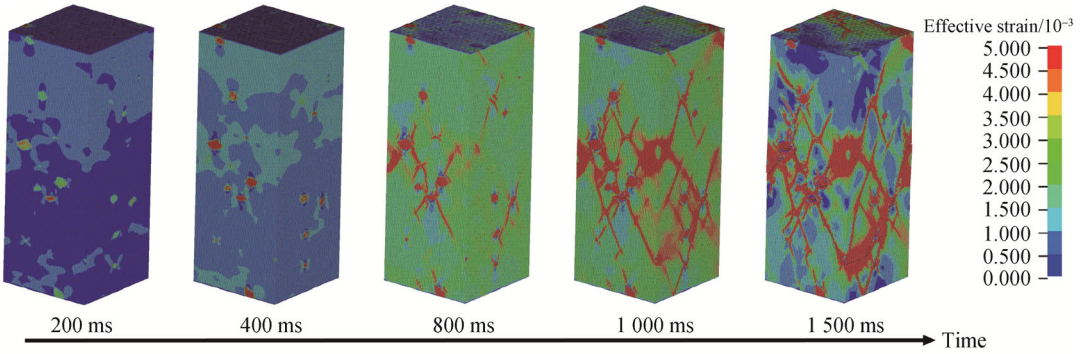


图 10 棱柱体 CAC 准静态压缩破坏过程

Fig. 10 Failure process of prismatic CAC specimen under quasi-static compression

3 珊瑚混凝土冲击压缩力学性能

针对 CAC 圆柱体试件冲击压缩试验，采用细观模型模拟不同应变率荷载下 CAC 的破坏形态和破坏过程，研究其动态应力应变关系及应变率效应。圆柱体尺寸为 ϕ70 mm×35 mm，应变率包括 1、10、50、100 s^{-1} 和 200 s^{-1}。

3.1 动态应力应变曲线

基于三维随机细观模拟方法，得到不同应变率(1~ 200 s^{-1})压缩荷载作用下 CAC 的应力应变曲线如

图 11 所示。由图 11 可以看出：1) 冲击压缩荷载作用下，CAC 的动态应力应变曲线可以分为初始弹性阶段、屈服阶段和失效破坏阶段 3 个部分。其中，初始弹性段的斜率随着应变率增大而逐渐增大，说明 CAC 的初始弹性模量得到提高；2) 随着应变率的提高，CAC 动态峰值应力和峰值应变均呈现增长趋势，说明冲击压缩荷载作用下 CAC 表现出和普通混凝土相似的应变率增强效应，这与文献[18，32]中 CAC 的动态试验结果相吻合；3) 随着应变率的提高，CAC 应力应变曲线下降段逐渐趋于平缓，表面试件在高应变率作用下破坏程度提高，这与文献[18，32]所报道的不同应变率作用下的普通混凝土数值结果和 CAC 试验结果相一致。

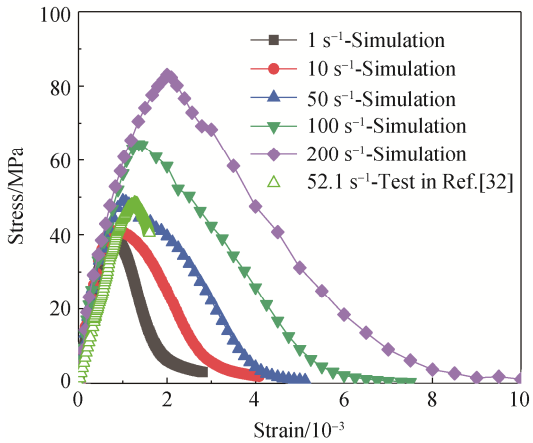


图 11　CAC 动态压缩应力应变曲线

Fig. 11　Stress-strain curves of CAC under dynamic compression

3.2　冲击压缩破坏形态

当应变率在 1 ~ 200 s^{-1} 范围内变化时，CAC 试件主体及各细观组分(骨料、砂浆和 ITZ)的冲击压缩破坏形态如图 12 所示。在冲击压缩荷载作用下，圆柱体 CAC 试件最终破坏形式为条状碎块崩裂，主要原因是动态加载过程中忽略了试件的端面约束效应，在 Poisson 比效应的影响下，试件表面会沿侧向产生自由位移，使得大量竖向和斜向裂缝沿着加载方向出现和扩展，最终导致试件发生断裂破坏。上述现象与文献[18，32]中报道的 CAC 实际破坏模式较为吻合，进一步证明了该细观模型在模拟 CAC 动态力学行为方面的合理性。随着应变率的提高，可以发现 CAC 的破坏程度也在逐渐加剧，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。此外，由图 12 可见，试件边缘的开裂破坏程度较试件中心更加严重。主要原因是：在侧向惯性效应的影响下，试件中心处于三向受压状态，其承载能力得到提升；但是在径向拉应力的作用下，试件边缘处混凝土会很快达到极限承载状态，因此其开裂现象更加明显。考虑到珊瑚骨料低强、多孔的特点，高速冲击荷载作用下 CAC 内部也出现了类似静态荷载作用时出现的珊瑚骨料损伤破坏行为，这与文献[18]的试验结果相一致。

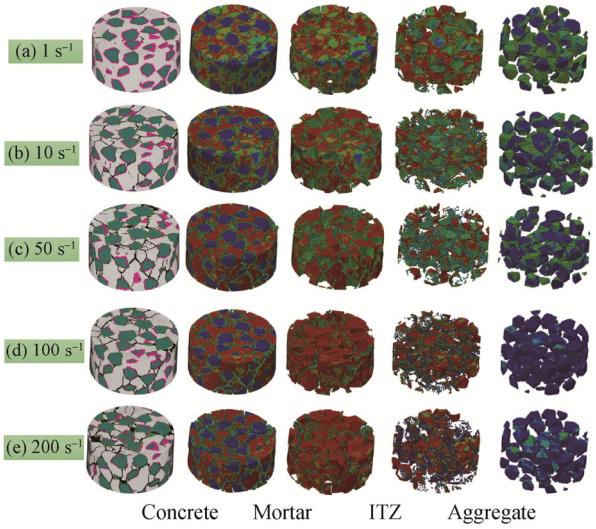


图 12　不同应变率作用下 CAC 压缩破坏形态

Fig. 12　Dynamic compressive failure patterns of CAC at different strain rates

3.3　冲击压缩破坏过程

当应变率为 1 s^{-1} 和 100 s^{-1} 时，CAC 的破坏过程如图 13 所示。同时，为了研究不同时间点混凝土破坏形态和应力之间的关系，分别在 CAC 应力-应变曲线上取 4 个不同的特征点(*A*、*B*、*C* 和 *D*)来对 CAC 失效过程进行分析。其中，*A* 点位于屈服阶段，*B* 点为峰值应力点，*C* 点和 *D* 点位于失效破坏阶段。由图 13 可知，CAC 的砂浆和 ITZ 区域在 *A* 点时已经出现了很多微细裂缝，说明此时试件内部裂纹快速发展，损伤逐渐积累；随着应力进一步增大，试件内部的微细裂缝彼此连通，导致试件表面裂缝宽度增大，直至达到试件峰值应力(*B* 点)，试件出现明显开裂破坏现象；在 CAC 失效破坏阶段(*B* 点以后)，试件应力逐渐下降、变形持续增大，表现为试件表面裂缝数量和宽度不断增加，最终导致试件发生断裂破坏(*C* 和 *D* 点)。另一方面值得注意的是，对于同一试件，当应变率从 1 s^{-1} 提高到 100 s^{-1} 时，试件的破坏程度大大加剧，而且试件完全破坏的时间(300 μs)也缩短了 1 个数量级。表明 CAC 的破坏速度和破坏程度均具有明显的应变率增强效应，对于如何提升高应变率荷载作用下 CAC 的防护能力提出了新的要求。

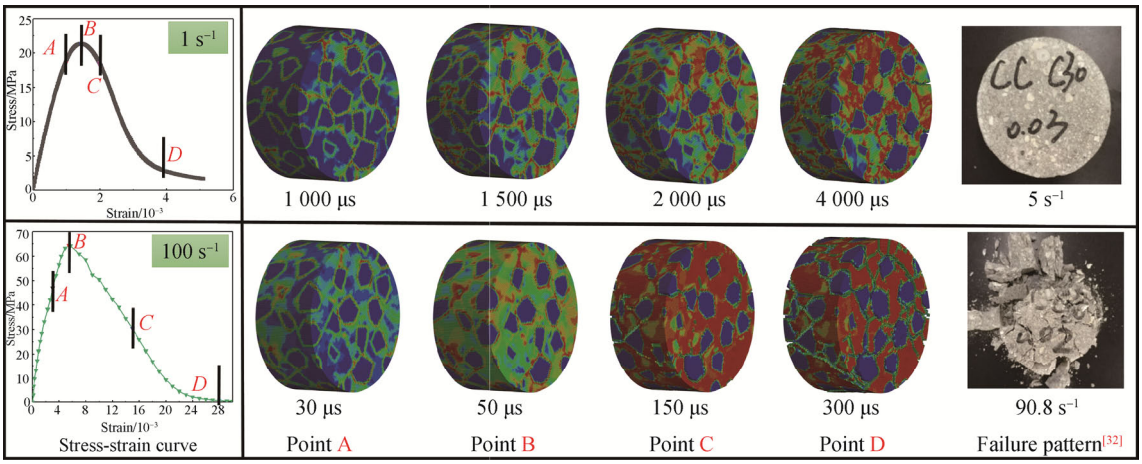


图 13 不同应变率时 CAC 动态压缩破坏过程

Fig. 13 Dynamic compressive failure process of CAC under different strain rates

3.4 应变率效应

为了研究混凝土的应变率效应，国内外学者统一采用动态增长因子(DIF)来描述动态荷载作用下混凝土强度变化规律及其与应变率的关系。根据 CAC 的静、动态应力应变曲线，计算得到 CAC 静、动态抗压强度细观模拟结果，见表 1。由表 1 可知，CAC 的抗压强度和 DIF 值均随着应变率的提高而增大，表明冲击荷载作用下 CAC 的强度存在明显的应变率增强效应。为了进一步探究 CAC 的 DIF 随应变率的发展规律，将表 1 中 C30CAC 的 DIF 值，与文献中不同强度等级普通混凝土和 CAC 的 DIF 试验值进行对比研究，如图 14 所示。由图 14 可知，随着应变率的提升，CAC 和普通混凝土的 DIF 值均在不断增大。其中，当应变率低于临界应变率 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 时，DIF 随应变率增长速度较慢；而当应变率超过 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 时，DIF 则会快速增长。欧洲混凝土委员会(CEB)推荐的普通混凝土的 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 为 30 s^{-1}，而 CAC 的 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 在 20 ~ 30 s^{-1} 范围内。同时，通过对比相同应变率范围(10 ~ 200 s^{-1})内 CAC 的 DIF 变化规律，发现 CAC 的 DIF 模拟值和试验值变化趋势相同，且数值较为吻合，这与之前二者的强度对比分析结果相一致。此外，不同强度等级 CAC 的 DIF 值也存在一定差异：在相同应变率条件下，不同强度等级 CAC 的 DIF 值按从大到小排序为：C30CAC、C50CAC 和 C70CAC。说明随着混凝土强度等级的降低，CAC 的 DIF 值呈现增长的趋势，这与文献[18，32]所得到的试验结论相一致。

表 1 不同应变率下 C30 CAC 的数值抗压强度

Table 1 Compressive strengths of C30 CAC at different strain rates

Strain rate/ s^{-1}	Peak stress/ MPa	DIF
10^{-5}	37.41	1.00
1	39.28	1.05
10	41.15	1.10
50	49.38	1.32
100	64.72	1.73
200	83.42	2.23

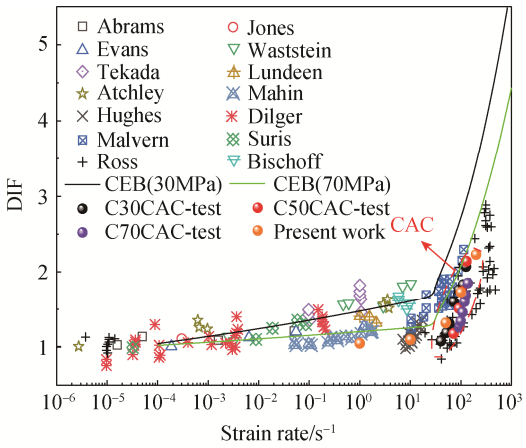


图 14 CAC 和普通混凝土 DIF 与应变率关系[31]

Fig. 14 Relationship between strain-rate and dynamic increase factor(DIF) for CAC and OPC[31]

4 结论

1) 准静态单轴压缩荷载作用下 CAC 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、屈服阶段和失效破坏阶段。同时发现，CAC 数值应力–应变曲线和试验曲线都具有很好的吻合度，证明了三维细观模型及细观模型参数的可靠性；

2) 当 CAC 完全发生破坏后，内部会出现大量斜向裂缝，这些裂缝从试件顶面贯穿到距离试件底面，使得 CAC 模型呈现出典型的劈裂破坏模式；CAC 模型侧面裂缝与竖向荷载(z 轴)方向夹角在 60°~75°范围内变化。

3) 冲击压缩荷载作用下，CAC 的动态应力应变曲线可以分为初始弹性阶段、屈服阶段和失效破坏阶段 3 个部分；初始弹性段的斜率随着应变率增大而逐渐增大，说明 CAC 的初始弹性模量得到提高；随着应变率的提高，CAC 动态峰值应力和峰值应变均呈现增长趋势，而 CAC 应力应变曲线下降段逐渐趋于平缓，表面试件在高应变率作用下破坏程度增大。

4) CAC 的抗压强度和 DIF 值均随着应变率的提高而增大，表明冲击荷载作用下 CAC 的强度存在明显的应变率增强效应；在相同应变率条件下，不同强度等级 CAC 的 DIF 值按从大到小排序为：C30CAC、C50CAC 和 C70CAC。说明随着混凝土强度等级的降低，CAC 的 DIF 值呈现增长的趋势。

参考文献:

[1] LYU B, WANG A, ZHANG Z, et al. Coral aggregate concrete: Numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate[J]. Cem Concr Compos, 2019, 100: 25–34.

[2] 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术、耐久性及构件力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学，2017.
DA Bo. Research on the preparation technology, durability and mechanical properties of concrete members of high strength coral aggregate seawater concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[3] DA B, YU H, MA H, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 122: 81–89.

[4] 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 J Chin Ceram Soc, 2016, 44(2): 253–260 .

[5] WU Z, YU H, MA H, et al. Rebar corrosion in coral aggregate concrete: Determination of chloride threshold by LPR[J]. Corros Sci, 2020, 163: 108238.

[6] FANG Q, ZHANG J. 3D numerical modeling of projectile penetration into rock-rubble overlays accounting for random distribution of rock-rubble[J]. Int J Impact Eng, 2014, 63: 118–128.

[7] 方秦, 张锦华, 还毅, 等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 14–30.
FANG Qin, ZHANG Jinhua, HUAN Yi, et al. Eng Mech (in Chinese), 2013, 30(1): 14–30.

[8] 刘清风. 基于多离子传输的混凝土细微观尺度多相数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1074–1080.
LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1074–1080.

[9] ZHANG C, CHEN W, MU S, et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 285: 122806.

[10] MAO L, HU Z, XIA J, et al. Multi-phase modelling of electrochemical rehabilitation for ASR and chloride affected concrete composites[J]. Compos Struct, 2019, 207: 176–189.

[11] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Mater Sci Eng, 1984, 68: 239–248.

[12] ZHOU X, HAO H. Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates[J]. Comput Struct, 2008, 86: 2013–2026.

[13] WRIGGERS P, MOFTAH S O. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour[J]. Finite Element Anal Des, 2006, 42: 623–636.

[14] JIN L, YU W, DU X, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates[J]. Int J Impact Eng, 2019, 125: 1–12.

[15] JIN L, YU W, DU X, et al. Mesoscopic numerical simulation of dynamic size effect on the splitting-tensile strength of concrete[J]. Eng Fract Mech, 2019, 209: 317–332.

[16] XU W, CHEN H. Mesostructural characterization of particulate composites via a contact detection algorithm of ellipsoidal particles[J]. Powder Technol, 2012, 221: 296–305.

[17] ZHOU R, SONG Z, LU Y. 3D mesoscale finite element modelling of concrete[J]. Comput Struct, 2017, 192: 96–113.

[18] MA H, YUE C, YU H, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete[J]. Int J Impact Eng, 2020, 137: 103466.

[19] ZHANG Z, SONG X, LIU Y, et al. Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm[J]. Compos Sci Technol, 2017, 149: 235–245.

[20] HAFNER S, ECKARDT S, LUTHER T, et al. Mesoscale modelling of concrete: Geometry and numerics[J]. Comput Struct, 2006, 84: 450–461.

[21] LI S, LI Q. Method of meshing ITZ structure in 3D meso-level finite element analysis for concrete[J]. Finite Elem Anal Des, 2015, 93: 96–106.

[22] ZHU Z, CHEN H, XU W, et al. Parking simulation of three-dimensional multi-sized star-shaped particles[J]. Model Simu. Mater Sci Eng, 2014, 22: 035008.

[23] GARBOCZI E J, BULLARD J W. Contact function, uniform-thickness shell volume, and convexity measure for 3D star-shaped random particles[J]. Powder Technol, 2013, 237: 191–201

[24] WU Z, ZHANG J, YU H, et al. 3D mesoscopic investigation of the specimen aspect-ratio effect on the compressive behavior of coral aggregate concrete[J]. Composites Part B, 2020, 198: 108025.

[25] LORMAN W R. Characteristics of coral mortars[R]. U. S. Naval Civil

Engineering Laboratory. Port Hueneme, California, NCEL, 1960–7–19.

[26] GARBOCZI, E J, BENTZ, D P. Advances in cementitious materials[J]. Ceram Trans, 1991, 16: 365–380.

[27] LU Y, SONG Z, TU Z. Analysis of dynamic response of concrete using a mesoscale model incorporating 3D effects[J]. Int J Prot Struct, 2010, 1(2): 197–217.

[28] 金昱昕, 陈天然, 孟庆山, 等. 单轴抗压强度揭示南海珊瑚骨骼结构的差异[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(2): 33–39.
JIN Yuxin, CHEN Tianran, MENG Qingshan, et al. J Trop Oceanogr (in Chinese), 2017, 36(2): 33–39.

[29] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2221–2226.
WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Chin J Rocks Mech Eng(in Chinese), 2008, 27(11): 2221–2226.

[30] 吴彰钰, 余红发, 麻海燕, 等. C45 珊瑚混凝土的冲击压缩性能试验及数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 488–495.
WU Zhangyu, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Southeast Univ : Nat Sci Ed(in Chinese), 2020, 50(3): 488–495.

[31] WU Z, ZHANG J, YU H, et al. Experimental and mesoscopic investigation on the dynamic properties of coral aggregate concrete in compression[J]. Sci China Technol Sci, 2021, 64: 1153–1166.

[32] 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 dynamic and static mechanical properties of coral aggregate seawater concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.