

# 动态响应下海水海洋骨料混凝土受压应力-应变本构关系研究

徐金俊<sup>1,2</sup>, 赵旭凌<sup>1</sup>, 唐月月<sup>1</sup>, 刘涛<sup>3</sup>, 陈林<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 工程结构综合防护国际研究中心, 江苏 南京 211816;  
3. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为了构建海水海洋骨料混凝土在高应变率下的受压应力-应变本构关系, 以海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土为研究对象, 采用大直径霍普金森压杆试验装置开展了两类混凝土动态力学性能的测试, 并通过静态力学性能试验得到各自混凝土动态力学性能比较的参考基准。基于静动态受压性能试验结果, 获取了海水海洋骨料混凝土破坏模式与特征、应力-应变关系曲线、峰值应力和峰值应变、受压强度的动态放大系数(DIF), 并深入分析应变率和混凝土类型对单一性能指标的影响。研究表明: 海水海砂碎石骨料混凝土的破坏面在于碎石与水泥浆体的界面区, 而海水海砂珊瑚骨料混凝土的破坏表现为珊瑚的剪切断裂; 海水海洋骨料混凝土的静动态受压过程相似, 其应力-应变关系曲线基本经历了弹性阶段、塑性发展阶段以及全塑性破坏阶段; 应变率效应对提高海水海洋骨料混凝土动态受压力学性能具有显著影响, 其中珊瑚作为粗骨料比碎石粗骨料具有更高的应变率敏感性。通过数值回归分析, 构建了以应变率为自变量的海水海洋骨料混凝土受压强度 DIF 预测模型。以《混凝土结构设计规范》提供的分段式数学方程为基础, 采用数值反演法建立了海水海洋骨料混凝土静动态应力-应变统一本构方程。

**关键词:** 混凝土; 海水海砂; 珊瑚骨料; 动态力学性能; 本构关系

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0207-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.022

## 引言

当前, 中国经济已发展成为高度依赖海洋的外向型经济, 对海洋资源、空间的依赖程度大幅提高, 在管辖海域外的海洋权益也需不断加以维护和拓展, 这些都需要通过建设海洋强国加以保障<sup>[1]</sup>。在这一建设活动中, 沿海、近海及深海基础设施的建造与维护是确保海洋生命线工程正常运营的关键, 就地利用海洋资源也成为部分或全部解决海上建筑材料依赖于内陆的状况, 对降低建设成本、节约陆地自然资源十分有利。迄今为止, 工程建设材料消耗体量最大的仍为混凝土, 海洋工程结构也概莫能外。传统混凝土主要采用淡水、河砂、天然粗骨料、水泥等进行拌合制备, 而海洋混凝土完全可基于海水、海砂、珊瑚等丰富的海上资源进行生产制造, 但这并不意味着相同配合比的海洋混凝土与传统混凝土的力学性能就能等同。为探究这一基础问题, 众多学者对此开展了大量的试验研究用以揭示其基本力学性

能与海洋拌合料(海水、海洋骨料等)之间的关系<sup>[2-6]</sup>。

实际上, 海洋结构物所面临的服役环境远比位于内陆区域的工程结构复杂, 这不仅涉及耐久性的问题, 还有外部动力荷载的持续考验, 如海浪拍打、海上气流引起的激振、海底地震、海啸、船舶撞击等。因此, 采用传统静态力学计算理论对海洋混凝土结构承载能力极限状态进行设计存在严重的科学性不足的问题, 而材料的力学性能对结构的受力性能起着决定性作用。显然, 理解海洋混凝土动态力学性能是实现其结构安全设计的内在核心。吴彰钰等<sup>[7]</sup>、岳承军等<sup>[8-9]</sup>、吴家文等<sup>[10]</sup>、Ma等<sup>[11]</sup>针对全珊瑚混凝土开展了冲击压缩性能研究, 结果显示珊瑚混凝土受压强度的动态放大系数(dynamic increasing factor, DIF)比同条件下的普通混凝土要大。易金等<sup>[12]</sup>、王磊等<sup>[13]</sup>分别采用聚丙烯纤维和碳纤维增强珊瑚混凝土的动态受力性能, 发现纤维掺量不易过多, 否则增强效果有所降低。杨成林等<sup>[14]</sup>通过研究得到: 与普通混凝土相同, 海水海砂混凝土同样具有

收稿日期: 2021-08-29; 修订日期: 2021-10-04

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2018YFC0705701); 八桂学者专项经费资助项目([2019]79号)。

应变率效应,甚至表现得更加明显,过峰值后应力-应变曲线下落更为陡峭。

就现阶段而言,多数学者聚焦于单一类型的海洋骨料混凝土力学性能及其本构关系的研究,而针对采用骨料类型较为全面的海水海洋骨料混凝土在动态响应下的受压性能研究成果并不多见,但往往拌合海水和多种海洋骨料于海工及港工混凝土才是就地取材的最大初衷。为此,本文采用直径为 155 mm 的大型分离式霍普金森杆压杆(SHPB)试验装置对两类海水海洋骨料混凝土(分别为海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土)受压性能开展系统的试验研究,获取其在不同动态响应下的力学性能,并建立其应力-应变本构关系。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

试验设计选取海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土为研究对象,相应地可从细、粗骨料两个维度考虑海砂和珊瑚对混凝土动态力学性能的影响。本次试验所用原材料包括:(1)P.II52.5 普通硅酸盐水泥;(2)粗骨料:天然碎石和珊瑚;(3)细骨料:海砂;(4)拌合用水:人工海水。所用珊瑚骨料和

海砂均来自河北某海岛。粗、细骨料的实物照片如图 1 所示,相应的级配曲线如图 2 所示,物理性能如表 1 所示。人工海水依据美国规范 ASTM D1141—2013<sup>[15]</sup> 配制而成,相应的化学成分如表 2 所示。此外,考虑到珊瑚骨料的孔隙特性,测试了其筒压强度,经三组取样测得筒压强度的平均值为 1.34 MPa。

### 1.2 配合比及试件设计

考虑到粗骨料的品质是影响混凝土强度指标的关键因素,而海水海砂与淡水河砂在影响混凝土目标强度等级时并不突出,因此海水海砂碎石骨料混凝土的配合比设计参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)<sup>[16]</sup>。此外,国内外现阶段尚无珊瑚骨料混凝土配合比设计方面的标准,而考虑到珊瑚骨料的性质类似于轻骨料,因而参照《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)<sup>[17]</sup> 进行海水海砂珊瑚骨料混凝土配合比设计。从面向应用的角度出发,海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土分别适用于强度等级较高和较低的海洋混凝土结构,故相应的目标强度等级分别设计为 C30-C40 和 C20-C30。经实验室多次试配,最后得到两类海水海洋骨料混凝土目标强度等级的配合比设计方案,其中对珊瑚骨料混凝土配合比的设计,相应地考虑

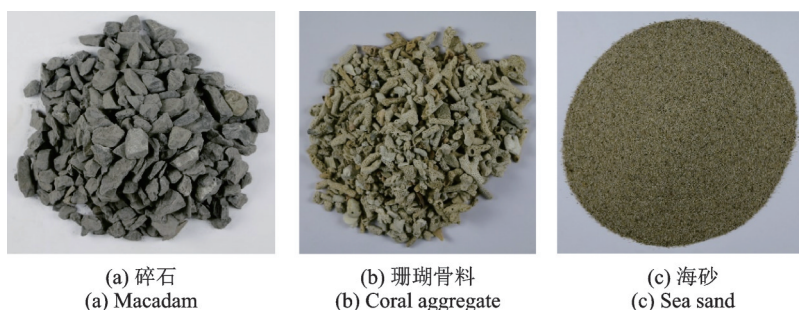


图 1 粗、细骨料照片

Fig. 1 Photos of coarse and fine aggregates

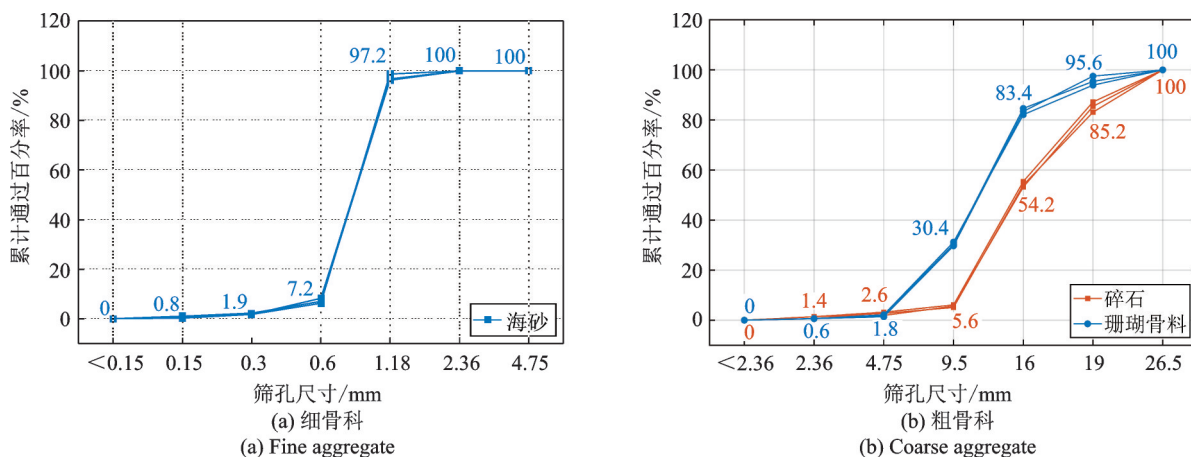


图 2 骨料的级配曲线

Fig. 2 Aggregate grading curves

表 1 原材料的物理性能指标

Tab. 1 Physical properties of raw materials

| 材料 | 表观密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 堆积密度 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |        | 空隙率 /% | 细度模数 | 压碎<br>指标 /% | 吸水率 /% | 含水率 /% |
|----|--|---|--------|--------|------|-------------|--------|--------|
|    |  | 松散                                      | 紧密     |        |      |             |        |        |
| 海砂 | 2682.5                                     | 1522.2                                  | 1648.5 | 38.55  | 2.88 | -           | 3.70   | 0.13   |
| 碎石 | 2750.7                                     | 1463.3                                  | 1625.9 | 40.89  | -    | 12.4        | 0.95   | 0.39   |
| 珊瑚 | 2474.1                                     | 750.5                                   | 853.4  | 65.51  | -    | 37.7        | 10.89  | 0.65   |

表 2 人工海水组成成分及含量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )Tab. 2 Composition and content of artificial seawater/  
( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

| $w(\text{NaCl})$ | $w(\text{KCl})$ | $w(\text{MgCl}_2)$ | $w(\text{CaCl}_2)$ | $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ | $w(\text{NaHCO}_3)$ |
|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| 23.7             | 0.7             | 5.2                | 1.1                | 4                           | 0.2                 |

表 3 混凝土配合比/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Tab. 3 Mix proportion of concrete

| 混凝土类型  | 配合比/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |     |      |     | 水灰比  | 砂率   |
|--------|---------------------------------------|-----|------|-----|------|------|
|        | 水泥                                    | 细骨料 | 粗骨料  | 拌合水 |      |      |
| SSMC30 | 380                                   | 660 | 1200 | 214 | 0.56 | 0.36 |
| SSMC40 | 380                                   | 660 | 1200 | 190 | 0.50 | 0.36 |
| SSCC20 | 500                                   | 730 | 500  | 280 | 0.56 | 0.59 |
| SSCC30 | 700                                   | 690 | 500  | 322 | 0.46 | 0.58 |

了珊瑚骨料吸水能力强的这一特点,如表 3 所示,其中 SSMC 和 SSCC 分别表示海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土,其后数值表示混凝土强度等级值,如“30”代表混凝土强度等级为 C30。在配制混凝土前,对所有骨料进行清洗处理,以便去除骨料本身携带的氯离子,保证试验变量的可靠性;之后,将骨料置于露天暴晒,去除水分。

为适用于 SHPB 杆件直径(155 mm),将所有试件首先设计成直径为 150 mm、高为 300 mm 的标准圆柱体试样,之后根据高应变率受压试验的要求在标准圆柱体试样的基础上切割成直径为 150 mm、高为 75 mm 的试样块(非标准圆柱体试样)。此外,为考察海水海洋骨料混凝土动态力学效应,尚需设计静态受压试验的试件进行对比研究,此类试验的试件采用标准圆柱体试样。试件设计时,针对每一类型的海水海洋骨料混凝土需重复静态受压试验 3 组,累计 12 个标准圆柱体试件;高应变率受压试验考虑三种应变率(实际对应为三种冲击气压:0.3, 0.6, 0.9 MPa),每一应变率下的一类海水海洋骨料混凝土重复试验 5 组,累计 60 个非标准圆柱体试块。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 静态受压试验

静态受压试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[18]</sup>对标准圆柱体试

样进行静力单轴压缩试验。考虑到标准混凝土圆柱体浇筑时其开口端面与闭口端面存在不平整性,加载前需将试件的开口端面用高强石膏进行找平,其平整过程借助玻璃平板和水平尺的不断调节以达到上下端面齐平的效果。采用中国科学院武汉岩土力学研究所研发的“岩石与混凝土力学试验机 RMT-301”进行静力受压加载试验,该设备可实现位移控制的加载模式,相应的加载设备如图 3 所示。本次试验采用加载速率为 0.02 mm/s 的位移控制加载模式进行单调加载。



图 3 试件静力受压试验机

Fig. 3 Static compression testing machine for specimens

#### 1.3.2 动态受压试验

采用直径为 155 mm 的 SHPB 试验装置对非标准圆柱体试样块进行高应变率动态响应下的受压性能试验,该试验装置的示意图如图 4 所示。此类大直径 SHPB 试验装置能最大程度地消除骨料和试件所带来的尺寸效应。试验中,入射杆所具有的冲击能量是由子弹提供的,而子弹撞击速度的稳定性是入射杆能量值稳定的重要保障。本试验装置中,子弹撞入射杆的速度通过光电法测量得到,即在入射杆和子弹之间有两个固定间距( $\Delta l=500$  mm)的光源,测速仪测量子弹通过两个光源的时间( $\Delta t$ ),便可测得子弹的撞击速度( $v=\Delta l/\Delta t$ )。正式加载前,通过调整冲击气压获取不同的子弹速度,并将两者相对应的数值进行回归,得到冲击气压与子弹速度的预测模型,如图 5 所示。由图 5 可见,预测模型的相关系数  $R^2$  为 0.995,表明不同冲击气压下子弹的速度

具有良好的稳定性。

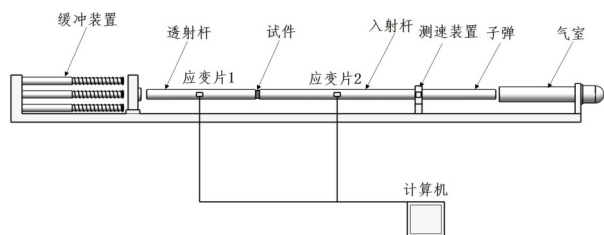


图 4 SHPB 试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SHPB test setup

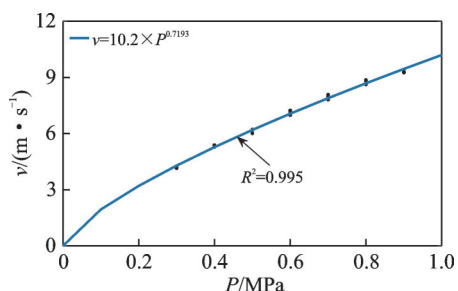


图 5 冲击气压与子弹速度的数学关系

Fig. 5 Mathematic relationship between shock pressure and bullet speed

SHPB 试验开始前,先将入射杆与透射杆对齐,使两个杆件处在同一径向线上;为减小应力波的弥散效应,将直径为 35 mm、厚度为 3 mm 的 T2 紫铜片作为波形整形元器件粘贴于入射杆前端面,如图 6 所示;为减小试块与入射杆、透射杆接触面之间的端部摩擦效应,将试样块的两个端面均匀涂抹一层凡士林后将其夹于入射杆与透射杆之间。完成上述操作后打开数据采集系统,设定冲击气压,达到目标气压后发射子弹。试验过程中的应力波通过粘贴于入射杆和透射杆上的应变片采集得到。图 7 为典型试件的原始波形图和三波对齐图,其中  $\epsilon_i$  为入射波;  $\epsilon_r$  为反射波;  $\epsilon_t$  为透射波。由图可见,虽然局部依然存在震荡,但经波形整形器处理的波形图震荡较小且整体较为平滑。

基于弹性杆一维应力波假定和试件应力-应变沿其长度方向均匀分布的均匀性假定,试件的动态



图 6 入射杆前端的铜片

Fig. 6 Copper sheet at the front of the incident bar

应力、动态应变以及应变率可通过入射杆和透射杆上的应变片测得入射波、反射波、透射波等数据推算得到<sup>[19]</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 静态受压试件的破坏及模式

海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土的破坏模式相似,均为劈裂破坏。所有试件在加载初期无肉眼可见的裂缝,随着荷载的增大,试件出现纵向微裂纹并伴有轻微撕裂的声音,继续加载裂纹稳定发展直至破坏,试件的最终破坏形态如图 8 所示。由图 8 可见,海水海砂碎石骨料混凝土的破坏面均绕开骨料而出现在骨料与水泥浆体的界面区,海水海砂珊瑚骨料混凝土的破坏面直接贯穿珊瑚骨料。这表明海水海洋骨料混凝土在强度等级不高的情况下,碎石骨料与水泥砂浆的界面区是此类骨料混凝土的薄弱区,而珊瑚骨料本身强度不高,粗糙多孔的特性决定了该种混凝土的破坏常常发生在骨料本身。

### 2.2 动态受压试件的破坏及模式

由于五组重复试验的破坏形态相似,故同类强度等级、同一冲击气压的同种海水海洋骨料混凝土取一个试块的破坏形态予以展示,相应的破坏形态如图 9 所示。由图 9 可见,海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土试样块的破碎程度均随冲击气压的增加而增大。试块经 0.3 MPa 气压加载后还存在较大的块状碎混凝土,而经 0.9 MPa 气压加载后混凝土试块被撞击成尺寸更小、破碎更均匀的碎块,同时伴有粉末状破碎物的产生。

对比两类海水海洋骨料混凝土的破坏形态发现,在相同冲击气压下,不同类型的混凝土破坏形貌虽有相似但其破坏情况有所侧重:海水海砂碎石骨料混凝土的破碎主要呈块体状,而海水海砂珊瑚骨料混凝土的破碎为偏条状,其中海水海砂碎石骨料混凝土的碎块主要为碎石块,破坏主要发生在水泥砂浆与碎石骨料的界面,而海水海砂珊瑚骨料混凝土的破碎直接贯穿珊瑚本身,这些破坏特征与静态受压试验下的破坏较为一致。

### 2.3 静态及动态受压应力-应变关系曲线

图 10 为海水海洋骨料混凝土静态受压应力-应变关系的试验曲线。由图可见,对于每种类型的混凝土,加载初期的受压应力-应变关系曲线基本重合,随着荷载的增加曲线之间产生一定的分离,表明

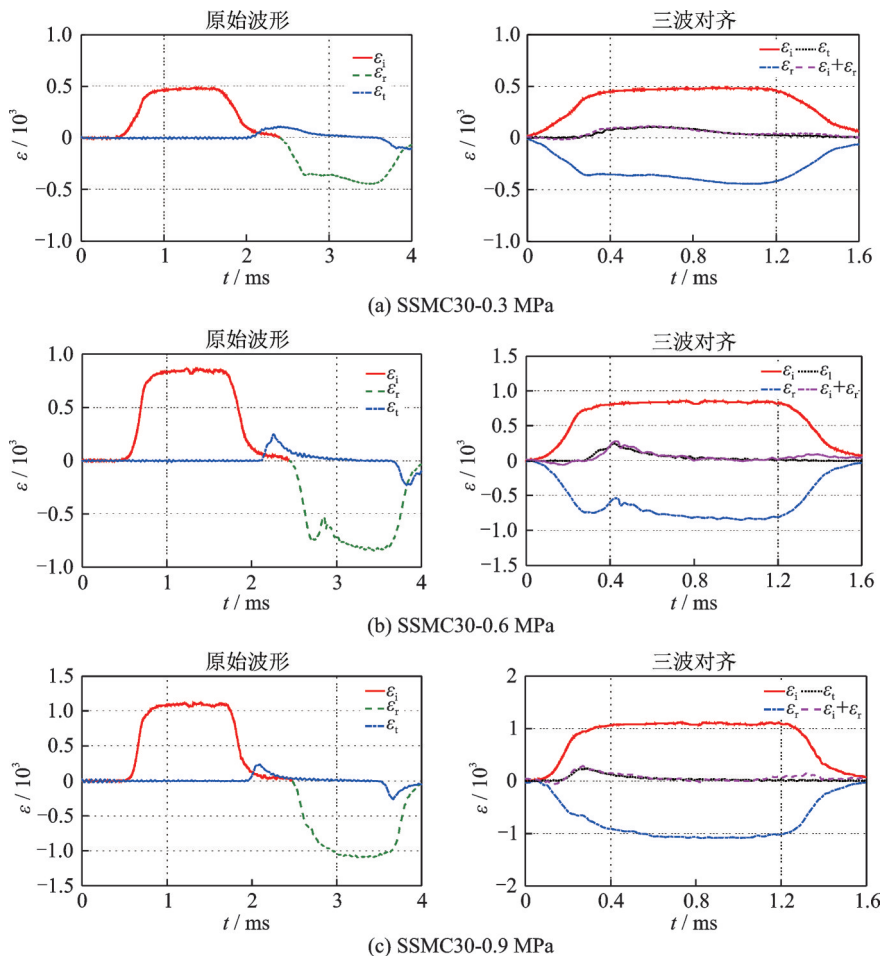


图 7 典型试件的波形整形结果

Fig. 7 Wave-shaping results of typical specimens



(a) SSMC30 (b) SSMC40 (c) SSCC20 (d) SSCC30

图 8 静态受压后试件的破坏形态

Fig. 8 Failure mode of test specimens after static compression

随着应力水平的提高,海水海洋骨料混凝土作为多相复合材料其内部结构分布不均匀性在宏观力学性

能方面得以体现,但这类离散程度尚小且总体较为接近。对比曲线形状可知,海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土具有相似的受力过程,分为上升段和下降段,基本经历了弹性阶段、塑性发展阶段以及全塑性破坏阶段。在破坏阶段(也即负刚度阶段),海水海砂珊瑚骨料混凝土出现断崖式下降,而海水海砂碎石骨料混凝土的下降过程相对缓慢,表明前者的脆性比后者的大,其原因在于:海水海砂珊瑚骨料混凝土的破坏多为珊瑚的剪切断裂,这类断裂呈现出快速发展的特点;而海水海砂碎石骨料混凝土的内部破坏集中在碎石与水泥砂浆的

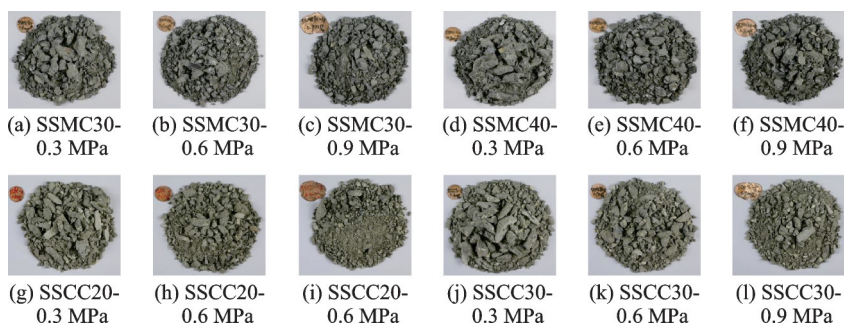


图 9 动态受压后试件的破坏形态

Fig. 9 Failure mode of test specimens after dynamic compression

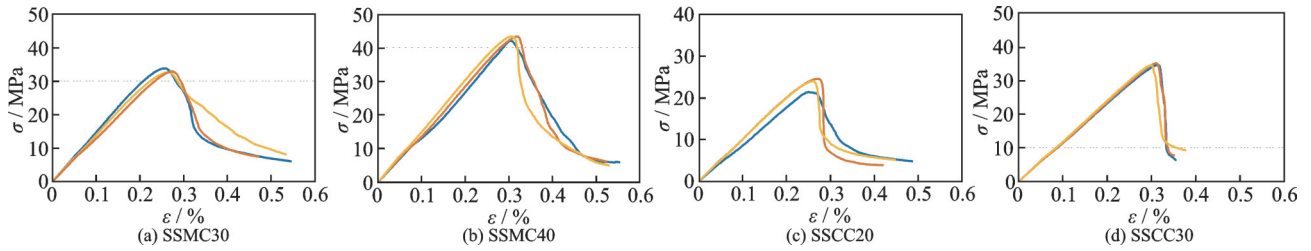


图10 静态受压应力-应变关系曲线

Fig. 10 Stress-strain curves under static compression

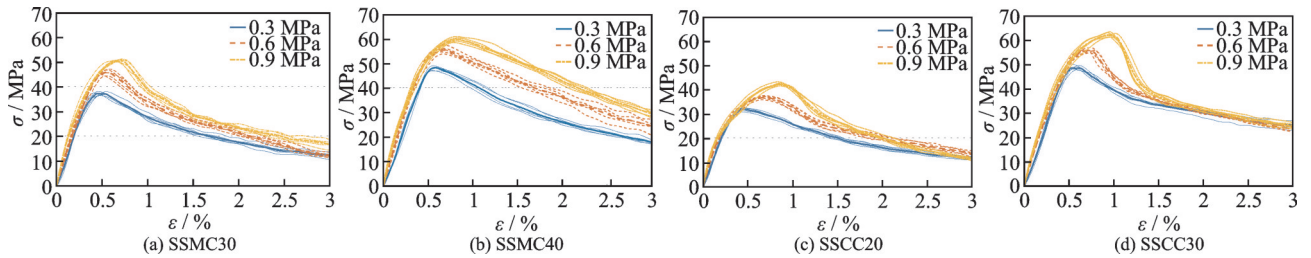


图11 动态受压应力-应变关系曲线

Fig. 11 Stress-strain curves under dynamic compression

交界面,内在裂缝沿碎石的不规则表面曲折发展,导致这些裂缝的相互贯通具有迟缓现象。

图11为海水海洋骨料混凝土动态受压应力-应变本构关系的试验曲线。由图可见,类似于静态受压的本构曲线,动态受压的海水海洋骨料混凝土应力-应变关系曲线也具有上升段和下降段的力学特性。对于同一强度等级同种海水海洋骨料混凝土,五组重复试验结果基本趋于稳定,整体离散性较小。应变率高的海水海洋骨料混凝土受压应力-应变关系曲线围络了应变率低的同类混凝土本构曲线。具体地,动态响应下海水海洋骨料混凝土的弹性模量、峰值压应力、峰值压应变、下降段残余压应力均随应变率的增加而增大。相比于碎石骨料混凝土,压应变超过2.5%以后,珊瑚骨料混凝土的残余应力对

应变率不甚敏感,究其原因在于珊瑚本身的压碎指标就比碎石小,在应力幅下降后,珊瑚骨料不成形(即压碎)的成分/比例较大,冲击波在珊瑚骨料内部的传输不连续成分也变得更大,导致不同应变率下其残余应力并不受到应变率的影响。

混凝土强度等级对海水海洋骨料混凝土受压峰值应力和峰值应变的影响如图12所示。由图可见,强度等级较高的海水海洋骨料混凝土峰值应力和峰值应变均比强度等级较低的大。特别地,随着动态响应的应变率提高,即便海水海砂珊瑚骨料混凝土的强度等级较低,其峰值应变比强度等级略高的海水海砂碎石骨料混凝土要大,这是由于珊瑚骨料内部多孔洞,导致其在压应力场作用下内部孔隙压紧致密而发生较大的变形。

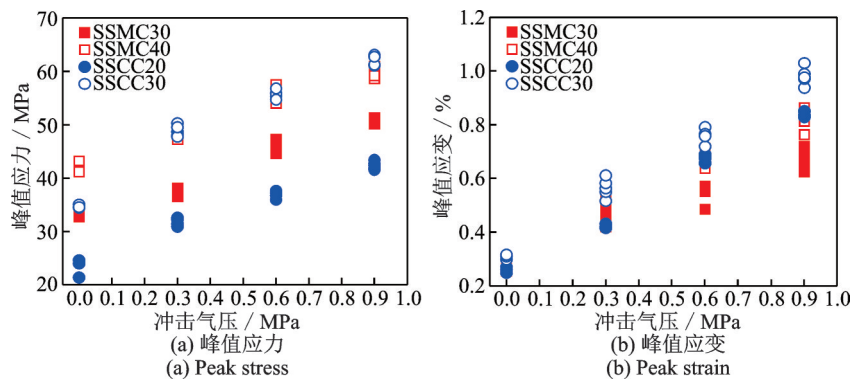


图12 混凝土强度等级对峰值应力及其应变的影响

Fig. 12 Influence of concrete strength class on peak stress and peak strain

#### 2.4 受压强度的动态放大系数(DIF)

图12(a)为海水海洋骨料混凝土动态受压强度

与应变率(以冲击气压表示)之间的关系。由图可见,海水海洋骨料混凝土动态受压强度随应变率的

增加而增大,这是由于应变率越大混凝土吸收的能量越多,大量能量聚集于混凝土内部使得其处于高应力状态。为便于比较,引入受压强度的动态放大系数(DIF)用以表征混凝土强度的应变率效应<sup>[19]</sup>,其数学含义为动态受压强度与静态受压强度的比值,相应的计算式为:

$$DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} \quad (1)$$

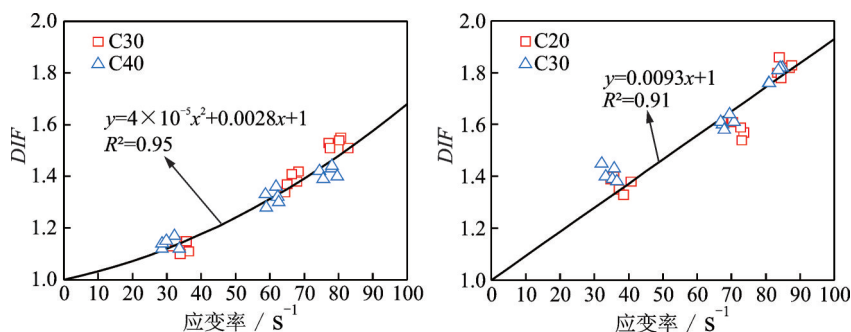


图 13 应变率对 DIF 的影响

Fig. 13 Influence of strain rate on DIF

为了建立海水海洋骨料混凝土 DIF 与应变率之间的关系,将两者的试验结果进行回归分析。特别地,对于静力受压的试件工况,取 DIF 为 1.0、应变率近似为 0,由此得到海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土的 DIF 预测模型如图 13 所示,相应的计算式为:

海水海砂碎石骨料混凝土:

$$DIF = 4 \times 10^{-5} \dot{\epsilon}^2 + 0.0028\dot{\epsilon} + 1 \quad (2)$$

海水海砂珊瑚骨料混凝土:

$$DIF = 0.0093\dot{\epsilon} + 1 \quad (3)$$

由图 13 可见,基于应变率的海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚骨料混凝土受压强度动态放大系数在回归效果上具有良好的相关性,其相关系数  $R^2$  分别为 0.95 和 0.91,表明该预测模型能反映试验结果的分布特性。

### 3 本构关系的预测模型

为了将海水海洋骨料混凝土在动态响应下的研究成果方便工程实践,有必要提出面向设计与评估的应力-应变本构关系数值模型。虽然动态响应下海水海洋骨料混凝土具有很明显的应变率效应,但其动态受压的应力-应变本构关系曲线形状与静态受力状态下相似,分上升段和下降段。这就给动态本构关系数值模型的构建提供了基本思路,即参照静态受压的应力-应变本构关系模型。

中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[20]</sup>采用分段式数学方程用以表达混凝土在静

式中  $f_{cd}$  为动态受压强度;  $f_{cs}$  为静态受压强度。

图 13 为海水海洋骨料混凝土 DIF 随应变率和混凝土强度等级的分布情况。由图可见,随着应变率的提高,海水海洋骨料混凝土的 DIF 也随之增大;在同一强度等级和同等应变率下,海水海砂珊瑚骨料混凝土的 DIF 比海水海砂碎石骨料混凝土的大,表明珊瑚骨料比碎石骨料具有更高的应变率敏感性。

力单轴压缩下的应力-应变本构关系,其计算式为:

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x}, & 1 \leq x \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x = \epsilon/\epsilon_c$ ;  $y = \sigma/\sigma_c$ ;  $\sigma$  为压应力;  $\sigma_c$  为峰值压应力,文中表示为  $f_c$ ;  $\epsilon$  为压应变,  $\epsilon_c$  为峰值压应变,  $a$  为上升段参数,  $b$  为下降段参数。

本质上,  $a$  和  $b$  是式(4)的形状控制参数,而基于静态和动态的试验数据可获得不同的函数形状,相应地表现为本构关系的应变率效应。通过对试验获取的静态和动态受压应力-应变本构关系无量纲化处理,并将其按式(4)进行数值反演,得到不同类型、不同强度等级的海水海洋骨料混凝土本构方程控制参数  $a$  和  $b$ ,详细结果如表 4 所示。由表可见,上升段参数的相关系数  $R^2$  绝大多数接近 1.0,最小也不低于 0.956,表明其数值稳定性较好;下降段参数的相关系数  $R^2$  虽然有一小部分在 0.9 以下,但多数也趋于 1.0,这是由于下降段的离散性较大所致。需特别说明的是,对于同一强度等级的同种海水海洋骨料混凝土,对应于某一应变率下的参数  $a$  和  $b$  的值可通过线性插值的方法确定。

为了验证回归模型的有效性,将计算得到的本构关系曲线与试验曲线进行对比,如图 14 所示。由图可见,计算本构曲线与试验本构曲线吻合程度较高,表明文中提出的海水海洋骨料混凝土在应变率介于 0~80  $s^{-1}$  之间的受压应力-应变本构模型在海洋工程结构的设计与评估中可予以采纳。

表4 回归得到的参数 $a, b$ 的取值  
Tab. 4 Values of parameters  $a$  and  $b$  obtained by regression

| 混凝土类型  | 实际气压 /MPa | 实测应变率 /s <sup>-1</sup> | 上升段  |       | 下降段    |       |
|--------|-----------|------------------------|------|-------|--------|-------|
|        |           |                        | $a$  | $R^2$ | $b$    | $R^2$ |
| SSMC30 | 0         | 0                      | 0.58 | 0.985 | 12.07  | 0.973 |
|        | 0.3       | 33.91                  | 1.24 | 0.999 | 0.49   | 0.986 |
|        | 0.6       | 66.33                  | 1.41 | 0.999 | 0.57   | 0.980 |
|        | 0.9       | 79.58                  | 2.22 | 0.999 | 0.91   | 0.887 |
| SSMC40 | 0         | 0                      | 0.26 | 0.956 | 30.02  | 0.980 |
|        | 0.3       | 30.59                  | 0.68 | 0.998 | 0.45   | 0.999 |
|        | 0.6       | 60.86                  | 1.71 | 0.999 | 0.56   | 0.990 |
|        | 0.9       | 77.11                  | 2.30 | 0.999 | 0.63   | 0.988 |
| SSCC20 | 0         | 0                      | 0.48 | 0.976 | 43.96  | 0.890 |
|        | 0.3       | 37.32                  | 1.17 | 0.999 | 0.32   | 0.998 |
|        | 0.6       | 71.87                  | 2.31 | 0.998 | 0.66   | 0.975 |
|        | 0.9       | 85.20                  | 2.51 | 0.972 | 1.48   | 0.988 |
| SSCC30 | 0         | 0                      | 0.36 | 0.965 | 240.60 | 0.973 |
|        | 0.3       | 34.63                  | 0.75 | 0.999 | 0.36   | 0.905 |
|        | 0.6       | 68.47                  | 1.89 | 0.998 | 0.80   | 0.854 |
|        | 0.9       | 82.92                  | 2.44 | 0.999 | 1.69   | 0.777 |

注:表中应变率为五组重复试验的平均值。

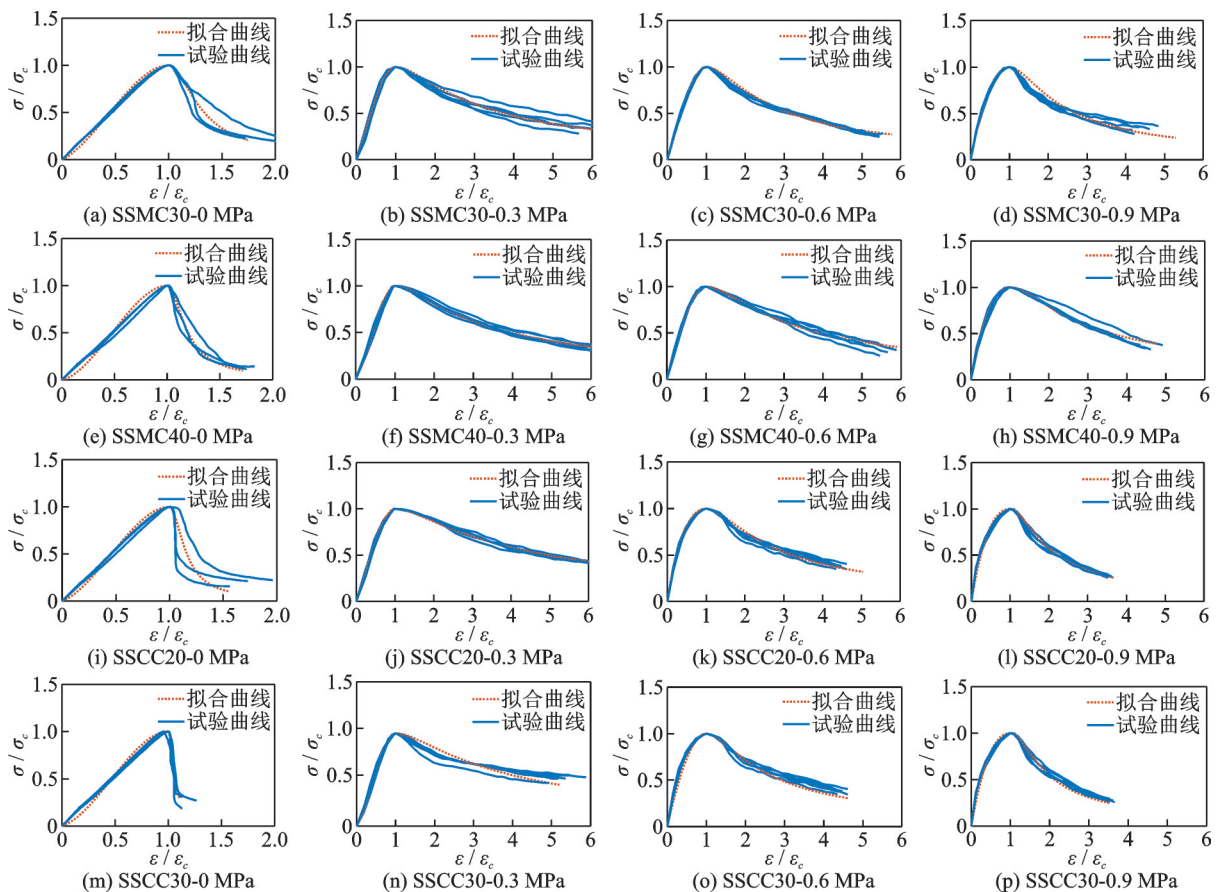


图14 本构模型曲线与试验曲线的对比

Fig. 14 Comparison of constitutive relationship between model curves and test curves

## 4 结论

(1) 海水海砂碎石骨料混凝土和海水海砂珊瑚

骨料混凝土受力过程相似,其应力-应变关系曲线基本经历了弹性阶段、塑性发展阶段以及全塑性破坏阶段;海水海砂珊瑚骨料混凝土在破坏阶段的应力下降过程比海水海砂碎石骨料混凝土的更加突然。



(2) 应变率高的海水海洋骨料混凝土受压应力-应变关系曲线围络了应变率低的同类混凝土本构曲线,表明应变率效应对提高海水海洋骨料混凝土动态受压力学性能具有显著影响。

(3) 在同一强度等级和同等应变率下,海水海砂珊瑚骨料混凝土的 *DIF* 比海水海砂碎石骨料混凝土的大,表明珊瑚骨料比碎石骨料具有更高的应变率敏感性;通过数值回归分析得到了海水海洋骨料混凝土受压强度 *DIF* 的预测模型。

(4) 以普通混凝土静态受压计算方法为基础,通过数值反演的手段得到了应变率介于  $0\sim 80\text{ s}^{-1}$  的海水海洋骨料混凝土应力-应变静动态统一本构关系。

#### 参考文献:

- [1] 吴园涛,段晓男,沈刚,等. 强化我国海洋领域国家战略科技力量的思考与建议[J]. 地球科学进展, 2021, 36(4): 413-420.  
Wu Yuantao, Duan Xiaonan, Shen Gang, et al. Thoughts and suggestions on strengthening the national strategic scientific and technological forces in the marine field of China [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 413-420.
- [2] 李师财,于泳,金祖权. 海水海砂混凝土力学性能与耐久性研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3743-3752.  
Li Shicai, Yu Yong, Jin Zuquan. Review on mechanical properties and durability of seawater and sea-sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(12): 3743-3752.
- [3] Zhao Yifan, Hu Xiang, Shi Caijun, et al. A review on seawater sea-sand concrete: mixture proportion, hydration, microstructure and properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 295: 123602.
- [4] 陈宗平,张亚旗,姚如胜,等. 海砂混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3934-3940.  
Chen Zongping, Zhang Yaqi, Yao Rusheng, et al. Experimental study on complete stress-strain curve of sea sand concrete behavior under uniaxial loading [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3934-3940.
- [5] Huang Yijie, Li Xiaowei, Lu Yu, et al. Effect of mix component on the mechanical properties of coral concrete under axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 736-754.
- [6] 巩位,余红发,麻海燕,等. 全珊瑚海水混凝土配合比设计及评价方法[J]. 材料导报, 2019, 33(22): 3732-3737.  
Gong Wei, Yu Hongfa, Ma Haiyan, et al. Mix proportion design and evaluation approach of coral aggregate seawater concrete[J]. Materials Reports, 2019, 33(22): 3732-3737.
- [7] 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. Experiment and numerical simulation on impact compressive properties of C45 coral aggregate concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 488-495.
- [8] 岳承军,余红发,麻海燕,等. 全珊瑚海水混凝土动态冲击性能试验研究[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 2697-2703.  
Yue Chengjun, Yu Hongfa, Ma Haiyan, et al. Experiment study on dynamic impact properties of coral aggregate seawater concrete [J]. Materials Reports, 2019, 33(8): 2697-2703.
- [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 simulation of impact compression of coral aggregate seawater concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 283-290.
- [10] 吴家文,马林建,孔新立,等. 冲击荷载下全珊瑚混凝土动力特性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 581-588.  
Wu Jiawen, Ma Linjian, Kong Xinli, et al. Dynamic characteristics of coral concrete under impact load [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 581-588.
- [11] Ma L, Li Z, Liu J, et al. Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 244-255.
- [12] 易金,刘超,王磊. 聚丙烯纤维增强珊瑚混凝土抗冲击性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 244-248.  
Yi Jin, Liu Chao, Wang Lei. Experimental study on shock resistance of polypropylene fiber reinforced coral concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(4): 244-248.
- [13] 王磊,谷文慧,汪稔,等. 碳纤维增强珊瑚混凝土抗冲击性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3339-3343.  
Wang Lei, Gu Wenhui, Wang Ren, et al. Experimental study on shock resistance of carbon fiber reinforced coral concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3339-3343.
- [14] 杨成林,徐迎,洪建,等. 强动载作用下海水海砂混凝土应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2): 415-422.

- Yang Chenglin, Xu Ying, Hong Jian, et al. Research progress on application of sea sand concrete under strong dynamic load [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(2): 415-422.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98 [S]. ASTM International, 2013.
- [16] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [17] 轻骨料混凝土技术规程: JGJ 51—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
Technical specification for lightweight aggregate concrete: JGJ 51—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [18] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [19] Xiong Beibei, Cristoforo Demartino, Xu Jinjun, et al. High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: recycled crushed concrete and clay bricks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 123875.
- [20] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

## Compressive stress-strain constitutive relationship of seawater and marine aggregates fabricated concrete under dynamic response

XU Jin-jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Xu-ling<sup>1</sup>, TANG Yue-yue<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>, CHEN Lin<sup>3</sup>

(1.College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2.International Center of Integrated Protection Research of Engineering Structures, Nanjing 211816, China; 3.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to establish the stress-strain constitutive relationship of seawater marine aggregate-based concrete under compression at high strain rate, the dynamic mechanical properties of seawater-sea sand gravel aggregate concrete and seawater-sea sand coral aggregate concrete were tested by large diameter split Hopkinson pressure bar testing device. The reference datum for comparison of dynamic mechanical properties of each concrete was obtained through static tests for mechanical properties. Based on the results of static and dynamic compressive performance tests, the failure mode and characteristics, stress-strain relationship curves, peak stress and peak strain, dynamic increasing factor (DIF) of compressive strength of seawater marine aggregate-based concrete were obtained; and meanwhile, the influence of strain rate and concrete type on a single performance index was analyzed in depth. The results show that the failure surface of seawater-sea sand gravel aggregate concrete lies in the interface area between gravel and cement slurry, while the failure surface of seawater-sea sand coral aggregate concrete is the shear fracture of coral. The process of static and dynamic compressions of seawater marine aggregate-based concrete are similar, that is: the stress-strain curves basically undergoes the elastic stage, the plastic development stage and the completely plastic failure stage. Strain rate effect has a significant effect on improving the dynamic compressive mechanical properties of seawater marine aggregate-based concrete. Coral as coarse aggregate has a higher strain rate sensitivity than gravel coarse aggregate. Using numerical regression analysis, a DIF prediction model for compressive strength of seawater marine aggregate-based concrete with strain rate as independent variable was established. Based on the piece-type mathematical equations provided in the Code for the Design of Concrete Structures, the unified static and dynamic stress-strain constitutive relationship of seawater marine aggregate-based concrete was established by numerical inversion method.

**Key words:** concrete; seawater-sea sand; coral aggregate; dynamic mechanical properties; constitutive relationship

**作者简介:** 徐金俊(1986—),男,副教授,硕士生导师。电话:15251716891;E-mail:jjxu\_concrete@njtech.edu.cn。