

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0432

珊瑚砂应变率效应研究*

董凯¹, 任辉启^{1,2}, 阮文俊¹, 宁惠君^{2,3}, 郭瑞奇², 黄魁²

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国人民解放军军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023;

3. 河南科技大学土木工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为研究应变率对珊瑚砂力学特性的影响, 用直径 37 mm 的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 对两类珊瑚砂进行了冲击实验, 得到了 460~1300 s⁻¹ 应变率范围内不同密实度的一维应变压缩应力-应变关系; 结合准静态 (10⁻⁴ s⁻¹) 压缩的实验结果, 发现珊瑚砂存在明显的应变率效应; 通过对比两类砂物理特性, 认为应变率敏感性与内孔隙和粒间摩擦密切相关; 提出了率型本构模型中动态增强系数的计算模型, 可为珊瑚砂在冲击下的数值计算提供理论依据。

关键词: 珊瑚砂; 应变率效应; 内孔隙; 冲击; 增强系数

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Study on strain rate effect of coral sand

DONG Kai¹, REN Huiqi^{1,2}, RUAN Wenjun¹, NING Huijun^{2,3}, GUO Ruiqi², HUANG Kui²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Luoyang 471023, Henan, China;

3. School of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: A 37 mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus was used to conduct impact tests on two types of coral sand to investigate the effect of strain rate. One-dimensional compressive stress-strain curves with the strain rates ranging from 460 to 1300 s⁻¹ were obtained under different compactness levels. Combining with the static compressive results (strain rate of 10⁻⁴ s⁻¹), it is found that coral sand is affected with strain rate obviously. Comparison of physical properties of two types of coral sand indicates that the strain rate sensitivity is highly correlated with the proportion of inner pores of the particles and friction between the particles. The calculation models of dynamic intensification factor are proposed, which provide theoretical basis for the numerical calculation of coral sand under impact.

Keywords: coral sand; strain rate effect; inner pore; impact; strengthening coefficient

热带沿海地区岛礁礁坪和潟湖表层普遍覆盖着珊瑚砂^[1], 因碳酸钙含量较高又称钙质砂。随着对海域岩土的不断开发, 人们在珊瑚砂方面的研究取得了丰硕的成果^[2-6], 为深入探索利用海洋资源提供了宝贵的技术支撑。

珊瑚砂作为岛礁天然地质材料被广泛用作地基、覆土层等的填充材料。由于珊瑚砂在冲击时表现出不同于静载下的力学行为, 为了保障建筑设施能承受如地震、强冲击、偶然或人为的爆炸等强动载的作用^[7], 需要对珊瑚砂的动力学特性进行探索。学者们对珊瑚砂开展了一系列的冲击试验^[8-9], 发现珊瑚砂的动态力学特性与变形机理在本质上不同于陆源砂^[10], 较高的孔隙率使珊瑚砂有望成为天然的吸波材料^[11]。以上成果为岛礁工程的建设提供了科学依据, 但这些研究中, 关于应变率敏感性的结果存在

* 收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2020-01-21

第一作者: 董凯 (1989—), 男, 博士研究生, dongkai@njust.edu.cn

通信作者: 任辉启 (1953—), 男, 博士, 研究员, 1933236975@qq.com

差异^[12-14],这种差异同样存在于关于陆源硅基石英砂的研究中^[15-17],目前该差异尚未得到合理解释与深入研究。

从宏观角度研究珊瑚砂的力学特性有利于抓住工程问题的主要方面,同时,通过相关方法得到的宏观描述可为细观上颗粒作用分析进行指导。本文中,对珊瑚砂进行准静态/动态冲击压缩实验;根据颗粒的物理属性分析其破碎机制;通过对两种珊瑚砂的强度进行对比,从颗粒破碎形式上探索珊瑚砂应变率效应产生的本质,同时探究石英砂表现出应变率不敏感的原因;根据实验,计算在 $460 \text{ s}^{-1} \sim 1300 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的应力增强系数,并分析该系数随应变率和密实度的变化规律。

1 一维压缩实验介绍

1.1 实验装置及测试方法

准静态一维应变压缩实验在 DDL(100) 型微机控制电子万能试验机上进行,该试验机最大加载力为 100 kN,力与位移的测量精度为示值的 $\pm 0.5\%$,实验时的所有工况加载速率为 0.6 mm/min ,试样初始长度为 16 mm,珊瑚砂的应变率为 $6.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,试验机输出的数据为轴向力与位移随时间的散点,结合试样的横截面积和长度即可得到其轴向应力-应变曲线。

动态冲击实验采用直径 37 mm 的分离式霍普金森压杆(SHPB),其中入射杆与透射杆长度均为 2 000 mm,撞击子弹的长度为 400 mm。杆和子弹材料均为铝合金(7A04),密度为 2.85 g/cm^3 ,弹性模量 E_0 为 72 GPa,弹性纵波波速 $c_0 \approx 5026 \text{ m/s}$ 。在试样径向固定有内径为 37.05 mm、外径为 43 mm,材质为 30CrMnSiA 高强度合金钢制套筒,入射杆端部贴有橡胶制成的波形整形器,子弹以一定速度撞击入射杆产生应力脉冲,通过测量入射杆、透射杆的应变脉冲并计算得到试样的应力-应变曲线。很多学者使用该方法对砂土材料进行了冲击实验并取得了丰富的成果^[18-21],本文不再对实验原理详细说明。

1.2 珊瑚砂试样

两种珊瑚砂均为不良级配土,其物理参数见表 1,级配曲线见图 1,可以看出 2#砂比 1#砂级配更加平缓,并且小颗粒占比更高。

如图 2 所示,1#珊瑚砂以扁平、细长的条状颗粒居多,2#砂与之相比颗粒圆度更高,以块状颗粒居多。由于两种砂的比重均为 2.81,最大、最小干密度的测试结果表明 2#砂内孔隙较大。本文两种珊瑚砂选用的相对密实度 η 均为 30%、60%、90%(误差在 1% 以内),对应的 1#砂试样密度 ρ 分别为 1.178、1.219、1.260 g/cm^3 ,2#砂试样密度 ρ 分别为 1.038、1.104、1.178 g/cm^3 。

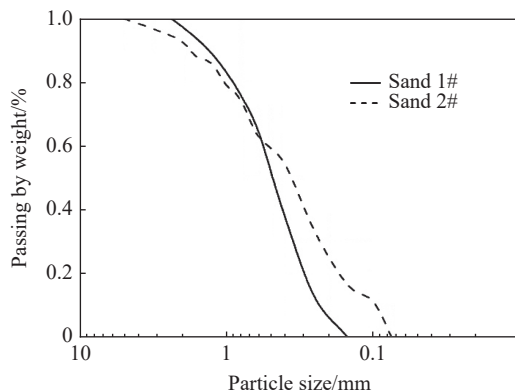


图1 珊瑚砂级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution of coral sand

表1 珊瑚砂基本物理特性

Table 1 Physical mechanical properties of dry coral sand					
珊瑚砂	中间粒径/ mm	不均 系数	曲率 系数	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最小干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1#	0.480	2.358	0.924	1.317	1.136
2#	0.356	2.240	1.070	1.205	0.980



图2 珊瑚砂颗粒图

Fig. 2 Pictures of coral sand particles

岩土材料的力学特征有一定离散性,故实验过程中需要严格控制试样误差。首先,在取样前选择9组筛孔进行筛分,取样时采用精度为0.01 g的电子秤进行逐个粒组称量,并进行充分均匀混合,保证每个试样的质量称量误差在 ± 0.03 g以内;其次,在保证珊瑚砂取样一致的前提下,装样长度误差控制在0.02 mm以内,平面度在0.02 mm以内;最后,通过5~8次平行实验取均值确定应力-应变曲线。装配完成后的静态与动态实验如图3所示。

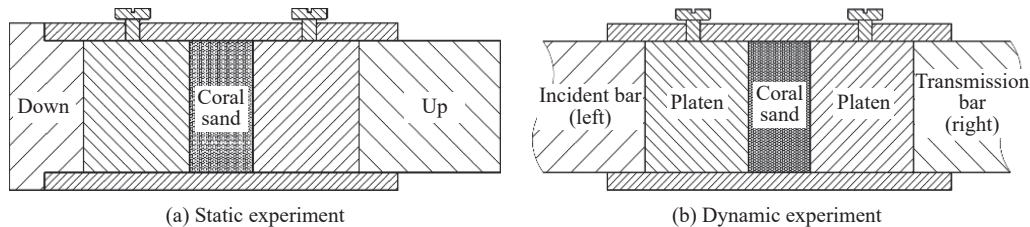


图3 珊瑚砂试样装配图

Fig. 3 Test section for coral sand specimen assembly

2 实验结果及分析

2.1 动态应力平衡与一致性检验

Martin 等^[22]认为加载初期透射波的震荡是一个难以解释的问题,在高强度的石英砂中往往可以忽略。但珊瑚砂强度较低,初始段震荡产生的多峰现象将对力学特性分析造成严重的错误判断。根据多个围压套筒的实验结果,发现初始震荡可能由套筒与垫块、杆件的非对称接触摩擦引起,本次实验通过严格的加工精度、套筒和垫块表面的抛光打磨,并在实验前在接触部位涂抹薄层润滑油消除了波形震荡。

珊瑚砂波速较低、质地较脆,因此实验的难点在于试样的均匀化加载。采用波形整形技术增加入射波的上升沿时间达到应力平衡被认为是最有效的方法,而试样前后端面的应力一致性是检验实验是否有效的核心标准。由于透射波较弱,采用了较高灵敏度(灵敏系数为110)的半导体应变片,得到的曲线较光滑不需做滤波处理,整形后上升沿时间大于150 μs 。图4为2#砂在最高应变率加载时前后端面的应力-时程曲线,可以看出试样前后端面重合度较高,满足试样的均匀加载要求。

实验的一致性是针对岩土材料需要特殊关注的问题,根据动态应变仪记录的应变波形数据,并根据SHPB实验数据分析处理得到了不同工况的应力-应变曲线,如图5所示,平行实验一致性良好,也表明对于试样和加载速度的控制可靠性较高。套筒上记录的径向应变值最高在 10^{-5} ~ 10^{-4} 量级,而测得的试样轴向应变在0.08~0.18之间,故可认为试样处于一维应变加载状态。

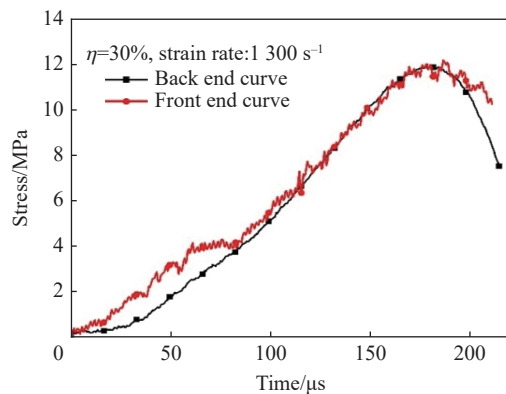


图4 最高应变率下试样前后端面应力平衡检验
Fig. 4 Dynamic stress equilibrium check of specimen at highest strain rate

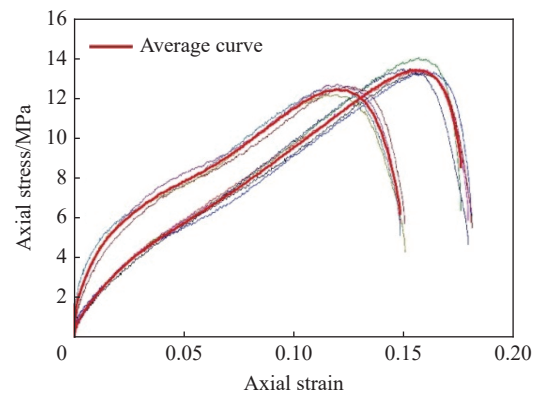


图5 冲击实验下应力-应变曲线的一致性检验
Fig. 5 Stress-strain curves of the sand under the identical loading condition

2.2 珊瑚砂应力-应变曲线分段描述及压缩特性

珊瑚砂的准静态压缩力学性能已经有了很多研究成果^[23-24], 由于颗粒形状与孔隙度的不同可能存在较大的差异, 为了与动态实验结果对比分析, 使用 2.1 节中介绍的实验方法得到了珊瑚砂在不同密实度 ($\eta=30\%$, 60% , 90%) 下的准静态(应变率为 $6.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 应力-应变曲线(见图 6), 在试样轴向应力达到 100 MPa 时停止压缩, 此时应变值达到了 40% 以上, 珊瑚砂达到了硬化阶段, 不同于泡沫混凝土、泡沫铝等孔隙材料, 珊瑚砂没有出现明显的应变强化拐点, 而是以指数形式增长达到硬化段。

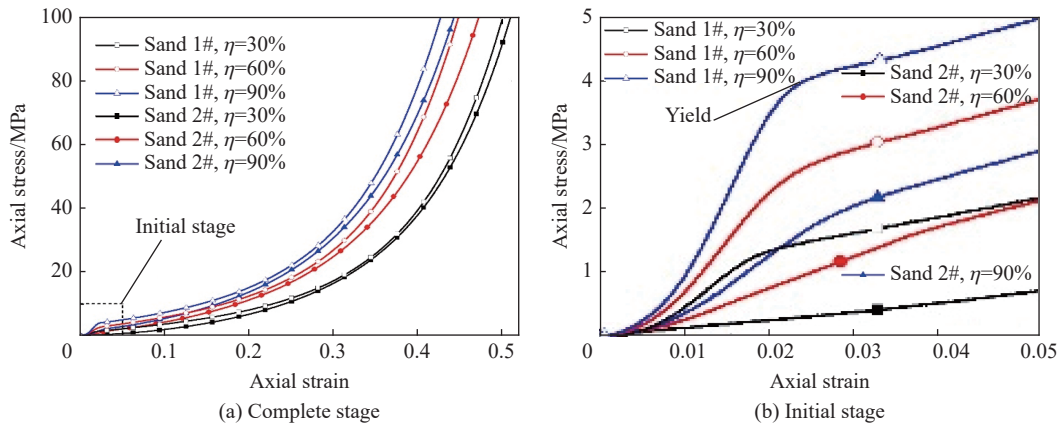


图 6 准静态(应变率: $6.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 压缩珊瑚砂应力-应变曲线

Fig. 6 Axial stress-strain curves of coral sand under static loading (Strain rate: $6.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

许多文献中将珊瑚砂的本构关系通过 Murnaghan 模型来表述^[13], 这在高荷载引起的较大压缩应变的描述中是合理的。从图 6 中可以看出, 珊瑚砂在初始变形阶段存在屈服现象, 并且随着密度的增加屈服值逐渐增大, 1#砂在 3 种密实度下屈服强度分别为 1.34、2.62、4.00 MPa, 2#砂由于密度较小, 仅在 $\eta=90\%$ 时有屈服现象, 屈服强度约为 1.89 MPa。由于珊瑚砂在较低的应力水平下会发生破碎现象, 在仅考虑小载荷产生低应变时的工程计算中需对模型进行修正。

根据 SHPB 实验的结果, 得到了不同应变率下的一维压缩应力-应变曲线(见图 7 和图 8), 动态压缩曲线与准静态压缩曲线在形式上主要存在两点区别: 第一, 低密实度的 2#砂在准静态压缩时未出现屈服现象, 而在冲击条件下 2 种砂均发生屈服现象, 并且 1#砂屈服应变与准静态近似相等; 第二, 在骨架屈服段, 准静态压缩下应力随应变呈指数形式增长, 而冲击下 1#砂为线性增长, 模量为常数, 2#砂模量在低密度时随应变的增加而下降, 高密度时近似线性。

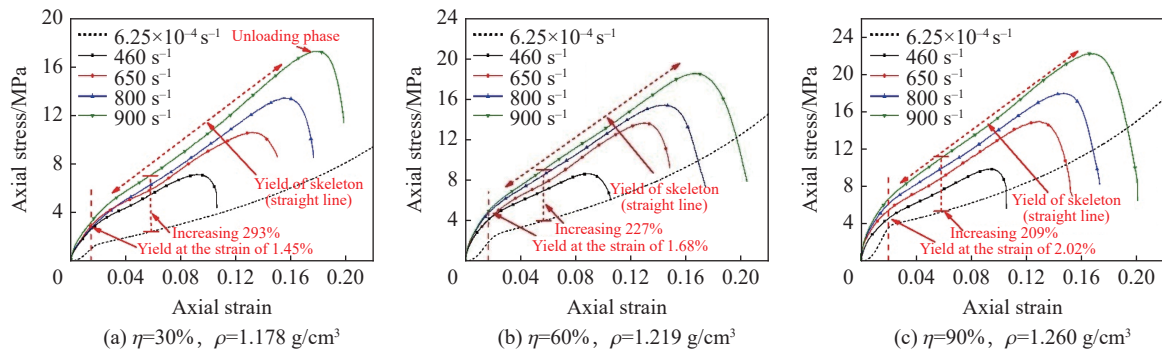


图 7 不同相对密实度下 1#珊瑚砂应力-应变曲线

Fig. 7 Axial stress-strain curves of coral sand 1# under different compactness levels

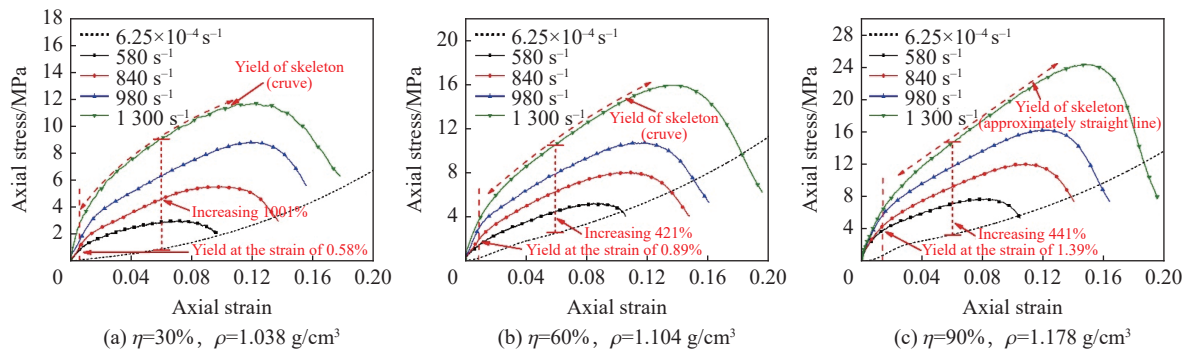


图 8 不同相对密度下 2#珊瑚砂应力-应变曲线

Fig. 8 Axial stress-strain curves of coral sand 2# under different compactness levels

珊瑚砂的应力-应变曲线可分为以下几段: 拟弹性段、骨架屈服段、硬化段。低密度的珊瑚砂在准静态压缩时, 拟弹性段可能不存在, 由于图 6、图 7、图 8 中屈服前的弹性段与石英砂的线性表现不同, 存在颗粒破碎, 因此称为为拟弹性段。由于珊瑚砂的高孔隙率和动态加载设备的限制, 动态实验未达到硬化段。

孔隙比与轴向压力的关系可根据初始孔隙比及应变历史计算得到, 结果如图 9 所示, 将首个拐点处应力定义为压缩屈服点, 下降段斜率为压缩指数。对比石英砂^[10], 珊瑚砂在冲击时不存在明显的压缩屈服点, 表明珊瑚砂受压时始终伴随着颗粒破碎。在曲线的下降段, 2#砂($\eta=30\%$, 60%)在冲击时压缩指数为非定值, 对应于应力-应变曲线中的模量下降, 造成该现象的原因是高孔隙比珊瑚砂试样在冲击时颗粒的破碎更容易造成颗粒间接触的失效, 在宏观上表现出模量下降和压缩指数的变化。

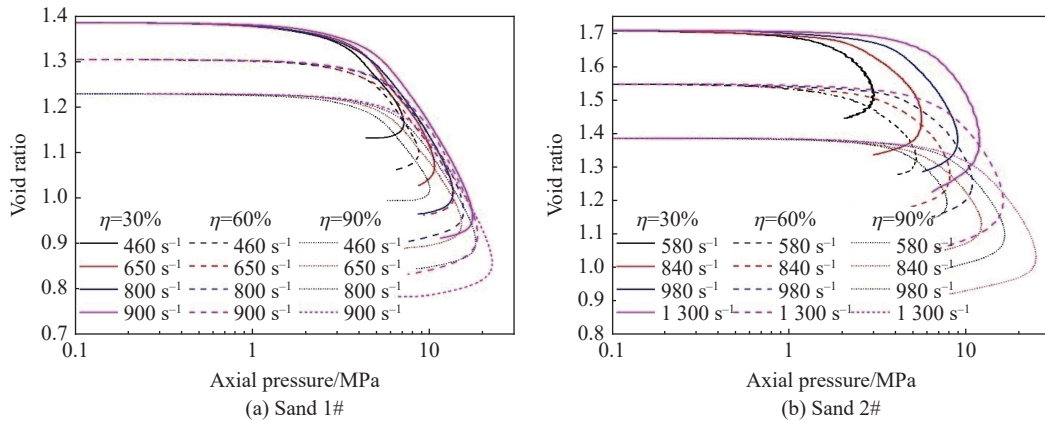


图 9 珊瑚砂孔隙比与轴向压力的关系

Fig. 9 Relationship between void ration of coral sand and axial pressure

SHPB 实验中试样由于入射波的下降段开始卸载, 对应于孔隙比-压力曲线末端的应力下降段, 但孔隙比随压力的减小而降低, 表明试样在下降段继续受到压缩, 这主要由两方面原因综合构成: (1) 由于整形器的作用使得入射波下降沿存在一段作用时间, 该段入射波仍具有一定的加载能力; (2) 珊瑚砂具有较低的颗粒强度, 下降段的加载可引起珊瑚砂的颗粒破碎, 从而引起试样压缩。因此并未出现石英砂中出现的卸载后孔隙比增大的回弹现象^[25], 表明珊瑚砂与石英砂在压缩时的变形机理有着本质的区别, 石英砂受压时受颗粒的弹性变形影响较大, 而珊瑚砂则发生不可逆的颗粒破碎。

在相同的应变率加载时, 压缩指数随初始孔隙比的增大而增大, 表明越密实的试样越难压缩; 不同的应变率加载时, 初始孔隙比相同的试样压缩指数近似相等, 受应变率影响较小, 而压缩屈服点受应变率影响较大, 且随应变率的增大而增大, 这些结论与文献 [15] 中的石英砂具有相似的应变率影响规律。

2.3 应变率效应机理

建立密度与强度的函数关系是本构模型中常用的方法,珊瑚砂由于颗粒形态多样化的特殊性,相同压实密度的两种珊瑚砂试样,由于变形机制的不同,产生不同的力学表现。

如图 10 所示,在准静态压缩时,1#砂的初始强度略大,在到达屈服点后,2#砂强度高于 1#砂,并且强度差值随着变形的增大而增加;在相同应变率冲击时,1#砂强度也同样低于 2#砂。该力学特性与两种砂不同的破碎机制有关,2#砂的平均粒径较小,并且颗粒圆度相对较高,在压缩时表现为更难破碎,因此在相同的应变率下 2#砂试样的强度较高。这表明即使密度相同的两种砂,由于压缩时变形机制的不同导致力学特性存在很大差异。

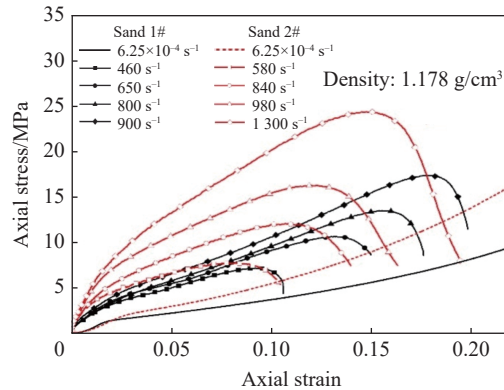


图 10 相同密度下两种珊瑚砂应力-应变曲线

Fig. 10 Axial stress-strain curves of two types of coral sand with the same density

两种砂压缩强度均随着应变率的提高而增大,初始压实密度相同时,取应变值 0.03、0.05、0.07 处对应的动态应力与静态应力的比值定义为增强系数,如图 11 所示,不难看出,2#砂的应变率敏感性更高。在 600~800 s⁻¹ 的应变率范围内两种砂的增强系数近似相等,1#砂的强化系数与变形程度变化不大,可认为是常数;2#砂在不同的应变值处存在差异,相同应变率下,珊瑚砂的增强系数随变形的增长而减小。有文献^[26]表明松砂在压缩时产生的颗粒间摩擦效应较大,而冲击条件下颗粒间动摩擦因数与颗粒间的位错速度有关,从宏观上影响试样整体的应变率效应,因此在相同的应变速率加载下,松砂由于摩擦效应大产生更强的应变率效应。

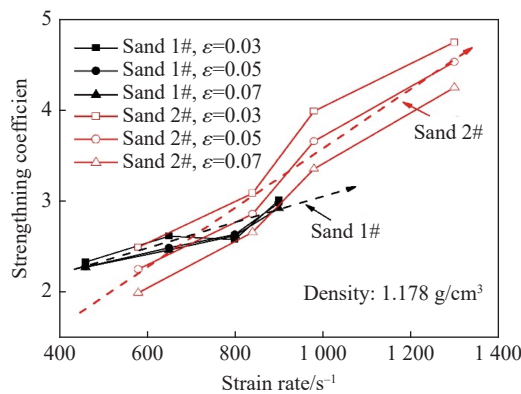


图 11 相同密度珊瑚砂增强系数随应变率的变化关系

Fig. 11 Relationship between strengthening coefficient and strain rate

脆性岩土材料应变率效应的宏观本质是损伤变形和时间上的位错:由于加载速率的增高,试样因损伤的迟滞而在达到相同的应变值时表现出更高的应力状态。尽管两种珊瑚砂的压缩变形机制均为颗粒破碎,但破碎模式的不同表现出了不同的应变率敏感性。1#珊瑚砂圆度低并且枝状、片状颗粒较多,错

综复杂的颗粒排布导致粒间孔隙占比较大, 压缩变形主要由颗粒尖角处的破碎、颗粒的折断、滚转和滑动等引起; 2#砂颗粒主要由内孔隙和强度薄弱处的损伤发展导致的爆裂性破坏^[27], 如图 12 所示。由于内孔隙压力的影响爆裂破坏产生的迟滞效应高于断裂, 在相同的密度下 2#砂的内孔隙占比高于#1 砂, 并且颗粒圆度大, 颗粒的爆裂破坏占比较高, 因此, 2#砂表现出更强的应变率敏感性。

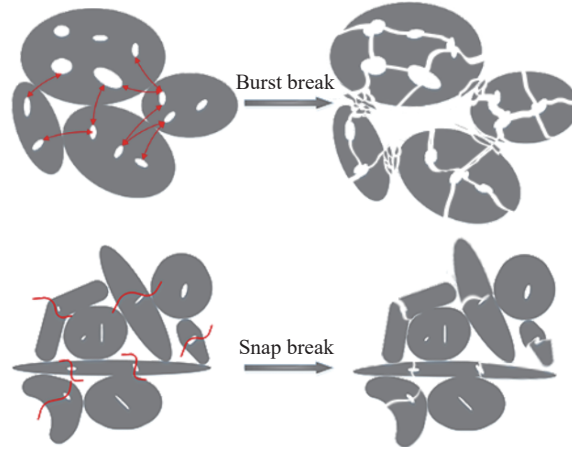


图 12 两种形状珊瑚砂破碎模式

Fig. 12 Different broken modes of coral sand under compression

有学者认为石英砂未出现应变率效应的原因在于级配过于良好而不产生破碎^[15], 但研究认为石英砂也存在颗粒破碎, 主要的破碎方式为棱角的破碎, 其本质与折断相近。基于本文的研究, 认为级配良好、试样过于密实为部分原因, 而石英砂几乎不存在内孔隙并且由密实度高引起的低摩擦效应是导致应变率效应不明显的根本原因。

2.4 动态增强规律

对于混凝土、岩石等非松散材料, 关注的常常是其破坏强度, 为表征材料的应变率效应, 引入破坏处的动态增强系数 f , 定义为 $f = \sigma_d / \sigma_s$, 其中 σ_d 为动态强度, σ_s 为静态强度。珊瑚砂作为松散材料主要用于覆土层、填充介质等, 在爆炸冲击下往往受到一维应变压缩状态^[28], 应力-应变曲线的下降段为 SHPB 实验入射波的下降沿引起的卸载。

本文所考虑到的强度为侧限条件下的承载力, 该承载力与变形程度有关, 因此本文定义动态增强系数 f 是随应变值变化的函数。两种珊瑚砂的动态增强系数 f 随应变之间的关系如图 13 所示, 两种砂的动态增强系数均随着应变率的增大而增大, 同时在相同应变率时, 均随密实度的增大而减小。

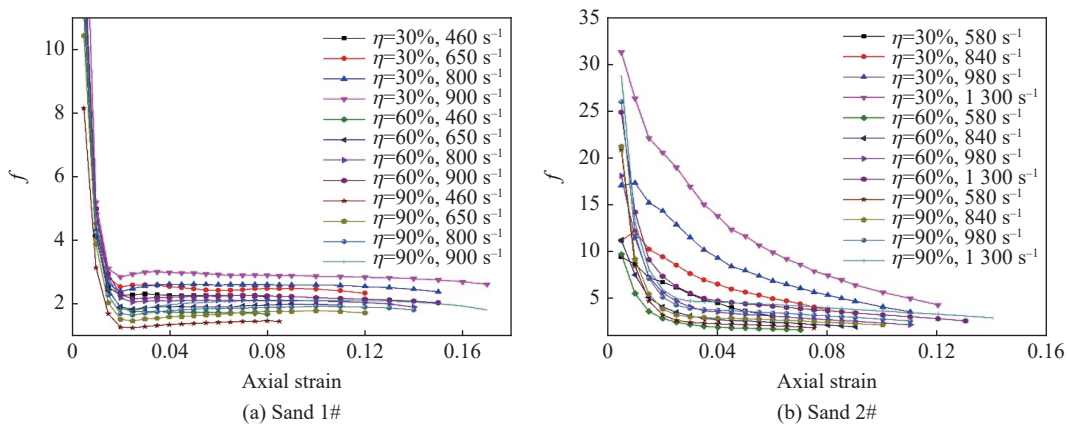


图 13 动态增强系数与压缩应变的关系

Fig. 13 Relation curves of dynamic intensification factor and strain

为定量描述动态增强规律,构建了动态增强系数在不同应变值处随应变率的变化函数,动态增强系数对于珊瑚砂率型本构模型中过应力、黏性参数的描述具有重要意义^[29-30],

两种珊瑚砂增强函数具有不同的表述形式,对于1#珊瑚砂, f 可用三段线性模型描述,在 $0\sim 0.02$ 应变区间(拟弹性段)可表示为:

$$f = \begin{cases} -1\ 605.6\varepsilon + 20.626 & 0 < \varepsilon \leq 0.01 \\ a\varepsilon + b & 0.01 < \varepsilon \leq 0.02 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} a = 0.125\dot{\varepsilon} - 288.65 \\ b = -1.24 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon} + 7.453 \end{cases} \quad \eta = 30\% \\ \begin{cases} a = 0.105\dot{\varepsilon} - 329.9 \\ b = -1.05 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon} + 7.869 \end{cases} \quad \eta = 60\% \\ \begin{cases} a = 0.141\dot{\varepsilon} - 382.38 \\ b = -1.41 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon} + 8.394 \end{cases} \quad \eta = 90\% \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率。

在骨架屈服段, f 可视为常数,该值随应变率效应和密实度之间的关系可表示为:

$$f = \begin{cases} 1.683\ 5 + 1.25 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon}, \eta = 30\% \\ 1.271\ 0 + 1.05 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon}, \eta = 60\% \\ 0.746\ 2 + 1.41 \times 10^{-3}\dot{\varepsilon}, \eta = 90\% \end{cases} \quad \varepsilon > 0.02 \quad (3)$$

对于2#珊瑚砂,可用统一的指数函数 $f = \alpha \cdot \varepsilon^\beta$ 描述,式中 α 、 β 均为与应变率相关的函数,表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = 0.018\ 1\dot{\varepsilon} + 0.294\ 8 \\ \beta = -1.399 \times 10^{-4}\dot{\varepsilon} - 0.299\ 7 \end{cases} \quad \eta = 30\% \\ \begin{cases} \alpha = 3.372\ 3 \times 10^{-4}\dot{\varepsilon} + 0.02186 \\ \beta = -7.766\ 6 \times 10^{-5}\dot{\varepsilon} - 0.647\ 9 \end{cases} \quad \eta = 60\% \\ \begin{cases} \alpha = 8.170\ 8 \times \dot{\varepsilon}^{3.4797} \\ \beta = 5.824\ 6 \times 10^{-4}\dot{\varepsilon} - 1.467\ 5 \end{cases} \quad \eta = 90\% \end{cases} \quad (4)$$

考虑到动态实验加载变形量的有限,本文应变最高只达到了约18%,并未达到冲击下的压实段,从而影响了模型的适用范围,但基于以上的规律研究,对推导本文研究范围的任何密实度和应变率下的应力-应变关系具有非常重要的价值。

3 结 论

高孔隙率、形状不规则且具有应变率效应的珊瑚砂表现出复杂的力学特征,抓住力学本质特征能够在工程应用时全面考虑力学行为的规律,为实际工程设计应用提供科学指导。本文基于实验研究和破碎机理分析,根据珊瑚砂物理特性解释了准静态、冲击一维压缩时有关应变率敏感性的力学机制问题,得到以下结论:

(1)静态压缩与动态压缩的应力-应变曲线形式存在区别,动态下存在屈服特性,并且屈服后的模量为常数或略有下降,静态压缩下是否存在屈服特征取决于试样密度;

(2)珊瑚砂存在应变率效应,在孔隙比-压力曲线中表现出与石英砂相似的影响规律,内孔隙含量较大的珊瑚砂有更加敏感的应变率效应,颗粒的爆裂损伤导致的变形迟滞效应是珊瑚砂应变率效应的本质;

(3)低密实度的珊瑚砂应变率敏感性比密砂强,原因在于松砂在压缩时产生的摩擦效应更强;

(4)两种珊瑚砂的增强系数的变化规律不同,1#砂在骨架屈服段表现为常数,2#砂表现为指数形式下降。

受到实验设备的限制,动态冲击下珊瑚砂并未达到硬化段,为了达到动态的压实过程,需用杆长范围更广的 SHPB 设备;本文虽然对珊瑚砂、石英砂的应变率效应的影响因素做了阐述,认为内孔隙是主导应变率效应的主要因素,颗粒摩擦也存在影响,然而两者对应变率敏感度的影响尚未得到定量分析,这些工作是作者下一步的研究路线。

参考文献:

- [1] NOORANY I. Classification of marine sediments [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(1): 23–37. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(23).
- [2] 汪稔,宋朝景,赵焕庭,等.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
- [3] 高冉,叶剑红.中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J].*岩土力学*,2019,40(10):3897–3908,3919. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2085.
GAO R, YE J H. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3897–3908, 3919. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2085.
- [4] 湛民,张涛,单华刚,等.钙质砂压缩波速与物理性质参数关系研究[J].*岩土力学*,2019,40(6):2275–2283. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1160.
CHEN M, ZHANG T, SHAN H G, et al. Study of the relationship between compression wave velocity and physical properties of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2275–2283. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1160.
- [5] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea [J]. *Engineering Geology*, 2011, 120(1–4): 40–47. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.03.011.
- [6] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, et al. Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 77–86. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.019.
- [7] 钱七虎,王明洋.岩土中的冲击爆炸效应[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [8] XIAO Y, LIU H, XIAO P, et al. Fractal crushing of carbonate sands under impact loading [J]. *Géotechnique Letters*, 2016, 6(3): 199–204. DOI: 10.1680/jgele.16.00056.
- [9] 赵章泳,邱艳宇,紫民,等.含水率对非饱和钙质砂动力特性影响的试验研究[J].*爆炸与冲击*,2020,40(2):023102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0066.
ZHAO Z Y, QIU Y Y, ZI M, et al. Experimental study on dynamic compression of unsaturated calcareous sand [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 023102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0066.
- [10] LV Y R, LIU J G, XIONG Z M. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(1): 192–201. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.04.013.
- [11] YU X, CHEN L, FANG Q, et al. Determination of attenuation effects of coral sand on the propagation of impact-induced stress wave [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 63–82. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.11.004.
- [12] 魏久淇,王明洋,邱艳宇,等.钙质砂动态力学特性试验研究[J].*振动与冲击*,2018,37(24):7–12. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.002.
WEI J Q, WANG M Y, QIU Y Y, et al. Impact compressive response of calcareous sand [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(24): 7–12. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.002.
- [13] 文祝,邱艳宇,紫民,等.钙质砂的准一维应变压缩试验研究[J].*爆炸与冲击*,2019,39(3):033101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0015.
WEN Z, QIU Y Y, ZI M, et al. Experimental study on quasi-one-dimensional strain compression of calcareous sand [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 033101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0015.
- [14] FLOREZ E S. A study of strain rate effects on the mechanical behavior of sand [D]. New York: New York University Tandon School of Engineering, 2016: 137–143.
- [15] HUANG J Y, XU S L, HU S S. Influence of particle breakage on the dynamic compression responses of brittle granular materials [J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 68: 15–28. DOI: 10.1016/j.mechmat.2013.08.002.
- [16] 郑文,徐松林,胡时胜.侧限压缩下干燥砂的动态力学性能[J].*爆炸与冲击*,2011,31(6):619–623. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0619-05.

- ZHENG W, XU S L, HU S S. Dynamic mechanical properties of dry sand under confined compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 619–623. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0619-05.
- [17] SONG B, CHEN W N, LUK V. Impact compressive response of dry sand [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(6): 777–785. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.01.003.
- [18] BRAGOV A M, KOTOV V L, LOMUNOV A K, et al. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the Kolsky method [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, 45(4): 580–585. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000030338.66701.e9.
- [19] LUO H Y, COOPER W L, LU H B. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 40–55. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.001.
- [20] HUANG J, XU S, HU S. Effects of grain size and gradation on the dynamic responses of quartz sands [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 59: 1–10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.007.
- [21] BRAGOV A M, LOMUNOV A K, SERGEICHEV I V, et al. Determination of physicommechanical properties of soft soils from medium to high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 967–976. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.004.
- [22] MARTIN B E, CHEN W N, SONG B, et al. Moisture effects on the high strain-rate behavior of sand [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(6): 786–798. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.01.014.
- [23] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(18): 3327–3331. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.18.022.
- ZHANG J M, WANG R, SHI X F, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(18): 3327–3331. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.18.022.
- [24] 吕亚茹, 李治中, 李浪. 高应力状态下钙质砂的一维压缩特性及试验影响因素分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 3142–3150. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0175.
- LV Y R, LI Z Z, LI L. One-dimensional compression behavior of calcareous sand and its experimental technology under high stress conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 3142–3150. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0175.
- [25] LUO H, LU H, COOPER W L, et al. Effect of mass density on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(9): 1499–1510. DOI: 10.1007/s11340-011-9475-2.
- [26] DE COLA F, PELLEGRINO A, GLÖBNER C, et al. Effect of particle morphology, compaction, and confinement on the high strain rate behavior of sand [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 58(2): 223–242. DOI: 10.1007/s11340-017-0331-x.
- [27] PARAB N D, CLAUS B, HUDSPETH M C, et al. Experimental assessment of fracture of individual sand particles at different loading rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 68: 8–14. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.01.003.
- [28] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017: 133–135.
- [29] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 31–33.
- [30] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理与本构理论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016: 166–167.

(责任编辑 王小飞)