

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0938

珊瑚砂细观颗粒结构及破碎特性研究

吕亚茹¹, 王 冲¹, 黄厚旭², 左殿军³

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
3. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘 要: 珊瑚砂颗粒的物理力学特性决定着珊瑚砂的宏观力学机制, 在涉及颗粒破碎的岩土工程问题中至关重要。通过扫描电镜和 X-CT 试验, 研究了珊瑚砂颗粒的表观和内部结构特征, 发现珊瑚砂颗粒多孔隙, 保留生物骨骼成分的珊瑚砂颗粒孔隙率高达 41%, 而经过风化、沉积而成的珊瑚砂颗粒孔隙率小于 20%。多数表面孔隙可与内部连通, 使气体可以流通。珊瑚砂颗粒压缩破碎形态与孔隙率密切相关, 孔隙率含量低的颗粒表现出与石英砂相似的形态, 即颗粒逐级破碎。孔隙率含量高的颗粒往往表现出“骨架压缩”现象, 骨架破碎伴随细小的碎屑产生, 碎屑不脱离骨架直至压缩至粉末。通过统计分析, 得到了珊瑚砂圆形、枝状和片状颗粒的弹性模量、屈服强度和破碎强度, 明确了各种颗粒强度与粒径的相关性, 为研究宏观珊瑚砂力学特性提供参数依据。进一步得到了屈服与破碎应力-应变的指数分布规律, 为后续进一步探索颗粒破碎特性奠定基础。

关 键 词: 珊瑚砂; 孔隙率; 颗粒破碎; 破碎强度; 应力-应变

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 02-0352-09

Study on particle structure and crushing behaviors of coral sand

LÜ Ya-ru¹, WANG Chong¹, HUANG Hou-xu², ZUO Dian-jun³

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Tianjin 300456, China)

Abstract: The physical and mechanical properties of coral sand particles determine the macro mechanical behaviors of coral sand, which is closely related to several geotechnical engineering problems, especially those related to particle breakage. The apparent and internal structure characteristics of coral sand particles were studied by SEM and X-CT tests. It was found that the coral sand particles were porous. The porosity of coral sand particles with biological skeleton components was as high as 41%, while the porosity of coral sand particles formed by weathering and depositing was less than 20%. Most of the pores on the surface of the particles can be connected with the interior so that the gas can flow through the particles. The failure type of coral sand particles was closely related to the porosity. The coral sand particles with low porosity were broken into fragmentations step by step, similar to silica sand particles. The coral sand particles with high porosity were gradually compressed with the failure of skeleton. The failure of the skeleton was accompanied by the formation of fine detritus which did not detach from the skeleton until the particles were compressed into powder. The elastic modulus, yielding strength and crushing strength of circular, branched and flaky coral sand particles were determined by compression tests and statistical analysis. The correlations between particle strength and particle size was clarified, which provided parameter basis for studying the mechanical properties of coral sand. Furthermore, the stress-strain curves of yielding and crushing were exponentially distributed, which laid a foundation for further exploration of particle crushing characteristics in the future.

Keywords: coral sand; porosity; particle crushing; crushing strength; stress-strain

1 引 言

颗粒的强度、破碎等细观力学特性决定着岩土

体的宏观力学机制, 与岩土蠕变、土-结构相互作用、强夯、能源开发、土石坝等岩土工程密切相关^[1-5]。岩土颗粒的力学特性受颗粒尺寸、颗粒形状、配位

收稿日期: 2020-07-03

修回日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51779264); 江苏省自然科学基金面上项目 (No. BK20171399); 中央高校基本科研业务费 (No. B200202119); 安徽省自然基金 (No. 2008085QE219); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (No. TKS20200403)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51779264), the General Program of Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20171399), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200202119), the Natural Science Foundation of Anhui (2008085QE219) and the Basic Scientific Research Service Funds of Central Level Public Welfare Research Institutes (TKS20200403).

第一作者简介: 吕亚茹, 女, 1987 年生, 博士, 青年教授, 主要从事海洋岩土方面的科学研究。E-mail: yaru419828@163.com

通讯作者: 左殿军, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事粗粒土本构模型和数值模拟研究工作。E-mail: zdj647@163.com

数、矿物成分、加载形式等因素影响,可通过图像技术、力学试验、数值模拟等方法进行研究。颗粒尺寸的影响往往通过试验前后的级配曲线进行表征^[6],颗粒形状常通过圆度、球度和光滑度来反映^[7],这两个参数决定着岩土受荷后颗粒的旋转、重分布和配位数变化。颗粒的矿物成分主要控制颗粒强度和刚度^[8],还影响着不同荷载条件下颗粒的应变率效应^[9-10]。配位数^[11]是细观颗粒特性与宏观力学特性之间的纽带和桥梁,取决于细观颗粒尺寸、形状及破碎特性,与砂土密实度和级配等宏观参数相统一^[12]。然而,目前为止针对具有复杂内部结构的砂土颗粒物理力学特性的研究还十分有限,例如碳酸钙岩土。

碳酸钙岩土主要由碳酸盐的风化或海洋生物碎屑(如珊瑚、有孔虫和贝壳等)的搬运沉淀而成,珊瑚砂就是其中之一,多分布于北纬 30° 至南纬 30° 之间的热带海洋中,如地中海沿岸、埃及红海、伊朗波斯湾、我国南海等。Poulos^[13]认为钙质岩土粒径分布较广,大到砂颗粒,小到黏土颗粒,但主要分布在砂土和粉土序列,因此,珊瑚砂是一种典型的海相岩土。由于珊瑚砂孔隙率高、压缩性大、易破碎^[5, 14],常导致地基承载力低^[3]、桩基承载力不足^[4]、不均匀沉降大、上部结构裂缝等问题,因此被定义为问题岩土。

随着近年来海洋开发浪潮,与珊瑚砂相关的岩土工程问题日益突出,国内外学者们也针对珊瑚砂颗粒的力学特性开展了相应研究。Ma 等^[9]对粒径为 3~12 mm 的珊瑚砂颗粒进行了约 400 次压缩试验,并对其强度、破碎方式、分形维数进行了研究。Kuang 等^[15]通过试验和离散元数值模拟研究了粒径在 5~17 mm 范围内钙质颗粒的破碎行为,发现随着粒径的增大,钙质颗粒破碎方式由脆性破碎过度到连续破碎。周博等^[16]通过高精度 X 射线 μ CT 扫描技术,得到珊瑚砂颗粒高精度断层图,重构了珊瑚砂颗粒的三维结构,发现珊瑚砂颗粒内孔隙较好地符合三维分形特征,且分形维数的大小与孔隙率大小成正相关关系。蒋明镜等^[17-18]采用自制的高精度单颗粒加载仪,对不同粒径、形状的南海珊瑚砂颗粒进行了单颗粒破碎试验,探究了静载荷作用下珊瑚砂单颗粒强度特征,并对循环荷载下珊瑚砂单颗粒力学行为进行了研究。张丙树等^[19]开展了不同粒径珊瑚砂的压缩试验,借助砂土微观结构提取装置和图像处理软件,分析了珊瑚砂压缩过程中颗粒破碎过程及其微观结构。

本文在上述研究的基础上,通过扫描电镜试验和 X-CT 试验表征了珊瑚砂颗粒的表观和内部结

构,量化了珊瑚砂颗粒的孔隙率。又通过 X 射线衍射(XRD)试验和颗粒骨架相对密度试验得到了珊瑚砂颗粒的主要矿物成分和骨架密度。在系统地得到珊瑚砂颗粒物理特性的基础上,通过颗粒压缩试验,基于统计分析方法,得到不同形状珊瑚砂颗粒的弹性模量、屈服应力与破碎应力,为后续研究珊瑚砂宏观力学特性提供参考依据和参数来源。

2 珊瑚砂颗粒的物理特性

2.1 珊瑚砂表观及内部结构

因海洋珊瑚砂的生物成因,其表观和内部结构特征与陆源石英砂差异较大。通过电子显微镜观察不同类型珊瑚砂颗粒的表观形态,见图 1。其中,图 1(a)为珊瑚碎屑,尚能看出生物骨架特征,颗粒多尖角,其表面有规律地分布着孔洞和气泡,将该图片放大发现孔洞尺寸在 40 μm 左右;图 1(b)为一种枝状珊瑚砂颗粒的表观特征,可以发现这种颗粒具有如蜂巢一样的复杂内部结构,颗粒多不规则,有尖角,颗粒内有大的孔洞存在,孔径可达 70 μm ;图 1(c)为经风化、搬运和沉积而成的浑圆珊瑚砂颗粒,这种颗粒相对比较密实,放大后可以发现风化后孔隙内被豆腐渣样的物质填充,说明颗粒由珊瑚残骸经沉积而成,沉积过程有胶结物产生,颗粒表面有附着物,胡明鉴等^[20]通过导电率研究了表面附着盐量。作为对比,图 1(d)给出了石英砂颗粒的表观结构,与珊瑚砂相比,石英砂浑圆密实,放大后表面具有明显的纹路,是颗粒风化搬运的痕迹。

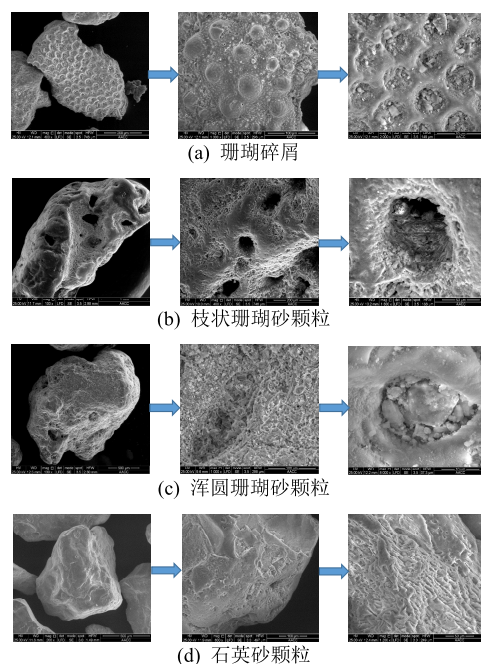


图1 珊瑚砂颗粒的表观特征

Fig.1 Superficial characteristics of coral sand particles

为了探索珊瑚砂颗粒内部结构,采用高分辨三维 X 射线显微成像系统 X-CT 无损探测技术,对珊瑚砂三维内部结构进行研究,采用几何与光学二级放大技术,可在大工作距离下高分辨率成像,最高空间分辨率为 $0.5\ \mu\text{m}$,标准图像为 16 位灰度,1 024 像素 $\times$ 1 024 像素。基于该观测系统,对 4 个枝状珊瑚砂样品(编号为 1[#]~4[#])进行切片扫描,4 个样品像素尺度分别为 4.20 、 4.68 、 6.85 、 $6.78\ \mu\text{m}$,每个试样沿高度连续扫描约 1 000 张图像,如图 2 所示。发现珊瑚砂孔隙差异性非常大,孔道截面形状有很强的规律性,具有大量长条形截面孔道。有些珊瑚砂颗粒内部存在连通的空腔,空腔直径可占颗粒直径的一半,这是原始生物骨骼的保留形态。

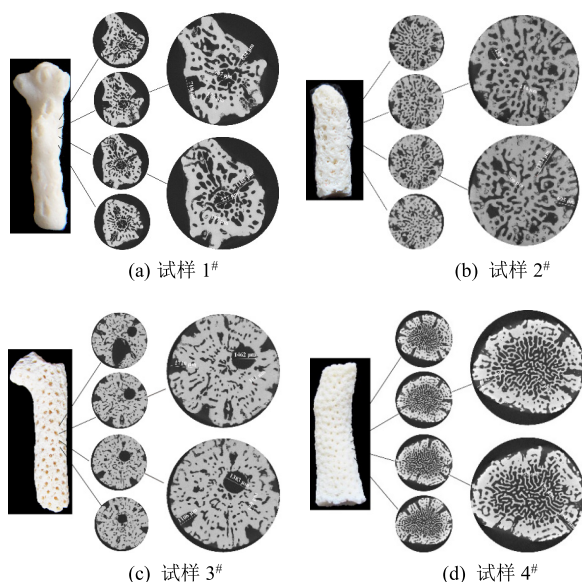


图 2 珊瑚砂颗粒 X-CT 扫描切片

Fig.2 Scanning section of coral sand particles by X-CT

进一步,通过图像重构软件对珊瑚砂颗粒的内部结构进行了三维重构,如图 3 所示。分析珊瑚砂颗粒三维孔隙结构特征,发现珊瑚砂颗粒内孔隙非常发育,多数珊瑚砂颗粒表面孔洞都能延伸至颗粒内部,孔道连通性好。通过像素体积计算得到 4 个珊瑚砂颗粒样品的孔隙率分别约为 34%、27%、26% 和 41%。可以看出,珊瑚砂颗粒孔隙率高,孔隙分布多样。这种高孔隙率主要来源于两部分,第一是孔道尺寸大,第二是孔道密集。周博等^[16]曾采用同样的方法对 11 个珊瑚砂颗粒进行扫描和重构,并将珊瑚砂颗粒分为两类,第 1 类 5 个样本颗粒表面孔隙较为发达,表面较多沟壑,颗粒孔隙率平均值为 26%,方差约为 6%;第 2 类颗粒表面较为平坦,6 个样本的颗粒孔隙率平均值为 8%,方差约为 4%。究其原因,两种砂颗粒形成原因不同,孔隙率含量

高的颗粒多保留生物骨架成分,而孔隙率低的颗粒充分受物理和化学沉积作用。这一结论可以通过本文的观测结果进行佐证,本文的 4 个研究样本为枝状珊瑚砂颗粒,尚保留明显的珊瑚枝丫成分,因此孔隙率高达 41%。

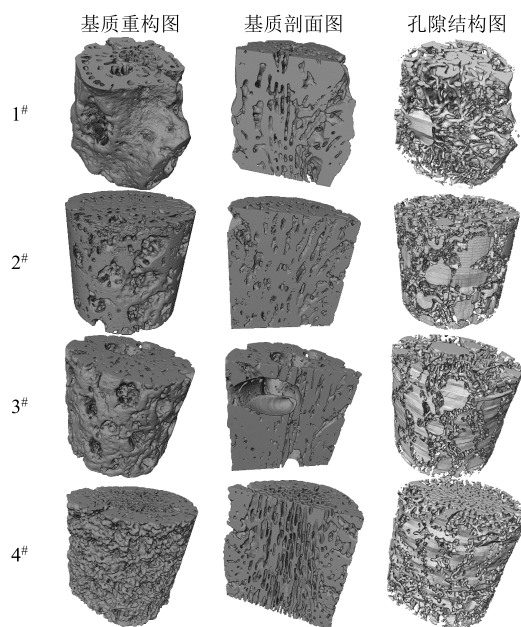


图 3 珊瑚砂颗粒骨架及孔隙三维重构结果

Fig.3 3D reconstruction for the pores and skeleton of coral sand particles

2.2 珊瑚砂骨架密度

采用真密度仪测试不同粒径珊瑚砂颗粒的骨架密度。该仪器的测试原理是通过将试样仓内的空气置换为已知气压和密度的氦气来精确测量试样的体积。该方法对试样体积测量准确,减小了传统比重瓶法、浮称法和虹吸管法测定骨架相对密度时的人为误差。试验对 3 种试样进行了测试,包括两种珊瑚砂和一种石英砂,其中两种珊瑚砂分别取自我国南海不同地区,石英砂为 ISO 标准砂。试验前对试样进行烘干密封,通过标准筛对珊瑚砂和标准石英砂进行筛分,试样分为 5 个等级: $0.15\sim 0.30$ 、 $0.30\sim 0.60$ 、 $0.60\sim 1.18$ 、 $1.18\sim 2.36$ 、 $2.36\sim 5.00\ \text{mm}$ 。每次试验重复 3~5 次。表 1 为珊瑚砂和石英砂的骨架密度测试结果,由于石英砂颗粒密实,所以无论颗粒粒径大小,骨架密度测试结果稳定在 2.67 左右。对于珊瑚砂,不同地方取样的珊瑚砂骨架密度存在差异,说明珊瑚砂骨架密度与其形成环境有关。不同粒径珊瑚砂骨架密度相差不大,约在 2.81 左右^[5]。颗粒粒径的变化没有影响骨架密度的大小,说明颗粒内部孔隙是气通的(是否水通与孔隙尺寸有关,有待进一步研究),换言之,严格封闭的内孔隙所占比例有限。

表1 不同粒径珊瑚砂与石英砂的颗粒骨架密度
Table 1 Summary of the specific gravity of coral sand and silica sands

颗粒粒径 /mm	珊瑚砂 1	珊瑚砂 2	石英砂
0.15~0.30	2.822	2.790	2.671
0.30~0.60	2.812	2.786	2.668
0.60~1.18	2.811	2.807	2.664
1.18~2.36	2.810	2.811	2.662
2.36~4.74	2.822	2.807	2.664
4.75~9.50	—	2.825	—

2.3 珊瑚砂颗粒的主要矿物成分

现已有对钙质砂的定义认为, 等效碳酸钙的含量大于 50% 的砂为钙质砂, 而珊瑚砂的碳酸钙含量往往大于 90%。为了量化珊瑚砂颗粒的矿物组分, 对标准筛筛分出的不同粒径的珊瑚砂颗粒进行 XRD 测试, 样品质量不低于 0.5 g。图 4 为不同粒径珊瑚砂矿物衍射图谱, 结果表明, 珊瑚砂主要以生物文石、含镁方解石为主, 并夹杂有石英矿物, 其他剩余成分含量较少。利用不同矿物的衍射波峰面积, 半定量计算出不同粒径珊瑚砂中各个物相所占的比例, 见表 2, 发现珊瑚砂的主要成分为碳酸盐, 其含量随着粒径的增大有所增大, 且远远大于 50%, 小粒径可高达 90%。

3 珊瑚砂颗粒的强度及破碎特性

3.1 珊瑚砂颗粒强度试验

使用小型 MTS 联合高速摄像技术开展试验, 试验时颗粒压缩过程可通过高速摄像机记录。本文共开展珊瑚砂与石英砂颗粒压缩试验 360 组, 部分试验颗粒见图 5, 图中纵横坐标表示 0~100 mm, 每个方格尺寸为 10 mm×10 mm。试验前对颗粒进行筛分, 初步划分颗粒尺寸。圆形珊瑚砂颗粒共 136 组, 包括筛孔尺寸 3.35~4.75 mm 的大颗粒 100 组 (见图 5(a)), 筛孔尺寸 1.18~2.36 mm 的小颗粒 36 组 (见图 5(b), 编号 1~36)。枝状珊瑚砂颗粒共 64 组, 包括大颗粒 30 组 (未在图中展示), 小颗粒 34 组 (见图 5(b), 编号 37~70)。片状珊瑚砂颗粒共 60 组, 其中大颗粒 30 组, 小颗粒 30 组 (见图 5(b), 编号 71~100)。另有 100 颗石英砂颗粒作为参考试验, 粒径分布在 1.18~2.36 mm, 见图 5(c)。为保证试验拥有相似的应变率, 大颗粒采用加载速率 0.5 mm/min, 小颗粒采用 0.22 mm/min。试验前对每个颗粒编号, 对于圆形颗粒, 取 3 个不同方向上直径的平均值表征颗粒大小; 对于枝状颗粒, 枝状的直径和长度表征颗粒大小; 对于片状颗粒, 取片状平面方向两个尺度和厚度表征颗粒尺寸。

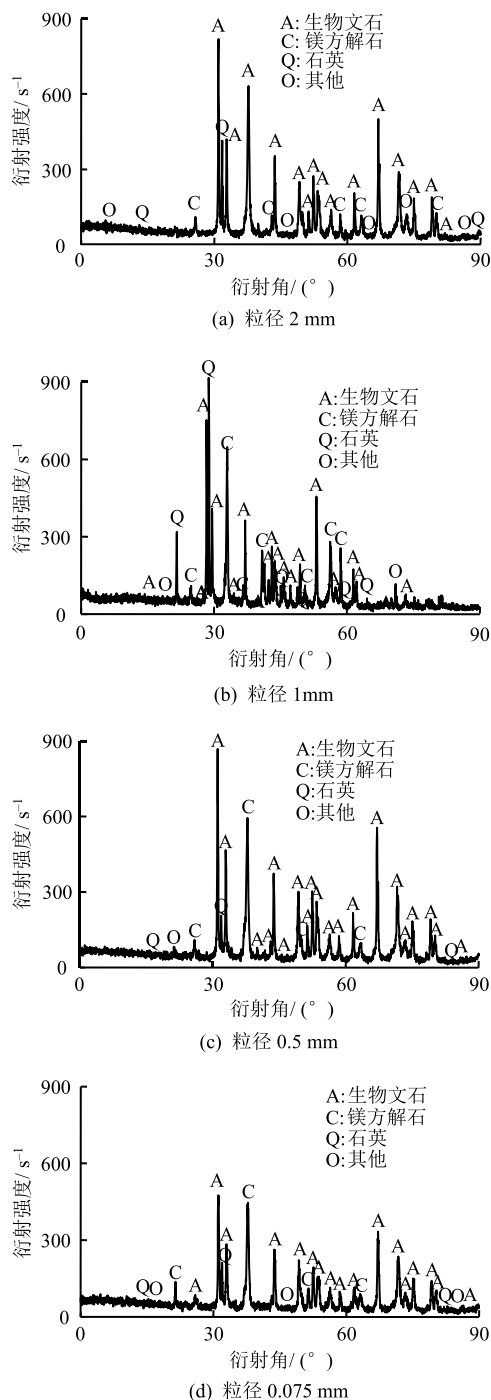


图4 XRD 衍射结果

Fig.4 Results of XRD measurements on particles

表2 珊瑚砂颗粒的矿物成分

Table 2 Summary of mineralogy compositions for coral sand

粒径 /mm	生物文石 /%	镁方解石 /%	石英 /%	其他 /%
> 2.000	55.52	24.57	17.86	2.05
1.450~2.000	53.35	9.26	19.47	17.95
1.000~1.450	57.12	13.23	16.26	13.39
0.710~1.000	59.14	11.32	14.95	14.59
0.500~0.710	66.63	21.59	5.72	6.06
0.355~0.500	63.91	19.22	14.29	2.57
0.250~0.355	67.69	22.79	6.38	3.14
0.160~0.250	68.26	20.39	5.28	6.08
0.075~0.160	68.70	21.14	3.84	6.32

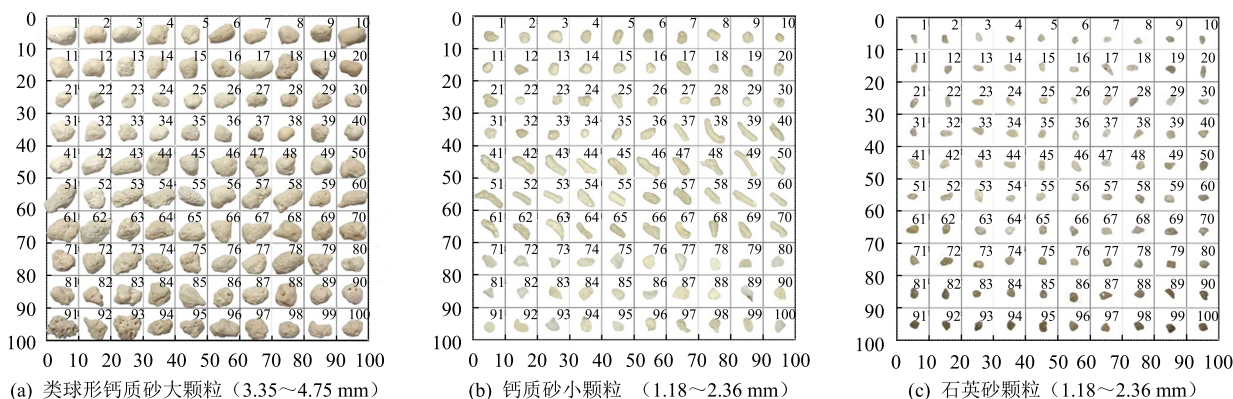


图 5 试验珊瑚砂及石英砂颗粒

Fig.5 Particle morphology of coral sand and silica sands

3.2 珊瑚砂颗粒压缩曲线

图 6 为试验得到的荷载-位移曲线及其关键节点上的颗粒压缩形态, 其中 6(a)、6(b)、6(c) 和 6(d) 分别对应珊瑚砂圆形颗粒、枝状颗粒、片状颗粒及石英砂颗粒的试验结果。

从图中可知, 随着压力的增大, 颗粒表现出弹性变形、屈服、应变硬化和颗粒破碎等阶段。从放大的插图可知, 颗粒压缩过程中的弹性阶段十分明显, 因弹性模量和屈服点是表征材料力学性能的重

要指标, 因此, 通过压缩曲线可得到每个颗粒的弹性模量和屈服应力。屈服点之后, 颗粒进入明显的应变软化阶段, 与石英砂颗粒相比, 多孔珊瑚砂颗粒的屈服段较长且平坦。随着荷载的继续增加, 颗粒进入应变硬化阶段, 荷载不断累积, 颗粒开始发生破碎, 破碎点与力-位移曲线上的峰值点相对应。小的峰值表明颗粒表面的微凸体断裂, 这些微凸体断裂一般不被定义为颗粒失效^[21], 只有明显的颗粒破碎或断裂对应的大峰值才被认为是颗粒破碎, 此

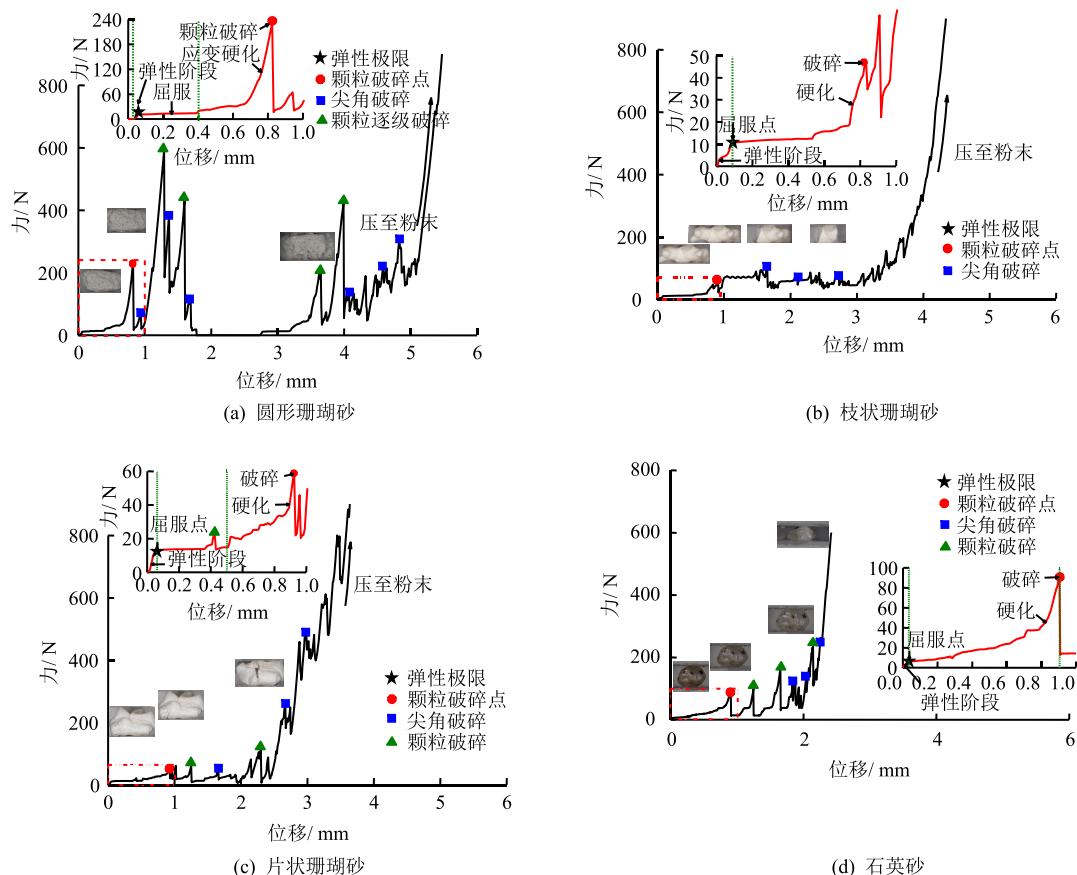


图 6 颗粒压缩曲线

Fig.6 Compression curves of sand particles

时可以观察到明显的破碎和碎片。颗粒破碎是一个渐进过程,破碎后的颗粒会部分或共同承担上部荷载,待荷载达到一定值后进一步破碎。因此,有学者将压缩曲线上第一个典型峰值点定义为颗粒破碎点^[21],也有学者将整个压缩曲线的最大峰值点定义为破碎点^[9]。本文的目的是研究颗粒强度和破碎特性,因此,将第1个典型峰值点定义为破碎点,意味着颗粒极限承载的出现。

3.3 珊瑚砂颗粒弹性模量与破碎应力

Kwag 等^[22]认为颗粒破碎强度(拉伸强度)为破碎力与受力面积的比值。基于此,破碎前任一时刻的应力 σ 与应变 ε 可通过下式计算:

$$\sigma = \frac{c_N F}{bd} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{s}{d} \quad (2)$$

式中: F 为力,破碎应力计算时 F 为第1个典型峰值对应的力; s 为位移,破碎应变计算时 s 为第1个典型峰值对应的位移; b 和 d 为初始颗粒尺寸; c_N 为拉应力计算系数。对于近似圆形颗粒,受力面积为颗粒的近似直径;对于枝状颗粒,受力面积为垂直长度方面的横截面积;对于片状颗粒,受力面积为颗粒厚度与长度的乘积。

基于上述定义,通过颗粒的荷载-位移曲线计算得到颗粒的屈服应力、屈服应变、弹性模量、破碎应力、破碎应变等结果。图7(a)、7(b)和7(c)为弹性模量、屈服应力和颗粒破碎应力结果。基于Weibull统计分析方法,以极限弹性率、屈服率或破碎率为63%(即成活率为37%)所对应的数值作为上述参数的统计结果。发现珊瑚砂圆形、枝状、片状和石英砂颗粒对应的弹性模量分别为58、114、81、134 MPa, Weibull参数分别为1.731、1.577、1.570和1.771。不难发现石英砂的弹性模量最大,枝状和片状珊瑚砂颗粒保留了原生生物骨骼特征,因此弹性模量较大,而经过沉积和海水搬运等过程后发生物理和化学变化的珊瑚砂圆形颗粒弹性模量最小。圆形颗粒的离散性相对较低,枝状和片状较高。

珊瑚砂圆形、枝状、片状和石英砂颗粒对应的屈服应力分别为0.6、0.1、1.0、0.3 MPa, Weibull参数分别为2.214、0.955、1.750和3.002。片状珊瑚砂的屈服强度最大,形状规则的珊瑚砂圆形颗粒次之,而枝状颗粒屈服强度最小。珊瑚砂圆形、枝状、片状和石英砂颗粒对应的破碎应力(颗粒强度)分别为9.7、0.7、5.2、28.6 MPa, Weibull参数分别为1.760、1.239、1.590和1.920。石英砂的破碎强度

最大,形状规则的珊瑚砂圆形颗粒次之,而枝状和片状颗粒极易发生局部破碎,因此强度最小。4种砂颗粒中,屈服强度和破碎强度并不一致,说明形状、矿物成分等因素对颗粒强度的影响程度随荷载等级而变化。上述Weibull分布的参数 m (表征试验的离散性)的数值基本小于2,符合岩土颗粒的分布规律。

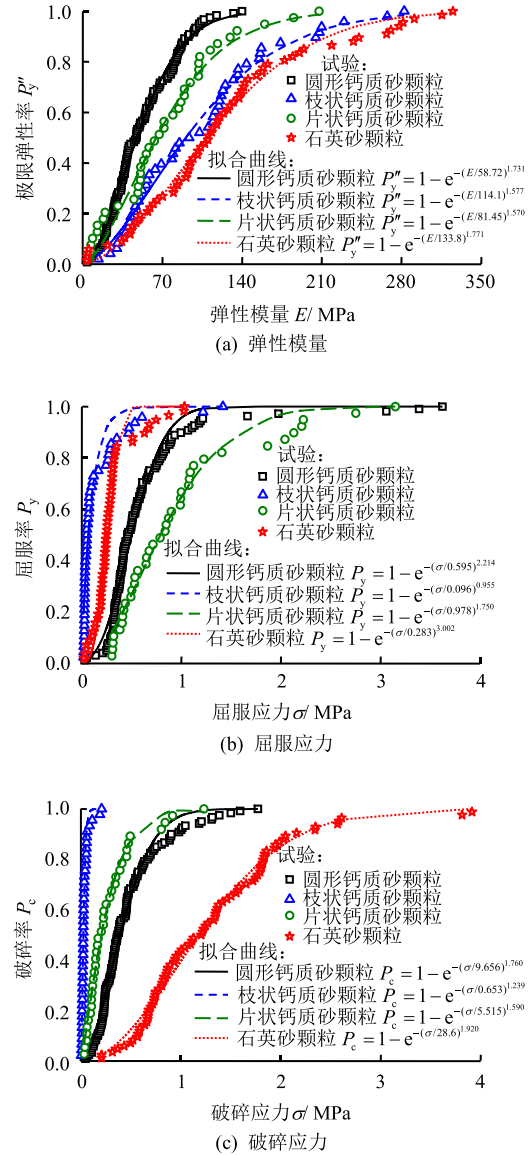


图7 颗粒弹性模量、屈服应力与破碎应力

Fig.7 Variation of Young's modulus, yielding stress and crushing stress of sand particles

3.4 颗粒大小对强度的影响

为了反映颗粒大小对颗粒强度的影响,将所有试验屈服应力、破碎应力与试样有效粒径(d_e)的关系表述如图8,其中有效粒径为体积等效的圆形颗粒直径。为了验证结果的可靠性,将Ma^[9]、Nakata^[23]、Zhang^[24]等的研究结果添加到图中作为参考,发现上述参考点与本文试验结果拟合直线的规律较好吻合。

与前期结果一致,颗粒强度的对数随粒径对数的增大而线性减小。值得注意的是,不同形状珊瑚砂颗粒强度对粒径的敏感度不同。圆形、枝状、片状和石英砂颗粒对应的屈服强度变化斜率分别为 1.65、2.79、2.12 和 2.32,而破碎强度变化斜率分别为 0.95、1.27、1.92 和 2.36。如前文所述,颗粒的形状、大小、矿物成分等因素对颗粒强度的影响程度随荷载等级而变化。以颗粒大小为例,其影响随荷载的增大而减小,因此,破碎应力对颗粒粒径的敏感度明显降低。

4 颗粒破碎讨论

由于颗粒具有明显的个体性,所以上述得到的

弹性模量、屈服应力和破碎应力都是通过统计分析得到的结果,这种研究方法和表达形式已经十分成熟。为了进一步分析 4 种颗粒的屈服应力-应变和破碎应力-应变分布,图 9 给出了所有颗粒屈服点和破碎点的应力-应变分布。理想状态下,作为重复试验,所有试验点的重合度越高说明试验结果越好。然而,天然形成的砂土颗粒存在个体差异,每个颗粒又表现出个体特征,如颗粒粒径形状和粒径不同,随之矿物成分、内部结构(孔隙率)及内部缺陷也各不相同。有趣的是,4 种颗粒的屈服应力-应变和破碎应力-应变大概呈指数分布,且集中在两条指数曲线围成的区间内,意味着颗粒破碎时应力-应变关系可通过下式预测:

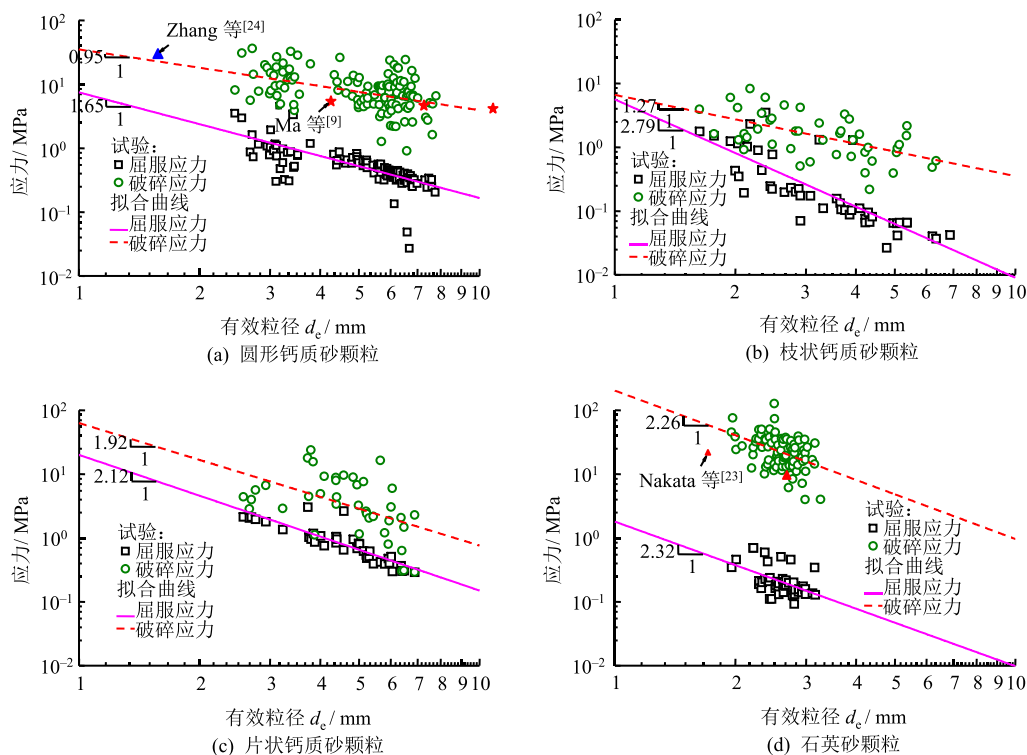


图 8 珊瑚砂与石英砂颗粒强度随粒径变化

Fig.8 Variation of yielding strength and crushing strength with particle size of coral sand and silica sand

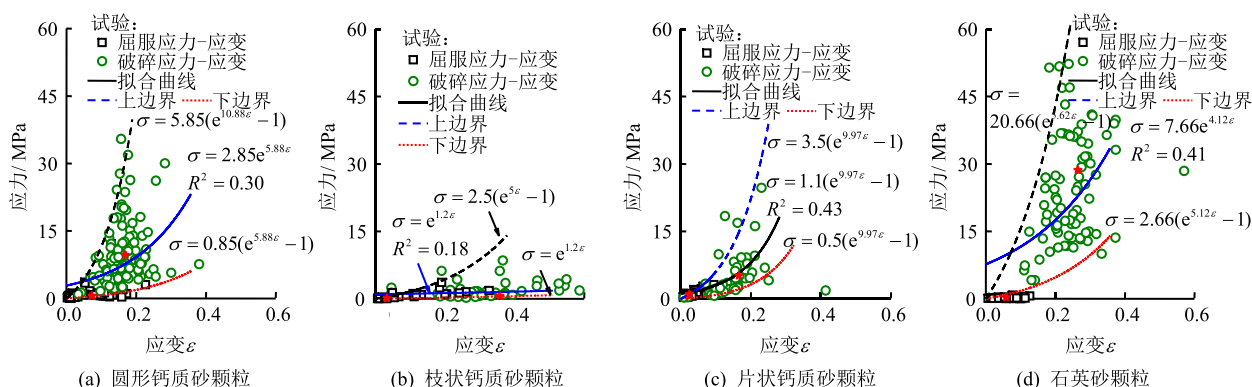


图 9 珊瑚砂与石英砂颗粒屈服与破碎应力-应变分布

Fig.9 Distributions of the stress-strain curves of yielding and crushing of coral sand and silica sand

$$\sigma = a(e^b - 1) \quad (3)$$

式中: a 和 b 为表征颗粒应力-应变关系的参数。从数据分布可以看出, 高孔隙率的珊瑚砂离散性更强, 具有尖角的枝状和片状珊瑚砂颗粒尤甚。换言之, 规则颗粒的屈服和破碎应力-应变随某一个参数的变化可能分布在某一指数曲线的附近。

需要讨论的是, 应力-应变分布图具有明显的指数分布规律, 由此分布规律可以洞察颗粒破碎应力-应变之间存在某种规律, 但这种分布规律的物理意义和实际应用尚且不清, 有待进一步研究和分析。可通过理想颗粒材料的强度试验进行验证。

5 主要结论

本文通过扫描电镜试验和 X-CT 试验表征了珊瑚砂颗粒的表观和内部结构特征, 又通过骨架相对密度试验得到了珊瑚砂颗粒的骨架密度。在了解珊瑚砂颗粒物理特性的基础上, 通过颗粒压缩试验, 基于统计分析得到不同形状珊瑚砂颗粒的弹性模量、屈服应力与破碎应力, 为后续研究珊瑚砂宏观力学特性提供参考依据和参数来源。主要结论如下:

(1) 珊瑚砂颗粒多孔隙, 多数表面孔隙可与内部连通, 这些孔隙可以通过气体(气通)。颗粒孔隙率与颗粒形成过程密切相关, 保留生物骨骼成分的颗粒孔隙率高达 41%, 而经过风化、沉积而成的珊瑚砂颗粒孔隙率小于 20%。

(2) 珊瑚砂主要矿物成分为碳酸盐, 随颗粒粒径增大碳酸盐的含量有所降低。骨架密度随颗粒大小变化不明显, 约为 2.81。

(3) 珊瑚砂颗粒压缩破碎的形态与孔隙率密切相关, 孔隙率含量低的颗粒表现出与石英砂相似的形态, 即颗粒逐级破碎直至成粉末。孔隙率含量高的颗粒往往表现出骨架失效的连续破坏特性, “磨碎”过程中产生碎屑, 不脱离主体直至压缩至粉末。

(4) 通过统计分析, 得到珊瑚砂圆形、枝状和片状颗粒的弹性模量、屈服强度和破碎强度, 明确各种颗粒强度与粒径的相关性, 为研究宏观珊瑚砂力学特性提供参数依据。

(5) 本文探索性地对颗粒屈服和破碎应力-应变关系进行探讨, 发现屈服与破碎应力-应变呈指数分布, 但其物理意义有待进一步研究和发掘, 抛砖引玉, 供后续研究讨论。

参考文献

[1] MCDOWELL G R. On the yielding and plastic compression of sand[J]. **Soils and Foundations**, 2002,

42(1): 139-145.

- [2] MESRI G, VARDHANABHUTI B. Compression of granular materials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(4): 369-392.
- [3] WANG Xin-zhi, WANG Xing, JIN Zong-chuan, et al. Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef[J]. **Ocean Engineering**, 2017, 134: 77-86.
- [4] RITTIRONG A, SHANG J Q, MOHAMEDHASSAN E, et al. Effects of electrode configuration on electrokinetic stabilization for caisson anchors in calcareous sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(3): 352-365.
- [5] LÜ Y, LI F, LIU Y, et al. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general stress states[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(11): 1601-1611.
- [6] CIL M B, SOHN C, BUSCARNERA G. DEM modeling of grain size effect in brittle granular soils[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2020, 146(3): 04019138.
- [7] ALTUHAFI F N, COOP M R. Changes to particle characteristics associated with the compression of sands[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(6): 459-471.
- [8] BONO J P D, MCDOWELL G R, WANATOWSKI D. DEM of triaxial tests on crushable cemented sand[J]. **Granular Materials**, 2014, 16: 563-572.
- [9] MA L, LI Z, WANG M, et al. Effects of size and loading rate on the mechanical properties of single coral particles[J]. **Powder Technology**, 2019, 342: 961-971.
- [10] HUANG J, XU S, HU S. Influence of particle breakage on the dynamic compression responses of brittle granular materials[J]. **Mechanics of Materials**, 2014, 68: 15-28.
- [11] KONRAD J, SALAMI Y. Particle breakage in granular materials-a conceptual framework[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2018, 55(5): 710-719.
- [12] TODISCO M C, WANG W, COOP M R, et al. Multiple contact compression tests on sand particles[J]. **Soils and Foundations**, 2017, 57: 126-140.
- [13] POULOS H G. The mechanics of calcareous sediments[M]// Australian Geomechanics. Singapore: Institution of Engineers, 1988: 8-41.
- [14] LÜ Y, LI X, WANG Y. Particle breakage of calcareous sand at high strain rates[J]. **Powder Technology**, 2020, 366: 776-787.
- [15] KUANG D, LONG Z, GUO R, et al. Experimental and

- numerical investigation on size effect on crushing behaviors of single calcareous sand particles[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2020. DOI: 10.1080/1064119X.2020.1725194.
- [16] 周博, 库泉, 吕珂臻, 等. 钙质砂颗粒内孔隙三维表征[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊 1): 41-48.
ZHOU Bo, KU Quan, LÜ Ke-zhen, et al. Three-dimensional characterization of inner pores in calcareous sand particles[J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2019, 52(Suppl.1): 41-48.
- [17] 蒋明镜, 杨开新, 陈有亮, 等. 南海钙质砂单颗粒破碎试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(增刊): 150-155.
JIANG Ming-jing, YANG Kai-xin, CHEN You-liang, et al. Experimental study on crushability of single calcareous sand obtained from South China Sea[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2018, 45(Suppl.): 150-155.
- [18] 蒋明镜, 许泽伟, 刘俊, 等. 循环荷载下钙质砂单颗粒破碎试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊 1): 23-28.
JIANG Ming-jing, XU Ze-wei, LIU Jun, et al. Experimental study on single-particle crushing of calcareous sand under cyclic loading[J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2019, 52(Suppl.1): 23-28.
- [19] 张丙树, 顾凯, 李金文, 等. 钙质砂破碎过程及其微观机制试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 725-733.
ZHANG Bing-shu, GU Kai, LI Jin-wen, et al. Study on crushing process and microscopic mechanism of calcareous sand [J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(4): 725-733.
- [20] 胡明鉴, 蒋航海, 崔翔, 等. 钙质砂电导率与相关性问题的初探[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 2): 158-162.
HU Ming-jian, JIANG Hang-hai, CUI Xiang, et al. Preliminary study of conductivity and correlation problems of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl.2): 158-162.
- [21] MCDOWELL G R. On the yielding and plastic compression of sand[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(1): 139-145.
- [22] KWAG J M, OCHIAI H, YASUFUKU N. Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength[C]//Engineering for Calcareous Sediments. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999: 79-86.
- [23] NAKATA Y, HYDE A F L, HYODO M. et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(5): 567-583.
- [24] ZHANG Y, BUSCARNERA G. Breakage mechanics for granular materials in surface-reactive environments[J]. **Journal of the Mechanics and Physics Solids**, 2018, 112: 89-108.