

DOI: 10.11779/CJGE2022S1002

侧限高压下珊瑚砂-石英砂混合料的压缩特性及颗粒破碎行为

王伟光¹, 姚志华^{*2}, 李婉², 张建华³

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 空军工程大学机场建筑工程教研室, 陕西 西安 710038;
3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

摘要: 珊瑚砂的工程力学特征已被广泛研究, 但特殊地域珊瑚砂并不是单独存在, 常夹杂硅质杂质等形成珊瑚砂混合料, 硅质杂质对珊瑚砂力学变形特性及颗粒破碎的影响机制尚不明晰。本文以标准石英砂充当硅质杂质, 开展控制相对密实度和掺砂率的侧限高压压缩试验, 对其压缩特性及颗粒破碎规律进行研究。试验结果表明, 随着掺砂率的增加, 珊瑚砂-石英砂混合料压缩变形逐渐降低, 但石英砂未对混合料压缩曲线的变化趋势产生明显影响。相对密实度、竖向压力及掺砂率均对珊瑚砂-石英砂混合料的颗粒破碎构成重要影响。相较于高密实度条件下, 低密实度时混合料在压缩过程中引起的颗粒破碎效应更为显著; 随着竖向压力的增加, 混合料的颗粒破碎效应逐步增大; 掺砂率的提高在一定程度上降低了颗粒破碎的发生, 这与石英砂较高的颗粒强度等因素密切相关。研究成果可对进一步认识硅质杂质对珊瑚砂压缩变形及颗粒破碎规律的影响提供一定参考和借鉴。

关键词: 珊瑚砂; 混合料; 侧限高压; 压缩变形; 颗粒破碎

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0006-06

作者简介: 王伟光(1996—), 男, 硕士, 主要从事工程力学方面的研究工作。E-mail: wangweiguang@nint.ac.cn。

Compression characteristics and particle crushing behavior of coral sand-quartz sand mixture under confined high pressure

WANG Wei-guang¹, YAO Zhi-hua², LI Wan², ZHANG Jian-hua³

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China, 2. Teaching and Research Office of Airport Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China, 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China)

Abstract: The special engineering mechanical characteristics of coral sand have been widely studied, but the coral sand in special areas is not isolated and often contains siliceous impurities to form coral sand mixture. The influence mechanism of the siliceous impurities on the mechanical deformation characteristics and particle breakage of the coral sand is still unclear. By using the standard quartz sand as the siliceous impurity, the confined high-pressure compression tests under different initial relative compactnesses and sand mass proportions are carried out to study its compression characteristics and particle crushing rules. The experimental results show that with the increasing proportion of quartz sand mass, the compressive deformation of the coral sand-quartz sand mixture decreases. However, the quartz sand has no obvious influences on the trend of its compression curve. The relative compactness, vertical pressure and sand mass proportion all have important effects on the particle breakage of the coral sand-quartz sand mixture. Compared with that at high compactness, the particle breakage effect of the mixture at low compactness is more significant in the process of compression. With the increase of the vertical pressure, the particle breakage effect of the mixture increases gradually. The increasing proportion of quartz sand mass reduces the occurrence of the particle breakage to a certain extent, which is closely related to the high particle strength of the quartz sand. The research results can provide some references for further understanding the influences of siliceous impurities on the compressive deformation and particle breakage of the coral sand.

Key words: coral sand; mixture; confined compression; compression deformation; particle breakage

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972374); 基础加强计划技术领域基金项目 (2019-JCJQ-JJ-082); 陕西省重点研发计划项目 (2022SF-084)

收稿日期: 2022-09-28

***通信作者** (E-mail: lightbright@163.com)

0 引言

珊瑚砂是发育于南北纬 30° 之间热带海洋环境中的一种较为特殊的岩土介质, 已有研究表明珊瑚砂矿物成分以长石、方解石为主, 化学成分中碳酸钙含量最高可达 97%^[1], 因此也被称为钙质砂、碳酸盐砂、钙质珊瑚砂等, 由于特殊的发育环境, 珊瑚砂颗粒结构疏松, 形状较不规则。其莫氏硬度低于硅质砂, 在受力过程中易引起颗粒的破碎, 受到了工程界及学术界的广泛关注^[2-4]。颗粒破碎已经成为珊瑚砂区别于其它特殊土的重要特征, 在工程施工过程中具有不可忽视的影响, 因此开展珊瑚砂压缩变形特性及颗粒破碎的试验研究具有重要的现实意义。

张家铭等^[5]在不同终止压力条件下进行侧限压缩试验, 结果表明颗粒破碎在钙质砂的压缩变形中具有重要影响。龙蛟等^[6]针对钙质砂开展多次加一卸载条件下的一维压缩试验, 结果指出颗粒破碎受加载历史的影响较为明显, 是压缩过程中影响变形的关键因素。马启峰等^[7]自行设计高压压力室在不同终止压力下开展侧限压缩试验, 并将石英砂作为对照组进行对比分析, 结果表明钙质砂的压缩变形较石英砂大, 更易发生压缩屈服及颗粒破碎。李彦彬^[8]选取不同地域钙质砂开展侧限压缩试验, 认为颗粒破碎是发生较大变形的重要原因。Miao 等^[9]对碳酸盐砂进行高压条件下的一维压缩试验和大剪切应变下的环剪试验, 对比分析认为压缩与剪切过程中产生的颗粒破碎趋势一致, 但最终的稳态性差异显著。

前人的研究成果与思路为珊瑚砂力学变形特征研究提供了很好借鉴, 但上述针对珊瑚砂压缩特性及颗粒破碎的研究多集中在纯珊瑚砂(钙质砂), 而实际工程中常因海风、暴雨等自然环境原因, 岛礁山麓块石碎化形成的陆相硅质沉积物常掺入珊瑚砂中形成混合物^[10], 其工程变形特性难以预测。硅质沉积物颗粒结构致密, 其掺入对珊瑚砂压缩变形和颗粒破碎的影响鲜有相关报道。本文以标准石英砂充当硅质杂质, 设置不同掺砂率配置珊瑚砂-石英砂混合料, 进行侧限压缩试验, 并对混合料压缩前后试样进行颗粒分析试验, 探究不同初始物理条件对混合料变形行为及颗粒破碎规律的影响, 以期为进一步贴近珊瑚砂实际工程建设提供一定参数依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用砂取自中国南海某岛礁, 如图 1(a) 所示。珊瑚砂中夹杂有贝壳、碎礁和珊瑚残枝等, 整体呈浅

灰色。为充分研究珊瑚砂压缩试验前后颗粒的破碎状况, 在《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》^[11]要求的基础上将筛孔直径细分加密, 各层筛的孔径分别为 2, 1.43, 1.0, 0.85, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 mm。通过对珊瑚砂筛分得其颗粒级配如图 2 所示, 试验原料以中粒为主, 局部为粗粒。具体物理参数见表 1。其不均匀系数 $C_u=2.670<5$, 曲率系数为 $C_c=1.168>1$, 为级配不良的颗粒材料。珊瑚砂材料中 2.0 mm 以下的颗粒占主要部分, 因此主要取该部分珊瑚砂颗粒进行试验。

试验用石英砂为福建厦门标准砂(ISO), 呈浅褐色, 如图 1(b) 所示, 颗粒形状较为规则。其主要成分为 SiO_2 , 级配曲线如图 2 所示。其最大粒径为 2.0 mm, 不均匀系数 C_u 为 6.494, 曲率系数 C_c 为 1.044, 级配良好, 其重要参数详见表 1。

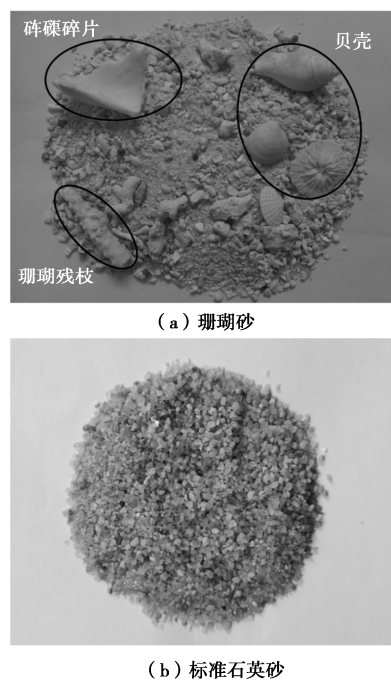


图 1 珊瑚砂和标准石英砂材料

Fig. 1 Test materials of coral sand and quartz sand

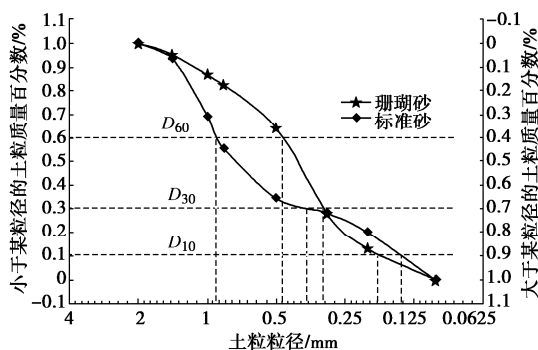


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of particles

表1 材料基本物理参数

Table 1 Basic physical indices of materials

| 材料 | 最大孔隙比 e_{\max} | 最小孔隙比 e_{\min} | 颗粒相对密度 G_s | 不均匀系数 C_u | 曲率系数 C_c |
|-----|------------------|------------------|--------------|-------------|------------|
| 珊瑚砂 | 1.410 | 0.770 | 2.739 | 2.670 | 1.168 |
| 石英砂 | 0.455 | 0.725 | 2.658 | 6.494 | 1.044 |

1.2 试验方案与方法

试样配置过程中, 设定初始含水率为 10%, 取相对密实度为 0.3, 0.5, 0.7, 分别对应疏松、中密、密实三种密实状态^[12]。试验中以石英砂充当硅质杂质, 在珊瑚砂中掺入不同质量比例的石英砂, 其掺砂率计算公式如下:

$$m_s = \frac{m_Q}{m_Q + m_C} \quad (1)$$

式中, m_Q , m_C 分别表示石英砂和珊瑚砂的质量 (g)。

掺加形式为石英砂各不同粒组的整体掺加, 即通过公式计算出珊瑚砂与石英砂各自质量后, 依据各粒组的质量占比进行称取以及最后的混合, 而后按照目标含水率计算并添加水分, 放入保湿器中保湿 24 h, 复核含水率, 满足规范^[11]要求后, 进行环刀试样制备。掺加过程中应保证相对密实度不变。

在本试验中设定掺砂率 m_s 为 0% (纯珊瑚砂)、10%、20%、30% 和 100% (纯石英砂) 共 5 种。为准确测定试样在加载过程中的颗粒破碎, 对同一初始条件制作试样 6 个, 其中一个用于测定试样全应力加载过程中的压缩变形及竖向压力 4000 kPa 条件下的颗粒破碎, 其余 5 个试样保持加载路径与前者相同, 分别在终止压力 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa 处停止试验, 测定该压力下的颗粒破碎。因此本试验方案共设定 5 个掺砂率、3 个相对密实度, 共 15 个初始条件, 制备试样 90 个。

试验时采用最大竖向压力为 4 MPa 的高压固结仪进行侧限压缩试验, 试验过程中严格按照规范要求进行逐级加载操作^[11]。待试验结束后均应将试样小心取出并烘干, 再次进行颗粒分析试验以研究侧限压缩过程不同初始条件对颗粒破碎的影响。

2 试验结果分析

2.1 颗粒微观结构特征

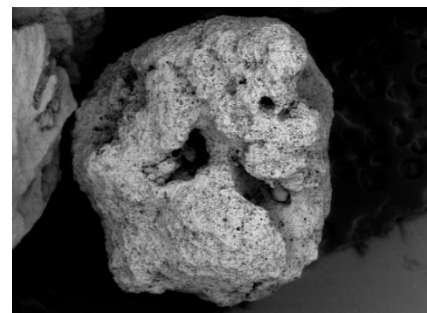
岩土散粒介质中, 微观颗粒的基本物理属性与运动特点对宏观力学行为及变形特征等具有重要影响, 为充分认识两种颗粒的表面特征, 随机取珊瑚砂及石英砂颗粒进行电子显微镜扫描 (SEM), 如图 3 所示。石英砂表面浑圆, 颗粒结构致密, 而珊瑚砂表面粗糙, 孔隙发育, 结构疏松, 两者形成鲜明对比。

由于特殊的海洋生物成因, 钙质砂中常常保留原

始生物骨架残骸中的多孔隙特征, 构成其受力易碎, 宏观力学特性与陆源散粒介质迥异的重要原因。为充分表征钙质砂颗粒内部形态, 利用高分辨率工业 CT 对钙质砂颗粒进行扫描观测, 其结果如图 4, 其中灰色部分为珊瑚砂颗粒实体, 黑色为剖面上的孔隙。由图可知珊瑚砂颗粒结构中内部孔隙发育, 该结果与多数文献对珊瑚砂内孔隙的认识相同^[1-3,5]。珊瑚砂内部结构存在的孔隙必将对其力学变形特征和破碎性质产生重要影响。



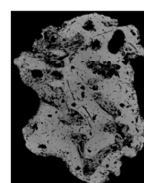
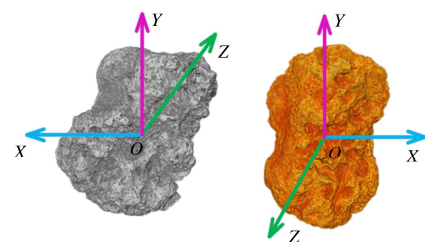
(a) 石英砂



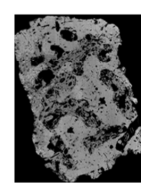
(b) 珊瑚砂

图3 SEM 观测结果

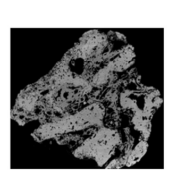
Fig. 3 Test results of SEM



XY方向切片图



YZ方向切片图



XZ方向切片图

图4 X射线显微镜检测结果

Fig. 4 Test results of X-ray microscope

2.2 压缩变形特性

岩土介质的压缩是指外界物理环境及力学状态发生变化时引起的体积变形, 包括松散骨架的收缩、气

体的排除、颗粒的重排布及颗粒破碎等。相较于黏性土, 无黏性土颗粒的压缩行为较为简单, 但应力水平达到颗粒强度后引起的颗粒破碎将使其受力变形机制发生改变, 需要引起研究人员的注意。

颗粒材料在侧限压缩条件下的变形主要是颗粒滑移和颗粒破碎的过程^[13], 袁泉等^[14]将该过程分为初始压密和颗粒破碎两个阶段。图 5 为连续加载过程中不同掺砂率条件下试样的竖向变形-竖向压力曲线, 由于篇幅限制, 仅将 $D_r=0.5$ 的情况进行展示, 其余相对密实度条件下规律相似。由图 5 可知, 在加荷初期珊瑚砂、石英砂及混合砂在压缩变形上差异不大, 该阶段的变形主要发生颗粒的滑移和定向排布。随着颗粒所处应力状态的不断提高, 珊瑚砂的颗粒破碎开始加剧, 不同试样力学变形的差异逐渐拉大, 至加载结束 (竖向压力为 4 MPa), 石英砂的轴向变形约为 0.620 mm, 珊瑚砂的轴向变形约为 1.56 mm, 大于前者变形的两倍。在全应力加载压缩过程中, 石英砂压缩变形逐渐收敛, 而珊瑚砂压缩变形趋势仍未稳定, 收敛性的差异是高应力状态下颗粒破碎的直接结果。

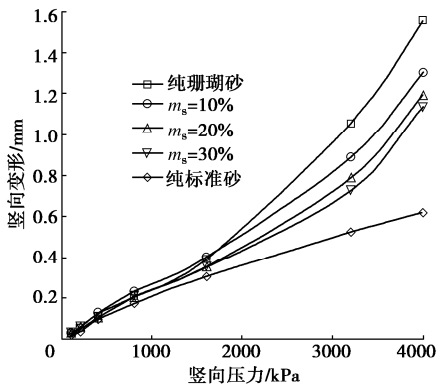


图 5 竖向变形与竖向压力之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship between vertical deformation and pressure

石英砂的掺入对珊瑚砂的竖向变形存在较大影响, 其掺入后变形曲线分布在珊瑚砂与石英砂之间, 随着的掺砂率不断提高, 其曲线逐渐向下移动, 向石英砂曲线方向偏移, 混合料的竖向变形逐渐降低。差异的出现及掺入后的变化规律与珊瑚砂和石英砂颗粒形状、颗粒结构、矿物组成等的不同有关。由于致密的颗粒结构及石英矿物组成, 石英砂的颗粒强度更高, 其掺入珊瑚砂中在一定程度上可以降低珊瑚砂的压缩性。同时荷载作用下颗粒的滑移与定向排布受颗粒形状的影响, 是构成竖向变形差异的又一重要因素。

图 6 为不同相对密实度下试样的压缩曲线, 呈典型的粒状材料压缩变形特性。以 $D_r=0.5$ 为例, $m_s=0$ 时, $\Delta e=0.163$, $m_s=10\%$, 20% , 30% 时, Δe 分别为 0.136, 0.125, 0.119。随着掺砂率的提高, 在加载过程中孔隙比的变化程度逐渐降低, 且在加载前期珊

瑚砂发生的压缩变形小于后期发生的压缩变形。以竖向压力 2 MPa 为界, $D_r=0.5$ 时珊瑚砂在前 2 MPa 的孔隙比降低量 $\Delta e_{0-2}=0.057$, 后 2 MPa 的孔隙比降低量为 $\Delta e_{2-4}=0.106$, 约为前者的两倍, 压缩变形仍未收敛。随着掺砂率的增加, 孔隙比降低量前后差异逐渐降低, 至 $m_s=100\%$ 时 (纯石英砂), $\Delta e_{0-2}=0.040 > \Delta e_{2-4}=0.025$, 表明压缩变形逐渐稳定, 呈收敛趋势。

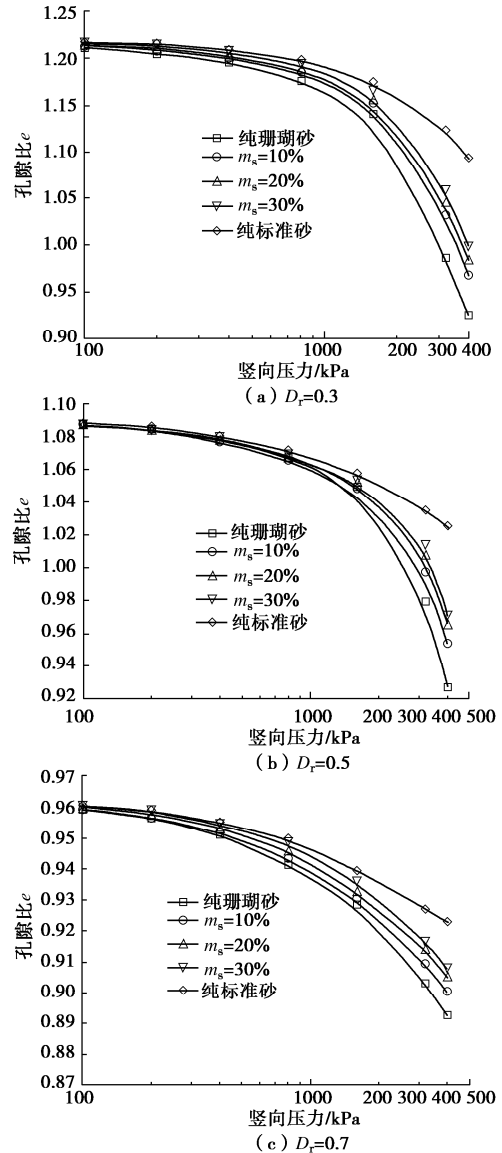


图 6 不同掺砂率条件下珊瑚砂的压缩曲线

Fig. 6 Compression curves of coral sand under different sand mixing rates

由于相对密实度的不同, 微观结构上颗粒间的距离及接触形式大不相同, 对试样压缩性的影响显而易见。图 7 为珊瑚砂在不同相对密实度条件下的压缩曲线。由图 7 可知, 在加载初期, 初始孔隙比对压缩特性的影响较为显著, 且密实度较小时, 加载初期引起的孔隙比变化也较高密实度条件下大, 与压缩过程中不同的作用机制密切相关。如竖向压力增至 1.6 MPa

时, $D_r=0.3$ 时孔隙比总变化量为 0.078, 而 $D_r=0.7$ 时仅为 0.034。在该阶段孔隙比主要通过影响颗粒的滑移排布等引起压缩变形的差异。对比分析认为, 相较于高密实度, 低密实度条件下 (如 $D_r=0.3$ 时), 试样的密实性较差, 整体骨架较为疏松, 在荷载的作用下颗粒发生位置的调整, 孔隙比降低量及降低速度均较大。而 $D_r=0.7$ 时, 由于试样密实, 在加载初期仅部分颗粒发生了位置的重新调整, 孔隙比变化较小。

当荷载进一步加大时颗粒破碎开始增大, 孔隙比进一步下降使试样达到更加密实的状态。到加载的后期, 初始孔隙比即相对密实度对压缩曲线的影响逐渐降低, 颗粒破碎主导和影响试样的压缩变形。

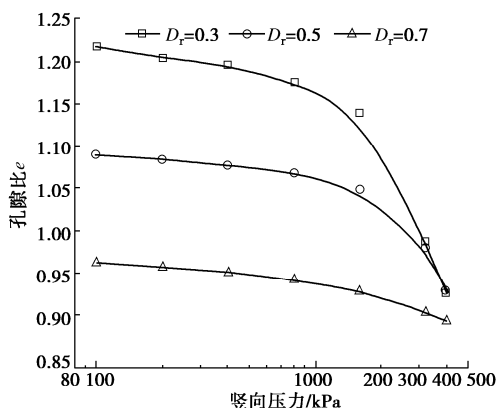


图7 不同密实度条件下珊瑚砂压缩变形曲线

Fig. 7 Curves of compressive deformation of coral sand under different compactnesses

2.3 颗粒破碎特性

颗粒破碎是一个受颗粒强度、颗粒形状、颗粒密度、颗粒矿物组成等多种因素影响的复杂过程^[15]。在理论层面研究中, 通常认为当土体受到外部荷载作用时, 土颗粒之间形成相互作用的应力场。土颗粒受到有效应力的作用后发生变形, 沿颗粒薄弱结构面或微裂缝处产生拉应力。随着施加在土颗粒上能量的增加, 土颗粒中的微裂缝逐渐出现和发展, 当颗粒中的裂纹扩展到整个颗粒时, 即发生颗粒的整体破碎。因此人们也普遍认为压力作用下土颗粒的破碎是拉伸破坏^[16], 而颗粒在复杂应力场中亦发生表面的相互研磨等。因此颗粒破碎可定义为外荷载作用下颗粒结构整体破坏或相互研磨形成粒径相等或不等更小颗粒的过程。

在颗粒破碎研究过程中, 破碎程度的合理量化至关重要。本文采用 B_r 指标^[17]对试样的颗粒破碎程度进行定量测定, 由于部分初始条件下试样的颗粒破碎并不明显, 使用筛分方法精度较差, 因此仅将其中可以测定部分进行绘图。

图8为5类试样在加载过程中的颗粒破碎曲线, 由该图可知, 随着竖向压力的施加, 颗粒破碎程度不断上升。同时可明显的观察到, 随着石英砂的掺入,

试样的颗粒破碎逐渐下降, 与石英砂较高的颗粒强度密切相关。但石英砂的掺入是否能抑制珊瑚砂的颗粒破碎, 从目前试验结果仍无法得出, 需进一步探究。随着外部荷载的施加, 石英砂颗粒破碎发展较为平稳, 而珊瑚砂与混合料的颗粒破碎发展趋势并不稳定, 均呈不收敛的趋势, 压缩变形曲线走势一致。

图9为终止压力 4 MPa 下不同相对密实度试样的颗粒破碎分布。显而易见, 相对密实度对颗粒破碎具有重要影响。相较于 $D_r=0.7$ 条件下, $D_r=0.3$ 时的试样更为疏松, 颗粒骨架易于压缩, 在同一竖向压力作用下颗粒间的相对运动较容易, 颗粒间的相互研磨及棱角的折断等变得剧烈, 形成的细小颗粒增多。

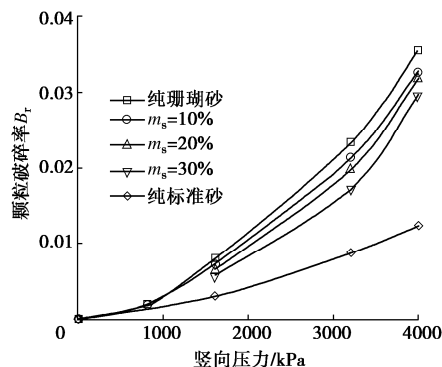


图8 竖向压力-颗粒破碎率相关曲线

Fig. 8 Relationship between vertical load and particle breakage

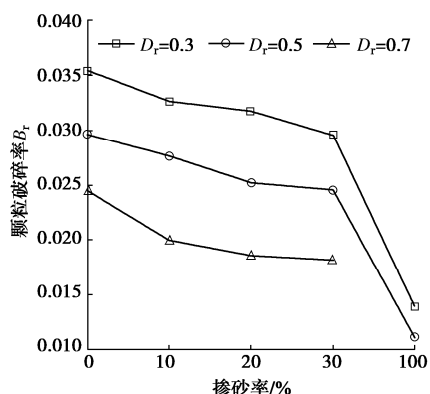


图9 不同密实度条件下的颗粒破碎率

Fig. 9 Crushing rates of particles under different compactnesses

3 结 论

本文以标准石英砂充当硅质杂质, 以珊瑚砂为基体, 配制不同掺砂率和相对密实度的混合料试样, 开展侧限高压试验, 研究其压缩变形特性, 并分析级配变化和颗粒破碎规律, 得到以下 2 点结论。

(1) 随着掺砂率的提高, 珊瑚砂-石英砂混合料压缩变形逐步降低, 但掺砂率未对压缩曲线走势产生明显影响。相同条件下, 珊瑚砂的压缩变形大于石英砂。

(2) 混合料颗粒破碎随竖向压力的上升而增大,

破碎呈不收敛趋势。石英砂的掺入在一定程度上降低了颗粒破碎的发生, 且随掺砂率的提高而降低。而相对密实度在颗粒破碎中的影响亦不可忽视, 相对密实度较低时引起的颗粒破碎较高相对密实度条件下更明显。

本研究成果对有效揭示实际工程条件下硅质杂质对珊瑚砂压缩变形行为的影响有着一定的实际意义, 可为进一步贴近珊瑚砂实际工程建设提供一定依据。

参考文献:

- [1] 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): 40 - 47.
- [2] 王 刚, 查京京, 魏 星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 755 - 760. (WANG Gang, ZHA Jing-jing, WEI Xing. Evolution of particle crushing of carbonate sands under cyclic triaxial stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 755 - 760. (in Chinese))
- [3] WEI H Z, ZHAO T, HE J Q, et al. Evolution of particle breakage for calcareous sands during ring shear tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017153.
- [4] ZHANG J R, LUO M X. Dilatancy and critical state of calcareous sand incorporating particle breakage[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(4): 04020030.
- [5] 张家铭, 汪 稔, 石祥峰, 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. (ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, 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. (in Chinese))
- [6] 龙 蛟, 顾琳琳, 王 振, 等. 多次加-卸载条件下考虑颗粒破碎的钙质砂一维压缩特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 144 - 150. (LONG Jiao, GU Lin-lin, WANG Zhen, et al. Study on one-dimensional compression characteristics of calcareous sand considering particle breakage under multiple loading-unloading conditions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1): 144 - 150. (in Chinese))
- [7] 马启锋, 刘汉龙, 肖 杨, 等. 高应力作用下钙质砂压缩及颗粒破碎特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, **38**(6): 1020 - 1025. (MA Qi-feng, LIU Han-long, XIAO Yang, et al. Compression and particle breakage features of calcareous sand under high stress[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, **38**(6): 1020 - 1025. (in Chinese))
- [8] 李彦彬, 李 飒, 刘小龙, 等. 颗粒破碎对钙质砂压缩特性影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(2): 352 - 359. (LI Yan-bin, LI Sa, LIU Xiao-long, et al. Effect of particle breakage on compression properties of calcareous sands with oedometer tests[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(2): 352 - 359. (in Chinese))
- [9] MIAO G, AIREY D. Breakage and ultimate states for a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2013, **63**(14): 1221 - 1229.
- [10] 马 林. 钙质土的剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(S1): 309 - 316. (MA Lin. Experimental study of shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 309 - 316. (in Chinese))
- [11] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [12] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [13] 汪 稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤-滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002, **33**(7): 75 - 78. (WANG Ren, SUN Ji-zhu. Damage-slide coupled interaction behavior of undrained calcareous sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **33**(7): 75 - 78. (in Chinese))
- [14] 袁 泉, 李文龙, 高 燕, 等. 钙质砂颗粒特征及其对压缩性影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2020, **39**(2): 32 - 43. (YUAN Quan, LI Wen-long, GAO Yan, et al. Experimental study on particle characteristics of calcareous sand and effect on its compressibility[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(2): 32 - 43. (in Chinese))
- [15] YU F W. Particle breakage in granular soils: a review[J]. Particulate Science and Technology, 2021, **39**(1): 91 - 100.
- [16] MCDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. Géotechnique, 1998, **48**(5): 667 - 679.
- [17] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.

(编校: 孙振远)