

DOI: 10.11779/CJGE201805004

# 珊瑚礁砂砾料力学行为与颗粒破碎的试验研究

王 刚<sup>1, 2</sup>, 叶沁果<sup>1, 2</sup>, 查京京<sup>1, 2</sup>

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:** 珊瑚礁砂砾石是中国南海岛礁建设的主要填料, 因为特殊的生物成因和多孔隙的颗粒结构, 极易产生颗粒破碎。对取自南海某岛礁的珊瑚礁砂砾石填料开展了大型压缩试验、三轴排水剪切试验和三轴不排水剪切试验, 研究了压缩指数、杨氏模量、剪胀和强度等基本工程力学指标与颗粒破碎的变化规律。在相同的压缩作用下, 疏松试样比密实试样的颗粒破碎程度更大。颗粒破碎程度随着压力的增大而显著增大, 导致珊瑚礁砂砾料的压缩模量和杨氏模量随压力的增大增幅不明显, 峰值摩擦角和临界状态摩擦角随压力的增高而显著降低。颗粒破碎过程具有明显的应力路径和应力历史依赖性, 有无预压作用的相同密度的试样表现出显著不同的压缩特性, 相同密度和初始压力的试样在排水和不排水剪切下也表现出明显不同的剪胀和强度特性。峰值摩擦角依赖于应力路径和颗粒破碎的演化过程; 临界状态摩擦角与最终的颗粒破碎指标值有较好的相关性, 与颗粒破碎的产生过程无关。

**关键词:** 钙质砂砾料; 颗粒破碎; 模量; 摩擦角; 相对破碎指数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)05-0802-09

**作者简介:** 王 刚(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事土的本构理论、土动力学及地震工程、数值分析等方面的研究工作。E-mail: cewanggang@163.com。

## Experimental study on mechanical behavior and particle crushing of coral sand-gravel fill

WANG Gang<sup>1, 2</sup>, YE Qin-guo<sup>1, 2</sup>, ZHA Jing-jing<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The coral sand and gravel are used as the main source of reclamation fill in the island construction of the South China Sea. Due to their biological origin, the grains of coral sand-gravel fill are porous and prone to breakage. A series of large-scale compression tests, triaxial drained and undrained shear tests are conducted on a typical coral sand-gravel fill from the South China Sea, and the basic mechanical properties such as compression index, Yang's modulus, shear-dilatancy and strength parameters as well as particle crushing characteristics of the coral sand-gravel fill are studied. Under the compression, the particle crushing of a loose sample is more serious than that of a dense sample. Particle crushing increases with the increasing pressure, in result, the compressive modulus and Young's modulus increase little, and the peak friction angle and the critical state friction angle decrease significantly as the pressure increases. The particle crushing has a strong dependency on stress path and history. The samples with the same density but different pre-compression histories exhibit significantly different responses under compression. The samples with the same density and initial pressure also show different dilatant tendency and strength characteristics under drained and undrained triaxial shearing. The peak friction angle depends on the stress path and the evolution process of particle crushing, and the critical state friction angle can be well correlated to a particle breakage index in the final state, implying that it is independent of the intermediate evolution process of particle crushing.

**Key words:** coral sand-gravel fill; particle breakage; modulus; friction angle; relative breakage index

## 0 引 言

中国南海岛礁间的松散堆积物及礁坪沉积物主要是珊瑚礁破碎崩解后的碎块及其他海洋生物的骨架残骸在原地沉积或近源搬运沉积的碎屑物。珊瑚礁的矿物成分主要为文石和高镁方解石, 化学成分主要为碳

酸钙, 因此珊瑚礁沉积物也被称为钙质土(包括钙质砂和钙质砾石)。在中国南海的岛礁工程建设中一般就地取材采用珊瑚礁沉积物作为场地填料。由于特殊的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679016)

收稿日期: 2017-03-14

生物成因, 珊瑚体内部结构疏松并含有大量孔隙, 其崩解破碎后的颗粒具有强度低、形状极不规则、易折断和破碎的特点, 使得珊瑚礁砂砾石填料具有不同于陆源砂砾石填料的特殊力学特性。因此研究珊瑚礁砂砾石填料 (简称珊瑚礁砂砾料) 的力学特性具有重要的工程意义。

自20世纪60年代以来, 在海洋油气开发过程中因钙质土地层引发的工程问题使得人们开始关注钙质土的特殊力学特性<sup>[1-2]</sup>。钙质砂的压缩和剪切试验表明<sup>[3-11]</sup>：  
①钙质砂极易产生颗粒破碎，其颗粒破碎过程是一个与物理成分、粒径级配、颗粒形状、孔隙比、有效应力状态、有效应力路径等有关的复杂过程；  
②颗粒形状越不规则、粒径越大、级配越均匀、压力越大，颗粒破碎越显著；  
③钙质砂剪切行为的压力依赖性更大，初始相对密度很高的钙质砂在较高压力下也表现出剪缩特征；  
④钙质砂的强度指标随着围压的增高而降低；  
⑤颗粒破碎达到一定程度后颗粒破碎逐渐减弱，对力学特性的影响也趋于稳定，因此在大剪切后趋向一个常体积、常应力的状态（类似于临界状态）。这些研究证实了颗粒易破碎粒状材料可表现出独特的变形行为，但是已有研究基本都是针对珊瑚礁沉积物中的细粒组分——钙质砂开展的，对砂砾石的力学特性研究较少。正如已有研究中所揭示的颗粒破碎与颗粒大小、形状密切相关，因此很有必要根据现场珊瑚礁沉积物的颗粒级配，采用大型单元试验研究珊瑚礁砂砾石填料的力学特性。

本文针对中国南海某岛礁的现场珊瑚礁砂砾石沉积物，采用大型压缩试验、大型三轴试验研究珊瑚礁砂砾料的力学行为和颗粒破碎特征，揭示其宏观力学特性与细观颗粒破碎间的物理机制。

1 试验用珊瑚礁砂砾料

试验所用珊瑚礁砂砾料取自中国南海西沙群岛。由于所采用的大三轴试验设备的试样直径为 300 mm，并且原沉积物中大于 60 mm 的颗粒含量少，对力学特性的影响小，因此试验用料中去除了砂砾料中粒径大于 60 mm 的颗粒。图 1 给出试验用料的颗粒级配曲线，相应的特征粒径、不均匀系数  $C_u$  和连续性系数  $C_c$  均标注在图中，筛分后的砂砾料级配良好。

图 2 给出了试验用料典型的颗粒形状图，由此可以定性分析出颗粒容易破碎的原因。图 2 (a) 显示，较大的颗粒保留了原有珊瑚礁枝条的形状，颗粒中有肉眼可见的大孔隙。因此，珊瑚礁砂砾料中较大的颗粒在压缩或剪切作用下很容易产生折断和崩解。图 2 (b) 给出了细颗粒电镜扫描放大后的图片。因为珊瑚

礁沉积物一般为原地或近源沉积，细颗粒主要是珊瑚礁破碎过程中的碎屑或者粗颗粒二次破碎得到，保留了棱角状或片状的结构。棱角被磨蚀、薄片状颗粒被折断是细颗粒在较低压力下颗粒破碎的主要形式。图 2 (c) 给出了细颗粒进一步放大后的图片，可见即使是细颗粒内部仍然还有大量的内孔隙，导致细颗粒的颗粒强度也远低于密实的碳酸钙岩体强度，因此细颗粒在不很高的压力下也能产生崩解破碎。

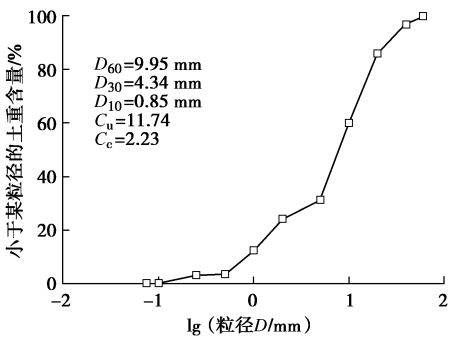
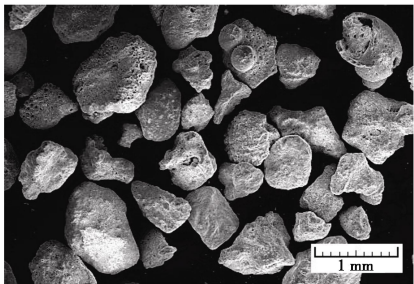


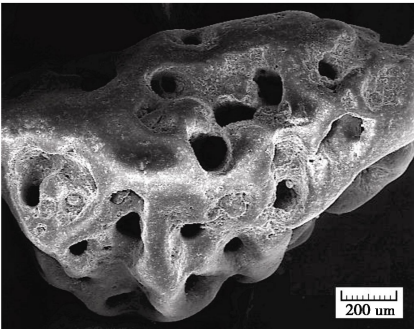
图 1 试验用珊瑚礁砂砾料的初始级配曲线  
Fig. 1 Initial grading curves of test coral fill



(a) 粗颗粒数码照片



(b) 细颗粒扫描电镜图片



(c) 细颗粒内孔隙扫描电镜图片

图 2 典型颗粒形状图片

Fig. 2 Typical shapes of coarse grains in test coral fill

## 2 压缩变形特性

采用大型一维压缩仪(试样直径 504.6 mm, 高度 300 mm)研究珊瑚礁砂砾料的压缩变形特性。采用分层振捣的方法制作指定初始密度的试样。由于珊瑚礁砂砾料颗粒易破碎, 在保留初始颗粒级配的情况下, 很难制作很密实的试样, 通过尝试, 本文采用了两种不同初始密度的试样: 干密度为  $1.3 \text{ g/m}^3$ , 孔隙比为 1.049 的试样, 简称为疏松试样; 干密度为  $1.4 \text{ g/m}^3$ 、孔隙比为 0.957 的试样, 简称为密实试样。制样后两种密度的试样基本保留了初始颗粒级配(见图 1)。图 3 分别给出了疏松试样和密实试样在一维压缩过程中的孔隙比与竖向压力的关系曲线, 两条曲线都分别在竖向压力为 200, 400 kPa 时有一次卸载—再压缩过程。

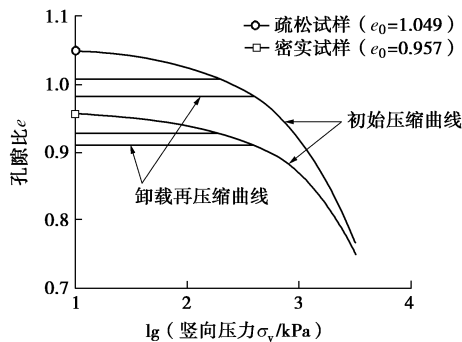


图 3 侧限压缩试验孔隙比与竖向压力变化曲线

Fig. 3 Void ratio versus vertical pressure in oedometer tests

### 2.1 初始压缩特性

从图 3 的初始压缩曲线可以看出, 在侧限压缩作用下, 试样的孔隙比发生了显著的变化, 表明珊瑚礁砂砾料具有很高的压缩性, 并且初始孔隙比越大, 压缩性越大。另外, 疏松试样的初始压缩曲线加速趋向密实试样的初始压缩曲线, 在 3200 kPa 竖向压力时, 疏松试样的孔隙比已经接近密实试样的孔隙比, 在更高压力下两条压缩曲线可能重合并趋向一个所谓的“极限压缩线”<sup>[12]</sup>。Coop<sup>[3]</sup>和张家铭等<sup>[7]</sup>对钙质砂的侧限压缩试验也发现了同样的变化趋势。

对于正常固结黏土和硅质砂, 通常用下述对数曲线来描述初始压缩曲线:

$$e = e_0 - \lambda \ln p, \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为自然对数坐标中压缩曲线的斜率, 又称为压缩指数。

在常规工程压力范围内, 颗粒强度很高的硅质砂基本不产生颗粒破碎, 压缩指数基本为一常数, 因此可由压缩指数的变化来定性分析材料的颗粒破碎程度。根据珊瑚礁砂砾料在各分级荷载下的孔隙比增量

可计算出其压缩指数随压力的变化, 见图 4。可见, 珊瑚礁砂砾料的压缩指数随着压力的增加显著增大, 只有在很小的压力下才能近似为一常数。在 20 kPa 压力时, 疏松试样的压缩指数约为 0.008, 密实试样的压缩指数约为 0.006, 与硅质砂砾料的压缩指数基本在同一数量级。当压力超 100 kPa 时, 两个试样的压缩指数均超过 0.01; 在本次试验的最大压力 3000 kPa 时, 压缩指数均超过 0.1, 与一般黏土的压缩指数相当。通过压缩指数随压力的变化过程可见, 在几百千帕的常规工程压力范围内, 珊瑚礁砂砾料的压缩指数是常规砂砾料的数十倍, 不能忽略其颗粒破碎带来的高压缩性效应。

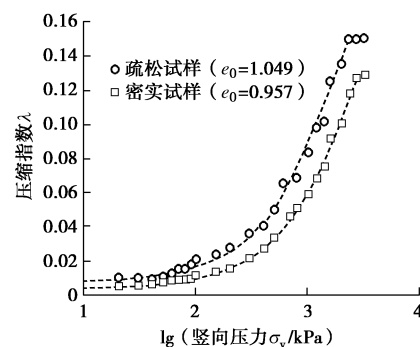


图 4 压缩指数与竖向压力的变化曲线

Fig. 4 Compression index versus vertical pressure

### 2.2 卸载—再压缩特性

图 3 中各卸载—再压缩过程的卸载曲线和再压缩曲线基本重合, 斜率约为 0.001~0.004, 和一般砂砾料的回弹指数量级相当, 但是一旦当压力接近或超过卸荷前的压力(称为前期固结压力)后, 压缩指数迅速增加, 压缩变形沿着卸荷前的初始压缩曲线迅速发展。该现象说明在初始压缩过程中经过颗粒破碎、位置调整形成的细观结构能够抵抗小于当前压力的再压缩作用, 因而再压缩过程中颗粒破碎很小, 变形主要是土骨架弹性回弹变形的再压缩。

从宏观变形行为上看, 经过压缩作用的珊瑚礁砂砾料存在一个前期固结压力的特性类似于超固结黏土, 但是两者有着本质的区别。黏土的前期固结压力和制样密度是一一对应的(正常固结线上与制样密度对应的压力), 然而图 3 中疏松试样和密实试样的压缩曲线表明, 珊瑚礁砂砾料并不存在一个与制样密度对应的前期固结压力, 其前期固结压力只能通过压缩过程获得。为了进一步说明, 本文设计了一组特殊的对比试验。如图 5 所示, 疏松试样在压缩至孔隙比 0.955 时(此时压力为 600 kPa)卸载至 10 kPa(此时孔隙比为 0.957, 等于密实试样的孔隙比), 在此后的压缩过程中(路径 A1—A2—A3)就可以将该试样视

为一个具有前期固结压力 600 kPa、制样孔隙比为 0.957 的试样（简称为 A 试样）。为了对比，再直接分层振捣制作一个制样孔隙比为 0.957 的振捣击实样（简称为 B 试样），测定其压缩曲线（路径 B1—B2—B3）。如图 5 所示，虽然两个试样有相同的初始孔隙比，却表现出完全不同的压缩特性。A 试样在压缩的起始段（A1—A2 段）的变形沿卸载—再压缩曲线发展，在压力达到前期固结压力 600 kPa 时，压缩应变不到 0.1%；而 B 试样则表现出初始压缩的行为，在压力达到 600 kPa 时，压缩应变达到了 3%。该现象说明，虽然 B 试样和 A 试样具有相同的孔隙比，但是其微观结构与 A 试样的微观结构有着显著的差异，因此 B 试样不能抵抗 600 kPa 的压缩作用而不产生大的变形。该对比试验结果表明，在实际工程中，除了采用分层碾压措施让珊瑚礁砂砾料场地更加密实外，让实际地基经历一次大于预期基底压力的预压作用是减小地基沉降的更有效措施。

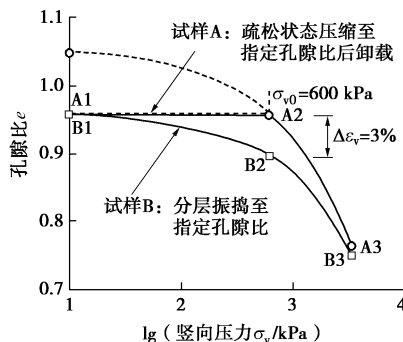


图 5 有无预压作用的相同密度试样压缩变形行为对比

Fig. 5 Comparison of compression deformation behaviors of samples with same density with and without compression history

## 2.3 颗粒破碎

图 6 给出了疏松试样和密实试样压缩后（图 3 的压缩路径）的级配曲线与初始级配曲线的对比，可见，压缩过程中产生了明显的颗粒破碎。珊瑚礁砂砾料的颗粒破碎（如点面接触的尖角磨损、架空颗粒的折断）使得压缩过程中颗粒间的错动和重排列更容易，是其压缩性远大于常规堆石料的原因。

由图 3 可知，疏松试样的最终孔隙比（ $e_f=0.765$ ）比密实试样的最终孔隙比（ $e_f=0.749$ ）略大，但是图 6 中疏松试样的颗粒级配曲线在密实试样的上方，说明疏松试样的颗粒破碎程度更大。在硅质砂的高压压缩试样中也观察到孔隙比越大、颗粒破碎越显著的现象<sup>[13]</sup>。对该现象的通常解释是：孔隙比越大，颗粒间的点接触越少，接触应力更大，颗粒棱角越容易破碎。对于珊瑚礁砂砾料，孔隙比越大，大颗粒越容易被架空，枝条状颗粒越容易被折断，也是孔隙比越大、颗粒破

碎越显著的重要原因。

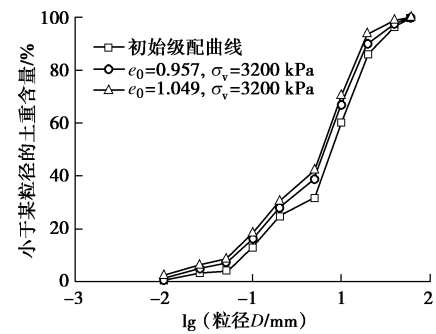


图 6 不同密度的试样在一维压缩后的颗粒级配曲线对比

Fig. 6 Comparison of grading curves of samples with different initial void ratios under same surcharge pressure

## 3 三轴剪切变形特性

### 3.1 试验方案及变量定义

采用重庆大学 YS30-3B 型应力路径大型三轴试验机开展了珊瑚礁砂砾料三轴固结排水剪切试验、三轴固结不排水剪切试验和等向固结试验。试样直径为 300 mm，试样高度为 600 mm。限于仪器的轴向位移行程，轴向应变最大只能达到 20%。剪切结束后，将试样拆除，烘干，进行筛分得到试验后的颗粒级配曲线，以定量分析颗粒破碎的情况。

珊瑚礁砂砾料在等向固结作用下会发生显著的体积压缩，因此很难像一般的砂或砂砾料在不同的固结压力下制作相同密度的试样进行试验。鉴于此，本文对所有试样都采用统一的制样密度（根据侧限压缩试验的经验，取制样孔隙比为 0.957）。由于在不同压力下固结后再进行剪切，不同压力下剪应力剪应变曲线对应的是不同密度的试样。这和实际工程中珊瑚礁砂砾石填料的工作状态是一致的。因为现场只能控制填料的分层碾压密度，场地形成后，不同深度处上覆压力不同，填料在上覆压力的压缩作用后密度自然不同。填料的压缩性越大，密度的分层变化越大。

采用有效球应力  $p'$ 、广义剪应力  $q$  和广义剪应力比  $\eta = q/p'$  给出试验结果。三轴压缩应力路径下，任意  $\eta$  对应的启动摩擦角  $\phi_m$  的计算公式为

$$\sin \phi_m = 3\eta / (6 + \eta) \quad (2)$$

在三轴等向固结排水压缩条件下，如果围压  $\sigma_3$  保持不变，初始杨氏模量  $E_0$  可根据剪应力比  $\eta$  与轴向应变  $\varepsilon_1$  的初始斜率  $(d\eta/d\varepsilon_1)_0$  计算如下：

$$E_0 = (d\sigma_1/d\varepsilon_1)_0 = (d\eta/d\varepsilon_1)_0 \sigma_3 \quad (3)$$

任意广义剪应力比  $\eta$  对应的割线杨氏模量为

$$E(\eta) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_1} = \frac{3\eta}{(3 - \eta)} \times \frac{\sigma_3}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

### 3.2 排水条件下变形特性

图7分别给出了固结排水剪切下广义剪应力比 $\eta$ 和体积应变 $\varepsilon_v$ 随轴向应变 $\varepsilon_1$ 的发展曲线。从广义剪应力比曲线(图7(a))可见,除围压200 kPa试样的广义剪应力比曲线有峰值和软化段外,其它曲线都呈持续硬化型。各曲线的初始斜率和最终广义剪应力值都随着围压的增大而减小。体变发展曲线(图7(b))表明,各试样在剪切作用下均发生了显著的体积收缩(体变正值表示收缩),体变速率和最终体变值都随着围压的增大而增大。除了200 kPa围压试样的体变在达到最大值之后基本稳定外,其它试样的体变在试验结束(轴向应变20%)时仍未稳定,残余体变速率随着围压的增加而增大,可以预见,体变达到稳定值时需要的轴向应变随着围压的增大而增大。所以,虽然围压200, 400, 800 kPa试样的广义剪应力比在试验结束时已经基本稳定,但是体变还在发展,这3个试样在试验结束时未达到稳定的最终状态(临界状态)。

从体变发展曲线还可以观察到,体变与轴向应变关系起始段近似线性,线性段长度随着围压的增加而增加,并且4个试样在起始段内的体变速率接近。孔德志等<sup>[14]</sup>在易破碎的人工制备水泥球颗粒材料的三轴剪切试验中也观察到了类似的现象。

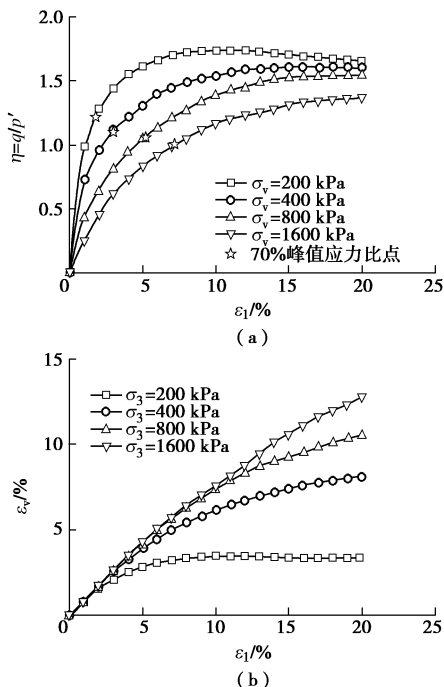


图7 珊瑚礁砂砾料三轴排水剪切试验结果

Fig. 7 Results of drained triaxial tests on coral sand-gravel fill

选取初始杨氏模量 $E_0$ 和70%峰值强度时的割线杨氏模量 $E_{70}$ 来分析剪切模量随围压的变化特征。初始杨氏模量 $E_0$ 可根据各曲线的初始斜率由式(3)计

算得到;割线杨氏模量 $E_{70}$ 可根据式(4)由70%峰值强度点(见图7(a)的标注)对应的广义剪应力比值和轴向应变值计算得到。由图8可见,在几百千帕的围压范围,珊瑚礁砂砾料的杨氏模量随着围压的增加增幅很小,压硬性并不显著。

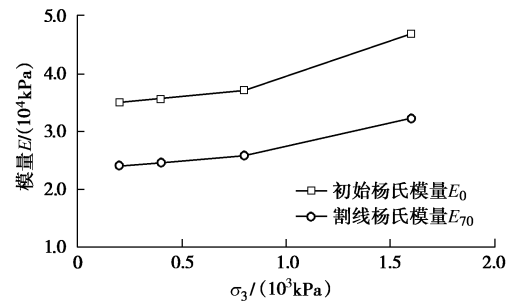


图8 三轴固结排水试验模量随围压的变化

Fig. 8 Modulus versus confining pressure in drained tests

在常围压三轴剪切试验中,试样的球应力也在增加( $\Delta p = \Delta \sigma_1/3$ ),总体变中包含了压缩和剪缩两种效应。将排水剪切条件下试样的初始状态和最终状态点标注于图9的 $e-p$ 坐标中。4个试样的最终点都在等向固结压缩曲线的下方,表明对于所采用的珊瑚礁砂砾料试样,在试验的固结压力范围内(大于100 kPa),剪切引起的总体变是体积收缩;并且随着围压的增加,体变点相对于等向固结线向下偏移的量越大,说明剪缩效应随着固结压力的增加而增大。

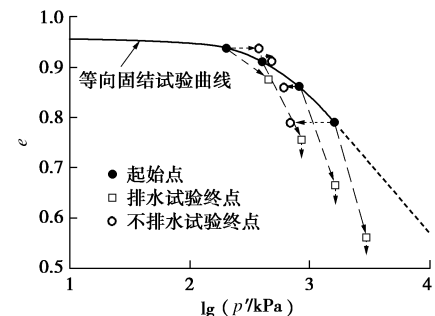


图9  $e-p$ 坐标中的三轴试样的初始状态和最终状态图

Fig. 9 Illustration of initial and eventual states in  $e-p$  plot

### 3.3 不排水条件下变形特性

图10给出了固结不排水剪切下各试样的广义剪应力比曲线和有效应力路径。从图10(a)可以看出,不排水剪切条件下,除了1600 kPa围压的试样外,其它试样的广义剪应力比曲线都有明显的峰值和软化段。不排水剪切条件下,广义剪应力比随轴向应变的发展速率远大于排水剪切条件,因此试验结束时各试样均达到了一个稳定的最终状态(临界状态)。和排水剪切条件下的规律一样,各曲线的初始斜率随着围压的增加而减小,峰值应力比和临界状态应力比也都

随着围压的增加而减小。从图 10 (b) 的有效应力路径中可以看出剪切引起的体积变化趋势。各试样在初始剪切时均是剪缩趋势,当应力比超过“相态转换应力比”后,发生剪胀趋势。这和排水条件下各试样在剪切全过程中均表现为体积收缩趋势有着显著的区别。

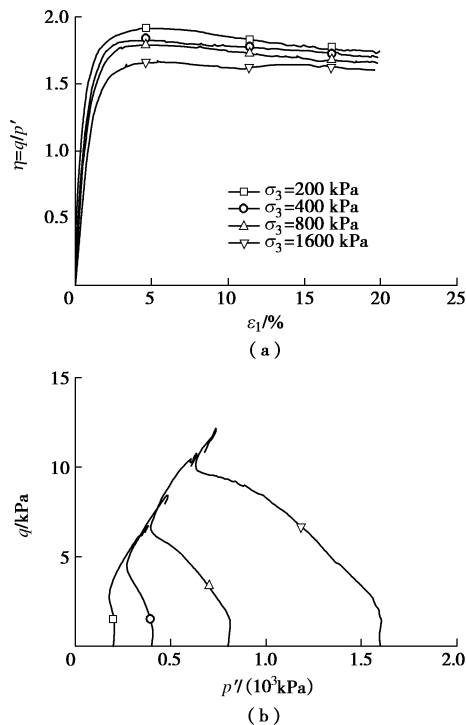


图 10 珊瑚礁砂砾料三轴不排水剪切试验结果

Fig. 10 Results of undrained triaxial tests on coral sand-gravel fill

不排水剪切试验中,各试样的孔隙比保持不变,有效球应力发生变化,根据最终有效球应力,可将各试样的最终状态点也点绘于图 9 的  $e-p$  坐标中。可见,围压为 200, 400 kPa 的试样的最终状态点在等向固结曲线的上方,而围压为 800, 1600 kPa 的试样的最终状态点在等向固结曲线的下方,表明随着初始固结压力的升高,剪切作用引起的总的体积变化趋势由膨胀变为收缩,分界压力值在 400~800 kPa 之间。这与排水试验中剪缩与剪胀的分界压力值(至少小于 100 kPa)是不同的。对比两种应力路径下的最终点的变化趋势,可见试样在排水剪切和不排水剪切下趋向于不同的最终状态线(临界状态线)。这和硅质砂试样在三轴排水和不排水剪切下基本趋向于同一个临界状态线<sup>[15]</sup>是有着显著区别的。

### 3.4 强度特性

根据广义剪应力比曲线的峰值和最终值,可由式

(2) 计算得到相应的峰值摩擦角和临界状态摩擦角。对于应变硬化型曲线,取峰值摩擦角等于临界状态摩擦角。如图 7 (a) 所示,在排水条件下,围压为 400,

800, 1600 kPa 的广义剪应力比曲线在 20% 的轴向应变时基本趋于水平,可近似认为临界状态广义剪应力比等于 20% 时的广义剪应力比。

图 11 给出了排水和不排水剪切条件下各试样的峰值摩擦角和临界状态摩擦角随围压的变化。 $\phi_{p,cu}$  和  $\phi_{cs,cu}$  分别为不排水条件下的峰值摩擦角和临界状态摩擦角; $\phi_{p,cd}$  和  $\phi_{cs,cd}$  分别为排水条件下的峰值摩擦角和临界状态摩擦角。无论排水或不排水剪切条件,试样的峰值摩擦角和临界状态摩擦角均随着围压的升高而降低;不排水条件下的峰值摩擦角和临界状态摩擦角均显著大于排水条件下的相应摩擦角。

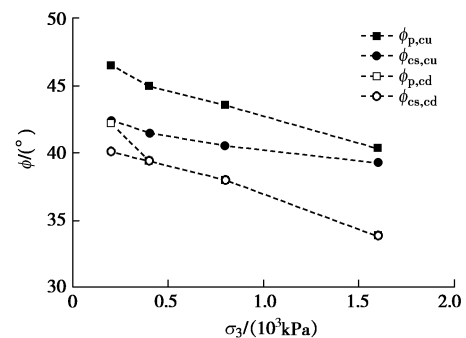


图 11 峰值摩擦角和临界状态摩擦角随围压的变化

Fig. 11 Change of peak friction angle and critical state friction angle with confining pressure

## 4 三轴剪切颗粒破碎特征

### 4.1 级配曲线演化规律

图 12 分别给出了珊瑚礁砂砾料在相同围压下等向固结压缩、排水剪切和不排水剪切后测得的级配曲线。随着颗粒破碎的加剧,级配曲线的演化可归纳为 3 个特征。

(1) 总体向小粒径方向移动,大粒径颗粒显著减小。如图 13 所示,初始级配曲线的最大粒径为 60 mm,大于 20 mm 粒径的颗粒含量约为 14%,在 1600 kPa 围压下排水剪切后,大于 20 mm 粒径的含量不到 1%,可视作最大粒径点向左移动到 20 mm 处。

(2) 绕最大粒径点向上旋转,细粒部分的相对含量增多。例如,初始级配中小于 1 mm 的颗粒含量为 10%,在 1600 kPa 围压下排水剪切后,小于 1 mm 粒径的颗粒含量增加到 30%。

(3) 曲线逐渐连续光滑,缺失粒径被补齐。初始级配曲线在 0.25~0.5 mm、2~5 mm 处有台阶,表明缺少 0.25~0.5 mm、2~5 mm 的颗粒。而 1600 kPa 围压下排水剪切后的级配曲线中,两个台阶逐渐消失,表明 0.25~0.5 mm、2~5 mm 粒径的颗粒在颗粒破碎过程中被补充。该现象说明,颗粒的大小分布在趋向于一个“分形级配”<sup>[16]</sup>。在分形级配下小一级的颗粒填



充大一级颗粒形成的孔隙,使得在所有度量尺度下颗粒的填充排列都接近一样。

需要注意的是,硅质砂的颗粒破碎试验结果<sup>[13, 17-18]</sup>表明:硅质砂的颗粒破碎特征主要是大颗粒边角的研磨,主要结果是增加细颗粒的比例,填充大颗粒间的空隙,而不明显地改变大颗粒的尺寸,可认为破碎后的级配曲线的最大粒径不变。吴京平等<sup>[5]</sup>、Coop等<sup>[4]</sup>和张家铭等<sup>[8]</sup>的试验结果也表明:即使珊瑚礁钙质砂,颗粒破碎主要是颗粒边角研磨,大颗粒的含量无明显减小。本文试验表明,由于颗粒粒径显著增大,珊瑚礁砂砾料与钙质砂的颗粒破碎特征以及级配曲线的变化规律是有显著差别的。

#### 4.2 排水条件的影响

对比图 12 中珊瑚礁砂砾料等向固结压缩后和固结排水剪切后的颗粒级配曲线,可见等向固结过程中也产生了明显的颗粒破碎,但是颗粒破碎程度远小于之后的排水剪切过程。贾宇峰等<sup>[19]</sup>对某玄武岩堆石料的试验也表明,剪切过程引起的颗粒破碎远大于等向固结压缩过程;他们并且认为等向压缩作用下(最大压力 1500 kPa)该堆石料几乎无颗粒破碎。

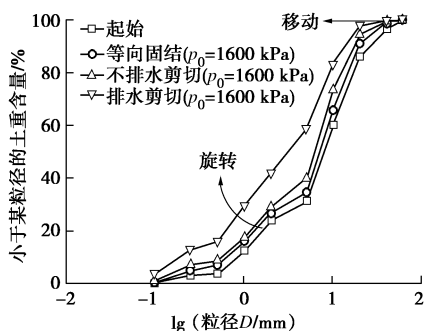


图 12 压缩、排水剪切和不排水剪切后级配曲线对比

Fig. 12 Comparison of grading curves respectively after compressing, drained shearing and undrained shearing

图 12 中排水剪切和不排水剪切后的颗粒级配曲线表明,不排水剪切过程中的颗粒破碎远小于排水剪切过程。张家铭等<sup>[8]</sup>对钙质砂的试验也发现,排水剪切产生的破碎要比不排水剪切严重得多。该试验事实揭示了珊瑚礁砂砾料在排水和不排水条件下宏观应力应变响应显著不同的细观机制:排水剪切过程中的颗粒破碎远大于不排水剪切,因而排水剪切下表现出的剪缩性越大,强度指标越低。

#### 4.3 固结压力的影响

图 13 给出了不同初始固结压力下排水剪切和不排水剪切后的颗粒级配曲线。试验只能保证初始制样时的颗粒级配一致,因此试验后的颗粒级配曲线同时包含了压缩过程和剪切过程中的颗粒破碎。由图 13 中各颗粒级配曲线可见,在相同的应力路径下,颗粒破碎

程度随着固结压力的增加逐渐增加。

为了进一步对比固结压力对颗粒破碎程度的定量影响,采用相对破碎指数<sup>[20]</sup>来定量描述颗粒级配曲线的变化。相对破碎指数定义为当前级配曲线和初始级配曲线间所围限的面积与初始级配曲线以上(至纵坐标为 100%)的面积之比。图 13 中各级配曲线对应的颗粒破碎指数  $B_r$  值见相应图例。图 14 (a) 给出了两种应力路径下相对破碎指数随初始固结压力的变化。可见,相对破碎指数随着初始固结压力的增加逐渐增加,相同初始固结压力下排水条件下的颗粒破碎指数远大于不排水条件。图 14 (b) 给出了颗粒破碎指数与最终固结压力  $p'_{cs}$  的变化关系。可见,颗粒破碎指数随着最终固结压力的增加而增加,当排水与不排水条件下的颗粒破碎指数接近时,最终固结压力也接近。

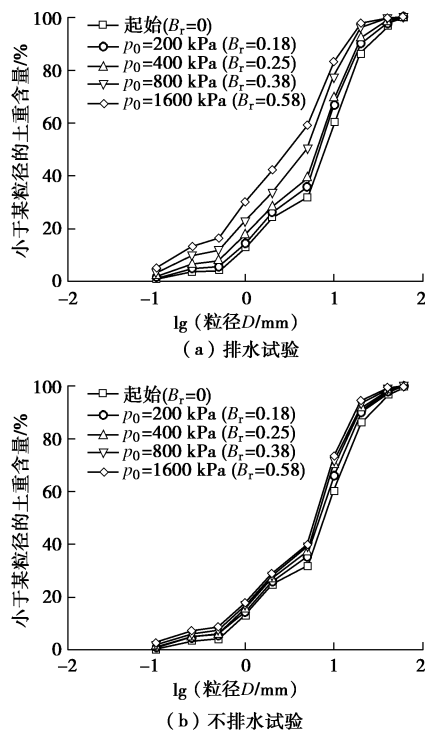


图 13 不同固结压力下排水和不排水剪切后颗粒级配曲线

Fig. 13 Grading curves after drained and undrained triaxial shearing under different initial consolidation pressure

#### 4.4 颗粒破碎与强度指标

Coop 等<sup>[4]</sup>对钙质砂的环剪试验结果表明,峰值摩擦角依赖于密度和固结应力,临界状态摩擦角基本不随颗粒破碎程度变化。郭熙灵等<sup>[21]</sup>和刘萌成等<sup>[22]</sup>对堆石料的三轴排水试验研究表明,峰值摩擦角和最终状态摩擦角随着颗粒破碎程度的增加而降低。图 15 给出了珊瑚礁砂砾料的颗粒破碎指标与峰值摩擦角和临界状态摩擦角的变化关系及其拟合曲线,表明珊瑚礁砂砾料的峰值摩擦角和临界状态摩擦角都随着颗粒破碎指标的增加而显著降低。

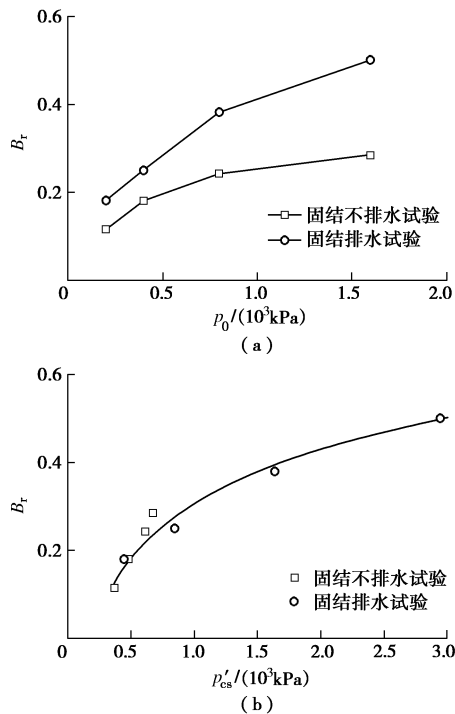


图 14 相对破碎指数与初始固结压力和最终固结压力的关系

Fig. 14 Relationship between relative breakage index and initial mean pressure and eventual mean pressure respectively

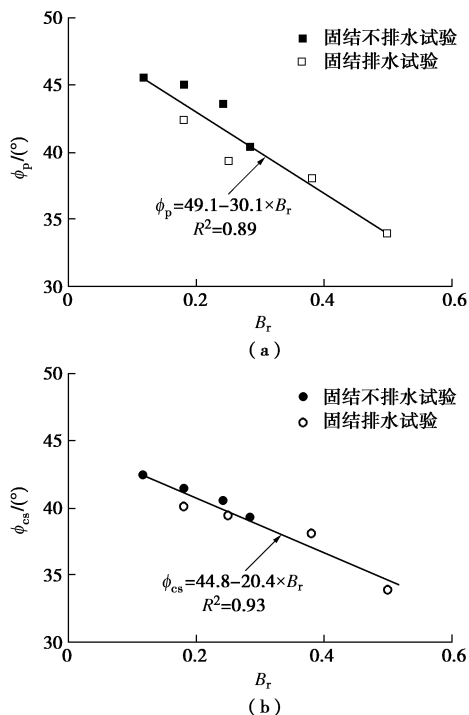


图 15 峰值摩擦角和临界状态摩擦角与相对破碎指数的关系

Fig. 15 Changes of friction angle and critical state friction angle with relative breakage index

峰值摩擦角是剪切过程中启动的最大摩擦角, 它依赖于具体的应力路径以及该应力路径过程中物态的变化。由于排水剪切和不排水剪切过程中颗粒破碎程度显著不同, 所以由图 15 (a) 可见, 排水和不排水

条件下峰值摩擦角与颗粒破碎指标间的关系比较离散, 对于相近的最终相对破碎指标值, 不排水剪切条件下的峰值摩擦角明显大于排水剪切条件。

临界状态摩擦角是大剪切变形后的残余摩擦角, 主要决定于矿物成分、颗粒形状 (棱角) [23]。在初始级配相同的条件下, 相近的破碎指标值对应着相近的颗粒破碎程度, 颗粒的磨损程度相似, 因此临界状态摩擦角也应该接近。如图 15 (b) 所示, 临界状态摩擦角与最终的相对破碎指标间有较好的相关关系。

## 5 结 论

(1) 珊瑚礁砂砾料具有高压缩性。有无预压历史的相同密度的试样的对比压缩试验表明, 预压作用可以形成一个抵抗压缩作用的骨架结构, 显著地减小压缩性。

(2) 珊瑚礁砂砾料的孔隙比越大、颗粒破碎越显著。剪切作用下的颗粒破碎随着压力的增大而增大, 导致珊瑚礁砂砾料的剪切模量随着压力的增加, 增幅不明显, 峰值摩擦角和临界状态摩擦角都随着压力的增高而降低。

(3) 珊瑚礁砂砾料的颗粒破碎具有明显的应力路径依赖性。排水剪切条件下的颗粒破碎明显大于不排水剪切条件, 因而相同密度和初始压力的试样在排水和不排水剪切下表现出明显不同的剪胀特性和强度特性。

(4) 大颗粒的崩解和颗粒尖角的磨损效应在珊瑚礁砂砾料的颗粒破碎过程中都很显著, 导致其颗粒级配曲线的变化同时出现最大粒径减小和绕最大粒径点向上旋转两种趋势。

(5) 珊瑚礁砂砾料的峰值摩擦角和临界状态摩擦角随颗粒破碎指数的增大而显著降低。峰值摩擦角依赖于应力路径和颗粒破碎的演化过程; 临界状态摩擦角与最终的颗粒破碎指标值有较好的相关性, 与颗粒破碎的产生过程无关。

## 参考文献:

- [1] JEWELL RJ, ANDREWS DC. Engineering for calcareous sediments[M]. Rotterdam: AA Balkema, 1988.
- [2] 沈建华, 汪 稔. 钙质砂的工程性质研究进展及展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(增刊): 26 - 32. (SHEN Jian-hua, WANG Ren. Study on engineering properties of calcareous sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(S0): 26 - 32. (in Chinese))
- [3] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Géotechnique. 1990, 40(4): 607 - 626.



- [4] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. *Géotechnique*, 2004, **54**(3): 157 - 163.
- [5] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, **19**(5): 51 - 57. (WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, **19**(5): 51 - 57. (in Chinese))
- [6] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(9): 1389 - 1392. (CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(9): 1389 - 1392. (in Chinese))
- [7] 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. (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))
- [8] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(10): 2789 - 2793. (ZHANG Jia-ming, ZHANG Lin, JIANG Guo-sheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(10): 2789 - 2793. (in Chinese))
- [9] TARANTINO A, HYDE A F L. An experimental investigation of work dissipation in crushable materials[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(8): 575 - 584.
- [10] VALDES J R, KOPRULU E. Internal stability of crushed sands: experimental study[J]. *Géotechnique*, 2008, **58**(8): 615 - 622.
- [11] DONOHUE S, O'SULLIVAN C, LONG M. Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(5): 477 - 482.
- [12] PESTANA J M, WHITTLE A J. Compression model for cohesionless soils[J]. *Géotechnique*, 1995, **45**(4): 611 - 631.
- [13] BASTIDAS P A M. Ottawa F-65 sand characterization[D]. Davis: University of California, Davis, 2016.
- [14] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(3): 464 - 469. (KONG De-zhi, ZHANG Bing-yin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(3): 464 - 469. (in Chinese))
- [15] BEEN K, JEFFERIES M G, HACHEY J. The critical state of sands[J]. *Géotechnique*, 1991, **41**(3): 365 - 381.
- [16] MCDOWELL G R, BOLTON M D, ROBERTSON D. The fractal crushing of granular materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1996, **44**(12): 2079 - 2102.
- [17] VESIC A S, CLOUGH G W. Behavior of granular materials under high stresses[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1968, **94**(SM3): 661 - 688.
- [18] NAKATA Y, HYODO M, HYDE A F L, et al. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. *Soils and Foundations*, 2001, **41**(1): 69 - 82.
- [19] 贾宇峰, 王丙申, 迟世春. 堆石料剪切过程中的颗粒破碎研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(9): 1692 - 1697. (JIA Yu-feng, WANG Bing-shen, CHI Shi-chun. Particle breakage of rockfill during triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(9): 1692 - 1697. (in Chinese))
- [20] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [21] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, **19**(3): 83 - 88. (GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rock fill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, **19**(3): 83 - 88. (in Chinese))
- [22] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 模拟堆石料颗粒破碎对强度变形的影响[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Effect of particle breakage on strength and deformation of modeled rockfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. (in Chinese))
- [23] SADREKARIMI A, OLSON S M. Critical state friction angle of sands[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(9): 771 - 783.