

DOI: 10.11779/CJGE201905023

# 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究

马维嘉<sup>1</sup>, 陈国兴<sup>\*1,2</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 吴琪<sup>1</sup>, 刘景儒<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009; 3. 海军工程设计研究院, 北京 100070)

**摘要:** 针对饱和南沙岛礁珊瑚砂, 开展了一系列不排水循环加载试验, 研究了相对密度  $D_r$  和初始围压  $\sigma'_{3c}$  对饱和珊瑚砂的超孔隙水压力、应变发展、有效应力路径及动强度特性的影响, 并比较了珊瑚砂与福建砂的液化特性差异。试验表明, 珊瑚砂的超静孔压  $\Delta u$  的发展模式与石英砂的有较大区别, 可用修正后的 Seed 模型进行表征。珊瑚砂液化时的累积能量耗散远比福建砂的大。珊瑚砂的轴向应变  $\varepsilon_{DA}$  随着循环振次增加而逐渐变大, 不会发生急剧增大的现象。在有效应力路径接触相转换线后, 珊瑚砂会发生剪胀和剪缩交替出现的现象, 仍然会存在有效应力。较之福建砂  $\Delta u$  的波动特征, 珊瑚砂  $\Delta u$  的波动更大, 且当  $\Delta u$  接近  $\sigma'_{3c}$  时波动明显增大, 产生“瞬时液化”现象。珊瑚砂的动强度随着  $D_r$  以及  $\sigma'_{3c}$  的增大而增大。珊瑚砂的动强度大于石英砂的动强度。

**关键词:** 饱和珊瑚砂; 不排水动三轴试验; 孔压发展模式; 动强度

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)05-0981-08

作者简介: 马维嘉(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail: njtechmjw@163.com。

## Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading

MA Wei-jia<sup>1</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1, 2</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, WU Qi<sup>1</sup>, LIU Jing-ru<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Engineering Design and Research Institute of Navy, Beijing 100070, China)

**Abstract:** Undrained cyclic triaxial tests are carried out on the saturated coral sand in Nansha Islands, South China Sea. The experiment aims at investigating the characteristics of pore water pressure, axial strain, effective stress path and cyclic resistance of coral sand under different  $D_r$  and  $\sigma'_{3c}$ . The differences between coral sand and Fujian sand about liquefaction characteristic are also discussed. The test results indicate that the development of pore water pressure ( $\Delta u$ ) of coral sand is different from that of siliceous sand, which can be fitted by a modified Seed model. The accumulative energy dissipation of liquefied coral sand is greater than that of liquefied Fujian sand. The axial strain ( $\varepsilon_{DA}$ ) of coral sand has no sudden enlargement phenomenon during cyclic loading, and the amplitude of  $\varepsilon_{DA}$  increases continuously with the loading time. When touching the phase transformation line, the coral sand shows the alternation of dilatancy and contraction as the effective stress still exists. Compared with the Fujian sand, the coral sand has a greater fluctuation in especially when approaching  $\sigma'_{3c}$ , and a phenomenon of transient liquefaction can be observed in the tests. The cyclic resistance of coral sand increases with the increase of  $D_r$  and  $\sigma'_{3c}$ . The cyclic resistance of coral sand is basically higher than that of siliceous sand.

**Key words:** saturated coral sand; undrained cyclic triaxial test; generation pattern of excess pore pressure; cyclic resistance

## 0 引言

珊瑚砂是一种由海洋生物骨架残骸经物理、生物及化学作用后形成的特殊海洋土。经测定, 珊瑚砂的碳酸钙含量约为 90%, 远远高于钙质砂中定义的碳酸钙含量, 因此, 珊瑚砂是名副其实的钙质砂。珊瑚砂因其特殊的形成过程, 具有棱角度高, 强度低、易破碎、形状不规则、存在内孔隙等特点<sup>[1-2]</sup>; 与陆源石英砂相比, 不同类型的珊瑚砂会有明显不同的动力特性

是毫不令人惊奇的<sup>[3]</sup>。南海战略地位十分重要, 系我国核心利益之所在。吹填造岛工程费用极为昂贵, 岛礁及其国防与民用工程设施的地震风险大, 确保岛礁及其工程设施的地震安全性极为重要, 但中国对南海

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678299); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17-0927)

收稿日期: 2018-03-20

\*通讯作者(E-mail: gxc6307@163.com)

珊瑚岛礁的地震安全问题研究至今鲜有公开报道。预防和减轻南海岛礁工程地震灾害的首要问题是确定岛礁工程场地液化的可能性。因此, 南海岛礁珊瑚砂的动力特性问题是亟需解决的基础性科学问题。

从近期大地震震害资料看(1993年关岛地震<sup>[4]</sup>、2006年夏威夷地震<sup>[5]</sup>、2010年海地地震<sup>[6]</sup>), 饱和珊瑚砂存在严重的地震液化现象。国内外学者进行了一系列的室内试验以研究珊瑚砂的液化现象。Hyodo等<sup>[7]</sup>对Dogs Bay珊瑚砂和Toyoura砂进行了一系列不排水动力三轴对比试验, 比较两种砂土动强度之间的大小, 建立了Dogs Bay珊瑚砂相变强度与动强度之间的关系。Salem等<sup>[8]</sup>针对埃及Dabaa珊瑚砂进行了动力三轴试验, 发现对于Dabaa珊瑚砂的液化判定, 使用孔压判定标准比应变判定标准更为合理。Sharma等<sup>[9]</sup>对Goodwyn和Ledge Point的两种珊瑚砂进行了一系列动力三轴对比试验, 探究了单向(one-way)、双向(two-way)加载时土体的体积变化, 比较两种珊瑚砂的循环剪切强度以及破坏时的应变大小。虞海珍等<sup>[10]</sup>着重研究了波浪作用下西沙群岛珊瑚砂的变形特性, 发现珊瑚砂在循环加载过程中极易发生塑性变形, 认为这与珊瑚砂的高压缩性有关。李建国<sup>[11]</sup>研究了复杂应力路径作用下西沙群岛饱和珊瑚砂的特性, 发现主应力方向角的连续旋转对于珊瑚砂的孔压增长模式有重要影响。以上研究对珊瑚砂的动力特性进行了不同的分析, 但对于中国南沙群岛饱和珊瑚砂的动力特性研究仍是空白, 需要对南沙群岛珊瑚砂以及石英砂做进一步的试验对比分析, 二者在动力特性上的差异有待更深层次讨论。

本试验利用GDS动三轴仪对不同相对密度 $D_r$ 以及不同初始围压 $\sigma'_{3c}$ 的南沙岛礁饱和珊瑚砂进行了一系列不排水循环三轴试验, 分析了饱和珊瑚砂的孔压发展模式、变形特征以及应力路径特征, 同时进行了一组饱和福建砂的循环加载试验, 对比了饱和珊瑚砂与石英砂的液化特性。

## 1 试验设计

### 1.1 试验仪器及试样制备

试验采用英国GDS动三轴仪进行, 仪器如图1所示。该仪器由计算机系统、试验数据采集器、轴向力和轴向位移动态控制主机以及两个标准压力/体积控制器组成。轴向最大负荷为±5 kN, 精度可达到0.001 kN, 压力最大可达到2 MPa, 轴向位移最大量程为100 mm, 位移精度0.07% F.S(满量程)。

试验所用珊瑚砂取自南沙群岛某岛礁, 图2为珊瑚砂电镜扫描图像, 通过图像可观察到珊瑚砂颗粒呈

次角状-片状, 且颗粒表面较为粗糙。试验所用福建砂为典型石英砂, 颗粒呈圆形且表面较为光滑。两种砂土的基本物理性质指标如表1所示, 级配曲线如图3所示。试样直径 $D=50$  mm, 高 $H=100$  mm, 采用干装法制样。将烘干的砂土按照级配对每层所需粒径颗粒的质量进行单独配制, 均分5层倒入承膜筒中, 各层之间进行刮毛处理, 以保证试样的均匀性。为使试样达到饱和状态, 制样完成后, 首先通入15 min的CO<sub>2</sub>以置换土体中的空气; 然后从试样底部通入无气水, 直至无气泡排出; 最后进行分级反压饱和, 当试样的孔压系数 $B$ 达到0.97以上时, 可认为此时砂土已达到饱和。

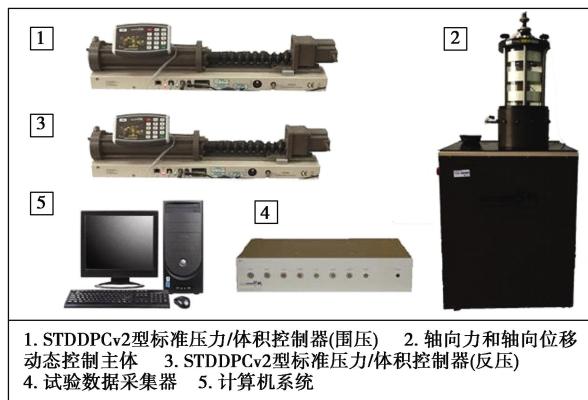


图1 GDS 动三轴仪

Fig. 1 GDS dynamic triaxial test apparatus

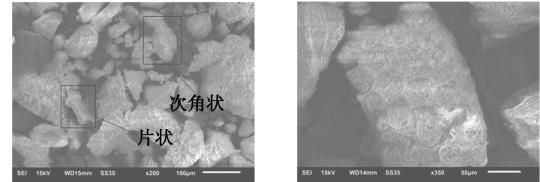


图2 南沙珊瑚砂电镜扫描图像

Fig. 2 SEM photos of coral sand in Nansha Islands

表1 珊瑚砂与福建砂的基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of coral sand and Fujian sand

土名	珊瑚砂	福建砂
平均粒径 $d_{50}$	0.31	0.22
不均匀系数 $C_u$	4.67	2.01
曲率系数 $C_c$	0.86	0.98
相对密度 $G_s$	2.80	2.65
最大孔隙比 $e_{max}$	1.72	0.86
最小孔隙比 $e_{min}$	0.99	0.55
有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	43.00	33.90

### 1.2 试验方案

为研究不同 $D_r$ 、 $\sigma'_{3c}$ 和应力水平下珊瑚砂的液化特性, 选取 $D_r$ 为30%, 45%, 60%的珊瑚砂, 在 $\sigma'_{3c}$ 为50, 100, 200 kPa的条件下进行固结, 固结完成后在循环应力比CSR为0.15, 0.2, 0.25的条件下进行不排水循环三轴试验, 其中 $CSR = \sigma_d / (2\sigma'_{3c})$ ,  $\sigma_d$ 为轴

向应力。试验采用应力控制的正弦波加载, 加载频率为 1 Hz。选取  $D_r = 45\%$  的福建砂进行对比试验, 为分析固结后相对密度的改变对于珊瑚砂强度的影响, 通过土样固结时排水的体积量测固结后土样的实际体积, 可得出固结后的相对密实度  $D_{r(\text{con})}$ 。试验方案见表 2。

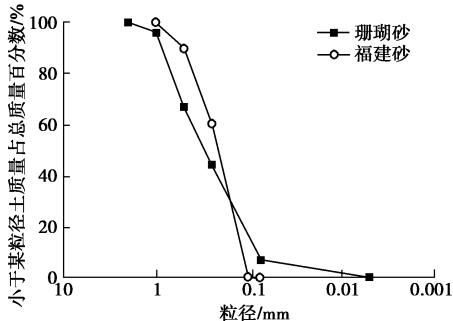


图 3 珊瑚砂与福建砂的级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of coral sand and Fujian sand

表 2 试验方案

Table 2 Summary of test schemes

编号	$D_r/\%$	$D_{r(\text{con})}/\%$	$\sigma'_{3c} / \text{kPa}$	CSR
S1	45	48.02	50	0.15
S2	45	48.35	50	0.20
S3	45	47.84	50	0.25
S4	45	50.50	100	0.15
S5	45	51.04	100	0.20
S6	45	50.11	100	0.25
S7	45	52.92	200	0.15
S8	45	52.05	200	0.20
S9	45	54.40	200	0.25
S10	30	35.92	100	0.15
S11	30	36.85	100	0.20
S12	30	36.61	100	0.25
S13	60	65.04	100	0.15
S14	60	64.03	100	0.20
S15	60	64.42	100	0.25
F16	45	51.20	100	0.10
F17	45	51.67	100	0.12
F18	45	52.12	100	0.15

注: S 为珊瑚砂, F 为福建砂。

## 2 试验结果分析

以土样编号 S2 的不排水循环三轴试验结果为例, 图 4 给出了饱和珊瑚砂的孔压、轴向应变和偏应力的实测时程曲线。可以看出, 随着循环振次的增加, 珊瑚砂的超静孔隙水压力  $\Delta u$  不断上升, 双幅应变  $\varepsilon_{DA}$  逐渐发展, 在此期间  $\sigma_d$  能够保持稳定, 直至土体液化, 说明仪器性能良好, 试验结果可信。

### 2.1 两种砂土的试验结果对比分析

图 5 为两种砂土的  $\Delta u$  时程曲线。当 CSR 均为 0.15 时, 珊瑚砂在经历 208 圈的循环加载后  $\Delta u$  达到  $\sigma'_{3c}$ ; 而福建砂在循环加载 4 圈时  $\Delta u$  就达到  $\sigma'_{3c}$ , 这说明相比于福建砂, 珊瑚砂具有更强的抗液化能力。且当珊瑚砂与福建砂液化振次相近时, 两种砂土的  $\Delta u$  均随循环振次  $N$  的增加而上升, 直至达到  $\sigma'_{3c}$ 。其主要差

异是, 福建砂呈现出  $\Delta u$  的累积增长,  $\Delta u$  达到  $\sigma'_{3c}$  时土体完全破坏; 而珊瑚砂的  $\Delta u$  在累积增长的同时, 每一循环周期内也会产生较大的波动孔压  $\Delta u_{(f)}$  ( $\Delta u_{(f)} = \Delta u_{\max} - \Delta u_{\min}$ ), 当  $\Delta u$  达到  $\sigma'_{3c}$  时, 珊瑚砂呈现出“瞬时液化”现象, 即土体在初始液化后, 只在某些瞬间  $\Delta u$  与  $\sigma'_{3c}$  相等, 而土体结构并未完全破坏。

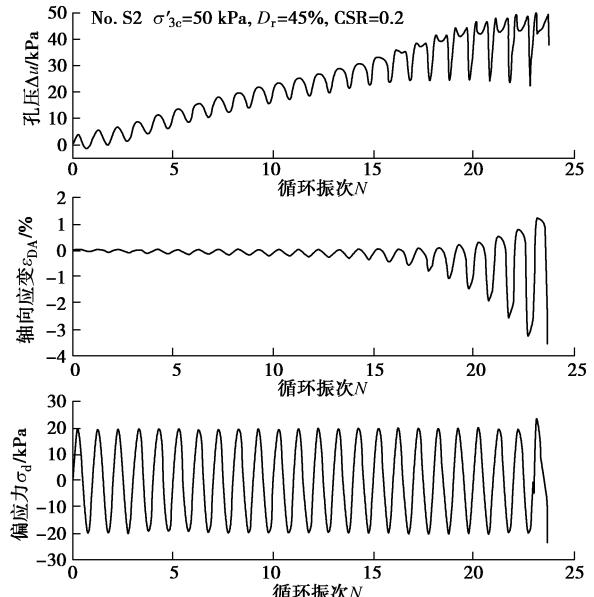


图 4 代表性土样试验结果的实测时程曲线

Fig. 4 Measured time histories of test results of typical specimen

图 6 为相近液化振次下的两种砂土  $\Delta u_{(f)}$  与循环振次比  $N/N_L$  的关系曲线, 其中,  $N_L$  代表  $\Delta u$  首次达到  $\sigma'_{3c}$  时的振次。由图可知, 随着振次的增加, 福建砂的  $\Delta u_{(f)}$  始终保持在 7 kPa 左右, 而珊瑚砂的  $\Delta u_{(f)}$  随着振次增加而逐渐变大, 液化时可达 50 kPa。究其原因, 珊瑚砂较大的孔隙比可使  $\Delta u$  快速消散, 抑制了有效应力  $p'$  的减小, 颗粒间的接触力得以保持。

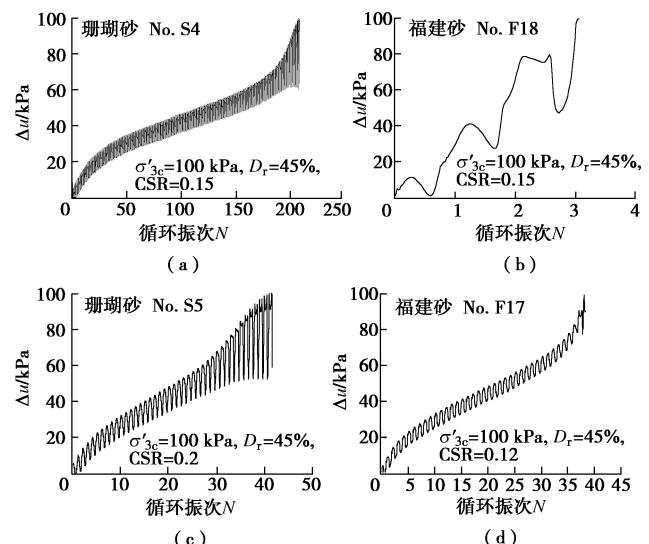


图 5 珊瑚砂与福建砂的孔压时程曲线的比较

Fig. 5 Comparison of time histories of pore water pressures for coral sand and Fujian sand

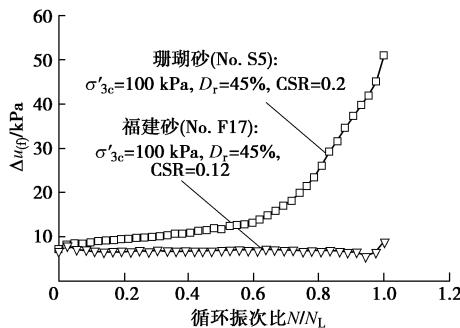


图6 珊瑚砂与福建砂的孔压波动曲线的比较

Fig. 6 Comparison of curves of fluctuating pore water pressures for coral sand and Fujian sand

图7为两种砂土的轴向应变 $\varepsilon_{DA}$ 时程曲线。珊瑚砂的 $\varepsilon_{DA}$ 在加载初期会产生明显的波动现象,  $\varepsilon_{DA}$ 随振次N的增加而逐渐变大直至土体液化, 并没有像福建砂一样产生应变突然急剧增大的现象。究其原因, 由于珊瑚砂颗粒形状不规则、表面粗糙, 导致粒间接触点较多, 使加载初期的土体结构较为稳定, 珊瑚砂只能产生部分可恢复弹性变形; 随着孔压的上升, 粒间接触力逐渐减小, 且由于珊瑚砂的孔隙比较大及少量颗粒破碎的影响, 易于产生颗粒重组现象, 使颗粒结构变得相对稳定, 对孔压的增长产生抑制作用, 从而使珊瑚砂相比于石英砂更难以液化。

图8为两种砂的土应力-应变曲线。可以看出, 福建砂的滞回圈在液化前面积很小, 而液化时突然变大; 珊瑚砂的滞回圈在振动过程中面积是逐渐增大的, 且其滞回圈面积比福建砂的大得多。这说明两种砂土的耗能方式是不同的。

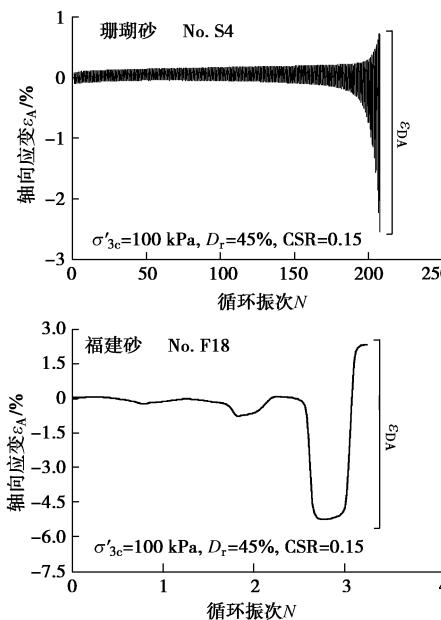


图7 珊瑚砂与福建砂的轴向应变时程曲线的比较

Fig. 7 Comparison of time histories of axial strains for coral sand and Fujian sand

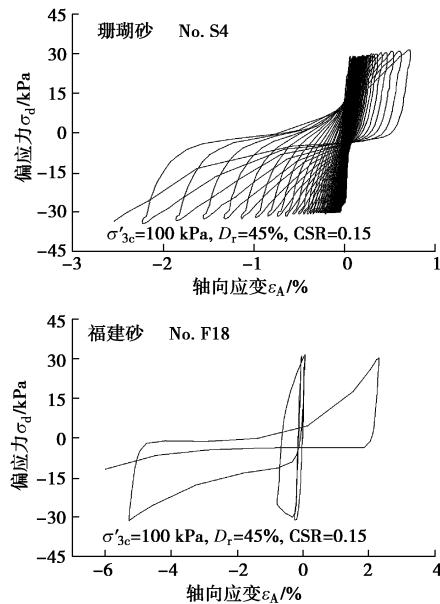


图8 珊瑚砂与福建砂的应力-应变曲线的比较

Fig. 8 Comparison of stress-strain curves for coral sand and Fujian sand

Figueredo等<sup>[12]</sup>提出用滞回圈面积的大小来表征土单元的能量耗散, 将加载过程中所有能量耗散相加, 即得土单元在液化时总的能量耗散。计算相同固结条件及CSR下两种砂土的能量耗散, 如图9所示。可以发现: 珊瑚砂的单次能量耗散随循环振次逐渐增加, 而福建砂的单次能量耗散在振动前期几乎为0, 在液化时能量耗散急剧增加。值得注意的是, 珊瑚砂在液化时的累计能量耗散高达551 kJ/m<sup>3</sup>, 而福建砂的累积能量耗散仅有113 kJ/m<sup>3</sup>。这说明珊瑚砂具有较强的结构性, 需要消耗更多的能量才能使其达到破坏。

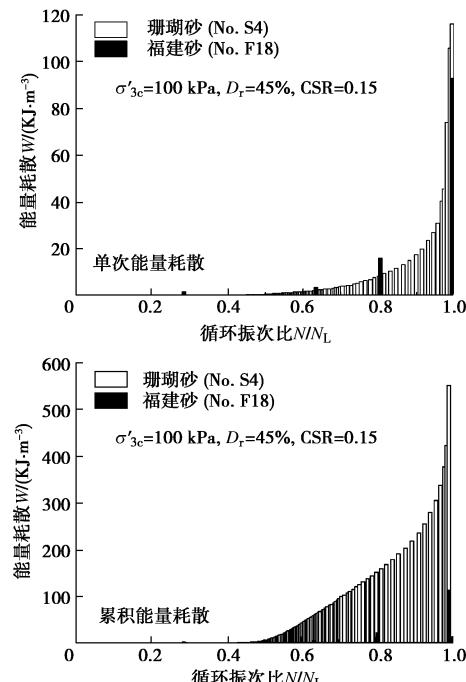


图9 珊瑚砂与福建砂的能量耗散的比较

Fig. 9 Comparison of energy dissipations for coral sand and Fujian sand

## 2.2 孔压发展特性

孔压比  $R_u$  定义为每一循环周期  $\Delta u$  的峰值与  $\sigma'_{3c}$  的比值, 图 10 给出了不同循环应力比 CSR 时  $R_u$  与  $N/N_L$  之间的关系。显然, CSR 对  $R_u$  随  $N/N_L$  变化的影响显著。Lee 等<sup>[13]</sup>给出了 Monterey 砂  $\Delta u$  的上下边界, 见图 10 中虚线。可以发现: 石英砂  $\Delta u$  的上下边界并不适用于珊瑚砂。珊瑚砂  $\Delta u$  的发展明显超出了石英砂  $\Delta u$  的上边界。

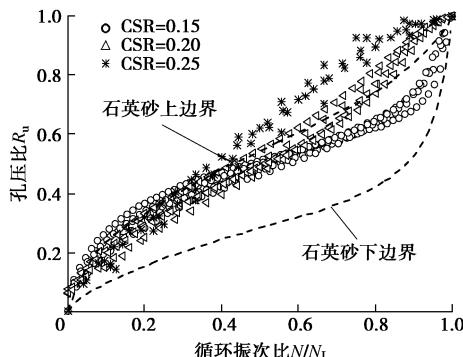


图 10 珊瑚砂超静孔压的发展 (CSR 为 0.15, 0.2, 0.25)

Fig. 10 Generation patterns of excess pore pressure for coral sand  
(CSR = 0.15, 0.2, 0.25)

为了清晰地观察  $R_u$  的增长模式, 图 11 给出给定 CSR 时  $R_u$  与  $N/N_L$  之间的关系。对不同的  $D_r$  和  $\sigma'_{3c}$ , 当施加在试样上的 CSR 相同时, 其  $\Delta u$  的发展规律是一致的。广泛应用的 Seed 孔压模型可表示为<sup>[14]</sup>

$$R_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(2 \cdot (N/N_L)^{1/\theta} - 1) , \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为与砂土类型有关的试验常数。随后, Booker 等<sup>[15]</sup>等将式 (1) 简化为

$$R_u = \frac{2}{\pi} \arcsin(N/N_L)^{1/2\theta} . \quad (2)$$

使用式 (2) 对珊瑚砂  $\Delta u$  进行拟合的结果如图 11 虚线所示, 发现拟合曲线与孔压增长趋势的差别较大。因此, Seed 模型直接用于描述珊瑚砂的孔压发展是不适宜的。鉴于此, 本文在式 (2) 的基础上进行修正, 得到了适宜描述珊瑚砂孔压发展的修正 Seed 模型:

$$R_u = a \times \frac{2}{\pi} \arcsin(N/N_L)^{1/2\theta} + b \times \arctan(N/N_L) , \quad (3)$$

式中,  $a$ ,  $b$ ,  $\theta$  为拟合参数, 通过对可决系数  $R^2$  的最优拟合, 得到了表 3 所列出的拟合参数。拟合曲线如图 11 中实线所示。

表 3 修正 Seed 模型拟合参数及可决系数

Table 3 Fitting coefficients of corrected Seed model

CSR	$a$	$b$	$\theta$	$R^2$
0.15	1.381	-0.489	1.047	0.985
0.20	0.964	0.151	0.869	0.980
0.25	-0.168	1.492	0.403	0.995

采用本文提出的修正 Seed 模型对试验测量的珊瑚砂孔压数据进行拟合, 效果很好,  $R^2$  均大于 0.98,

模型参数的变化有明显的规律:  $a$ ,  $\theta$  随 CSR 的升高而降低,  $b$  随 CSR 的升高而升高。因此, CSR 对珊瑚砂孔压发展模式的影响较大。

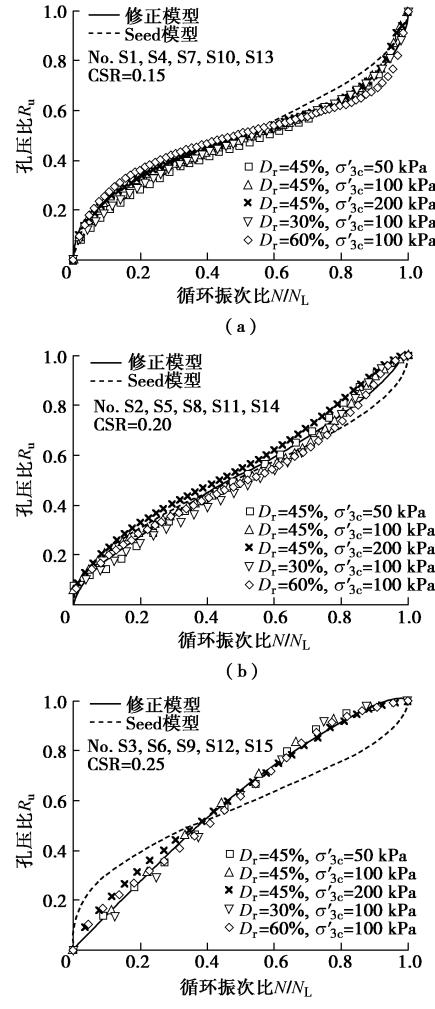


图 11 施加不同循环应力时珊瑚砂孔压的测试数据与预测结果的比较

Fig. 11 Comparison between test data and the predicted values of corrected Seed model for generation of excess pore pressure of coral sand under various CSRs

## 2.3 轴应变发展特征

图 12 为 CSR 为 0.15, 0.2, 0.25 时珊瑚砂双幅轴向应变  $\varepsilon_{DA}$  的发展曲线。珊瑚砂的  $\varepsilon_{DA}$  随着 CSR 的增大而改变, 且  $\varepsilon_{DA}$  的发展趋势随 CSR 的增大而加快。可以发现, 当施加的 CSR = 0.15 时, 达到  $\varepsilon_{DA} = 5\%$  需循环加载 100 次以上, 这意味着在弱震作用下珊瑚砂不会发生液化; 而当施加的 CSR = 0.25 且土样处于低围压、中密达状态时, 达到  $\varepsilon_{DA} = 5\%$  所需的循环加载次数小于 12 次, 这意味着在强震作用下珊瑚砂极易发生液化。

## 2.4 应力路径分析

为研究珊瑚砂的有效应力路径, 与福建砂进行了对比分析。图 13 比较了一组珊瑚砂和福建砂的不排水

单向压缩试验结果,以确定两种砂土的静力破坏线(failure line, FL)和相转换线(phase transformation line, PTL)的差异。根据莫尔-库仑强度准则,可得珊瑚砂的有效内摩擦角 $\varphi'$ 为43°,福建砂的 $\varphi'$ 为33.9°,珊瑚砂的 $\varphi'$ 要比福建砂的大。

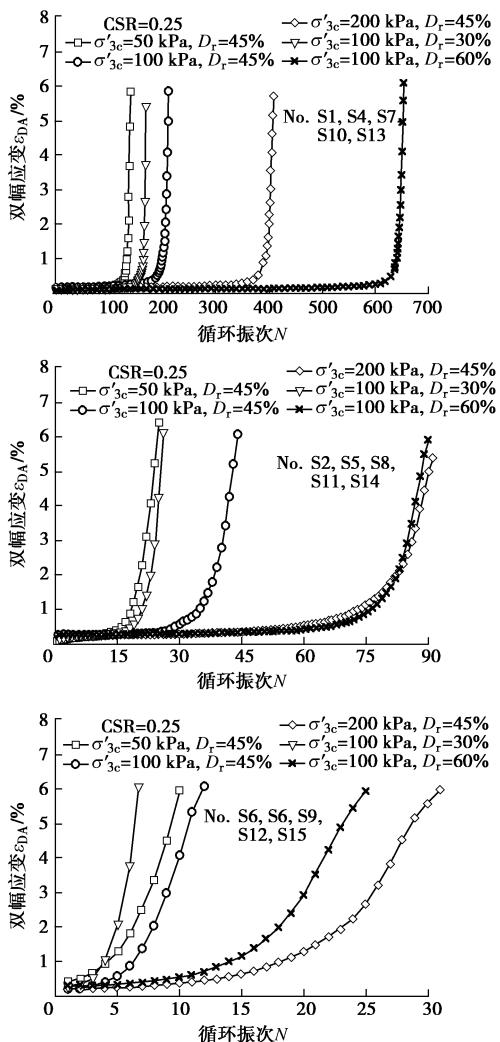


图 12 施加不同循环应力时珊瑚砂双幅应变发展曲线

Fig. 12 Curves of double strain development of coral sand under various CSRs

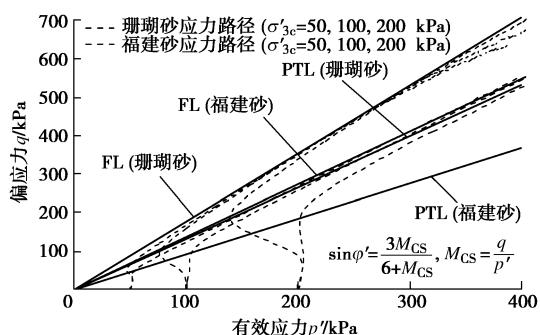


图 13 珊瑚砂与福建砂的静力破坏线和相变线的比较

Fig. 13 Comparison between failure and phase transformation lines for coral sand and Fujian sand

图 14 为两种砂土的有效应力路径。由图 14 (a) 可知,福建砂的有效应力路径在未达到 PTL 之前,有效应力  $p'$  逐渐下降。当达到图示点 1 处时,有效应力路径第一次接触 PTL,之后  $p'$  急剧下降,当达到图示点 2 处时,有效应力路径达到 PTL 的上方,  $p'$  急剧上升,土体出现剪胀现象;再次经过一个周期的循环作用,应力路径到达点 3 处,出现了典型的“蝴蝶形”回滞环,此时  $p'$  接近 0,土体发生液化。液化后的有效应力路径处于 FL 的上方,表示土体已完全破坏。图 14 (b) 为珊瑚砂的有效应力路径,虽然在点 a 处应力路径并未达到 PTL,但此时土体就已经开始产生剪胀现象,在点 b 处达到 PTL 后,交替出现剪胀、剪缩的现象,且交汇于点 c, d 处,虽然此时也出现了“蝴蝶形”的回滞环,但  $p'$  只会在某个瞬时降低到 0,应力路径几乎处于 FL 下方。这说明珊瑚砂在  $p'$  几乎丧失时,颗粒间的重新排列使得部分  $p'$  得以恢复,减缓了珊瑚砂的液化进程。

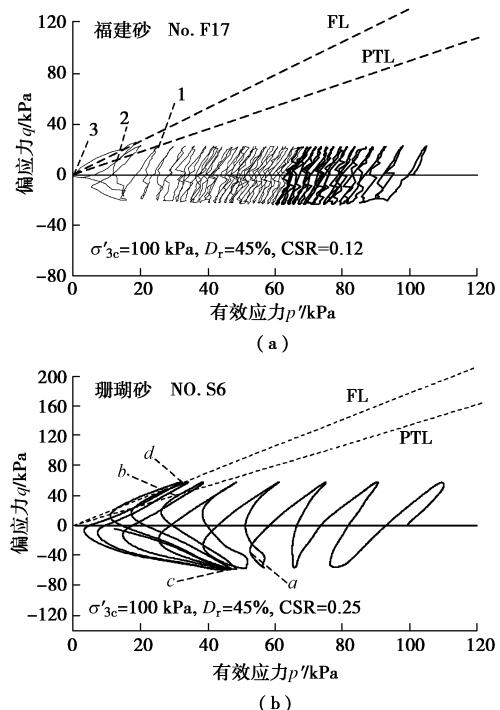


图 14 珊瑚砂与福建砂的有效应力路径的比较

Fig. 14 Comparison of effective stress paths for coral sand and Fujian sand

## 2.5 动强度特性

土的动强度是表征砂土抗液化能力的重要指标。取孔压比  $r_u = 100\%$ 作为珊瑚砂液化标准,图 15 给出了珊瑚砂液化所需的循环应力比 CSR 与循环振次 N 的关系曲线。由图可知,饱和珊瑚砂的动强度随着  $\sigma'_3c$  的增大而增大。究其原因,随着  $\sigma'_3c$  的增大,粒间接触力会增大;此外,  $\sigma'_3c$  的增大会导致  $D_r$  的增大,使得颗粒排列更加紧密。随着  $D_r$  的增大,饱和珊瑚砂的动强度也是逐渐变大的,这与石英砂的性质是一致的。

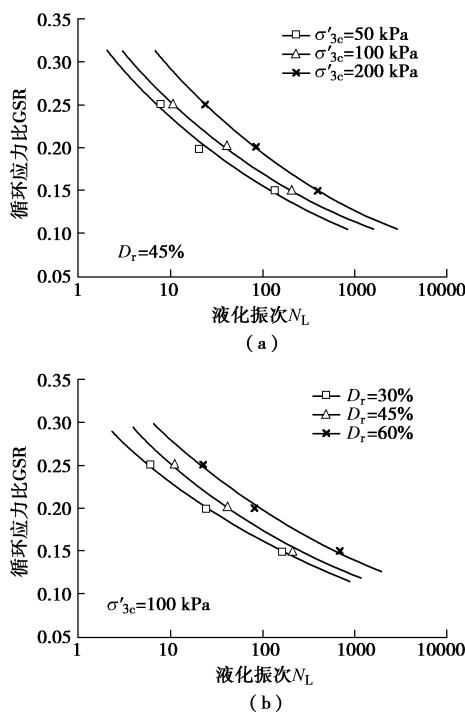


图 15 珊瑚砂动强度曲线

Fig. 15 Cyclic strength curves of coral sand

通常根据拟考虑的震级大小确定室内试验采用的等效振动次数。对于 7.5 级地震, Seed 等<sup>[16]</sup>建议采用循环加载 15 次发生液化时所对应的 CSR 来表征土体的抗液化强度 (CRR), 而 Martin 等<sup>[17]</sup>则建议采用循环加载 20 次发生液化时所对应的 CSR 作为土体的 CRR。表 4 给出珊瑚砂循环加载 15 次和 20 次发生液化时 \$\sigma'\_{3c}\$、\$D\_{r(\text{con})}\$ 与 CRR 之间的关系。

表 4 \$\sigma'\_{3c}\$、\$D\_{r(\text{con})}\$ 与 CRR 之间的关系

Table 4 Relationship among \$\sigma'\_{3c}\$, \$D\_{r(\text{con})}\$ and CRR

\$D_{r(\text{con})}/\%\$	$\sigma'_{3c}/\text{kPa}$	CRR	
		15 次	20 次
48.07	50	0.22	0.208
50.55	100	0.242	0.229
53.12	200	0.273	0.258
36.46	100	0.216	0.207
64.5	100	0.263	0.252

Salem 等<sup>[8]</sup>曾对 Dabaa 珊瑚砂进行了一系列三轴不排水试验, 提出使用参数 \$\sigma'\_{3c} \times D\_r^{-0.55}\$ 来描述 \$D\_r\$ 与 \$\sigma'\_{3c}\$ 对 CRR 的影响。据此, 本文对该参数进行修正, 引入参数 \$(\sigma'\_{3c}/100)^\alpha \times D\_{r(\text{con})}^{0.5-\alpha}\$ 来描述 \$\sigma'\_{3c}\$、\$D\_{r(\text{con})}\$ 对砂土 CRR 的影响。对于本次试验所用的珊瑚砂, 当 \$\alpha\$ 取值为 0.14 时, 此参数与 CRR 具有很强的线相关性, \$R^2\$ 均高于 0.99, 如图 16 所示。

图 17 比较了不同珊瑚砂与石英砂在 \$D\_r = 40\% \sim 65\%\$ (中密砂) 及 \$\sigma'\_{3c} = 100 \text{ kPa}\$ 条件下的动强度曲线。当 \$\sigma'\_{3c}\$ 相同且 \$D\_r\$ 相近时, 珊瑚砂的动强度大于石英砂。如前所述, 由于振动过程中珊瑚砂的孔隙水能够快速消散、应变缓增而保持了一定的有效应力以及液化时

能量耗散较大等原因, 导致了珊瑚砂与石英砂相比具有更强的抗液化能力。

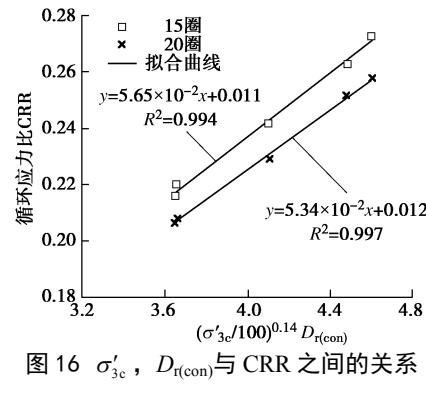
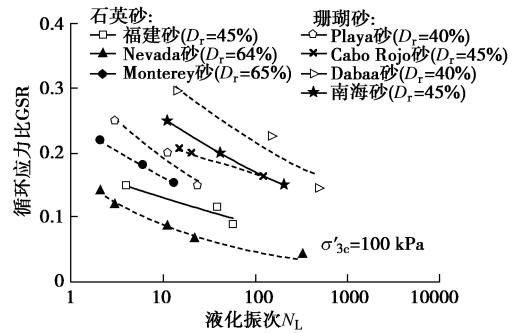


图 16 \$\sigma'\_{3c}\$、\$D\_{r(\text{con})}\$ 与 CRR 之间的关系

Fig. 16 Relationship among \$\sigma'\_{3c}\$, \$D\_{r(\text{con})}\$ and CRR

图 17 不同类型的珊瑚砂与石英砂动强度对比<sup>[8, 18-20]</sup>Fig. 17 Comparison of cyclic strengths among different types of coral sand and siliceous sand<sup>[8, 18-20]</sup>

### 3 结 论

(1) 珊瑚砂的 \$\Delta u\$ 在达到 \$\sigma'\_{3c}\$ 后, \$\Delta u\$ 会有较大波动, \$p'\$ 并未完全丧失, 出现“瞬时液化”现象; \$\varepsilon\_{DA}\$ 在振动初期出现明显波动, 在 \$\varepsilon\_{DA}\$ 发展的过程中不会发生因应变突增而导致的土体结构崩塌的现象; 达到液化时需要耗散的能量较大, 表明珊瑚砂更不易液化。

(2) 根据珊瑚砂的孔压发展特征, 提出了修正 Seed 模型, 可以很好地描述珊瑚砂的孔压发展特征。

(3) 福建砂的有效应力路径在第一次接触 PTL 后, 其 \$\Delta u\$ 会急剧增大, \$p'\$ 迅速减小, 发生液化现象; 珊瑚砂的应力路径在未接触 PTL 之前便出现明显的剪胀现象, 在接触 PTL 后, \$p'\$ 并未完全丧失, 剪胀与剪缩现象交替产生, 有效应力路径未超越 FL, 土体未发生结构上的破坏。

(4) 与石英砂相比, 珊瑚砂具有更高的动强度。珊瑚砂的动强度随着 \$\sigma'\_{3c}\$ 以及 \$D\_r\$ 的增大而增大, 可用参数 \$(\sigma'\_{3c}/100)^\alpha \times D\_{r(\text{con})}^{0.5-\alpha}\$ 描述 \$\sigma'\_{3c}\$ 与 \$D\_{r(\text{con})}\$ 对 CRR 的影响。

### 参考文献:

- [1] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特

- [1] 征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831 - 1836. (ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831 - 1836. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] CELESTINO T B, MITCHELL J K. Behavior of carbonate sands for foundations of offshore structures[C]// Proceedings of Brazil Offshore'83, Rio de Janeiro, 1983: 85 - 102.
- [4] MEJIA L H, YEUNG M R. Liquefaction of Coralline Soils during the 1993 guam earthquake[C]// Earthquake-induced Movements and Seismic Remediation of Existing Foundations and Abutments: Proceedings of Sessions Held in Conjunction with the ASCE Convention in San Diego. San Diego, 1995: 33 - 48.
- [5] CHOCH G, KINDRED T, ROBERTSON I, et al. Compilation of observations of the October 15, 2006 Kiholo bay (Mw 6.7) and Mahukona (Mw 6.0) Earthquakes, Hawai'i[R]. Earthquake Engineering Research Institute (EERI). <http://www.eeri.org/2006/10/island-of-hawaii/>. 2006.
- [6] OLSON S M, GREEN R A, LASLEY S, et al. Documenting liquefaction and lateral spreading triggered by the 12 January 2010 haiti earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2012, 27(S1): S93 - S116.
- [7] HYODO M, HYDE A F L, ARAMAKI N. Liquefaction of crushable soils[J]. Géotechnique, 1998, 48(4): 527 - 543.
- [8] SALEM M, ELMAMLOUK H, AGAIBY S. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55: 83 - 91.
- [9] SHARMA S S, ISMAIL M A. Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(12): 1581 - 1591.
- [10] 虞海珍, 汪 稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 6 - 11. (YU Hai-zhen, WANG Ren. Experimental study on dynamic strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 6 - 11. (in Chinese))
- [11] 李建国. 波浪荷载作用下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005. (LI Jian-guo. Experimental research on dynamic behavior of saturated calcareous sand under wave loading[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences. P.R. China, 2005. (in Chinese))
- [12] FIGUEROA J L, SAADA A S, LIANG L, et al. Evaluation of soil liquefaction by energy principles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(9): 1554 - 1569.
- [13] LEE K L, ALBAISA A. Earthquake induced settlements in saturated sands[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(4): 387 - 406.
- [14] SEED H B, LYSMER J, MARTIN P P. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1976, 102(4): 323 - 346.
- [15] BOOKER J R, RAHMAN M S, SEED H B. GADFLEA—A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, Univ of California at Berkeley, 1976.
- [16] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425 - 1445.
- [17] MARTIN G R, FINN W D L, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1975, 101(5): 423 - 438.
- [18] BRANDES H G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2011, 29(1): 113 - 126.
- [19] SANDOVAL E A, PANDO M A. Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands[J]. Earth Sciences Research Journal, 2012, 16(16): 55 - 63.
- [20] LAVIELLE T H. Liquefaction susceptibility of uncemented calcareous sands from Puerto Rico by cyclic triaxial testing[D]. Montgomery County: Virginia Tech, 2008.