

DOI: 10.11779/CJGE20220798

不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的液化流动特性

秦 悠¹, 杨铮涛¹, 吴 琦¹, 赵 凯¹, 陈国兴^{*1,2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 211816)

摘要: 循环荷载作用下饱和砂土的超静孔压累积是导致土体液化的原因, 将可液化砂土视为流体是一种较新的液化研究思路。通过循环应力主轴 90° 跳转和连续旋转的均等固结、不排水循环剪切试验, 探究了不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的液化流动特性, 发现以初始表观黏度 η_0 规准的表观黏度比 η/η_0 与超静孔压比 r_u 的关系受循环应力路径的影响显著, η/η_0 随 r_u 的增大而渐进衰退; 而平均流动系数 $\bar{\kappa}$ 随 r_u 的增长呈指数函数形式增大。循环应力比 CSR (CSR=0.25~0.40) 和循环加载频率 f ($f=0.1\sim1$ Hz) 对 η/η_0-r_u 和 $\bar{\kappa}-r_u$ 关系的影响均不敏感。不论循环应力主轴 90° 跳转或连续旋转, 发现表观黏度梯度和平均流动系数梯度均随 r_u 的增大呈现出先增后减的特征, 其反转点的 $r_u \approx 0.9$, 可视为饱和珊瑚砂由固态向液态转变的相变孔压比 r_{uth} , 以相应的相变平均流动系数 $\bar{\kappa}_{th}$ 规准的 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}-r_u$ 的所有试验数据点处于一个窄带内, 且 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ 随 r_u 增长服从指数函数关系。

关键词: 液化流动特性; 饱和珊瑚砂; 不排水循环剪切试验; 循环加载方式; 应力主轴转动

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)08-1625-10

作者简介: 秦 悠(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: qinyou94@163.com。

Liquefaction flow characteristics of saturated coral sand subjected to various patterns of cyclic loading

QIN You¹, YANG Zhengtao¹, WU Qi¹, ZHAO Kai¹, CHEN Guoxing^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 211816, China)

Abstract: The accumulation of the excess pore water pressure of saturated sand under various cyclic loadings is the cause of soil liquefaction, and it is a relatively new research idea to treat the liquefiable sand as a fluid. A comprehensive experimental investigation of the liquefaction flow characteristics is performed for the saturated coral sand subjected to the jump of 90° and the continuous rotation of the principal stresses with cyclic loading frequency (f) at isotropic consolidations. The test results show that the relationship between the normalized apparent viscosity (η/η_0) and the excess pore water pressure ratio (r_u) is significantly affected by the cyclic stress paths, the degradation of η/η_0 with r_u is a progressive process, and a positive exponential correlation exists between the average flow coefficient ($\bar{\kappa}$) and r_u . The correlations between η/η_0 and r_u and between $\bar{\kappa}$ and r_u seem to be independent on the cyclic stress ratio (CSR = 0.25~0.40) and f ($= 0.1\sim1$ Hz). Another significant finding is that the apparent viscosity gradient and the average flow coefficient gradient both increase first and then decrease with the increase of r_u regardless of the jump of 90° and the continuous rotation of the principal stresses, and r_u approximately equal to 0.9 at the reversal point can be regarded as the threshold value of the excess pore water pressure ratio (r_{uth}) at the phase transformation state from the solid state to the liquid one, by denoting the corresponding $\bar{\kappa}$ as $\bar{\kappa}_{th}$. The data points of $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}-r_u$ for all testing conditions are distributed in a narrow band, and a virtually positive exponential relationship exists between $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ and r_u .

Key words: liquefaction flow characteristic; saturated coral sand; undrained cyclic shear test; cyclic loading pattern; rotation of principal stress

0 引言

液化泛指土体在现场发生类似于液体性态的现象及其后果^[1]。美国土木工程师协会岩土工程分会土动力学委员会对液化的定义是:“任何物质转化为液体的

行为或过程”^[2]。Seed 等^[3]从不排水循环剪切试验中

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678299, 52278503); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX22_1324)

收稿日期: 2022-06-24

*通信作者 (E-mail: gxc6307@163.com)

试样的应力状态出发, 提出了“初始液化”的概念: 首次瞬态零有效应力状态或孔压比 r_u 首次到达 100%, 其中, r_u 为超静孔隙水压力 u_e 与初始有效平均主应力 p'_0 之比。已有研究证实^[1, 4], 循环荷载下土体虽未达到初始液化状态, 但由于孔压上升引起的土结构损伤和软化, 具有液化流动的性态。因此, 饱和砂土液化可视为孔压上升而引起的强度快速降低过程中与土性、应力状态密切相关的一种流动破坏。

为了澄清可液化的力学特性, 一些研究者采用黏度或表观黏度 η 描述和量化液化土的流体特性。Towhata 等^[5]利用振动台和动三轴试验研究了液化后砂土的流动特性, 液化后砂土具有典型的剪切稀化非牛顿流体性质。陈育民等^[6]开展振动台拖球试验, 结果表明: 剪切稀化非牛顿流体模型能够再现液化土的应力-应变率关系。王志华等^[7-8]将饱和砂土的液化行为定义为“超静孔压触变性”, 提出了一种统一的触变流体模型。该模型构建了连接循环剪切前的土结构与液化触发及维持状态的渐进循环反应的有效桥梁, 并建立了基于触变流体理论的可液化土的孔压增长及本构模型。Chen 等^[9]通过饱和砂土的振动台模型试验和液化后细砂的单调轴向压缩试验, 研究了表观黏度 η 的演化过程与液化的触发条件, 提出了剪应变率 $\dot{\gamma}$ 的概念及其算法, 发现 η 与 $\dot{\gamma}$ 服从幂律函数关系, 饱和砂土可视为幂律剪切稀化非牛顿流体。Lirer 等^[10]和 Mele^[11]认为 η 可作为液化触发标准的一个物理参数, 依据 Chen 等^[9]提出的研究思路, 试验证实了 η 与 $\dot{\gamma}$ 之间的关系是表征非牛顿流体的幂律函数。 η 与 r_u 具有强相关性, 且随 r_u 的增大而减小, 当饱和砂土接近液化时 $r_u \rightarrow 1.0$ 和 η 趋近一个很小的稳定值^[9-11]。土单元中循环应力主轴方向角 α_c 会随地震波入射角度的变化而改变^[12]。循环加载方向角对无粘性土的液化特性具有显著影响^[13-14], 已有研究大多是在简单应力条件下开展^[5-11], 模拟地震、波浪等复杂荷载作用下饱和砂土的液化流体特性未见报道。

珊瑚砂作为一种海洋生物成因的特殊岩土介质, 主要分布于地震动水平较高的南北纬 30° 间的区域, 其赋存条件特殊, 具有棱角度高、强度低、易破碎、形状不规则等特征^[13-14], 导致其循环加载下的不排水反应特性与陆源石英砂存在显著差异^[15-17]。珊瑚砂液化是珊瑚岛礁地震地质灾害的主要原因^[14-17], 许多学者试验研究了不同地区饱和珊瑚砂的液化机理与特性^[15, 18-24], 但所有这些试验均基于固体连续介质力学理论来描述珊瑚砂的不排水反应与液化特性。本文将可液化珊瑚砂视为流体, 开展了不同循环加载频率、应力主轴 90° 跳转和连续旋转的均等固结不排水循

环剪切试验, 首次探究不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的液化流动特性。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验在英国 GDS 公司研制的空心圆柱扭剪仪 (HCA) 上完成。该仪器可对空心圆柱试样独立施加四向循环荷载 (轴力 W 、扭矩 M_T 、外围压 p_o 、内围压 p_i), 空心圆柱试样受力与单元应力状态如图 1 所示。通过 HCA 仪对土样同时施加自定义 W , M_T , p_o 和 p_i 波形来实现控制中主应力系数 b 为定值的复杂循环应力路径下的不排水循环剪切(UCS)试验, HCA 仪的技术指标见参考文献[14]。

1.2 试验材料及试样制备

试验所用的珊瑚砂取自南沙群岛某岛礁, 经测定, 该珊瑚砂含有 55.5% 的文石, 41.5% 的高镁方解石和 3.0% 的方解石, 其中 CaCO_3 含量约为 90.28%^[14]。测得试验珊瑚砂的颗粒相对质量密度 G_s 为 2.80; 最大与最小孔隙比分别为 $e_{\max} = 1.72$, $e_{\min} = 0.99$ ^[25]。珊瑚砂的颗粒分布曲线如图 2 所示, 计算得到平均粒径 $d_{50} = 0.31$, 不均匀系数 $C_u = 4.67$, 曲率系数 $C_c = 0.86$ 。

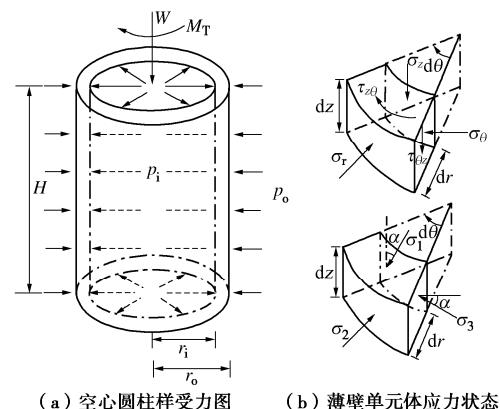


图 1 空心圆柱试样受力状态

Fig. 1 Stress states of a hollow cylinder specimen

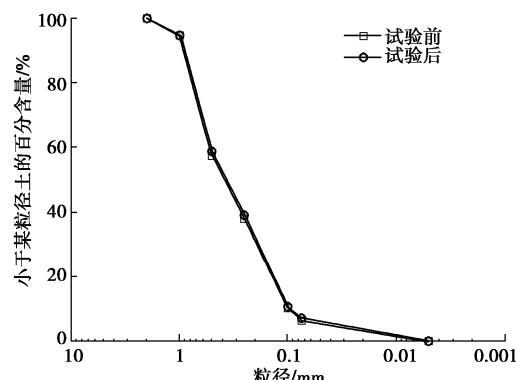


图 2 南沙珊瑚砂的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of tested coral sand

试验采用高 $H = 200$ mm、外径 $d_o = 100$ mm 和内径 $d_i = 60$ mm 空心圆柱试样。采用干装法制样, 控制初始相对密度 D_r 为 45%。将烘干的珊瑚砂按级配对每层所需的颗粒称量后均匀混合, 均分 5 层倒入制样模具中, 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, 先通入 15 min 的 CO_2 以置换土体中的空气; 再从试样底部通入无气水, 直至无气泡排出; 最后分级反压饱和, 直至测得 $B \geq 0.97$ 。试样饱和后, 进行 $p'_0 = 100$ kPa 的均等固结, 依据规范规定^[25], 关闭排水通道后 5 min 内孔隙水压力不再上升, 即可认为固结完成, 计算得到的固结后相对密度 D_{rc} 列于表 2。

1.3 试验方案

对固结后试样施加频率 f 为 0.1 Hz 的正弦波循环偏应力进行 UCS 试验, 循环应力路径如图 3 所示。对循环应力主轴 90° 跳转试验, 以 α_σ 表示循环加载偏离垂直轴的初始方向, 分别取 $\alpha_\sigma = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 。对循环应力主轴连续旋转试验, 以 $\alpha_{\sigma\max}$ 表示循环加载偏离垂直轴的最大方向, 分别取 $\alpha_{\sigma\max} = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 。对 $\alpha_\sigma = 22.5^\circ$ 和 $\alpha_{\sigma\max} = 45^\circ$ 的 UCS 试验, 开展了 $f = 1, 0.5, 0.05$ Hz 的对比

试验。表 1 给出了试验工况的详细信息。循环应力比 CSR 定义如下:

$$\text{CSR} = q_a / p'_0 \quad (1)$$

式中, q_a 为循环偏应力幅值 (kPa)。

2 可液化珊瑚砂的流体特性

2.1 不排水循环反应

图 4, 5 分别为循环应力主轴 90° 跳转和连续旋转下代表性试样的不排水循环反应。由实测的循环应力路径可知, GDS 空心圆柱扭剪仪可以精准实现设定循环应力路径的加载。对于均等固结 UCS 试验, 不同循环加载路径下超静孔隙水压力 u_e 均可达到初始有效平均主应力 p'_0 ($p'_0 = 100$ kPa)。由图 4 (c) 和 (d) 可知, 对于循环应力主轴 90° 跳转的 UCS 试验, $\alpha_\sigma = 22.5^\circ$ 和 67.5° 的应力路径的相位差为 90°。由图 5 (c) 和 (d) 可知, 对于循环应力主轴连续旋转的 UCS 试验, 瞬态的循环主应力方向角 α 为周期变化的正弦曲线。循环应力主轴转动下饱和珊瑚砂各应变分量随 N 的发展差异显著^[14], 可在以 $(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)/2$ 和 $\gamma_{z\theta}$ 轴表示的偏应变平面中的循环应变路径描述循环加载过程中

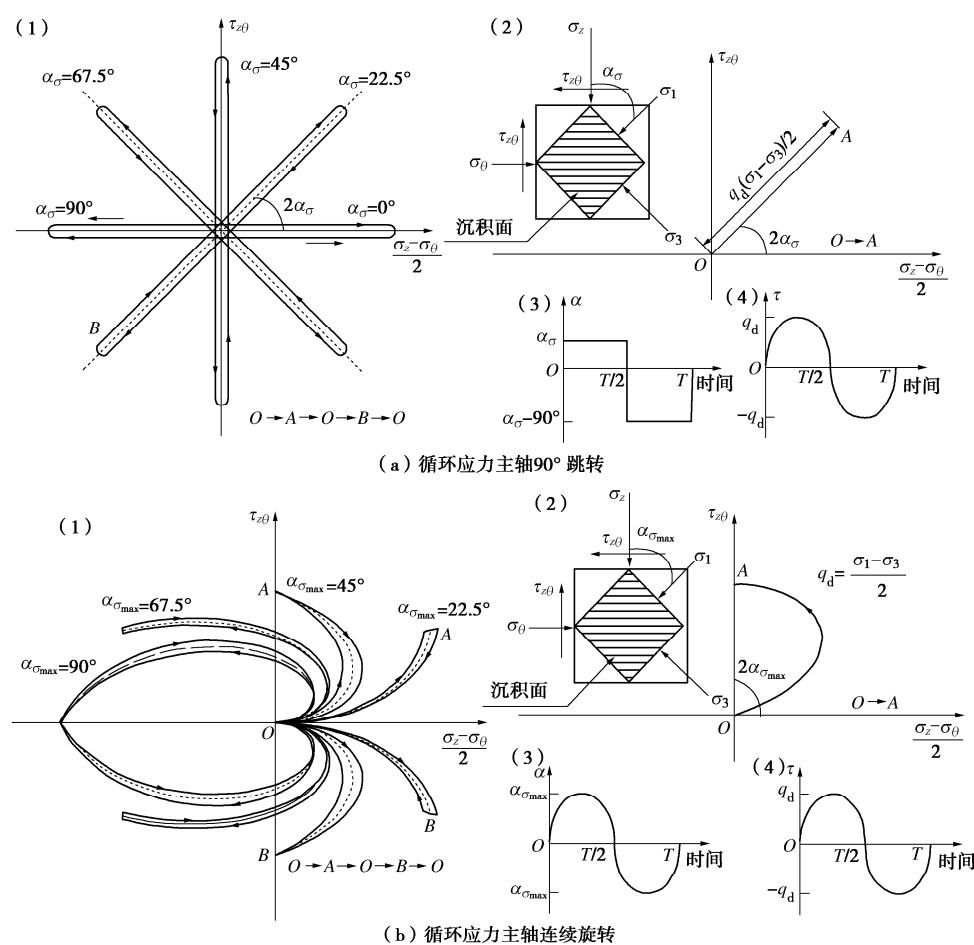


图 3 循环加载应力路径和土单元应力状态

Fig. 3 Stress paths of cyclic loading and stress states of soil elements tested

表 1 不排水循环剪切试验方案
Table 1 Schemes of undrained cyclic shear tests

No.	循环应力路径	$\alpha_\sigma/(\circ)$	$D_{rc}/\%$	f/Hz	CSR	$\eta_0/(\text{kPa} \cdot \text{s})$	$\eta_{\text{fluid}}/(\text{kPa} \cdot \text{s})$	$\dot{\gamma}_L/\text{s}^{-1}$	$\bar{\kappa}_{\text{th}}/(\text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$
01		0 \leftrightarrow 90	49.83	0.1	0.25	—	—	—	—
02			50.42	0.1	0.30	26012	157	0.191	0.0041
03			50.22	0.1	0.35	14906	125	0.278	0.0043
04		22.5 \leftrightarrow -67.5	50.32	0.1	0.25	6447	78	0.320	0.0070
05			49.73	0.1	0.30	5197	82	0.365	0.0075
06			49.91	1	0.35	3948	102	0.343	0.0076
07			49.59	0.5	0.35	4601	103	0.340	0.0082
08			50.10	0.1	0.35	3848	79	0.440	0.0078
09	循环应力主轴		49.52	0.05	0.35	4218	69	0.507	0.0083
10	90° 跳转	45 \leftrightarrow -45	49.84	0.1	0.25	4260	28	0.885	0.0128
11			49.62	0.1	0.30	3427	27	1.096	0.0132
12			50.08	0.1	0.35	2433	25	1.383	0.0136
13		67.5 \leftrightarrow -22.5	50.17	0.1	0.25	6435	80	0.310	0.0072
14			50.19	0.1	0.30	5579	78	0.383	0.0074
15			50.07	0.1	0.35	4586	68	0.516	0.0075
16		90 \leftrightarrow 0	49.98	0.1	0.25	—	—	—	—
17			49.82	0.1	0.30	23210	136	0.220	0.0042
18			50.00	0.1	0.35	19048	178	0.196	0.0043
19		22.5 \leftrightarrow -22.5	50.14	0.1	0.30	12123	951	0.032	0.0045
20			49.63	0.1	0.35	8324	905	0.039	0.0044
21			49.88	0.1	0.40	2906	912	0.044	0.0043
22		45 \leftrightarrow 45	49.94	0.1	0.20	5031	46	0.435	0.0116
23			49.62	0.1	0.25	4310	51	0.488	0.0120
24			49.32	1	0.30	3054	50	0.601	0.0128
25	循环应力主轴		49.10	0.5	0.30	2866	66	0.455	0.0116
26	连续旋转		49.72	0.1	0.30	3150	57	0.525	0.0124
27			49.26	0.05	0.30	2930	97	0.309	0.0114
28		67.5 \leftrightarrow -67.5	49.82	0.1	0.20	8004	41	0.493	0.0118
29			49.59	0.1	0.25	7016	47	0.529	0.0128
30			51.61	0.1	0.30	5031	38	0.783	0.0132
31		90 \leftrightarrow -90	50.14	0.1	0.20	—	—	—	—
32			49.64	0.1	0.25	8946	131	0.191	0.0098
33			49.87	0.1	0.30	7861	117	0.255	0.0101

注: D_{rc} 为固结后相对密度; η_0 为初始表观黏度; η_{fluid} 为流动表观黏度; $\dot{\gamma}_L$ 为 $r_u = 1.0$ 时对应的最大偏应变率; $\bar{\kappa}_{\text{th}}$ 为相变平均流动系数; 未液化试验工况未给出相应数据。

各应变分量的演化过程^[24]。 $\alpha_\sigma = 22.5^\circ$ 和 67.5° 时试样的循环应变路径都向 $(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)/2$ 轴的正方向移动, 但两者在 $\gamma_{z\theta}$ 轴的移动方向则反向 (图 4 (e)), 这与其扭剪应力方向有关。 $\alpha_{\text{max}} = 45^\circ$ 和 90° 时试样的循环应变路径分别向 $(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)/2$ 轴的正、负方向移动, 且均绕 $\gamma_{z\theta}=0$ 轴线对称振荡 (图 5 (e))。由于均等固结条件下中主应变 ε_2 ($\varepsilon_2 = \varepsilon_r$) 无明显发展, 本文采用偏应变 γ_q 表征试样的整体变形发展特征^[23]:

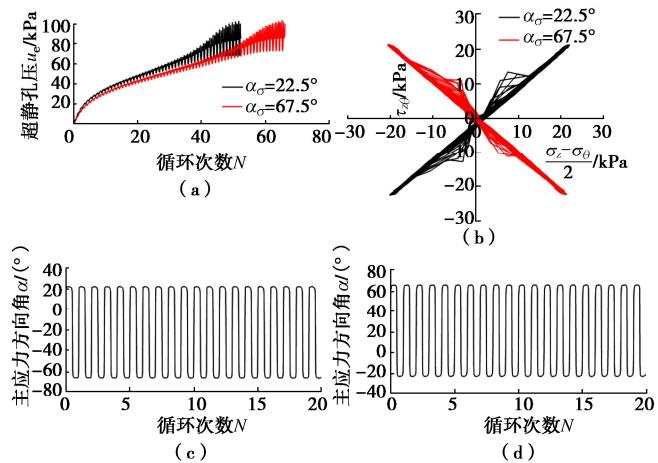
$$\gamma_q = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2 = \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2/4 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (2)$$

式中: ε_1 , ε_3 分别为大、小主应变; ε_z 为轴向应变; ε_θ 为环向应变; $\gamma_{z\theta}$ 为扭剪应变。

不同循环应力路径下 γ_q 随循环次数 N 的发展都呈现出先慢后快的趋势 (图 4 (f) 和 5 (f))。Chen 等^[9]以剪应变率 $\dot{\gamma}$ 定量表示应变发展的速率:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (3)$$

式中, $\dot{\gamma}_{i+1}$, $\dot{\gamma}_i$, $\dot{\gamma}_{i-1}$ 分别为剪应变 γ 在 t_{i+1} , t_i , t_{i-1} 时刻的值 (s^{-1})。本文以 $\dot{\gamma}_q$ 量化试样的整体变形速率。



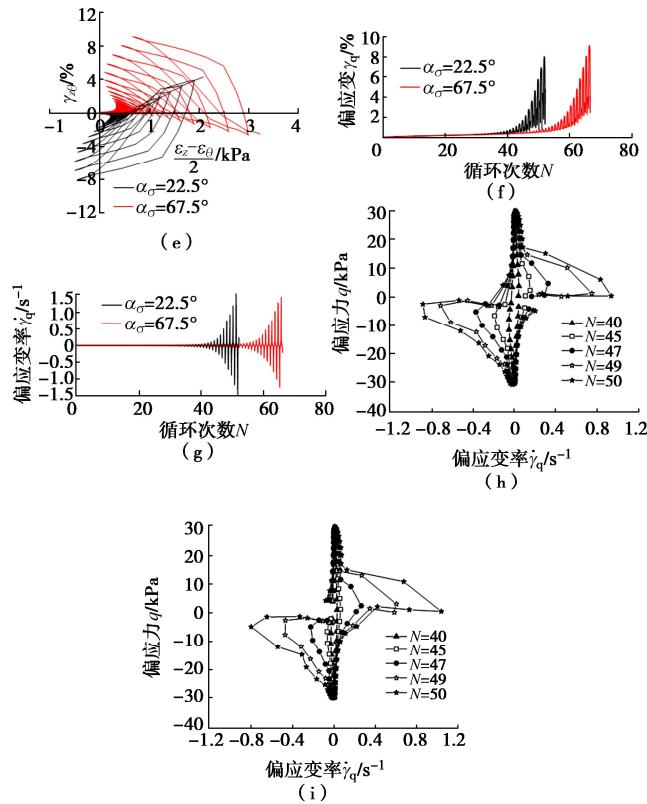


图4 循环应力主轴90°跳转下饱和珊瑚砂的不排水循环反应

Fig. 4 Undrained cyclic responses of saturated coral sand specimens subjected to jump rotation of 90° of principal stresses

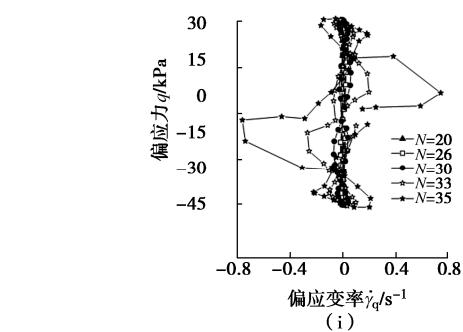
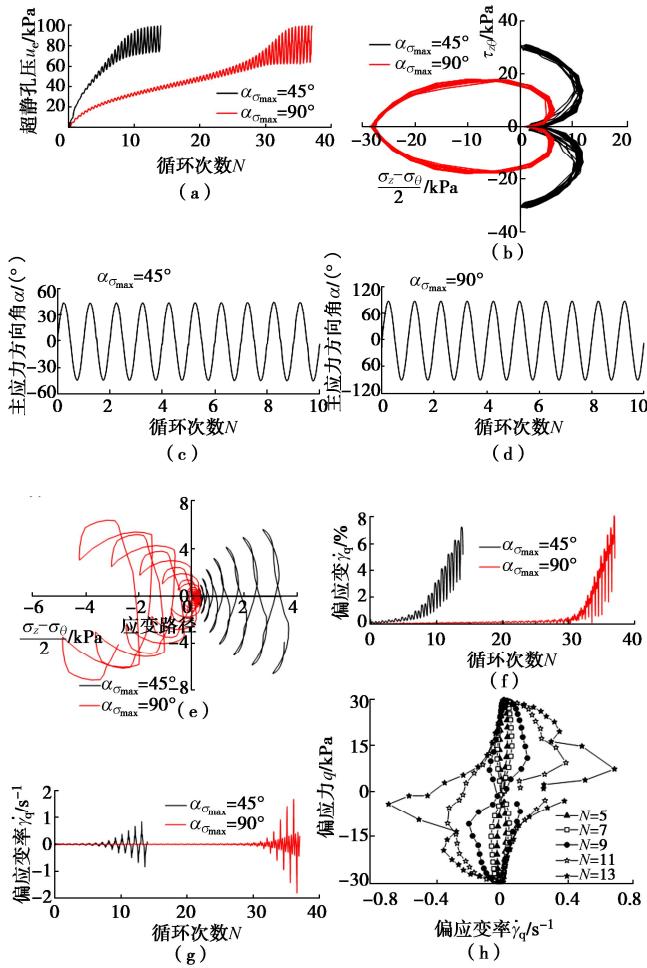


图5 循环应力主轴连续旋转下饱和珊瑚砂的不排水循环反应

Fig. 5 Undrained cyclic responses of saturated coral sand specimens subjected to continuous rotation of principal stresses

由图4 (g) 和 5 (g) 可知, 对不同循环加载路径的 UCS 试验, $\dot{\gamma}_q$ 随 N 的增长速率差异很大。循环荷载作用下 u_e 不断累积, 应力-应变率滞回曲线呈现出不同的阶段性特征, 从类似“椭圆形”向着类似“哑铃形”渐变 (图4 (h), 4 (i), 5 (h), 5 (i))。

2.2 表观黏度与孔压比的相关性

定量表征可液化土流体特性的表观黏度 η 可定义为^[9]

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中, τ 为剪应力 (kPa)。本文分别采用偏应力 q 和偏应变率 $\dot{\gamma}_q$ 代替式 (4) 的剪应力 τ 和剪应变率 $\dot{\gamma}$ 。

图6给出了不同循环加载路径下试样的 η 随 N 的变化。可以发现: 循环加载路径、循环应力水平对 η - N 衰减曲线的演化过程具有显著影响。 η 随 N 的演化过程表征了饱和砂土从固态、过渡态到液态的过程。循环加载初始阶段, 超静孔压水平很低, 饱和砂土呈固态特征, η 衰减很小; 随着 N 的增大, u_e 逐渐增大, 饱和砂土的强度和刚度逐渐呈现出较明显的降低, 砂土也从固态渐进到过渡态, η 呈渐进衰退特征; 随着 N 的继续增大, 饱和砂土的 u_e 急剧上升而临近液化, 其强度和刚度几近完全损失, 在对数坐标下 η 呈“断崖式”下降为很小值。同时, CSR 越大, η - N 曲线衰减越快。对循环应力主轴 90° 跳转的 UCS 试验, $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 时 η - N 曲线衰减最快; $\alpha_\sigma = 0^\circ$ 或 90° 且 CSR = 0.25 时 η - N 曲线几乎无衰减 (未液化), 在对数坐标下 η - N 曲线近似为直线。对循环应力主轴连续旋转的 UCS 试验, CSR 相同时, η 的衰减随 $\alpha_{\sigma_{\max}}$ 的增大呈现出先增后减的现象; $\alpha_{\sigma_{\max}} = 90^\circ$ 和 CSR = 0.20 时 η - N 曲线几乎无衰减, 饱和珊瑚砂的性态不会发生从固态到液态的演化过程, 也即不会发生液化现象, 对于不同的循环加载路径, 存在门槛值, 当 CSR 小于门槛值时, 饱和珊瑚砂在循环荷载下不会液化, 且此门槛值与循环加载应力路径密切相关。

依据以结构概念为基础的流体触变性理论^[8, 26],

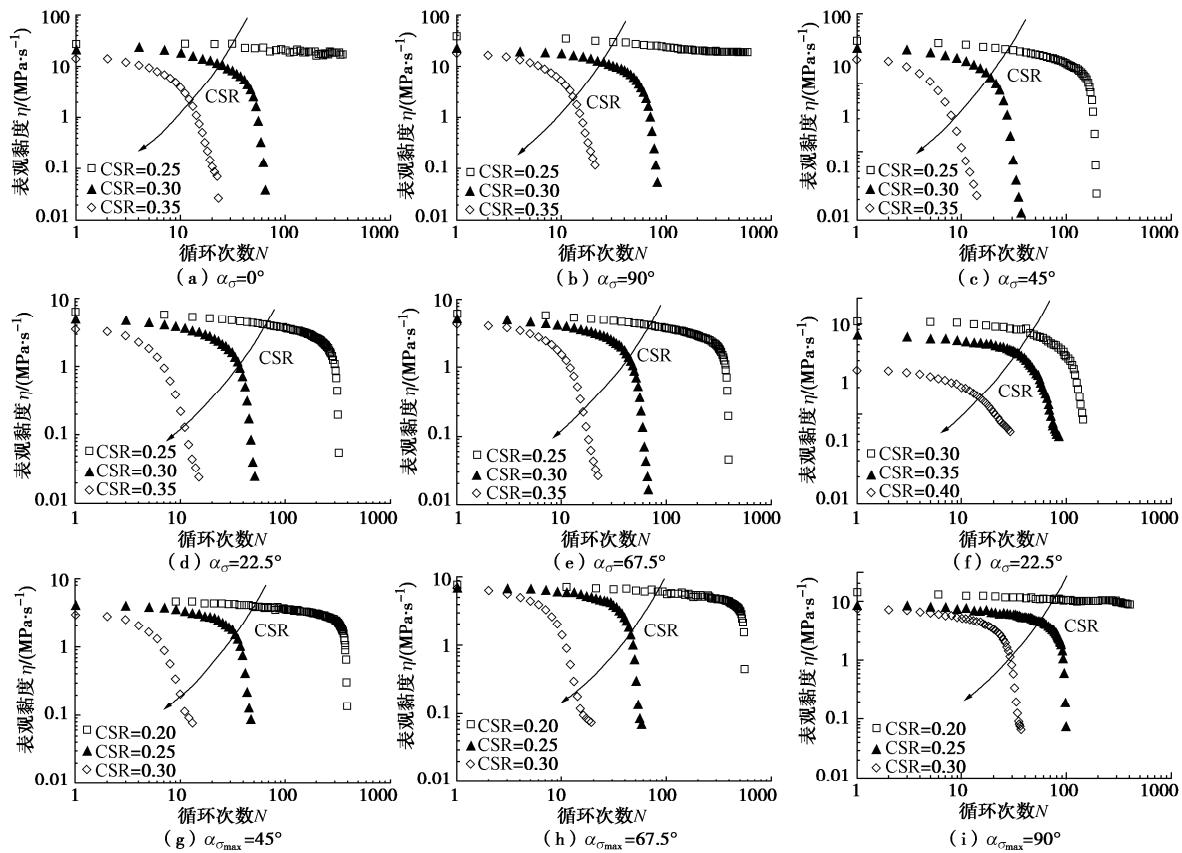


图 6 不同循环加载路径下试样的表现黏度 η 随循环次数 N 的变化

Fig. 6 Variation of apparent viscosity η with number of cycles N of specimens at various cyclic loading paths

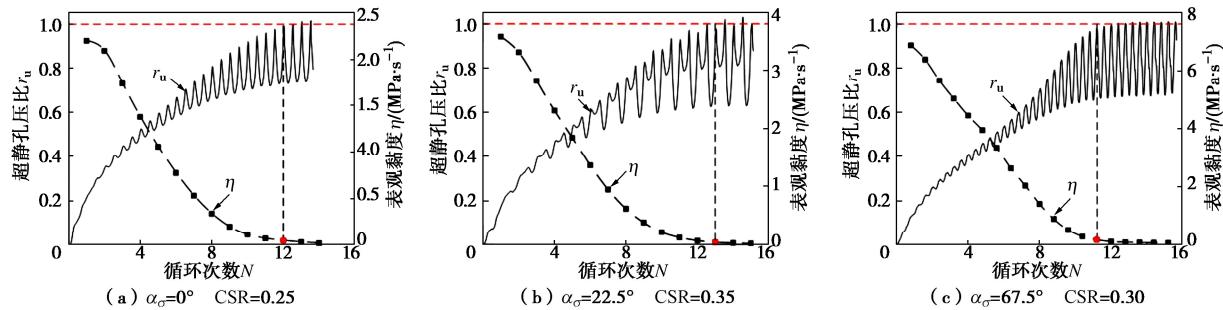


图 7 典型循环应力路径下表观黏度 η 和超静孔压比 r_u 与循环次数 N 的关系

Fig. 7 Apparent viscosity η , excess pore water pressure ratio r_u versus number of cycles N at typical cyclic stress paths

流体内部结构可视为网状分布，循环剪切作用下网状结构的破坏和重构会引起表观黏度的变化。据此本文将可液化珊瑚砂视为“孔压触变性流体”，将其描述为：一种处于初始平衡状态的“假想流体”，即 $r_u = 0$ 时的 η 为初始表观黏度 η_0 ；随着循环剪切作用的不断施加，其内部结构逐渐发生破坏，最终达到极限平衡状态，即 $r_u = 1.0$ 时的 η 为流动表观黏度 η_{fluid} 。图 7 展示了典型循环应力路径下 η 、 r_u 与 N 的关系。可以发现， η 的衰减与 r_u 的累积有很好的对应关系，当 $r_u \rightarrow 1.0$ 时饱和珊瑚砂液化触发， η 趋近很小的稳定值 η_{fluid} 。饱和砂土的均等固结 UCS 试验表明^[8]：剪应变率 $\dot{\gamma}$ 与 $1-r_u$ 服从双曲线关系。对于复杂循环加载条件的均等固结 UCS 试验，本文以最大偏应变率 $\dot{\gamma}_{q \max}$ 取代 $\dot{\gamma}_{\max}$ ， $\dot{\gamma}_{q \max}$ 与 $1-r_u$ 也满足式的双曲线关系（图 8）：

$$\dot{\gamma}_{\text{qmax}} = \frac{1}{A + B(1 - r_{\text{u}})} \quad , \quad (5)$$

式中, $A = \eta_{\text{fluid}} / q_a$, $B = (\eta_0 - \eta_{\text{fluid}}) / q_a$ 。通过试验数据计算的 η_0 和 η_{fluid} 值, 见表 1。

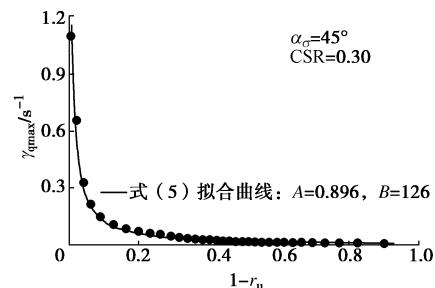


图8 典型循环应力路径下 $\dot{\gamma}_{q,\max}$ 与 $1-r_u$ 的关系

Fig. 8 Maximum deviatoric strain rate $\dot{\gamma}_{q \max}$ versus excess pore water pressure ratio $1-r_u$ at a typical cyclic loading path

图 9 给出了不同循环加载方式下规准化表现黏度 η/η_0 与 r_u 的关系。对应力主轴 90° 跳转的 UCS 试验, 发现循环应力路径 α_σ 和 $90^\circ - \alpha_\sigma$ 的 $\eta/\eta_0 - r_u$ 关系是一致的; 对给定的循环应力路径, f , CSR 对 $\eta/\eta_0 - r_u$ 关系的影响均不敏感。不同循环加载方式下 $\eta/\eta_0 - r_u$ 关系可用统一的形式表示:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = a \cdot \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(\pi \cdot (1 - r_u))] \right\}^c + d \quad , \quad (6)$$

式中, a , c , d 为最佳拟合参数。

2.3 平均流动系数与孔压比的相关性

为了表征循环荷载下饱和砂土的固-液相变特征, 引入平均流动系数 $\bar{\kappa}$ 作为量化指数^[7, 27]:

$$\bar{K} = \frac{(\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{A} \quad , \quad (7)$$

$$A = \iint d\bar{\tau} d\dot{\gamma} \quad . \quad (8)$$

式中: A 为一周循环荷载作用下 $\tau - \dot{\gamma}$ 曲线围成的面积 ($\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$); $\bar{\tau}$ 为一周循环荷载作用的平均剪应力 (kPa); $\dot{\gamma}_{\max}$, $\dot{\gamma}_{\min}$ 分别为一周循环加载中 $\dot{\gamma}$ 的最大、最小值 (s^{-1})。本文分别采用 $q - \dot{\gamma}_q$ 曲线代替 $\tau - \dot{\gamma}$ 曲线。

从 $\bar{\kappa}$ 的定义可知, $\bar{\kappa}$ 越大, 则该周循环荷载下单位平均偏应力引起的最大偏应变率越大, 饱和珊瑚砂的流动性越强。图 10 为不同循环加载路径下饱和珊瑚砂的 $\bar{\kappa}$ - r_u 关系。可以看出, 随着 r_u 的增大, $\bar{\kappa}$ - r_u 关系的演化经历了 3 个阶段: 初始阶段 r_u 累积较慢, $\bar{\kappa}$ 几近无增长且其值很小, 饱和珊瑚砂不具有流动性, 呈固态特征; 而在 $r_u > 0.90$ 阶段, 随着 r_u 的增大, $\bar{\kappa}$ 急剧增大, 饱和珊瑚砂呈现出强流动性, 呈液态特征; 而在 $r_u = 0.6 \sim 0.9$ 的中间阶段, 随着 r_u 的增大, $\bar{\kappa}$ 的增速逐渐加快, 饱和珊瑚砂的流动性逐渐增大, 处于

固态向液态转化的过渡阶段。这一特征与文献[7, 27]中饱和石英砂和砂-砾混合料的 $\bar{\kappa}$ - r_u 关系的基本特征是类似的。从图 10 也可以看出, 对给定的循环应力路径, f , CSR 对 $\bar{\kappa}$ - r_u 关系的影响均不敏感。不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的 $\bar{\kappa}$ - r_u 关系可用统一的指数函数形式表示:

$$\bar{\kappa} = m \exp(nr_u^p) \quad , \quad (9)$$

式中, m , n , p 为最佳拟合参数。

2.4 饱和珊瑚砂的固-液相变特征

图 11 给出了不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的表观黏度梯度 $\Delta\eta/\eta$ 、平均流动系数梯度 $\Delta\bar{\kappa}/\bar{\kappa}$ 与超静孔压比 r_u 的关系, 其中, $\Delta\eta/\eta = |\eta_i - \eta_{i+1}|/\eta_i$, $\Delta\bar{\kappa}/\bar{\kappa} = |\bar{\kappa}_i - \bar{\kappa}_{i+1}|/\bar{\kappa}_i$ 。以表观黏度梯度及平均流动系数梯度分别表征饱和砂土在循环荷载作用下表观黏度衰减(η - N)及流动曲线($\bar{\kappa}$ - N)的变化情况。对所有试验工况, $\Delta\eta/\eta$ 和 $\Delta\bar{\kappa}/\bar{\kappa}$ 均随 r_u 的增大呈现先增后减的特征, 其反转点位于 $r_u \approx 0.9$ 处, 饱和珊瑚砂试样自循环加载开始至完全液化的演化过程中, 历经超静孔隙水压力逐步累积, 珊瑚砂颗粒间的接触逐步减弱, 直至液化触发时珊瑚砂颗粒间接触完全脱离, 导致珊瑚砂宏观结构发生破坏。表观黏度梯度和平均流动系数梯度从逐步增大和突变急降, 意味着饱和珊瑚砂颗粒间的接触发生了从量变到质变的过程, 经历了从固态到固-液过渡态、再到液态的转变。定义突变时的 r_u 为饱和珊瑚砂由固-液过渡状态向液态转变的相变孔压比 r_{uth} , 则 $r_{uth} \approx 0.9$ 。已有的研究表明: 饱和南京砂的 $r_{uth} \approx 0.8^{[7]}$; 砂-砾混合料的 $r_{uth} \approx 0.95^{[23]}$ 。这表明: r_{uth} 的取值与试验材料相关。定义与 r_{uth} 对应的 $\bar{\kappa}$ 为相变平均流动系数 $\bar{\kappa}_{th}$ 。表 1 列出本次试验所有工况的 $\bar{\kappa}_{th}$ 值。

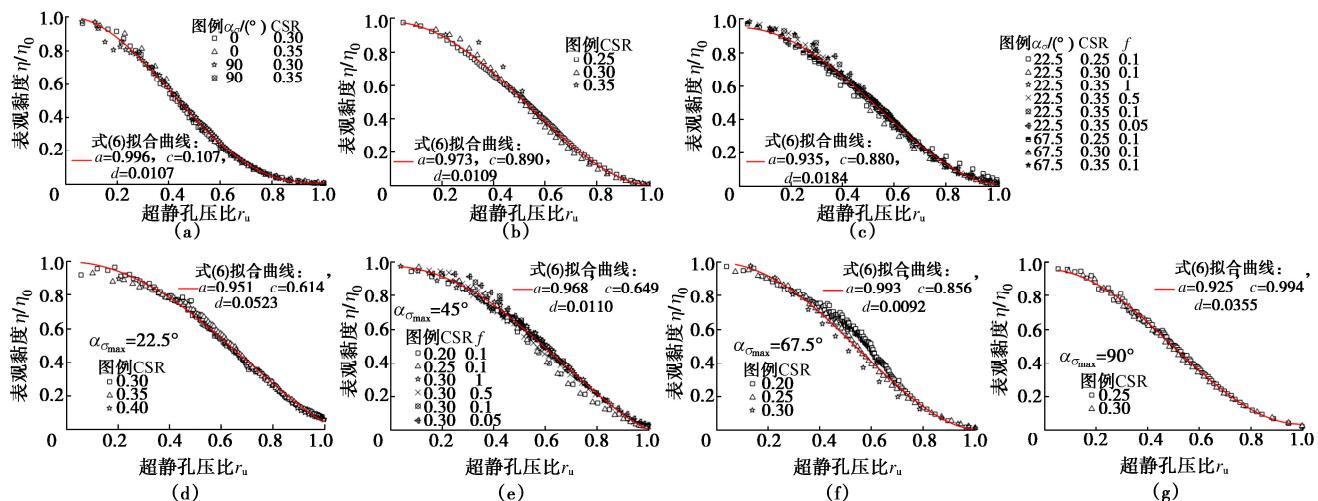


图 9 不同循环加载方式下规范化表观黏度 η/η_0 与孔压比 r_u 的关系

Fig. 9 Normalized apparent viscosities (η/η_0) versus excess pore water pressure ratios (r_u) under various cyclic loading patterns

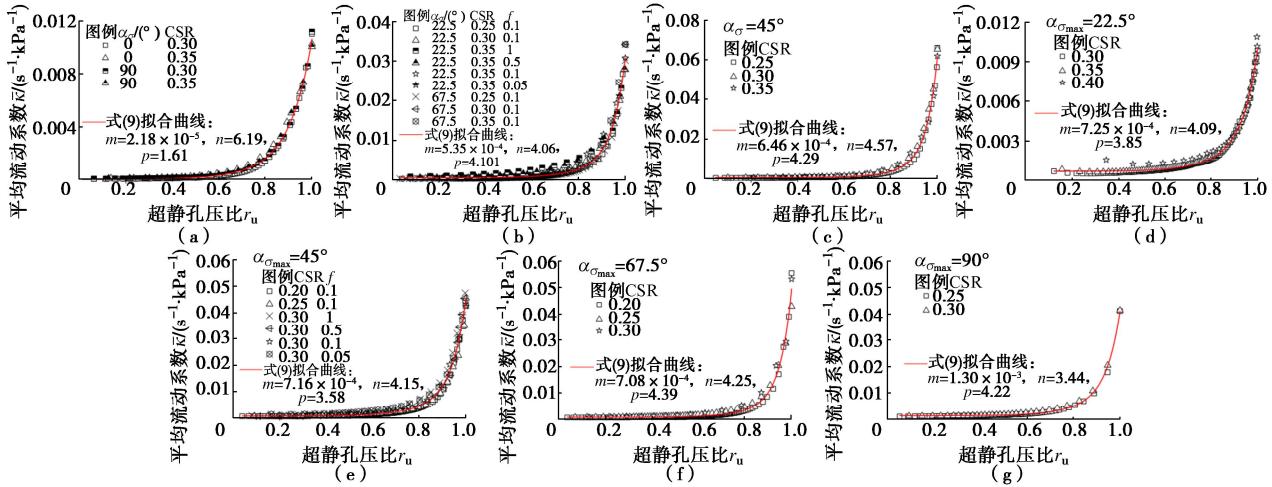
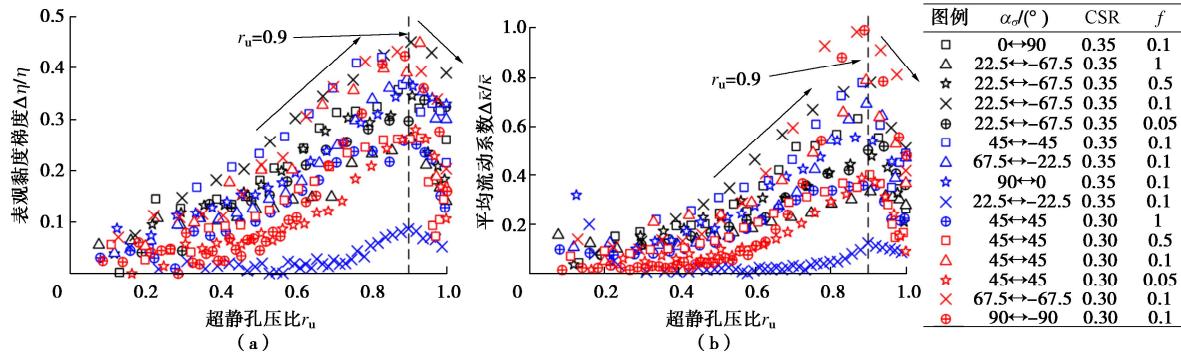
图 10 不同循环应力方式下平均流动系数 $\bar{\kappa}$ 与超静孔压比 r_u 的关系Fig. 10 Variation of average flow coefficient $\bar{\kappa}$ with excess pore water pressure ratio r_u under various cyclic stress paths

图 11 不同循环应力路径下表观黏度梯度及平均流动系梯度与超静孔压比的关系

Fig. 11 Variation of apparent viscosity gradient $\Delta\eta/\eta$ and average flow coefficient gradient $\Delta\bar{\kappa}/\bar{\kappa}$ with excess pore water pressure ratio r_u under various cyclic stress paths

图 12 展示了不同循环加载路径下饱和珊瑚砂的 $\bar{\kappa}_{th}$ 值。 $\bar{\kappa}_{th}$ 的差异主要与循环加载过程中试样的最大剪切作用面与其薄弱面的关系及薄弱面上的剪应力大小有关^[28]。对应力主轴 90° 跳转的 UCS 试验, $\alpha_{\sigma} = 45^{\circ}$ 时试样受扭剪应力作用, 最易液化^[14], 故其液化流动性最强, $\bar{\kappa}_{th}$ 值最大; $\alpha_{\sigma} = 0^{\circ}$ 和 90° 时, 引起试样的超静孔压累积和应变增长的荷载主要为轴向循环荷载, 其液化抗力基本相同, 最不易液化^[14], 故其液化流动性最差, $\bar{\kappa}_{th}$ 值最小。对应力主轴连续旋转的 UCS 试验, $\bar{\kappa}_{th}$ 随 $\alpha_{\sigma_{max}}$ 呈现出先增后减的趋势, $\alpha_{\sigma_{max}} = 45^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$ 时最大, $\alpha_{\sigma_{max}} = 22.5^{\circ}$ 时试样所受荷载主要为轴向压缩, 最不易液化^[14], 故液化流动性最差。

图 13 给出了本文所有试验的规准化平均流动系数 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ 与 r_u 的关系。可以发现, $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ - r_u 的数据点落在一条较窄的范围内, $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ 随 r_u 增长的最佳拟合关系服从指数函数关系:

$$\frac{\bar{\kappa}}{\bar{\kappa}_{th}} = 0.0785 \exp(3.64r_u^{3.95}) \quad (10)$$

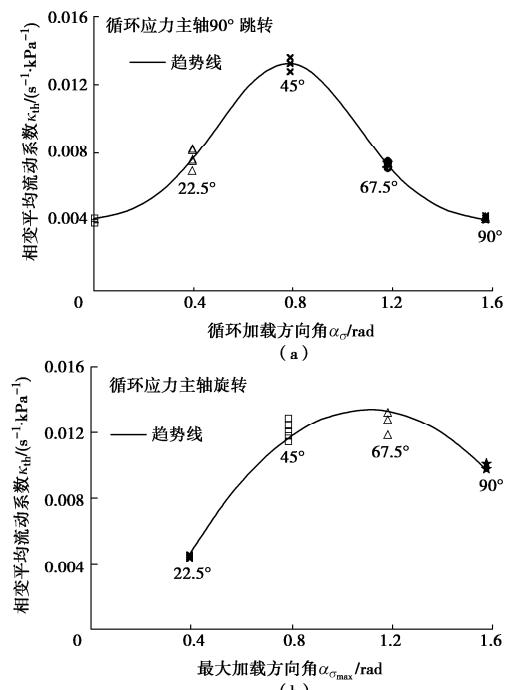
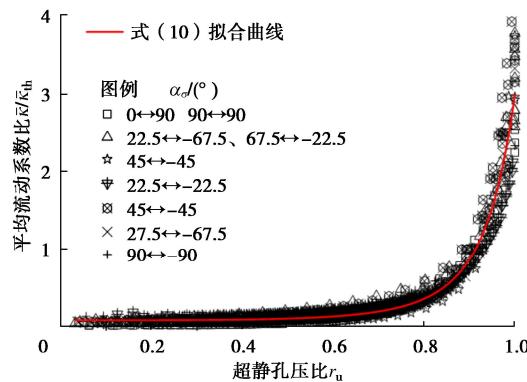


图 12 相变平均流动系数与循环加载方向角的关系

Fig. 12 Correlation between average flow coefficient $\bar{\kappa}_{th}$ at phase transformation state from solid state to liquid state and orientations of cyclic loading

图 13 所有试验的 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ 与 r_u 的关系Fig. 13 Correlation between $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ and r_u for all test data

3 结 论

本文通过不同循环加载频率、应力主轴 90° 跳转和连续旋转的均等固结不排水循环剪切 (UCS) 试验, 探究了不同循环加载方式下饱和珊瑚砂的液化流动特性, 得到以下 3 点结论。

(1) 循环应力比 CSR、循环加载路径对饱和珊瑚砂的表观黏度 η 随循环次数 N 的发展影响显著, 以初始表观黏度 η_0 规准的表观黏度比 η/η_0 与超静孔压比 r_u 的关系对 CSR 和频率 f 不敏感。

(2) 对应力主轴 90° 跳转的 UCS 试验, 循环加载方向角 $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 时饱和珊瑚砂的平均流动系数 $\bar{\kappa}$ 随 N 增长的速率最快, $\alpha_\sigma = 22.5^\circ$ 和 67.5° 时次之, $\alpha_\sigma = 0^\circ$ 和 90° 时最慢。对应力主轴连续旋转的 UCS 试验, $\bar{\kappa}$ 随 N 增长的速率随最大加载方向角 $\alpha_{\sigma\max}$ 的增加呈现先增后减的趋势。

(3) 不同循环加载方式下表观黏度梯度和平均流动系数梯度均随 r_u 的增大呈现出先增大后减小的特征, 其反转点的 $r_u \approx 0.9$, 可视为饱和珊瑚砂由固-液过渡状态向液态转变的相变孔压比 r_{uth} , 相应的 $\bar{\kappa}$ 为相变平均流动系数 $\bar{\kappa}_{th}$, CSR 与 f 对 $\bar{\kappa}_{th}$ 的影响不敏感, 循环加载路径对 $\bar{\kappa}_{th}$ 的影响显著。所有试验的 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ - r_u 数据点处于窄带内, 且 $\bar{\kappa}/\bar{\kappa}_{th}$ 随 r_u 增长的最佳拟合曲线服从指数函数关系。

参考文献:

- 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guoxing. Geotechnical Earthquake Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- MARCUSON W F. Definition of terms related to liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(9): 1197-1200.
- SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(6): 105-134.
- NATIONAL (U S). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences[M]. Washington, DC: National Academies Press, 2022
- TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(5): 347-361.
- 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1139-1143. (CHEN Yumin, LIU Hanlong, ZHOU Yundong. Analysis on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1139-1143. (in Chinese))
- 王志华, 周恩全, 陈国兴, 等. 循环荷载下饱和砂土固-液相变特征[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1604-1610. (WANG Zhihua, ZHOU Enquan, CHEN Guoxing, et al. Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sand under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1604-1610. (in Chinese))
- WANG Z H, MA J L, GAO H M, et al. Unified thixotropic fluid model for soil liquefaction[J]. Géotechnique, 2020, 70(10): 849-862.
- CHEN G X, ZHOU E Q, WANG Z H, et al. Experimental investigation on fluid characteristics of medium dense saturated fine sand in pre- and post-liquefaction[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(8): 2185-2212.
- LIRER S, MELE L. On the apparent viscosity of granular soils during liquefaction tests[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(11): 5809-5824.
- MELE L. An experimental study on the apparent viscosity of sandy soils: from liquefaction triggering to pseudo-plastic behaviour of liquefied sands[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(2): 463-481.
- 黄博, 凌道盛, 丁浩, 等. 斜入射地震波在土体中产生的动应力路径及试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 276-283. (HUANG Bo, LING Daosheng, DING Hao, et al. Seismic stress path induced by obliquely incident waves and its simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 276-283. (in Chinese))
- 马维嘉, 陈国兴, 吴琪. 复杂加载条件下珊瑚砂抗液化强度试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 535-542, 551.

- (MA Weijia, CHEN Guoxing, WU Qi. Experimental study on liquefaction resistance of coral sand under complex loading conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(2): 535-542, 551. (in Chinese))
- [14] CHEN G X, MA W J, QIN Y, et al. Liquefaction susceptibility of saturated coral sand subjected to various patterns of principal stress rotation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, **147**(9): 04021093.
- [15] HYODO M, HYDE A F L, ARAMAKI N. Liquefaction of crushable soils[J]. *Géotechnique*, 1998, **48** (4): 527-543.
- [16] 马维嘉, 陈国兴, 李磊, 等. 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 981-988. (MA Weijia, CHEN Guoxing, LI Lei, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(5): 981-988. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] VAHDANI S, PYKE R, SIRIPRUSANEN U. Liquefaction of Calcareous Sands and Lateral Spreading Experienced in Guam as A Result of the 1993 Guam Earthquake[R]. Buffalo: US National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.
- [19] CHOCH G, ROBERTSON I, NICHOLSON P, et al. Compilation of Observations of the October 15, 2006 Kiholo Bay ($Mw6.7$) and Mahukona ($Mw 6.0$) Earthquakes, Hawai'i[R]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2006.
- [20] 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*, 2011, **27**(S1): 93-116.
- [21] WANG Y S, QIU Y Y, MA L J, et al. Experimental study on the cyclic response of Nanhui Sea calcareous sand in China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(22): 677.
- [22] 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.
- [23] CHEN G X, WU Q, ZHOU Z L, et al. Undrained anisotropy and cyclic resistance of saturated silt subjected to various patterns of principal stress rotation[J]. *Géotechnique*, 2020, **70**(4): 317-331.
- [24] MA W J, QIN Y, ZHAO K, et al. Comparisons on liquefaction behavior of saturated coral sand and quartz sand under principal stress rotation[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, **40**(2): 235-247.
- [25] 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 Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [26] CHENG D C H. A differential form of constitutive relation for thixotropy[J]. *Rheologica Acta*, 1973, **12**(2): 228-233.
- [27] CHEN G X, WU Q, SUN T, et al. Cyclic behaviors of saturated sand-gravel mixtures under undrained cyclic triaxial loading[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, **25**(4): 756-789.
- [28] SIVATHAYALAN S, LOGESWARAN P, MANMATHARAJAN V. Cyclic resistance of a loose sand subjected to rotation of principal stresses[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, **141**(3): 04014113.