

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1497

循环加载频率对饱和珊瑚砂液化特性的影响

杨铮涛¹, 秦 悠¹, 吴 琪^{1,2}, 陈国兴^{1,2}

(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)

摘 要: 人们对循环加载频率 f 对饱和石英砂液化特性的影响已进行大量的不排水循环试验研究, 但循环加载频率 f 对饱和珊瑚砂液化特性的影响尚未引起重视。为探究 f 对饱和珊瑚砂液化特性的影响, 针对中密、均等固结的饱和珊瑚砂试样, 开展了 $f=0.01\sim 1.00$ Hz、循环主应力路径 90° 跳转的系列不排水循环剪切试验。试验表明: 孔压比 r_u 和广义剪应变 γ_g 的增长速率随 f 增大而降低, 到达初始液化所需的液化次数 N_L 随 f 增大而增大; 不同循环加载方式引起的广义剪应变幅值 γ_{ga} 与峰值孔压比 $r_{u\max}$ 存在事实上的唯一性关系, 且 γ_{ga} 可表示为以 $r_{u\max}$ 为自变量的正切函数; f 的增大会减弱试样的剪胀性。引入单元体循环应力比 USR 作为施加于试样的循环应力水平指标, $USR-N_L$ 关系曲线随 f 的增大而移向右上侧, 不同 f 的 $USR-N_L$ 关系曲线均服从相同形式的负幂函数。这意味着饱和珊瑚砂的抗液化强度随 f 的增大而增大。

关 键 词: 饱和珊瑚砂; 液化特性; 加载频率; 循环加载模式; 抗液化强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 09-2648-09

Influence of cyclic loading frequency on liquefaction behaviors of saturated coral sand

YANG Zheng-tao¹, QIN You¹, WU Qi^{1,2}, CHEN Guo-xing^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: The influence of cyclic loading frequency f on the liquefaction behaviors of saturated quartz sands during undrained cyclic laboratory tests has been investigated extensively, but rare studies reported on the effect of f on the liquefaction behaviors of saturated coral sands. To better understand the effects of the f on the liquefaction behaviors of saturated coral sand, a series of undrained cyclic shear tests is performed on isotropically consolidated, medium dense saturated specimens subjected to the 90° jump of principal stress in the range of $f=0.01\sim 1.0$ Hz. For all loading patterns investigated, the growth rates of the excess pore water pressure ratio r_u and the generalized shear strain γ_g decrease with the increase of f ; the number of liquefaction N_L required to cause the initial liquefaction increases with f ; a unique tangent correlation function exists between the generalized shear strain amplitude γ_{ga} and the peak excess pore pressure ratio $r_{u\max}$ ($r_{u\max}$ is independent variable); and an increase in f weakens the dilatancy of the specimen. By introducing a unit cyclic stress ratio USR as a proxy for cyclic stress level acting on the specimen during the cyclic testing, USR versus N_L curves moves to the upper right with f ; a unified form of power-law function of the correlation exists between USR and N_L regardless of f . This indicates that liquefaction resistance of saturated coral sands increases with f .

Keywords: saturated coral sand; liquefaction behavior; loading frequency; cyclic loading pattern; liquefaction resistance

1 引 言

珊瑚砂是一种海洋生物成因的特殊岩土介质, 常作为主要吹填材料广泛应用于军用和民用基础设施建设中, 主要分布在地震灾害风险水平较高的区域, 如南北纬 30° 之间的海域, 地震引起的珊瑚砂液化

往往会造成严重地质灾害。1993 年的美国关岛地震和 2010 年的海地地震均发生了珊瑚砂场地的严重液化现象。

国内外许多学者对不同地区的珊瑚砂液化特性开展了试验研究^[1-8]。由于珊瑚砂的沉积过程与陆源石英砂有着较大差异, 其颗粒具有多内孔隙、棱

收稿日期: 2022-09-26

录用日期: 2022-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.52278503)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52278503).

第一作者简介: 杨铮涛, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail: yzt0628@163.com

通讯作者: 陈国兴, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学及岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

角度高、形状不规则且富含内孔隙的特点^[1-2]。Hyodo等^[3]发现 Dogs Bay 珊瑚砂的抗液化强度通常高于 Toyoura 砂。马维嘉等^[4]发现南沙珊瑚砂的抗液化强度高于福建标准砂。Sandoval等^[5]发现, Cabo Rojo 珊瑚砂超静孔压 u_e 在发展过程中存在大幅波动现象, 且抗液化强度高于 Ottawa 砂。刘抗等^[6]进行循环主应力 90° 跳转应力路径的不排水循环剪切试验发现, 我国南沙珊瑚砂抗液化强度与循环加载路径的方向角 α_σ (与竖轴的夹角) 密切相关, $0^\circ \leq \alpha_\sigma \leq 45^\circ$ 时, 南沙珊瑚砂抗液化强度随 α_σ 增大而减小。Ma等^[7]通过复杂应力路径下系列不排水循环剪切试验发现, 南沙珊瑚砂液化所需耗能远大于福建标准砂, 循环应力路径几乎不影响偏应变幅值与孔压比 r_u 间的相关性。Chen等^[8]通过系列不排水循环剪切试验发现, $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 时珊瑚砂最易液化; 不同固结条件和循环加载模式下饱和珊瑚砂广义剪应变幅值 γ_{ga} 与超静孔压比 r_u 之间存在唯一性关系式, 提出了广义单元体循环应力比 USR_g 的概念和定义, 建立了以 USR_g 为指标的表征不同固结和循环加载条件下砂类土抗液化强度的统一表达式。循环加载下饱和珊瑚砂具有固有各向异性的特征^[8-9], 且饱和珊瑚砂液化表现为循环流动性, 不会产生流滑现象^[10]。

地震和波浪并非单一的频率谐波, 探究循环加载频率 f 对饱和砂土液化特性的影响具备重大工程价值。部分研究表明, f 对饱和砂土的抗液化强度几乎没有影响^[11-13]; 也有研究发现, f 对饱和砂土的抗液化强度存在较为显著的影响^[14-17]。最近, 许成顺等^[18]对比研究了 $f = 0.1 \text{ Hz}$ 和 1 Hz 的中密饱和珊瑚砂的不排水循环反应特征, 其剪缩剪胀特性与 f 有关。上述研究表明, 关于 f 对饱和石英砂土液化特性的影响尚未有一致的认识; 除许成顺等^[18]开展的 f 对饱和珊瑚砂液化特性影响的试验外, 未见针对 f 影响的珊瑚砂液化特性试验报道。因此, f 对饱和珊瑚砂液化特性的影响是一个需探究的基本问题。

为了模拟地震和波浪作用下饱和珊瑚砂的液化特性, 针对 f 分别为 0.01 、 0.02 、 0.05 、 0.10 、 0.50 和 1.00 Hz 、循环主应力路径 90° 跳转的循环加载方式, 开展了中密、均等固结的饱和珊瑚砂试样的系列不排水循环剪切试验, 探讨了 f 对饱和珊瑚砂超静孔压、变形特性和抗液化强度的影响。为了消除中主应力系数 b 值对饱和珊瑚砂液化特性的影响, 在所有试样的固结和循环加载过程中 b 值保持为常数 0.5 ^[2, 8]。

2 试验设计

2.1 试验材料

试验采用的珊瑚砂取自中国南沙群岛某岛礁。表 1 给出了珊瑚砂的基本物理指标, 相对密度 G_s 依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]测得, 最大、最小孔隙比采用 ASTM 规范 (D4253—16、D4253—14) 测得^[20-21]。图 1 为试验珊瑚砂的级配曲线。

表 1 珊瑚砂的基本物理指标
Table 1 Physical properties of coral sand used in this study

相对密度 G_s	最大孔隙比 $e_{\max}$	最小孔隙比 $e_{\min}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	平均粒径 d_{50}/mm
2.80	1.72	0.99	4.67	0.86	0.31

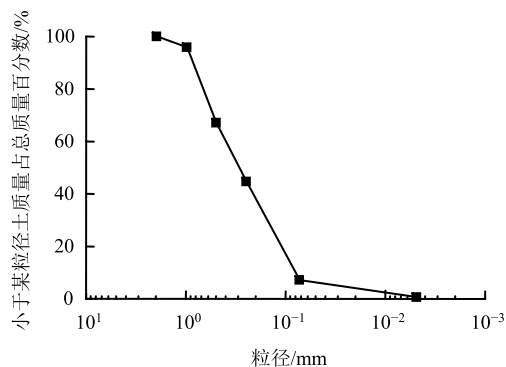
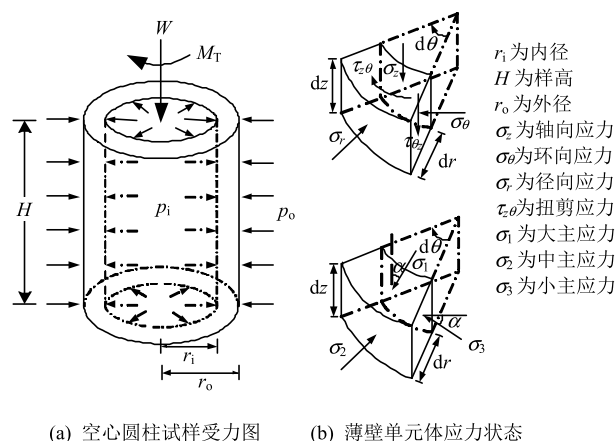


图 1 珊瑚砂级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of the tested coral sand

2.2 试验仪器与试样制备

本试验采用南京工业大学 GDS 空心圆柱扭剪仪, 该仪器可独立控制轴力 W 、扭矩 M_T 、外围压 p_o 和内围压 p_i , 实现复杂应力路径加载^[8, 22], 试样受力状态如图 2 所示。



(a) 空心圆柱试样受力图 (b) 薄壁单元体应力状态

图 2 空心圆柱试样受力状态

Fig.2 Stress state of hollow cylinder specimen

试验采用干装法制样^[8], 控制初始相对密实度 $D_r = 45\%$, 颗粒筛分完成的珊瑚砂按图 1 所示级配进行称重, 均分 5 层装入空心圆柱承膜筒, 装填中严格控制层高, 每层表面需刮毛处理。装样完成后通入 CO_2 置换空气, 利用无气水进行预饱和, 采用分级反压饱和法对试样进行饱和。当测得孔压系数 $B \geq 0.97$ 时, 可认为试样已完全饱和。饱和结束后进行初始平均有效主应力 $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ 的均等固结。

2.3 试验方案

马维嘉等^[2]的试验结果表明: 若循环剪切过程中不控制中主应力系数 b 值, 则试验结果不能区分 α_σ 对抗液化强度的影响, 这会模糊不同 α_σ 下 f 对液化性能的影响。故本文试验中, 控制 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.5$ 。表 2 给出了施加不同 f 的均幅正弦波的试验方案。图 3 给出了不同 α_σ 下的实测循环主应力 90° 跳转应力路径。这说明试验过程中应力控制可以很好地达到预期目的。

循环应力比 CSR 由下式定义^[4, 8, 23]:

$$\text{CSR} = q_a / p'_0, \quad q_a = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + (\tau_{z\theta})^2} \quad (1)$$

式中: q_a 为偏应力幅值。

3 试验结果与分析

3.1 不排水循环反应

图 4 以 $\text{CSR} = 0.30$ 和 $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 作为典型试验工况, 分析 f 对饱和珊瑚砂不排水循环反应特性的影响。循环荷载作用下, 超静孔压 u_e 波动上升, 呈现瞬时振荡的波动性和单调增长的累积效应, 且 u_e 最终均能达到 p'_0 。不同 f 下试样应变分量的发展模式一致, 轴向应变 ε_z 及环向应变 ε_θ 随循环次数 N 的发展表现出单向累积, 而扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 随 N 表现出循环流动性, 径向应变 ε_r 几近不变。复杂循环加载下各应变分量发展差异性较大, 采用单一应变分量评价试样的变形缺乏合理性^[8]。因此采用广义剪应变 γ_e 表征试样的整体变形^[7-8, 24]:

表 2 不排水循环剪切试验方案

Table 2 Undrained cyclic shear test schemes

编号	$D_{re}/\%$	$\alpha_\sigma/(^\circ)$	f/Hz	CSR	USR	$N_L/\text{次}$	编号	$D_{re}/\%$	$\alpha_\sigma/(^\circ)$	f/Hz	CSR	USR	$N_L/\text{次}$
1	50.76	0.0	0.05	0.25	0.188	200	34	49.71	22.5	0.50	0.25	0.223	120
2	50.18	0.0	0.05	0.30	0.225	71	35	49.66	22.5	0.50	0.30	0.267	70
3	49.29	0.0	0.05	0.35	0.263	32	36	49.54	22.5	0.50	0.35	0.312	23
4	49.45	22.5	0.05	0.25	0.223	95	37	49.63	45.0	0.50	0.25	0.250	57
5	49.10	22.5	0.05	0.30	0.267	36	38	49.54	45.0	0.50	0.30	0.300	28
6	49.51	22.5	0.05	0.35	0.312	18	39	49.11	45.0	0.50	0.35	0.350	13
7	49.24	45.0	0.05	0.25	0.250	43	40	49.67	67.5	0.50	0.25	0.223	118
8	49.15	45.0	0.05	0.30	0.300	25	41	49.73	67.5	0.50	0.30	0.267	61
9	49.28	45.0	0.05	0.35	0.350	10	42	49.35	67.5	0.50	0.35	0.312	24
10	49.17	67.5	0.05	0.25	0.223	90	43	49.33	90.0	0.50	0.25	0.188	322
11	49.66	67.5	0.05	0.30	0.267	43	44	49.36	90.0	0.50	0.30	0.225	110
12	49.39	67.5	0.05	0.35	0.312	15	45	49.22	90.0	0.50	0.35	0.263	70
13	49.23	90.0	0.05	0.25	0.188	211	46	49.39	0.0	1.00	0.25	0.188	383
14	49.27	90.0	0.05	0.30	0.225	76	47	49.34	0.0	1.00	0.30	0.225	113
15	49.19	90.0	0.05	0.35	0.263	34	48	49.26	0.0	1.00	0.35	0.263	66
16	49.39	0.0	0.10	0.25	0.188	243	49	49.81	22.5	1.00	0.25	0.223	123
17	49.51	0.0	0.10	0.30	0.225	85	50	50.18	22.5	1.00	0.30	0.267	83
18	49.41	0.0	0.10	0.35	0.263	32	51	49.87	22.5	1.00	0.35	0.312	30
19	49.11	22.5	0.10	0.25	0.223	100	52	49.41	45.0	1.00	0.25	0.250	61
20	49.19	22.5	0.10	0.30	0.267	40	53	49.48	45.0	1.00	0.30	0.300	35
21	49.29	22.5	0.10	0.35	0.312	19	54	49.56	45.0	1.00	0.35	0.350	13
22	49.45	45.0	0.10	0.25	0.230	50	55	50.13	67.5	1.00	0.25	0.223	118
23	49.18	45.0	0.10	0.30	0.300	25	56	49.73	67.5	1.00	0.30	0.267	62
24	49.23	45.0	0.10	0.35	0.350	11	57	49.59	67.5	1.00	0.35	0.312	28
25	49.60	67.5	0.10	0.25	0.223	95	58	49.66	90.0	1.00	0.25	0.188	398
26	49.11	67.5	0.10	0.30	0.267	48	59	50.44	90.0	1.00	0.30	0.225	115
27	49.68	67.5	0.10	0.35	0.312	14	60	49.28	90.0	1.00	0.35	0.263	64
28	49.66	90.0	0.10	0.25	0.188	184	61	49.64	0.0	0.01	0.30	0.225	56
29	49.34	90.0	0.10	0.30	0.225	81	62	49.73	22.5	0.01	0.30	0.267	23
30	49.73	90.0	0.10	0.35	0.263	37	63	49.33	45.0	0.01	0.30	0.300	16
31	49.38	0.0	0.50	0.25	0.188	343	64	50.14	67.5	0.01	0.30	0.267	29
32	49.15	0.0	0.50	0.30	0.225	103	65	50.06	90.0	0.01	0.30	0.225	46
33	49.33	0.0	0.50	0.35	0.263	56	66	49.57	45.0	0.02	0.30	0.300	19

注: D_{re} 为固结后的相对密实度, N_L 为液化次数。

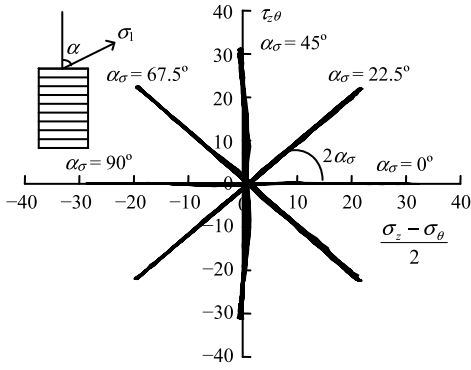


图3 循环主应力 90° 跳转试验的应力路径

Fig.3 Stress paths for the 90° jump rotation of cyclic principal stress tests

$$\gamma_g = \sqrt{2/3} \times \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (2)$$

式中： ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为大、中、小主应变。

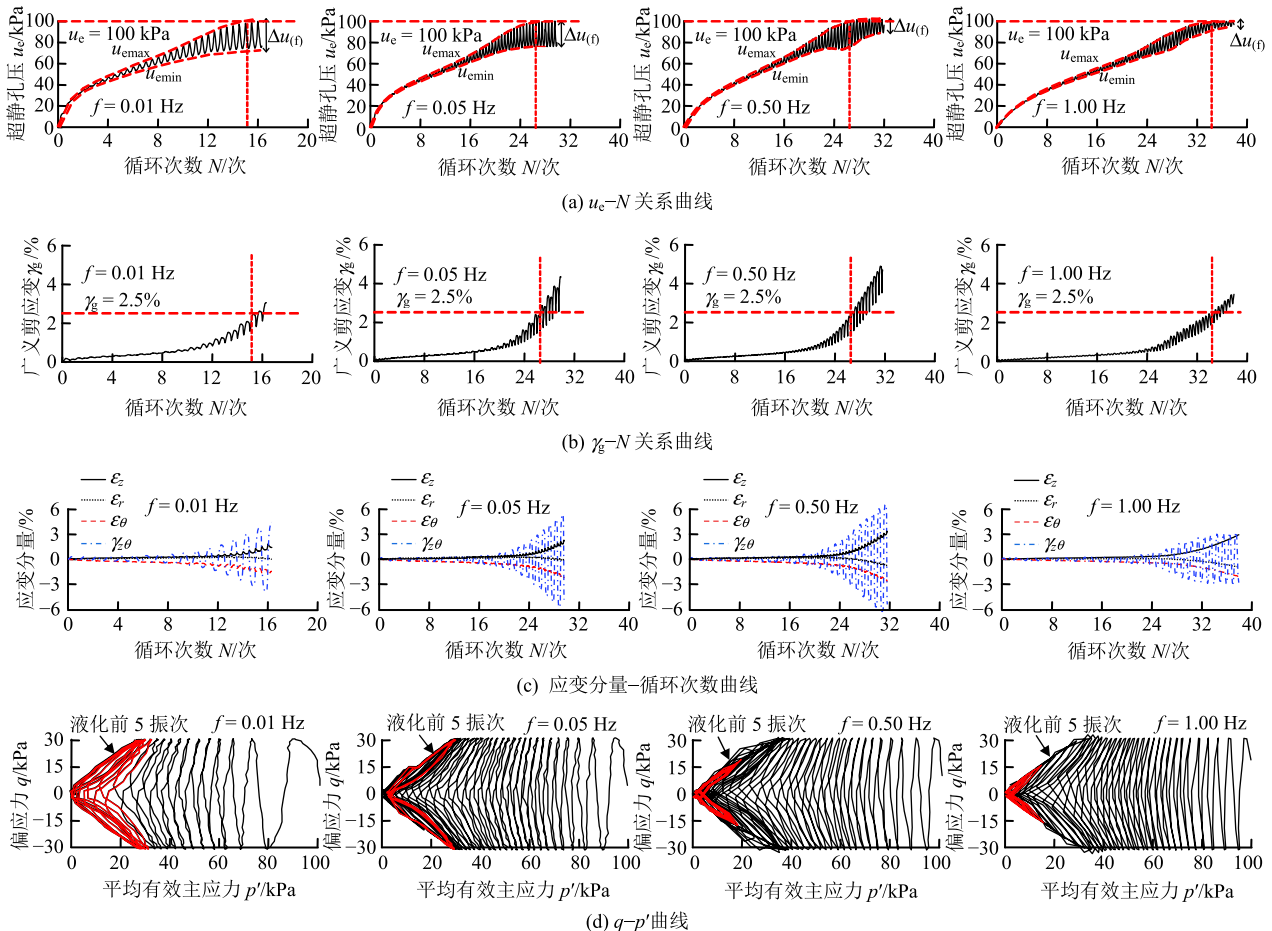
对不排水循环剪切试验，通常以首次有效应力为 0 或某一应变值作为试样的失效判据^[25-28]。本文选取首次有效应力为 0 作为初始液化依据，定义超静孔压比 r_u ^[25-26]：

$$r_u = u_e / p'_0 \quad (3)$$

对比图 4(a)和 4(b)可发现，首次零有效应力与 $\gamma_{ga} = 2.5\%$ 几乎同时发生。这与 Chen 等^[8]的珊瑚砂试验结果一致。Chen 等^[26]的硅质粉土试验也发现：首次零有效应力与偏应变幅值 $\gamma_{ga} = 2.5\%$ 几乎同时发生。应指出，均等固结条件下 γ_{ga} 和 γ_{ga} 的差异很小。

为定量研究孔压增长过程中的波动特性，将每一周循环中孔压的最大值和最小值分别记为 u_{emax} 、 u_{emin} ，定义每一周循环孔压的振荡幅值为波动孔压 Δu_e ，即 $\Delta u_e = u_{emax} - u_{emin}$ ^[4]。由图 4(a)可知，循环次数相同时， u_e 和 γ_g 的振荡幅度均随 f 的增大而减小，液化所需的循环次数 N 随 f 的增大而增大。究其原因， f 的增大导致孔压传递受阻及变形发展不完全，表现为 Δu_e 减小、 γ_g 发展速度减慢，延缓了液化的发生。从图 4(d)中临近液化（红色部分）的有效应力路径可知：有效应力路径在 $f = 0.01$ Hz 时呈“蝴蝶翼”型，其平均有效主应力 p' 恢复显著，总体上表现出较强的剪胀性，但随 f 的增大， p' 的恢复逐渐减小。这表明：试样的剪胀性随 f 的增大而渐减。

本次试验其余工况的 u_e 增长、孔压波动特征、应变分量的发展和有效应力路径均存在上述现象。

图4 CSR = 0.30 和 $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 时加载频率 f 对饱和珊瑚砂不排水循环反应的影响Fig.4 Effects of loading frequency f on undrained cyclic responses of saturated coral sand at CSR = 0.30 and $\alpha_\sigma = 45^\circ$

3.2 孔压增长特性

定义一个循环加载周期内 r_u 的最大值为峰值孔压比 $r_{u\max}$ 。图 5 给出了 $CSR = 0.30$ 时不同 f 的 $r_{u\max}$ 随 N 的发展曲线。以 $\alpha_\sigma = 22.5^\circ$ 为例, 试样达到相同 $r_{u\max}$ 时所需的 N 随 f 的增大而增大。这表明 r_u 的增长速率随 f 增大而减小。应注意, 其余 α_σ 工况下的试样均存在这一现象。究其原因, 超静孔压的传递依赖土骨架孔隙相互贯通所形成的排水通道, 排水通道在循环加载过程中随砂粒骨架变化不断损伤和重构, 而重构通道会因小颗粒阻塞而产生阻塞效应, 使孔压传递路径受阻, 致使孔压传递速度下降, 表现为土抗液化强度增大。这种阻塞效应会随 f 增加而越发显著^[29]。此外, α_σ 对 $r_{u\max}$ 发展速度的影响比较复杂。

定义 $r_u = 1.0$ 时的 Δu_e 为波动孔压终值 Δu_{el} 。

图 6 显示了给定 CSR 时 f 、 α_σ 和 Δu_{el} 的 3D 视图。 f 和 α_σ 一定时, Δu_{el} 随 CSR 的增大而增大; 给定 CSR 时, Δu_{el} 的大小受 f 和 α_σ 的耦合影响; f 较小时, Δu_{el} 随 α_σ 增大呈先减后增趋势, 且 $\alpha_\sigma = 45^\circ$ 时达最小值。给定 CSR 和 α_σ 时, Δu_{el} 随 f 的增大而减小; 在 $f = 1 \text{ Hz}$ 时不同 α_σ 的 Δu_{el} 值几乎相同。这表明 α_σ 对 Δu_{el} 的影响会随 f 的增大而弱化。

3.3 变形增长特性

定义试样的广义剪应变幅值 γ_{ga} 随 N 增长而发生突变点处的值为阈值 $\gamma_{ga,th}$ 。图 7 给出了 $\gamma_{ga,th}$ 的确定方法示意图。加载初期和后期的数据点斜直线的交叉角分线与 γ_{ga} 曲线的交点作为 $\gamma_{ga,th}$, 读取该交点的坐标值即可确定 $\gamma_{ga,th}$ 值。

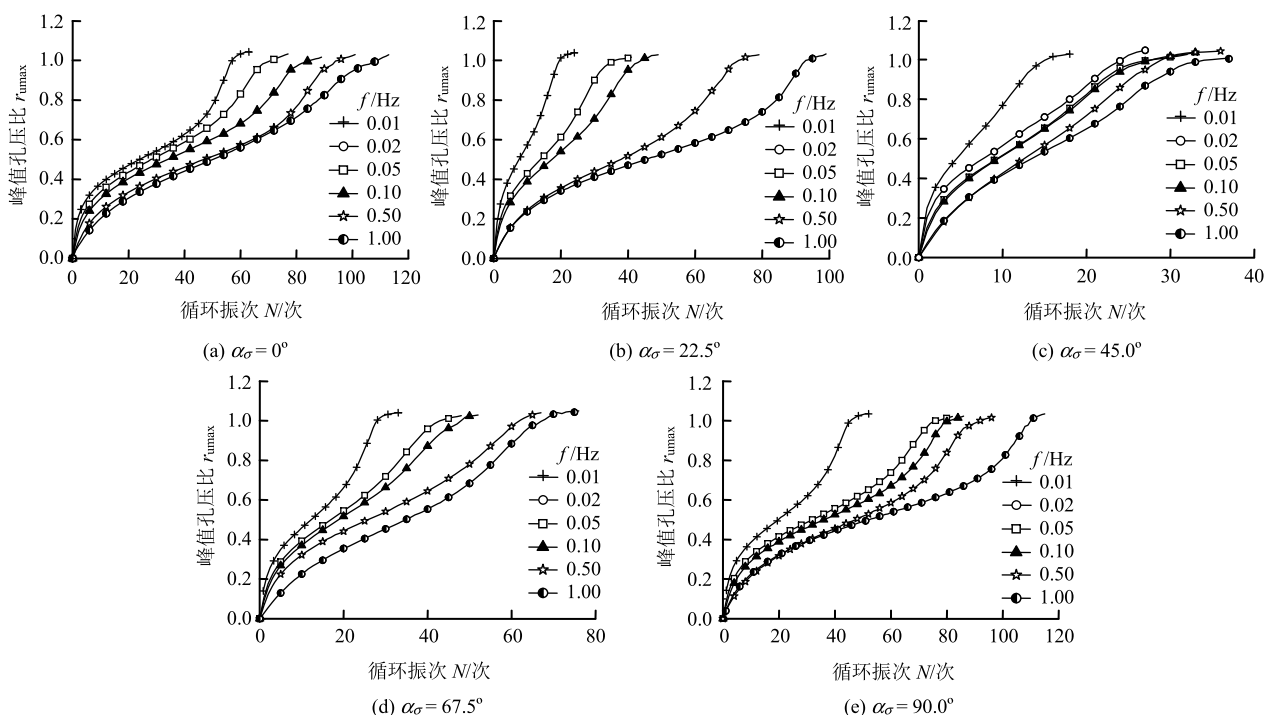


图 5 给定循环加载路径下频率 f 对 $r_{u\max}$ 随循环次数 N 变化的影响 ($CSR = 0.30$)

Fig.5 Influence of frequency f on the generation of $r_{u\max}$ with cyclic number N for a specific cyclic loading path at $CSR = 0.30$

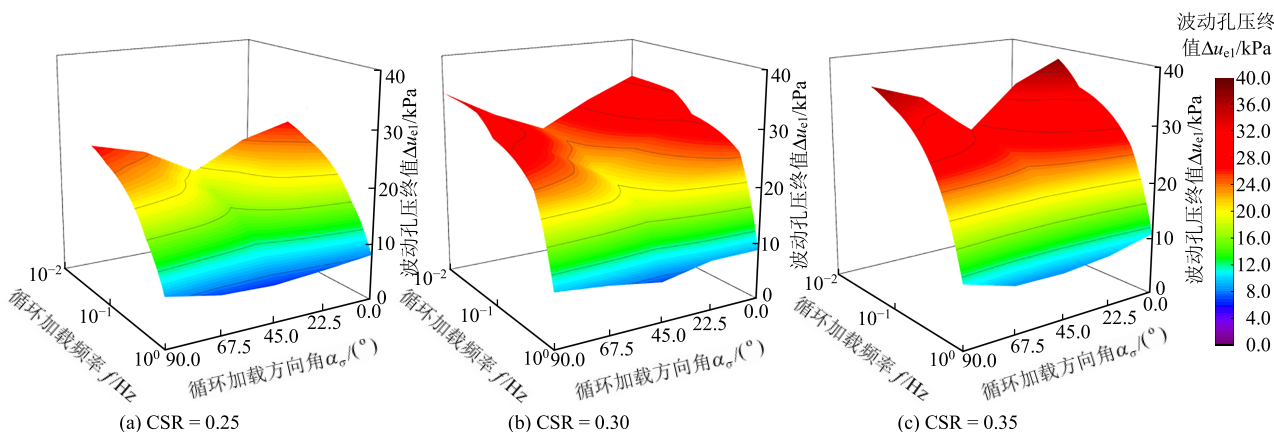


图 6 不同的 CSR 时 Δu_{el} 、 α_σ 和 f 关系的 3D 视图

Fig.6 3D graphs for Δu_{el} , α_σ , and f at various CSR s

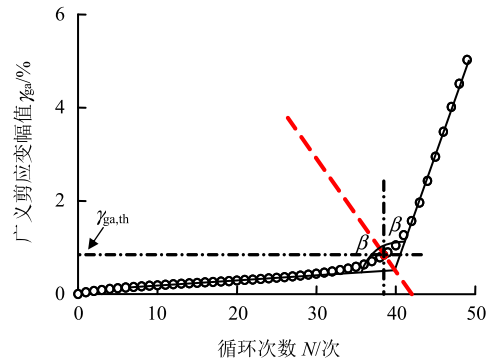
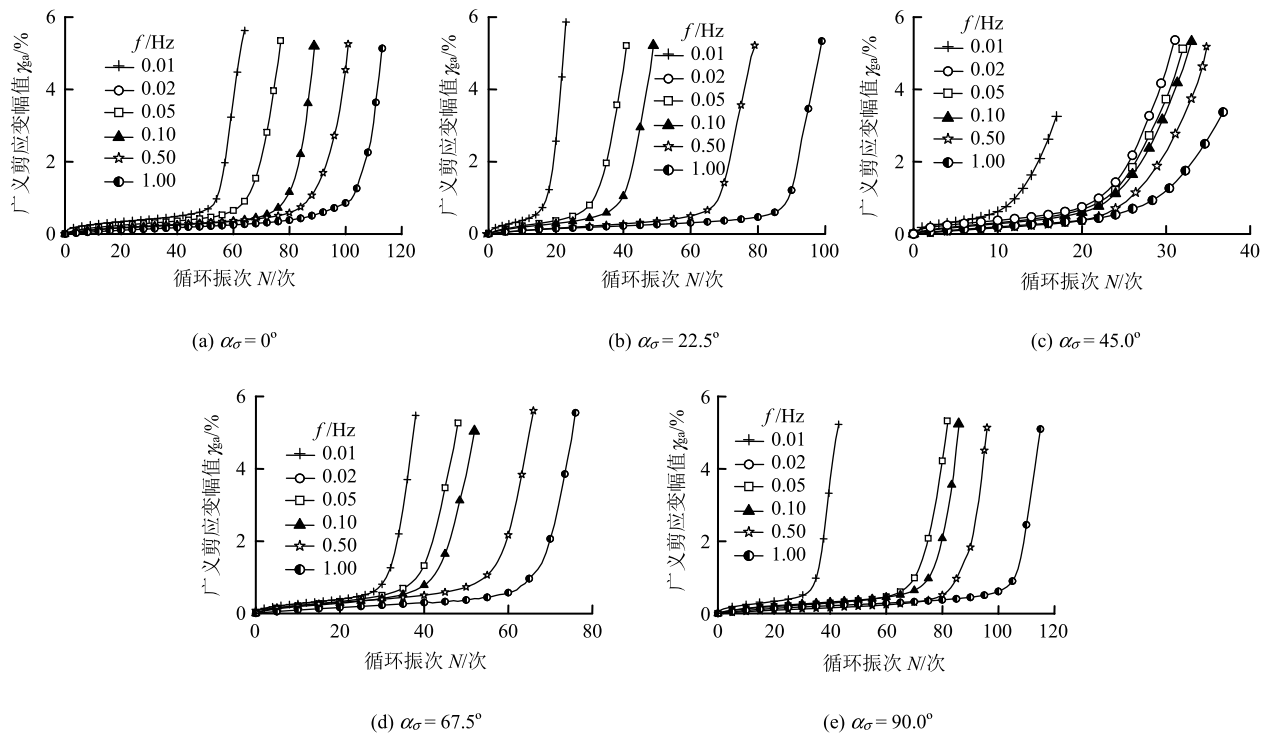
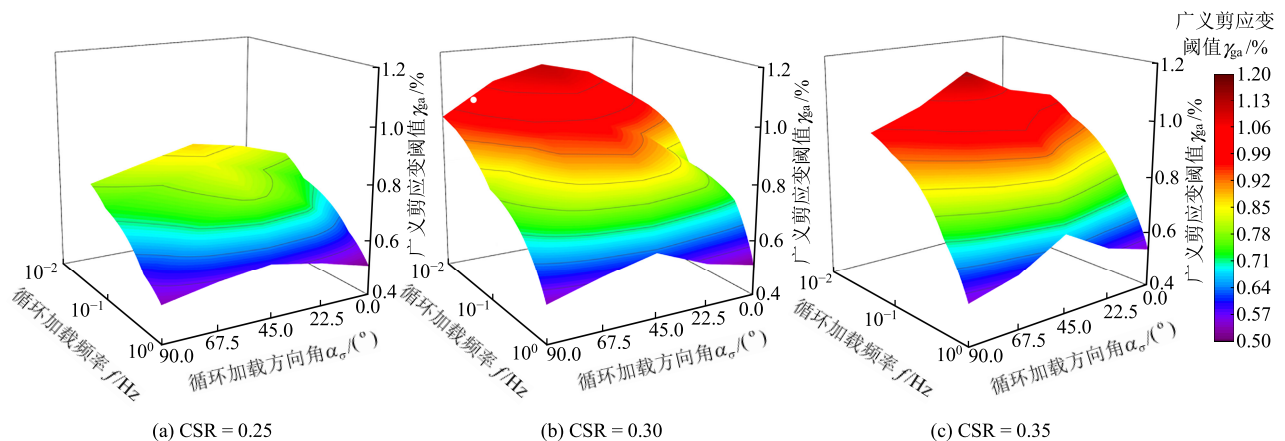
图7 $\gamma_{ga,th}$ 的确定方法示意图Fig.7 Diagram of the method for determining $\gamma_{ga,th}$

图8展示了给定循环加载模式下 f 对 γ_{ga} 随 N 增长的影响。加载初期, γ_{ga} 呈线性缓慢增长, 当 γ_{ga} 达到 $\gamma_{ga,th}$ 时, 砂粒骨架损伤加剧, γ_{ga} 随 N 的增大而急剧增长, 土样发生较大的塑性形变, 在随后的几个循环内达到初始液化。 α_σ 相同时, γ_{ga} 达到 $\gamma_{ga,th}$ 所需的 N 随 f 的增大而增大, 达到初始液化所需的液化次数 N_L 也随 f 增大而增大。

图9对比了不同CSR下 α_σ 、 $\gamma_{ga,th}$ 和 f 的3D视图。给定 f 和 α_σ 时 $\gamma_{ga,th}$ 随CSR增大而增大; 给定CSR和 α_σ 时 $\gamma_{ga,th}$ 随 f 增大而减小; 给定CSR和 f 时 $\gamma_{ga,th}$ 随 α_σ 增大呈先增大后减小的趋势。这表明 $\gamma_{ga,th}$ 的大小受 f 、 α_σ 和CSR的耦合影响。

图8 给定循环加载模式下加载频率 f 对 γ_{ga} 随循环次数 N 发展的影响 (CSR = 0.30)Fig.8 Effect of loading frequency f on the generation of γ_{ga} with N for a specific cyclic loading pattern (CSR = 0.30)图9 不同的CSR时 $\gamma_{ga,th}$ 、 α_σ 和 f 关系的3D视图Fig.9 3D graphs for $\gamma_{ga,th}$, α_σ , and f at various CSRs

由图 10 可知, 在均等固结条件下, 不同 CSR 和 α_σ 的 r_u 随 γ_{ga} 发展的试验数据对均落在一个窄带内, 说明 CSR 和 α_σ 对 γ_{ga} 和 r_u 的相关性无显著影响。Chen 等^[8]通过 $f = 0.5$ Hz 的饱和珊瑚砂不排水循环剪切试验发现, 在不同的固结条件和循环加载模式下 γ_{ga} 与 r_u 的关系存在唯一性表达式:

$$\gamma_{ga} = a \times \tan\left(d \times \frac{\pi}{2} r_u\right) \quad (4)$$

式中: a 、 d 均为与土性相关的拟合参数。

图 10(f)表明: 给定 f 时, 不同 CSR 和 α_σ 的试

验给出的 γ_{ga} - r_u 关系均符合式 (4); 且 a 、 d 的取值与试验中的循环加载方式几乎无关。因此, 拟合系数 a 、 d 可视为材料参数。

3.4 抗液化强度表征方法

研究表明, 不同循环加载模式显著影响土体的抗液化强度^[6-8, 24, 26]。Chen 等^[26]定义单元体循环应力比 USR 表征复杂应力条件下抗液化强度新指标:

$$USR = C_1 C_2 \cdot CSR \quad (5)$$

式中: C_1 和 C_2 为无量纲参数, 定义为

$$C_1 = A_{p0}/A_M \quad (6)$$

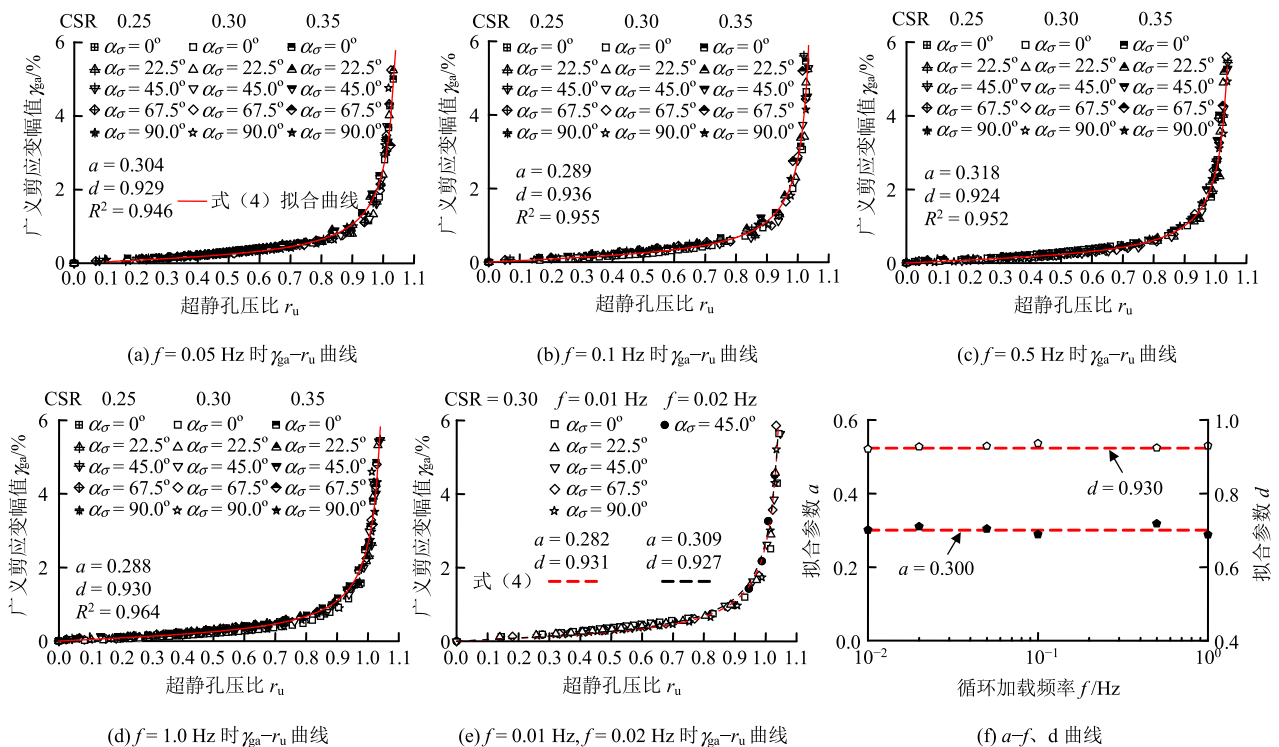


图 10 加载频率 f 对 γ_{ga} 和 r_u 相关性的影响

Fig.10 Effects of loading frequency f on the correlation of γ_{ga} and r_u

$$C_2 = (1 - A_{q0}/A_{p0})^{C_3} \quad (7)$$

$$A_{p0} = \int_0^T 2 \sqrt{\left(\frac{W(t)}{\pi(r_o^2 - r_i^2)}\right)^2 + \left(\frac{3M_T(t)}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}\right)^2} dt \quad (8)$$

$$A_{q0} = \left| \int_0^T (\sigma_z(t) - p) dt \right| = \left| \int_0^T \left(\frac{W(t)}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} \right) dt \right| \quad (9)$$

式中: A_M 为参考值, $A_M = 1.27q_a T$; T 为循环加载周期; C_3 为反映土性可能影响的参数, 0.1 可能是适当取值; $W(t)$ 和 $M(t)$ 分别为随加载时间变化的轴力和扭矩; t 为加载时间; r_i 和 r_o 为试样内外半径。

图 11 给出了不同 f 下 USR 与发生初始液化所需液化次数 N_L 的关系曲线。给定 f 时, 不同 CSR 和 α_σ 的试验给出的 USR 与 N_L 具有唯一性关系:

$$USR = A \cdot N_L^{-B} \quad (10)$$

式中: A 、 B 为拟合参数。这表明 USR 是表征不同循环加载模式下饱和珊瑚砂抗液化强度的有效物理指标。通过拟合式 (10) 发现, USR- N_L 曲线 (抗液化强度) 的发展趋势受 f 的影响甚微, $B = 0.20$ 是一个适宜的值, 而 A 值随 f 增大而增大, 在图 11 中表现为 USR- N_L 曲线随 f 增大而向右上侧移动。这表明饱和珊瑚砂抗液化强度会随 f 的增大而增

大。

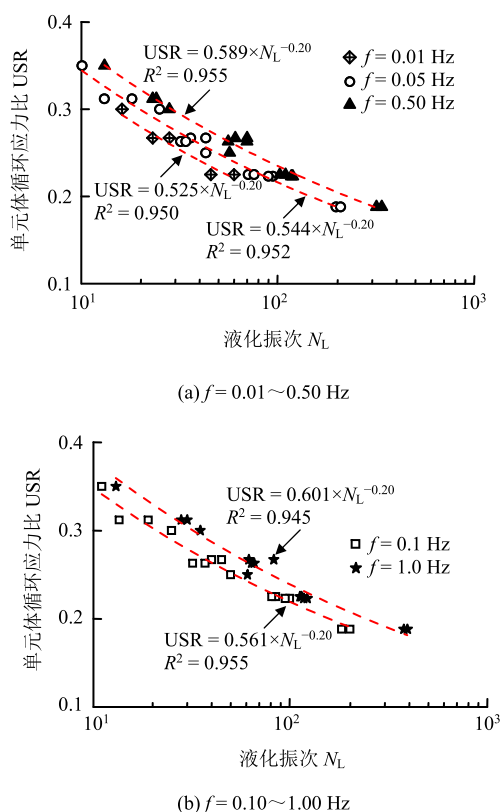


图 11 不同 f 、CSR 和 α_σ 下的 USR 与 N_L 的关系曲线
Fig.11 Correlations between USR and N_L for all f , CSR and α_σ considered

4 结 论

通过不同频率 f 的循环主应力 90° 跳转的系列不排水剪切试验, 主要结论如下:

(1) f 的增大会降低超静孔压 u_e 的增长速率; 达到初始液化时的孔压波动终值 Δu_{el} 随 f 的增大呈减小趋势, 随 α_σ 增大呈先减后增的趋势, α_σ 对 Δu_{el} 的影响会随 f 增大而被弱化。

(2) f 的增大会降低试样变形的发展速率。给出了变形发生突变时的广义剪应变阈值 $\gamma_{ga,th}$ 的量化方法, $\gamma_{ga,th}$ 随 f 增大而减小, 随 CSR 增大而增大, 随 α_σ 增大而先增后减。

(3) 广义剪应变幅值 γ_{ga} 与超静孔压比 r_u 存在事实上的唯一性关系, 几乎不受 f 、CSR 和 α_σ 等因素的影响。

(4) 饱和珊瑚砂不排水循环反应的有效应力路径受 f 的影响显著, 低频时试样会表现出明显的剪胀性, 试样的剪胀性随 f 的增大而降低。

(5) 单元体循环应力比 USR 是表征不同循环加载模式下饱和珊瑚砂抗液化强度的适宜指标。 f 的增大会增大饱和珊瑚砂的抗液化强度, 但对 USR- N_L

曲线的发展趋势影响甚微。

参 考 文 献

- [1] 梁珂, 陈国兴, 杭天柱, 等. 砂类土最大动剪切模量的新预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1963-1970, 1982.
LIANG Ke, CHEN Guo-xing, HANG Tian-zhu, et al. A new prediction model of small-strain shear modulus of sandy soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(6): 1963-1970, 1982.
- [2] 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 Wei-jia, CHEN Guo-xing, 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.
- [3] HYODO M, HYGE A F L, ARAMAKI N. Liquefaction of crushable soils[J]. **Géotechnique**, 1998, 48(4): 527-543.
- [4] 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 Wei-jia, CHEN Guo-xing, LI Lei, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Geotechnical Engineering**, 2019, 41(5): 981-988.
- [5] SANDOVAL E A, PANDO M A. Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands[J]. **Earth Sciences Research Journal**, 2012, 16(1): 55-63.
- [6] 刘抗, 陈国兴, 吴琪, 等. 循环加载方向对饱和珊瑚砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1951-1960.
LIU Kang, CHEN Guo-xing, WU Qi, et al. Effects of cyclic loading directions on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 1-10.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 马维嘉, 秦悠, 王常德, 等. 复杂应力条件下饱和珊瑚砂各向异性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 576-583.
- MA Wei-jia, QIN You, WANG Chang-de, et al. Experimental study on anisotropy of saturated coral sand under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Geotechnical Engineering**, 2022, 44(3): 576-583.
- [10] 汪稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究——从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207.
- WANG Ren, WU Wen-juan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs——engaged in research for 30 years[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(1): 202-207.
- [11] PEACOCK W H, SEED H B. Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1968, 94(3): 689-708.
- [12] HUSSAIN M, SACHAN A. Effect of loading conditions and stress history on cyclic behavior of Kutch soil[J]. **Geomechanics and Geoengineering**, 2020, 15(4): 233-251.
- [13] TATSUOKA F, MAEDA S, FUJII S, et al. Cyclic undrained strength of saturated sand under random and uniform loading and their relation[J]. **Bullition ERS (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)**, 1983, 16: 11-31.
- [14] NONG Z, PARK S, JEONG S-W, et al. Effect of cyclic loading frequency on liquefaction prediction of sand[J]. **Applied Sciences**, 2020, 10: 4502.
- [15] MULILIS J P. The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behaviour of sands[R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1975: 75-93.
- [16] DASH H K, SITHARA T G. Effect of frequency of cyclic loading on liquefaction and dynamic properties of saturated sand[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 10: 487-492.
- [17] LEE K L, FITTON J A. Factors affecting the cyclic loading strength of soil[M]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1969.
- [18] 许成顺, 王冰, 杜修力, 等. 循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 109-118.
- XU Cheng-shun, WANG Bin, DU Xiu-li, et al. Experimental study on effect of cyclic loading frequency on liquefaction mode of sand[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2021, 54(11): 109-118.
- [19] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [20] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. D4253—16 Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [21] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. D4253—14 Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [22] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. **Géotechnique**, 1983, 33(4): 355-383.
- [23] ISHIHARA K, YAMAZAKI A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. **Soils and Foundations**, 1984, 24(3): 85-100.
- [24] HUANG B, CHEN X Y, ZHAO Y. A new index for evaluating liquefaction resistance of soil under combined cyclic shear stresses[J]. **Engineering Geology**, 2015, 199: 125-139.
- [25] CHEN G X, ZHAO D F, CHEN W Y, et al. Excess pore water pressure generation in cyclic undrained testing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(7): 04019022.
- [26] 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**, 2019, 70(4): 317-331.
- [27] ISHIHARA K. Soil behaviour in earthquake geotechnics. New York[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [28] 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.
- [29] CAO Z G, CHEN J Y, CAI Y Q, et al. Long-term behavior of clay-fouled unbound granular materials subjected to cyclic loadings with different frequencies[J]. **Engineering Geology**, 2018, 243: 118-127.