

DOI: 10.11779/CJGE20220956

基于剪切应变特征的饱和珊瑚砂超静孔压发展模型 试验研究

吴琪^{1,2}, 王路阳¹, 刘启菲¹, 周正龙¹, 马维嘉^{*3}, 陈国兴¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 北京工业大学城市建设部, 北京 100124;

3. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 利用空心圆柱扭剪仪, 针对南沙岛礁饱和珊瑚砂试样进行了一系列不排水循环扭剪试验, 以探究细粒含量 FC、相对密度 D_r 及循环应力比 CSR 对饱和珊瑚砂超静孔压比 R_u 增长特性的影响。试验结果表明: R_u - N 曲线发展速率随 FC 及 CSR 的增大而增大, 随 D_r 的增大而减小; 饱和珊瑚砂的 R_u - N 曲线发展速率明显超出了陆域石英砂, 传统的 Seed 孔压模型对珊瑚砂孔压发展规律的表征不完全适用。相同的 FC 和 D_r 下, 不同 CSR 作用下的珊瑚砂 R_u 与剪应变幅值 γ_a 具有唯一性关系。建立了基于剪应变特征的孔压发展预测模型, 分析表明, 孔压模型参数 A 为土性相关的常数, 密度修正的孔压模型参数的 $B/(D_r)^{1.5}$ 与等效骨架孔隙比 e_{sk}^* 具有单一的负幂函数关系。

关键词: 珊瑚砂; 细粒含量; 超静孔压; 剪切应变; 等效骨架孔隙比

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)10-2091-09

作者简介: 吴琪(1991—), 男, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事珊瑚砂动力特性试验研究。E-mail: qw09061801@163.com。

Experimental study on development model of excess pore pressure for saturated coral sand based on shear strain characteristics

WU Qi^{1,2}, WANG Luyang¹, LIU Qifei¹, ZHOU Zhenglong¹, MA Weijia³, CHEN Guoxing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Faculty of Architecture, Civil and

Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Mechanical Engineering, Nanjing

University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A series of undrained cyclic torsional shear tests are carried out on the saturated coral sand specimens from Nansha Islands by using the hollow cylinder torsion shear apparatus. The aim of the tests is to investigate the effects of fine contents(FC), relative density (D_r) and applied cyclic stress ratio CSR on the generated excess pore pressure ratio R_u of the specimens. The test results show that: the development rate of R_u - N curve increases with the increasing FC and CSR, but decreases with the increasing D_r . In addition, the development rate of R_u - N curve of the saturated coral sands significantly exceeds that of the terrestrial quartz sands, and the traditional Seed pore pressure model is not fully applicable to characterize the development pattern of the excess pore pressure of coral sands. For the same D_r and FC, R_u of the specimens under different CSR is uniquely related to the shear strain amplitude (γ_a). A pore pressure evaluation model based on the shear strain characteristics is established, and the analysis shows that the pore pressure model parameter A is a soil-specific constant, and the density-corrected pore pressure model parameter $B/(D_r)^{1.5}$ has a single negative power function relationship with the equivalent skeleton void ratio e_{sk}^* .

Key word: coral sand; fines content; excess pore pressure; shear strain; equivalent skeleton void ratio

0 引言

随着南海岛礁及近岸军事和民事功能设施的不断建设, 珊瑚岛礁工程的稳定性已成为一个具有挑战性的问题, 碳酸钙 (CaCO_3) 含量大于 90% 的碳酸盐砂通常被称为珊瑚砂, 是岛礁建设的主要吹填材料^[1]。

高冉等^[2]和王鸾等^[3]对南海吹填岛礁珊瑚砂进行一系列室内单元试验, 并结合现场情况得出南海岛礁在波

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52008206, 52278503, 52208349)

收稿日期: 2022-08-04

*通信作者 (E-mail: mwj9107@njjust.edu.cn)

浪荷载作用下液化可能性极小, 在地震荷载作用下有可能液化。饱和土体受振动荷载作用产生的孔隙水压力变化是影响土体动强度和变形的根本原因, 也是研究土体液化机理的关键问题^[3-4]。循环荷载作用下超静孔压的振动发展模型是基于有效应力原理解释液化机理的数学基础, 也是液化场地动力稳定性分析技术的基础本构关系之一^[5]。饱和吹填珊瑚土的超静孔压模型研究是岛礁工程场地液化防控工作中的重要科学问题。

诸多学者针对陆源砂的在循环荷载作用下超静孔压特性进行了系列研究, 取得了有益的成果^[6-9]。值得关注的是, 由于珊瑚砂特殊的矿物成分、颗粒形状及内孔隙丰富等特性, 导致基于已有研究构架的陆源砂超静孔压发展规律并不完全适用于珊瑚砂^[10-11]。Aiery 等^[12]通过不同循环应力水平的循环剪切试验较早的研究了胶结程度和应力水平对珊瑚砂液化特性的影响, 其变形发展与孔隙水压力有关, 且随着超静孔压的增长表现为弹性增长、稳定发展和最终破坏 3 种状态。然而, 由于对珊瑚砂的研究起步较晚, 对循环荷载作用下珊瑚砂的超静孔压增长特性研究甚少。虞海珍等^[13]初步探讨了级配、相对密度、固结应力比、侧向应力等因素对珊瑚砂超静孔压发展规律的影响。随后, 虞海珍等^[14]着重研究波浪荷载对饱和珊瑚砂超静孔压增长特性的影响, 并建立超静孔压比 R_u 与广义剪应变 γ_g 相关性表征方程。孙吉主等^[15]分析了内孔隙与各向异性对循环荷载作用下珊瑚砂超静孔压特性的影响, 并提出考虑内孔隙率变化的超静孔压应力增量方程。刘汉龙等^[11]研究发现: 循环加载初期, 超静孔压几乎呈单调上升且波动很小; 随后孔压发展进入加速阶段, 此时剪缩与剪胀交替出现, 超静孔压的波动逐渐增大。高冉等^[2]发现 R_u 与振次比 N/N_f 符合 Seed 提出的反正弦孔压发展模式, 同时归一化的累积孔压与动应变幅值之间满足双曲线函数。马维嘉等^[16]指出: 饱和珊瑚砂的超静孔压随广义剪应变幅值的增加呈现先增大后减小的趋势, 固结应力历史对饱和珊瑚砂的液化特性有较大影响。

多位学者的研究均发现^[17-20]: 珊瑚砂在常规工程应力水平下就很容易被压碎且产生细粒 (粒径小于 0.075 mm), 形成具有不同细粒含量的珊瑚砂。而已有研究成果表明, 细粒含量 FC 对土体超静孔压发展特性影响显著^[21-22]。随着“一带一路”倡议和“海洋强国”战略的实施, 南沙群岛珊瑚砂岛礁基础设施工程的安全性问题受到越来越多的关注。因此, 对具有不同 FC 的南沙珊瑚砂超静孔压发展特性开展深入的系统性研究势在必行。

对取自南沙群岛某岛礁的饱和珊瑚砂开展了系列

不排水循环扭剪试验, 分析了细粒含量 FC、相对密度 D_r 及循环应力比 CSR 对饱和珊瑚砂孔压发展特性影响。建立饱和珊瑚砂统一超静孔压发展模型, 为南海岛礁液化场地动力稳定性分析提供参考。

1 试验内容与方法

1.1 试验仪器

试验仪器采用南京工业大学的空心圆柱扭剪仪, 仪器性能指标详见文献^[23, 24]。该仪器可同时控制轴力 W 、扭矩 M 、及内外围压 p_o 、 p_i 的加载, 可以实现各种循环加载模式。试验试样为空心圆柱试样, 试样高 $H = 200$ mm, 外径 $r_o = 100$ mm, 内径 $r_i = 60$ mm。

1.2 试验材料及试样制备

珊瑚砂广泛分布于地震风险水平高的热带、亚热带海洋及岛礁。试验所用珊瑚砂试样均取自南海某岛礁, 为无胶结松散体, 由海洋生物碎屑沉积物组成, 主要矿物成分为碳酸钙。试样电镜扫描图如图 1, 该砂颗粒形状多为不规则粒状, 表面较为粗糙。本试验南海珊瑚砂的碳酸钙含量高达 90.28%, 其相对质量密度为 2.80。

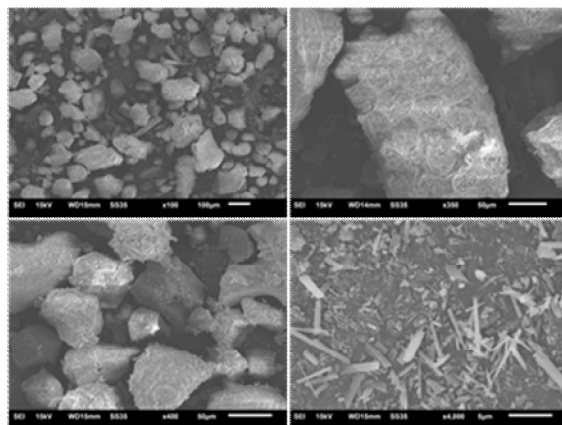


图 1 珊瑚砂电镜扫描图

Fig. 1 SEM images of coral sand

将珊瑚砂置于 103℃ 的恒温烘箱内烘 24 h, 以 0.075 mm 为界限进行筛分, 将粒径 0.075 mm 以下的珊瑚砂颗粒视为细粒, 而其余的颗粒作为砂粒。将不同质量的细粒与砂粒均匀混合获取具有不同 FC 的珊瑚砂。纯砂粒、纯细粒及具有不同 FC 的珊瑚砂的级配曲线如图 2 所示。其中最大、最小孔隙比采用 ASTM 规范测得^[25-26], 其中最小孔隙比采用“振动法”测得, 相对应的物理指标见表 1。

试样采用干装法分 5 层制样, 每层单独配制珊瑚砂的质量, 在容器中充分均匀混合, 然后撒入空心圆柱模具的承膜筒内, 为保证试样均匀性, 各层土间刮毛处理。由于珊瑚砂颗粒具有易破碎的性质, 夯击土

样容易导致颗粒破碎, 所以采用压实器静压土样至目标高度, 控制每层厚度基本一致, 以便达到预期的干密度。装样完成后, 联合使用 CO₂ 置换、通入无气水及分级反压饱和的方法对试样进行饱和, 当孔压系数 $B \geq 0.97$, 认为试样完全饱和。

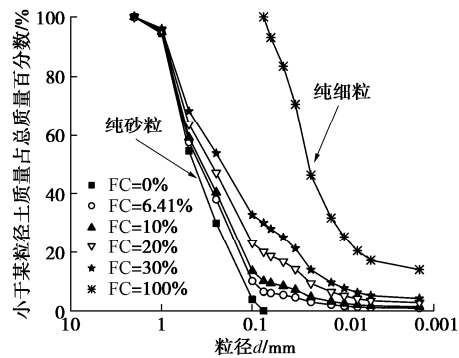


图 2 珊瑚砂级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of coral sand gradation curve

表 1 纯砂粒、纯细粒及不同 FC 的珊瑚砂基本物理指标
Table 1 Basic physical indices of coral sand with pure sand, pure fine grain and different FC

物理指标	细粒含量 FC/%					
	0	6.41	10	20	30	100
e_{\max}	1.79	1.72	1.70	1.65	1.62	1.52
e_{\min}	1.12	0.99	0.91	0.77	0.69	0.89
d_{50}/mm	0.44	0.38	0.35	0.28	0.21	0.03
C_u	4.53	5.41	6.58	17.82	23.69	—
C_c	0.91	0.71	0.84	1.59	1.19	—

注: e_{\max} 为最大孔隙比; e_{\min} 为最小孔隙比; d_{50} 为平均粒径; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数。

1.3 试验方法与方案

对于循环扭剪试验, 循环应力比 CSR 定义为

$$CSR = \tau / \sigma'_m \quad (1)$$

式中: τ 为循环剪应力; σ'_m 为初始有效固结应力。加载波形为频率 1 Hz 的正弦波。为探究 FC、相对密度 D_r 及 CSR 对饱和珊瑚砂超静孔压特性的影响, 对 FC = 0%, 6.41%, 10%, 20% 和 30% 的珊瑚砂分别制备 $D_r = 30\%$, 45% 及 70% 的试样, 然后在 $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$ 条件下进行均等固结。固结完成后, 施加不同 CSR 对试样进行不排水循环扭剪试验, 试验方案见表 2。

2 试验结果与分析

以 ID 为 15, 25, 29 及 32 的工况为例, 图 3 给出了 $D_r = 45\%$, $CSR = 0.25$ 条件下饱和珊瑚砂不排水循环扭剪试验的典型试验结果。可以看出, 随着循环振次 N 的增加, 超静孔压 u_e 在上升初期无明显的波动, 当 u_e 上升到 40 kPa 之后开始出现明显的波动直至液化, 循环剪应变 γ 呈喇叭状增长模式。试验发现, 所有试样的 u_e 最终均能达到 σ'_m , 因此, 取 $u_e = \sigma'_m$ 作为

饱和珊瑚砂试样的初始液化判据。

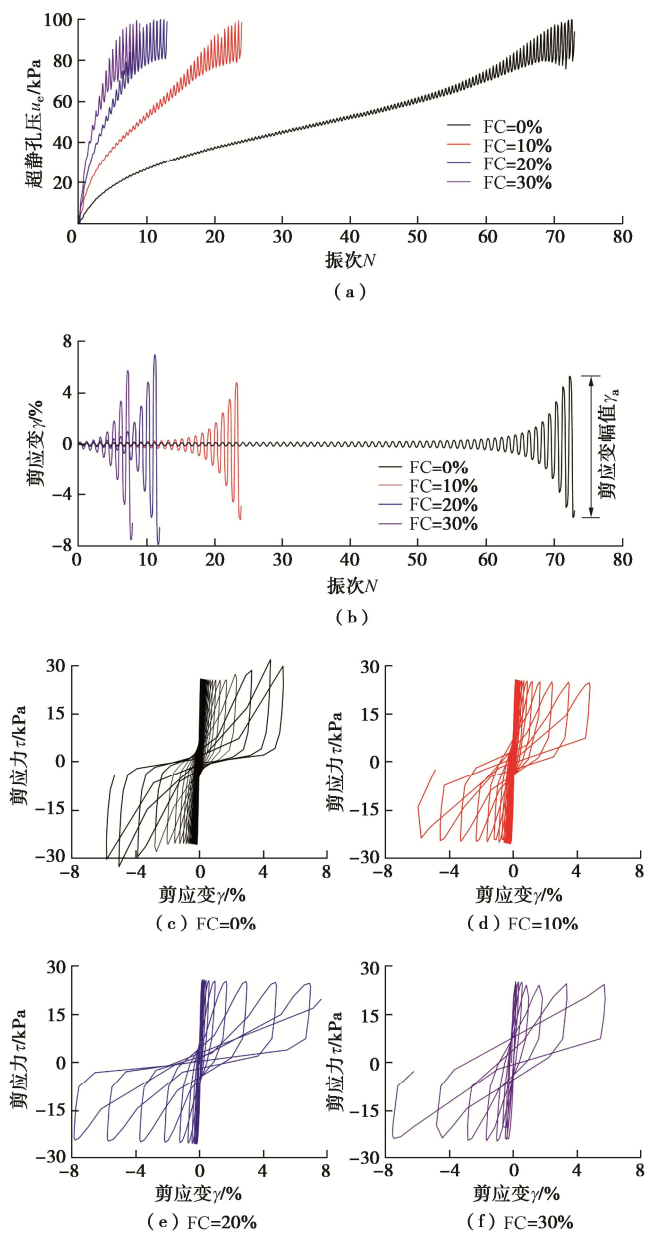


图 3 $D_r = 45\%$, $CSR = 0.25$ 条件下饱和珊瑚砂典型试验结果
Fig. 3 Typical test results of saturated coral sand with $D_r = 45\%$, $CSR = 0.25$

2.1 饱和珊瑚砂孔压发展特性

定义超静孔压比 R_u 为每一循环加载周期 u_e 峰值与 σ'_m 的比值, 定义试样达到初始液化 ($R_u = 1.0$) 时所需的 N 为液化振次 N_L 。图 4 给出了不同 CSR 下饱和珊瑚砂 R_u 与 FC, N 的关系。由图 4 可知: FC, CSR 及 D_r 对 R_u 随 N 的发展速率均有影响。当 CSR 相同时, 随 FC 的增加, R_u 的发展速率增大, 而 N_L 减小, 但 R_u 的发展速率随 D_r 的增大而减小, 而 N_L 增大; 对于不同的 FC 和 D_r , 随 CSR 增加, 饱和珊瑚砂 R_u 的发展速率逐渐增大, N_L 也逐渐减小。对比发现 CSR 对孔压发展的影响较小, D_r 及 FC 对孔压发展影响较大。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

ID	D_r / %	FC/ %	CSR	ID	D_r / %	FC/ %	CSR	ID	D_r / %	FC/ %	CSR	ID	D_r / %	FC/ %	CSR	ID	D_r / %	FC/ %	CSR
1	30	0	1.888	10	30	30	0.188	19	45	6.41	0.223	28	45	20	0.223	37	70	10	0.312
2	30	0	0.223	11	30	30	0.223	20	45	6.41	0.250	29	45	20	0.250	38	70	10	0.350
3	30	0	0.250	12	30	30	0.250	21	45	6.41	0.225	30	45	30	0.188	39	70	20	0.263
4	30	10	0.188	13	45	0	0.188	22	45	6.41	0.263	31	45	30	0.223	40	70	20	0.312
5	30	10	0.223	14	45	0	0.223	23	45	10	0.188	32	45	30	0.250	41	70	20	0.350
6	30	10	0.250	15	45	0	0.250	24	45	10	0.223	33	70	0	0.263	42	70	30	0.263
7	30	20	0.188	16	45	0	0.320	25	45	10	0.250	34	70	0	0.312	43	70	30	0.312
8	30	20	0.223	17	45	0	0.263	26	45	10	0.280	35	70	0	0.350	44	70	30	0.350
9	30	20	0.250	18	45	6.41	0.188	27	45	20	0.188	36	70	10	0.263				

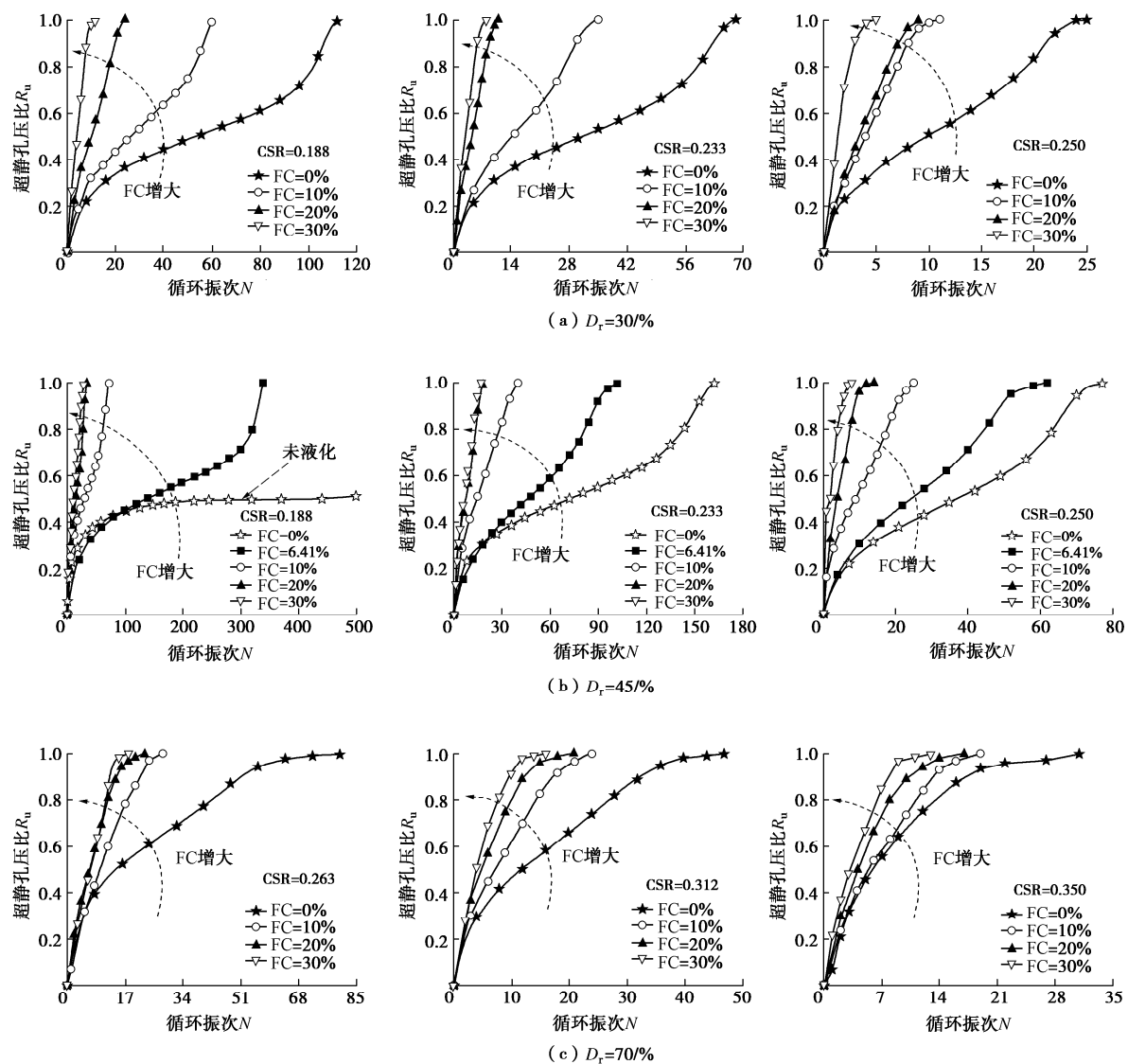


图 4 饱和珊瑚砂 R_u 与 N 的关系曲线

Fig.4 Relationship between R_u and N for saturated coral sand

图 5 为不同 FC 及 CSR 下饱和珊瑚砂 R_u 与 N/N_L 的关系。可以看出 FC 及 CSR 均对 R_u 随 N/N_L 的变化特征有明显影响, 且经典的 Seed 等^[27]提出的正弦函数孔压模型并不完全适用于饱和珊瑚砂。图中红实线是高冉等^[2]进行了一系列动三轴试验所得到的南海钙质砂孔压发展的上下边界, 显然南海钙质砂的 u_e 并未达到 σ'_m , 这与本试验的结果有所差异, 造成这种差异的原因可能是与土性以及试验条件(试验仪器与循环加载应力路径)有关。当 $R_u < 0.3$ 时, 珊瑚砂的孔压发展在 高冉等^[2]给出的钙质砂孔压发展的范围内; 但当 $R_u > 0.3$ 时, 珊瑚砂孔压的发展超出了钙质砂孔压发展的上边界。图 5 中阴影部分是 Lee 等^[28]给出的 Monterey 石英砂的孔压发展范围, 珊瑚砂孔压的发展明显超出了陆域石英砂孔压的上边界, 且饱和珊瑚砂 R_u 发展速率明显大于石英砂。

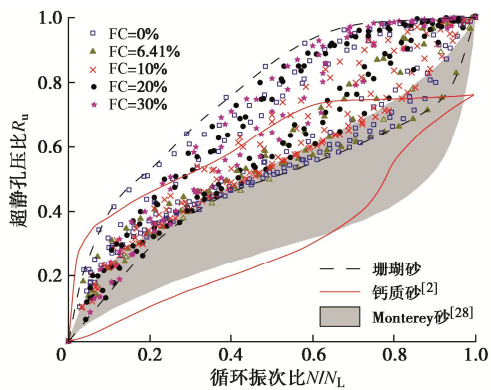
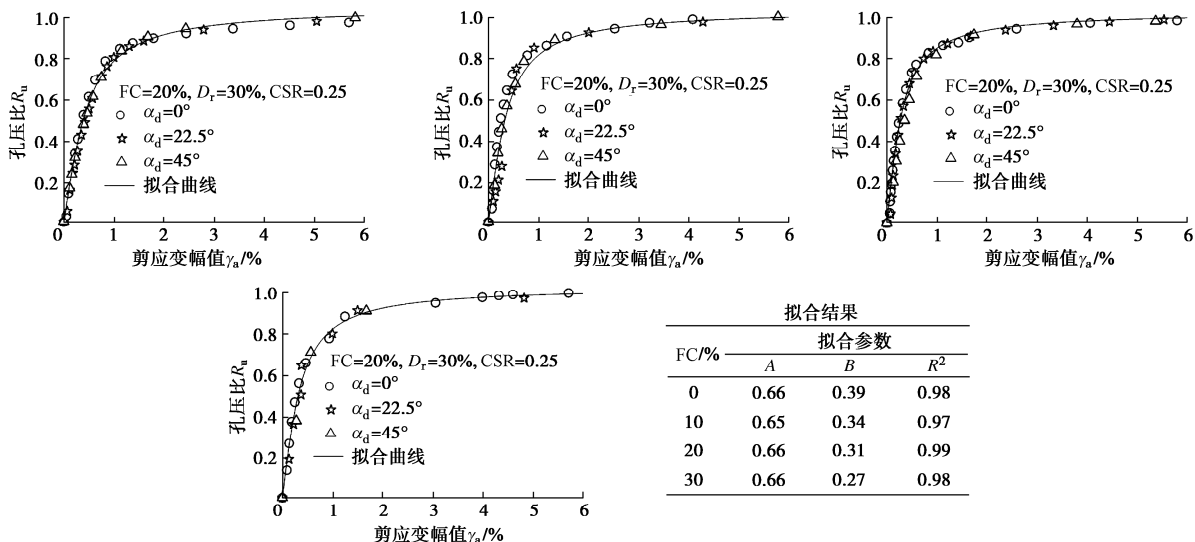


图 5 饱和珊瑚砂超静孔压发展

Fig. 5 Development patterns of excess pore water pressure for saturated coral sand

2.2 基于剪切应变特征的超静孔压发展预测模型

图 6 给出剪应变幅值 γ_a 与孔压比 R_u 的关系曲线, 不同 D_r , FC 和 CSR 情况下饱和珊瑚砂的 R_u - γ_a 关系曲线均呈现“急剧-平稳”的发展模式, 当 $\gamma_a < 1$ 时,



R_u 急剧增长近似线性, 当 γ_a 增长至 1 左右, R_u 增长趋势变缓; 当 $\gamma_a > 2.5$ 时 R_u 随 γ_a 的增加趋于平稳。由图可知, FC 与 D_r 对 R_u - γ_a 曲线影响较为显著, 而 CSR 对 R_u - γ_a 关系曲线没有影响, 这表明基于 γ_a 的超静孔压发展模型可以消除循环应力条件的影响, 据此, 可建立基于剪切应变特征的超静孔压发展模型:

$$R_u = A \times \text{acr} \tan\left(\frac{\gamma_a}{B}\right) \quad (2)$$

式中: A , B 为孔压模型拟合参数, 反映 R_u 随 γ_a 的变化, 式 (2) 对具有不同 D_r 、FC 饱和珊瑚砂的 γ_a 与 R_u 试验数据有较好的拟合效果, 非线性拟合度 R^2 均大于 0.97。

由图 7 可知, A 为反映土性的材料特性孔压模型参数, 基本维持在 1/3, 且不受 FC 和 D_r 的影响; B 表征 R_u 随 γ_a 的增长速率特征孔压模型参数, 受 FC 和 D_r 影响显著。当给定 D_r 时, B 随 FC 的增大呈线性降低, 当 FC 确定时, B 随 D_r 的增大而减小。这表明, FC 越小或 D_r 越小, 饱和珊瑚砂的超静孔压增长速率越快。

为统一表征 FC 及 D_r 对孔压模型参数 B 的影响, 引入等效骨架孔隙比 e_{sk}^* 以描述细粒参与组成土骨架的程度对不同 FC 的砂土颗粒接触状态的影响。 e_{sk}^* 定义为砂土骨架颗粒体积与其间的孔隙体积之比^[29]:

$$e_{sk}^* = \frac{e + (1 - b) \cdot FC}{1 - (1 - b) \cdot FC} \quad (3)$$

式中: b 为细粒影响系数, $0 \leq b \leq 1$ 。Mohammadi 等^[30]给出了预测 b 值的简化公式:

$$b = \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{0.3}{k}\right] \right\} \left(r \times \frac{FC}{FC_{th}} \right)^r \quad (4)$$

式中: $k = 1 - r^{0.25}$, $r = \chi^{-1}$ 。 $\chi = d_{10}^s/d_{50}^f$ 为颗粒粒径比, d_{50}^s 为纯砂粒平均粒径, d_{50}^f 为纯细粒平均粒径。

拟合结果			
FC/%	拟合参数		R^2
	A	B	
0	0.66	0.39	0.98
10	0.65	0.34	0.97
20	0.66	0.31	0.99
30	0.66	0.27	0.98

(a) $D_r=30\%$

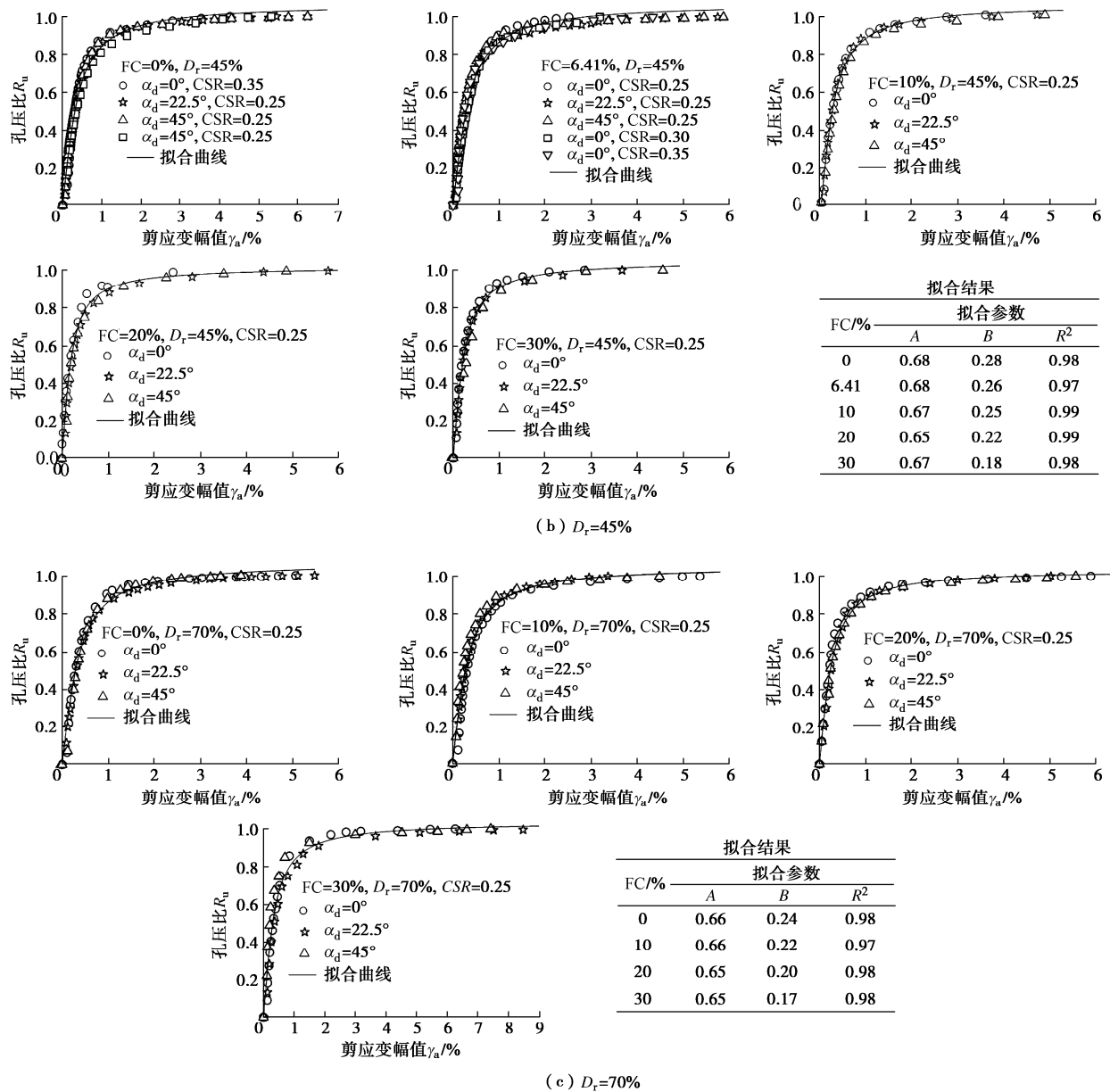


图 6 剪应变幅值与超静孔压比的关系

Fig. 6 Relationship between shear strain amplitude and excess pore pressure ratio

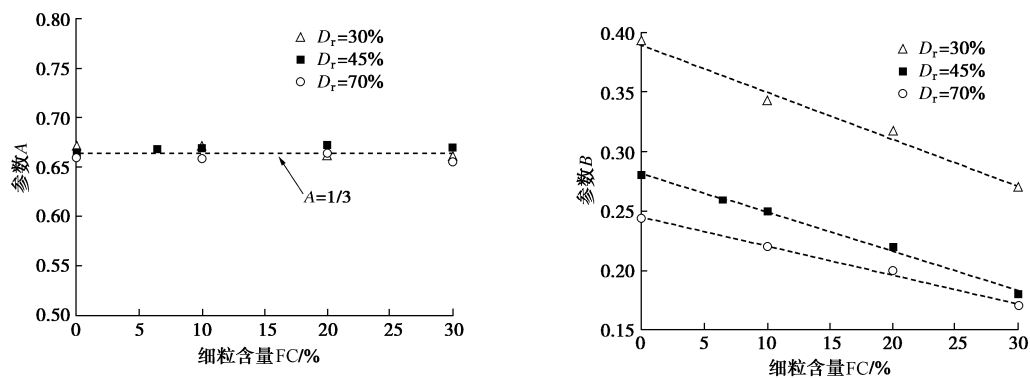


图 7 参数 A , B 与 FC 关系曲线

Fig. 7 Relationship between parameters A , B and FC

分析发现, 密度修正的孔压模型参数的 $B/(D_r)^{1.5}$ 随 e_{sk}^* 的增大而减小的现象 (图 8), 两者具有单一的负幂函数关系, 且 FC 及 D_r 对该唯一性关系没有影响。这说明, 综合反映土体细粒组成、物理状态和颗粒接触的 e_{sk}^* 是表征 $B/(D_r)^{1.5}$ 的一个适宜的物理特性指标, 能很好地综合反映不同砂类土的物理特性对 $B/(D_r)^{1.5}$ 的影响。据此, B 与 e_{sk}^* 的最佳拟合关系曲线可表示为

$$B = D_r^{1.5} \times \alpha (e_{sk}^*)^\beta \quad (5)$$

式中: α 和 β 为拟合参数, 对于本试验的饱和珊瑚砂, α 和 β 分别为 0.3 和 -3.3。

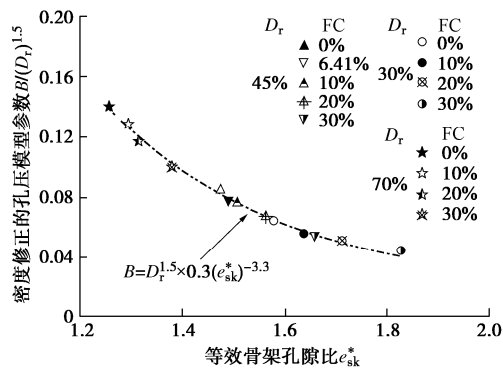


图 8 密度修正的孔压模型参数 $B/(D_r)^{1.5}$ 与 e_{sk}^* 关系曲线

Fig. 8 Relationship between density-corrected pore pressure model parameter $B/(D_r)^{1.5}$ and e_{sk}^*

综上, 可建立综合考虑 D_r , FC 及 CSR 的饱和珊瑚砂孔压预测模型, 具体流程如下:

首先, 确定砂粒和细粒的基本物理指标, 然后由式 (3), (4) 计算 e_{sk}^* ;

其次, 基于 e_{sk}^* 和 D_r , 利用式 (5) 获取孔压模型参数 B ; 孔压模型参数 A 取定值 1/3;

最后, 利用式 (2) 计算各剪应变条件下饱和珊瑚砂 R_u , 并推算 u_e 。

对于本试验珊瑚砂, 其基于剪应变特征的孔压预测模型为

$$u_e = \frac{\sigma'_m}{3} \times \arctan \frac{\gamma_a}{D_r^{1.5} \times 0.3 (e_{sk}^*)^{-3.3}} \quad (6)$$

3 结 论

基于系列不排水循环扭剪试验, 详细探究了具有不同 FC 和 D_r 的饱和珊瑚砂在不同 CSR 的循环加载条件下超静孔压发展特性, 得到以下 3 点结论。

(1) FC , CSR 或 D_r 的变化会引起 R_u 随 N 的发展速率的改变。 FC 的增加、 D_r 的减小及 CSR 的增大均会导致 R_u 随 N 的发展速率增大, FC , CSR 及 D_r 对 N_L 的影响呈现出相反的规律。对比发现 D_r 及 FC 对超静孔压发展影响程度大于 CSR 对超静孔压发展的影响。

(2) 珊瑚砂在 R_u-N/N_L 坐标系中的发展明显超出了陆域石英砂孔压的上边界, 且饱和珊瑚砂 R_u 发展速率明显大于石英砂。经典的 Seed 正弦函数孔压模型并不完全适用于饱和珊瑚砂。不同 D_r , FC 和 CSR 下饱和珊瑚砂的 R_u 随 γ_a 的均呈现“急剧—平稳”发展模式, 两者具有反正切函数关系。

(3) 提出基于剪切应变特征的超静孔压发展预测模型, 其中, 孔压模型参数 A 为土性相关的常数, 对于本试验珊瑚砂取 1/3; 孔压模型参数 B 随 FC 的增大呈线性降低, 随 D_r 的增大而减小。此外, 发现密度修正的孔压模型参数的 $B/(D_r)^{1.5}$ 与 e_{sk}^* 具有单一的负幂函数关系。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 高 冉, 叶剑红. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3897-3908, 3919. (GAO Ran, YE Jianhong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3897-3908, 3919. (in Chinese))
- [3] 王 鸾, 汪云龙, 袁晓铭, 等. 人工场地吹填珊瑚土抗液化强度大粒径动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2819-2829. (WANG Luan, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Experimental study on liquefaction resistance of hydraulic fill coralline soils at artificial sites based on large-scale dynamic triaxial apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2819-2829. (in Chinese))
- [4] 聂庆科, 白 冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 724-729. (NIE Qingke, BAI Bing, HU Jianmin, et al. The pore pressure model and undrained shear strength of soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 724-729. (in Chinese))
- [5] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 1-50. (ZHANG Jianmin. New advances in basic theories of sand dynamics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 1-50. (in Chinese))

- [6] 孙海妹, 王兰民, 王 平, 等. 饱和兰州黄土液化过程中孔压和应变发展的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3464-3468. (SUN Haimei, WANG Lanmin, WANG Ping, et al. Experimental study of development of strain and pore water pressure during liquefaction of saturated Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3464-3468. (in Chinese))
- [7] 徐 斌, 孔宪京, 邹德高, 等. 饱和砂砾料振动孔压与轴向应变发展模式研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(6): 925-928. (XU Bin, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Study of dynamic pore water pressure and axial strain in saturated sand-gravel composites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(6): 925-928. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 年廷凯, 焦厚滨, 范 宁, 等. 南海北部陆坡软黏土动力应变-孔压特性试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1564-1572, 1580. (NIAN Tingkai, JIAO Houbin, FAN Ning, et al. Experiment on dynamic strain-pore pressure of soft clay in the northern slope of South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1564-1572, 1580. (in Chinese))
- [10] HYODO M, HYDE A F L, ARAMAKI N. Liquefaction of crushable soils[J]. Géotechnique, 1998, **48**(4): 527-543.
- [11] 刘汉龙, 张 宇, 郭 伟, 等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(4): 790-801. (LIU Hanlong, ZHANG Yu, GUO Wei, et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(4): 790-801. (in Chinese))
- [12] AIREY D W, FAHEY M. Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1991, **28**: 101-121.
- [13] 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 Haizhen, WANG Ren. The cyclic strength test research on calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(4): 6-11. (in Chinese))
- [14] 虞海珍, 汪 稔, 赵文光, 等. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(11): 86-89. (YU Haizhen, WANG Ren, ZHAO Wenguang, et al. Experimental research on development pattern of pore water pressure of carbonate sand under wave loads[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, **28**(11): 86-89. (in Chinese))
- [15] 孙吉主, 黄明利, 汪 稔. 内孔隙与各向异性对钙质砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 166-169. (Sun Jizhu, Huang Mingli, Wang Ren. Influence of inner pore and anisotropy on liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 166-169. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 王 刚, 查京京, 魏 星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 755-760. (WANG Gang, ZHA Jingjing, WEI Xing. Evolution of particle crushing of carbonate sands under cyclic triaxial stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 755-760. (in Chinese))
- [18] 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 Jiaming, ZHANG Ling, JIANG Guosheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2789-2793. (in Chinese))
- [19] HALL E B, GORDON B B. Triaxial testing with large-scale high pressure equipment[J]. Laboratory Shear Testing of Soils, 1963, **361**: 315-328.
- [20] WEI H Z, ZHAO T, HE J Q, et al. Evolution of particle breakage for calcareous sands during ring shear tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017153.
- [21] 王艳丽, 饶锡保, 潘家军, 等. 细粒含量对饱和砂土动孔压演化特性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(3): 52-56. (WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2011, **33**(3): 52-56. (in Chinese))
- [22] 曾长女, 刘汉龙, 陈育民. 细粒含量对粉土动孔压发展模式影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(8): 2193-2198. (ZENG Changnü, LIU Hanlong, CHEN Yumin. Test study on influence of fine particle content on dynamic pore water

- pressure development mode of silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(8): 2193-2198. (in Chinese))
- [23] 吴 杨, 崔 杰, 李 晨, 等. 细粒含量对岛礁吹填珊瑚砂最大动剪切模量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(1): 205-216. (WU Yang, CUI Jie, LI Chen, et al. Experimental study on the effect of fines on the maximum dynamic shear modulus of coral sand in a hydraulic fill island-reef[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(1): 205-216. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density: ASTM D4254—14[S]. Annual Book of ASTM Standards, 2006.
- [26] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using A Vibratory Table: ASTM D4253—16 [S]. Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [27] 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.
- [28] LEE K L, ALBAISA A. Earthquake induced settlements in saturated sands[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, **100**(4): 387-406.
- [29] THEVANAYAGAM S, MARTIN G R. Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2002, **22**(9): 1035-1042.
- [30] MOHAMMADI A, QADIMI A. A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(5): 587-606.

第十一次全国岩石力学与工程试验及测试学术交流会 暨第八届岩石力学测试专业委员会换届会议第一号通知 2023 年 11 月 10 日—13 日, 浙江 宁波

第十一次全国岩石力学与工程试验及测试学术交流会暨第八届岩石力学测试专业委员会换届会议, 由中国岩石力学与工程学会岩石力学测试专业委员会、浙江省岩土力学与工程学会及湖北省岩石力学与工程学会联合主办, 宁波大学、长江水利委员会长江科学院等单位联合承办, 将于 2023 年 11 月 10 日—13 日在浙江省宁波市召开。本次会议将邀请我国土木建筑、水利水电、能源矿山、交通市政、设备制造等领域从事岩土工程测试与监测研究、传感器研发的知名专家学者和工程技术人员, 围绕岩石力学特性试验方法、岩土工程多场测试技术、岩土工程隐患探测、岩土工程灾害监测等多个课题开展学术交流。会议将致力于搭建学术交流平台, 展现近年来我国岩土工程界在试验及测试方面的最新研究成果, 促进我国岩土测试技术的推广与进步。谨此, 我们热忱欢迎相关专家、学者及同行参会交流。

会议主题: ①复杂应力条件下岩石力学特性与试验文法; ②岩体应力场、渗流场与温度场测试技术与分析理论; ③岩体工程隐患探测、反演与预报新技术; ④大型岩土工程灾害监测、检测、防治及预警技术; ⑤岩体水力耦合特性测试新技术与新方法; ⑥岩石动力特性测试新技术与新方法; ⑦深部冲击地压、岩爆灾害机理及监测预警技术; ⑧能源地下储存和能源地下结构中的测试与监测技术; ⑨TBM 掘进隧道岩石力学测试分析与评价技术; ⑩岩石力学试验新设备、新技术与新方法; ⑪其

他岩土工程测试新方法及工程应用实践; ⑫岩土与地下工程测试与监测教学。

学术报告及回执: 学术交流包含特邀报告和专题报告, 请作报告的专家于 2023 年 10 月 20 日前将报告题目和回执发送至邮箱 ningbocdf@126.com。

会议注册: 正式代表 2000 元/人, 学生代表及随行人员 1000 元/人, 10 月 20 日之后缴费分别为 2200 元/人, 1200 元/人。注册费可通过银行转账(提倡)或现场缴纳至以下账户: 开户名: 上海诚恩国际旅行社有限公司, 开户银行: 宁波银行股份有限公司上海杨浦支行, 开户账号: 70150122000252355, 转账请注明“姓名+第十一次测试会”。

会议地点: 宁波阳光豪生大酒店(报到处在 A 座一楼大堂), 宁波市海曙区中山西路 1288 号。

联系方式: 岑夺丰 18322349423, ningbocdf@126.com, 浙江省宁波市江北区风华路 818 号宁波大学; 丁长栋 18615289558, geotest2023@126.com, 湖北省武汉市江岸区黄浦大街 289 号长江科学院。

友情提示: 因住房紧张, 请参会代表在 2023 年 10 月 20 日之前发送回执。若计划在本次会议上作学术报告, 请务必在会议回执中注明。11 月 10 日晚上 7:30 召开岩石力学测试专业委员会换届会议, 请各位候选委员提前安排好时间参加会议, 因故不能到会的, 请务必派代表参加。

(浙江省岩土力学与工程学会 供稿)