

DOI: 10.11779/CJGE202003022

初始主应力方向角对饱和珊瑚砂液化特性影响的试验

马维嘉¹, 陈国兴^{1, 2}, 秦悠¹, 吴琪¹

(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: 为探究不同的初始主应力方向角 α_0 条件下南沙岛礁饱和珊瑚砂的液化特性, 对饱和珊瑚砂进行了一系列不排水循环扭剪试验。试验结果表明: ① α_0 对饱和珊瑚砂液化特性的影响显著; $\alpha_0 \neq 45^\circ$ 时的超静孔压 u_e 不会到达初始有效平均主应力 p'_0 ; 但 $\alpha_0 = 45^\circ$ 时 u_e 会达到 p'_0 。② 不同 α_0 条件下试样各应变分量发展形式的差异显著, 但均会产生较大的广义剪应变幅值 γ_{ga} , 且超静孔压比 u_e/p'_0 与 γ_{ga} 之间的相关性可表示为正切函数。③ 以惯用的循环应力比 CSR 作为应力水平指标时, 对于给定的 CSR, 到达液化标准所需的循环次数 N_L 随着 α_0 的增大而减小; 采用本文定义的修正循环应力比 CSR_M 作为应力水平指标时, 不同 α_0 条件下 CSR_M 与 N_L 的关系曲线规准化为一条曲线, 且文献中 3 种饱和砂土的原始试验数据也验证了 CSR_M 的适用性。

关键词: 饱和珊瑚砂; 初始主应力方向角; 超静孔隙水压力; 变形特性; 循环强度; 修正循环应力比

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)03-0592-09

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

Experimental studies on effects of initial major stress direction angles on liquefaction characteristics of saturated coral sand

MA Wei-jia¹, CHEN Guo-xing^{1, 2}, QIN You¹, WU Qi¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to investigate the liquefaction characteristics of saturated coral sand from Nansha Islands under different initial major stress direction angles (α_0), a series of undrained cyclic torsional shear tests for saturated coral sand are carried out by using the GDS hollow cylinder torsional apparatus. A remarkable finding of this study is that, α_0 has significant influence on the liquefaction characteristics of coral sand, the excess pore water pressure (u_e) for case $\alpha_0 \neq 45^\circ$ cannot reach the initial mean principal stress p'_0 , but the u_e for case $\alpha_0 = 45^\circ$ can eventually reach do. The developments of strain components for various α_0 cases are different, but the specimens for all α_0 cases will produce larger general shear strain amplitude (γ_{ga}), and the correlation between the u_e to p'_0 and γ_{ga} can be expressed approximately as tangent function. Based on the experimental data, the number of cycles (N_L) required to induce initial liquefaction decreases with the increasing α_0 for a given cyclic stress ratio (CSR). However, by defining the modified cyclic stress ratio (CSR_M) as a new index for cyclic stress level, a virtually unique relationship between CSR_M and N_L can be established for all α_0 cases. The applicability of CSR_M is verified by the original test data of saturated sands from the literatures.

Key words: saturated coral sand; initial major stress direction angle; excess pore water pressure; deformation characteristic; cyclic resistance; modified cyclic stress ratio

0 引言

珊瑚砂是一种在海洋中形成的特殊土质, 其碳酸钙含量高达 90% 以上。由于珊瑚砂特殊的形成过程, 使其具有棱角度高、强度低、易破碎、形状不规则、存在内孔隙等特点^[1-2]; 与陆源砂相比, 珊瑚砂具有明显不同的动力特性。Hyodo 等^[3]对 Dogs Bay 珊瑚砂和 Toyoura 砂进行了一系列不排水循环三轴对比试验, 发现 Dogs Bay 砂的液化强度通常比 Toyoura 砂的要

高。Mao 等^[4]对澳大利亚西北大陆架近海地区的三种钙质土进行了一系列不排水循环剪切试验, 发现钙质土呈现出循环流动的破坏模式。Sharma 等^[5]对 Goodwyn 和 LedgePoint 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

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678299)

收稿日期: 2019-03-25

*通信作者 (E-mail: gxc6307@163.com)

载时珊瑚砂的体变特性和液化强度的大小。李建国^[6]、虞海珍^[7]对南沙岛礁珊瑚砂进行了不排水循环加载试验, 研究了珊瑚砂在不同应力条件下的应变、孔压等特性。南沙群岛复杂的海洋环境必然会对珊瑚砂的原位固结状态产生显著影响, 且南沙岛礁工程面临着较大的地震风险, 为确保南沙岛礁工程的地震安全, 需对南沙珊瑚砂的液化特性做深入的试验研究。

在影响砂土液化特性的诸多因素中, 较为关注的是初始主应力方向角 α_0 对砂土液化特性的影响。Sato 等^[8]研究了 α_0 对密砂液化特性的影响, 认为 α_0 的影响本质是初始结构的各向异性。付磊等^[9]研究了中主应力系数 $b = 0.25$ 时 α_0 对砂砾料残余超静孔压 u_e 的影响, 结果表明: 随着 α_0 的增大, u_e 的发展水平降低。郭莹等^[10]探讨了 α_0 对福建标准砂液化强度的影响, 发现福建标准砂在扭剪与耦合加载时的液化强度随 α_0 的增大而减小。潘华^[11]对南京细砂进行了一系列复杂固结条件下的轴向-扭转循环耦合剪切试验, 发现饱和和细砂的液化强度随着 α_0 的增大而逐渐降低。目前仅初步涉及南沙岛礁饱和珊瑚砂液化特性的研究, 深入研究 α_0 对珊瑚砂动力特性的影响是必要的。

利用空心圆柱扭剪仪, 本文对南沙群岛饱和珊瑚砂进行了一系列不排水循环扭剪试验, 研究了在 $b = 0.5$ 时 α_0 对饱和珊瑚砂的超静孔压、应变及动强度特性的影响, 探究其液化机理, 提出一种修正初始有效平均主应力 p'_0 的方法, 以期将不同非均等固结应力状态下的动强度曲线进行统一描述。

1 试验设计

1.1 试验仪器

采用南京工业大学购置的空心圆柱扭剪仪(HCA)进行试验, 如图 1 所示。该仪器可同时控制轴力 W 、扭矩 M 、以及内外围压 p_o 、 p_i 的加载, 可实现不同的固结应力状态。所用试样为空心圆柱样: 高 $H = 200\text{ mm}$, 外径 $r_o = 100\text{ mm}$, 内径 $r_i = 60\text{ mm}$ 。

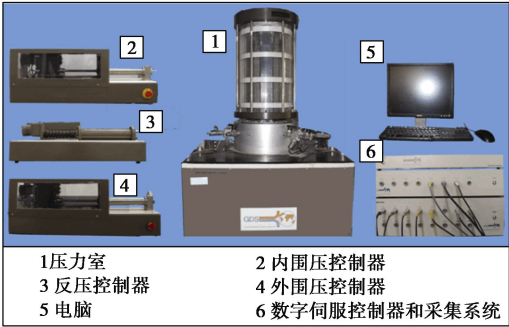


图 1 空心圆柱扭剪仪 (HCA)

Fig. 1 Hollow cylinder torsional apparatus

1.2 试验材料与试样制备

试验所用珊瑚砂取自南沙群岛某岛礁, 珊瑚砂的电镜扫描图片如图 2 所示。可以看出, 珊瑚砂的形状极不规则, 大多呈片状以及次角状, 且表面较为粗糙。试验用珊瑚砂由文石、方解石以及高镁方解石组成, 碳酸钙含量高于 90%。珊瑚砂的级配曲线如图 3 所示, 基本物理性质如表 1 所示。

表 1 珊瑚砂的基本物理性质指标

Table 1 Index properties of coral sand

平均粒径	不均匀系	曲率系	相对密	最大孔隙	最小孔隙
d_{50}	数 C_u	数 C_c	度 G_s	比 e_{\max}	比 e_{\min}
0.31	4.67	0.86	2.80	1.72	0.99

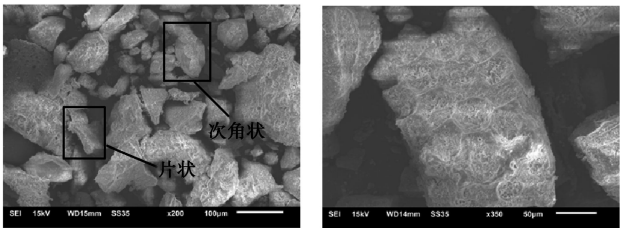


图 2 珊瑚砂颗粒电镜扫描图像

Fig. 2 Electronic microscope scanning graphs of coral sand

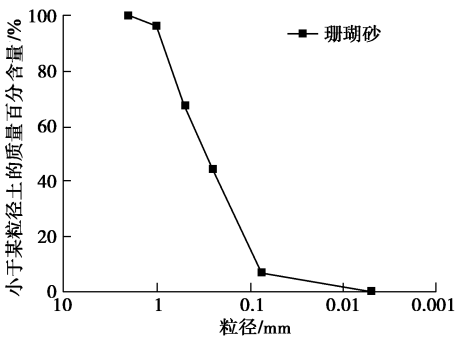


图 3 珊瑚砂级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of coral sand

采用干装法制样, 将烘干的珊瑚砂按照级配对每层所需珊瑚砂进行配比, 均分 5 层倒入空心圆柱模具的承膜筒内, 每层之间进行刮毛处理, 以保证试样的均匀性。装样完成后, 联合使用 CO_2 置换、通入无气水以及分级反压饱和的方法使得试样饱和, 当反压达到 400 kPa 时, 试样的 B 值可达 0.97 以上, 此时可认为试样已饱和。饱和结束后按照所需的固结应力状态进行加载。

1.3 不同初始主应力方向角的实现

空心圆柱试样的受力情况如图 4 所示。Hight 针对空心圆柱试样提出了加载参数与单元体所受应力参数之间的关系^[12]:

$$\sigma'_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p'_o r_o^2 - p'_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)}, \quad (1)$$

$$\sigma_r' = \frac{p_0' r_0 + p_i' r_i}{r_0 + r_i}, \tag{2}$$

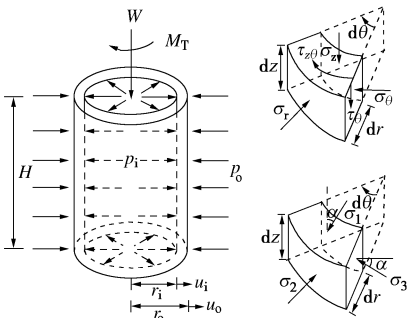
$$\sigma_\theta' = \frac{p_0' r_0 - p_i' r_i}{r_0 - r_i}, \tag{3}$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)}, \tag{4}$$

$$\sigma_1' = (\sigma_z' + \sigma_\theta')/2 + \sqrt{(\sigma_z' - \sigma_\theta')^2/4 + (\tau_{z\theta})^2}, \tag{5}$$

$$\sigma_2' = \sigma_r', \tag{6}$$

$$\sigma_3' = (\sigma_z' + \sigma_\theta')/2 - \sqrt{(\sigma_z' - \sigma_\theta')^2/4 + (\tau_{z\theta})^2}. \tag{7}$$



(a) 空心圆柱试样受阻力 (b) 试样上薄壁单元体应力状态

图 4 空心圆柱试样受力状态

Fig. 4 Hollow cylinder sample under loads

由于空心圆柱扭剪仪可以实现各种复杂固结应力状态的加载，按试验要求控制平均主应力 p 、固结应力比 R 、中主应力系数 b 及初始主应力方向角 α_0 的变化。这 4 个基本参数的定义分别为

$$p' = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3, \tag{8}$$

$$R = \sigma_1'/\sigma_3', \tag{9}$$

$$q = (\sigma_1' - \sigma_3')/2, \tag{10}$$

$$b = (\sigma_2' - \sigma_3')/(\sigma_1' - \sigma_3'), \tag{11}$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z' - \sigma_\theta'} \right). \tag{12}$$

因此，由式 (1) ~ (12) 可计算出为实现不同 α_0 所需的循环加载参数。

2 试验方案

考虑到自然沉积的砂土大多为中密砂；在土体的平面应变问题中， b 值往往接近 0.5，且当 $b = 0.5$ 时，内外压差值较小，试验结果更精确，实验过程易于控制等因素，选取 $D_r = 45\%$ 的珊瑚砂，在初始有效平均主应力 $p_0' = 100$ kPa，固结应力比 $R = 1.5$ ， $b = 0.5$ ，及 $\alpha_0 = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ 和 90° 的条件下进行固结^[13-14]。固结完成后，施加 3 个不同的循环应力比 CSR 进行不排水循环扭剪试验，空心圆柱试样的 CSR 由下式计算可得^[14-15]

$$CSR = q_m/p_0', \tag{13}$$

式中，循环偏应力幅值 $q_m = \sqrt{(\sigma_z' - \sigma_\theta')^2/4 + \tau_{z\theta}^2} |_{\max}$ 。

不同固结条件所施加的外荷载及具体的试验方案如表 2 所示，试验应力路径如图 5 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Summary of test schemes

试验 编号	初始主应力 方向角 α_0	内压 p_i'/kPa	外压 p_o'/kPa	轴向应力 σ_z'/kPa	扭矩 $M/(\text{N}\cdot\text{m})$	CSR
1						0.25
2	0	106.67	96.00	120.00	0	0.30
3						0.35
4						0.25
5	22.5	104.71	97.17	114.14	2.9027	0.30
6						0.35
7						0.25
8	45	100.00	100.00	100	4.1050	0.30
9						0.35
10						0.20
11	67.5	95.29	102.83	85.86	2.9027	0.25
12						0.30
13						0.20
14	90	93.33	104.00	80.00	0	0.25
15						0.30

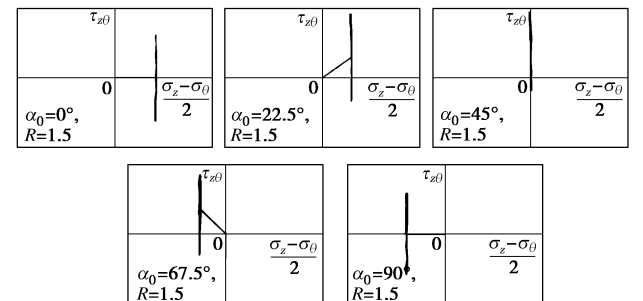


图 5 试验中应力路径示意图

Fig. 5 Diagram of stress paths in tests

3 试验结果与分析

3.1 α_0 对孔压特性的影响

图 6 为不同 α_0 时饱和珊瑚砂的超静孔压 u_e 与循环振次 N 的关系曲线。对不同的 α_0 ， u_e 随着 N 增加而增大的发展形式有所不同的，且 u_e 有较大的震荡现象。当 $\alpha_0 = 0^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ$ 和 90° 时， u_e 无法达到 p_0' 值， u_e 稳定时仅能达到 p_0' 的 85%~95%，循环扭剪过程中试样的有效应力始终大于零；当 $\alpha_0 = 45^\circ$ 时， u_e 可以达到 p_0' 值，某瞬间试样的有效应力为 0。因此， α_0 对试样 u_e 的增长有很大的影响。

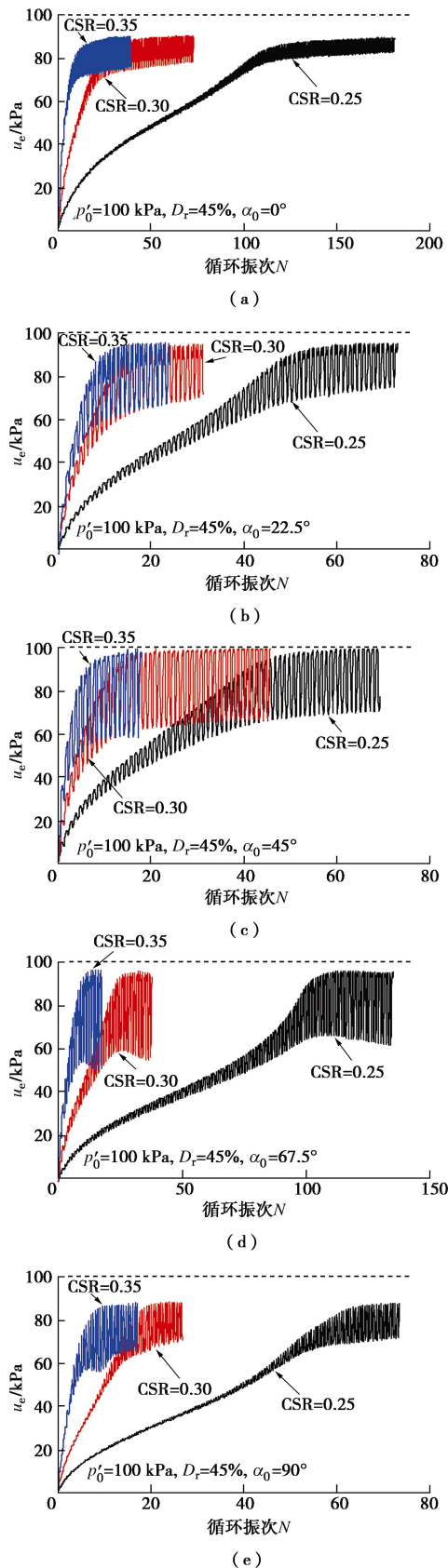
图6 不同 α_0 时饱和珊瑚砂超静孔压的发展

Fig. 6 Development tendency of excess pore water pressure at various α_0 for saturated coral sand

3.2 α_0 对变形特性的影响

图7给出了不同 α_0 时饱和珊瑚砂各应变分量幅值

(轴向应变 ε_z 、环向应变 ε_θ 、径向应变 ε_r 、剪应变 γ)与 N 的关系曲线。 α_0 对各应变分量幅值的发展模式有很大影响:在循环荷载作用下,不同 α_0 的试样均会产生较大的 γ ;在 $\alpha_0 \neq 45^\circ$ 时,由于固结时存在轴向应力,在循环加载时会产生不同水平的 ε_z ; α_0 相同时, ε_θ , ε_r 的发展趋势一致: ε_z 较大时 ε_θ , ε_r 也较大;反之亦然。

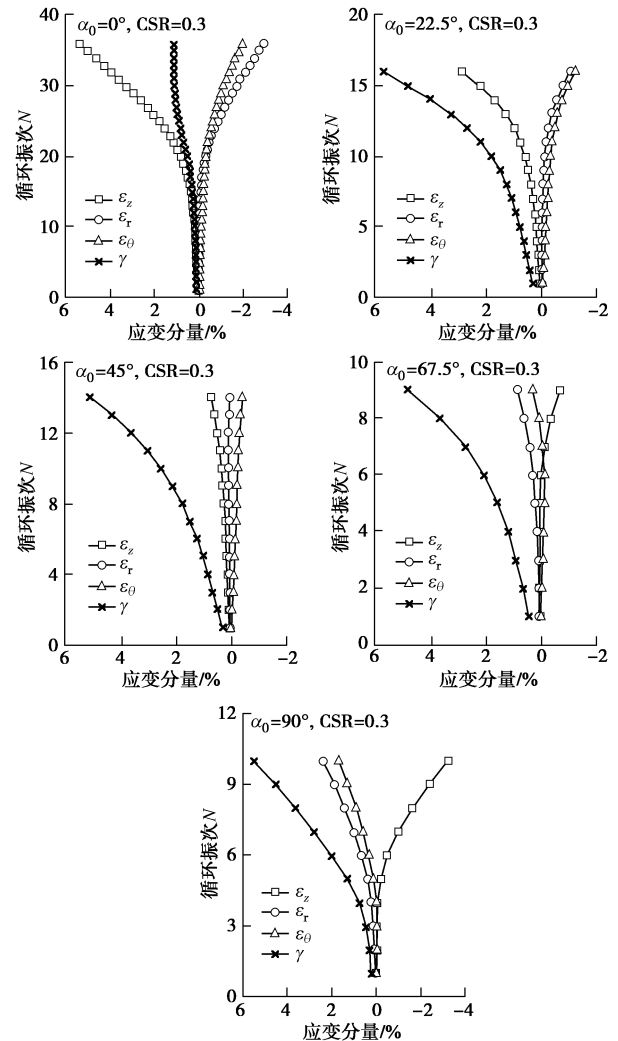
图7 不同 α_0 时饱和珊瑚砂应变分量的发展

Fig. 7 Development tendency of strain components at various α_0 for saturated coral sand

因此,以单一应变分量描述饱和珊瑚砂的变形特性是不合理的,宜采用广义剪应变 γ_g 描述其变形特性。广义剪应变 γ_g 按下式计算^[13, 16]:

$$\gamma_g = \sqrt{2/3} \times \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (14)$$

式中, ε_1 , ε_2 , ε_3 分别为大、中、小主应变。

图8为广义剪应变幅值 γ_{ga} 随 N 增大而增大的发展趋势。可以发现,所有试样最终均会产生较大的 γ_{ga} 。国际上有两种常用的砂土液化判据:①Seed等^[17]提出的有效应力等于零的液化判据;②Casagrande等^[18]提出的应变达到某一水平的液化判据,强调了土的液化

流动特征。由于 $\alpha_0 \neq 45^\circ$ 时试样的 Δu 不能达到 p'_0 , 且工程中的破坏, 归根结底表现为过量的位移及变形, 因此本文采用 $\gamma_{ga}=5\%$ 作为饱和珊瑚砂试样液化的判据^[10, 20-21]。

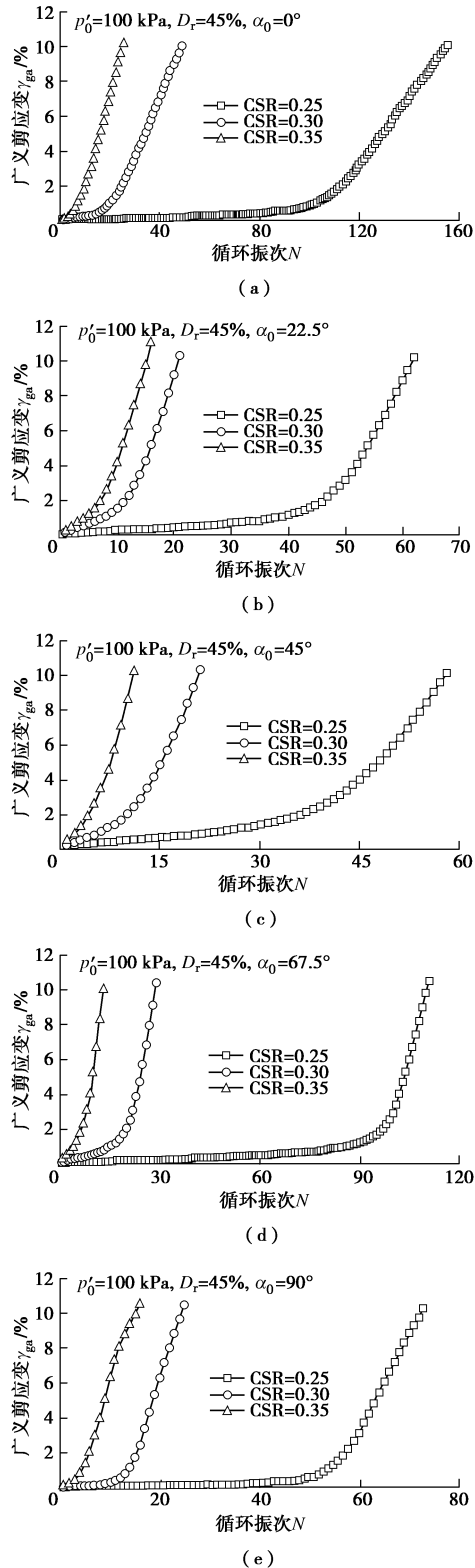


图8 不同 α_0 时饱和珊瑚砂广义剪应变幅值的发展

Fig. 8 Development tendency of generalized shear strain amplitude γ_{ga} at various α_0 for saturated coral sand

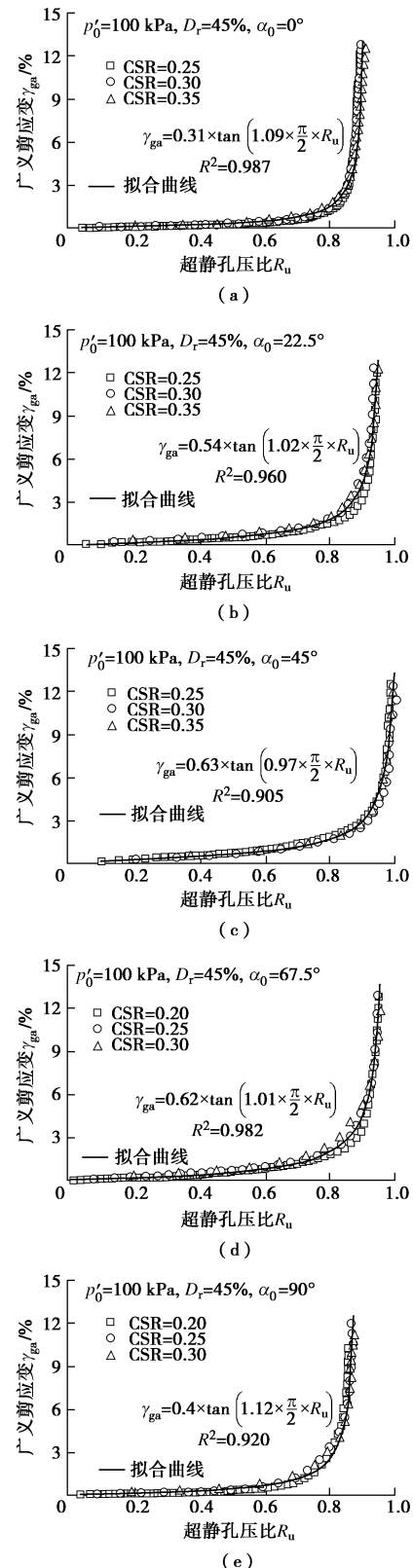


图9 不同 α_0 时饱和珊瑚砂广义剪应变与超静孔压比的关系

Fig. 9 Relationships between amplitudes of generalized shear strains and excess pore water pressure ratios at various α_0 for saturated coral sand

3.3 超静孔压比与广义剪应变的相关性

超静孔压比 R_u 定义为 u_e 与 p'_0 的比值, Chen等^[14]曾提出 γ_{ga} 与 u_e 之间存在唯一性关系, 如式(15)所

示:

$$\gamma_{ga} = a \times \tan(\pi/2 \times R_u) \quad (15)$$

但由于珊瑚砂与一般的陆源无黏性土有着明显的差异, 因此需对式(15)进行如下修正:

$$\gamma_{ga} = a \times \tan(b \times \pi/2 \times R_u) \quad (16)$$

式中, a , b 是与固结状态有关的拟合参数。图9为饱和珊瑚砂 R_u 与 γ_{ga} 的关系曲线。可以看出, 当 α_0 相同时, R_u 与 γ_{ga} 之间存在较强相关性, 且不受应力水平的影响。图10给出了拟合参数 a , b 与 α_0 之间的关系。可以发现, 随着 α_0 的增大, 参数 a 呈现出先增大后减小的趋势, 参数 b 则呈现出先减小后增大的趋势。

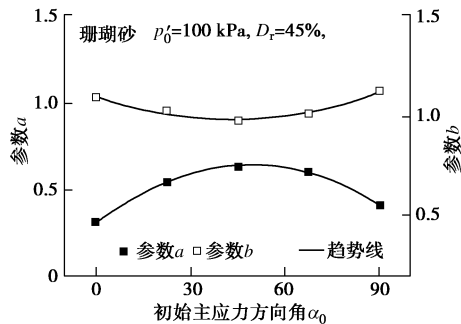


图10 参数 a , b 与 α_0 之间的关系

Fig. 10 Relationships among parameters a , b and α_0

3.4 α_0 对动强度的影响

以 CSR 作为应力水平指标, 图11给出了不同 α_0 条件下施加于饱和珊瑚砂试样的 CSR 与到达液化所需的循环次数 N_L 的关系曲线。可以发现: 不同 α_0 的 CSR - N 曲线随 α_0 的增大而向左下侧移动。

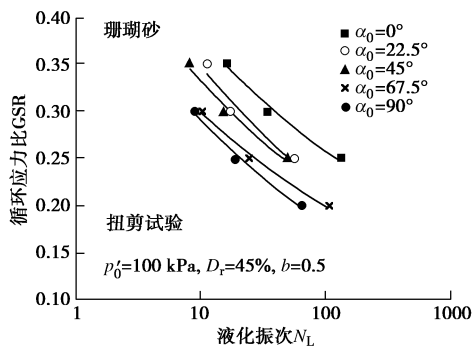


图11 不同 α_0 时饱和珊瑚砂的动强度曲线

Fig. 11 Curves of cyclic resistance at various α_0 for saturated coral sand

由式(1)~(7)可知, α_0 的大小与固结后的 σ'_1 , σ'_3 有关, 而与固结后的 σ'_2 无关。因此, 需进一步研究 σ'_1 , σ'_3 所在平面的应力状态。以 σ'_1 , σ'_3 所在平面的有效主正应力 σ'_{13} 以及主剪应力 τ_{13} 作为衡量土单元所受应力大小的参量, 二者表达式如下^[19]:

$$\sigma'_{13} = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 \quad (17)$$

$$\tau_{13} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 \quad (18)$$

式(17), (18)虽对 σ'_1 , σ'_3 所在平面的应力状态进行

了描述, 但仍未消除其他平面上应力的影响。由式(2), (6)可知, $\sigma'_2 = \sigma'_r$, 而 σ'_r 的大小仅与内、外压 p'_0 , p'_i 有关。为了消除不同 σ'_2 的影响, 须设定 $p'_0 = p'_i = p'_0$, 此时 σ'_2 恒等于 p'_0 。因此, 对 p'_0 相同的不同固结状态, 将施加的 W , M 及设定条件 $p'_0 = p'_i = p'_0$ 代入式(1)~(7), 可得消除 σ'_2 影响的土单元大、小主应力 $\sigma'_{1(0)}$ 和 $\sigma'_{3(0)}$, 此时, 式(17), (18)中的 σ'_{13} , τ_{13} 退化为 $\sigma'_{13(0)}$, $\tau_{13(0)}$:

$$\sigma'_{13(0)} = (\sigma'_{1(0)} + \sigma'_{3(0)})/2 \quad (19)$$

$$\tau_{13(0)} = (\sigma'_{1(0)} - \sigma'_{3(0)})/2 \quad (20)$$

则 p'_0 与设定条件的等效平均有效主应力 p'_{0M} 的关系可表示为

$$p'_{0M} = \beta_1 \times \beta_2 \times p'_0 \quad (21)$$

$$\beta_1 = (\sigma'_{13(0)} / p'_a)^m \quad (22)$$

$$\beta_2 = \sqrt{1 - \tau_{13(0)} / \sigma'_{13(0)}} \quad (23)$$

式中, p'_a 为基准值, 等于均等固结条件下初始平均有效主应力为 p'_0 的 $\sigma'_{13(0)}$ 值, 则易得 $p'_a = p'_0$; m 为与土的物理性质有关的参数。 β_1 , β_2 分别表征有效大小主应力 σ'_1 , σ'_3 之和及其之差对土单元的作用。以 p'_{0M} 代替 p'_0 , 修正循环应力比 CSR_M 可定义:

$$CSR_M = q_m / p'_{0M} \quad (24)$$

须指出, 以上对大小主应力的设定仅为假设, 其目的是修正 p'_0 , 并未改变表2给出的试验加载条件, 不影响试验测试的原始数据。对图11中 CSR 与 N_L 关系曲线的数据进行重新处理, 可给出 CSR_M 与 N_L 之间的关系曲线, 如图12所示, 相应的参数值见表3。可以发现: 取 $m = 0.77$ 时可将不同 α_0 的 CSR_M 与 N_L 的关系曲线规准化为一条曲线。

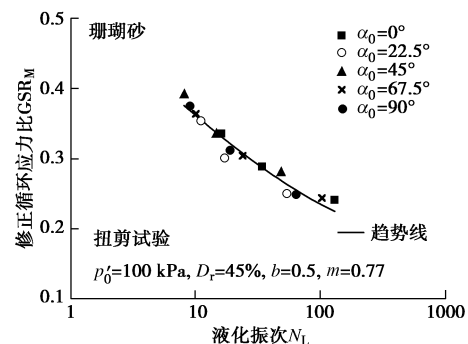


图12 不同 α_0 时 N_L 与 CSR_M 之间的关系

Fig. 12 Relationships between CSR_M and N_L at various α_0 for saturated coral sand

将南京细砂^[11]、南沙岛礁珊瑚砂^[20]和福建砂^[10]的试验结果分别以 CSR 和 CSR_M 作为应力水平指标, 其结果如图13所示, 相应的参数值见表3。可以发现, 不同 α_0 的3种砂土的 CSR 与 N_L 的关系曲线均规准化为单一的 CSR_M 与 N_L 关系曲线。可见, 指数 m 是与土的物理性质有关的参数。

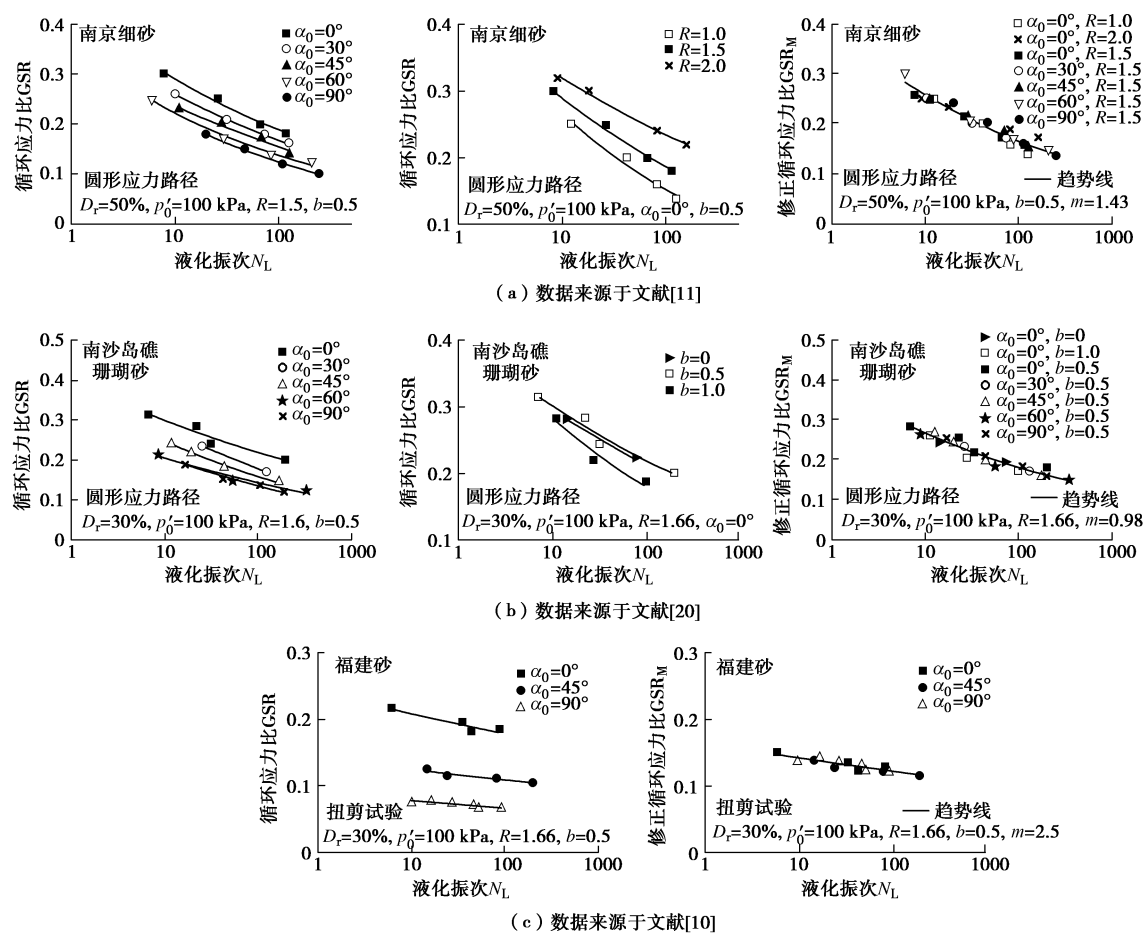


图 13 3 种砂土的 CSR、CSR_M与 N_L 之间的关系

Fig. 13 CSR and CSR_M of three sands vs. N_L

表 3 4 种砂土在不同固结状态下 σ'_{i(0)}, σ'₃₍₀₎, β₁, β₂ 的取值

Table 3 Values of σ'_{i(0)}, σ'₃₍₀₎, β₁ and β₂ under different consolidation conditions for four sands

土类 (平均大主应力)	<i>m</i>	α ₀ /(°)	<i>R</i>	<i>b</i>	σ' _{i(0)} /kPa	σ' ₃₍₀₎ /kPa	β ₁	β ₂
南沙岛礁 珊瑚砂 (本文) (<i>p</i> ' ₀ = 100 kPa)	0.77	0	1.5	0.5	130.00	100.00	1.11	0.93
		22.5			128.28	92.93	1.08	0.92
		45			120.00	80.00	1.00	0.89
		67.5			107.07	71.72	0.92	0.90
		90			100.00	70.00	0.88	0.91
南京细砂 ^[10] (<i>p</i> ' ₀ = 100 kPa)	1.42	—	1.0	—	100.00	100.00	1.00	1.00
		0	2.0	0.5	150.00	100.00	1.37	0.89
		0	1.5	0.5	130.00	100.00	1.22	0.93
		30	1.5	0.5	126.37	88.63	1.11	0.91
		45	1.5	0.5	120.00	80.00	1.00	0.89
		60	1.5	0.5	111.37	73.63	0.90	0.89
南沙岛礁 珊瑚砂 ^[20] (<i>p</i> ' ₀ = 100 kPa)	0.98	90	1.5	0.5	100.00	70.00	0.79	0.91
		0	1.66	0.5	137.22	100.00	1.18	0.92
		30	1.66	0.5	132.72	85.89	1.09	0.89
		45	1.66	0.5	124.81	75.19	1.00	0.87
		60	1.66	0.5	114.11	67.28	0.91	0.86
		90	1.66	0.5	100.00	62.78	0.82	0.88
福建砂 ^[10] (<i>p</i> ' ₀ = 100 kPa)	2.49	0	1.66	0	154.10	100.00	1.26	0.89
		0	1.66	1.0	122.92	100.00	1.11	0.95
		0	1.66	0.5	137.22	100.00	1.53	0.92
		45	1.66	0.5	124.81	75.19	1.00	0.87
		90	1.66	0.5	100.00	62.78	0.60	0.88

4 结 论

针对南沙岛礁饱和珊瑚砂进行了一系列不排水循环扭剪试验, 探究了初始大主应力方向角 α_0 对饱和珊瑚砂液化特性的影响, 主要结论如下:

(1) 饱和珊瑚砂的超静孔压 u_e 随循环振次 N 的增大而升高, $\alpha_0 \neq 45^\circ$ 时, u_e 趋于稳定时无法达到 p'_0 , 也即, 非均等固结时在循环加载过程中饱和珊瑚砂的强度不会完全丧失; 当 $\alpha_0 = 45^\circ$ 时, u_e 在某些瞬间可达到 p'_0 。相同 α_0 的超静孔压比 R_u 与广义剪应变幅值 γ_{ga} 的关系可用正切函数表示。

(2) 不同固结条件下饱和珊瑚砂各应变分量的发展具有较大的差异。 γ_{ga} 是一个综合反映各应变分量发展的物理指标, 可取 $\gamma_{ga} = 5\%$ 作为复杂固结条件下饱和珊瑚砂的液化判据。

(3) 以惯用的循环应力比 CSR 作为应力水平指标时, 发现施加于饱和珊瑚砂试样的 CSR 与到达液化标准所需的循环次数 N_L 的关系曲线随着 α_0 的增加而向左下侧移动; 采用修正循环应力比 CSR_M 作为应力水平指标时, 不同 α_0 条件下的 CSR_M 与 N_L 的关系曲线规准化为一条曲线; 引自文献的3种砂土的试验数据也验证了应力指标 CSR_M 的普适性。

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] HYODO M, HYDE A F L, ARAMAKI N. Liquefaction of crushable soils[J]. Géotechnique, 1998, **48**(4): 527 - 543.
- [4] MAO X, FAHEY M. Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear[J]. Géotechnique, 2003, **53**(8): 715 - 727.
- [5] 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.
- [6] 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 China Academy of Sciences, 2005. (in Chinese))
- [7] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. (YU Hai-zhen. Experimental Research on Dynamic Behavior of Saturated Calcareous Sand Under Complex Stress Conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese))
- [8] SATO K, YASUHARA K, YOSHIDA N. Effect of pre-shearing with drainage on undrained cyclic shear behaviour of dense sand[C]// Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. France, 1999: 542 - 547.
- [9] 付 磊, 王洪瑾, 周景星, 等. 主应力偏转角对砂砾料动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(4): 435 - 440. (FU Lei, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing, et al. Effect of initial rotation angle of principal stress on the dynamic properties of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(4): 435 - 440. (in Chinese))
- [10] 郭 莹, 栾茂田, 许成顺, 等. 主应力方向变化对松砂不排水动强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 666 - 670. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, XU Chen-shun, et al. Effect of variation of principal stress orientation on undrained dynamic strength behavior of loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 666 - 670. (in Chinese))
- [11] 潘 华. 复杂应力条件下饱和南京细砂动力特性试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2011. (PAN Hua. Experimental Research on Dynamic Behavior of Saturated Nanjing Fine Sand under Complex Stress Conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. Géotechnique, 2007, **57**(4):

- 371 - 384.
- [14] 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*, in press.
- [15] ISHIHARA K, YAMAZAKI A. Analysis wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. *Soils and Foundations*, 1984, **24**(3): 85 - 100.
- [16] HUANG B, CHEN X, ZHAO Y. A new index for evaluating liquefaction resistance of soil under combined cyclic shear stresses[J]. *Engineering Geology*, 2015, **199**: 125 - 139.
- [17] SEED H B, IDRISS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, **109**(3): 458 - 482.
- [18] CASAGRANDE A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fill[J]. *Journal of Boston Society of Civil Engineering*, 1936: 257 - 276.
- [19] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(2): 1 - 10. (YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [20] 李建国, 汪 稔, 虞海珍, 等. 初始主应力方向对钙质砂动力特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(5): 723 - 727. (LI Jian-guo, WANG Ren, YU Hai-zhen, et al. Experimental research on effect of initial principal stress orientation on dynamic properties of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(5): 723 - 727. (in Chinese))
- [21] 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*, in press.
-

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司