

DOI:10.12170/20181210001

侯贺营, 曹永勇, 张绍栋, 等. 密度及应力水平对珊瑚砂强度变形特性影响 [J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 92-97. (HOU Heying, CAO Yongyong, ZHANG Shaodong, et al. Analysis of strength-deformation behavior of coral sand with different densities and stress levels[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 92-97. (in Chinese))

# 密度及应力水平对珊瑚砂强度变形特性影响

侯贺营<sup>1</sup>, 曹永勇<sup>1</sup>, 张绍栋<sup>2</sup>, 关云飞<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088)

**摘要:** 为研究密度与应力水平对珊瑚砂强度和变形特性的影响, 利用三轴仪, 对珊瑚砂试样开展了一系列不同密度、不同应力水平条件下的三轴固结排水剪试验。根据试验结果分析了珊瑚砂密度和应力水平对其应力应变、体积变形特性及强度特性等的影响。结果表明, 不同相对密度的试样均表现出剪胀特性, 同一初始密度的试样, 围压越大其剪胀现象越不显著。珊瑚砂初始切线模量随着围压和相对密度的增大而增大, 可近似用直线表示, 并建立了初始切线模量与相对密度和围压的关系式。相变点应变随围压的增大而增大, 随相对密度的增大而减小。珊瑚砂强度指标  $\varphi_0$  和  $\Delta\varphi$  随着相对密度的增大而呈线性增大趋势。

**关键词:** 珊瑚砂; 密度; 应力变形; 三轴试验; 围压

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)01-0092-06

珊瑚砂作为一种主要地基土, 开始受到广泛关注。大量研究表明, 密度和应力水平对砂土的应力变形特性影响显著<sup>[1-2]</sup>。王新志等<sup>[3]</sup>通过室内载荷试验研究了南海钙质砂在不同密实度下的承载力及变形特性, 发现在相同密实度下, 钙质砂承载力和变形模量明显高于石英砂, 同时指出钙质砂承载力随相对密实度的增加而增大, 破坏时的变形量显著减小。王丽等<sup>[4]</sup>对取自南海永暑礁的钙质砂进行不同密实度下的三轴固结排水剪切试验, 发现钙质砂的物理力学性质较陆源砂存在较大差异, 具体表现在钙质砂内摩擦角高达  $48^\circ$ , 远大于一般陆源砂的  $35^\circ$ ; 低围压下钙质砂表现出剪胀特性, 但当围压增至 200 kPa 时, 钙质砂剪胀性逐渐消失, 其应力应变曲线应变软化趋势逐渐减小。然而上述研究多集中在定性描述, 从定量角度分析钙质砂密度及应力水平对其强度变形特性的研究相对较少。

姜璐等<sup>[5]</sup>通过钙质砂压缩试验和直剪试验, 采用数据拟合的方法获得了含水率、密实度与剪切强度三者间的关系式, 但并未考虑应力水平对剪切强度的影响。杨佳等<sup>[6]</sup>采用轻型击实试验和直剪试验, 建立了不同含水率下钙质砂抗剪强度与干密度间的数学关系式, 但这一研究同样未考虑应力水平的影响。Impe 等<sup>[7]</sup>通过对珊瑚砂地区海洋扩建过程中的设计和施工数据进行分析, 建立了考虑小应变剪切模量  $G_0$ 、孔隙比  $e$  和应力水平三者变化的圆锥抗力  $q_c$  与相对密度  $D_r$  数学模型, 但这一模型不能对现场土体特性做出合理预测。另一些学者, 如黄宏翔等<sup>[8]</sup>, 利用环剪试验研究了钙质砂抗剪强度特性。

鉴于此, 本文对不同相对密度的珊瑚砂进行了常规三轴固结排水剪切试验。根据试验结果分析了珊瑚砂密度对其应力应变、体积变形特性及强度特性等的影响, 并建立了初始切线模量与围压和相对密度的关系式, 以及强度参数与相对密度之间的关系式。

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879167); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151071); 中央级非营利性科研院所基金创新团队项目(Y317011); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y318009; Y318010)

作者简介: 侯贺营(1988—), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事土与结构相互作用等研究。

E-mail: houheyings1206@163.com 通信作者: 关云飞(E-mail: yfguan@nhri.cn)

### 1 珊瑚砂试验方案

试验仪器为全自动三轴仪, 该设备主要技术参数: 最大围压 3 MPa, 最大轴向荷载 10 kN, 最大垂直变形 10 cm。由于试样尺寸较小, 考虑到尺寸效应对试验结果的影响且大于 2 mm 的颗粒含量很少, 故对珊瑚砂样进行了筛分, 去除掉粒径大于 2 mm 的部分。处理后试样的级配曲线如图 1 所示, 其颗粒密度为 2.78 g/cm<sup>3</sup>, 最小孔隙比 0.917, 最大孔隙比 1.242。

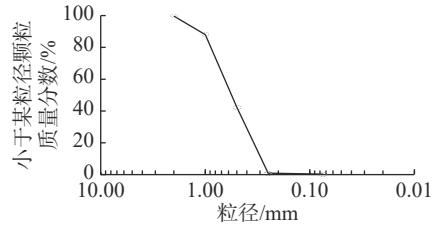


图 1 珊瑚砂粒径分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of particles of coral sand

试验选取 0.65, 0.85 和 0.95 共 3 种相对密度, 对每种密度的试样分别在 100, 200, 300 和 400 kPa 围压作用下进行常规三轴固结排水剪切试验, 共进行 12 组试验。试样尺寸为  $\varnothing 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , 依据《土工试验方法标准》<sup>[9]</sup> 进行, 试样采用抽气饱和方式进行处理, 剪切速率为 0.04 mm/min, 本次试验以轴向应变 25% 为控制试验停止的标准。

### 2 密度对应力应变的影响

#### 2.1 密度对应力的影响

图 2(a) 为初始相对密度  $D_r=0.65$  的试样在 4 种不同围压下的偏应力和轴向应变试验结果。由图 2(a) 可知, 4 组试验的应力应变曲线均表现为应变软化: 随着轴向应变增加, 剪应力不断增加, 达到某一峰值后开始减小, 最后趋于稳定。对于同样初始密度, 围压越大其软化现象越不显著; 围压越小, 应变软化越明显。图 2(b) 和 (c) 分别是初始相对密度为 0.85 和 0.95 的试样在 4 种围压下的三轴排水剪切试验结果。对比图 2(a) 可以发现, 所有试样的变形规律基本一致, 只是每个试验应变软化的程度不同。

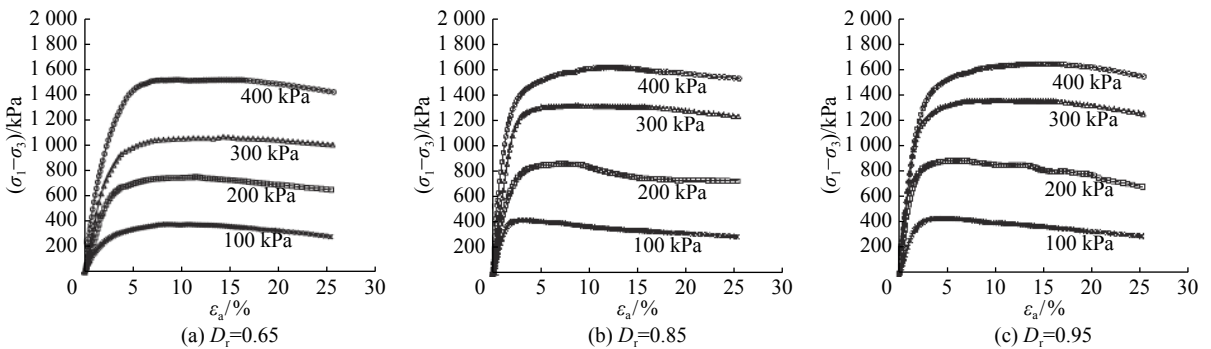


图 2 偏应力与轴向应变关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of deviatoric stress versus axial strain

将某一围压下偏应力达到最大值所对应的轴向应变称为破坏应变。图 3 给出了破坏应变与围压的关系曲线。由图 3 可知, 以相对密度为 0.65 的试样为例, 围压由 100 kPa 增大至 400 kPa 过程中, 破坏应变由 8.35% 增大至 15.62%。随着围压增大, 破坏应变逐渐增大。

#### 2.2 密度对变形的影响

图 4(a) 为初始相对密度  $D_r=0.65$  的试样在 4 种

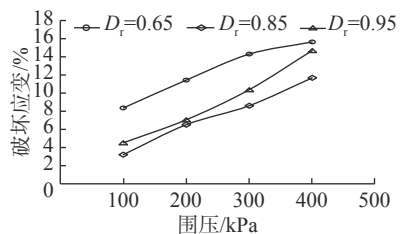


图 3 破坏应变与围压关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of failure strain versus confining pressure

不同围压下的体积应变与轴向应变试验结果。由图 4(a)可知,对于 4 组试样均表现出剪胀特性:随着轴向应变增加,体积先缩小,后膨胀,最后趋于稳定。对于同样的初始密度,围压越大其剪胀现象越不显著,围压越小,应变剪胀越明显。图 4(b)和(c)分别是初始相对密度为 0.85 和 0.95 的试样在 4 种围压下体积应变与轴向应变试验结果。对比图 4(a)可以发现,所有试样变形规律基本一致,只是每个试样的剪胀程度不同。通过对比分析可知,对于同样围压,相对密度越高,剪胀越明显。

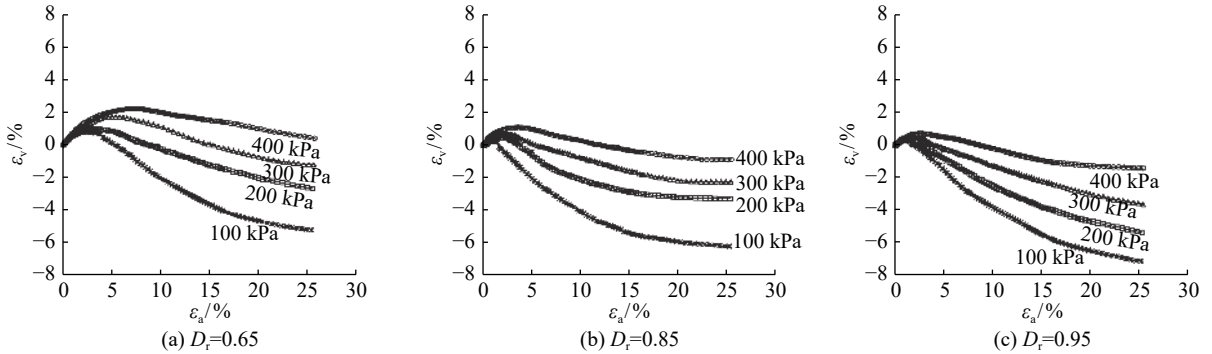


图 4 体积应变与轴向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of volumetric strain versus axial strain

将试样由剪缩转为剪胀时对应的应力应变称为相变点。试样相变点对应的轴向应变称为相变点应变,用  $\varepsilon_{vp}$  表示。图 5 是不同围压下  $\varepsilon_{vp}$  与  $D_r$  的关系曲线。由图 5 可知,二者可近似用直线表示。当围压一定时,相变点应变  $\varepsilon_{vp}$  随相对密度的增大而减小。当围压为 200 kPa 时,相对密度为 0.65 的试样的相变点应变为 3.24%,相对密度为 0.95 的试样的相变点应变为 1.13%,相当于  $D_r$  每增加 0.1,  $\varepsilon_{vp}$  减小 0.70%;当围压为 400 kPa 时,相对密度为 0.65 的试样的相变点应变为 7.17%,相对密度为 0.95 的试样的相变点应变为 2.47%,相当于  $D_r$  每增加 0.1,  $\varepsilon_{vp}$  减小 1.57%。由此可知,试样的围压越大,  $\varepsilon_{vp}$  减小得越快。将围压  $\sigma_c$  除以标准大气压  $p_a$  ( $p_a$  取 101 kPa) 转化成无量纲参数。文中绘制了不同初始相对密度下相变点应变  $\varepsilon_{vp}$  与  $\sigma_c/p_a$  的关系曲线,见图 6。在同一初始相对密度下,  $\varepsilon_{vp}$  随围压增大而增大,二者可近似用直线表示。

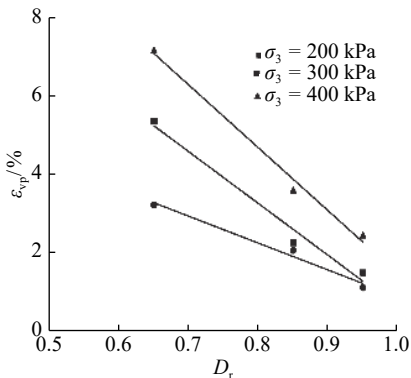


图 5 相变点应变与相对密度关系曲线

Fig. 5 Curves of phase transition strain versus confining pressure

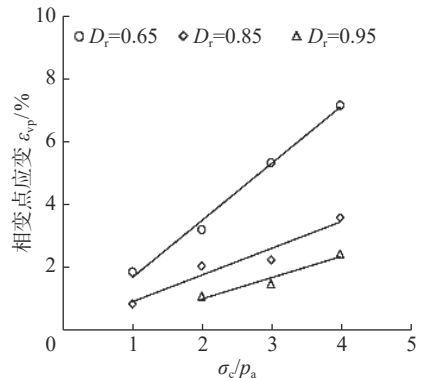


图 6 相变点应变与  $\sigma_c/p_a$  关系曲线

Fig. 6 Curves of phase transition strain versus  $\sigma_c/p_a$

### 3 密度对初始切线模量的影响

Duncan-Chang 模型<sup>[10]</sup>的切线模量  $E_t$  表达式为:

$$E_t = \left( 1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_c)(1 - \sin \varphi)}{2\sigma_c \sin \varphi + 2c \cos \varphi} \right)^2 \cdot E_i \quad (1)$$

式中:  $(\sigma_1 - \sigma_c)$  为偏应力;  $R_f$  为破坏比;  $E_i$  为初始切线模量;  $c$  和  $\varphi$  分别为土体黏聚力和内摩擦角。

初始切线模量  $E_i$  可以表征材料应力-应变曲线的形态, 反映材料的变形特性。先将初始切线模量和围压同时除以  $p_a$ , 转换为无量纲量。文中分析了不同相对密度下无量纲化的初始切线模量与围压的关系, 如图 7 所示。由图 7 可知, 对于同一相对密度的试样, 珊瑚砂初始切线模量随围压增大而增大, 二者可近似用直线表示, 3 条直线的斜率相差不大, 可近似认为 3 条直线平行, 但截距都不同。在同一相对密度下, 初始切线模量与围压  $\sigma_c$  的关系可用下式表示:

$$E_i/p_a = \alpha_1(\sigma_c/p_a) + \beta_1 \tag{2}$$

式中:  $\alpha_1, \beta_1$  为材料参数。

图 8 是不同相对密度下  $E_i/p_a$  与相对密度的关系。由图 8 可知, 对于同一围压下的试样, 珊瑚砂初始切线模量随相对密度增大而增大, 二者可近似用直线表示, 4 条直线的斜率相差不大, 可近似认为 4 条直线平行, 但截距都不同。在同一围压下, 初始切线模量与相对密度的关系可用下式表示:

$$E_i/p_a = \alpha_2 D_r + \beta_2 \tag{3}$$

式中:  $\alpha_2, \beta_2$  为材料参数。

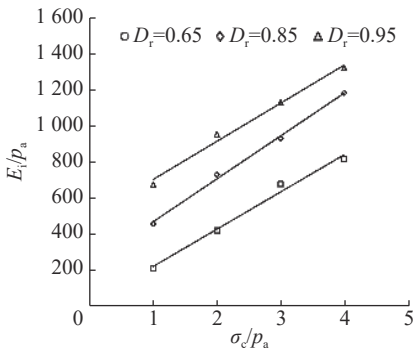


图 7  $E_i/p_a$  与  $\sigma_c/p_a$  的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of  $E_i/p_a$  and  $\sigma_c/p_a$

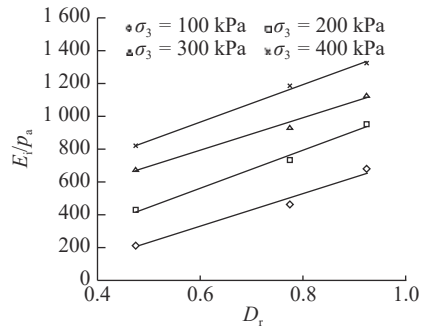


图 8 初始切线模量与相对密度关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of initial tangent modulus and relative densities

通过对初始切线模量  $E_i$  与相对密度  $D_r$  和围压  $\sigma_c$  进行线性回归分析可得:

$$E_i/p_a = \alpha D_r + \beta(\sigma_c/p_a) + \lambda \tag{4}$$

式中:  $\alpha, \beta, \lambda$  为材料参数。对于本文研究的珊瑚砂,  $\alpha=1\ 602, \beta=219.8, \lambda=-1\ 059$ 。

#### 4 密度对抗剪强度指标的影响

为了分析密度对珊瑚砂强度特性的影响, 整理了不同围压下试样破坏时的应力比  $(\sigma_1 - \sigma_c)/\sigma_c$  与试样相对密度的关系, 如图 9 所示。以围压 400 kPa 为例, 当相对密度为 0.65 时, 破坏应力比为 3.78; 当相对密度为 0.95 时, 破坏应力比为 4.12。可知, 随着相对密度增大, 试样破坏时的应力比逐渐增大。

对于式(1)中的  $\varphi$  可用式(5)<sup>[11-12]</sup> 表示:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_c/p_a) \tag{5}$$

式中:  $\sigma_c$  为围压;  $\varphi_0$  为 1 标准大气压时的  $\varphi$  角;  $\Delta\varphi$  是围压增加 10 倍后  $\varphi$  角的减少量。

按式(5)计算结果表明, 珊瑚砂相对密度由 0.65 增大到 0.95 的过程中, 其  $\varphi_0$  由  $40.80^\circ$  增大到  $43.71^\circ$ ,  $\Delta\varphi$  由  $0.68^\circ$  增大到  $1.12^\circ$ 。

图10绘制了 $\varphi_0$ 和 $\Delta\varphi$ 与相对密度 $D_r$ 关系曲线。可见, $\varphi_0$ 和 $\Delta\varphi$ 与 $D_r$ 的关系可近似用线性关系表示,其随着 $D_r$ 的增大而逐渐增大,可用直线进行拟合,即:

$$\varphi_0 = a_1 D_r + b_1 \quad (6)$$

$$\Delta\varphi = a_2 D_r + b_2 \quad (7)$$

式中: $a_1, b_1, a_2, b_2$ 为材料参数。对于本文研究的珊瑚砂, $a_1=9.986, b_1=34.395, a_2=1.343, b_2=-0.23$ 。这就说明,相对密度 $D_r$ 对珊瑚砂试样的强度指标有一定影响。

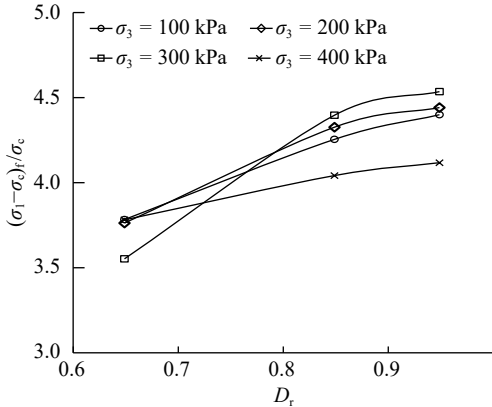


图9  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_c$ 与 $D_r$ 的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_c$  and  $D_r$

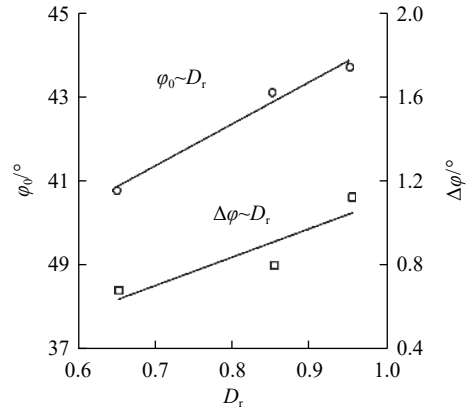


图10 强度指标与相对密度关系

Fig. 10 Curve of strength indexes and relative densities

## 5 结 语

对珊瑚砂试样开展了不同相对密度和不同应力水平下的三轴固结排水剪切试验,研究了密度对其变形和强度特性的影响,主要结论如下:

(1)对于不同相对密度的试样均表现出剪胀特性。对于同样的初始密度,围压越大其剪胀现象越不显著,围压越小,应变剪胀越明显。

(2)珊瑚砂初始切线模量随围压和相对密度的增大而增大,可近似用直线表示;相变点应变随围压增大而增大,随相对密度增大而减小。文中建立了初始切线模量与相对密度和围压的关系式。

(3)珊瑚砂强度指标 $\varphi_0$ 和 $\Delta\varphi$ 随相对密度增大而呈线性增大趋势。

## 参 考 文 献:

- [1] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. *Géotechnique*, 2000, 50(4): 449-460.
- [2] 蔡正银, 李相菘. 砂土的剪胀理论及其本构模型的发展[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(8): 1122-1128. (CAI Zhengyin, LI Xiangsong. Development of dilatancy theory and constitutive model of sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1122-1128. (in Chinese))
- [3] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 147-151, 156. (WANG Xinzhì, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Study of plate load test of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 147-151, 156. (in Chinese))
- [4] 王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. *实验力学*, 2009, 24(2): 133-143. (WANG Li, LU Xiaobing, WANG Shuyun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(2): 133-143. (in Chinese))

- [5] JIANG L, FAN J H, WANG Z J, et al. Mechanical property of calcareous sand under action of compaction[J]. *Global Geology*, 2015, 18(3): 183-187.
- [6] 杨佳, 范建华, 汪正金. 钙质砂的抗剪强度与干密度的拟合研究[J]. *中国水运*, 2015, 15(8): 341-342. (YANG Jia, FAN Jianhua, WANG Zhengjin. Fitting research on shear strength and dry density of calcareous sand[J]. *China Water Transport*, 2015, 15(8): 341-342. (in Chinese))
- [7] VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, MANZOTTI A, et al. Compaction control and related stress-strain behaviour of off-shore land reclamations with calcareous sands[J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(6): 1474-1486.
- [8] 黄宏翔, 陈育民, 王建平, 等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 2082-2088. (HUANG Hongxiang, CHEN Yumin, WANG Jianping, et al. Ring shear tests on shear strength of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 2082-2088. (in Chinese))
- [9] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准[2007版]: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [10] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [11] 徐远杰, 王观琪, 李健, 等. 在ABAQUS中开发实现Duncan-Chang本构模型[J]. *岩土力学*, 2004, 25(7): 1032-1036. (XU Yuanjie, WANG Guanqi, LI Jian, et al. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in ABAQUS[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(7): 1032-1036. (in Chinese))
- [12] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2000. (in Chinese))

## Analysis of strength-deformation behavior of coral sand with different densities and stress levels

HOU Heying<sup>1</sup>, CAO Yongyong<sup>1</sup>, ZHANG Shaodong<sup>2</sup>, GUAN Yunfei<sup>1</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Beijing Urban Construction Group Company Limited, Beijing 100088, China*)

**Abstract:** In order to study the influences of density and stress level on the strength and deformation characteristics of the coral sand, a series of triaxial consolidation drained shear tests with different densities and stress levels are carried out using a triaxial apparatus. Based on the experimental study results, the effects of the density and stress level of the coral sand on its stress-strain, volume deformation characteristics and strength characteristics are analyzed. The analysis results show that the specimens with different relative densities all have the dilatancy characteristics, while for the specimens with same initial density, the larger the confining pressure, the less obvious the dilatancy. The initial tangential modulus of the coral sand increases with the increase of the confining pressure and relative density, which can be approximately expressed by a straight line. The relationships between the initial tangent modulus, relative density and confining pressure are established in this paper. The strain at the phase transition point increases with the increase of the confining pressure and decreases with the increase of the relative density. The strength indexes of the coral sand increase linearly with the increase of the relative density, and the relationships between them are established.

**Key words:** coral sand; density; stress and deformation; triaxial test; confining pressure