

文章编号:1005-9865(2022)05-0147-11

北部湾地区不同相对密度的海砂力学特性分析

王家全,祝梦柯,唐 毅,黄世斌

(广西科技大学 土木建筑工程学院,广西 柳州 545006)

摘 要:为探究相对密度和有效围压对饱和海砂力学特性的影响,利用 GDS 动态三轴试验仪,对广西北部湾地区海砂开展了一系列固结排水三轴剪切试验,分析了相对密度、有效围压对饱和海砂强度特征、体变特征、割线模量以及摩擦角的影响规律。结果表明:随着围压的减小或相对密度的增大,试样体积应变不断增大,而相对密度或有效围压的增加均会提高试样的峰值强度,有效围压与峰值强度之间呈现良好的线性增长关系。随着围压的减小或相对密度的增大,应力相对软化系数、剪胀系数均不断增大,且有效围压与应力相对软化系数、剪胀系数分别呈线性和半对数线性相关。割线模量随轴向应变的增加整体呈衰减趋势,各试验工况下轴向应变为 5% 时试样的割线模量相比于轴向应变 0.164% 衰减了 80%~90%。饱和海砂的峰值摩擦角随相对密度的增加而增大,随有效围压的增大而减小,相对密度 D_r 为 50% 时有效围压 σ_c 为 50 kPa 对应的峰值摩擦角是 σ_c 为 200 kPa 的 1.098 倍。

关键词:海砂;三轴剪切试验;相对密度;有效围压;北部湾;软化系数;强度特征;体变特征

中图分类号:P744.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.05.016

Analysis of mechanical properties of sea sand with different relative densities in the Beibu Gulf

WANG Jiaquan, ZHU Mengke, TANG Yi, HUANG Shibin

(College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to explore the influence of relative density and effective confining pressure on the mechanical properties of saturated sea sand, a series of consolidated drainage triaxial shear tests were carried out on sea sand in the Beibu Gulf region of Guangxi using the GDS dynamic triaxial equipment, and the relative density was analyzed. The influence of temperature and effective confining pressure on the strength characteristics, volume deformation characteristics, secant modulus and friction angle of saturated sea sand was also analyzed. The result shows: With the decrease of the confining pressure or the increase of the relative density, the volumetric strain of the specimen will continue to increase, and the increase of the relative density or the effective confining pressure will increase the peak strength of the specimen, which is between the effective confining pressure and the peak strength, showing a good linear growth relationship. With the decrease of confining pressure or the increase of relative density, the relative stress softening coefficient and dilatancy coefficient are increasing, and the effective confining pressure is linearly and semi-log linearly related to the relative stress softening coefficient and dilatancy coefficient, respectively. The secant modulus shows an overall attenuation trend with the increase of the axial strain. When the axial strain is 5% under each test condition, the shear modulus of the specimen is attenuated by 80%~90% compared with the axial strain of 0.164%. The peak friction angle of saturated sea sand increases with the relative density and decreases with the effective confining pressure. When the relative density D_r is 50%, the peak friction angle corresponding to the effective

收稿日期:2021-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41962017);广西自然科学基金重点项目(2022GXNSFDA035081);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6号);广西研究生教育创新计划项目(YCSW2021310);广西大学生创新创业训练计划资助项目(202010594035)

作者简介:王家全(1981—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事土木工程灾害防治等方面的教学与研究工作。

E-mail: wjquan1999@163.com

通信作者:唐 毅(1982—),女,助理研究员,主要从事土木工程方向的研究。E-mail: tyi-moon@163.com

confining pressure σ_c of 50 kPa is 1.098 times that of σ_c of 200 kPa.

Keywords: sea sand; triaxial shear test; relative density; effective confining pressure; Beibu Gulf; softening factor; strength characteristics; volume characteristics

沿海地区地理位置优越、交通方便、人口稠密,是我国经济发展较为发达的地区,而随着其经济的持续快速发展,对土地资源的需求不断上升,因此为缓解土地稀缺问题,合理开发海洋资源,沿海地区出现了大量围填海工程,促进了海洋岩土工程的发展。由于取材方便、工程成本低等诸多优势,港口码头、物流基地、沿海高速公路及铁路等海洋工程的基础多位于以海砂为填筑材料的地基上。相对密度既是反映砂土密实程度的重要参数,也是围填海工程设计施工的重要控制指标之一,选取不当则会影响工程的安全性及经济性,所以有必要进一步探究相对密度与海砂力学特性之间的关系。

目前关于相对密度对砂土力学特性影响方面的研究取得了一定的成果,如:Verdugo 和 Ishihara^[1]发现密实程度、围压是影响砂土剪切特性的两个重要影响因素;Cai 和 Li^[2]认为砂土在剪切过程中变形特性取决于自身的密度和所施加的有效平均正应力;徐日庆等^[3]研究了不同围压、相对密度下福建标准砂初始切线模量、峰值偏应力的变化规律,发现初始切线模量、峰值偏应力均随围压和相对密度的增加而增大;朱材峰等^[4]通过固结排水三轴剪切试验研究发现粗粒料应力应变曲线软化现象及剪胀性随着相对密度的增大表现得更为明显;孙明辉等^[5]认为砂卵石料应力应变曲线类型与相对密度有关,相对密度较小时,应力应变曲线硬化特征随围压的增大逐渐明显,相对密度较大时均为应变软化型曲线,且与围压大小无关;姜景山等^[6]指出粗粒料强度基本随初始干密度的增大呈线性增加;潘政等^[7]和黄浩然等^[8]以砂卵石料为研究对象,发现随着密度的增加,峰值强度、剪胀特性逐渐增强而峰值应变逐渐减小;陈晨^[9]研究发现随着相对密度的增加,砾砂峰值强度逐渐增大,且无量纲参数 K 的对数与相对密度之间呈二次函数关系。

在海砂力学性能研究方面,Shahnazari 和 Rezvani^[10]分别从围压、密度、颗粒粒径、排水条件等方面对饱和珊瑚砂的颗粒破碎特性进行了相关研究;文哲等^[11]通过吹填珊瑚砂剪切力学试验研究发现,珊瑚砂的抗剪强度随含水量的增加而减小,随密度的增加而增大;蔡正银等^[12]基于珊瑚砂三轴压缩试验,建立了颗粒破碎与围压、初始孔隙比之间的联系;陈火东等^[13]认为试验围压对颗粒破碎的影响大于相对密度;刘萌成等^[14]研究发现随着围压和相对密度的增大,钙质砂剪切模量逐渐增加;侯贺营等^[15]基于珊瑚砂固结排水三轴剪切试验,建立了珊瑚砂初始剪切模量与围压、相对密度之间的关系式;李大勇等^[16]和吴杨等^[17]分别针对细海砂和珊瑚砂开展了不同相对密度的室内三轴剪切试验,均发现试样剪胀变形随相对密度的增加而增大;王家全等^[18]采用动三轴测试系统研究不同围压及不同动应力幅值对海砂动力特性的影响规律,发现轴向累积应变随围压增加而减小。

由此可见,相对密度是砂土力学特性的重要影响因素,但目前研究对象多以常规陆源砂及钙质砂为主,针对普通海砂力学特性影响的研究相对较少,且鲜少有研究将强度、变形等特性进行定量分析。因此以广西北部湾大风江海区海砂为研究对象,开展不同相对密度、有效围压下饱和海砂固结排水三轴剪切试验,探究海砂的强度、变形等力学特性的发展规律,以期为北部湾围填海工程的设计施工提供一定的参考依据。

1 试验介绍

1.1 试验材料及试验仪器

试验采用广西北部湾大风江海区海砂为试验材料,取土深度为 10~30 m,烘干后颜色整体呈黄白色,颗粒表面较为光滑,通过试验测试海砂基本物理参数得到其土粒相对密度 $G_s = 2.66$,最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.949 \text{ g/cm}^3$ 、最小干密度 $\rho_{dmin} = 1.652 \text{ g/cm}^3$,粒径范围为 0.075~10 mm,不均匀系数 $C_u = 4.96$,曲率系数 $C_c = 0.77$,由规范中土的分类标准可知,该砂为级配不良的粗砂。具体粒组分布情况见图 1 颗粒级配曲线。

试验仪器为英国 GDS 动态三轴试验系统,如图 2 所示。该仪器主要由计算机控制系统、围压/反压控制系统、加载系统和数据采集系统等几部分组成,其最大围压、反压均可设置为 2 MPa,最高轴向荷载为 10 kN,可进行应力路径、标准三轴、动态三轴、 K_0 固结、冻土三轴等试验。

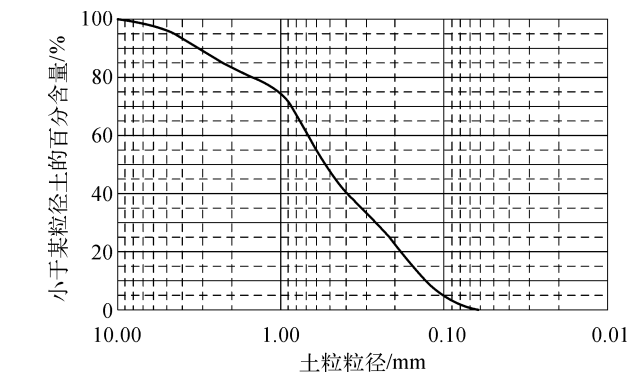


图 1 砂样颗粒级配曲线
Fig. 1 Gradation curve of sand particles



图 2 GDS 动态三轴试验系统
Fig. 2 GDS dynamic triaxial test system

1.2 试样制备及试验方案

试样尺寸为 50 mm×100 mm(直径×高度),将土样分成质量相等的 4 份,按 4 层击实制备试样,装样时将土颗粒均匀地放入橡胶模内,使用击实器将其振密击实。装样完成后,依次进行试样饱和、B 检测、试样固结、固结排水三轴剪切以及卸载等环节。

为揭示相对密度 D_r 与围压 σ_c 对饱和海砂力学特性的影响规律,对取自广西北部湾大风江区级配不良的海砂开展了固结排水三轴剪切试验。分别在有效围压 50、100、150、200 kPa 下,对相对密度 D_r 为 50%、70%、90%的海砂进行固结排水三轴剪切试验,试样加载过程中,始终保持剪切速率为 0.01 mm/min,加载至轴向应变达到 20%时终止试验,具体试验方案如表 1 所示。

表 1 饱和海砂固结排水三轴剪切试验方案
Tab. 1 Consolidation and drainage triaxial shear test scheme of saturated sea sand

试验工况	试样直径/mm	固结比 K_0	相对密度 $D_r/\%$	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	围压 σ_c /kPa	终止条件
1	50	1.0	50	0.01	50,100,150,200	轴向应变达到 20%
2			70		50,100,150,200	
3			90		50,100,150,200	

2 试验结果分析

2.1 强度特征

通过不同相对密度($D_r=50\%$ 、70%、90%)的海砂在 4 种有效围压($\sigma_c=50$ 、100、150、200 kPa)下的固结排水三轴剪切试验,得到各试验工况下试样应力—应变曲线,如图 3 所示,其中最大偏差应力为试样的峰值强度,峰值强度对应的轴向应变为峰值应变,轴向应变为 20%时对应的偏差应力为试样的残余强度。

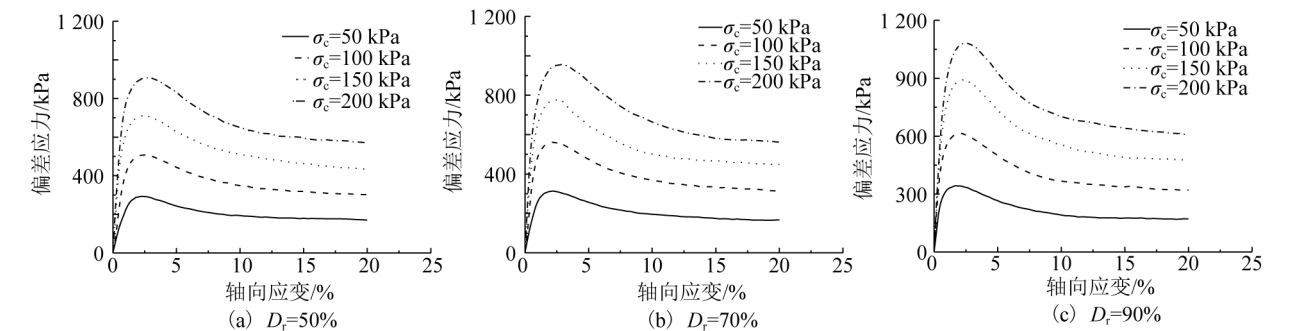


图 3 应力—应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve

分析饱和海砂在不同相对密度和有效围压下的应力—应变曲线可知:各试验工况下偏差应力表现为随轴向应变的增加先增大至峰值后逐渐减小的发展趋势,均为应变软化型曲线,应力—应变曲线存在明显的峰值,试样出现峰值强度。

对比不同有效围压下试样应力—应变曲线可发现在同一相对密度下,随着围压的增加,试样峰值强度不断增大,相对密度 D_r 为 50% 时有效围压 σ_c 为 50、100、150、200 kPa 对应的峰值强度分别为 293.006、509.091、711.130 以及 907.032 kPa, σ_c 为 200 kPa 时的峰值强度相比于 σ_c 为 50 kPa 提高了 2.096 倍。围压越大,试样在外力作用下颗粒位置越不易发生改变,土体稳定性越高,因此其峰值强度不断增强。对不同相对密度下饱和海砂峰值强度与有效围压的关系曲线进行拟合分析后发现,峰值强度 q_m 与有效围压呈现良好的线性增长关系,如图 4 所示。由图 3 可发现与有效围压 σ_c 为 50 kPa 相比,不同相对密度下有效围压 σ_c 为 200 kPa 时的峰值应变均有所增加。此外,从图 3 中还可以看出随着有效围压的增加,残余强度也随之增大。对比分析图 3(a)、(b)、(c) 中 σ_c 为 50 kPa 时不同相对密度下的峰值强度可知,试样峰值强度随着相对密度的增加逐渐增大, D_r 为 90% 时对应的峰值强度为 343.279 kPa,是 D_r 为 50% 的 1.172 倍。这是因为相对密度越大,固定试样体积内土体颗粒越多,则在外力作用下,颗粒所能移动的空间越小,则相比于低密度试样颗粒产生相同位移所需的作用力更大,因此其峰值强度有所提升。 σ_c 为 50 kPa 时相对密度 50%、70%、90% 的试样的峰值应变分别为 2.330%、2.164% 以及 1.664%,表明随着相对密度的增加,其峰值强度对应的轴向应变不断减小,原因为相对密度越高,在相同体积内土体颗粒越多,试样越密实,其可压缩性越弱。综上相对密度及有效围压对试样峰值强度、峰值应变等特性影响显著,因此在实际工程设计与施工时,增大围压或提高土体的相对密度均可使土体抗剪强度得到提升。

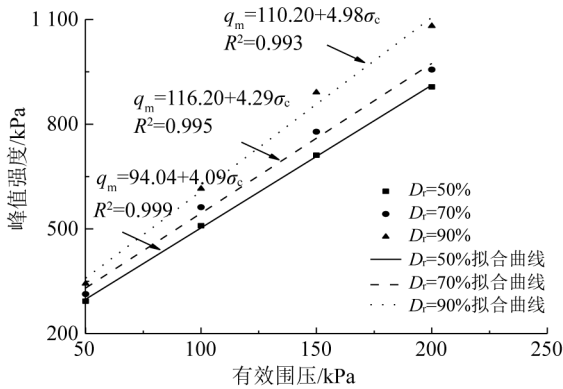


图 4 峰值强度与有效围压关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between peak intensity and effective confining pressure

由图 3 可知不同相对密度、有效围压下饱和海砂试样应力—应变曲线均为应变软化型曲线,因此为了更深入地研究饱和海砂的强度特性,引用文献[17]中所定义的应力相对软化系数 α ,对不同相对密度、有效围压下海砂的应力—应变软化特性进行统一量化处理,应力相对软化系数 α 的计算方法见式(1)。

$$\alpha = \frac{q_m - q_f}{q_m} \tag{1}$$

式中: q_m 为试样峰值强度, q_f 为试验终止(即轴向应变为 20%)时试样的残余强度, q_m 、 q_f 统称为特征应力。由式(1)可知:当 $\alpha > 0$ 时说明试样应力—应变曲线表现为应变软化型,且 α 值越大,土体软化程度越高。

各试验工况下试样的峰值强度 q_m 、残余强度 q_f 见表 2,依据式(1)计算获取各试验方案下试样的应力相对软化系数,分析 3 种相对密度的海砂试样在不同有效围压条件下的软化特征,得到应力相对软化系数随围压的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,对于不同相对密度的海砂而言,其应力相对软化系数均随有效围压的增加不断减小,即随着围压的增加,试样应力—应变曲线软化程度逐渐减小。由表 2 可知,相对密度 D_r 为 90% 时有效围压 σ_c 为 200 kPa 试样对应的应力相对软化系数为 0.438,相比于同条件下 σ_c 为 50 kPa 时减

小了 12.750%。观察表 2 及图 5 中同一有效围压下的应力相对软化系数可知,随相对密度的增加,应力相对软化系数不断增大,表明土体软化程度随着相对密度的增加不断增大。从图 5 还可发现不同相对密度下应力相对软化系数与有效围压的关系曲线可通过线性模型来描述,拟合公式如式(2)所示,其拟合后的决定系数 R^2 均在 0.980 以上,表明采用线性模型对不同相对密度下饱和海砂应力相对软化系数与有效围压的关系曲线进行拟合时吻合度良好。

$$\alpha = a \times \sigma_c + b$$

(2)

式中: α 为应力相对软化系数; σ_c 为有效围压, a 、 b 均为拟合参数。

对拟合参数 a 、 b 与相对密度 D_r 进行拟合分析后发现,拟合参数 a 、 b 与相对密度之间呈良好的线性关系,如图 6 所示,相对密度增加时,参数 a 呈线性减小,而参数 b 呈线性增长,相对密度与拟合参数 a 、 b 的函数方程见式(3)、式(4),综上应力相对软化系数与有效围压、相对密度的关系式如式(5)所示。

$$a = -2.215 \times 10^{-4} D_r - 2.116 \times 10^{-4}$$

(3)

$$b = 0.213 D_r + 0.332$$

(4)

$$\alpha = (-2.215 \times 10^{-4} D_r - 2.116 \times 10^{-4}) \times \sigma_c + 0.213 D_r + 0.332$$

(5)

表 2 不同相对密度及有效围压下试样的特征应力

Tab. 2 Characteristic stress of specimens under different relative densities and effective confining pressures

相对密度 $D_r/\%$	有效围压 σ_c/kPa	峰值应力 q_m/kPa	残余应力 q_r/kPa	应力相对软化系数 α
50	50	293.006	170.031	0.420
	100	509.091	302.002	0.407
	150	711.130	434.095	0.390
	200	907.032	570.765	0.371
70	50	313.388	167.393	0.466
	100	562.117	313.033	0.443
	150	778.462	448.008	0.425
	200	956.425	561.414	0.413
90	50	343.279	170.834	0.502
	100	615.273	320.180	0.480
	150	891.263	477.205	0.465
	200	1 081.336	607.906	0.438

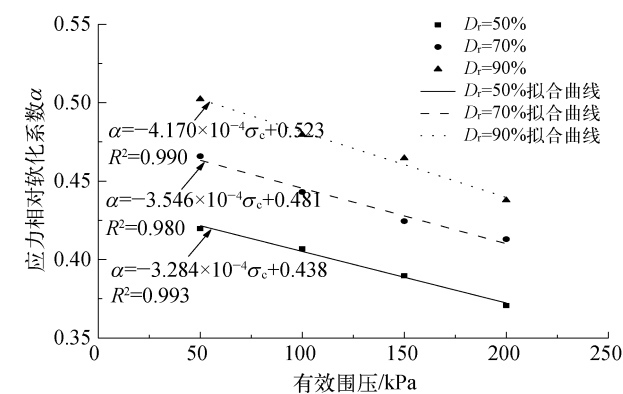


图 5 应力相对软化系数 α 与有效围压关系曲线

Fig. 5 The relationship curve between the relative stress softening coefficient α and the effective confining pressure

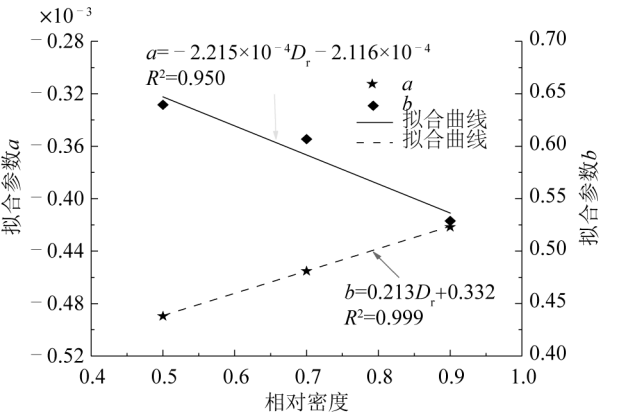


图 6 拟合参数与相对密度关系曲线

Fig. 6 The relationship curve between fitting parameters and relative density

2.2 体变特征

图 7 给出了不同相对密度、有效围压下试样体积应变随轴向应变的发展曲线,其中体积应变为负值时表示试样发生剪缩,体积应变为正值时则表示发生剪胀现象。各试验工况下试样体积应变随轴向应变的发展首先沿坐标轴向下发展随后体积应变不断增加,即试验开始初期,在轴向应力作用下试样先发生小幅度的剪缩,而后在轴向应变增大过程中颗粒间的相对位置不断发生改变,剪应力作用下试样体积由收缩转变为膨胀,在不同相对密度、有效围压下试样发生剪胀现象前期其体积应变随轴向应变快速增长,当轴向应变达到约 7%后,试样体积应变随轴向应变的增长速率逐渐减小。

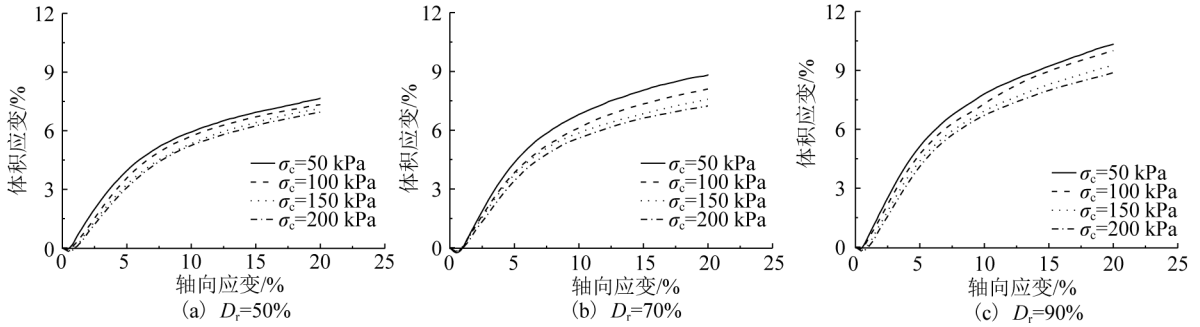


图 7 体积应变与轴向应变关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between volumetric strain and axial strain

将不同围压下试样体积应变随轴向应变的发展曲线进行对比分析可发现:图 7 中 3 种相对密度下由上至下曲线对应的有效围压依次为 50、100、150、200 kPa,即不同相对密度下海砂的体积应变随有效围压的增加不断减小,相对密度 D_r 为 50%、有效围压 σ_c 为 200 kPa 的海砂试样试验终止时的体积应变为 6.954%,相比于 D_r 为 50%、 σ_c 为 50 kPa 减小了 9.106%。同一相对密度时,低围压下土体颗粒受到的约束较小,则在剪应力作用下试样越易发生体积膨胀。从图 7 中体积应变与轴向应变的关系曲线可以看出,相同围压下体积应变随相对密度的增加而增大, σ_c 为 50 kPa 时,试验终止时相对密度 D_r 为 50%、70%、90%对应的体积应变分别为 7.651%、8.845%以及 10.352%,相比于 D_r 为 50%、 D_r 为 70%、90%试样的体积应变分别增加了 15.606%、35.303%。分析上述现象的原因为剪切应力会导致海砂颗粒之间发生翻滚、滑动,使得土体颗粒产生位移,相对密度愈高,试样颗粒间的孔隙愈小,颗粒之间接触作用较强,试样愈易产生变形。

由图 7 可以看出随着轴向应变的增加,试样整体发生剪胀变形,为便于对试样的体变特征开展更进一步的分析,采用文献[19]中的剪胀系数 β 对海砂试样的剪胀特性进行定量描述,其计算式为:

$$\beta = \frac{\varepsilon_{vc} - \varepsilon_{vp}}{\varepsilon_{ac} - \varepsilon_{ap}} \quad (6)$$

式中: ε_{ap} 、 ε_{vp} 为试样峰值强度对应的轴向应变(即峰值应变)、体积应变, ε_{ac} 、 ε_{vc} 为试样相变状态(即试样体积由剪缩开始转变为剪胀的状态)时对应的轴向应变、体积应变, ε_{ap} 、 ε_{vp} 、 ε_{ac} 、 ε_{vc} 统称为特征应变。由式(6)可知,当 $\beta > 0$ 时,表明土体整体发生剪胀现象, β 值越大,试样发生剪胀程度越高。

各试验工况下试样峰值强度对应的轴向应变(即峰值应变) ε_{ap} 、体积应变 ε_{vp} 、试样相变状态时对应的轴向应变 ε_{ac} 、体积应变 ε_{vc} 如表 3 所示,利用式(6)处理海砂在不同相对密度和有效围压下的固结排水三轴剪切试验结果,得到其剪胀系数 β ,并绘制不同相对密度下剪胀系数 β 随有效围压的变化曲线,如图 8 所示。从图 8 可发现在同一相对密度下,随着有效围压的增加,试样剪胀系数 β 逐渐减小,说明试样的体变效应随围压的增大而减弱,而 β 随相对密度的增加不断增大,有效围压 σ_c 为 50 kPa 时,相对密度 D_r 为 50%、70%、90%试样对应的剪胀系数 β 分别为 0.960、1.025、1.143,与 D_r 为 50%相比, D_r 为 70%、90%的剪胀系数分别增长了 6.771%、19.063%,表明在相同试验条件下相对密度越大,试样越易发生剪胀变形。由图 8 可知,不同相对密度下试样的剪胀系数 β 与有效围压之间表现出良好的半对数线性关系,可用公式(7)对其曲线进行拟合,不同相对密度下的决定系数 R^2 均大于 0.960,拟合效果较好。

$$\beta = c \times \lg \sigma_c + d$$

(7)

式中: β 为剪胀系数; σ_c 为有效围压, c 、 d 均为拟合参数。

图 8 给出了相对密度 D_r 为 50%、70%、90%时剪胀系数与有效围压的拟合曲线,可以发现拟合参数 c 值为 $-0.419 \sim -0.405$,且随着相对密度的增大呈现先增大后减小的发展趋势,而拟合参数 d 与相对密度 D_r 呈良好的线性增长关系,见图 9,其函数关系式为:

$$d = 0.5D_r + 1.394$$

(8)

表 3 不同相对密度及有效围压下试样的特征应变

Tab. 3 Characteristic strains of specimens under different relative densities and effective confining pressures

相对密度 $D_r/\%$	有效围压 σ_c/kPa	$\varepsilon_{ap}/\%$	$\varepsilon_{vp}/\%$	$\varepsilon_{ac}/\%$	$\varepsilon_{vc}/\%$	剪胀系数 β
50	50	2.330	1.838	0.330	-0.082	0.960
	100	2.330	1.364	0.497	-0.078	0.787
	150	2.664	1.475	0.497	-0.158	0.754
	200	2.664	1.339	0.497	-0.185	0.703
70	50	2.164	1.456	0.497	-0.253	1.025
	100	2.163	1.289	0.496	-0.225	0.909
	150	2.664	1.698	0.497	-0.175	0.864
	200	2.663	1.461	0.496	-0.200	0.766
90	50	1.664	1.402	0.331	-0.122	1.143
	100	2.164	1.751	0.330	-0.121	1.021
	150	2.330	1.628	0.497	-0.169	0.980
	200	2.331	1.390	0.497	-0.212	0.874

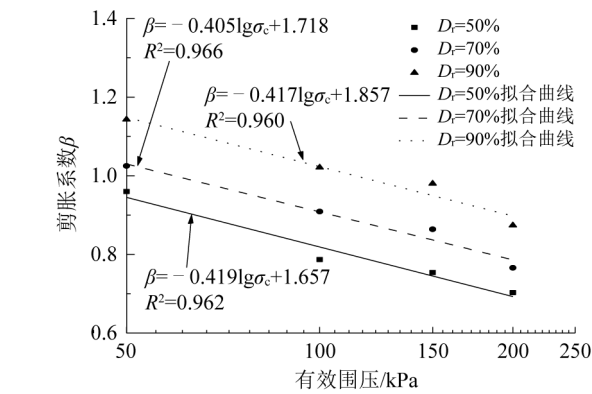


图 8 剪胀系数 β 与有效围压关系曲线

Fig. 8 The relationship curve between dilatancy coefficient β and effective confining pressure

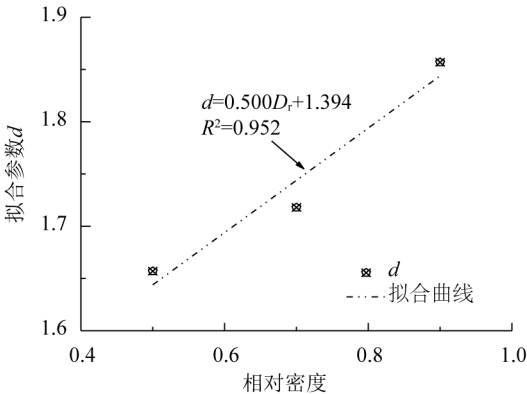


图 9 拟合参数 d 与相对密度关系曲线

Fig. 9 The relationship curve between fitting parameter d and relative density

2.3 割线模量

割线模量是指试验加载过程中偏差应力 q 与轴向应变 ε_a 的比值,如式(9)所示,用来表征试样抵抗剪切变形的能力。

$$E = \frac{q}{\varepsilon_a}$$

(9)

基于式(8)及试验所得数据,计算得到不同相对密度、有效围压下试样的割线模量随轴向应变的变化曲线,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,割线模量随轴向应变的增加整体呈衰减趋势,在三轴剪切试验初期,

割线模量随轴向应变的发展规律不稳定,轴向应变达到 0.5%后,随着轴向应变的增加,割线模量逐渐衰减,当轴向应变为 5%时,相比于 ε_a 为 0.164%时,试样割线模量衰减了 80%~90%左右;试验后期,割线模量与轴向应变的关系曲线基本趋于稳定,不同相对密度、有效围压下割线模量与轴向应变关系曲线可用式(10)进行拟合。

$$E = \frac{1}{m + l \times \varepsilon_a^r}$$

(10)

式中: E 为割线模量; ε_a 为轴向应变; m 、 l 、 r 为拟合参数。割线模量与轴向应变关系曲线的拟合参数取值、决定系数 R^2 如表 4 所示。由表 4 可知,拟合参数 m 随有效围压和相对密度的增加不断减小。

表 4 拟合参数 m 、 l 、 r 及决定系数 R^2

Tab. 4 Fitting parameters m , l , r and coefficient of determination R^2

相对密度/%	有效围压/kPa	m	l	r	R^2
50	50	3.350×10^{-2}	1.148×10^{-2}	1.641	0.999
	100	2.106×10^{-2}	4.771×10^{-3}	1.823	0.990
	150	1.017×10^{-2}	6.016×10^{-3}	1.531	0.996
	200	7.758×10^{-3}	5.309×10^{-3}	1.433	0.999
70	50	2.783×10^{-2}	1.141×10^{-2}	1.647	0.999
	100	1.581×10^{-2}	5.217×10^{-3}	1.783	0.987
	150	8.808×10^{-3}	6.404×10^{-3}	1.452	0.999
	200	7.133×10^{-3}	5.371×10^{-3}	1.410	0.998
90	50	1.571×10^{-2}	1.463×10^{-2}	1.511	0.998
	100	8.062×10^{-3}	9.670×10^{-3}	1.390	0.999
	150	7.634×10^{-3}	5.255×10^{-3}	1.510	0.999
	200	6.759×10^{-3}	4.328×10^{-3}	1.475	0.999

观察图 10 可知随着有效围压的增加,试样割线模量沿坐标轴向上发展,即割线模量随有效围压的增加而增大,表明有效围压越大,试样抵抗剪切变形的能力越强。经计算有效围压 σ_c 为 50 kPa 时,相对密度 $D_r=50\%$ 、70%、90%试样峰值强度对应的割线模量分别为 20.632、14.483 以及 12.573 MPa,可以发现随着相对密度的增加,试样峰值强度对应的割线模量不断减小。

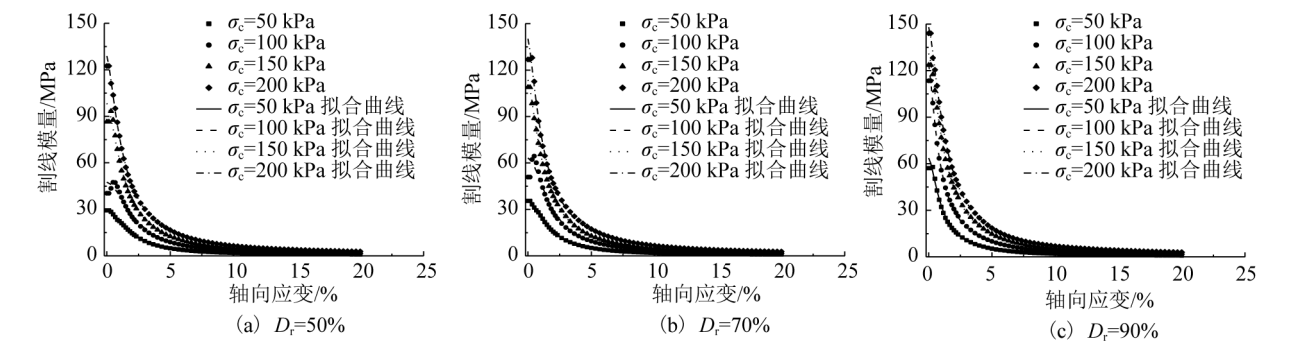


图 10 割线模量与轴向应变关系曲线

Fig. 10 The relationship curve between secant modulus and axial strain

2.4 摩擦角

在三轴剪切应力作用下,可依据式(11)对岩土粒状材料的滑动摩擦角 φ 进行计算^[20-21]:

$$\sin\varphi = \frac{3\eta}{6+\eta} = \frac{3q/p'}{6+q/p'} = 3 - \frac{18}{6+q/p'}$$

(11)

$$\eta = \frac{q}{p'} = 3 - \frac{9}{q/\sigma_c + 3}$$

(12)

式中: η 为剪应力比,其值为 $\eta=q/p'$; q 为偏差应力; p' 为平均有效应力; σ_c 为有效围压。

通过式(11)对试样的滑动摩擦角进行计算,得到不同相对密度、有效围压下滑动摩擦角随轴向应变的发展曲线,如图 11 所示。

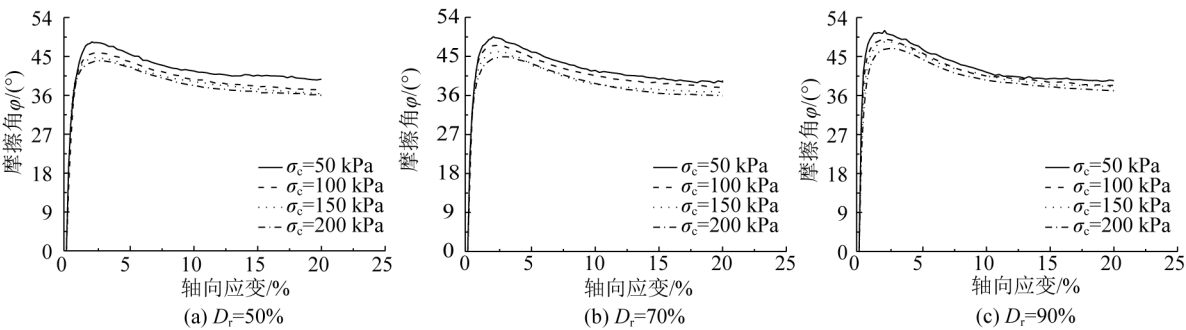


图 11 滑动摩擦角与轴向应变关系曲线

Fig. 11 The relationship curve between sliding friction angle and axial strain

从图 11 可以看出,滑动摩擦角随轴向应变的增加呈现先增大后减小的发展趋势;同一相对密度下,围压越大,其滑动摩擦角越小。图 12 给出了不同相对密度下试样峰值摩擦角随有效围压的发展规律。由图 12 可知,在文中试验研究范围内,试样峰值摩擦角的变化范围为 $44.029^{\circ} \sim 51.012^{\circ}$,且随着有效围压的增加,不同相对密度下试样的峰值摩擦角均随之减小,以相对密度 D_r 为 50% 为例,有效围压 σ_c 为 50 kPa 时对应的峰值摩擦角为 48.355° ,是 σ_c 为 200 kPa 的 1.098 倍,这与吴杨等^[17]和王毅锐等^[22]的研究结果保持一致。此外,峰值摩擦角与有效围压的关系曲线可采用幂函数进行拟合。由式(11)可知,滑动摩擦角随剪应力比的增加而增大,式(12)表明在同一有效围压下,随着偏应力的增加,试样剪应力比逐渐增加,因此在相同围压下试样峰值偏应力越高,其峰值摩擦角越大,由 2.1 节可知随着相对密度的增加,试样峰值强度不断增大,因此峰值摩擦角随相对密度的增加而增大,从图 12 中亦可发现此规律。这是因为试样在高密实状态下,土体颗粒之间的接触更加紧密,颗粒接触面积较大,在三轴剪切应力作用下土体所要克服的摩擦阻力较高。

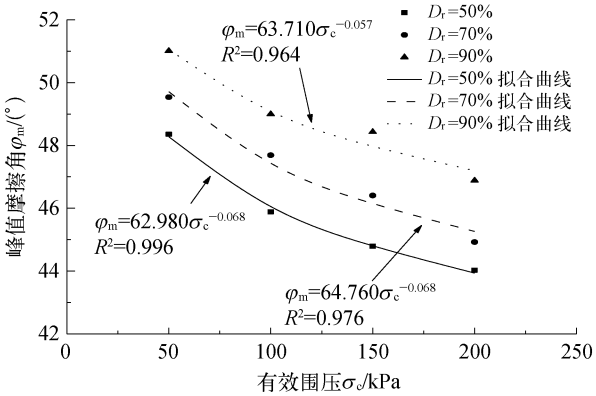


图 12 峰值摩擦角与有效围压的关系曲线

Fig. 12 The relationship curve between peak friction angle and effective confining pressure

2.5 海砂与常规陆源砂、钙质砂对比分析

与常规陆源砂相比,①强度特征:饱和海砂应力—应变曲线发展趋势与徐日庆等^[3]的福建标准砂,朱材峰等^[4]、孙明辉等^[5]、潘政等^[7]、黄浩然等^[8]的砂卵砾石料及陈晨^[9]的砾砂研究结果基本一致,饱和海砂、福建标准砂、砂卵砾石料及砾砂的峰值强度均随相对密度、围压的增加而增大,但在同一相对密度、围压下,海

砂的软化程度要高于其他砂土,其峰值强度比砂卵砾石料低,但高于福建标准砂。②体变特征:在剪切过程中海砂与砂卵砾石料均先发生剪缩后发生剪胀现象,相比于砂卵砾石料,海砂的剪胀程度有所提高,因为海砂中的贝壳、珊瑚碎屑等杂质使其强度相比于其他砂土有所降低,试样软化及剪胀程度提高,因此在围填海工程设计施工时,可采用加筋或掺入固化剂等措施来提高海砂地基的抗剪强度。

与钙质砂相比,①强度特征:陈火东等^[13]、侯贺营等^[15]、吴杨等^[17]基于钙质砂力学特性的研究发现低围压($\sigma_c \leq 200$ kPa)下试样软化程度随相对密度的增加而增大、随围压的增加而减小,与本文所研究的海砂力学特性发展规律一致;其次海砂峰值强度高于钙质砂,峰值强度对应的轴向应变小于钙质砂;此外同一相对密度、围压下钙质砂的峰值摩擦角略大于海砂,原因为相比于海砂,钙质砂颗粒形状不规则性更强,因此颗粒间的咬合力相对较大。②体变特征:对比已有钙质砂研究成果^[13,15,17]与本文研究结果发现同条件下钙质砂的剪胀程度小于海砂试样,剪切过程中钙质砂颗粒发生破碎,是出现这一试验现象的主要原因。

3 结 语

通过开展不同相对密度、有效围压下饱和海砂固结排水三轴剪切试验,探究了海砂强度、变形等力学特性的发展规律,在本文试验研究范围内得出了如下结论:

- 1) 同一有效围压下,饱和海砂峰值强度、应力相对软化系数、剪胀系数及峰值摩擦角均随相对密度的增加而增大;
- 2) 同一相对密度下,随着有效围压的增大,饱和海砂试样软化程度和剪胀程度降低,峰值摩擦角减小,而峰值强度随之增加,且应力相对软化系数、峰值强度与有效围压呈线性相关,剪胀系数与有效围压呈半对数线性相关,峰值摩擦角与有效围压呈幂函数相关;
- 3) 不同有效围压、相对密度下饱和海砂割线模量随轴向应变的增加整体均呈衰减趋势,轴向应变为 5% 时试样的割线模量相比于轴向应变 0.164% 衰减了 80%~90%;
- 4) 不同有效围压、相对密度下饱和海砂滑动摩擦角随轴向应变的增加呈现先增大后减小的发展趋势,同一相对密度下,围压越大,其滑动摩擦角越小。

参考文献:

- [1] VERDUGO R, ISHIHARA K. The steady state of sandy soils[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(2): 81-91.
- [2] CAI Z Y, LI X S. Deformation characteristics and critical state of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 697-701.
- [3] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 345-349. (XU Riqing, WANG Xingchen, ZHU Jianfeng, et al. Experiment on the influence of initial relative density on the strength characteristics of sand[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 345-349. (in Chinese))
- [4] 朱材峰, 朱俊高, 潘政. 密度对粗粒料力学特性影响三轴试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 24-30. (ZHU Caifeng, ZHU Jungao, PAN Zheng. Triaxial test study on the effect of density on the mechanical properties of coarse-grained materials[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38(2): 24-30. (in Chinese))
- [5] 孙明辉, 朱俊高, 沈靠山, 等. 密度对砂卵砾石料强度及变形特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 43-47. (SUN Minghui, ZHU Jungao, SHEN Kaoshan, et al. The effect of density on the strength and deformation characteristics of sand, gravel and gravel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 43-47. (in Chinese))
- [6] 姜景山, 左永振, 程展林, 等. 不同密度粗粒料强度特性的大型真三轴试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2601-2608. (JIANG Jingshan, ZUO Yongzhen, CHENG Zhanlin, et al. Large-scale true triaxial tests on the strength characteristics of coarse-grained materials with different densities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2601-2608. (in Chinese))
- [7] 潘政, 朱俊高, 方智荣. 相对密度对砂卵砾石料强度影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 130-133. (PAN Zheng, ZHU Jungao, FANG Zhirong. Experimental study on the influence of relative density on the strength of sand and gravel materials[J]. People's Yellow River, 2016, 38(2): 130-133. (in Chinese))
- [8] 黄浩然, 朱俊高, 方智荣, 等. 砂卵砾石料变形与强度特性三轴试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 87-89. (HUANG Haoran, ZHU Jungao, FANG Zhirong, et al. Triaxial test study on deformation and strength characteristics of sand

- and gravel materials[J]. *Hydropower Energy Science*, 2012, 30(7): 87-89. (in Chinese))
- [9] 陈晨. 相对密实度对砾砂初始切线模量的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(5): 579-583. (CHEN Chen. The influence of relative density on the initial tangent modulus of gravel sand[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2016, 38(5): 579-583. (in Chinese))
- [10] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands[J]. *Engineering Geology*, 2013, 159(9): 98-105.
- [11] 文哲, 段志刚, 李守定, 等. 中国南海岛礁吹填珊瑚砂剪切力学特性[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 77-84. (WEN Zhe, DUAN Zhigang, LI Shouding, et al. Shearing mechanical properties of coral sand from dredging reefs in the South China Sea[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 77-84. (in Chinese))
- [12] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋, 等. 密度与应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响试验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 184-192. (CAI Zhengyin, HOU Heying, ZHANG Jinxun, et al. Experimental study on the influence of density and stress level on the fragmentation of coral sand particles[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 184-192. (in Chinese))
- [13] 陈火东, 魏厚振, 孟庆山, 等. 颗粒破碎对钙质砂的应力-应变及强度影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1490-1498. (CHEN Huodong, WEI Houzhen, MENG Qingshan, et al. Study on the influence of particle crushing on the stress-strain and strength of calcareous sand[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1490-1498. (in Chinese))
- [14] 刘萌成, 胡帅峰, 戴鹏飞. 南海钙质砂不排水剪切特性三轴试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 69-76. (LIU Mengcheng, HU Shuaifeng, DAI Pengfei. Triaxial test study on undrained shear characteristics of South China Sea calcareous sand[J]. *China Journal of Highway and Transport*: 2022, 35(4): 69-76. (in Chinese))
- [15] 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. Influence of density and stress level on the strength and deformation characteristics of coral sand[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(1): 92-97. (in Chinese))
- [16] 李大勇, 卢高, 鞠雷. 初始相对密实度对饱和细海砂直剪特性的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 45-49. (LI Dayong, LU Gao, JU Lei. Influence of initial relative density on direct shear characteristics of saturated fine sea sand[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 36(3): 45-49. (in Chinese))
- [17] 吴杨, 崔杰, 李能, 等. 岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3181-3191. (WU Yang, CUI Jie, LI Neng, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breaking characteristics of coral sand from islands and reefs[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3181-3191. (in Chinese))
- [18] 王家全, 陈胜前, 唐毅, 等. 北部湾地区海砂填料的动力特性分析[J]. 海洋工程, 2020, 38(5): 149-155. (WANG Jiaquan, CHEN Shengqian, TANG Yi, et al. Dynamic characteristics analysis of sea sand filler in Beibu Gulf area[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(5): 149-155. (in Chinese))
- [19] 闫超萍, 龙志林, 周益春, 等. 钙质砂剪切特性的围压效应和粒径效应研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 581-591. (YAN Chaoping, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. Study on the confining pressure effect and particle size effect of the shear characteristics of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 581-591. (in Chinese))
- [20] SADREKARIMI A, OLSON S M. Critical state friction angle of sands[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(9): 771-783.
- [21] WU Y, YAMAMOTO H, CUI J, et al. Influence of load mode on particle crushing characteristics of silica sand at high stresses[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(3): 4019194.
- [22] 王毅锟, 解林, 王星, 等. 饱和方式对珊瑚砂力学特性影响试验研究[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 228-233. (WANG Yikun, XIE Lin, WANG Xing, et al. Experimental study on the influence of saturation modes on the mechanical properties of coral sand[J]. *Geotechnical Foundation*, 2021, 35(2): 228-233. (in Chinese))