

引用格式:高运昌,彭晓东,高盟,等. 南海钙质砂的液化特性动三轴试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(2):69-76.

GAO Yunchang, PENG Xiaodong, GAO Meng, et al. Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of calcareous sand in South China Sea[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(2): 69-76.

南海钙质砂的液化特性动三轴试验研究

高运昌^{1,2}, 彭晓东^{1,2}, 高盟^{1,2}, 陈青生³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 119077)

摘要:随着南海岛礁建设的快速发展,确定钙质砂工程场地的液化特性是预防和减轻地基液化灾害的重要课题。为研究钙质砂在动力荷载作用下的液化特性,开展了钙质砂室内动三轴试验,考虑有效围压和动应力比两方面因素,对钙质砂动孔压的发展过程、动应变的累积特征以及滞回曲线的演变规律进行了分析。试验表明,随着围压的增大,钙质砂的抗液化能力增强,试样出现失稳时的累积塑性应变也随之增加;有效围压越大,钙质砂的孔压曲线波动幅度越大,循环活动强度增强。钙质砂累积塑性应变的变化趋势相似,开始稳定发展,累积到试样失稳位置后应变急剧增加,使试样变形破坏。钙质砂在液化破坏后,颗粒骨架结构仍然存在一定的残余强度。滞回曲线的面积呈现先增大后缩小的演变规律;滞回圈的形状在液化过程前期基本不变,中期会发生剧烈变化,后期又逐渐趋于稳定。

关键词:南海钙质砂;液化特性;动三轴试验;滞回曲线

中图分类号:TU441

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)02-0069-08

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.02.008

Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of calcareous sand in South China Sea

GAO Yunchang^{1,2}, PENG Xiaodong^{1,2}, GAO Meng^{1,2}, CHEN Qingsheng³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: With the rapid development of island reef construction, to determine the liquefaction characteristics of calcareous sand engineering sites has become an important issue for preventing and mitigating ground-based liquefaction disasters. To study the liquefaction characteristics of calcareous sand under dynamic loading, the dynamic triaxial test was carried out. Considering the effective confining pressure and dynamic stress ratio, the development process of dynamic pore pressure, the cumulative characteristics of dynamic strain and the evolution principle of hysteresis curve were investigated. The test results indicate that the increase of confining pressure enhances the liquefaction re-

收稿日期:2019-03-27

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808324)

作者简介:高运昌(1994—),男,山东嘉祥人,硕士研究生,主要从事岩土动力学方向研究。

高盟(1974—),男,山东临沂人,副教授,博士,主要从事岩土动力学及桩基工程学研究,本文通信作者。

E-mail:gmxyz@sdust.edu.cn

sistance of calcareous sand and increases the cumulative plastic strain when the sample is unstable. With the increase of effective confining pressure, the fluctuation range of pore pressure curve of calcareous sand increases, and the cyclic mobility is enhanced. The cumulative plastic strain of calcareous sand develops steadily at the beginning, but increases sharply afterwards when it accumulates at the instability position, which finally deforms and destroys the sample. After liquefaction damage, the grain skeleton of calcareous sand still has a certain residual strength. The area of hysteresis curve shows the evolutionary principle of increasing first and then decreasing. In the process of liquefaction, the shape of the hysteresis loop remains basically unchanged in the early stage, and drastically changes in the middle stage, and gradually becomes stable in the later stage.

Key words: calcareous sand in South China Sea; liquefaction characteristics; dynamic triaxial test; hysteresis curve

随着“21世纪海上丝绸之路”经济带建设的推进,越来越多的国防及民用工程建设在珊瑚礁上。珊瑚岛礁的主要成分为钙质砂,岛礁工程地震风险大,地震产生的灾害又主要是喷水冒砂、地面沉降、地表裂缝等液化破坏^[1]。预防和减轻南海岛礁工程的地震灾害极为重要,因此,研究钙质砂在交通、地震及波浪等动荷载作用下的动力液化特性对南海的实际工程具有重要价值。

钙质砂是一种海洋生物成因、 CaCO_3 含量超过50%的粒状材料,特殊的物质组成导致其表现出特别的力学性质,国内外学者开展了一系列室内试验对钙质砂的力学特性进行研究。刘崇权等^[2]通过三轴压缩试验指出对钙质砂的强度评价及力学性质研究应当考虑颗粒破碎、剪胀、颗粒重组等力学模型;Coop等^[3]对Dogs Bay砂进行环剪试验发现,由于钙质砂的颗粒破碎和重组,在剪切后颗粒级配会达到最终稳定状态;张家铭等^[4]通过高压三轴剪切试验对钙质砂的剪切特性进行了研究;朱长岐等^[5]利用飞秒切割技术对钙质砂颗粒的内孔隙进行了定量分析;黄宏翔等^[6]对钙质砂进行环剪试验,探究颗粒破碎对钙质砂残余强度的影响;任玉宾等^[7]对钙质砂的渗透性进行研究,并从细观角度进行了分析。

以上研究表明钙质砂具有易破碎、易压缩、渗透性强等特殊性质,因其静力力学性质的特殊性,使得钙质砂在动力作用下的液化特性也较为不同。国外学者Sharma等^[8]和Salem等^[9]通过对不同地区钙质砂进行循环荷载下的试验研究,发现高孔隙率和颗粒破碎是影响钙质砂动力特性的主要原因。国内学者针对我国南海的钙质砂也进行了相应研究,李建国^[10]利用竖向-扭向循环耦合剪切试验,对波浪荷载作用下钙质砂的液化特性进行了研究;王刚等^[11]开展三轴排水循环剪切试验,分析在循环荷载作用下钙质砂颗粒破碎特征及规律;刘汉龙等^[12]采用动三轴试验,对钙质砂的液化特性进行了分析;孟庆山等^[13]利用现场原位扁铲侧胀试验和室内动静三轴-扭剪试验手段,分析钙质砂土的抗液化特性,并阐释了其形成机理。

目前,对南海钙质砂的动力液化特性研究较少,需要开展更多的研究来充分认识钙质砂的液化过程,为岛礁工程建设抗震设计提供参考依据。因此,本研究开展动力三轴试验,考虑有效围压和初始动应力比两方面因素对钙质砂动力液化性能的影响,分析了钙质砂的动孔压发展过程、动应变累积特征以及滞回曲线的演变规律。

1 试验设计

1.1 仪器

本试验在英国GDS单向激振动力三轴试验仪器上进行,该设备通过电机伺服系统施加动轴向应力。所采用的试样尺寸为:直径 $D=50\text{ mm}$,高度 $H=100\text{ mm}$ 。

1.2 材料及试样制备

试验所用钙质砂取自我国南海某岛礁附近海域。试验前筛除大直径颗粒,仅保留颗粒粒径小于 2 mm 部分,通过颗粒筛分试验测其粒径分布,颗粒级配曲线如图1(a)所示。该试样的有效粒径 $d_{10}=0.09\text{ mm}$ 、中值粒径 $d_{30}=0.27\text{ mm}$ 、限制粒径 $d_{60}=0.59\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=6.56>5$,曲率系数 $C_c=1.37>1$,属良好级配砂土。

钙质砂经煮沸烘干后,采用分层捣实和干砂水沉法按照固定的试样大小在仪器上制样,试样如图1(b)所示。然后采用 CO_2 饱和与反压饱和相结合的方式,直至饱和度 $B=\Delta u/\Delta\sigma_3>0.98$ 时完成饱和过程,具体

试验步骤可参见《土工试验规程(SL237—1999)》。达到饱和所需施加的反压值可由下式估算^[2]：

$$u_0 = u_a \left[\frac{100 - (1 - h) S_0}{100 - (1 - h) S_f} - 1 \right]。$$
 (1)

式中： u_0 —所需施加的反压力，kPa； u_a —大气压力； h —亨利系数，即空气溶解系数，20℃时为 0.02； S_0 —初始饱和度，%； S_f —最后饱和度，%。

由于钙质砂颗粒内孔隙较多，需要饱和的反压值会比估算值略大，本试验饱和反压为 300 kPa，分 6 级加载，每级增量 50 kPa，具体反压值如表 1 所示。需待试样内孔压充分均匀后再施加下一级反压，约 10 min 一级。

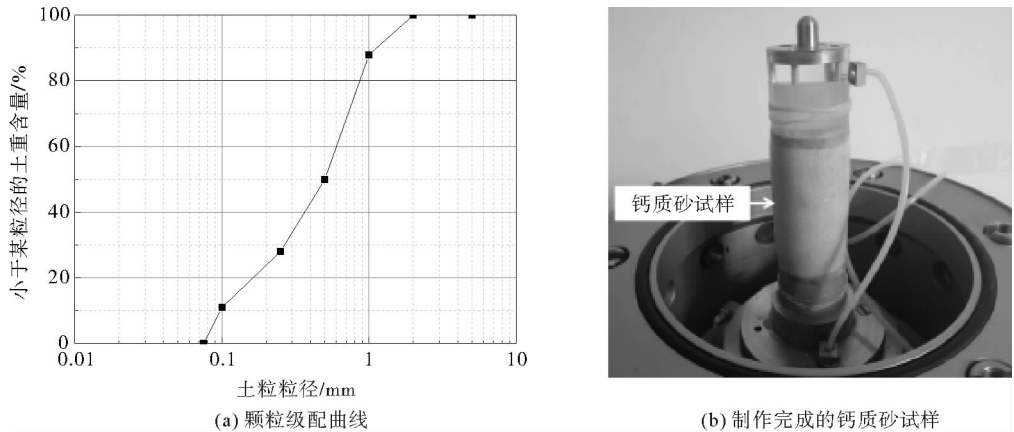


图 1 钙质砂试样图和颗粒级配曲线

Fig. 1 Sample diagram and grain size distribution of calcareous sand

1.3 试验方案

基于常规地基应力范围，选取三个有效围压($\sigma_c=50、100$ 和 150 kPa)来分析不同固结压力对钙质砂动力液化特性的影响。同时，为了分析液化过程中循环动应力的影响，在每级围压下又进一步选取四个初始动应力比进行试验。总体试验方案如表 2 所示，试样均为等向固结，共进行了 12 组试验，每组试验测试对应的轴向应变、动孔压和破坏周次。试验选取应变破坏准则作为钙质砂的液化标准^[14]，即轴向应变达到 5%时试验结束。试验加载采用正弦波型，振动频率为 1 Hz。

2 结果与分析

2.1 时程曲线

对开展的 12 组钙质砂动三轴试验进行分析研究。图 2 是在有效围压 $\sigma_c=100$ kPa，初始动应力比 $r_d=1.0$ 时的动应力(σ_d)、动应变(ϵ_d)和动孔压(u_d)时程曲线。由图 2 可以看出，随着振动次数(N)的增加，钙质砂的动应变幅值增大，动孔压逐渐增长。达到轴

表 1 试样饱和过程中各级反压的荷载水平

Tab. 1 Load level of back pressure at various stages during sample saturation

反压等级	1	2	3	4	5	6
反压值/kPa	50	100	150	200	250	300

表 2 钙质砂动三轴试验方案

Tab. 2 Scheme of dynamic triaxial tests for calcareous sand

试验编号	有效围压 σ_c/kPa	轴向动力幅值 σ_d/kPa	初始动应力比 $\sigma_{d\max}/2\sigma_c$
1-1	50	45	0.45
1-2		65	0.65
1-3		80	0.80
1-4		100	1.00
2-1	100	100	0.50
2-2		130	0.65
2-3		160	0.80
2-4		200	1.00
3-1	150	150	0.50
3-2		195	0.65
3-3		240	0.80
3-4		300	1.00

向应变幅值 $\varepsilon_{d\max} = 5\%$ 的破坏准则时,动孔压达到有效围压的 95%,说明仪器良好,试验结果可信,可以分析钙质砂的液化特性。

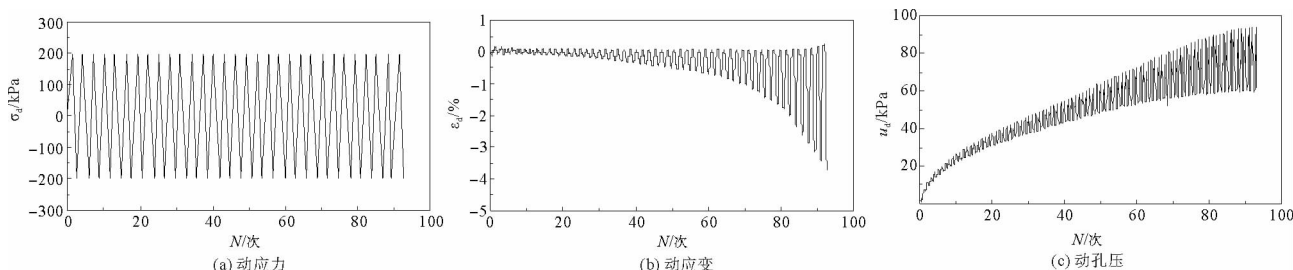


图2 钙质砂动三轴试验时程曲线

Fig. 2 Time-history curve of dynamic triaxial test for calcareous sand

2.2 动孔压(u_d)与循环周次(N)的关系

图3为钙质砂在初始动应力比 $r_d = 1.0$ 时不同有效围压下的动孔压时程曲线,从图中可以看出:①钙质砂的动孔压随着振动次数的增加而增大,有效围压越高,液化破坏所需要的振动次数越大;②孔压增长趋势相似,在液化过程前期($N < 20$ 次)孔压增长较为剧烈。这是由于在动应力作用初始阶段,钙质砂因其高孔隙比表现出很强的压缩性,使得颗粒间孔隙减小,孔压急剧上升;③试样在动应力循环作用下,轴向应变和孔压逐渐累积,孔压累积到接近围压时,孔压时程曲线在波峰处出现凹槽,表明已出现液化现象。随着动荷载的持续作用,孔压曲线波峰处的凹槽趋于稳定,此时试样完全液化,失稳破坏。

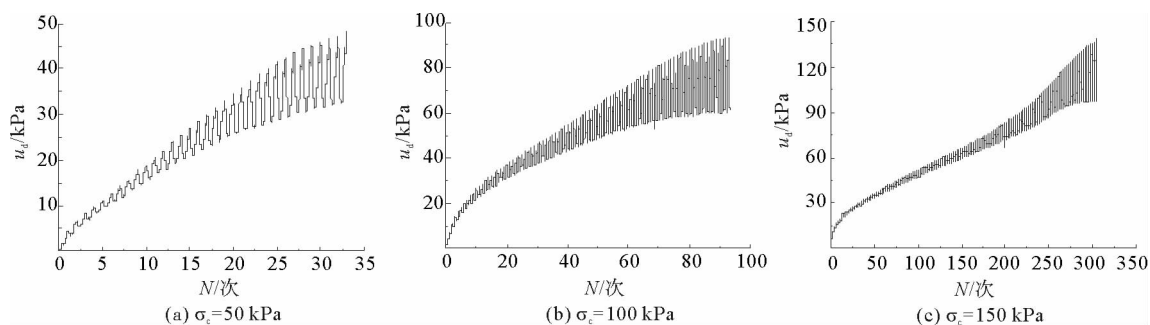


图3 不同围压下钙质砂孔压时程曲线

Fig. 3 Time history curve of calcareous sand pore pressure under different confining pressures

图4为不同围压下钙质砂循环活动性示意图,可以看出:孔压曲线波峰处稳定的凹槽形态表现为在一次加载-卸载的过程中孔隙水压力出现两个峰值,这正是循环活动性的明显特征,但是钙质砂的循环活动性与普通砂土的条件不符^[15]。这是由于钙质砂颗粒多含有内孔隙且容易发生破碎,在循环载荷加载时,颗粒受力破裂释放出大量非饱和内孔隙;卸载时,颗粒之间的接触松弛,在围压的侧向束缚作用下重新排列以趋向更加密实的稳定状态。

纪文栋等^[16]通过两个峰值之间的面积来定量表征循环活动强度,如图4中黑色阴影部分。可以看出,有效围压越高,动应力循环作用下的一次加载-卸载过程中孔隙水压力的波动幅度越大,凹槽的下凹程度也越深,阴影部分面积越大。表明随着围压的增加,钙质砂的循环活动强度在逐渐增强。

谢定义^[17]根据图像特点认为孔压曲线有三类:A(上凸型),B(凹凸微小变化型),C(下凹型)。图5是钙质砂在初始动应力比 $r_d = 1.0$ 时考虑不同有效围压影响的 $u_d/\sigma_c - N/N_f$ 关系曲线。可以看出本试验结果的孔压曲线包含A、B、C三种类型,其中有效围压为 50、100 和 150 kPa 的孔压曲线分别为 C 类、A 类和 B 类线型。由图可知,随着围压的增加,孔压曲线逐渐向 B 类的凹凸微小变化型靠近。

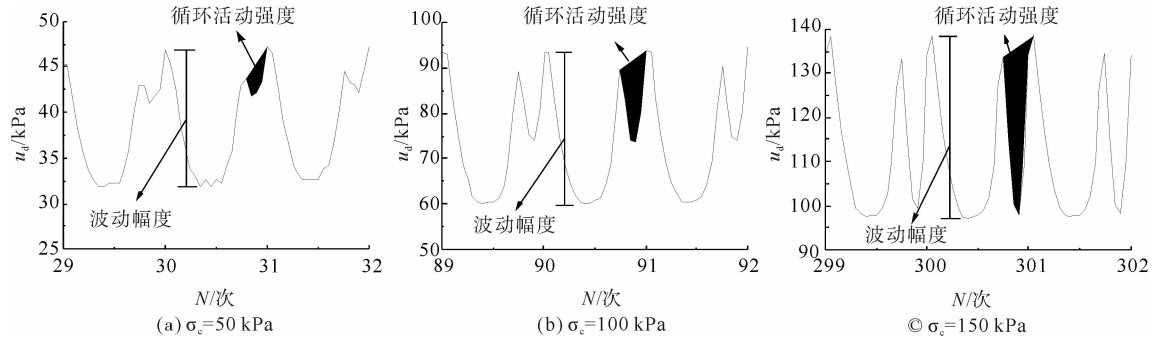
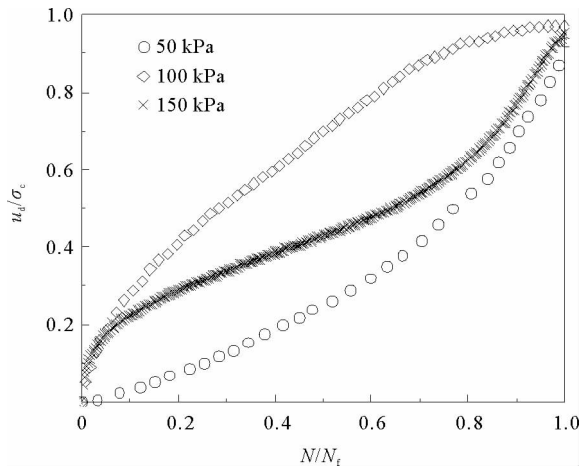
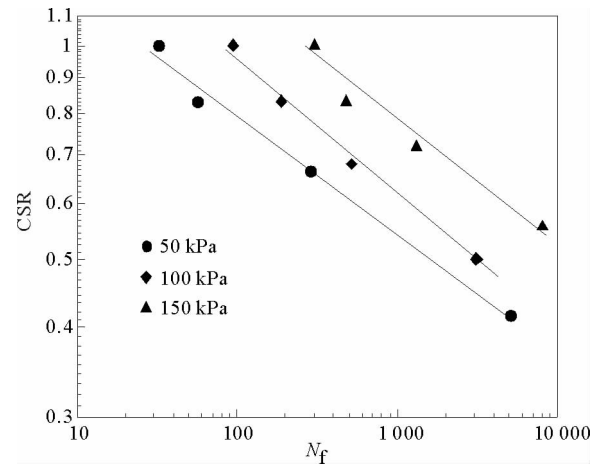


图4 不同围压下循环活动性示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cyclic mobility under different confining pressures

图5 钙质砂 $u_d/\sigma_c - N/N_f$ 关系曲线Fig. 5 Calcareous sand $u_d/\sigma_c - N/N_f$ curve图6 不同围压下钙质砂的 $C_{SR} - N_f$ 关系曲线Fig. 6 $C_{SR} - N_f$ curves of calcareous sand under different confining pressures

2.3 循环应力比与振动破坏次数(N_f)的关系

在研究地震触发砂土液化动应力条件时,张克绪^[18]提出最大往返剪切作用面的概念,定义循环剪应力幅值 τ_d 与法向静有效正压力 σ'_s 的比值叫循环应力比。把本次固结不排水动三轴试验达到液化标准所需施加的循环应力比记作 C_{SR} ,且此时的循环应力比为破坏循环应力比,用来表示在不同条件下,达到破坏标准时的动应力和振次之间的关系。其计算公式为:

$$C_{SR} = \frac{\sigma_{dmax}}{2\sqrt{K_c}\sigma_c} \quad (2)$$

式中: σ_{dmax} —动应力幅值, K_c —固结应力比, σ_c —有效围压。

围压对钙质砂的液化特性有重要影响。图6为不同有效围压下($\sigma_c=50, 100$ 和 150 kPa)钙质砂的 $C_{SR} - N_f$ 关系曲线图,从图中可以看出:相同有效围压下,破坏循环应力比 C_{SR} 越小,破坏所需振次越大,即钙质砂达到液化破坏时所需振次随着动应力幅值的增大而减小;相同 C_{SR} 值时破坏振次随着围压的增大而增加, $N_{150kPa} > N_{100kPa} > N_{50kPa}$,即有效围压越大,钙质砂越不容易发生液化。

在固结应力比 $K_c=1$ 时, C_{SR} 等于初始动应力比。由图6可知,在双对数坐标平面上, C_{SR} 与破坏时的振动次数 N_f 呈直线关系,与虞海珍等^[19]研究的钙质砂性质相一致。

2.4 累积塑性应变(ε_{dc})与循环周次(N)的关系

动应变的发展与振动次数和循环动应力比密切相关。图7(a)是钙质砂在有效围压 $\sigma_c=100$ kPa 时的累积塑性应变 ε_{dc} 随着振动次数 N 和不同动应力比 r_d 的变化情况。可以看出:①随着振动次数 N 的增加,试

样的累积塑性应变随之增大。在动荷载作用下,塑性变形持续累积,当到达某一临界值时,试样开始出现失稳,从而轴向应变急剧增长,使试样变形破坏;②随着动应力比的减小,试样变形破坏所需要的振动次数增大,试样失稳位置更加明显,且出现在更低的应变水平。这是由于钙质砂颗粒在动荷载作用下易发生破碎,较小的动应力作用下,试样到达同一累积塑性应变所需要的循环次数增大,给了钙质砂颗粒更多的时间进行重排列调整,使其变得更加紧密。而在此过程中孔压是持续发展和增长的,由于孔隙水压力的增长导致了土体的抗剪强度降低,当孔压累积到一定程度,即使轴向应变较小也会发生液化破坏。

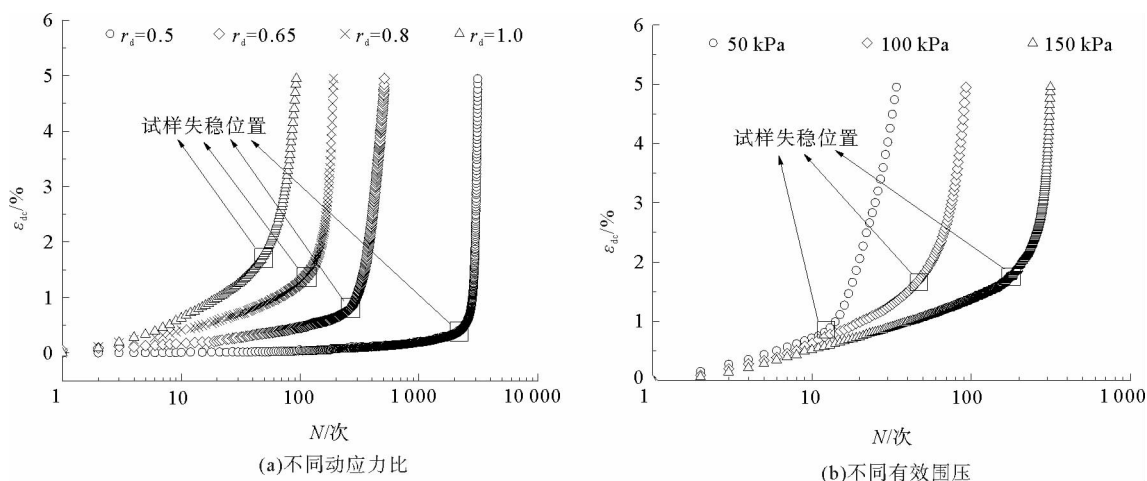


图7 钙质砂考虑不同因素的 ε_{dc} - N 关系曲线

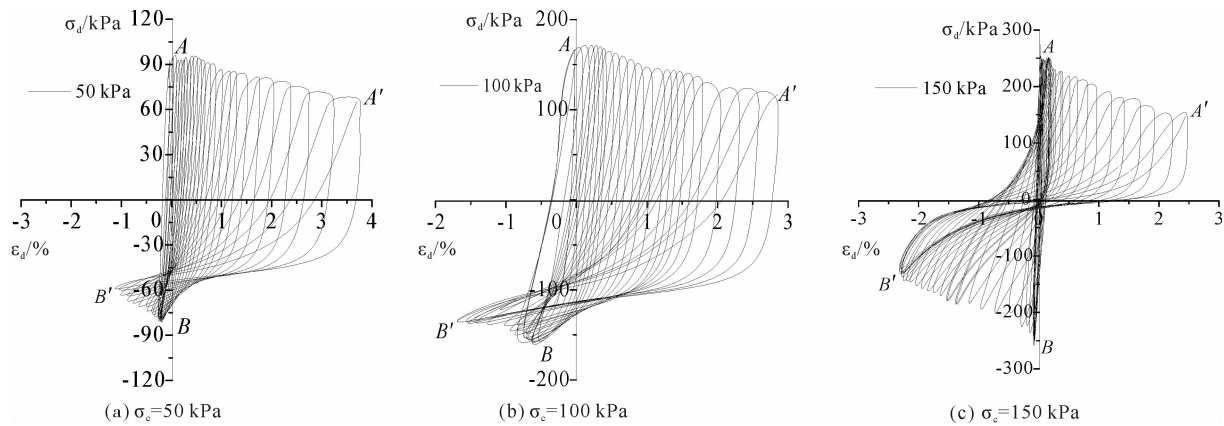
Fig. 7 ε_{dc} - N curve of calcareous sand considering different factors

图7(b)是在动应力比为1.0时,不同围压下钙质砂的累积塑性应变 ε_{dc} 随着振动次数 N 的关系曲线。从图中可以看出,随着有效围压的增大,变形破坏所需要的振动次数增加,试样失稳位置出现在更高的应变水平。这是由于围压的增加,使得试样受到的侧向束缚作用增大,产生相同的轴向应变时颗粒破碎程度增大,更多的内孔隙被释放,给孔压更大的消散空间。因此需要累积更多的塑性变形才会使孔压逐渐累积达到失稳位置,从而变形破坏。

2.5 动应力(σ_d)与动应变(ε_d)的关系

滞回曲线可较好地反映土的动应力-应变关系特性。图8是在初始动应力比 $r_d = 1.0$ 时钙质砂在不同有效围压下的滞回曲线,图中 A 、 A' 表示滞回曲线的最大正应力点, B 、 B' 表示滞回曲线的最大负应力点。从图中可以看出:①钙质砂的滞回曲线随着循环振次的增加逐渐偏移,最大正应力和最大负应力均逐渐减小,减幅随围压升高而增大,负应力方向表现更明显;②从起始的 AB 线到破坏时的 $A'B'$ 线,连线斜率变小,表明钙质砂的抗剪强度减小。这是由于饱和的钙质砂在循环荷载作用下产生一时不可恢复的残余孔隙水压力,使有效应力逐渐由砂土骨架转移到水;③液化破坏时的 $A'B'$ 线与横轴之间存在一定倾角,随着有效围压增加,倾角在逐渐减小。表明钙质砂液化后的颗粒骨架结构仍然存在一定的残余强度,且围压越高,钙质砂残余强度越低。

为更直观的分析滞回曲线的演化特征,选取典型周数进行分析,图9是钙质砂在不同循环周期对应的滞回曲线(初始动应力比 $r_d = 1.0$, 有效围压 $\sigma_c = 150$ kPa),图9(a)(b)(c)分别对应滞回曲线发展的前期、中期和后期,可以看出:①钙质砂试样的应力应变滞回圈有着明显的阶段性发展特征,即前期的稳定发展阶段,中期的剧烈变化阶段和后期的趋于稳定阶段;②钙质砂的滞回曲线仅在前期保持了较规则形状,封闭且关于原点基本对称;随着振动次数的增加,滞回曲线发生明显变化,并且在试验的后期,循环次数的增加依然对滞回曲线有显著的改变。原因在于,循环荷载作用前期主要发生砂粒之间的相互错动,变形不大;随着动荷载的持续作用,钙质砂的易破碎性得以显现,应变逐渐增加;到加载后期,由于颗粒结构的破坏,产生了大量不可恢复的塑性变形,试样承受荷载的能力减小,应变幅值也逐步增大,导致试样软化破坏。



- HUANG Yu, YU Miao, BHATTACHARYA S. Review on liquefaction-induced damages of soil and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834-840.
- [2] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 209-212.
LIU Chongquan, WANG Ren, WU Xinsheng. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 209-212.
- [3] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FREITAS T. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [4] 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.
- [5] 朱长岐, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内空隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831-1836.
ZHU Changqi, CHEN Haiyang, MENG Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831-1836.
- [6] 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.
- [7] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491-497.
REN Yubin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 491-497.
- [8] 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.
- [9] SALEM M, ELMAMLOUK H, AGAIBY S. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55: 83-91.
- [10] 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 Jianguo. Experimental research on dynamic behavior of saturated calcareous sand under wave loading[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [11] 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 sand under cyclic triaxial stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 755-760.
- [12] 刘汉龙, 胡鼎, 肖杨, 等. 钙质砂动力液化特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 707-711.
LIU Hanlong, HU Ding, XIAO Yang, et al. Test study on dynamic liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 707-711.
- [13] 孟庆山, 秦月, 汪稔. 珊瑚礁钙质沉积物液化特性及其机理研究[J]. 土工基础, 2012, 26(1): 21-24.
MENG Qingshan, QIN Yue, WANG Ren. Liquefaction characteristics and mechanism of coral reef sediments[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(1): 21-24.
- [14] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [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.
- [16] 纪文栋, 张宇亭, 裴文斌, 等. 钙质珊瑚钙质砂液化特性的动三轴试验研究[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 101-106.
JI Wendong, ZHANG Yuting, PEI Wenbin, et al. Study on the coral sand liquefaction characteristics by dynamic triaxial test[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(1): 101-106.
- [17] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [18] 张克绪. 饱和砂土的液化应力条件[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1): 99-109.
ZHANG Kexu. Stress condition inducing liquefaction of saturated sand[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(1): 99-109.
- [19] 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.