

文章编号:1005-9865(2018)06-0124-06

未胶结钙质砂静力和循环强度的单剪试验研究

王晓丽,裴会敏,王 栋

(中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室,山东 青岛 266100)

摘 要:通过等体积的单调和循环单剪试验研究南海未胶结钙质砂的静、动力反应,讨论应力水平和相对密实度对钙质砂静、动力强度的影响,并与典型的石英砂性质进行比较。在单调单剪试验中,中密和密实钙质砂在 100~400 kPa 范围的初始竖向应力下都表现出应变硬化的性质,有效内摩擦角随剪应变增大。在循环单剪试验中,钙质砂的反应与相对密实度和初始竖向应力密切相关,但中密和密实钙质砂中的等效孔压都能达到初始竖向应力的 85%~90%,此时剪应变突增,试样发生破坏。与相近密实度的石英砂相比,钙质砂抵抗液化的能力更强。提出了南海钙质砂动强度的归一化表达式,建立了不排水静强度、不排水动强度和循环次数之间的关系。

关键词:钙质砂;单剪试验;循环荷载;液化;应力水平;相对密实度;南海

中图分类号:TU411.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2018.06.015

Static and dynamic strengths of uncemented calcareous sand from simple shear tests

WANG Xiaoli, PEI Huimin, WANG Dong

(Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The monotonic and cyclic simple shear tests with constant volume were conducted to study the static and dynamic responses of uncemented calcareous sand in South China Sea. The effects of stress levels and relative densities on the static and dynamic strengths were discussed, with comparison between the calcareous sand and typical silica sand. In monotonic simple shear tests, the medium dense and dense calcareous sands exhibited strain-hardening as the initial vertical stress ranged from 100 to 400 kPa. In the cyclic tests, the responses of calcareous sand depended on both the relative density and initial vertical stress. However, the equivalent excess pore pressures in both the medium dense and dense sands could reach 85%~90% of the initial vertical stress, accompanied by sudden increase of the shear strain and failure of samples. The potential to resist liquefaction of calcareous sand was better than silica sand at the similar relative density. For calcareous sand in South China Sea, a normalized expression of dynamic strength was proposed to get the relationship between undrained static strengths, undrained dynamic strengths and cyclic numbers.

Keywords: calcareous sand; simple shear tests; cyclic loading; liquefaction; stress level; relative density; South China Sea

钙质砂又称珊瑚砂,是一种生物成因的海洋沉积物,广泛分布在我国南海、东南亚、中东和南太平洋岛国的陆上和近海地区^[1]。钙质砂场地上的桥梁、港口和海洋平台建设必须充分考虑钙质砂特殊的物理和力学性质,如澳大利亚西北大陆架的 North Rankin A 导管架平台打桩时多次发生溜桩,桩侧摩阻力仅有 10~40 kPa,远低于初始设计值,最终不得不更改基础形式,造成严重的经济损失^[2-3]。钙质砂颗粒之间可能存在

收稿日期:2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41772294)

作者简介:王晓丽(1993-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事岩土工程研究。E-mail: wangxiaoli@stu.ouc.edu.cn

通信作者:王 栋。E-mail: dongwang@ouc.edu.cn

胶结,也可能无明显胶结^[4]。动三轴试验中无胶结钙质砂的动力特性与石英砂类似,动强度依赖于试样的相对密实度、有效围压、循环强度比和剪切类型。随着荷载循环次数的增加,钙质砂中的孔隙水压力不断发展,最终达到液化,达到液化时的循环次数随相对密实度的增大而增大,随有效围压和循环强度比的增大而减小^[5-6]。

以往的钙质砂循环试验研究大多是借助动三轴仪^[5-6],而循环单剪仪能够更真实地再现水平剪切作用下土体的应力状态。挪威岩土工程研究所和瑞典岩土工程研究所开发了两种最具代表性的循环单剪仪^[7-8]:前者将试样放置到加筋橡皮膜中,而后者则通过叠置的光滑薄铁环限制试样的侧向变形。大部分循环剪切试验采用等体积条件,即在试验过程中打开排水阀,通过保持试样高度不变实现体积恒定。这种等体积试验等效于不排水剪切^[9-10],为了保证试样高度不变,施加的竖向应力会增大或减小,竖向应力的改变等于不排水条件下产生的超静孔隙水压力 u_w 。Porcino 等^[11]对法国西北部 Quiou 钙质砂、Mao 等^[12]对澳大利亚西北大陆架 Legendre 钙质砂进行了单剪试验研究发现:单调剪切中钙质砂表现出应变硬化,内摩擦角约 40° ;循环剪切的应力-应变曲线与石英砂类似。Porcino 等^[11]建议按相位转换点处的静不排水抗剪强度推测动强度。钙质砂的力学性质与其所处的地质和水文环境密切相关,往往具有较强的区域特征。目前还不清楚 Quiou 砂和 Legendre 砂表现出的规律是否适用于中国南海钙质砂。

钙质砂受到暴风浪和地震等动力荷载作用,研究水平循环剪切荷载作用下钙质砂的动力反应对于近海地基基础设计具有重要意义。对南海典型未胶结钙质砂进行一系列的单调和循环单剪试验,分析钙质砂的静、动力反应,讨论应力水平和相对密实度对钙质砂静、动力强度的影响,并与陆上石英砂性质进行比较。在此基础上,提出南海钙质砂动强度的归一化表达。

1 试验介绍

1.1 试样基本参数

试验所用钙质砂试样取自南海某岛礁,未胶结,颗粒形状多为不规则粒状,表面粗糙,少量呈长条状,大于 2 mm 的粒径占 23%左右,如图 1 所示。钙质砂颗粒形状不规则、多棱角,在压缩和剪切作用下可能发生破碎,而颗粒破碎会引起体积压缩,影响土的强度和剪胀性^[13-14]。为考察所采用的钙质砂的颗粒破碎性质,进行单向压缩试验,然后重新测定试样的粒径分布。利用大型单向压缩仪对 10 mm 以下的粒径进行压缩试验,竖向力增加到 2.7 MPa 时仍没有明显的颗粒破碎。由于使用的单剪仪容许试样高度不超过 20 mm,因此筛除原始试样中大于 2 mm 的粒径,以避免尺寸效应。筛后的钙质砂试样和作为对比的石英砂(厦门标准砂)的粒径分布曲线如图 2 所示,试样的基本物理参数如表 1 所示。图 2(a)为竖向压力达到 1.2 MPa 时粒径不超过 2 mm 的钙质砂的级配曲线,试样基本不发生破碎。因此在后续的单剪试验中不考虑钙质砂的颗粒破碎。

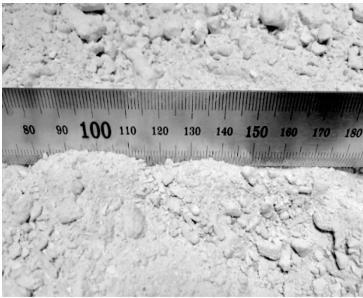


图 1 试验所用南海钙质砂试样
Fig. 1 The calcareous sand sample from South China Sea

表 1 试样基本物理参数
Tab. 1 Basic physical parameters of the sample

$e_{\min}$	$e_{\max}$	D_{60}/mm	D_{30}/mm	D_{10}/mm	G_s
0.560	1.275	0.730	0.235	0.072	2.73

1.2 单剪试验方案

单调和循环剪切试验均采用英国 GDS 生产的循环单剪仪,通过叠置的铁环限制试样的侧向变形。竖向力和水平力传感器最大量程为 5 kN,精度为 5 N;位移传感器量程为 25 mm,精度为 0.001 mm。制备试样时,在叠置的光滑铁环内套橡皮膜,在橡皮膜内撒砂,制成试样高度 20 mm、直径 70 mm,采用水头饱和法对试样充分饱和,饱和时间一般不少于 1.5 h。为研究相对密实度 D_r 和初始竖向应力 σ'_0 的影响,制备中密和密实两

种钙质砂样。由于施加竖向力后,试样的相对密实度会随之增大,因此在试样制备时根据所施加压力的大小调整初始相对密实度,保证施加竖向力后的相对密实度相差不大。施加的竖向力与固结后的相对密实度和干密度如表 2 所示。同时制备相对密实度接近密实钙质砂的石英砂试样,以进行比较。

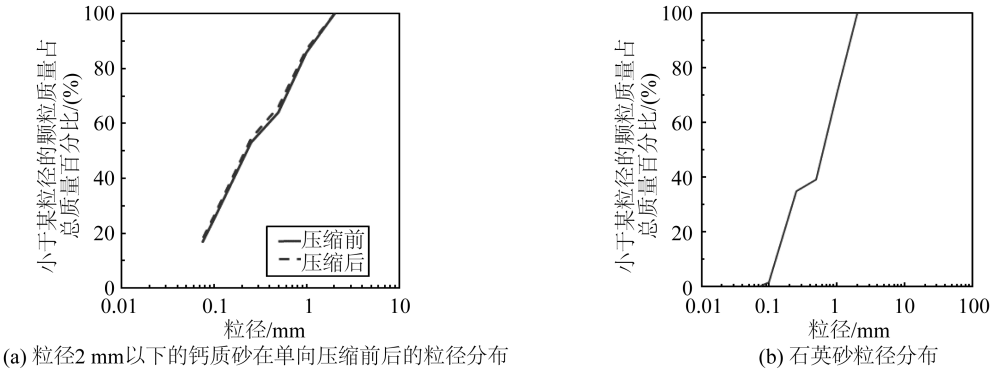


图 2 试样级配分布曲线

Fig. 2 The particle size distribution curves of calcareous sand and silica sand

表 2 单剪试验中试样固结后的相对密实度和干密度

Tab. 2 Relative densities and dry densities of samples after consolidation in simple shear tests

试样类型	σ'_{v0} /kPa	D_r /(%)	干密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
钙质砂	100	54	1 445
钙质砂	200	55	1 451
钙质砂	400	55	1 451
钙质砂	100	76	1 577
钙质砂	200	79	1 596
钙质砂	400	80	1 603
石英砂	100	76	1 710
石英砂	400	80	1 723

单调和循环剪切均采用等体积法,即剪切过程中保持试样高度不变以实现体积不变,试验中观察到几乎没有水排出。单调剪切采用位移控制,施加的水平速率为 0.1 mm/min,当剪应变 γ (水平位移与试样实时高度的比值) 达到 20% 时停止试验。循环剪切采用力控制,正弦形式的对称加载,频率为 0.1 Hz。记录竖向应力(即等效孔隙水压力)和应变的发展^[15],当剪应变出现明显突增后停止试验。定义水平循环剪应力幅值 τ_{cyc} 与初始竖向应力的比值 $\tau_{\text{cyc}}/\sigma'_{v0}$ 为循环强度比。改变循环强度比,研究其对钙质砂和石英砂动强度的影响。

2 试验结果分析

2.1 单调剪切

图 3 为钙质砂单调剪切试验获得的应力路径、应力-应变关系和等效超静孔压-应变关系。其中 σ'_v 为实时竖向应力, τ 为剪应力, u_w 为等效超静孔压。当初始竖向应力不超过 400 kPa 时,中密砂和密砂沿着相似的应力路径:1) 试样受剪后首先出现体积减小趋势,初始竖向应力不超过 200 kPa 时对应的剪切应变范围小于 2%, 400 kPa 时小于 3%。为保证试样高度不变,施加的竖向力减小,等效孔压上升。2) 随后应力路径达到相位转换点,如图 3 所示,之后试样体积膨胀,竖向应力随之增大以保持体积不变,等效孔压下降,试样表现为应变硬化,没有明显的破坏点,应力路径最终会沿着一条直线运动,这与三轴不排水试验中观察到的现象一致^[5]。为方便在图中表示钙质砂的单调剪切试验结果,按照相对密实度和初始固结应力水平对试验编号,例如 D54S100 表示在初始固结应力为 100 kPa 下固结后相对密实度为 54% 的试样。

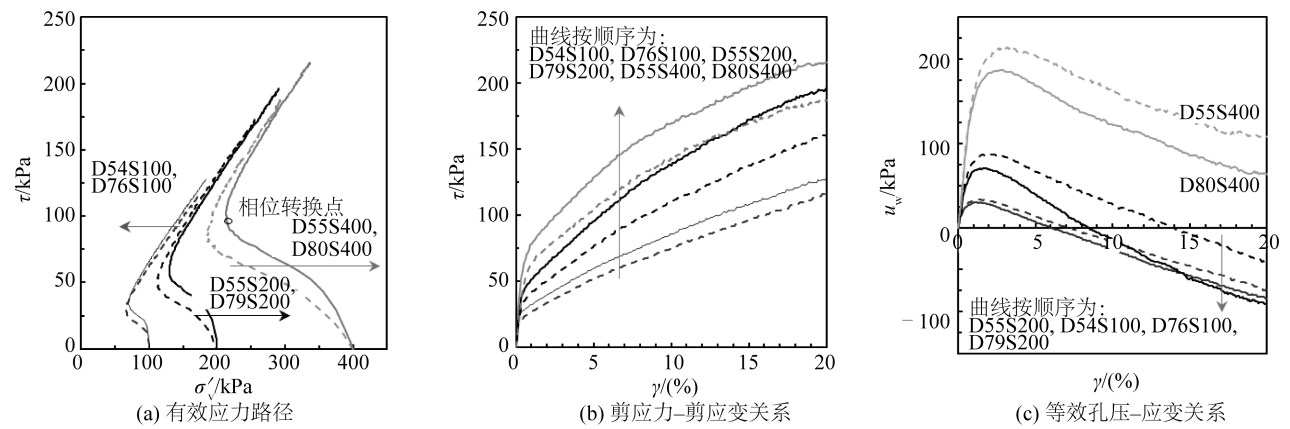


图 3 钙质砂的单调剪切试验结果

Fig. 3 The response of calcareous sands in monotonic shear tests

单调剪切试验的内摩擦角通过下式求得^[11]：

$$\varphi' = \sin^{-1}(\tau/\sigma'_v) \tag{1}$$

有效应力条件下,相位转换点、 $\gamma = 5\%$ 和 20% 时的内摩擦角如表 3 所示, $\gamma = 20\%$ 时的内摩擦角与以往单剪和三轴试验得到的临界内摩擦角接近^[12, 16]。

在打桩等实际应用中,钙质砂中的孔隙水来不及排出,应采用不排水强度进行设计^[3]。虽然应变硬化使钙质砂具有很高的不排水抗剪强度,但需要较大的剪切应变(例如 20%)才能完全发挥出来,而实际工程中通常不允许地基土达到如此大的应变。Porcino 等^[11]和 Carter 等^[17]建议在单调剪切中取相位转换点处的剪应力 τ_{PT} 为设计不排水强度,因此本文定义 τ_{PT}/σ'_{v0} 为静强度比,结果如表 3 所示。

表 3 单调剪切试验中不同状态下钙质砂的内摩擦角及相位转换点处的应力比
Tab. 3 Internal friction angles and stress ratios at phase transformation points in monotonic shear tests (calcareous sands)

$D_r/(%)$	σ'_{v0}/kPa	$\varphi'_{PT}/(^{\circ})$	$\varphi'_{\gamma=5\%}/(^{\circ})$	$\varphi'_{\gamma=20\%}/(^{\circ})$	τ_{PT}/σ'_{v0}
54	100	26.1	36.9	42.8	0.29
55	200	26.1	34.7	41.3	0.25
55	400	26.7	32.0	39.8	0.21
76	100	28.7	40.5	43.6	0.34
79	200	26.7	36.9	42.1	0.29
80	400	28.7	35.4	40.5	0.26

2.2 循环剪切

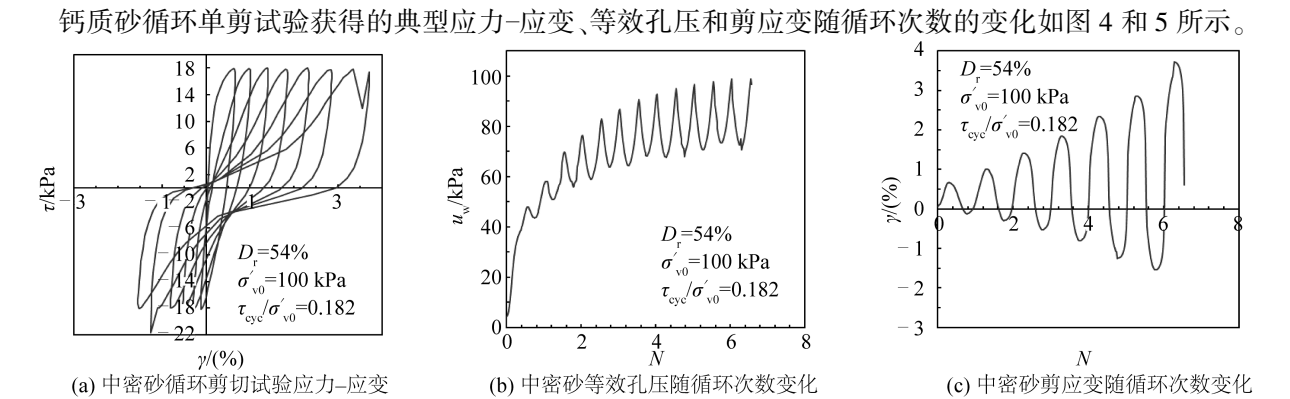


图 4 循环剪切试验中密钙质砂的反应

Fig. 4 The response of medium dense calcareous sand in cyclic shear test

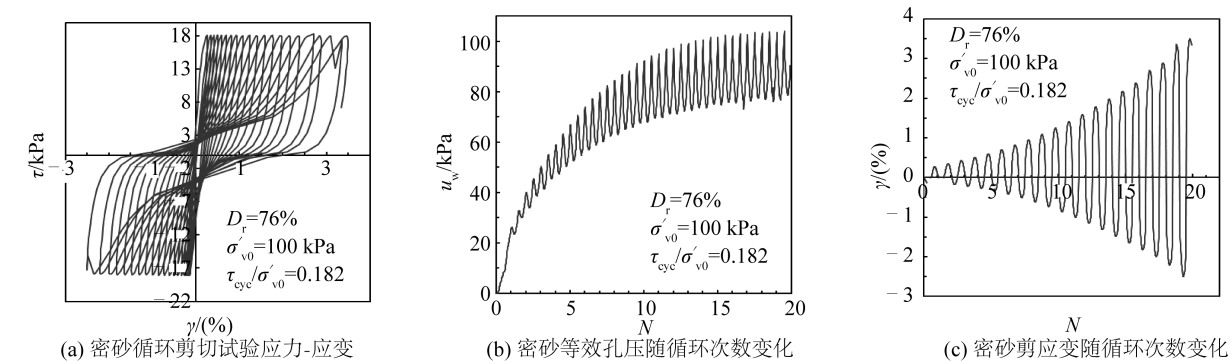


图 5 循环剪切试验密实钙质砂的反应

Fig. 5 The response of dense calcareous sand in shear test

对于 $D_r = 54\%$ 的中密砂, 试样在初始的几个循环中就表现出明显的应变累积, 等效孔压也迅速增高, 尤其是第一个循环 u_w 就达到了初始竖向应力的 43%。对于 $D_r = 76\%$ 的密砂, 第一个循环产生的 u_w 只有 σ'_{v0} 的 22%, 在后续的循环中剪应变和超静孔压逐渐累积, 在第 17 个循环, 剪应变突增, 此时仪器已难以维持稳定的水平力幅值, 即可认为试样发生破坏。无论中密还是密实钙质砂, 等效孔压最终达到初始竖向力的 85% ~ 90%, 即不排水或部分排水条件下中密和密实钙质砂存在液化的可能性。

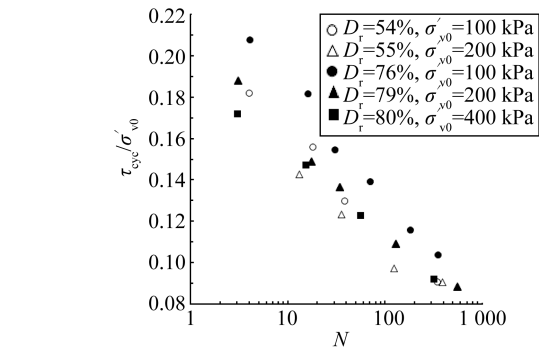


图 6 不同相对密度的钙质砂循环强度比与循环次数关系曲线

Fig. 6 Relationships between cyclic stress ratio and cyclic number of calcareous sand with different relative densities

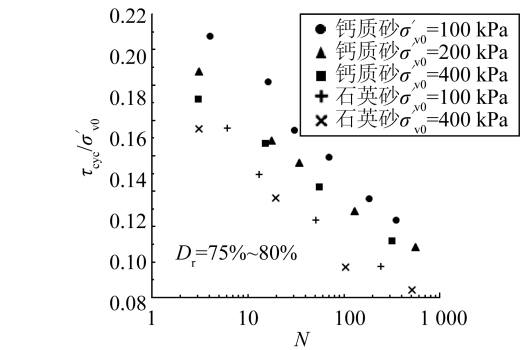


图 7 钙质砂和石英砂试样循环强度比与循环次数关系曲线

Fig. 7 Relationships between cyclic stress ratio and cyclic number of calcareous and silica sands

图 6 将中密、密实钙质砂破坏时的循环次数和循环强度比 (τ_{cyc}/σ'_{v0}) 的关系用半对数坐标表示。在相同的循环强度比下, 破坏时的循环次数随 D_r 的增大而增大, 随 σ'_{v0} 的增大而减小。图 7 比较 $D_r = 75\% \sim 80\%$ 的钙质砂和石英砂的试验结果发现, 在相同的循环强度比和初始竖向力下, 钙质砂达到破坏时的循环次数高于石英砂, 这意味着钙质砂试样的循环不排水强度大于厦门标准砂。对比钙质砂和石英砂在 $\sigma'_{v0} = 100$ 和 400 kPa 时的结果发现, 在某一循环强度比下, 石英砂破坏时的循环次数受有效应力的影响相对较小, 而钙质砂在两种初始竖向力作用下达到破坏时循环次数的差别较为显著。

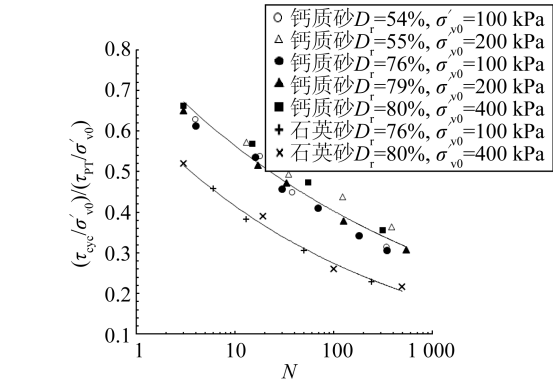


图 8 钙质砂和石英砂静强度比、循环强度比与循环次数之间的关系

Fig. 8 Relationship between static strengths, dynamic strengths and cyclic numbers for calcareous and silica sands

2.3 归一化的循环强度比与循环次数关系

单调剪切试验中表现出应变硬化的土可以用对应的静态不排水强度推测动不排水强度^[11]。单剪试验得到的静强度比 (τ_{PT}/σ'_{v0}) 和循环强度比 (τ_{cyc}/σ'_{v0}) 的比值随循环次数的变化如图 8 所示。拟合数据得到:

$$(\tau_{\text{cyc}}/\sigma'_{v0})/(\tau_{\text{PT}}/\sigma'_{v0}) = aN^{-b} \quad (2)$$

其中, a 、 b 为常数。对于南海无胶结钙质砂, $a=0.79$, $b=0.15$; 对于石英砂, $a=0.63$, $b=0.18$ 。式(2)可用于获得砂土的静态强度后预测不同初始竖向应力和循环荷载幅值组合对应的破坏循环次数。相同循环次数下, 钙质砂的 $\tau_{\text{cyc}}/\tau_{\text{PT}}$ 明显高于石英砂, $N=10$ 时前者比后者高约 35%, $N=100$ 时高约 45%。

3 结 语

对取自南海某岛礁的未胶结钙质砂进行保持体积不变的单调和循环单剪试验。在单调剪切试验中, 中密和密实钙质砂在 100~400 kPa 范围的初始竖向应力下都表现出应变硬化的性质, 试样没有明显的破坏点。在循环剪切试验中, 中密和密实钙质砂的等效孔压达到初始竖向应力的 85%~90% 时, 剪应变突增, 试样发生破坏。达到破坏时的循环次数随相对密实度的增大而增高, 随初始竖向力的增大而降低。与相近密实度的厦门标准砂相比, 钙质砂试样的循环不排水强度更高。在总结试验数据的基础上, 提出了钙质砂动强度的归一化表达式, 实现了通过不排水静强度预测动强度。

参考文献:

- [1] 王新志, 王星, 刘海峰, 等. 珊瑚礁地基工程特性现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2065-2070. (WANG Xinzhi, WANG Xing, LIU Haifeng, et al. Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2065-2070. (in Chinese))
- [2] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299-304. (SHAN Huagang, WANG Ren. Development of study on pile in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 299-304. (in Chinese))
- [3] DOLWIN J, KHORSHID M S, VAN G P. Evaluation of driven pile capacity- methods and results [C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. 1988(2): 409-428
- [4] SHARMA S S, FAHEY M. Evaluation of cyclic shear strength of two cemented calcareous soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(7): 608-618.
- [5] QADIMI A, COOP M R. The undrained cyclic behaviour of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2007, 57(9): 739-750.
- [6] 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(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(6): 707-711. (in Chinese))
- [7] BJERRUM L, LANDVA A. Direct simple-shear tests on a norwegian quick clay[J]. Geotechnique, 2015, 16(1): 1-20.
- [8] KJELLMAN W. Testing the shear strength of clay in sweden[J]. Geotechnique, 1951, 2(3): 225-232.
- [9] FINN W D L. Aspects of constant volume cyclic simple shear [C]//Proceedings of the Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions. ASCE, 2010.
- [10] DYVIK R, BERRE T, LACASSE S, et al. Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 3-10.
- [11] PORCINO D, GHIONNA V N, CARIDI G. Undrained monotonic and cyclic simple shear behaviour of carbonate sand[J]. Geotechnique, 2008, 58(8): 635-644.
- [12] MAO X, FAHEY M. Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear[J]. Geotechnique, 2003, 53(8): 715-727.
- [13] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [14] 汪轶群, 洪义, 国振, 等. 南海钙质砂宏观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018(1): 199-206. (WANG Yiqun, HONG Yi, GUO Zhen, et al. Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(1): 199-206. (in Chinese))
- [15] VAID Y P, CHERN J C. Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands[J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, 2(3): 171-177.
- [16] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Geotechnique, 1990, 40(40): 607-626.
- [17] CARTER J P, AIREY D W, FAHEY M. A review of laboratory testing of calcareous soils [C]//Proceedings of the International Conference on Engineering for Calcareous Sediments. 2000: 401-431.