

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.009

齐永正, 袁梓瑞, 杨永恒. 不同正压力下钙质砂颗粒剪切破碎特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 63-68. (QI Yongzheng, YUAN Zirui, YANG Yongheng. Shear breakage characteristics of calcareous sand particles under different normal pressures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 63-68. (in Chinese))

不同正压力下钙质砂颗粒剪切破碎特性分析

齐永正^{1,2}, 袁梓瑞¹, 杨永恒¹

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212000; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 钙质砂受力后易产生颗粒破碎, 从而使其力学性质发生变化。对取自我国南沙某岛礁的钙质砂样进行了不同正压力下的直剪试验。分析了钙质砂颗粒剪切破碎特性, 并就不同试验压力下剪切后钙质砂样的颗粒破碎程度通过筛分试验进行了粒径级配分析。结果表明, 在不同正压力下进行直剪试验, 钙质砂存在一定的颗粒破碎现象, 随着正压力增大, 颗粒破碎越来越严重; 由于钙质砂颗粒破碎的影响, 剪切后钙质砂的颗粒级配性质发生改变, 随正压力增大钙质砂由级配良好逐渐变得级配不良。钙质砂直剪试验强度包络线为峰值强度包络线, 而非残余强度包络线。钙质砂残余强度的摩擦角数值等于或接近砂的天然休止角。从工程安全角度考虑, 选用钙质砂的内摩擦角应等于或接近天然休止角。

关键词: 正压力; 钙质砂; 剪切; 颗粒破碎

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)05-0063-06

天然胶结钙质砂^[1]是广泛分布于热带及亚热带海洋中由生物碎屑经碳酸钙胶结或固结而形成的碳酸盐岩类, 其分布范围覆盖了大陆架 50% 的面积, 有超过 55% 的海床为钙质砂所覆盖。我国的南海岛礁上广泛地分布着天然胶结钙质砂^[2-6], 颗粒矿物组成以文石、方解石为主(达 90% 以上)。研究发现, 天然胶结钙质砂具有高孔隙比、颗粒易破碎且胶结不均匀等特征, 与常规陆源砂相比, 钙质砂在较低围压下就会产生颗粒破碎。其独特的工程性质常常给岩土工程设计与施工带来麻烦, 有时造成工程事故。由于钙质砂特殊的工程性质, 促进了人们对天然胶结钙质砂物理力学性质的深入研究。朱长歧等^[7]采用宏微观相结合的研究手段, 通过对钙质砂物理与力学参数间的相关关系进行分析, 认为密度和胶结度是控制海滩岩强度的主要参数, 单轴抗压强度随着密度及胶结度的增加而明显增大; 孔隙率及颗粒粒径对单轴抗压强度的影响不明显。袁征等^[8]从珊瑚礁岩土的工程地质特性研究中得出: 颗粒易破碎是钙质砂最重要的特性, 直接影响着钙质砂的其他力学性能, 而影响钙质砂颗粒破碎的主要因素有围压、有效应力、颗粒级配、初始孔隙比、颗粒强度、颗粒形状等; 生物颗粒的易破碎及成桩过程对钙质砂结构的扰动, 导致钙质砂中的桩基承载力远低于普通石英砂。毛炎炎等^[9]对钙质砂进行了考虑颗粒破碎的钙质砂压缩特性试验研究, 试验结果表明, 粒径越大钙质砂颗粒越容易破碎, 由此引发的形变越大; 不同含水率条件下, 颗粒破碎机制不同, 低含水率时, 颗粒破碎随含水率的增加而加剧, 高含水率时, 颗粒破碎随含水率的增加而减弱; 含水率对压缩变形影响显著, 不同含水率条件下的钙质砂压缩性不同。张家铭等^[10-11]对取自南沙群岛永暑礁附近海域的钙质砂进行了不同围压、不同应变下的三轴剪切试验, 对试验前后的试样进行了颗粒大小分析, 结果表明, 钙质砂在三轴剪切作用下颗粒破碎十分严重, 颗粒破碎对钙质砂强度有着重要影响。王帅等^[12]利用液压万能试验机在侧限条件下

收稿日期: 2018-01-28

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2015071); 江苏省交通科技项目(2017T12); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_2336)

作者简介: 齐永正(1974—), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士, 主要从事软基处理及海洋岩土等方面的研究。

E-mail: zmxtree@163.com

对混合粒组钙质砂进行高压加载,研究终止压力、平均粒径、干密度等因素对颗粒破碎影响。汪轶群等^[13]对钙质砂开展电镜扫描试验并对扫描结果进行图像分析,获取了钙质砂的颗粒形状特征,同时通过三轴固结排水试验,揭示了颗粒破碎对钙质砂变形、强度、能量耗散等特性的影响。

以上分析表明,钙质砂颗粒易碎是钙质砂的重要特性,而影响钙质砂颗粒破碎的因素很多,特别是不同工况下钙质砂颗粒破碎情况是不同的。国内外对钙质砂的研究集中在高、低围压下的钙质砂静、动力学性质上,集中在颗粒破碎影响因素上,对破碎本身的机理则缺乏系统认识。因此,本文研究不同正压力作用下受水平剪切作用钙质砂颗粒破碎特性,为钙质砂颗粒破碎特性研究提供一种思路。

1 试验材料及过程

选取我国南海某岛礁钙质砂样,进行室内物理力学指标试验。试验得出该钙质砂的含水率为 9.53%,饱和含水率为 48.2%,密度为 2.78 g/cm^3 ,天然休止角为 32.6° 。

试验主要仪器包括应变控制式直剪仪;20,10,5,2,1,0.5,0.25 和 0.075 mm 系列标准筛。

试验过程为:

(1) 烘干钙质砂样。将钙质砂样放入烘箱内烘干存放。

(2) 钙质砂样筛分处理。取烘干后的原钙质砂样 300 g 进行筛分试验。在振筛机上进行颗粒筛分,为减少筛分过程中钙质砂的颗粒破碎,严格控制筛分时间为 15 min^[12]。

(3) 钙质砂样直剪试验。取 4 份烘干后的原钙质砂样,每份约 300 g,分别在 100, 200, 300 和 400 kPa 正压力下直剪试验。为了保证钙质砂剪切试验的密实度以及减少钙质砂装样中的颗粒破碎,装样时轻微晃动和敲击剪切盒侧壁,砂样装毕后施加 100 kPa 的预加压力 10 min。直剪试验后的砂样如图 1 所示。

(4) 剪切钙质后砂样筛分处理。剪切后取出砂样,分别对不同正压力下直剪后的砂样进行颗粒筛分。为减少筛分过程中钙质砂的颗粒破碎,在振筛机上的筛分时间控制为 15 min^[12]。

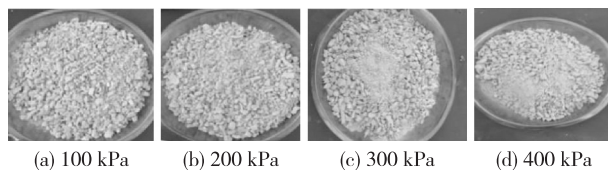


图 1 不同正压力下剪切后的钙质砂样

Fig. 1 Calcareous sands by direct shear tests under different normal pressures

2 试验结果与分析

2.1 原钙质砂样筛分结果与分析

原钙质砂样经标准筛筛分,得到初始钙质砂样的颗粒粒径分配曲线见图 2。

由图 2 可知, $d_{60} = 3.96 \text{ mm}$, $d_{30} = 2.28 \text{ mm}$, $d_{10} = 0.63 \text{ mm}$,得钙质砂样不均匀系数 C_u 为 6.3,曲率系数 C_c 为 2.1,说明该钙质砂样级配良好。原钙质砂样粒径小于 5 mm 的土颗粒质量占总质量的 72%,20~10 mm 和 1~0.075 mm 粒径区间的曲线较平缓,可知该粒径区间的钙质砂颗粒较少;10~1 mm 粒径区间为曲线陡降段,可知该粒径区间内的颗粒较多。

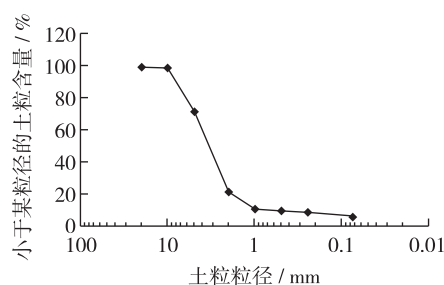


图 2 原钙质砂样粒径分布曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of initial calcareous sands

2.2 不同正压力下剪切后钙质砂筛分结果与分析

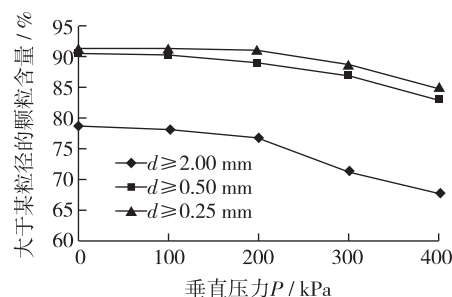
钙质砂样在不同正压力下剪切试验后的颗粒粒径分布曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,5 组钙质砂样颗粒粒径分布曲线趋势基本一致。原钙质砂样和 100 kPa 正压力下剪切后的砂样粒径分布曲线几乎重合,表明 100 kPa 正压力直剪试验对该钙质砂的破碎影响较小,剪切前后 2 mm 以下钙质砂颗粒含量分别为 21.4% 和 21.9%,几乎没变化。从 200 kPa 正压力开始,随着压力增大到 300 和

400 kPa, 粒径 2 mm 以下钙质砂颗粒含量由 23.2% 增至 28.7% 和 32.1%, 说明随着正压力增大, 颗粒破碎越来越多。

图 4(a) 为不同正应力剪切后大于某粒径的钙质砂颗粒含量变化趋势曲线, 可见, 粒径 $d \geq 2.00$ mm 的砂样颗粒含量随正压力加大持续减少, 并在大于 200 kPa 正压力后加速减少; 大于等于 0.50 mm 和 0.25 mm 砂样颗粒含量的变化趋势也基本一致。说明粗颗粒持续减少, 钙质砂出现了越来越多的颗粒破碎。

图 4(b) 为不同正应力直剪试验后颗粒粒径区间钙质砂颗粒含量变化趋势曲线, 可见, 2.00~0.50 mm 粒径区间颗粒含量随正压力加大总体呈增加趋势; 小于 0.25 mm 粒径区间钙质砂颗粒含量随正压力加大增加明显, 由 8.7% 增加到 15.1%; 0.50~0.25 mm 粒径区间颗粒含量随正压力加大亦有所增加, 由 0.9% 增加到 2.0%; 说明不同压力下钙质砂颗粒破碎情况不同。



(a) 大于某粒径的颗粒含量变化

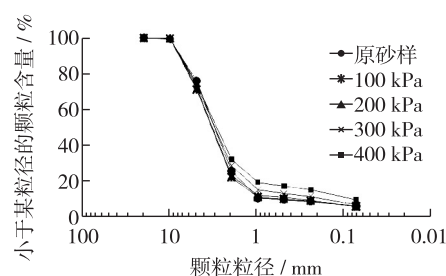
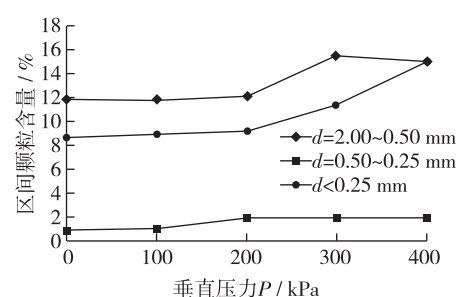


图 3 不同正压力下剪切后钙质砂颗粒粒径分布曲线

Fig. 3 Particle-size distribution curves of calcareous sands by direct shear tests under different normal pressures



(b) 区间颗粒含量变化

图 4 不同正压力下剪切后钙质砂颗粒含量变化趋势

Fig. 4 Variation tendency of particle contents of calcareous sands by direct shear tests under different normal pressures

2.3 钙质砂剪切试验颗粒粒径参数分析

表 1 列出了钙质砂样不同正压力剪切试验后筛分的参数, 图 5(a) 和 (b) 分别显示了 d_{60} , d_{30} , d_{10} 和 C_u , C_c 值的变化趋势, 由表 1 可知, 控制粒径 d_{60} 的值变化不大, 控制粒径 d_{30} 的值持续减少, 而有效粒径 d_{10} 的值减小明显 (见图 5(a)), 因此推算得到的不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c 均出现了较大变化, 特别是在 400 kPa 的正压力下, 变化更大 (见图 5(b)), 不均匀系数 C_u 增大了 6.5 倍, 曲率系数 C_c 增大了 4.6 倍。颗粒级配性质由量变发展到质变, 钙质砂由试验前的良好级配改变到试验后的不良级配。

从图 5 可见, 随着正压力增大剪切后钙质砂颗粒组分发生了明显变化, 细颗粒含量增多并随着正压力加大有加速增加的趋势, 表明钙质砂颗粒出现了越来越多的颗粒破碎, 且颗粒破碎程度越来越明显。

表 1 不同正压力下剪切后钙质砂样参数

Tab. 1 Parameters of calcareous sands by direct shear tests under different normal pressures

P/kPa	d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
0	3.96	2.28	0.63	6.3	2.1
100	4.00	2.55	0.51	7.8	3.2
200	4.00	2.38	0.31	12.8	4.5
300	3.91	2.12	0.18	21.3	6.2
400	3.85	1.91	0.08	47.5	11.7

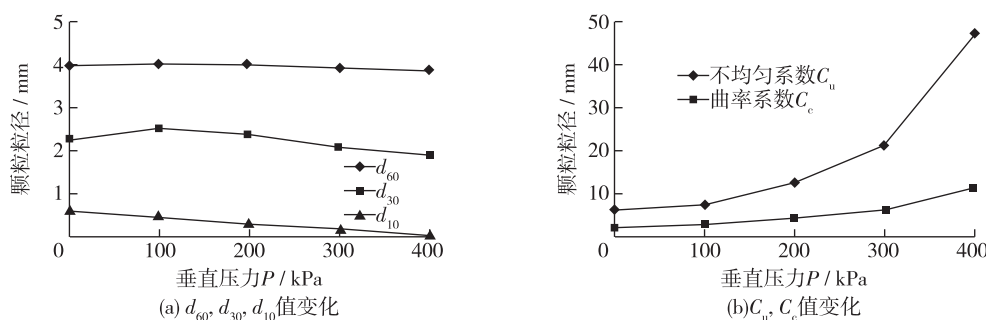


图 5 不同正压力下剪切后钙质砂样参数变化趋势

Fig. 5 Variation tendency of parameters of calcareous sands by direct shear tests under different normal pressures

2.4 钙质砂剪切强度特征分析

原钙质砂样在不同正压力下进行直剪试验,可得到原砂样的强度包络线。原钙质砂样直剪试验结束后,对剪切后的钙质砂样重塑后再次进行不同正压力下的直剪试验,两次试验所得钙质砂直剪试验抗剪强度-竖向压力关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可见,原钙质砂样的内摩擦角为 46.7° ,破碎后的钙质砂样内摩擦角为 39.5° 。钙质砂颗粒破碎前内摩擦角比颗粒破碎后内摩擦角数值大,且均大于天然休止角数值 32.6° 。原钙质砂样颗粒形状较不规则、土粒表面粗糙,级配良好,所以其内摩擦角较大。从颗粒级配分析可知,钙质砂在不同正压力直剪试验后受颗粒破碎影响,钙质砂颗粒级配变得不良,从而导致破碎后的钙质砂样内摩擦角变小,说明钙质砂颗粒的破碎性对剪切强度指标有影响。另外,钙质砂直剪试验中,试样有一定的密实度,试验得到的是峰值强度,因此所得的钙质砂样内摩擦角均大于其天然休止角。

2.5 钙质砂剪切破碎机理分析

钙质砂是分布于热带海洋中的一种特殊岩土介质,钙质砂沉积过程中,一般未经过长途搬运,保留了一些原生物形态。由于其成因和结构上的特点,钙质砂颗粒多为珊瑚残枝,海生生物的骨架,以及一些包裹体,颗粒强度低,质脆,多为不规则颗粒状。颗粒形状的不规则性使其受到作用力时,棱角处极易产生断裂,在较低应力水平下就会产生颗粒破碎,从而影响其宏观力学性质。

钙质砂直剪试验强度包络线基本呈线性关系,但该强度包络线是密实钙质砂的峰值强度包络线,并非残余强度包络线。而实际起主要作用的是残余强度(见图 7),图中 q 为剪应力, p' 为正应力, ε_1 为应变, Critical state 为极限剪切状态,密实钙质砂残余强度的内摩擦角与松砂剪切强度内摩擦角趋于一致,松砂内摩擦角数值等于或接近砂的天然休止角。

钙质砂内摩擦角随试样的颗粒级配而发生变化,级配良好的砂颗粒间接触点多,颗粒的不规则程度大,颗粒表面粗糙程度大,颗粒间咬合力大,因而其内摩擦角也较大。当应力增大到某一程度后,钙质砂颗粒破碎比较严重,颗粒级配因而变得不良,内摩擦角随之减小。

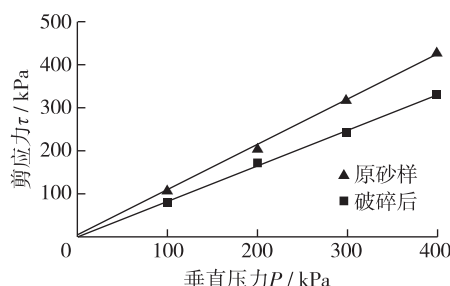


图 6 钙质砂抗剪强度与垂直压力的关系曲线

Fig. 6 Relationships between shear strength and vertical pressures of calcareous sands

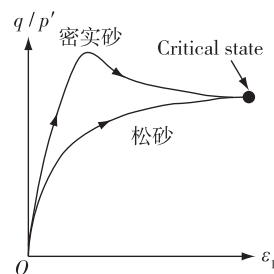


图 7 钙质砂的剪切强度

Fig. 7 Behaviors of calcareous sands

3 结 语

通过对南海某岛礁钙质砂样在不同正压力下剪切试验及砂样颗粒破碎特性和机理的分析,可得出如下结论:

- (1) 钙质砂直剪试验随正压力加大颗粒破碎加剧,粗颗粒含量减少,细颗粒含量增加。
- (2) 在不同的颗粒粒径区间,颗粒破碎程度不同,粒径越小的区间,颗粒含量增加的程度越大。
- (3) 不同压力的直剪试验,由于颗粒破碎影响,钙质砂的级配性质由量变发展到质变,钙质砂由原砂样的良好级配成为不良级配。
- (4) 钙质砂直剪试验强度包络线为剪切峰值强度包络线,而非残余强度包络线。钙质砂残余强度的内摩擦角等于或接近天然休止角。从工程安全角度考虑,选用钙质砂内摩擦角时应以等于或接近天然休止角为宜。

参 考 文 献:

- [1] 朱长歧,周斌,刘海峰. 胶结钙质土的室内试验研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 311-319, 324. (ZHU Changqi, ZHOU Bin, LIU Haifeng. State-of-the-art review of developments of laboratory tests on cemented calcareous soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 311-319, 324. (in Chinese))
- [2] 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 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. (in Chinese))
- [3] 秦月,孟庆山,汪稔,等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1714-1720, 1736. (QIN Yue, MENG Qingshan, WANG Ren, et al. A study of bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1714-1720, 1736. (in Chinese))
- [4] 张家铭,邵晓泉,王霄龙,等. 沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 272-278. (ZHANG Jiaming, SHAO Xiaquan, WANG Xiaolong, et al. Discrete element simulation of crushing behavior of calcareous sands during pile jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 272-278. (in Chinese))
- [5] 朱长歧,周斌,刘海峰. 天然胶结钙质土强度及微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1655-1663. (ZHU Changqi, ZHOU Bin, LIU Haifeng. Investigation on strength and microstructure of naturally cemented calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1655-1663. (in Chinese))
- [6] 霍珍生,范建华,汪正金. 室内大型直剪实验在钙质砂地层的应用[J]. 中国水运, 2015, 15(4): 294-295. (HUO Zhensheng, FAN Jianhua, WANG Zhengjin. Application of indoor large direct shear experiment in calcareous sand stratum[J]. China Water Transport, 2015, (4): 294-295. (in Chinese))
- [7] 朱长歧,周斌,刘海峰. 南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 683-693. (ZHU Changqi, ZHOU Bin, LIU Haifeng. Micro-structures and fundamental engineering properties of beach calcarenite from South China Sea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 683-693. (in Chinese))
- [8] 袁征,余克服,王英辉,等. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 87-93. (YUAN Zheng, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Research progress of in the engineering geological characteristics of coral reefs[J]. Tropical Geography, 2016, 36(1): 87-93. (in Chinese))
- [9] 毛炎炎,雷学文,孟庆山,等. 考虑颗粒破碎的钙质砂压缩特性试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(9): 75-78, 102. (MAO Yanyan, LEI Xuewen, MENG Qingshan, et al. Compression feature of calcareous sand considering particle breakage[J]. Yangtze River, 2017, 48(9): 75-78, 102. (in Chinese))
- [10] 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 Lin, JIANG Guosheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2789-2793. (in Chinese))
- [11] 张家铭,蒋国盛,汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048. (ZHANG Jiaming, JIANG Guosheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength

- of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2043-2048. (in Chinese))
- [12] 王帅, 雷学文, 孟庆山, 等. 侧限条件下高压对钙质砂颗粒破碎影响研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 80-87. (WANG Shuai, LEI Xuewen, MENG Qingshan, et al. Influence study of high pressure on particle breakage of calcareous sand under confined compression[J]. Building Science, 2017, 33(5): 80-87. (in Chinese))
- [13] 汪轶群, 洪义, 国振, 等. 南海钙质砂宏观细观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 199-206, 215. (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, 39(1): 199-206, 215. (in Chinese))

Shear breakage characteristics of calcareous sand particles under different normal pressures

QI Yongzheng^{1, 2}, YUAN Zirui¹, YANG Yongheng¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The particles of the calcareous sands are easily broken under the conditions of high stresses. Consequently, the mechanical properties of the calcareous sands will change under the action of different pressures. The shear breakage characteristics of the calcareous sand particles under different normal pressures are examined and analyzed in this paper. Several direct shear tests on the calcareous sands from Nansha's island of the South China Sea are conducted under different positive pressures. The particle breakage degrees of the sand samples under different positive pressures are studied through the sieving tests. The analysis results show that the calcareous sands can be broken to some extent after the direct shear tests under different positive pressures. The content of the coarse particles reduces and the content of the fine particles increases accordingly. As the positive pressures increase, the particle breakage becomes more and more serious. The grain grading properties of the calcareous sands change after the crushing of the calcareous sand particles. As the normal pressures increase, the gradation of the sand samples becomes poor gradually from its original gradation. The strength envelope of the calcareous sands is the peak strength instead of the residual strength. The friction angle of the residual strength of the calcareous sand is equal to or close to the natural repose angle of the sand. From the point of view of engineering safety, the internal friction angle of the calcareous sands should be equal to or close to the natural repose angle.

Key words: normal pressure; calcareous sand; shear; particle breakage