

文章编号: 1001-4888(2019)01-0088-07

碳酸钙含量对钙质砂性质影响的室内试验研究*

李飒¹, 刘富诗¹, 戴旭², 张彦龙³

(1. 天津大学建工学院岩土所, 天津 300072; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308;
3. 天津市交通科学研究院, 天津 300300)

摘要: 通过室内试验的方法, 研究了碳酸钙(CaCO_3)含量变化对钙质砂的颗粒破碎和宏观力学特性的影响。试验结果表明: 取自南海海域的钙质砂样碳酸钙含量为95.8%, 并表现出高孔隙、棱角明显等特征。钙质砂颗粒破碎本质上是颗粒间应力集中的表现, 随着碳酸钙含量的增加、粒径的增大, 钙质砂的内摩擦角和相对破碎率明显增加; 颗粒破碎导致级配曲线向良好的方向发展, 同时, 引起较高应力条件下的强度包线具有非线性的特征。相对破碎率随正应力和碳酸钙含量的变化规律可用一组二元双曲线函数关系式表示。

关键词: 钙质砂; 碳酸钙含量; 颗粒破碎; 抗剪强度; 室内试验

中图分类号: TU521.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-192

0 引言

钙质砂是指富含碳酸钙(CaCO_3)颗粒或天然胶结物的碳酸盐沉积物, 它是因为长期在饱和的碳酸钙溶液中, 经物理、化学及生物化学作用后而形成的一种与陆相沉积有很大差异的碳酸盐沉积物, 我国南海海域广泛地分布着大量的钙质砂^[1]。

由于其形状不规则、易破碎、高孔隙比等特征, 因此被研究人员所重视, 并开展了相关的试验研究。吴京平等^[2]利用三轴试验研究了颗粒破碎对钙质砂强度和变形的影响, 发现相对破碎率与输入的塑性功成指数关系, 颗粒破碎使得膨胀率和抗剪强度降低。刘崇权等^[3]同样从能量的角度入手, 建立了颗粒破碎的破碎功表达式。胡波^[4]针对南沙岛礁钙质砂进行了等向压缩与三轴试验, 研究了颗粒级配、应力水平、剪应变、颗粒形状等因素对钙质砂颗粒破碎的影响。张家铭等^[5,6]则利用高压固结仪研究了钙质砂的压缩和破碎特性, 指出钙质砂的压缩特性与黏土相似, 压缩条件下的屈服主要由颗粒破碎引起; 同时, 通过高压三轴试验研究了钙质砂在常压与高压下的颗粒破碎特征, 分析发现围压与剪应变共同控制颗粒破碎。Coop等^[7]通过环剪试验, 研究了在不同剪位移下的钙质砂的颗粒破碎与极限破碎情况。马林^[8]利用室内大剪仪研究粗粒钙质土在不同含水率、密度、黏土矿物含量影响下的剪切特性, 发现含有黏土矿物的钙质砂在水的软化作用下粘聚力急剧下降, 粗粒钙质土剪切破坏后粘聚力锐减、内摩擦角仅轻微减小。Valdes等^[9]则对钙质砂与石英砂的混合砂进行了单剪试验, 指出低围压下剪胀对强度起控制作用, 高围压下颗粒破碎是影响强度的主要因素。王新志^[10]、秦月^[11]、江浩^[12,13]等开展了一系列的小比尺模型试验, 针对海洋工程建设中钙质砂地层的桩基承载力、沉降、设计参数等问题进行了详细的研究。此外, Agarwal^[14]、吴梦喜^[15]、余殷鹏^[16]等通过对钙质砂与结构接触面的剪切试验, 研究了不同

* 收稿日期: 2017-09-16; 修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239008), 国家自然科学基金(51379145), 高技术船舶科研计划 2016[22]

通讯作者: 李飒(1970-), 女, 博士, 博士生导师。主要从事海洋土的工程性质、土与结构物相互作用以及海洋工程等方面的教学和科研。Email: lisa@tju.edu.cn

接触材料、法向应力下抗剪强度的变化规律。王丽^[17]、朱长岐^[18]等开展了钙质砂胶结特性对力学性质影响的试验研究。

然而,目前仍缺乏有关碳酸钙含量变化对钙质砂破碎特性与力学特性的研究。事实上,国内外学者发现全世界范围内钙质砂的碳酸钙含量差异很大。以我国南海海域为例,不同地区的钙质砂碳酸钙含量不同,南海钙质砂的碳酸钙含量范围在 5%~95%之间^[19]。因此,本文以南海钙质砂为研究对象,采用室内试验的方法,研究不同碳酸钙含量下钙质砂的破碎特性及力学特性。

1 矿物成分及微观结构

本文钙质砂取自我国南海海域,为未胶结的松散体,其主要成分为碳酸钙。试验前取适量砂样经蒸馏水清洗去掉盐分,烘干后利用 X 射线荧光光谱仪对钙质砂的矿物成分含量进行测定;同时,对比福建标准砂的矿物成分含量,结果见图 1 及表 1。

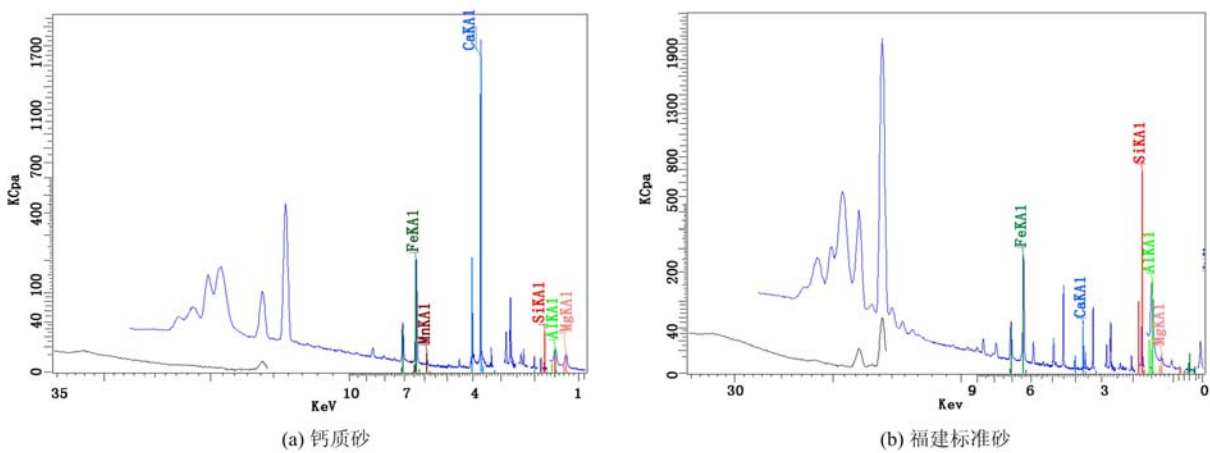


图 1 化学成分分析

Fig. 1 Chemical analysis

由表 1 可知,钙质砂中碳酸钙含量高达 95.8%,而福建标准砂的碳酸钙含量仅为 1.53%。为了揭示钙质砂与福建标准砂微观结构的区别,进行了钙质砂与福建标准砂的扫描电镜试验,如图 2 所示。图 2 中(a)(b)分别为 0.075~0.25mm 粒组钙质砂颗粒放大 100 倍和 20000 倍的电镜扫描图;图 2(c)为相同粒组条件下福建标准砂放大 20000 倍的电镜扫描图。由图 2(a)可知,钙质砂颗粒具有形状不规则、表面凹凸不平、有明显的棱角并存在较大内孔隙等特征;对比图 2(b)(c)可知,与颗粒表面致密的福建标准砂相比,钙质砂具有明显的多孔隙结构。

表 1 矿物成分百分含量

Tab. 1 Mineral composition of soil samples

砂样	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂
钙质砂	0.9876	95.85	2.995	0.0286	0.1387
福建标准砂	6.306	1.53	2.564	—	89.6

2 室内试验

为了便于研究碳酸钙含量变化对钙质砂破碎及力学特性的影响,本文通过控制试样的颗粒级配、按照钙质砂的质量百分比来配制不同碳酸钙含量的试样;同时,该方法有助于剔除试样因颗粒级配对颗粒破碎的影响,实现控制其他变量^[4],进而单一地研究碳酸钙含量对钙质砂破碎特性的影响,故筛分出 1~2mm、0.5~1mm、0.25~0.5mm、0.075~0.25mm 四种粒组,如图 3 所示。

将取自南海海域的钙质砂与福建标准砂按照质量百分比为 100%、80%、60%、40%、20%、0% 的标准,配得了共 24 组混合砂试样;利用 X 射线荧光光谱仪分别测量四种粒组混合砂试样质量比为 80%、

60%、40%、20%时碳酸钙的实际含量。表2列举了1~2mm粒组、不同质量百分比混合砂的碳酸钙实测含量,由表2可知,碳酸钙实测含量与混合砂的质量百分比非常接近,为方便叙述,本文用碳酸钙质量百分比代替实际碳酸钙含量。

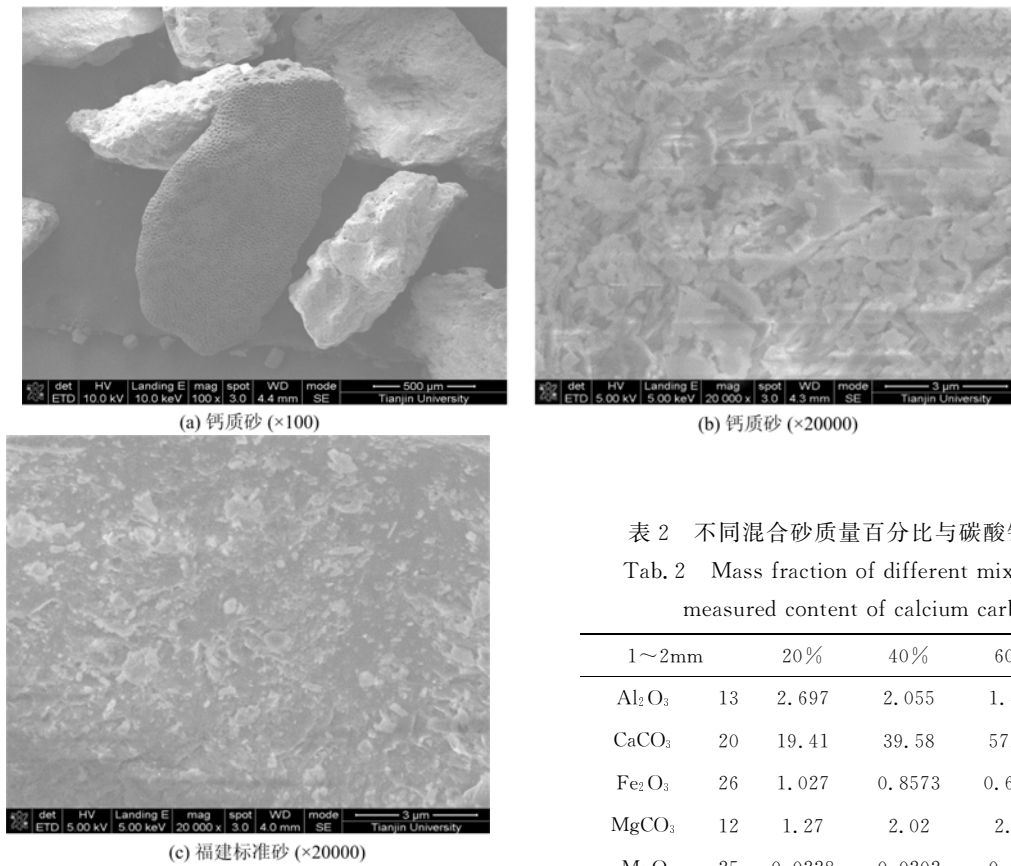


图2 扫描电镜图像

Fig. 2 SEM micrographs of sand sample

表2 不同混合砂质量百分比与碳酸钙实测含量
Tab. 2 Mass fraction of different mixed sand and measured content of calcium carbonate

	1~2mm	20%	40%	60%	80%
Al ₂ O ₃	13	2.697	2.055	1.453	0.8923
CaCO ₃	20	19.41	39.58	57.12	76.52
Fe ₂ O ₃	26	1.027	0.8573	0.6575	0.464
MgCO ₃	12	1.27	2.02	2.92	3.78
MnO	25	0.0228	0.0202	0.017	0.012
SiO ₂	14	75.57	55.47	37.84	18.34

表3 试样分组及试验内容

Tab. 3 Sample grouping and test contents

试样分组	粒组 /mm	质量百分比/%	正应力 /kPa
第一组	1~2		
第二组	0.5~1	100 80 60 40	100 200 300
第三组	0.25~0.5	20 0	400
第四组	0.075~0.25		



图3 筛分后的钙质砂

Fig. 3 Carbonate sand after sieved

所有试样采用砂雨法进行制样以模拟各粒组试样在相同沉积条件下的形成过程,砂土通过上部软管流入撒砂筒内,经筒体下部带有筛网的出砂口分散后,以10cm的落距均匀落入剪切盒,筛网的孔径为1cm。根据《土工试验规程》(SL237-1999)^[20]进行直剪试验,对试样施加法向荷载,随后施加剪应力,剪切速率为0.8mm/min,当量力环百分表读数达到峰值后一直下降或剪应变超过15%时停止试验。所用仪器为DSJ-2微控四联直剪仪,由计算机完成数据采集过程。试验内容见表3。为了研究不同碳酸钙含量下混合砂的颗粒破碎情况,在每次试验前及结束后,对砂样进行筛分试验,测量各粒组的

百分含量,得到相应的级配曲线。

3 试验结果与分析

3.1 碳酸钙含量对钙质砂破碎特性的影响

为了研究不同碳酸钙含量下钙质砂颗粒破碎的情况,本文采用 Hardin^[21]提出的破碎模型,利用相对破碎率 B_r 评价混合砂的破碎。相对破碎率 B_r 是试验前后级配曲线间的面积 B_i 与初始破碎率 B_p 的比值,即 $B_r = B_i / B_p$,如图 4 所示。该模型是依据级配曲线考虑所有的粒径变化,整体地反映颗粒破碎情况。

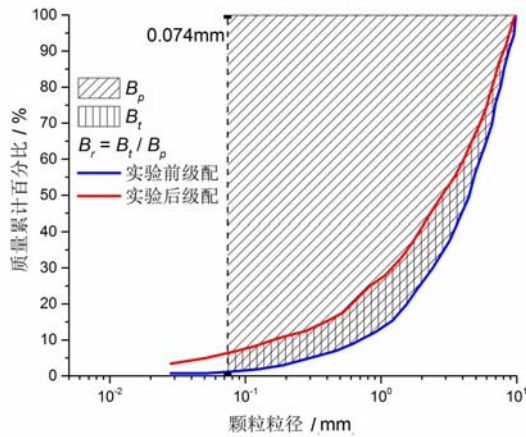


图 4 Hardin 相对破碎率 B_r 的定义

Fig. 4 Definition of Hardin's relative breakage B_r .

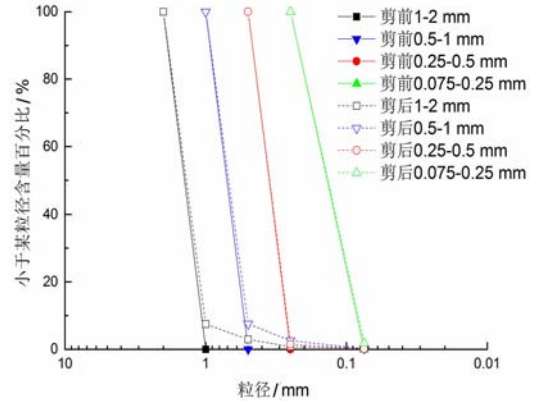


图 5 各粒径剪切前后级配曲线

Fig. 5 Particle size distribution of each grain group before and after shearing

对于整个试样,积分可得初始破碎率:

$$B_p = \int_0^1 b_p df \tag{1}$$

式中, $b_p = \log_{10} \left\{ \frac{d}{0.074} \right\}$; d 为颗粒直径。

总破碎率 B_i 定义为:

$$B_i = \int_0^1 (b_{p0} - b_{pe}) df \tag{2}$$

式中, b_{p0} 为 b_p 破碎前的值; b_{pe} 为 b_p 破碎后的值。

图 5 为不同粒径钙质砂在正应力为 400kPa 时剪切前后的级配曲线变化,由图可知,相同应力条件下,粒径越大,钙质砂颗粒破碎的现象越明显。其中,粒径为 1~2mm 的钙质砂剪切后的颗粒级配曲线相比于初始级配曲线发生了较大变化,说明颗粒破碎最严重;细、粉颗粒的含量增加明显,表明大颗粒钙质砂在剪切过程中的破碎形式是颗粒棱角的啃断与颗粒间的研磨;同时,颗粒破碎伴随着试样向更好的级配发展。

为了同时考虑碳酸钙含量与正应力共同作用下对颗粒破碎的影响,通过对试验数据点的拟合得到 B_r 与碳酸钙含量 H_{Ca} 、正应力 σ 的双曲线方程:

$$B_r = \frac{\sigma / p_a}{A + B e^{CH_{Ca}} + (\sigma / p_a)} \tag{3}$$

式中, p_a 为大气压力,引入 p_a 的目的是为了将坐标无量纲化; A 、 B 、 C 为拟合得到的参数 ($A=152.7$, $B=530.7$, $C=-4.9$)。将式(3)与试验数据绘制在三维图中,如图 6 所示。

由式(1)和图 6 可知,当正应力相同时,随着碳酸钙含量的增加,即本身具有缺陷的颗粒含量大量增加,导致颗粒破碎发生更加容易,因此相对破碎率逐渐增大,这说明碳酸钙含量对颗粒破碎有重要的贡献。当碳酸钙含量一定时,随着正应力的增加,相对破碎率增加,这是因为正应力的增加,使得颗粒间的

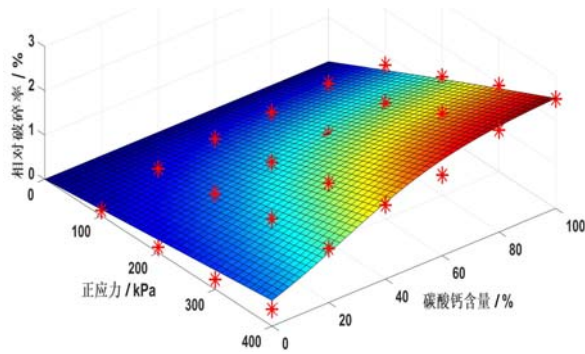


图6 相对破碎率与碳酸钙含量、正应力的关系

Fig. 6 The relationship between the relative breakage index and the calcium carbonate content, normal stress

应力增加最明显,剪应力提高 22%。

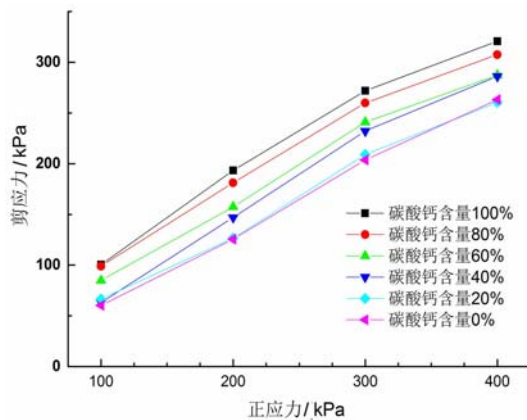


图7 正应力—剪应力关系图

Fig. 7 Relationship between normal stress and shear stress

此外,由图7还发现 $\sigma=100\sim 300\text{kPa}$ 范围内,正应力与剪应力之间线性关系良好,但超过 300kPa 时有向下弯曲的趋势,表现出一定的非线性的特征;这是由于正应力超过 300kPa 后,颗粒通过颗粒破碎来增加颗粒间的接触点数目进而分散应力。颗粒破碎导致颗粒间的接触压力重新调整,接触压力均匀化,同时削弱了颗粒间的咬合作用,破碎的颗粒填充在孔隙之间,阻碍了剪胀效应的发挥,所以使得剪切过程中强度降低。因此,颗粒破碎是在较高应力条件下导致非线性的主要原因。

根据土体的抗剪强度公式得到四种粒组、不同碳酸钙含量的内摩擦角随碳酸钙含量的变化情况,如图8所示。其中前三组 $H_{Ca}=100\%$ 时的钙质砂内摩擦角为 $36.1^\circ\sim 39.8^\circ$,与沿海和大陆架钙质砂内摩擦角 $38^\circ\sim 50^\circ$ 范围基本一致^[22,23];碳酸钙含量为 $H_{Ca}=0\%$ 时福建标准砂内摩擦角为 $28.1^\circ\sim 30.9^\circ$,也比较接近标准福建标准砂的内摩擦角 $28^\circ\sim 29^\circ$ ^[24]。由图8可知,总体而言,随着碳酸钙含量的增加,内摩擦角呈增大趋势,说明钙质砂的内摩擦角主要受碳酸钙含量的影响;并且颗粒粒径越大,碳酸钙含量变化对土体的内摩擦角的影响越显著,其中 $H_{Ca}\geq 80\%$ 时,内摩擦角的增加比较缓慢。

4 结论

(1) 本文钙质砂样取自南海海域,碳酸钙含量为 95.8%;与福建标准砂相比,钙质砂颗粒结构具有高孔隙、棱角明显等特征,微观结构和形态特征共同影响了钙质砂的宏观力学性质。

(2) 颗粒破碎的实质是颗粒间应力集中的表现,碳酸钙含量越大、正应力越高,钙质砂颗粒破碎越

接触力变大,进而发生应力集中、颗粒破碎;同时,正应力的增加相当于试样在竖直方向受到更大的约束作用,约束作用的增强限制了颗粒间的滑移和滚动,进而导致更多的颗粒发生破碎。

3.2 碳酸钙含量对钙质砂力学特性的影响

为了便于显示不同碳酸钙含量对钙质砂抗剪强度的影响,选取第一组试样,绘制正应力—剪应力关系曲线,见图7。由图可知,相同正应力下,随着碳酸钙含量增加,剪应力明显增加。其中 $H_{Ca}=20\%$ 的钙质砂剪应力与福建标准砂相似,而 $H_{Ca}=100\%$ 时钙质砂剪

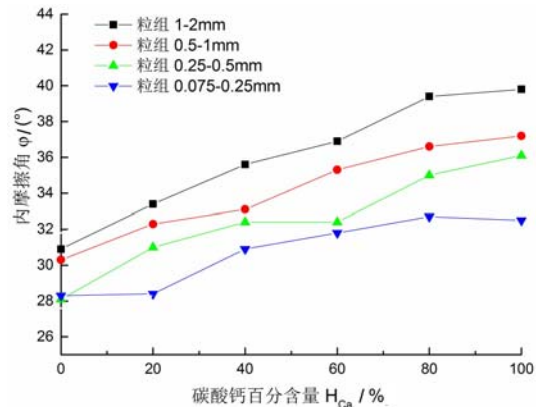


图8 内摩擦角与碳酸钙含量的关系

Fig. 8 Relationship between friction angles and the content of calcium carbonate

显著;同时,颗粒破碎伴随着试样由级配不良向级配良好的发展过程。相对破碎率与正应力、碳酸钙含量变化具有一定的规律性,可用一组二元双曲线函数关系式表示,具体表达式见式(3)。

(3)与福建标准砂相比,钙质砂剪应力有明显的提高,相同条件下,随着碳酸钙含量的增加,颗粒间的咬合作用增强;在较高应力条件下,颗粒破碎是导致剪切特性具有非线性的主要原因;试验结果显示,钙质砂的内摩擦角随碳酸钙含量的增加而增长,颗粒越大,碳酸钙含量的变化对钙质砂的内摩擦角的影响越显著。

参考文献:

- [1] 吴京平,楼志刚. 海洋桩基工程中的钙质土[J]. 海洋工程, 1996, 14(3):462-465 (WU Jingping, LOU Zhigang. Research on the behavior of calcareous soils in offshore pile foundations[J]. The Ocean Engineering, 1996, 14(3):462-465 (in Chinese))
- [2] 吴京平,褚瑶,楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5):49-55 (WU Jingping, ZHU Yao, LOU Zhigang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5):49-55 (in Chinese))
- [3] 刘崇权,汪稔. 钙质砂在三轴剪切中颗粒存在评价及其能量公式[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4):366-371 (LIU Chongquan, WANG Ren. Evaluation of calcareous sand grains crushing and it's energy equation[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(4):366-371 (in Chinese))
- [4] 胡波. 三轴条件下钙质砂颗粒破碎力学性质与本构模型研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008 (HU Bo. Research on the particle breakage mechanical characteristics and constitutive model of calcareous sand under triaxial condition[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, 2008 (in Chinese))
- [5] 张家铭,汪稔,石祥锋,等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18):3327-3331 (ZHANG Jiaming, WANG Ren, SHI Xiangfeng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18):3327-3331 (in Chinese))
- [6] 张家铭,张凌,刘慧,等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(s1):3010-3015 (ZHANG Jiaming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(s1):3010-3015 (in Chinese))
- [7] Coop M R, Sorensen K K, Bodas Freitas T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3):157-163.
- [8] 马林. 钙质土的剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016(s1):309-316 (MA Lin. Experimental study of shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(s1):309-316 (in Chinese))
- [9] Valdes J R, Leleu S L. Influence of mineral composition on the simple shear response of sands; experimental study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(12):1820-1824.
- [10] 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):147-156 (WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Study of plate load test of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1):147-156 (in Chinese))
- [11] Yue Q, Qingshan M, Ren W, et al. Model experimental research on uplift single pile in calcareous sand of South China Sea[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(5):653-660.
- [12] 江浩,汪稔,吕颖慧,等. 钙质砂中群桩模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(s1):3023-3028 (JIANG Hao, WANG Ren, LV Yinghui, et al. Model tests of pile groups in calcareous sands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s1):3023-3028 (in Chinese))
- [13] 江浩,汪稔,吕颖慧,等. 钙质砂中模型桩的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):780-784 (JIANG Hao, WANG Ren, LV Yinghui, et al. Test study of model pile in calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):780-784 (in Chinese))
- [14] Agarwal S L, Malhotra A K, Banerjee R L. Engineering properties of calcareous soils affecting the design of deep penetration piles for offshore structures[C]//Offshore Technology Conference, 1977.

- [15] 吴梦喜, 楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3):369—371 (WU Mengxi, LOU Zhigang. Experimental study on mechanical behavior of calcareous sand-steel interfaces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3):369—371 (in Chinese))
- [16] 余殷鹏, 吕亚茹, 李峰, 等. 珊瑚砂剪切特性试验分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2017, 18(1):29—35 (SHE Yinpeng, LV Yaru, LI Feng, et al. Experimental analysis of shearing mechanism of coral sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 18(1):29—35 (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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))
- [19] 张兰兰, 陈木宏, 陈忠, 等. 南海表层沉积物中的碳酸钙含量分布及其影响因素[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2010, 35(6):891—898 (ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, CHEN Zhong, et al. Distribution of calcium carbonate and its controlling factors in surface sediments of the South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(6):891—898 (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. 土工试验方法标准(GB/T50123—1999)[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [21] Hardin B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10):1177—1192.
- [22] Hull T S. The static behavior of various calcareous sediments[C]//Proc. of the Int. Conf. on Calcareous Sediments, Perth. 1988:87—96.
- [23] Brandes H G, Khadge N H, Nakayama D D. Consolidation and strength properties of calcareous sediments from Kaneohe and Kailua Bays, Hawaii[C]//The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.
- [24] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of soil behavior[M]. Hoboken: Wiley, 2005:577.

Indoor experimental study of the effect of calcium carbonate content on properties of calcareous sand

LI Sa¹, LIU Fu-shi¹, DAI Xu², ZHANG Yan-long³

(1. Geotechnical Institute, Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 30072, China; 2. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China; 3. Tianjin Traffic Science Research Institute, Tianjin 300300, China)

Abstract: The influence of calcium carbonate content on particle breakage and macroscopic mechanical properties of calcareous sand was systematically studied by indoor experiment. Experimental results show that the calcium carbonate content of the calcareous sand taken from the South China Sea is 95.8% and the calcareous sand is characterized by the angularity, and high void ratio. The breakage of calcareous sand is essentially result from stress concentration between particles; with the increase of calcium carbonate content and particle size, the friction angles and relative breakage index of calcareous sand increase significantly. Particle breakage not only leads to the particle size distribution into good gradation, but also caused the shear strength envelope expressed nonlinear characteristic under higher normal stress; and with the change of the normal stress and the calcium carbonate content, a set of two variables hyperbola function can be used to describe the change rule of relative breakage index.

Keywords: calcareous sand; calcium carbonate content; particle breakage; shear strength; laboratory test