



贝壳砂颗粒破碎及抗剪强度研究

赵 翀

(天津市市政工程设计研究院 岩土勘察分院, 天津 300051)

摘要: 对贝壳砂的破碎抗剪强度进行了系统的研究。在原有颗分曲线的形式上, 对其进行创新, 提出了相对颗分曲线, 能够直观地反映出颗粒破碎过程中某一粒径内颗粒含量的变化, 也能较为简单地表达出颗粒破碎程度。此外, 对贝壳砂的固结排水和不排水强度进行了系统的分析, 指出在颗粒破碎过程中, 粘聚力对颗粒破碎的影响较内摩擦大, 而在应力应变过程中, 内摩擦角对峰值应力的影响占据了主动地位。当相对密度及围压相同时, 固结排水达到峰值应力差要比固结不排水大很多。

关键词: 贝壳砂; 颗粒破碎; 峰值应力; 内摩擦角; 粘聚力

中图分类号: TU 512

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0047-04

On grain breakage and shear strength of shell sand

ZHAO Chong

(Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: The grain breakage and shear strength of shell sand are studied systematically. Based on the innovation of former grain size distribution curve, a new curve of relative grain size distribution curve is put forward, which reflects directly the change of the grain content in one grain size in the process of grain's breakage and shows the degree of particle's breaking briefly. Moreover, the triaxial compression consolidated undrained (CU) tests and drained (CD) tests are analyzed systemically. It points out that the cohesion has more effect on the grain's breakage than the internal friction angle in the process of grain's breakage, whereas the internal friction angle takes the initiative to peak stress in the process of strain-stress. When the relative density and confining pressure phase are equal during the test, the peak stress of CD is higher than CU.

Keywords: shell sand; grain breakage; peak stress; internal friction angle; cohesion

近年来, 随着港口建设、市政规划、铁路水利等大规模的发展建设, 建筑所需的材料也是越来越匮乏, 因此广大学者开始对新型建筑材料的研究及运用进行了深入的研究。贝壳砂作为一种特殊的建筑材料, 已经引起一部分学者的关注, 在我国福建、广东沿海, 以及日本、韩国、欧美等国沿海都分布着大量的贝壳砂。欧美等国已经将其作为一种过滤介质将其运用到城市污水处理系统^[1], 韩国日本等国已将其作为建筑材料运用

到混凝土、防坡堤中^[2-3]。因此, 如何利用沿海大量的贝壳砂以及将其运用到工程实践当中, 已经成了迫在眉睫的问题。

本文对贝壳砂的抗剪强度以及破碎特性进行了深入的研究, 希望可以为以后的工程建设及科学研究提供一个可靠的参照。

1 贝壳砂物理化学性质

首先对贝壳砂的基本物理性质进行了系统规

收稿日期: 2014-03-03

作者简介: 赵翀 (1988—), 男, 硕士, 主要从事特殊土力学研究。

范^[4]的测定,基本性质如下:最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.58 \text{ g/cm}^3$,最小干密度 $\rho_{dmin} = 1.15 \text{ g/cm}^3$,贝壳砂含水率 0.25%,风干含水率 0.3%,贝壳含量为 30.2%。

贝壳砂化学成分:贝壳中 CaCO_3 含量约占 86%,其余 14%是微量的硅、镁、钠、铁、铝等化合物、有机质和化合水。贝壳的棱柱层和珍珠层主要构成物是方解石 (Calcite) 和文石 (Aragonite),方解石属三方晶系碳酸钙,硬度为 3,文石硬度为 3.5~4,碳酸钙化学性质不稳定,极易溶于酸。因为贝壳砂与普通石英砂的区别在于贝壳极易破碎,贝壳的化学性质不稳定,因而应研究贝壳砂的颗粒破碎对贝壳砂工程特性的影响^[5]。

2 颗粒破碎研究

对不同相对密度 ($D_r = 0.25, 0.50, 0.75$) 和不同围压下 (50、100、200、300 kPa) 试验后的贝壳砂进行了颗分试验,并且对常用的颗分曲线进行了一定程度的改善。使得改善后的颗分曲线能直观地反映出颗粒破碎过程中某一粒径范围内颗粒含量的变化,同时也可以较为简单地表达出颗粒破碎程度 (曲线与横坐标所围的面积)。改善后的颗分曲线,以“小于该孔径质量相对百分数”为纵坐标 (即:试验后每一粒径的含量减去试验前每一粒径的含量),以颗粒直径为横坐标,坐标形式为常规坐标,而不是对数坐标。

改善后的 $\Delta W-d$ 曲线,横坐标 ΔW 表示贝壳砂在试验前后某一粒径范围内颗粒的增量,即百分量变化。曲线与横坐标所围的面积与 Hardin 所表示的相对破碎 B_r 有一定的相似^[6],面积表示试验后颗粒破碎的总量。

取相对密度 $D_r = 0.25$,围压 100 和 200 kPa 的贝壳砂进行相对颗分曲线分析,试验结果见图 1。当相对密度一定时,随着围压的增加,颗粒的破碎程度也逐渐增加,且固结不排水的破碎程度要比固结排水严重很多,可能是由于固结不排水时,有效内摩擦角相对较小,使得贝壳颗粒在较小的围压下就会发生比较严重的破碎。试验过

程中颗粒的破碎主要集中在中间范围内的粒径,而在两端处,粒径含量变化很小,其分布特征类似于正态分布。因此在以后的研究中可以考虑如何将正态分布引进颗分曲线分析当中。

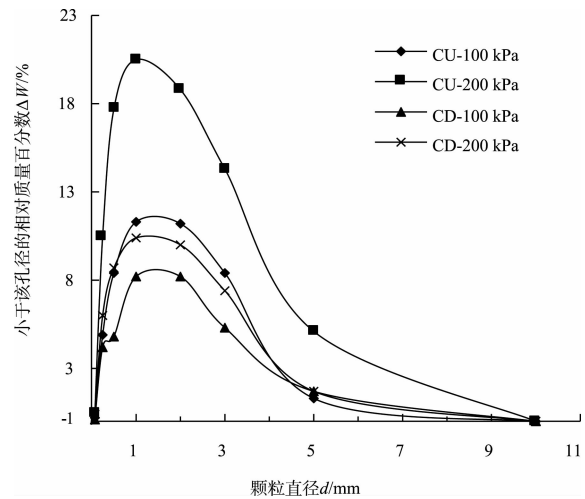


图 1 贝壳砂样试验后粒径分布曲线

此外经过多组颗分试验得出 (图 2):当围压一定时,贝壳砂的破碎程度随着相对密度的增加而增大,但是并没有随着 D_r 的增加而不断增加。当相对密度 $D_r \geq 0.5$ 时,贝壳砂颗粒破碎程度基本没变化,当 D_r 增加到一定程度时,颗粒破碎不再增加,而是趋于稳定。

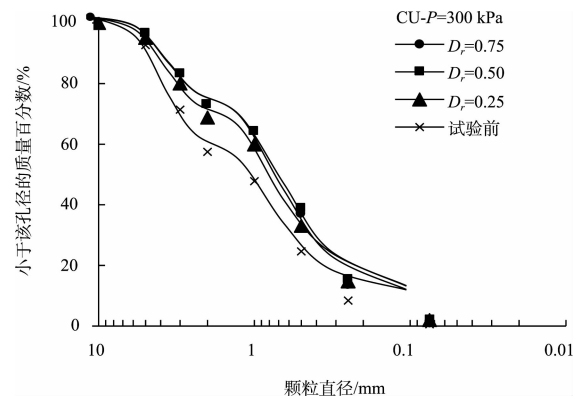


图 2 贝壳砂样试验后不同相对密度下粒径分布曲线

3 抗剪强度特性

砂性土的抗剪强度产生的机理有 4 部分:颗粒滑动摩擦阻力所发挥的强度,颗粒排列和定向所需能量而发展的强度,剪胀所需能量而发展的强度,颗粒破碎所需能量而发展的强度。对不同

相对密度 ($D_r = 0.25、0.50、0.75$) 的贝壳砂进行三轴固结不排水 (CU) 和排水试验 (CD)。饱和条件下固结不排水试验剪切速率 0.386 mm/min ；固结排水试验剪切速率 0.166 mm/min ，在围压

50、100、200、300 kPa 的条件下进行三轴试验试样首先按照要求在饱和器里装样，之后抽真空饱和，饱和后在冰箱里冷冻，然后将试样装在三轴仪上进行反压饱和，试验结果见表 1 和图 3。

表 1 贝壳砂抗剪强度

模式	贝壳含量/%	相对密度 D_r	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	有效凝聚力 C'_d / kPa	有效内摩擦角 $\varphi'_d / (^\circ)$
固结排水剪切强度	30.2	0.25	1.24	1.19	23.5	34.7
		0.50	1.33	1.03	52.6	34.6
		0.75	1.45	0.87	39.0	38.5
固结不排水剪切强度	30.2	0.25	1.24	1.19	70.0	23.8
		0.50	1.33	1.03	66.4	25.3
		0.75	1.45	0.87	65.6	33.6

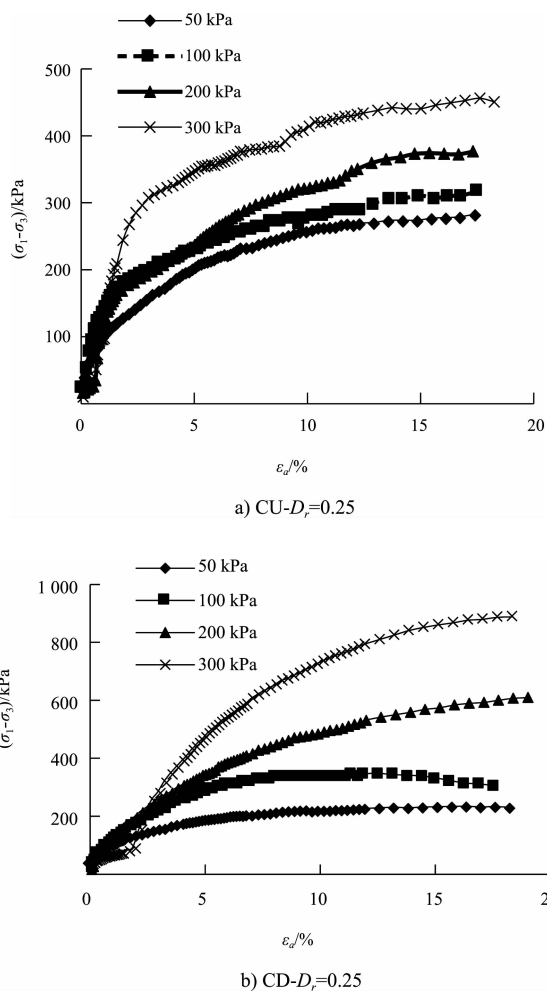


图 3 三轴试验应力-应变曲线

由表 1 及图 3 可知：当相对密度及围压相同时，CD 试验达到的峰值应力以及破坏应变要比 CU 试验大很多，并且围压对 CD 条件下的抗剪强

度的作用更为显著。CD 条件下有效内摩擦角较 CU 条件下大，但是粘聚力却是相反的。由图 1 可知 CU 条件下贝壳砂颗粒破碎程度较 CD 条件下严重很多，而在图 3 中，CD 条件下破坏所需要的峰值应力较 CU 条件下大很多，例如：当 $P = 300 \text{ kPa}$ 时， $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{CDmax}} = 821 \text{ kPa}$ ， $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{CUmax}} = 423 \text{ kPa}$ 。因此，在颗粒破碎过程中，粘聚力对颗粒破碎的影响比内摩擦角要显著很多。而在应力应变过程中，内摩擦角则占据主动地位，对峰值应力的影响较粘聚力要大很多。

CU 条件下粘聚力要比 CD 条件下大很多，粘聚力主要是由静电引力、分子间的范德华力、颗粒间的胶结、颗粒间接触点的化合键、表观粘聚力构成。然而除了胶结之外，粘聚力都是来源于颗粒间由于各种内部吸引力而产生的正应力，化学胶结力是粘聚力的主要部分。由于 CU 条件下，贝壳砂样在饱和条件下试验，因而水在贝壳砂颗粒之间起到一定的胶结作用，故而对贝壳砂的粘聚力有一定程度的贡献，所以 CU 条件下粘聚力较大。

CD 条件下有些内摩擦角要比 CU 条件下大一些，而固体颗粒间的滑动摩擦及咬合摩擦对摩擦角的作用起着很大的贡献。由于 CU 条件下水对贝壳砂颗粒起到一定润滑的作用，且由于水引起的有效孔隙水压力也承担了一定的压力，故而在相

同围压下, CU 条件下贝壳砂颗粒所承担的有效应力较 CD 条件下小, 所以 CD 试验中, 贝壳砂颗粒承担的较大应力主要是由内摩擦角所承担, 导致其内摩擦角也比 CU 条件下的大。

4 结论

1) 因为贝壳砂与普通石英砂的区别在于贝壳极易破碎, 贝壳的化学性质不稳定, 因而应研究贝壳砂的颗粒破碎对贝壳砂工程特性的影响。

2) 在原有颗分曲线的形式上, 对其进行创新, 提出了相对颗分曲线, 能够直观地反映出颗粒破碎过程中某一粒径内颗粒含量的变化, 也能较为简单地表达出颗粒破碎程度。

3) 颗粒的破碎主要集中在中间范围内的粒径, 而在两端处, 粒径含量变化很小, 其分布特征类似于正态分布。因此在以后的研究中可以考虑如何将正态分布引进颗分曲线分析当中。

4) 在颗粒破碎过程中, 粘聚力对颗粒破碎的影响较内摩擦大, 而在应力应变过程中, 内摩擦角对峰值应力的影响占据了主动地位。当相对密

度及围压一定时, 固结排水达到峰值应力差要比固结不排水大很多。

参考文献:

[1] Sjøvik A K, Kløve B. Phosphorus retention processes in shell sand filter systems treating municipal wastewater[J]. Ecological engineering, 2005, 25: 168-182.

[2] Mikami K, Okumura T. Underwater soil improvement for port facilities by compaction piles of oyster shell-sand mixture[C]. Tokyo: Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007: 66-75.

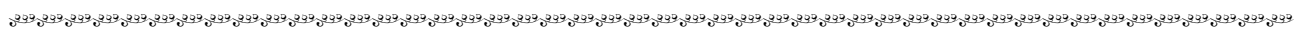
[3] Gil L Yoon, Yeo W Yoon, Kwang S. Chae. Shear strength and compressibility of oyster shell-sand mixtures [J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 1 701-1 709.

[4] 王园, 《公路土工试验规程》编写组. 《公路土工试验规程》释义手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[5] 郇能惠, 瞿易容, 何文钦, 等. 贝壳砂的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 632-637

[6] Har din B O. Crushing of soil particles [J]. Journal of Geot echnical Engineering, 1995, 111(10): 1 117-1 192.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 36 页)

参考文献:

[1] Saville T. Laboratory data on wave runup and overtopping[R]. Washington D C: Lake Okeechobee Levee Sections, US Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1955.

[2] Richard Weggle J. Wave overtopping Equation [C]. Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering. Hawaii: University of Hawaii, 1977.

[3] van der Meer J W, Janssen J P F M, Hydraulics D. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[M]. Delft, Netherlands: Delft Hydraulics, 1994.

[4] Hebsgaard M, Sloth P, Juhl J. Wave overtopping of rubble mound breakwaters[C]. Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen, Denmark: ASCE, 1998.

[5] 虞克, 余广明. 斜坡堤越浪试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1992(3): 211-219.

[6] 卢无疆. 直立堤堤前抛石对越浪量的影响[J]. 海洋工程, 1985(1): 81-90.

[7] 王红, 周家宝. 单坡堤上不规则波越浪量的估算[J]. 水利水运科学研究, 1996(1): 58-63.

[8] 王鹏, 孙大鹏. 基于 FLUENT 的海堤越浪数值模拟[J]. 中国水运: 下半月, 2011(7): 73-75.

[9] 刘亚男, 郭晓宇, 王本龙, 等. 基于 RANS 方程的海堤越浪数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(6): 682-688.

[10] Guo Li-dong, Sun Da-peng, Wu Hao. A new numerical wave flume combining the 0-1 type bem and the VOF metod[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24 (4): 506-517.

(本文编辑 武亚庆)