

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0040-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.009

不同颗粒级配钙质砂剪切特性研究

罗会武¹, 陈培帅¹, 陈卫忠², 陈祥龙¹

(1. 中交二航局技术中心, 湖北 武汉 430040; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为研究钙质砂剪切特性, 对某岛钙质砂进行4组固结排水三轴试验, 其围压分别是50、100、200、400 kPa。应力应变曲线表明钙质砂体变先剪缩后剪胀, 在剪胀发展的过程中伴随应变软化现象。为进一步探究钙质砂应变软化的原因, 筛除粒径小于0.5 mm, 重复试验。研究结果表明大颗粒的钙质砂并没有出现应变软化现象。给出如下结论: (1) 应变软化出现的位置比较偏后, 且随着围压的增长, 峰值强度会逐渐后移; (2) 在低围压条件下钙质砂颗粒破碎诱发的应变软化可能性低; (3) 细小颗粒诱发扁平状钙质砂出现定向滑移是试样表现应变软化的关键因素; (4) 围压越高细小颗粒诱发应变软化的难度越大, 峰值强度逐渐后移, 并伴随着剪切带的出现。

关键词: 钙质砂; 颗粒级配; 三轴试验; 剪切特性; 应变软化

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Experimental research on shear behavior of different particle gradation of calcareous sand

LUO Huiwu¹, CHEN Peishuai¹, CHEN Weizhong², CHEN Xianglong¹

(1. Technology Center of CCCC Second Harbor Engineering Co Ltd1, Wuhan 430040, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences2, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Four consolidated drained triaxial tests of an island calcareous sand were carried out to research its shear behavior, the confining pressure was 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa and 400 kPa respectively. The stress and strain curves show that the calcareous sand body is shrinkage and dilatancy in turn, accompanied by the phenomenon of strain softening during the development of dilatancy. In order to further explore the reason of the strain softening of calcareous sand, then, particles smaller than 0.5mm are removed and the tests are repeated. The results show that there is no strain softening phenomenon in the calcareous sand of large particles. This paper convinces that: (1) the position of strain softening occurs relatively later, and with the increase of confining pressure, the position of the peak strength will gradually move backward; (2) the possibility of strain softening induced by particle breakage of calcareous sand under low confining pressure is very low; (3) fine particles are the key factors to induce the directional slip of flat calcareous sand; (4) the higher the confining pressure is, the higher the difficulty of the strain softening is, the peak strength is move backward gradually, accompanied by the appearance of the shear band.

Key words: calcareous sand; particle size distribution; triaxial test; shear behavior; strain softening

钙质砂广泛分布在热带海洋地区, 由于其沉积过程大多未经长途搬运, 保留了原生生物骨架中的细小孔隙等原因, 形成的土颗粒具有多孔隙(含有内孔隙)、形状不规则、易破碎以及颗粒易胶结等特

点, 这使得其工程力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有较明显的差异^[1-7]。在钙质砂地层进行基础建设案例逐渐变多, 众多学者对其进行了深入研究, 取得了丰厚成果^[4, 8-12]。随着“一带一路”政策的推进,

收稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057906)

作者简介: 罗会武(1988-), 男, 湖北洪湖人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为岩土材料本构与数值。

工程面临钙质砂地基的情况由特殊案例过渡到常规案例。研究钙质砂力学特性将助力“一带一路”建设工程的顺利开展。本文通过三轴固结排水试验，着重探讨钙质砂剪切强度变化的原因。通过大颗粒钙质砂对比试验排除了颗粒破碎对强度的影响，认为细小颗粒诱发扁平状钙质砂出现定向滑移是试样表现应变软化的关键因素。

1 颗粒分析

试验钙质砂来源于某岛，考虑到钙质砂含有丰富有机物，烘干时温度小于 65°C 。对钙质砂进行了颗粒分析，经标准土工筛筛后钙质砂各粒组的成分如下图1所示。当粒径大于 5 mm 时，钙质砂保留了部分生物特性，大颗粒钙质砂之上含有细小孔隙，颗粒具有明显的不规则特性。粒径在 $5\sim 0.5\text{ mm}$ 之间，钙质砂生物特性消失，颗粒大多成片状。当粒径小于 0.5 mm 时钙质砂各个方向尺寸相差不大，颗粒形状较为均匀。

对试样进行颗粒分析，其筛分曲线如图2所示。粒径小于 5 mm 的钙质砂约占全部比例的 87% ；筛分曲线在 $0.5\sim 0.1\text{ mm}$ 之间，曲线斜率较陡，粒径分布在此区间较多，约占全部质量的 38.1% ；小于 0.075 mm 粒径的钙质砂约占全部质量的 18.3% 。从筛分曲线可以得到限制粒径 $d_{60}=0.50\text{ mm}$ ，中粒径 $d_{30}=0.16\text{ mm}$ ，有效粒径 $d_{10}=0.025\text{ mm}$ ，则得到曲线的不均匀系数 $C_u=20$ ，曲率系数 $C_c=2.05$ 。故钙质砂颗粒级配良好。

2 制样方法

本次试验试样直径为 50 mm ，高度为 100 mm ，参考土工试验规程^[13]三轴试验最大粒径为试样尺寸的 $1/10$ ，故在试验之前筛除粒径大于 5 mm 的钙质砂。

采用GDS非饱和土三轴试验系统进行试验。钙质砂属于无粘性土，为保证试样的饱和度，本次试验采用二氧化碳联合反压进行饱和。分三层装好试样后，从底部缓慢通入二氧化碳，为保证试样饱和度，本次试验要求出气口均匀冒泡，也要保证通气时长约为 30 min ，然后徐徐注入蒸馏水，待蒸馏水均匀渗出，完成水头饱和。最后施加反压，施加反压时应缓慢，且加载过程中保持围压始终大于反压，其差值保持在 30 kPa 左右。试验过程发现该方法适应性良好， B 值检测时其值能达到 0.98 以上。考虑到钙质砂颗粒较为容易破碎，在制样时没有采用重物强行击实，而是分三次捣实，最终试样密度为 1.487 g/cm^3 。本文也研究钙质砂在进行三轴试验时，颗粒破碎对其的影响，筛除粒径范围小于 0.5 mm 的钙质砂，在制样时，依然不采用重物对试样强行击实，试样依然分三次捣实，粗颗粒钙质砂试样密度为 1.189 g/cm^3 。

3 试验结果与分析

对正常级配的钙质砂、筛除颗粒小于 0.5 mm 钙质砂分别进行围压为 50 、 100 、 200 以及 400 kPa 的固结排水(CD)试验剪切应变速率为 0.08 mm/min 。试验方法按照土工试验的要求^[6]。

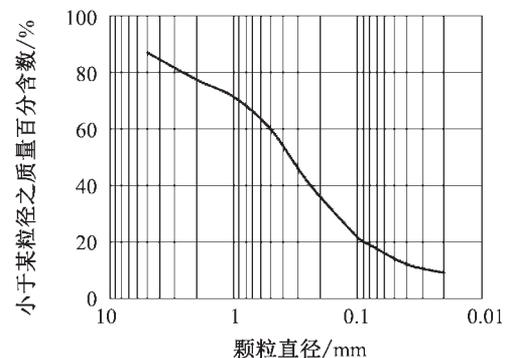


图2 钙质砂筛分曲线

Fig.2 Particle size distribution of the tested sample

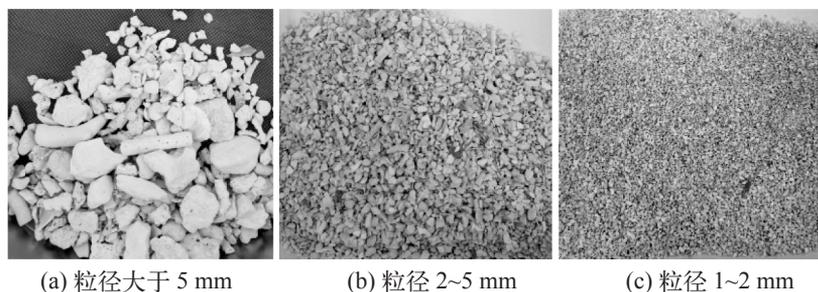


图1 不同粒径珊瑚砂实物图

Fig1. Coral sand with different particle size

3.1 正常级配钙质砂试验结果

图3为正常级配钙质砂应力-应变关系曲线,从中可以看出,正常级配钙质砂随着剪切的进行,偏应力逐步增大,到达某一应变后,出现峰值强度,随着剪切的持续,试样表现出应变软化的特性,最终试样达到残余强度,且随着剪切的进行,残余强度维持不变,试样最终表现为塑性流动。随着围压的增大,峰值强度出现的应变依次为7.4%、8.6%、9.3%以及12.8%。即应变软化的位置逐渐后移。注意到钙质砂出现应变软化对应轴向应变的位置大于5%,不同于结构性土应变软化的特性^[14]。结构性土应变软化主要是由于土颗粒之间的胶结破坏导致土体强度突然降低,其出现应变软化轴向应变的位置小于5%,且应变软化出现后并不会随着围压的增长而逐渐后移。这进一步排除了钙质砂是由于胶结键破坏而引起的强度突然降低。颗分试验表明,钙质砂颗粒形状的特点是颗粒扁平,小颗粒尺寸较为均匀,参考前人研究成果,本文认为引起应变软化的原因为:(1)钙质砂颗粒的破碎;(2)随着剪切的进行,在细小颗粒作用下,扁平状大颗粒定向滑移,导致试样出现软弱带,应变软化随之发生。

图4为体变曲线,可以看出试样在低围压

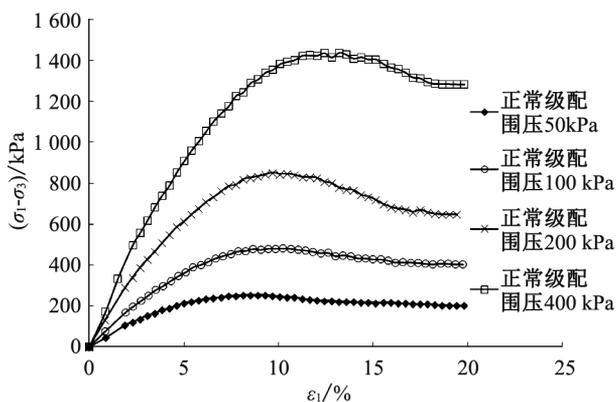


图3 正常级配钙质砂排水试验应力-应变关系曲线

Fig.3 Triaxial stress-strain curves of normal calcareous sand

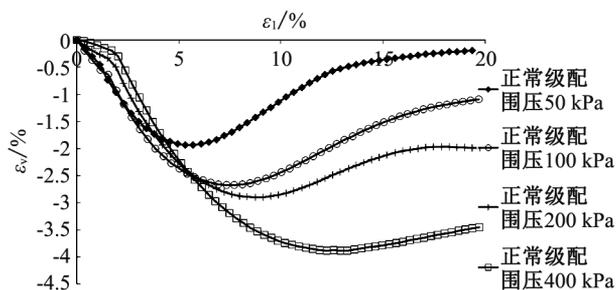


图4 正常级配钙质砂体变-应变关系曲线

Fig.4 Triaxial volume-strain curves of normal calcareous sand

(50 kPa)条件下的体变曲线不同于高围压(400 kPa)条件下的体变曲线。表明围压对钙质砂的体变模量有较大影响。在较低围压条件下,试样表现为体缩,且最初体缩速率逐渐降低,随后出现体胀。在较高围压条件下,试样表现为体缩,但试样初期响应呈刚性,体变较小,随着剪切的进行,体变速率加快,最终出现轻微的剪胀,可以看出随着围压的增大这种趋势逐步变得明显。观察不同围压条件出现应体胀的位置,分别为5.5%、7.1%、8.7%以及12.4%。可以看出随着围压的增长,体胀发生的位置也是逐渐后移的。联合应力-应变曲线可以看出,在低围压条件下,试样的偏应力增长比较平缓,而高围压条件下,试样的偏应力曲线最初快速增长,随后曲线斜率突然降低至某一稳定斜率,随后偏应力曲线平缓增长。综上所述,体变-应变曲线与应力-应变曲线有良好的对应关系,体变-应变曲线能较好地体现力学特性的变化趋势。

3.2 筛除0.5 mm细小钙质砂的试验结果

对正常级配条件下,出现应变软化的原因进行了讨论。为进一步确定是否是由钙质砂颗粒破碎引起其强度降低,筛除了小于0.5 mm细小颗粒的钙质砂,对扁平状大颗粒钙质砂进行了相同围压条件下的三轴试验。

图5表示了大颗粒钙质砂应力-应变关系曲线,从中可以看出,大颗粒钙质砂试样基本呈现出应变硬化性,最终试样近于塑性流动。随着围压的增长试样达到稳定时所对应的轴向应变逐步后移,当围压为400 kPa时,试样破坏时都没有表现出屈服。这表明钙质砂应力应变关系类似于“较软土”应力应变关系^[15]。表明钙质砂为较软砂土。

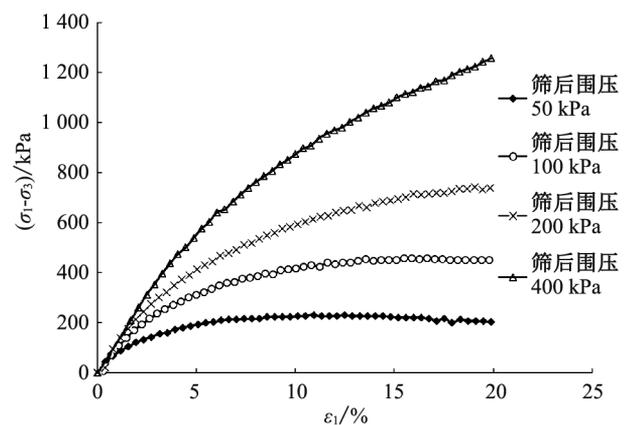


图5 大颗粒钙质砂固结排水试验应力-应变关系曲线

Fig.5 Triaxial stress-strain curves of large granule calcareous sand

图 6 表示大颗粒钙质砂体变曲线，可以看出当围压为 50 kPa 时，由于约束较弱，大颗粒扁平状钙质砂土颗粒出现滑移翻转，试样表现为先剪缩后剪胀。当围压为 100 kPa 及以上时，在围压的约束作用下，试样逐步被压密，试样表现为剪缩，符合应变硬化特性。

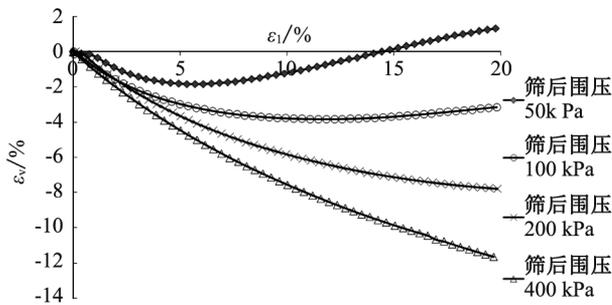


图 6 大颗粒钙质砂体变 - 应变关系曲线
Fig.6 Triaxial volume-strain curves of large granule calcareous sand

这表明：钙质砂在低围压条件下 (400 kPa)，颗粒并没有发生颗粒破碎或者钙质砂出现颗粒破碎，但颗粒破碎并不会引起强度的急剧增大。故本文认为钙质砂出现应变软化是由于扁平状大颗粒在颗粒均匀小颗粒的润滑作用下沿着剪切应力较大的反向偏转，待偏转的扁平状大颗粒偏转角度贯穿成线，剪切带就出现了，剪切带抵抗外荷载能力较弱，最终试样沿剪切带破坏，试样变现出应变软化。图 7 表示了试样破坏后形状，可以看出正常级配钙质砂在试样破坏后都会出现剪切带，剪切带基本沿着最大剪应力方向；大颗粒钙质砂试样破坏形式都是鼓胀破坏，破坏形式与试样应变硬化模式高度匹配。

正常级配钙质砂以及大颗粒钙质砂临界状态曲线如图 8 所示。其曲线关系满足如下方程。

$$q = MP + c$$

正常级配钙质砂拟合值 $M=1.61$ ，黏聚力 $c=60$ kPa，大颗粒钙质砂拟合值 $M=1.45$ ，黏聚力

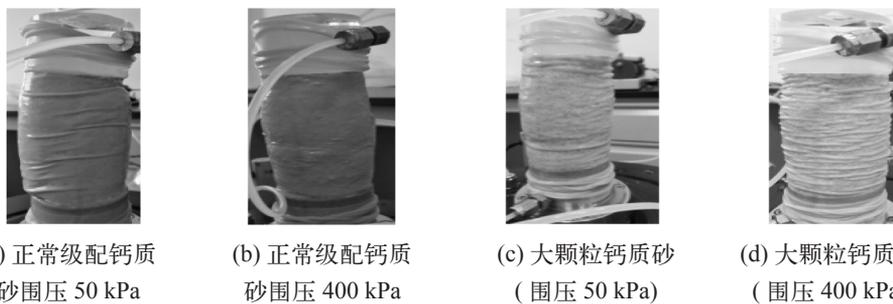


图 7 试验完成后试样的破坏状态
Fig.7 Failure state of the specimen after completion of the test

$c=90$ kPa。表明筛除 0.5 mm 粒径以下的细小颗粒后的大颗粒钙质砂，其内摩擦角也有所减小但黏聚力有所增加。说明大颗粒钙质砂的土粒间接触点变少，粗糙度有所降低，导致其内摩擦角减小，但由于缺乏细小颗粒的润滑作用，导致大颗粒钙质砂出现滑移难度有所增加，这引起了“黏聚力”的增加。试验结果表明缺少细小颗粒对钙质砂的强度机理有所影响，但对最终的剪切强度影响不大。

4 结论

- 1) 钙质砂级配良好，0.5 mm 以上大颗粒多为扁平状，0.5 mm 以下小颗粒尺寸较为均匀。
- 2) 对正常级配钙质砂进行三轴排水试验，应力应变表现出应变软化特性。出现应变软化的位置较为靠后，表现出较为明显的诱发应变软化特性。解释了诱发应变软化的原因为：钙质砂的颗粒破碎导致试样强度出现突然降低；剪切过程诱发钙质砂出现定向滑移。
- 3) 进行了大颗粒钙质砂三轴试验，应力应变表现为应变硬化特性，应力随应变缓慢增长表现出较

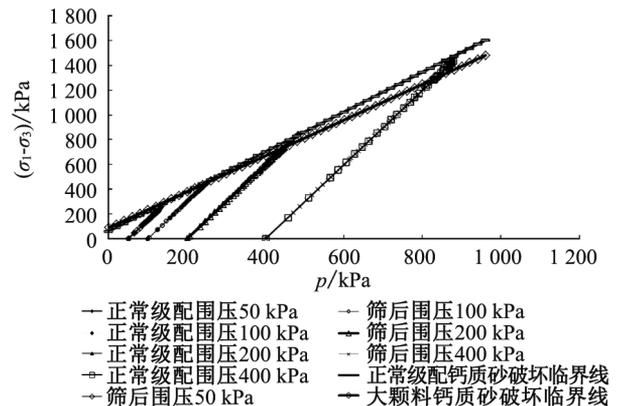


图 8 $q-p$ 临界状态曲线
Fig.8 $q-p$ critical state curve

- 弱地基填方工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 622-627.
- [3] 魏永幸, 罗强, 邱延峻. 渝怀线斜坡软弱地基填方工程特性及工程技术研究报告[R]. 成都: 铁道第二勘察设计院, 2005.
- [4] 魏永幸. 松软倾斜地基填方工程安全性评价方法[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(2): 73-79.
- [5] 张良, 魏永幸, 罗强. 基于离心模型试验的斜坡软弱土地基路堤变形特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2004(1): 51-53.
- [6] 蒋鑫, 刘晋南, 黄明星. 抗滑桩加固斜坡软弱地基路堤的数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1261-1267.
- [7] 罗强, 胡勇刚, 张良. 水泥土搅拌法加固斜坡软弱土地基的土工离心模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 12-19.
- [8] QIU Yanjun, WEI Yong, LUO Qiang. Highway embankments over sloped ground and influence on pavement responses[C]//PENG Qiyuan, WANG Kelvin, QIU Yanjun, et al. Proceedings of the International Conference on Transportation Engineering 2007(ICTE 2007). [S.l.]: ASCE, 2007: 1615-1620.
- [9] JIANG Xin, QIU Yanjun, WEI Yongxing, et al. Application of SSRM in stability analysis of subgrade embankments over sloped weak ground with FLAC3D[C]//CHEN Zzuyu, ZHANG Jianmin, LI Zhonggui, et al. Landslides and Engineered Slopes From the Past to the Future: Proceedings of 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes. London: Thylor & Francis Group, 2008: 741-746.
- [10] 张良, 魏永幸, 罗强. 基于离心模型试验的斜坡软弱土地基路堤加固方案研究[J]. 铁道工程学报, 2004(1): 73-76.
- [11] 池淑兰, 孔书祥, 梁明学. 路基及支挡结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 21-28.

(责任编辑 王利君)

(上接第43页)

软砂土力学特性。排除了钙质砂颗粒破碎导致试样强度突然降低的原因。进一步确定细小颗粒诱发扁平状大颗粒钙质砂出现定向滑移是导致钙质砂出现应变软化的主要因素。

4) 细小颗粒对钙质砂的强度机理有所影响, 细小颗粒的缺失导致试样内摩擦角减小, “黏聚力”增大, 但对最终的剪切强度影响不大。

参考文献:

- [1] 吴京平, 楼志刚. 钙质砂的基本特性[C]//第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 267-271.
- [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.
- [3] 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.
- [4] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩与破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327-3331.
- [5] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 641-644.
- [6] DATTA M, GULHATI S K, RAO G V. Crushing of Calcareous Sands during Shear[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(2): 77-85.
- [7] 蒋礼. 南海钙质砂破碎力学特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [8] 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(Z): 3010-3015.
- [9] 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.
- [10] FAHEY M. The response of calcareous soil in static and cyclic triaxial test[C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Rotterdam: Balkema A A, 1988: 61-68.
- [11] 孙吉主, 汪稔. 围压对钙质砂变形特性和声发射模式的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(Z): 1173-1176.
- [12] 汪稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤—滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 75-78.
- [13] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [14] 刘恩龙. 岩土破损力学: 结构块破损机制与二元介质模型[J]. 岩土力学, 2010(Z): 13-22.
- [15] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 51-60.

(责任编辑 王利君)