doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2020.02.010

高竖向应力作用下海砂直接剪切特性研究

张国富,张伦超,梁冠军
(滁州职业技术学院建筑工程学院,安徽 滁州 23900)

摘要:随着近海工程项目的日益增多,海砂可作为经济性建筑材料,但关于高应力作用下海砂的剪切特性研究未见相关文献。通过研究高竖向应力作用下中等粒径海砂的直剪特性,探究了剪切速率对强度指标的影响,得出以下主要结论:(1)随着竖向应力的增大,海砂应力-位移曲线的软化特性越来越突出。(2)海砂达到峰值应力时的位移大致呈现随竖向应力的增大而逐渐增大的趋势。(3)剪切过程中,竖向位移逐渐减小并趋于稳定,表现出剪胀特性。(4)竖向位移-剪切位移关系曲线在初始过程呈现出轻微的剪缩过程,表现为一个较长的稳定阶段,主要是与材料选择与高竖向应力有关。(5) 剪切速率对高竖向应力作用下摩尔-库伦曲线的斜率有一定影响,近似可认为随剪切速率的增大,表现为内摩擦的降低。研究成果对近海工程项目建设有一定的参考价值。

关键词:海砂;直接剪切试验;剪切位移;法向应力;抗剪强度
中图分类号:TU411.7; TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2020)02-0042-04

Direct Shear Characteristics of Marine Sand under Higher Vertical Stresses

ZHANG Guofu, ZHANG Lunchao, LIANG Guanjun
(School of Civil Engineering, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou, Anhui 239000, China)

Abstract: With increasing offshore engineering projects, marine sand can be used as an economic building material, but there is no relevant literature on the shear characteristics of marine sand under higher stresses. In this paper, the direct shear characteristics of medium-sized marine sand under higher vertical stresses are studied, and the influence of shear rate on the strength index is explored. With the increase of vertical stress, the softening characteristics of the stress-displacement curve of marine sand become more and more prominent. The displacement when the marine sand reaches the peak stress tends to increase with the increase of vertical stress. During the shear process, the vertical displacement first decreases gradually and then tends to become stable, showing shear expansion characteristics. The relationship curve of vertical displacement and shear displacement presents a slight shear contraction process in the initial process, representing a long-term stable period mainly due to material selection and high vertical stress. The shear rate has a certain impact on the slope of the Mohr-Coulomb curve under the action of high vertical stress, which can be roughly understood as the increase of shear rate is represented as the decrease of internal friction. Our study results have some values for offshore engineering projects.

Keywords: marine sand; direct shear test; shear displacement; vertical stress; shear strength

0 引言

海洋是人类赖以生存的资源宝库,其渔业、矿产与水资源等丰富。近年来,随着国家经济建设的高速持续发展,海洋港口建设、填海造岛礁与资源开采等工程建设项目日益增多。相反的是,河砂开展量的增长非常有限[1],伴随着河砂资源的减少,以及远距离运输河砂会增加工程建设成本,越来越多的旁海项目选择用海砂作为建设用砂[2]。

海砂中含有大量导致钢筋腐蚀的氯离子等化学成分,故国内外很多学者对如何合理利用海砂开展了大量研究,主要包括海砂混凝土基本力学特性[1-3],海砂砂浆工作性能[4-5],但是关于海砂的直剪特性研究较少[1],关于高竖向应力作用下海砂的直接剪切特性未见相关文献。

收稿日期:2020-02-12
基金项目:安徽省教育厅2017年高校省级质量工程项目(2017sjjd051);安徽省教育厅2017年高校自然科学研究重点项目(KJ2017A725);滁州职业技术学院院级人才项目(ZD2017007)。
作者简介:张国富(1972—),男,安徽来安人,讲师,学士,研究方向:土木工程管理及施工技术。

直剪试验设备相对简单，体积相对较小，方便安置于建设工地就地制样开展研究，并快速服务于工程项目建设。李大勇等[6]探究了不同相对密实度情况下饱和海砂的直接剪切特性，试验用最大竖向应力为300 kPa；柴维等[7]、齐永正等[8]、钱慧良等[9]研究了剪切速率、颗粒破碎与胶结性等对海相钙质砂强度指标与变形特性的影响，试验用最大竖向应力为400 kPa。既有研究成果均是在较低的竖向应力作用下开展，随着工程建设项目体量、高度、附属建构筑数目等的持续增加，有必要开展高竖向应力作用下的海砂直接剪切特性研究。

根据上述研究成果的不足之处，本文系统地开展了高竖向应力作用下海砂直接剪切试验研究，探讨了剪切速率对强度指标的影响，研究成果可为滨海工程项目建设提供一定的参考。

1 海砂基本物理性质

试验用海砂取自于青岛疗养院附近，本文筛取了其中粒径为0.212~0.600 mm的中等粒径海砂作为研究对象，其中，0.212~0.300 mm粒径成分约占23.5%，0.300~0.425 mm粒径成分约占65.5%，0.425~0.600 mm粒径成分约占11.0%。试验用中等粒径海砂的基本物理力学性质如表1所示，中等粒径海砂的级配曲线如图1所示。

表1　试验用中等粒径海砂的基本物理力学性质

粒组质量分数/%			级配参数			
粒径0.212~0.300 mm	粒径0.300~0.425 mm	粒径0.425~0.600/mm	有效粒径D30/mm	有效粒径D60/mm	不均匀系数Cu	曲率系数Cc
23.5	65.5	11.0	0.313	0.361	1.41	1.06

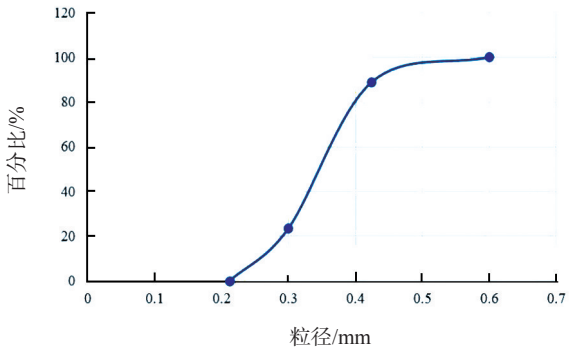


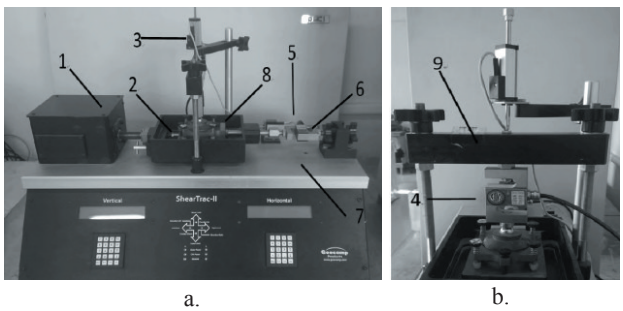
图1　中等粒径海砂的级配曲线图

2 直剪设备与试验方案

本文采用美国Geocomp公司生产的ShearTrac-Ⅱ型应变控制式直剪仪，通过传感器反馈实施控制加载框架，该仪器可实现竖向荷载与剪应力的全自动施加，实现竖向位移与水平剪切位移的全自动监控，是一套智能化的加载系统。同时，可保持剪切过程中竖向荷载的恒定，有效避免了传统直剪仪器误差。李大勇等[6]给出了该设备的详细介绍，如图2所示。

试验过程中，首先将海砂放入105 °C的烘箱中充分干燥24 h，试验采用的方形剪切盒边长约60.10 mm，剪切盒中试样的高度为36.85 mm，河砂自然轻微振动填充状态下盒内试样密度为1.66 g/cm^3，为保证加载均匀，试样上部加装一块方形透水石。

本次试验重点研究高竖向应力作用下的剪切特性，故竖向应力分别设置为500、1 000、1 500与2 000 kPa等共4组。用ShearTrac-Ⅱ直剪仪实现按每



a.　　b.

注：1. 水平电机；2. 水槽（可做饱水状态下剪切试验）；3. 竖向位移LVDT传感器；4. 竖向荷载传感器；5. 水平位移LVDT传感器；6. 水平剪切应力传感器；7. 加载装置平台；8. 剪切盒；9. 加载框架。

图2　试验装置示意图[6]

50 kPa递增竖向应力至指定值，即每次施加完50 kPa后稳定10 s，施加下一级50 kPa。该方式可以模仿实际工程荷载逐渐施加的固结过程。每组竖向应力分别作3组平行试验求均值，剪切速率分别设置为0.30、0.12、0.48 mm/min用以研究剪切速率对强度指标的影响。试验按照GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行，并参照美国标准ASTM D 3080。

3 试验结果与分析

3.1 剪切应力与剪切位移关系

剪切速率为0.30 mm/min时，高竖向应力作用下剪切应力与剪切位移关系曲线如图3所示。

由图3可以看出：(1)海砂的峰值剪切应力与竖向应力的大小密切相关，随着竖向应力的逐渐增

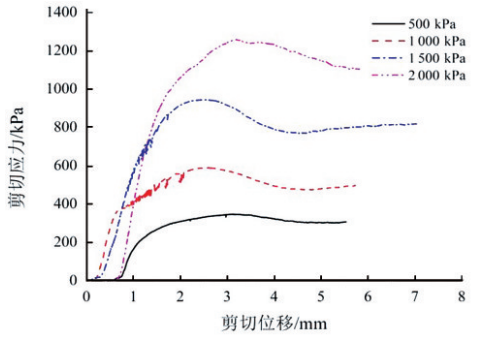


图3 高竖向应力作用下剪切应力与剪切位移关系曲线

大,应力-位移曲线的软化特性越来越突出。(2)达到峰值应力时的剪切位移不同,约为2~3 mm,大致呈现随竖向应力的增大而逐渐增大的趋势,其中,竖向应力为500 kPa与2 000 kPa初始阶段的剪切应力为负值,图中为标注出,可能与仪器误差或试验操作有关。(3)由垂直应力为1 000 kPa与1 500 kPa两组较完整剪切应力-位移曲线可以看出,试验末端剪切应力由增大的趋势,这与试验进程中上半部分剪切盒与上盖发生倾斜有关,上盖与下半部分剪切盒间发生摩擦,阻抗增大了剪切应力的记录值;(4)典型剪切应力-位移曲线呈现先增加—后减小—基本趋于稳定的变化趋势,后半段增大部分不可作为残余应力的判别标准。

3.2 竖向位移与剪切位移关系

剪切速率为0.30 mm/min时,高竖向应力作用下竖向位移与剪切位移关系曲线如图4所示。

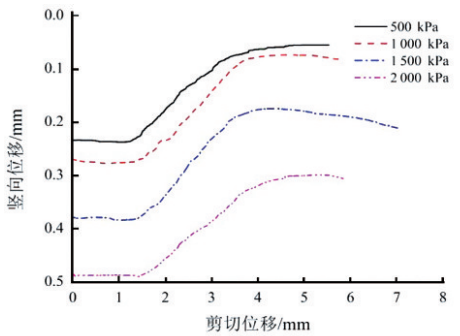


图4 高竖向应力作用下竖向位移与剪切位移关系曲线

由图4可以看出:(1)固结过程中竖向位移即垂直方向的变形量与施加的竖向荷载密切相关;剪切过程中,在不同的竖向荷载作用下,竖向位移逐渐减小并趋于稳定,即砂样的体积膨胀,表现出剪胀特性。(2)竖向位移-剪切位移关系曲线在初始过程呈现出轻微的剪缩过程,表现为一个较长的稳定阶段,主要是因为本次试验采用的中等粒径海砂不均匀系数与曲率系数均较小,没有明显的颗粒破碎、翻滚与相对滑移等行为。(3)1 000 kPa以上竖向应力试样在峰值后表现出一定程度的剪缩,竖向应力越大,该现象越明显,主要与试样发生剪切变形之后上盖与上半部分剪切盒发生倾斜有关。

3.3 抗剪强度与竖向应力关系

剪切速率为0.30 mm/min时,抗剪强度与竖向应力关系曲线如图5所示。

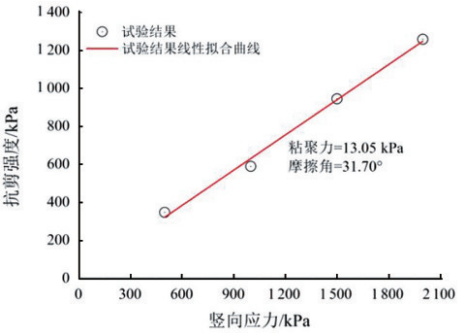


图5 抗剪强度与竖向应力关系曲线

由图5可以看出:(1)中等粒径海砂在填充密度为1.66 g/cm^{3}的情况下,黏聚力和内摩擦角分别为13.05 kPa与31.70°。(2)对于低应力状态的海砂,一般认为其黏聚力趋近于0[6, 10],对比于低竖向应力状态,本次试验得出的粘聚力数值相对较高,说明海砂的黏聚力在一定程度上受竖向应力大小的影响。(3)如果认为中等粒径河砂颗粒较均匀,颗粒间咬合较小,将黏聚力设为0,仅考虑内摩擦角的影响,则相应试验结果得到的内摩擦角为32.05°。

3.4 剪切速率对直剪特性的影响

不同剪切速率工况下,抗剪强度与竖向应力关系曲线如图6所示。

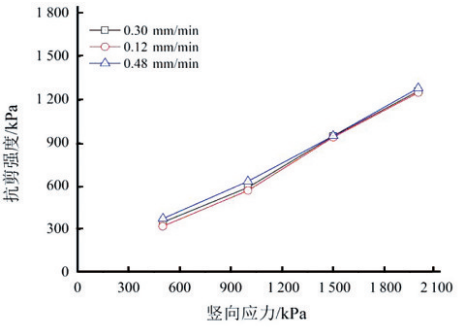


图6 不同剪切速率工况下,抗剪强度与竖向应力关系曲线

由图6可以看出:(1)海砂抗剪强度随竖向应力的增大而显著增加,即使在较高的竖向应力工况下,强度指标依然符合摩尔-库伦强度准则。(2)随着剪切速率的增加,黏聚力略微增大。(3)剪切速率对高竖向应力作用下摩尔-库伦曲线的斜率有一定影响,近似可认为随剪切速率的增大,斜率略微减小,表现为内摩擦的降低。(4)在较低应力作用下,

剪切应力引起的抗剪强度差值相对较大,随着竖向荷载的增大,试样压密,抗剪强度差值降低。

4 结论

本文研究了高竖向应力作用下中等粒径河砂的直剪特性,探究了剪切速率对强度指标的影响,得出以下主要结论:

1)海砂的峰值剪切应力与竖向应力的大小密切相关,随着竖向应力的逐渐增大,应力-位移曲线的软化特性越来越突出。

2)达到峰值应力时的剪切位移不同,约为2~3 mm,大致呈现随竖向应力的增大而逐渐增大的趋势。

3)剪切过程中,在不同的竖向荷载作用下,竖向位移逐渐减小并趋于稳定,表现出剪胀特性。

4)竖向位移-剪切位移关系曲线在初始过程呈现出轻微的剪缩过程,表现为一个较长的稳定阶段,主要是与材料选择与高竖向应力有关。

5)海砂的黏聚力在一定程度上受高竖向应力大小的影响。

6)剪切速率对高竖向应力作用下摩尔-库伦曲线的斜率有一定影响,近似可认为随剪切速率的增大,表现为内摩擦的降低。

参考文献:

[1] 刘伟,谢友均,董必钦,等.海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J].硅酸盐通报,2014,33(1):15-22.
[2] 秦斌.海水海砂混凝土基本力学性能研究[J].混凝土,2019(2):90-91.
[3] 赵嘉玮,薛瑞丰.海砂混凝土的研究和应用综述[J].山西建筑,2015,41(7):103-105.
[4] 刘斯凤,朱洪波,许赟晨.海砂砂浆的工作性及力学性能研究[C]//中国硅酸盐学会.第七届全国商品砂浆学术交流会(7th NCCM)论文集.广州:中国硅酸盐学会,2017:179-186.
[5] 金明东,李淑娥,徐永福.海砂土力学特性及其在路基工程中应用[J].岩土力学,2018,39(S2):373.
[6] 李大勇,卢高,鞠雷.初始相对密实度对饱和细海砂直剪特性的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(3):45-49+62.
[7] 柴维,龙志林,旷杜敏,等.直剪剪切速率对钙质砂强度及变形特征的影响[J].岩土力学,2019,40(S1):359-366.
[8] 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.
[9] 钱慧良,杨钧岩.胶结性对钙质砂剪切特性影响的试验分析[J].工程建设,2019,51(6):14-20.
[10] 陈宇龙,孙欢.非饱和亲水性和疏水性砂的剪切行为[J].清华大学学报(自然科学版)2019,59(12):1-6.

(责任编辑:蒋召雪)

(上接第37页)

[4] 高禹诗,周波,杨洁.城乡统筹背景下的田园型绿道使用后评价——以成都锦江198LOHAS绿道为例[J].中国园林,2018,34(2):116-121.
[5] 吴隽宇.广东增城绿道系统使用后评价(POE)研究[J].中国园林,2011,27(4):39-43.
[6] 庄惟敏,党雨田.使用后评估:一个合理设计的标准[J].住区, 2017(1):132-135.
[7] 张文彤,董伟.SPSS统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2002:215-220.
[8] 柯惠新,沈浩.调查研究中的统计分析法·基础篇.[M].3版.北京:中国传媒大学出版社, 2015.
[9] 杨晓明. SPSS在教育统计中的应用[M].北京:高等教育出版社, 2012.

(责任编辑:曲继鹏)