初始相对密实度对饱和细海砂直剪特性的影响

李大勇[1,2],卢　高[1],鞠　雷[3]

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266590;
3. 青岛暖万家市政工程有限公司,山东 青岛 266555)

摘　要:以松散、中密、密实等不同初始相对密实状态的饱和细海砂为研究对象,利用直接剪切试验研究了饱和细海砂的剪切特性。研究表明:砂土的初始相对密实度对其应力应变关系有重要影响,密实砂土呈现强度软化,松散砂土呈现强度硬化;相对密实度越大,饱和细海砂的剪应力峰值越大;同一相对密实度,饱和细海砂的剪应力峰值随竖向应力的增大而增大。竖向应力较低时,不同密实度的饱和细海砂在剪切过程中,体积先减小(即剪缩)后增大(即剪胀);竖向应力较高时,呈先剪缩-剪胀-再剪缩的趋势。内摩擦角随相对密实度的增加而增大。

关键词:饱和细海砂;相对密实度;直剪试验;抗剪强度

中图分类号:TU441.4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-3767(2017)03-0045-05

Effects of Initial Relative Densities on Direct Shear Behavior of Saturated Fine Marine Sand

LI Dayong[1,2], LU Gao[1], JU Lei[3]

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. Qingdao Nuanwanjia Municipal Construction Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: Direct shear tests were performed on saturated fine marine sand with loose, medium and tight initial relative densities to study its shear properties. The experimental results indicate that the initial relative densities of sand have important influence on the stress-strain relationship. Dense sand exhibits strength softening, while loose sand presents strength hardening. The larger the relative density of the sand is, the greater the peak of shear stress becomes. For the saturated fine marine sand with the same density, the peak shear stress increases with the increase of its vertical stress. When the vertical stress is low, the volume of the saturated fine marine sand with different densities shrinks at first and then dilates in the process of shearing, while when the high vertical stress is high, it presents a shrinkage-dilatancy-shrinkage trend. Friction angle increases with the increase of relative densities.

Key words: saturated fine marine sand; relative density; direct shear tests; shear strength

21 世纪是海洋的世纪,海上油气开采平台、海上风电场建设等,促进了新型学科海洋岩土工程的发展。这些海洋工程的基础多位于砂土地基上,相对密实度是反映砂类土紧密程度的重要指标,自 20 世纪 40 年代由国外学者提出并得到广泛使用[1],对于海床稳定性,特别是在抗震液化判别方面具有重要的工程意义。砂类土的力学性质分析试验研究取得了一系列研究成果,如:Cai 等[2]认为砂土在剪切过程中变形特性取决于

收稿日期:2016-01-11
基金项目:国家自然科学基金项目(51379118);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2015TDJH104)
作者简介:李大勇(1971—),男,山东泰安人,教授,博士,主要从事海洋岩土工程方面研究.
E-mail: ldy@sdust.edu.cn

自身的密度和所施加的有效平均正应力；李建红等[3]通过常规三轴试验发现孔隙比能够显著影响结构性土的剪胀和软化特性：结构性土胶结强度越高、孔隙比越小，就越容易出现软化和剪胀的现象；史旦达等[4]认为密实砂样抗剪强度的峰后软化现象和剪胀现象十分明显，砂土在加载过程表现出的应力－剪胀关系符合 Rowe-Davis 应力-剪胀关系；蒋明镜等[5]通过数值模拟对松散砂土在直剪试验中的经典与非经典场量进行了分析，探讨其间的联系；路德春等[6]通过对饱和砂在部分排水条件下的 GDS 三轴试验，研究了饱和砂在部分排水条件下的力学特性；陈立平等[7]将砂土颗粒简化为空间椭球体，从颗粒层面对砂土的摩擦特性和破坏机制进行分析，指出砂的剪切破坏实质上是砂土颗粒重新排列和应力重新分布的过程。

综上所述，国内外学者通过三轴试验、数值模拟等方法对砂土的力学性质有较好认识，但对饱和细海砂初始相对密实度对抗剪特性的影响仍需进一步研究。青岛黄海海床中广泛分布砂性土，针对 3 种不同相对密实度的青岛黄海海域饱和细海砂，采用先进伺服控制直剪试验仪对饱和细海砂的力学性质进行分析，探究其不同初始相对密实度对饱和细海砂抗剪强度的影响，得到了相应的剪应力-水平位移关系，可供工程设计参考。

1 试验材料及直剪试验仪

1.1 试验材料

试验所用土样为青岛黄海海域细海砂，通过筛分试验得到其颗粒级配曲线（图 1），由此颗粒级配曲线进一步得到了相关级配参数（表 1）。

1.2 直剪试验仪

试验仪器为美国生产的 ShearTrac-II 型应变控制式直剪仪（图 2）。与传统直剪仪相比，其优势在于能确保所施加的竖向固结压力在剪切过程中始终不变。而传统直剪仪在试验过程中，竖向固结压力在剪切过程中是不断增加的，但实际仍取常值，从而引起一定的分析误差。

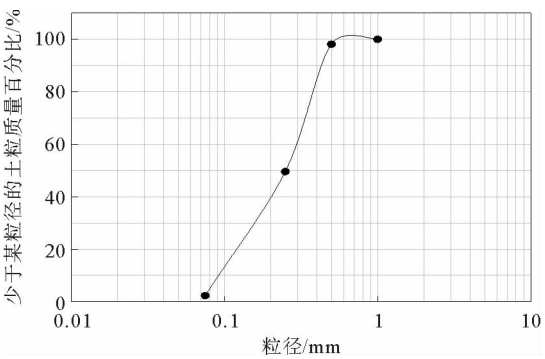


图 1 细海砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of fine marine sand

表 1 细海砂的相关级配参数

Tab. 1 Parameters of particle size distribution

平均粒径 /mm	有效粒径 D_{30}/mm	有效粒径 D_{60}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
0.097	0.16	0.29	1.78	0.997

2 试验方案

2.1 试样制备

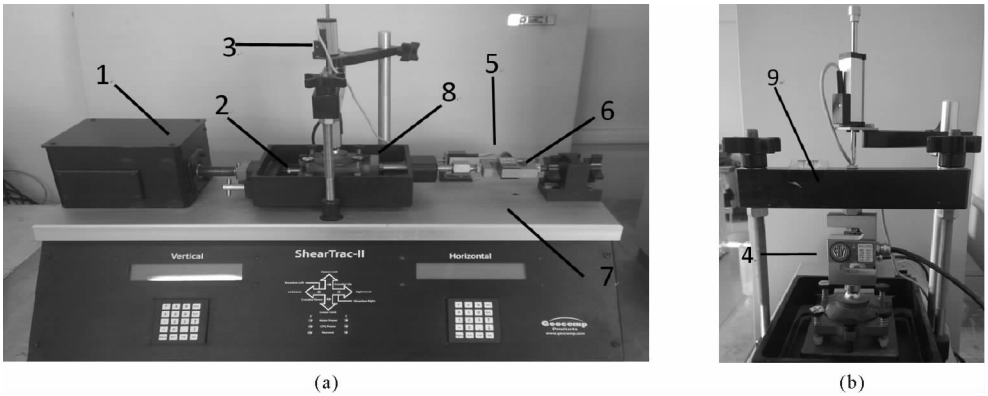
将细海砂置于 105 ℃烘箱中，经过 24 h 充分干燥。针对松散、中密和密实 3 种状态，对应选定了 3 个相对密实度即 D_r 分别为 0.3、0.5、0.9。每种状态的砂样，在竖向固结压力分别为 50、100、200 和 300 kPa 下进行剪切试验。

该试验砂样直径 D 为 63.5 mm，高度 h 为 27.7 mm，体积 $v=\pi D^2 h/4=87.679\ \mathrm{cm}^3$。为更好地控制试验中砂样的相对密实度，推导出砂样质量 m_s 与相对密实度 D_r、试样体积 v 的关系式。推导过程如下：

由天然孔隙比 $e_0=\nu_v/\nu_s=(\nu_v-\nu_s)/\nu_s$，可得

$$m_s=v_s\rho_s=v\cdot\rho_s/(1+e_0)\ 。\tag{1}$$

式中：v_v 为试样中孔隙的体积；v_s 为试样中砂粒体积；v 为试样体积；ρ_s 为砂样比重，试验用砂测得的 ρ_s 为 2.69。



1—水平电机;2—水槽;3—竖向位移传感器;4—竖向力传感器;5—水平力传感器;6—水平位移传感器;7—底座;8—剪切盒;9—荷载架

图 2　ShearTrac-II 型应变控制式直剪仪

Fig. 2　Shear Trac-II direct shear apparatus

根据相对密实度的计算式：$D_r = (e_{max} - e_0)/(e_{max} - e_{min})$，可得

$$e_0 = e_{max} - D_r(e_{max} - e_{min}) = 0.903 - 0.308D_r \text{。} \tag{2}$$

式中：e_{max}、e_{min}分别为试验用砂的最大、最小孔隙比，e_{max}取 0.903、e_{min}取 0.595[8]。

由式(1)和式(2)可得 m_s 与 D_r、v 的关系式为

$$m_s = 2.69\nu/(1 + 0.903 - 0.308D_r) = 2.69\nu/(1.903 - 0.308D_r) \text{。} \tag{3}$$

由此，根据式(3)可以计算出初始相对密实度 $D_r = 0.3$、0.5、0.9 时，特定体积的试样质量分别为 130.26、134.85 和 145.07 g。

2.2　试验步骤

1）针对不同的初始相对密实度，称取相应质量的砂样作为试验用砂。

2）采用湿装法进行装样。将剪切盒置于水槽中，在下盒内放入透水板和滤纸，向水槽内注水至剪切盒下盒的排水孔处，然后倒入三分之一总量的试验用砂，用木槌轻轻击实(击实力度因初始密实度大小而异)，再次注水至没过砂面约 2 mm 高度，使砂样充分饱和。重复上述步骤两次，刮平，盖上滤纸、透水石。

3）设定所需要的各级竖向固结压力(50、100、200 和 300 kPa)及剪切速率(0.8 mm/min)；当竖向固结压力达到设定值时，拔去固定销，进行剪切。

4）为确保试验结果的准确性与可重复性，每个工况至少进行 3 组试验，最大和最小值误差不超过 3%，取平均值，否则重新补做一组。

3　试验结果及分析

3.1　剪应力-水平位移关系曲线

图 3 为相对密实度依次为 0.3、0.5、0.9 的饱和细海砂在 50、100、200 和 300 kPa 竖向固结压力下的剪应力-水平位移关系曲线，剪应力峰值及所对应的水平位移如表 2 所示。

由图 3 和表 2 可发现：

1）砂土的剪应力峰值(或称为峰值强度)与初始相对密实度及竖向固结压力密切相关。相同初始相对密度条件、松散状态，且较低的竖向固结压力条件下(100 kPa)，应力曲线呈现硬化状态，反而较高应力状态下，呈现明显的软化特性；密实状态下，皆呈现软化特性。

2）达到相应的峰值强度时所需的水平位移是不同的。总的趋势是随竖向固结压力增大，达到峰值强度时所需的水平位移逐渐增大。松散状态条件下，所需的水平位移差别不大，最大差值不超过 0.3 mm，所需位移比密实状态条件要大；密实状态下，所需的水平位移有较大差别，最大差值达 0.885 mm。

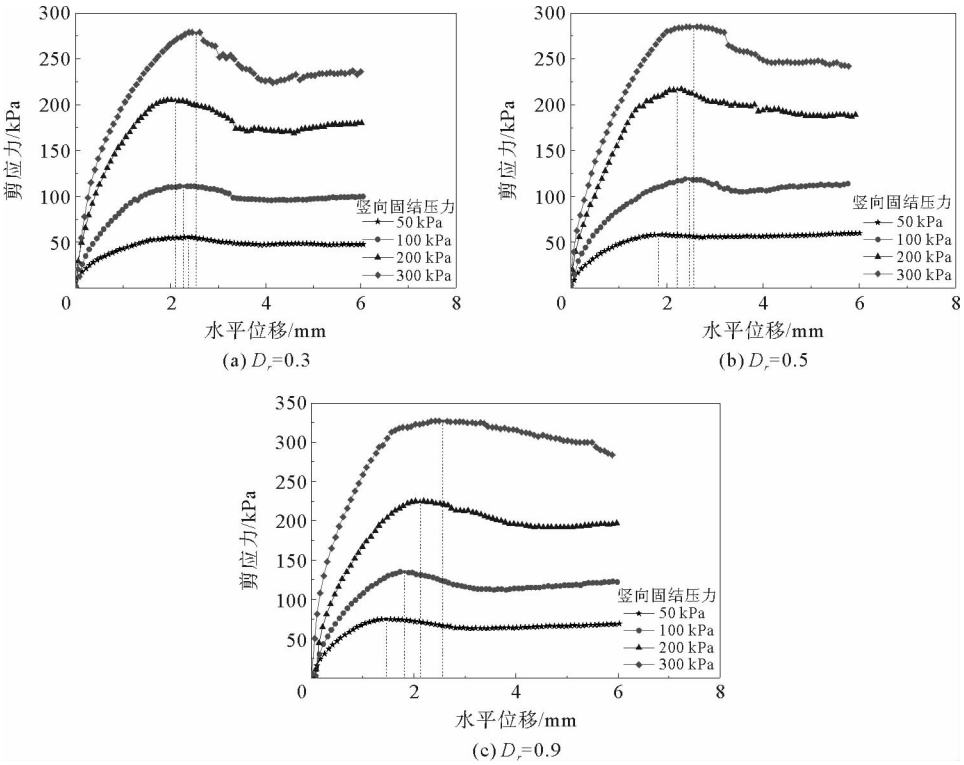


图 3　不同初始相对密实度下饱和细海砂的剪应力与水平位移关系曲线

Fig. 3　Curves of shear stress and horizontal displacement in different initial relative densities

表 2　不同竖向固结压力作用下的剪切峰值及相应位移关系

Tab. 2　Peak shear stress and corresponding displacement under various vertical pressures

初始相对密实度	初始相对密实度	50	100	200	300
D_r =0.3	剪应力峰值/kPa	55.5	99.2	185	289
	对应位移/mm	2.373	2.186	2.099	2.386
D_r =0.5	剪应力峰值/kPa	56	111	198	299
	对应位移/mm	1.902	2.379	2.216	2.404
D_r =0.9	剪应力峰值/kPa	66.9	115	220	327
	对应位移/mm	1.457	1.736	2.034	2.342

3）峰值强度随固结压力的升高而显著增大，砂土越松散，损失的剪切强度（峰值强度与残余强度的差）就越大。

3.2　体积应变与水平位移关系曲线

图 4 为饱和细海砂体积应变与水平位移关系，可以得出同一竖向应力下，不同初始相对密实度的饱和细海砂在剪切过程中随着水平位移的增大，体积应变由负值变为正值（图中负值代表试样位移向下，正值代表位移向上），即先压缩后膨胀。在 50 和 100 kPa 低竖向应力下，试样在剪切过程中先剪缩后剪胀；当竖向应力为 200 和 300 kPa 时，随着水平位移的增大、试样会出现先剪缩后剪胀再剪缩的趋势。从图中还可以得出，初始相对密实度越大体积应变值也就越大，表明试样越密实剪胀现象越明显。

3.3　不同初始相对密实度下抗剪强度与竖向应力关系曲线

根据试验测得的剪应力值，作出不同初始相对密实度下饱和砂的抗剪强度与竖向应力关系曲线（图 5）。可以得出，同种砂土其内摩擦角与初始相对密实度有关，且随初始相对密实度的增加而增大。

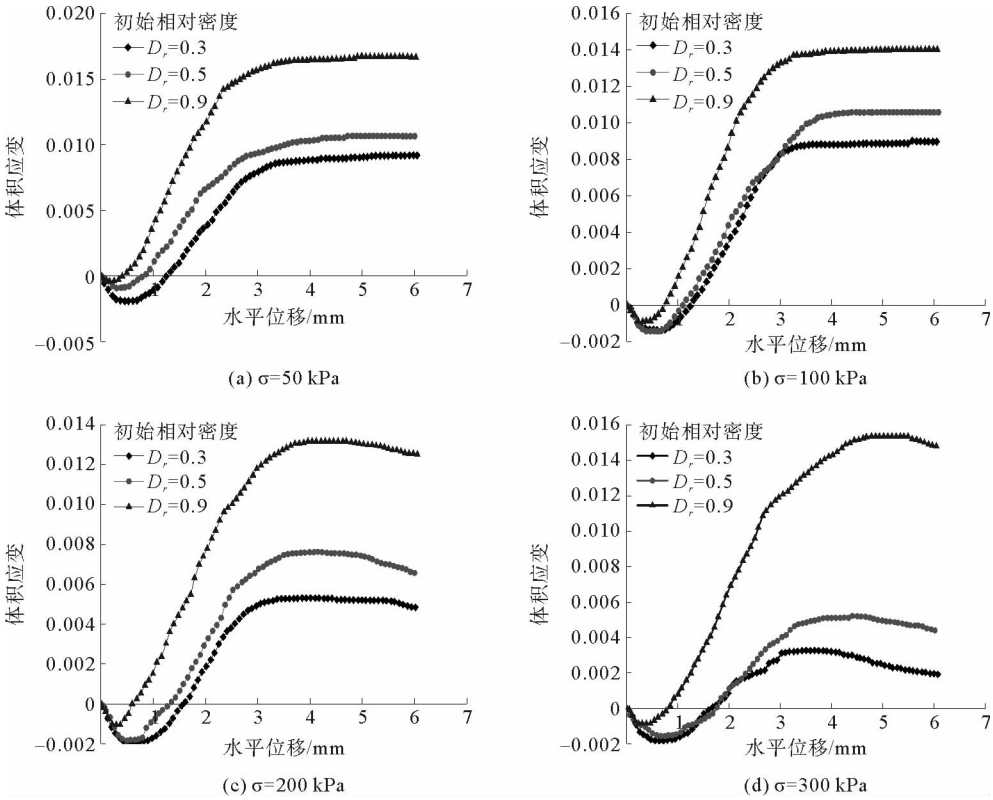


图 4　不同竖向固结压力条件下细海砂的体积应变与水平位移关系

Fig. 4　Curves of volumetric strain and horizontal displacement under different vertical pressures

4　结　论

通过对青岛黄海金沙滩海域的饱和细海砂的直剪试验，分析了初始相对密实度对饱和细海砂力学性质的影响，得到以下结论：

1）饱和细海砂在剪切过程中，当水平位移达到 1.9～2.5 mm 之后剪应力出现峰值。

2）当竖向压力为 50 和 100 kPa 时，不同初始相对密实度的饱和细海砂在剪切过程中，体积先减小（即剪缩）后增大（即剪胀）；当竖向压力为 200 及 300 kPa 时，呈先剪缩-后剪胀-再剪缩的趋势。

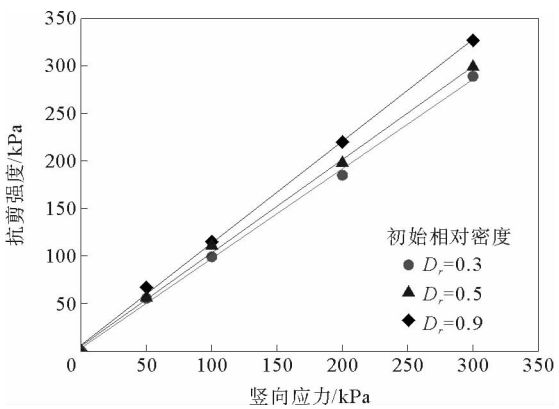


图 5　抗剪强度与竖向应力关系曲线

Fig. 5　Relation between shear strength and vertical stress

3）饱和细海砂的内摩擦角与初始相对密实度有关，随初始相对密实度的增加而增大。

参考文献：

[1]TAVENAS F，ROCHELLE P. Accuracy of relative density measurements [J]. Geotechnique，1972，22(4)：549-562.

[2]CAI Z Y，LI X S. Deformation characteristics and critical state of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2004，26(5)：697-701.

[3]李建红，张其光，孙逊，等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. 清华大学学报（自然科学版），2008，48(9)：1431-1435.

LI Jianhong，ZHANG Qiguang，SUN Xun，et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science)，2008，48(9)：1431-1435.

（下转第 62 页）

Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(8):1448-1452.

[7]孙训海,雷晓雨,佟建兴.土层压缩模量的选取对地基变形计算的影响[J].建筑科学,2010,26(9):40-43.

SUN Xunhai,LEI Xiaoyu,TONG Jianxin. Effect of modulus selection on the deformation of foundation soil[J]. Building Science,2010,26(9):40-43.

[8]董炳炎,甘德福.论上海软土地基⑦⑧⑨层压缩模量 E_s 的定值问题[J].水文地质工程地质,2003(4):59-62.

DONG Bingyan,GAN Defu. Value determination problem of compressive modulus E_s of soil layers⑦,⑧and⑨in Shanghai soft soil foundation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2003(4):59-62.

[9]周翠英,林春秀,林鲁生.外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J].岩土力学,2010,31(7):2040-2044.

ZHOU Cuiying,LIN Chunxiu,LIN Lusheng. Research on dynamic evolution law of compression modulus of soft clay under external loads[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2040-2044.

[10]陈仁朋.软弱地基中桩筏基础工作性状及分析设计方法研究[D].杭州:浙江大学,2001.

[11]陈福江,马建林,朱林.考虑压缩模量深度效应的深厚软土桩基沉降计算[J].岩土力学,2012,33(增2):167-172.

CHEN Fujiang,MA Jianlin,ZHU Lin. Settlement calculation of pile foundation in deep-soft soil considering depth effect of compression modulus[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(S2):167-172.

[12]梅国雄,宰金珉,赵维炳.土体侧限压缩模量简易计算方法及其应用[J].岩土力学,2003,24(6):1057-1059.

MEI Guoxiong,ZAI Jinmin,ZHAO Weibing. A simplified calculation method of oedometric modulus of soil and its application[J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(6):1057-1059.

(责任编辑:吕海亮)

(上接第49页)

[4]史旦达,周健,刘文白,等.砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏细观机理研究[J].岩土工程学报,2010,32(10):1557-1565.

SHI Danda,ZHOU Jian,LIU Wenbai,et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(10):1557-1565.

[5]蒋明镜,王富周,朱合华,等.松砂直剪试验中的经典与非经典场量数值分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):960-965.

JIANG Mingjing,WANG Fuzhou,ZHU Hehua,et al. Classical and non-classical variables analysis of loose sand in direct shear test by discrete element method analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2011,39(7):960-965.

[6]路德春,程星磊,杜修力.部分排水条件下饱和砂的力学特性[J].岩土工程学报,2012,34(12):2263-2269.

LU Dechun,CHENG Xinglei,DU Xiuli. Mechanical properties of saturated sand under partial drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(12):2263-2269.

[7]陈立平,张顶立,房倩,等.基于细观统计的砂土摩擦特性与破坏机制研究[J].岩土力学,2013,34(12):3471-3478.

CHEN Liping,ZHANG Dingli,FANG Qian. Research on friction characteristics and failure mechanism of anisotropic sand based on micro-statistics[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(12):3471-3478.

[8]冯磊.青岛黄海海砂的力学性质试验研究[D].青岛:山东科技大学,2013.

[9]徐日庆,王兴陈,朱剑锋,等.初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2012,33(3):1671-1775.

XU Riqing,WANG Xingchen,ZHU Jianfeng,et al. Experiment of initial relative density effects on sand strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2012,33(3):1671-1775.

(责任编辑:吕海亮)