

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.010

颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验

贺林林^{1,2,3},冯楚杰^{2,3},杨柳^{2,3},梁越^{1,2,3}

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心,重庆 400074;
2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074; 3. 重庆交通大学河海学院,重庆 400074)

摘要: 为了探讨不同砂土颗粒排列角度可能引起砂土剪切特性变化这一工程问题,选取日本标准砂(丰浦砂)土样开展相关研究。通过可以改变砂土颗粒排列角度的特殊矩形容器来实现不同砂土颗粒排列角度的设置,并采用真空预压方式制备试验土样;利用全自动单剪直剪仪进行直剪试验,并采用不同的竖向压力模拟不同深度土层所受上覆土层的压力,探究不同砂土颗粒排列角度和不同上覆土层深度砂土剪切特性的变化规律。试验结果表明:对于排水条件下的饱和砂土,随着砂土颗粒排列角度与竖向压力的增大,砂土的抗剪强度逐渐增大,当砂土颗粒角度从 0°增大至 90°时,其抗剪强度增大了 14% 左右,当竖向压力由 100 kPa 增大到 300 kPa 时,其抗剪强度增大了 11%;砂土颗粒排列角度的变化对砂土剪切模量的影响较小,但竖向压力越大砂土剪切模量越大;砂土抗剪强度达到峰值强度后会有一定的强度衰减,随着砂土颗粒排列角度的增大,砂土抗剪强度衰减率略有增大,而不同竖向压力时砂土抗剪强度衰减率基本保持不变。

关键词: 砂土颗粒;排列角度;直剪试验;剪切特性;剪切模量;残余强度

中图分类号:TU473 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2021)05-0447-08

Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand

HE Linlin^{1,2,3}, FENG Chuji^{2,3}, YANG Liu^{2,3}, LIANG Yue^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,Chongqing Jiaotong University,Chongqing 400074,China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Waterway Engineering,
Chongqing Jiaotong University,Chongqing 400074,China;
3. School of River and Ocean Engineering,Chongqing Jiaotong University,Chongqing 400074,China)

Abstract: To investigate the engineering problem that different arrangement angles of sand particles may cause changes in the shear properties of sands, Toyoura sand, as the Japanese standard sand, was selected to carry out the related research. First, a special rectangular container that could change arrangement angles of sand particles was used to set different arrangement angles of sand particles, and soil samples were prepared by the vacuum preloading method. Then, a full-automatic direct shear test instrument was used to conduct the direct shear tests, and different vertical pressures were used to simulate the pressure of the overlying soil layer with different depths to explore variation rules of shear characteristics of sand soils. In the experiments, the arrangement angles of the sand soil samples were set to four degrees: 0°, 22.5°, 45°, and 90°, three different vertical pressures were set for each different particle arrangement angle, and then 12 groups of direct shear tests were carried out in this paper. The test results show that for saturated sand under drainage conditions, shear strengths of the sand soils gradually increase with the increase of arrangement angles of sand particles and the vertical pressures. With increase of arrangement angles of sand particles from 0° to 90°, the shear strength of the sand soils increases by about 14%, while increases by 11% with the increase of vertical pressures from 100 kPa to 300 kPa. Moreover, the shear modulus of sand soils is almost constant with the variation of particle arrangement angles but increase significantly with the increase of vertical pressures. In addition, the sand soils have a decay after reaching the peak strength. The shear strength decay rates of sand soils increase slightly with the increase of particle arrangement angles but remain almost constant with different vertical pressures.

Key words: sand particle; arrangement angle; direct shear test; shear properties; shear modulus; residual strength

基金项目: 重庆市博士后科研项目特别资助(Xm2017188); 国家重点研发计划(2018YFB1600400); 重庆市基础与前沿研究科学基金(cstc2018jcyjAX0559); 研究生科研创新项目(2020S0028)

作者简介: 贺林林(1983—),女,副教授,博士,主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论及方法等研究。E-mail: helinl@126.com

引用本文: 贺林林,冯楚杰,杨柳,等. 颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):447-454.

HE Linlin, FENG Chuji, YANG Liu, et al. Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5): 447-454.

在工程实践中,人们发现土体的宏观工程特性在很大程度上取决于其微观结构的状态或行为,土体复杂的力学性状是其结构性的集中体现,因此,土体结构性研究的重要性越来越受到关注^[1]。土体的结构性是指土颗粒之间的排列方式、排列角度以及相互作用的接触关系,包含几何特性和力学特性。土体的结构性是在土的沉积演化过程中逐渐形成的,与土的矿物组成成分、土颗粒的形状和沉积条件有很大的关系^[2]。

砂土作为工程材料被广泛应用于道路、机场、港口等工程建设中,其剪切特性对设计和施工有着至关重要的影响^[3]。砂土材料主要由离散颗粒组成,颗粒的形状、大小、排列角度和物理性质等微观结构及颗粒之间相互受力的特点对土体的宏观力学特性有着显著的影响。如 Cho 等^[4]提出,棱角越突出的尖锐颗粒具有更大的极限状态孔隙比($e_{\max}, e_{\min}$)和压缩系数(C_c)。

国内外学者通过室内试验和数值模拟等方法对砂土的力学特性进行了相关研究。在试验研究方面,王立忠等^[5]在邓肯-张模型的基础上,考虑土体结构的损伤特性,引入损伤比的概念,对邓肯-张模型进行了修正,并将试验结果与修正的邓肯-张模型和软化模型进行对比,结果表明,考虑土体结构性能能够更好地反映土体的应力-应变关系。Ashmawy 等^[6]则采用不排水往复加载试验探究颗粒形状对液化性质的影响。张家铭等^[7]研制了一种能够测量土颗粒强度的特殊装置,并运用该装置对南沙群岛永暑礁附近海域的不同粒径钙质沙颗粒进行强度测试,初步试验结果表明,用该装置所测试的结果是可信的。王永炎^[8]、雷祥义^[9]、高国瑞^[10]先后采用电子显微技术、压汞法测试技术研究了我国各地区黄土的微结构特征、孔隙特征,认为骨架颗粒形态、连接方式、排列方式是决定黄土工程性质的主要结构特征,其中又以颗粒排列方式影响最为显著。

在数值模拟方面,诸多学者采用 PFC 对砂土的剪切特性进行颗粒流模拟。应用实践证明,颗粒离散元法是研究砂土颗粒微观力学性质最有效的工具之一^[11],目前已广泛应用于土-结构接触面细观模拟以及颗粒形状对土体力学特性的影响等课题的研究中^[12]。蒋明镜等^[13]采用离散元 PFC2D 对单粒组密砂在直剪试验中出现的剪切带进行了数值模拟,通过二次开发使大小主应力及其主方向角可视化,分析了试样内部的应力偏转情况。Lizcano 等^[14]通过离散元将圆形颗粒替换成任意多边形颗粒,探究了颗粒形状对颗粒组的配位数、力链和临界应力水平的影响。Oda^[15]提出了在颗粒接触点处考虑力矩阻抗的方法来限制圆盘颗粒的过度旋转。史旦达等^[16]针对 PFC 中只能模拟纯圆颗粒的缺陷,采用颗粒流团颗粒方法开发了近似椭圆的椭圆团颗粒,研究了颗粒形状变化对数值试样宏观剪切特性的影响及其剪切带变化的细观机理。张程林等^[17]对砂土颗粒形状的量化和构造进行了相关研究,在离散元重叠颗粒族 ODEC 方法的基础上提出一种新的基于加权圆度的处理方法,再利用 PFC3D 生产不同外轮廓特性的颗粒组,以此模拟各种形状的砂土颗粒。孔亮等^[18]通过 PFC2D 生成不同外轮廓特征的颗粒组,并结合颗粒材料变形机制,定义构建基于颗粒圆度与凹凸度的形状系数,并用 PFC 模拟直剪试验,结果发现砂土的抗剪强度有随着性状系数减小而增大的趋势。Santamarina 等^[19]研究了土壤颗粒形状对颗粒组应力诱导各项异性的影响。周建等^[20]采用两种不同接触模型对福建标准砂常规三轴试验进行了细观数值模拟,研究了砂土颗粒之间不同接触特性对土体剪切模量和摩擦系数的影响。张坤勇等^[21]基于 PFC^{2D}对砂土的各向异性进行了微观机理的数值模拟试验。刘清秉等^[22]探究了砂土颗粒形状对抗剪强度的影响,通过直剪试验表明,砂土临界摩擦角随着颗粒的磨圆度和规则性的增加呈线性减小。但关于不同砂土颗粒排列角度对砂土剪切特性影响方面的相关研究尚未见公开发表的文献。

砂土是无黏性土,一般认为其黏聚力非常小,可以忽略,尤其对于饱和砂,认为黏聚力为 0,抗剪强度主要由内摩擦角 φ_s 决定,且影响 φ_s 大小的主要因素为颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦^[23-25]。故本文通过特殊矩形容器改变砂土颗粒的排列角度,进而改变颗粒间相互作用的特性。在固结排水条件下,开展不同颗粒排列角度和不同竖向压力作用下的直剪试验,以揭示不同砂土颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响规律。

1 试验方法

1.1 土的物理性质

选取日本标准砂(丰浦砂)作为研究对象。丰浦砂的颗粒相对密度为 2.650,最大孔隙比为 0.990,最小孔隙比为 0.597。由二维光学显微镜图像可测量出砂粒的长轴 L 和短轴 W ,通过这两个主要尺寸,确定砂粒形状为不规则椭圆形,且其长径比 L/W 分布绝大部分在 1.0~1.8 之间, L/W 的平均值约为 1.5。丰浦砂粒径分布曲线和光学显微镜扫描结果如图 1 和图 2 所示。Le 等^[23]对丰浦砂 3114 个颗粒进行了长短轴测定试验, L/W 在 0~1.2、1.2~1.4、1.4~1.6、1.6~1.8 区间内的颗粒分别占粒子总数的 23%、25%、20% 和

15% , L/W 在 1.8 ~3.0 区间内的颗粒占粒子总数的 17% 。

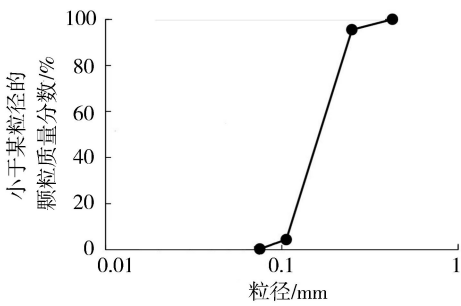


图 1 丰浦砂粒径分布曲线

Fig.1 Grain size distribution of Toyoura sand

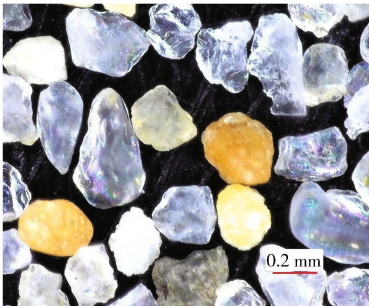


图 2 丰浦砂光学显微镜扫描结果

Fig.2 Scanning optical microscope image of Toyoura sand

1.2 土样制备

为了改变砂土颗粒的排列角度,采用长度为 250 mm、宽度为 100 mm、高度为 250 mm 的特殊矩形装砂容器进行试验。该矩形容器由 5 个可拆分的金属块构成,如图 3 所示。为了获得砂土颗粒排列角度 α 分别为 0° 、 22.5° 、 45° 和 90° 的重塑砂土试样,在制作试样过程中,首先在特殊矩形容器底部放置一块透水圆形金属板并设置该矩形容器底部倾斜角度为 0° 、 22.5° 、 45° 。待试样制备完成后,拆除矩形容器透水圆形金属板,取出底部透水圆形金属板上的试样,即可获得砂土颗粒排列角度分别为 0° 、 22.5° 、 45° 的重塑砂土试样。在制作砂土颗粒排列角度为 90° 试样时,保持矩形容器底部水平,将透水圆形金属板竖直放置在矩形仪器短边一侧的侧壁上,在试样制备完成后,拆除矩形容器并将透水圆形金属板放置水平,即可获得所需试样。制作过程及制作完成后均可通过肉眼观测砂土试样纹路,确保试样的制作正确。

第一步:通过孔径大小为 $425\ \mu\text{m}$ 的筛子将干燥的丰浦砂筛入特制的矩形容器内,并使筛子沿水平方向周期性摇动以加快砂土的下降速度。为了保证制备的试样干密度保持一致,在距离筛子下方 380 mm 处悬挂一圆形重物,使每次制备试样时砂土下落的高度恒定,且落砂平面与矩形容器内的砂面始终保持水平。通过控制砂土下降的高度,使相对密实度 D_r 为 90% (孔隙比 e 为 0.636)。在将砂土筛入矩形容器的过程中,为了减少对砂土原本力学性能的影响,始终保持矩形容器内砂面高度水平。图 4 为将砂土筛入矩形容器示意图。

第二步:矩形容器内装满砂土后,将容器移入圆桶内,并缓慢注入水,当水面距离容器内砂面 2 ~3 cm 时停止注水,并使试样在桶内固结吸水约 2 h。

第三步:将圆桶内的水排出,待砂土静置约 12 h 后,采用真空预压法将多余孔隙水排出,随后将容器四周的透水圆形金属板拆除。将矩形试样削成直径为 60 mm、高度为 125 mm 的圆柱体试样。为了保证切取试样的完整性,在切取试样时利用图 5 所示的仪器固定试样,然后通过旋转仪器底部的圆盘,缓慢旋转且每次切割时仅旋转一个极小的角度。进行切割时,刀片沿着仪器设定好的宽度依靠仪器边缘竖向垂直向下切割。为了避免影响砂土的力学特性,每次切割一个小角度后都需要将刀片完全清理干净。通过观察试样砂土颗粒排列的纹路能够清楚地确认制备试样的颗粒排列角度。图 6 为圆柱体试样中砂土颗粒不同排列角度 α 示意图,图 7 为单个颗粒之间接触示意图。



图 3 矩形容器实物

Fig.3 Picture of rectangle container

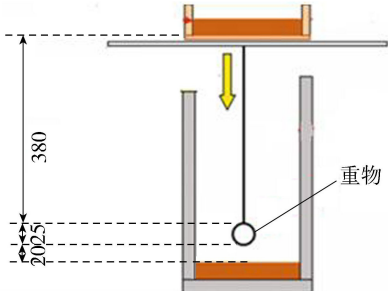


图 4 筛砂示意图(单位:mm)

Fig.4 Screening diagram of Toyoura sand (unit: mm)



图 5 试验土样制备

Fig.5 Preparation of Toyoura sand samples

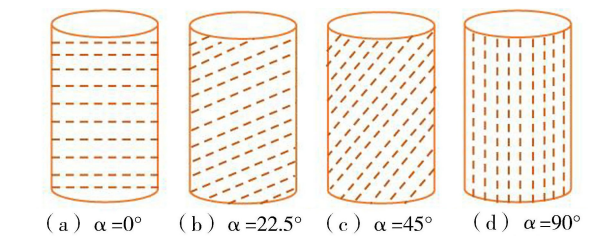


图 6 砂土试样不同颗粒排列角度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Toyoura sand samples with different particle arrangement angles

1.3 试验仪器

试验采用全自动单剪直剪仪(图 8),在直剪盒左右两侧分别设有两个竖向的压力计,通过压力计的数值可以测定试样所受的竖向应力及竖向应变。在直剪盒左侧下部的位置也设有一个压力计,用于测量剪切应力和剪切应变。该全自动单剪直剪仪能够设定剪切速率和竖向压力的加载速率,以模拟不同情况下土体受压和受剪的情况。分别对不同砂土排列角度 α (0° 、 22.5° 、 45° 、 90°) 和不同竖向压力 N (100 kPa、200 kPa、300 kPa) 作用的 12 组试样进行直剪试验,施加水平剪切力进行固结排水剪切试验,以获得各土样抗剪强度值。

1.4 试验过程

- 第一步:将直径为 6 cm、高度约为 3 cm 的圆环套在制备的圆柱体土样上,之后将圆环内的砂土从圆柱体土样切下。
- 第二步:将圆环内土样缓慢推入直剪盒内,为避免影响砂土的力学特性,应尽量减少将砂土放入直剪盒内时产生扰动。
- 第三步:通过测量剩余圆柱体试样的质量、直剪盒内砂土至直剪盒顶部的距离,可以得出试验土样的质量和体积。
- 第四步:使土体在 50 kPa 的竖向压力下进行预固结,当预固结完成后往直剪盒内注水,使砂土分别在竖向压力为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 作用下排水固结,当竖向平均位移不变时固结完成。
- 第五步:按照 12 r/min 的剪切速率进行排水剪切试验。在砂土试样剪切变形大于直径的 10% 时剪切停止,此时砂土试样发生剪切破坏。

2 试验结果与分析

2.1 颗粒排列角度对抗剪强度的影响

在排水直剪试验中,全自动单剪直剪仪匀速转动右侧水平转轮以施加剪切力,当剪切变形大于直径的 10% 时停止试验。不同竖向压力作用下,各组试样剪切应力 σ 与剪切位移 δ 关系曲线如图 9 所示。

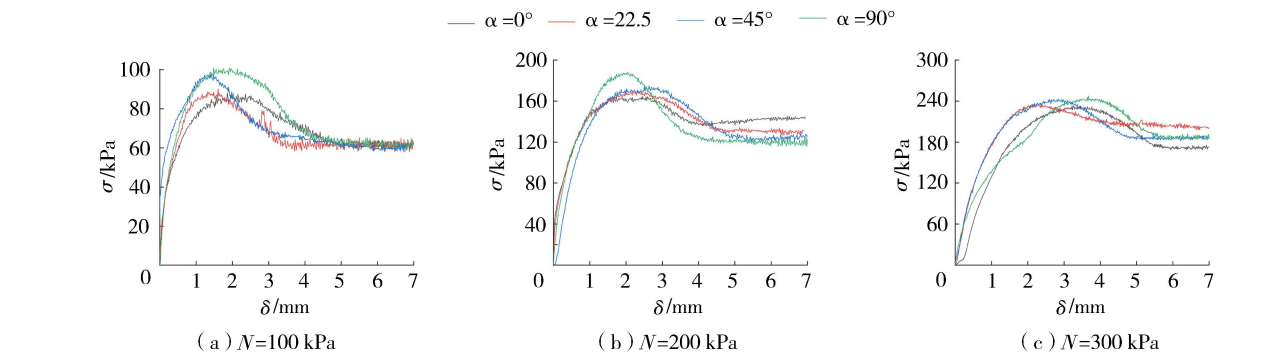


图 9 不同竖向压力作用下不同颗粒排列角度的剪切应力-位移曲线

Fig. 9 Different shear stress-displacement curves at different particle arrangement angles under different vertical pressures

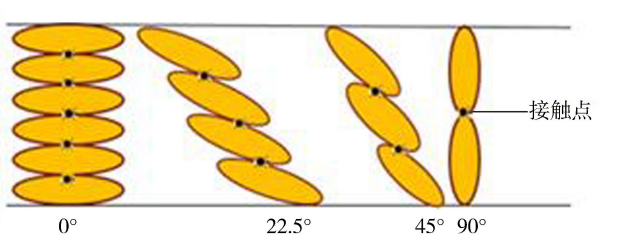


图 7 砂土试样颗粒接触示意图

Fig. 7 Schematic diagram of particle contact in Toyoura sand samples

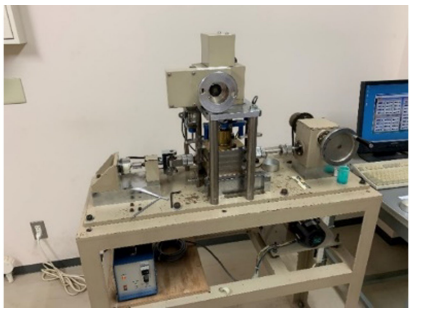


图 8 全自动单剪直剪仪

Fig. 8 Automatic direct shear machine

根据图 9 可知,试验中各试样均表现出明显的峰值抗剪强度和应变软化效应,峰值抗剪强度由黏聚分量、剪胀分量和摩擦分量三部分组成。而黏聚分量的大小与土样的状态有关,即砂土颗粒本身具有的黏结与胶结性能。剪胀分量和摩擦分量主要反应剪切面上剪切阻力的大小,且与剪切面上的法向应力成正比^[24]。同时,各试样中峰值抗剪强度均出现在剪切应变较小、剪切位移达到试样直径的 3%~4% 时。

由图 9 可知,随着砂土颗粒排列角度的变化,砂土的抗剪强度产生了较明显的变化。在 $N=100\text{ kPa}$ 、 200 kPa 时,砂土颗粒排列角度由 0° 增大至 90° ,其抗剪强度均增大了 14% 左右;在 $N=300\text{ kPa}$ 时,砂土颗粒排列角度由 0° 增大至 90° ,其抗剪强度增大了约 11%。

对比图 9(a)(b)(c) 可以发现,在相同的竖向压力作用下,砂土颗粒角度的变化对砂土剪切模量的影响较小,曲线中弹性变形阶段剪切位移随加载压力变化的初始斜率几乎一致。

通过直剪试验数据可绘制出不同竖向压力 N 作用时不同砂土颗粒排列角度的抗剪强度 τ 包线,见图 10。

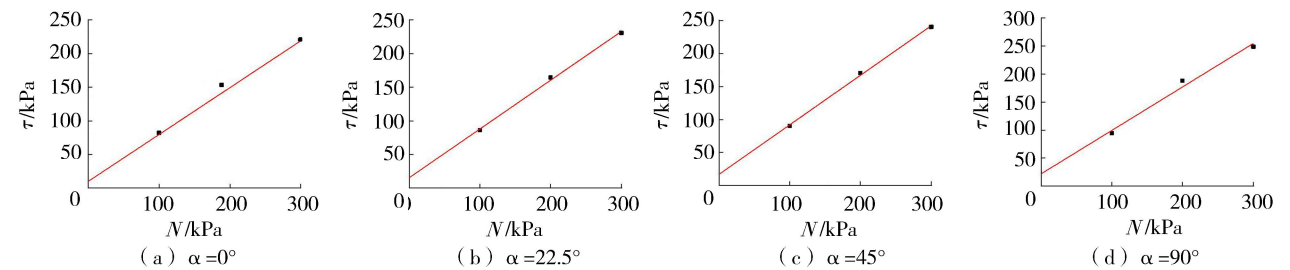


图 10 不同竖向压力时不同颗粒排列角度砂土抗剪强度包线

Fig. 10 Shear strength envelope of Toyoura sand at different particle arrangement under different vertical pressures

颗粒排列角度为 0° 、 22.5° 、 45° 和 90° 时,砂土抗剪强度包线可分别由以下拟合公式表示:

$$\tau = 0.69N + 10.03 \tag{1}$$
$$\tau = 0.72N + 15.63 \tag{2}$$
$$\tau = 0.75N + 17.20 \tag{3}$$
$$\tau = 0.77N + 22.20 \tag{4}$$

由抗剪强度包线公式可推算出砂土抗剪强度参数 c 、 φ 值,不同颗粒排列角度下砂土抗剪强度参数见表 1。

通过对试验测得的抗剪强度进行拟合,得出 3 条不同竖向压力作用下抗剪强度随颗粒排列角度变化的经验公式,见图 11。

在竖向压力 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 作用下,砂土抗剪强度随颗粒排列角度的变化可分别由以下拟合公式表示:

$$\tau = 0.154\alpha + 88.32 \tag{5}$$
$$\tau = 0.221\alpha + 164.9 \tag{6}$$
$$\tau = 0.288\alpha + 225.7 \tag{7}$$

由式(5)~(7)可发现,砂土抗剪强度随颗粒排列角度呈线性正相关关系,即砂土抗剪强度增大的速度随砂土颗粒排列角度增大逐渐加快。

不同竖向压力、砂土颗粒排列角度所获得的抗剪强度试验数值统计见表 2。

由表 2 可见,在相同竖向压力作用下,抗剪强度随着砂土排列角度的增加而逐渐增大,砂土的抗剪强度与颗粒排列角度呈线性正相关。当排列角度从 0° 增大到 90° 时,砂土的抗剪强度增加了 14% 左右。但随着竖向压力的逐渐增大,砂土颗粒排列角度的变化对砂土抗剪强度的影响有减小的趋势,当竖向压力由 100 kPa 增大到 300 kPa 时,土体抗剪强度增大 11%。这是由

表 1 不同颗粒排列角度下抗剪强度参数

Table 1 Shear strength parameters under different particle arrangement angles

$\alpha/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
0	10.03	34.61
22.5	15.63	35.75
45	17.20	36.87
90	22.20	37.59

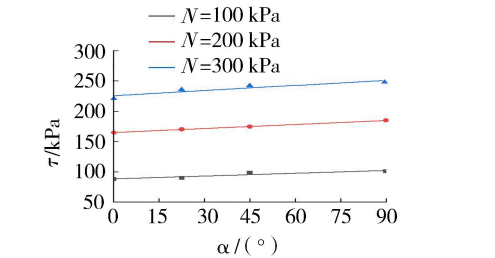


图 11 抗剪强度随砂土颗粒排列角度变化

Fig. 11 Change of shear strength with sand particle arrangement angle

表 2 不同竖向压力和排列角度下的抗剪强度

Table 2 Shear strength at different particle arrangement angles under different vertical pressures

$\alpha/(^\circ)$	τ/kPa		
	$N=100\text{ kPa}$	$N=200\text{ kPa}$	$N=300\text{ kPa}$
0	82.0	160.4	221.3
22.5	86.0	164.3	230.7
45	90.4	170.6	240.3
90	94.2	187.8	249.0

于单个砂土颗粒的形状近似为椭圆形,当颗粒排列角度为 0° 时,两个砂土颗粒之间相当于水平层层结构,只受到水平向滑动摩擦力的作用来抵抗剪切。当角度逐渐增大时,两个砂土颗粒之间存在一定的倾角,在受到竖向压力时,颗粒间产生咬合摩擦,增大颗粒之间的相互作用,土体的抗剪强度增大。由表2可知,当竖向压力增大3倍,土体的抗剪强度也大约增加3倍。对比图10(a)和(d),发现抗剪强度所对应的剪切位移仅增加了1.5倍,说明竖向压力越大,土体的刚度越大,抵抗变形的能力越强。

定义砂土原抗剪强度的峰值减去残余强度后与原抗剪强度峰值的百分比为砂土的衰减率。由图10(a)(b)(c)还可以明显发现,随着颗粒排列角度的变化,砂土的抗剪强度衰减有一定的规律, 0° 时抗剪强度衰减最小, 90° 时抗剪强度衰减最大。抗剪强度衰减率见表3。

2.2 不同竖向压力对抗剪强度的影响

直剪试验中,不同颗粒排列角度、不同竖向压力下的排水剪切应力-位移曲线见图12。

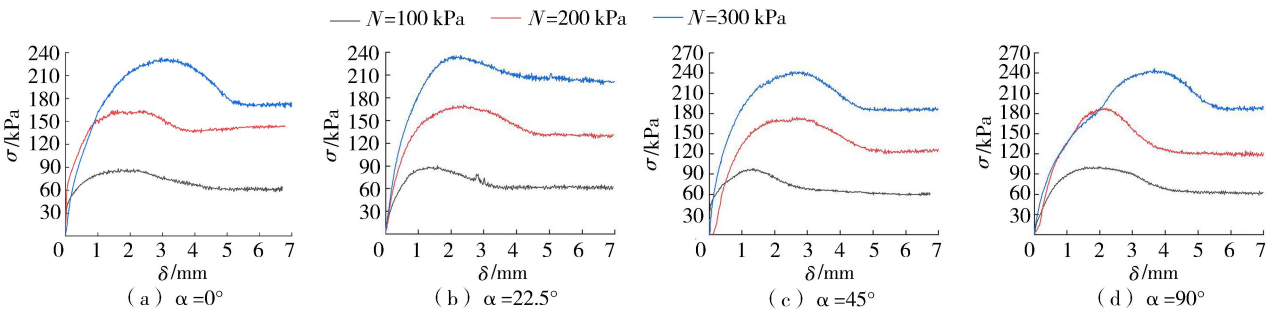


图12 不同砂土颗粒排列角度在不同竖向压力下的剪切应力-位移曲线

Fig. 12 Shear stress-displacement curve of Toyoura sand at different particle arrangement under different vertical pressures

由图12可知,颗粒排列角度相同时,竖向压力越大,则其抗剪强度越大。这主要是由于竖向压力的增大,使得砂土颗粒之间承受了更大的压力,在摩擦系数不变的情况下,颗粒之间的摩擦力也增大。因此,在受到水平剪切力作用时,具有了更大抵抗外部荷载作用的能力。根据表2计算竖向压力从100 kPa增大至300 kPa时的砂土抗剪强度增大幅值可以发现,不同砂土颗粒排列角度对于不同竖向压力作用,对抗剪强度影响的敏感度有一定的差异,且随着砂土颗粒排列角度的逐渐增大,砂土抗剪强度随竖向压力增大敏感性逐渐降低。即竖向压力增大时,颗粒排列角度从 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,抗剪强度的增大幅值逐渐减小。

通过计算图12中相同砂土颗粒排列角度、不同竖向压力下峰值强度与对应剪切位移的比值可以发现,峰值强度与对应剪切位移的比值随着竖向压力的增大而增大,表明砂土抵抗变形的能力随着竖向压力的增大而增大。峰值强度对应剪切位移见表4。

表4 峰值强度对应剪切位移
Table 4 Shear displacement corresponding to peak strength

$\alpha/(^{\circ})$	δ/mm		
	$N = 100 \text{ kPa}$	$N = 200 \text{ kPa}$	$N = 300 \text{ kPa}$
0	1.89	2.63	3.97
22.5	1.82	2.61	3.99
45	1.83	2.65	3.96
90	1.88	2.64	3.94

3 结 论

- a. 利用一种特制的矩形容器,通过改变矩形容器底部倾角实现了砂土颗粒排列角度分别为 0° 、 22.5° 、 45° 和 90° 时4种重塑砂土试样的制备。
- b. 随着砂土颗粒排列角度的逐渐增大,砂土的抗剪强度逐渐增大。当排列角度从 0° 增大到 90° 时,砂土的抗剪强度增大了14%左右。但随着竖向压力的逐渐增大,砂土颗粒排列角度的变化对砂土抗剪强度的影响程度有减小的趋势,当竖向压力由100 kPa增大到300 kPa时,土体抗剪强度增大11%。
- c. 在相同竖向压力的作用下,砂土颗粒排列角度的变化对砂土剪切模量的影响较小。在相同砂土颗粒

排列角度下竖向压力越大,砂土抵抗变形的能力越强。

d. 砂土抗剪强度达到峰值强度后会有一定的强度衰减,随着颗粒排列角度的增大,砂土抗剪强度衰减率略有增大;随着竖向压力的增大,砂土抗剪强度衰减率基本保持不变。

参考文献:

- [1] 邵生俊,陶虎,许萍.黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J].岩土力学,2011,32(2):42-50. (SHAO Shengjun,TAO Hu,XU Ping. Discussion on research and application of structural mechanical properties of loess[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2011,32(2):42-50. (in Chinese))
- [2] 谢小妍.土力学[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [3] 崔明娟,郑俊杰,赖汉江,等.砂土颗粒粗糙度对剪切特性影响细观机理分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(8):1-6. (CUI Mingjuan,ZHENG Junjie,LAI Hanjiang,et al. Mesoscopic mechanism analysis of the effect of sand particle roughness on shear properties [J]. Chinese Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science),2015,43(8):1-6. (in Chinese))
- [4] CHO G C,DODDS J,SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density,stiffness,and strength;natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2006,132(5):591-602.
- [5] 王立忠,赵志远,李玲玲.考虑土体结构性的修正邓肯-张模型[J].水利学报,2004(1):85-91. (WANG Lizhong,ZHAO Zhiyuan,LI Lingling. Modified Duncan-Zhang model considering soil structure [J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering,2004(1):85-91. (in Chinese))
- [6] ASHMAWY A K,SUKUMARAN B,HOANG V V. Evaluating the influence of particle shape on liquefaction behavior using discrete element modeling[C]//Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii, USA:[s. n.],2003:542-549
- [7] 张家铭,刘俊,路为.一种测试土体颗粒强度的试验装置[J].岩土力学,2007(增刊1):114-117. (ZHANG Jiaming,LIU Jun,LU Wei. An experimental device for testing the strength of soil particles[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2007(Sup1):114-117 (in Chinese))
- [8] 王永焱.中国黄土的结构特征及物理力学性质[M].北京:科学出版社,1990.
- [9] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学化学,1987,17(12):1309-1318. (LEI Xiangyi. Pore types and collapsibility of Chinese loess[J]. Science in China Chemistry,1987,17(12):1309-1318. (in Chinese))
- [10] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学,1980(12):81-86. (GAO Guorui. Classification of microstructure and collapsibility of loess [J]. Science in China,1980(12):81-86. (in Chinese))
- [11] 徐泳,孙其诚.颗粒离散元法研究进展[J].力学进展,2003,33(2):251-260. (XU Yong,SUN Qicheng. Research progress of particle discrete element method[J]. Chinese Journal of Advances in Mechanics,2003,33(2):251-260. (in Chinese))
- [12] STUDENT R P J,EDIL T B,BOSSCHER P J,et al. Effect of particle shape on interface behavior of DEM-simulated granular materials[J]. International Journal of Geomechanics,2001,1(1):1-19.
- [13] 蒋明镜,王富周,朱合华.单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析[J].岩土力学,2010,31(1):253-257. (JIANG Mingjing WANG Fuzhou,ZHU Hehua. Discrete element numerical analysis of direct shear test of single-grain dense sand shear zone[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):253-257. (in Chinese))
- [14] LIZCANO A A,ALONSO-MARROQUIN F,HERRMANN H J. Biaxial test simulations using a packing of polygonal particles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics,2008,32(1):143-160.
- [15] ODA M. Study on couple stress and shear band development in granular media based on numerical simulation analyses[J]. International Journal of Engineering Science,2000,38(15):1713-1740.
- [16] 史旦达,周健,刘文白,等.砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟[J].岩土工程学报,2008,30(9):1361-1366. (SHI Danda,ZHOU Jian,LIU Wenbai,et al. Non-circular particle simulation of monotonic shear characteristics of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1361-1366. (in Chinese))
- [17] 张程林,周小文.砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究[J].岩土工程学报,2015,37(增刊1):115-119. (ZHANG Chenglin,ZHOU Xiaowen. Research on discrete element algorithm for 3D shape simulation of sand particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(Sup1):115-119. (in Chinese))
- [18] 孔亮,彭仁.颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2112-2119. (KONG Liang,PENG Ren. Particle flow simulation of the influence of particle shape on the mechanical properties of sand-like soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(10):2112-2119. (in Chinese))

[19] SANTAMARINA J C, CHO G C. Soil behavior; the role of particle shape[C] //The Skempton Conference. London: Thomas Telford, 2004: 606-617.

[20] 周健, 史旦达, 贾敏才, 等. 砂土单调剪切力学性状的颗粒流模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 1299-1304. (ZHOU Jian, SHI Danda, JIA Mincai, et al. Particle flow simulation of monotonic shear mechanical properties of sand[J]. Chinese Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(10): 1299-1304. (in Chinese))

[21] 张坤勇, 李威, 罗兴军. 基于 PFC^{2D} 的砂土原生各向异性微观机理数值试验[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 518-524. (ZHANG Kunyong, LI Wei, LUO Xingjun. PFC^{2D}-based numerical experiment on microscopic mechanism of primary anisotropy of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 518-524. (in Chinese))

[22] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400-410. (LIU Qingbing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study on the influence mechanism of particle shape on sand shear strength and pile tip resistance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 400-410. (in Chinese))

[23] LE B N, TOYOTA H, TAKADA S. Detection of elastic region varied by inherent anisotropy of reconstituted Toyoura sand[C] // Sustainable Civil Infrastructures; Innovative Infrastructure Geotechnology. Tokyo: Tokyo International Congress and Exhibition, 2018.

[24] 龚晓南. 软黏土地基土体抗剪强度若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1596-1600. (GONG Xiaonan. Some problems of shear strength of soft clay soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1596-1600. (in Chinese))

[25] XIAO Zhong, FU Dengfeng. Effects of strain softening on the penetration resistance of offshore bucket foundation in nonhomogeneous clay[J]. Ocean Engineering, 2019, 193: 106594.

(收稿日期: 2020-06-07 编辑: 胡新宇)

(上接第 405 页)

[9] 申孙平, 吴腾, 李涛, 等. 巴彦高勒至头道拐河段输沙优化调控研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(3): 53-59. (SHEN Sunping, WU Teng, LI Tao, et al. Study on sediment transport optimal regulation on the reach from Bayangaole to Toudaoguai in the upper Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(3): 53-59. (in Chinese))

[10] 张晓华, 张敏, 郑艳爽, 等. 2012 年宁蒙河段洪水特点及对河道的影响[J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 31-34. (ZHANG Xiaohua, ZHANG Min, ZHENG Yanshuang, et al. Characteristics of floods in Ningxia-Inner Mongolia Reach in 2012 and the effect on the channel[J]. Yellow River, 2014, 36(9): 31-34. (in Chinese))

[11] 罗秋实, 周丽艳, 张厚军, 等. 支流来水来沙对黄河宁蒙河段冲淤的影响[J]. 人民黄河, 2011, 33(11): 29-31. (LUO Qiushi, ZHOU Liyan, ZHANG Houjun, et al. Influence of incoming flow and sediment from tributaries to the scour and fill of Ning-Mong Reach of the Yellow River[J]. Yellow River, 2011, 33(11): 29-31. (in Chinese))

[12] 孙赞盈, 尚进, 尚红霞, 等. 三盛公水利枢纽洪水期排沙分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 1-4. (SUN Zanying, SHANG Jin, SHANG Hongxia, et al. Sediment transport rate in flood season of Sanshenggong key water control project[J]. Yellow River, 2017, 39(5): 1-4. (in Chinese))

[13] 鲁俊, 安催花, 吴晓杨. 黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(6): 40-46. (LU Jun, AN Cuihua, WU Xiaoyang. Study on processes of water and sediment in the Ning-Meng Reach of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(6): 40-46. (in Chinese))

[14] 张红武, 黄远东, 赵连军, 等. 黄河下游非恒定输沙数学模型: I. 模型方程与数值方法[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 265-270. (ZHANG Hongwu, HUANG Yuandong, ZHAO Lianjun, et al. A mathematical model for unsteady sediment transport in the lower Yellow River: I. Model equations and numerical method[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 265-270. (in Chinese))

[15] 吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 15-16. (WU Baosheng, SHEN Guanqing. Discussion on the physical meaning of the coefficient of incoming sediment[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 15-16. (in Chinese))

[16] 胡兴林, 王静, 蓝永超, 等. 黄河内蒙古段河道冲淤量与水沙输移过程的关系分析[J]. 水文, 2012, 32(2): 44-48. (HU Xinglin, WANG Jing, LAN Yongchao, et al. Relationship between channel scouring/silting amount and water-sediment transport process in Inner Mongolia Reach of Yellow River[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2): 44-48. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-12-10 编辑: 胡新宇)