



砂土可视化直剪试验与剪切带形成机制研究

王子寒 张若钰 景晓昆 肖成志 黄达

A STUDY ON FORMING MECHANISM OF SHEAR BANDS AND VISUAL SHEARING TESTS OF SAND

WANG Zi-han, ZHANG Ruo-yu, JING Xiao-kun, XIAO Cheng-zhi, HUANG Da

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0283>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胶结型含可燃冰砂土剪切特性的离散元模拟

DISCRETE ELEMENT SIMULATION OF THE SHEAR BEHAVIOR OF CEMENTED METHANE HYDRATE-BEARING SANDS

工程力学. 2021, 38(2): 44-51 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.03.0174>

非等向固结砂土极小应变刚度的超弹性模型

VERY-SMALL-STRAIN STIFFNESS OF ANISOTROPICALLY CONSOLIDATED SAND: A HYPERELASTIC MODEL

工程力学. 2020, 37(1): 145-151 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.02.0058>

黏土蠕变非线性特性及其分数阶导数蠕变模型

NONLINEAR BEHAVIOR OF CLAY CREEP AND ITS FRACTIONAL DERIVATIVE CREEP MODEL

工程力学. 2020, 37(9): 153-160, 207 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.10.0624>

块石含量和空间分布对土石混合体抗剪强度影响的离散元分析

DISCRETE ELEMENT ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ROCK CONTENT AND ROCK SPATIAL DISTRIBUTION ON SHEAR STRENGTH OF ROCK-SOIL MIXTURES

工程力学. 2017, 34(6): 146-156 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0002>

颗粒流润滑剪切膨胀的力学机制研究

RESEARCH ON MECHANICAL MECHANISM OF SHEAR DILATANCY FOR GRANULAR FLOW LUBRICATION

工程力学. 2018, 35(8): 236-244 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0282>

带剪切连梁双柱式桥墩地震响应特性振动台试验研究

SHAKING TABLE TESTS ON THE SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF DOUBLE-COLUMN PIERS WITH SHEAR BEAMS

工程力学. 2021, 38(5): 171-181 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0411>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)07-0217-10

砂土可视化直剪试验与剪切带形成机制研究

王子寒, 张若钰, 景晓昆, 肖成志, 黄 达

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘 要: 通过对常规直剪仪进行可视化改造, 并结合数字图像变形量测技术, 探究了不同尺寸砂土试样在剪切过程中剪切带的形成机制和扩展过程, 归纳了试样尺寸对砂土强度指标的影响, 并针对典型尺寸试样总结了不同剪切时刻、不同法向应力下剪切带(尤其是副剪切带)的演化规律, 同时对试验中发现的拱形破坏区域进行受力分析, 对主/副剪切带的强度参数进行了对比。结果显示: 试样尺寸影响强度指标, 当长边与短边之比大于 2 时, 试验结果偏离平均值, 当比值大于 4 时, 会造成严重误差; 剪切破坏区域不是始终沿水平剪切缝发展, 而是在上盒中下部逐渐形成一条向上凸起的弧形副剪切带, 剪切破坏区域沿着主、副两条剪切带而展开; 随着剪切位移的增加, 以及法向应力的减小, 拱形破坏区域会逐渐减小; 拱形副剪切带上的正应力和剪应力均大于水平主剪切带; 而主/副剪切带的强度指标基本一致, 间接证明了副剪切带存在的合理性。

关键词: 土力学; 剪切带; 直剪试验; 可视化; 图像量测; 砂土

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0283

A STUDY ON FORMING MECHANISM OF SHEAR BANDS AND VISUAL SHEARING TESTS OF SAND

WANG Zi-han, ZHANG Ruo-yu, JING Xiao-kun, XIAO Cheng-zhi, HUANG Da

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: By visual reformation on traditional shear instrument, and combining digital image deformation measurement technology, it studies the forming mechanism and expansion processes of shear bands of sand samples with different sizes in shearing tests. The effects of sample sizes on sand strength are concluded. With the typical sample size, the evolution laws of shear bands (especially for secondary shear bands) in different shearing courses and various normal stresses are summarized. And the force analyses of arch damage areas discovered in tests are carried out. The strength parameters of primary and secondary shear bands are compared. The results show that sample sizes have influences on strength parameters. When the ratios of long to short side are greater than 2, test results deviate from average. When the ratios of long to short side are greater than 4, serious errors are caused. The shear failure areas are not always developed along horizontal shearing gap. The upward arch secondary shear bands are gradually formed in middle and lower part of upper boxes, and shear failure areas are developed along the primary and secondary shear bands. The arch failure areas decrease with the increasing shear displacements and decreasing normal stresses. The normal and tangential stresses on secondary shear bands are larger than those on primary shear bands. The strength indexes of primary and secondary shear bands are basically the same, which indirectly proves the rationality of the existence of secondary shear bands.

Key words: soil mechanics; shear band; direct shear test; visualization; image measurement; sand

收稿日期: 2021-04-15; 修改日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808184, 41877255); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2021039)

通讯作者: 景晓昆(1983—), 女, 河北邯郸人, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程方面的相关研究 (E-mail: jingxk@hebut.edu.cn).

作者简介: 王子寒(1984—), 男, 山东枣庄人, 副教授, 博士, 主要从事岩土体细观力学方面的相关研究 (E-mail: wangzihan@hebut.edu.cn);

张若钰(1996—), 女, 河北保定人, 硕士生, 主要从事岩土工程相关研究 (E-mail: 574199735@qq.com);

肖成志(1976—), 男, 湖北监利人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩土工程相关研究 (E-mail: chengzhixiao@hotmail.com);

黄 达(1976—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩石力学与地质灾害方面的相关研究 (E-mail: dahuang@hebut.edu.cn).

常规砂土直剪试验的剪切面局限于上、下箱体之间的平面,但不一定沿土样的最薄弱面展开,其剪切带形成机制仍不十分明确。目前针对砂土剪切带的研究主要是从物理试验、数值模拟,以及基于二者的理论分析等方面入手,其中物理试验的研究手段包括平面应变试验、三轴试验和直剪试验,并利用数字图像技术进行观测和研究;理论分析方面主要基于连续体假定,对砂土本构模型进行改进;而数值模拟近年来则以离散元程序研究为主^[1-10]。

近些年来,国内方面针对砂土的剪切带发展,进行了较为系统的试验研究。李福林等^[11]根据饱和砂土排水平面应变压缩试验的应变场,分析了试样的应变局部化现象。研究发现,砂土材料的应变局部化发生在峰值应力状态附近,峰值应力后应变局部化更加明显并集中在一定区域,最终形成 V 型剪切带。郭莹等^[12]对饱和细砂进行三轴固结排水剪切试验,通过对轴向应变场的分析发现,密砂和松砂的干样在应力峰值之后形成剪切带,而松砂湿样在峰值之前形成剪切带。孔亮等^[13]基于数字图像相关法,对砂土试样进行了室内细观直剪试验,研究发现,随着剪切的进行,位移较大的颗粒逐渐集中在剪切面两侧、从左下到右上的一个斜带内。潘远阳等^[14]对密砂直剪试验进行离散元数值模拟,通过对数值试验过程中的颗粒进行动态监测发现,剪切带的厚度受平均粒径和颗粒摩擦系数影响较大。

类似的研究工作近年来在国际上也比较多,Lai 和 Chen^[15]利用 X 射线成像技术,采用离散元程序再现了不同形状的月壤数值颗粒,进行了二维直剪试验模拟,表明随着颗粒形状的不同,直剪试验的剪切带也具有不同的形式,但都没有严格按照剪切缝开展。Tang 等^[16]研发了新型土体平面应变试验装置,并结合图像分析技术对砂土剪切带进行研究,表明剪应变的分布在试验前期主要集中在试样中部,并向四周扩散,后期则会形成一条主要的剪切带,但是厚度比较大,也并不十分平直。Kawamoto 等^[17]同样利用 X 射线成像技术,采用 LS-DEM 的方法,再现了具有砂土形状的数值颗粒,并通过对三轴试验的模拟,发现剪切带上的力链发生了较大偏转,认为与应力主轴的旋转有关。Wiebicke 等^[18]通过在三轴试验中开设内、外 2 个视窗,结合 X 射线成像技术对剪

切带进行联合观测,并采用统计的方法对剪切过程中细观结构的演化进行了分析,指出细观参数的变化是土体各向异性的主要原因。

以上研究大多关注于剪切过程中细观参数的改变对宏观现象的影响,对剪切带形成机制的分析尚不够系统;而剪切带的特征直接影响土体强度,现阶段由于三轴试验装置的局限性,难以对剪切带进行直观观测,可视化的直剪试验成为对剪切带进行深入研究的有效手段。因此,本文通过对传统直剪仪进行可视化改造,并结合数字图像变形量测技术探究了砂土试样在剪切过程中的演化规律,归纳出试样尺寸、法向应力等对剪切带形成机制和扩展过程的影响,同时对试验中发现的拱形副剪切带进行了强度分析,并与水平主剪切带进行了对比研究。

1 试验概况

1.1 试验装置

本试验所用主要仪器是 ZJ-1A 型应变控制式直剪仪,如图 1(a)所示。原设备直剪盒为黄铜材质,很难直接观测到试样在剪切过程中的颗粒运动情况,对剪切带的研究受到限制。因此,为了进行可视化试验,采用厚度为 10 mm 的亚克力板设计制造了 5 种不同规格的透明直剪盒,以便于在直剪过程中利用数码相机对试样表面进行拍照分析,如图 2 所示。内径尺寸(长×宽×高,单位:cm)分别为 10×10×10、10×10×5、10×10×2.5 的直剪盒用于研究试样不同宽高比对砂土强度指标和剪切带形状的影响;而尺寸分别为 10×10×5、10×5×5、10×2.5×5 的直剪盒用于研究试样不同长宽比的影响。



图 1 直剪仪与加压框架
Fig. 1 Shear instrument and pressurized frame

原直剪仪加压框架分布在直剪盒两侧(图 1(a)),不利于图像采集。因此设计了新型加压框架(图 1(b)),能够在试验过程中完全展现试样侧面。新加压框架的使用需注意两点:① 新加压框架重量有所改变,加压前需重新调节平衡锤使杠杆水平;② 加



图2 可视化直剪盒

Fig. 2 The visual shear boxes

压框架需作用在直剪盒中心,保持框架平面竖直防止偏心,并不能遮挡拍摄区域。结合图像采集设备能够保证全过程摄录的图像清晰(图3)。

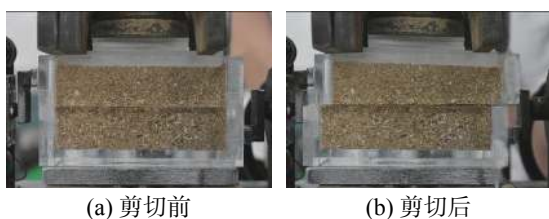


图3 试验过程中摄录图像

Fig. 3 Photographed images during the test

1.2 试验材料及方法

试验土样选用天津地区工程中常用的海砂,经人工过筛剔除大颗粒,粒径范围 0.075 mm~2 mm,级配曲线如图4所示。试验时保持含水率为 1.2%,制样密度 1.818 g/cm³,相对密度 0.7,物理力学指标如表1所示。本文主要研究剪切过程中剪切带的形成机制,对于砂土试样的含水率、密实度等材料因素的影响留待进一步研究。

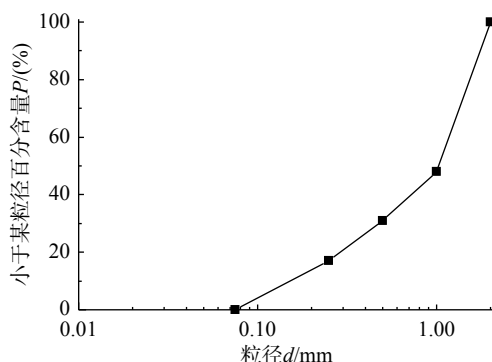


图4 级配曲线

Fig. 4 Gradation curve

表1 砂土试样的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of sand samples

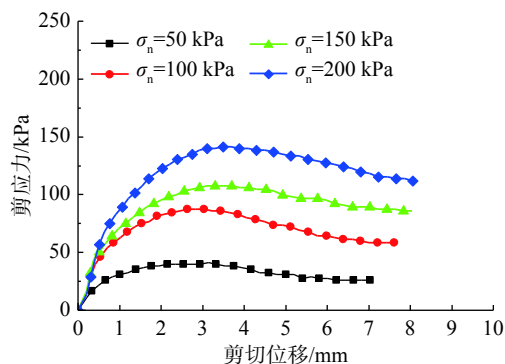
粒径范围	含水率/(%)	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	孔隙比
0.075~2	1.2	8.143	1.384	0.47

制样时先测定含水率,控制在预定数值上,再利用落砂法^[19]进行装样,保证试样均匀,分5次将砂土填满剪切盒,静置24 h后进行试验。每组试样施加不同的法向压应力(50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa),待试样稳定后施加切向拉力进行剪切。试验控制以 0.8 mm/min 的速率进行剪切,每隔 15 s 记录 1 次剪切力、剪切位移等试验数据,并摄录数码照片,用于图像分析。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),当剪应力达到稳定或显著下降时减损完成,宜剪切至位移 4 mm 以上;若剪应力持续增加,应剪切至位移 6 mm 以上。本文各组试验都剪切至剪应力下降,即完全剪损时为止。

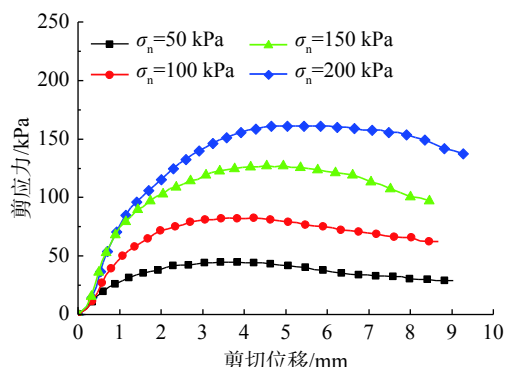
2 试验结果分析

2.1 剪应力-剪切位移关系曲线特征

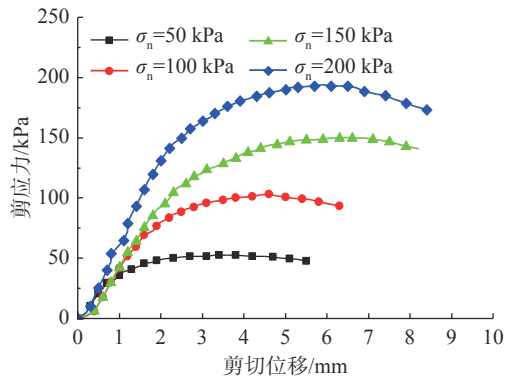
5种尺寸规格砂土试样直剪试验的剪应力与剪切位移关系曲线如图5所示,不同尺寸试样曲线的变化规律基本相同,随着剪切位移的增加,剪应力先增加后减小,临近结束时的曲线较为平缓,且随着法向应力的增加剪应力下降的幅度有所增大。曲线都存在峰值,剪应力达到峰值点时所对应的剪切位移随着法向应力的增大而增大。



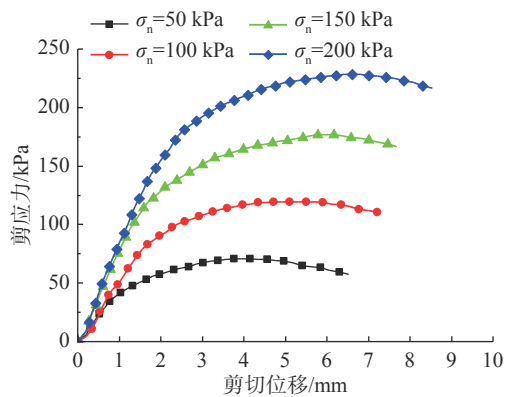
(a) 试样尺寸 10 cm×2.5 cm×5 cm



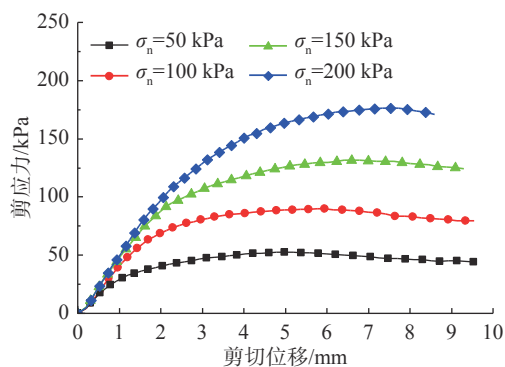
(b) 试样尺寸 10 cm×5 cm×5 cm



(c) 试样尺寸10 cm×10 cm×5 cm



(d) 试样尺寸10 cm×10 cm×2.5 cm



(e) 试样尺寸10 cm×10 cm×10 cm

图5 剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 5 Shear stresses versus shear displacements

取峰值时刻的剪应力作为试样的抗剪强度, 5种规格试验的抗剪强度与法向应力拟合曲线如图6所示, 其强度参数结果示于表2中。

2.2 剪切盒尺寸影响分析

各种规格砂土试样的强度参数如表2所示, 同一尺寸规格试验, 剪应力达到峰值点时所对应的剪切位移随着法向应力的增大而增大。各种规格砂土试样的黏聚力在 5.52 kPa~16.50 kPa, 大部分黏聚力值小于 10 kPa; 内摩擦角在 30.2°~46.4°内变化, 大部分内摩擦角在 40°上下。其中 10 cm×2.5 cm×5 cm、10 cm×10 cm×2.5 cm 试样的黏聚力

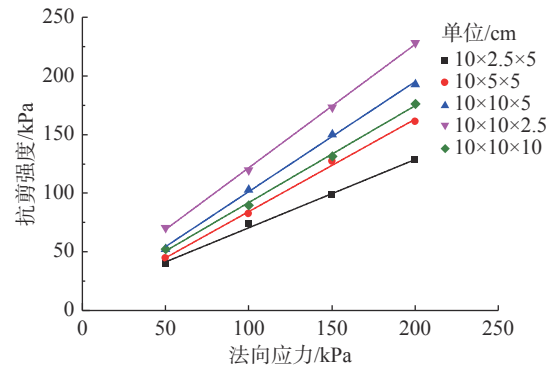


图6 砂土试样强度拟合曲线

Fig. 6 Strength fitting curves of sand samples

值分别为 12.30 kPa 和 16.50 kPa, 对于砂土明显偏大; 而对应的内摩擦角分别为 30.2°和 46.4°, 与平均值相差较大。可见, 试样尺寸影响抗剪强度指标, 当试样长边与短边之比大于 2 时, 剪切行为将呈现出尺寸效应, 导致测得的强度参数偏离平均值; 而当比值大于 4 时, 尺寸效应更为明显, 将导致试验数据严重偏离真实值。本文中 10 cm×10 cm×5 cm 试样的黏聚力和内摩擦角较为接近平均值, 最具代表性, 可用于下文中剪切带形成机制分析。

3 砂土试样剪切带发展规律分析

3.1 不同剪切时刻剪切带扩展规律

采用数字图像变形量测软件 Geodog, 对砂土直剪试验过程中的位移场进行分析。Geodog 是一款采用无标点法对数字图像进行变形量测的软件, 由于无需提前在试样上进行点位标记, 仅通过一系列照片就能进行位移场的量测, 为岩土工程有关试验提供了简便且有效的技术手段^[19]。通过定点连续拍摄一系列数字照片, 并在原始照片上设定测量点位, 利用每个像素点 (pixel) 颜色的 RGB 分量, 采用像素块追踪算法 (block tracking) 进行图像变形场的测量; 并利用有限单元法 (FEM) 中四边形等参单元的方法, 还可以进行各类应变场的计算^[20]。

对砂土直剪试验过程中摄录照片进行分析, 得到砂土试样侧表面土体颗粒在剪切时的运动位移情况, 探究砂土试样剪切带的形成过程和扩展机制。10 cm×10 cm×5 cm 试样在法向应力 150 kPa 下不同剪切时刻的位移场云图如图7所示。横向和纵向数字为像素点的坐标 (像素点的序号), 单位为 pixel, 图例中的数字代表相对位移, 单位为%,

表 2 砂土直剪试验结果及强度参数
Table 2 Shearing test results and strength parameters of sand samples

试样尺寸/cm	长宽比	宽高比	法向应力/kPa	峰值剪切位移/mm	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	拟合度
10×2.5×5	4 : 1	1 : 2	50	2.74	39.6	12.30	30.2	0.9945
			100	2.83	73.8			
			150	3.50	98.4			
			200	3.68	128.4			
10×5×5	2 : 1	1 : 1	50	3.70	44.8	5.52	38.2	0.9860
			100	4.24	82.6			
			150	4.54	127.3			
			200	5.04	161.2			
10×10×5	1 : 1	2 : 1	50	3.82	52.7	7.60	43.1	0.9841
			100	4.93	103.0			
			150	5.86	150.2			
			200	6.51	193.2			
10×10×2.5	1 : 1	4 : 1	50	3.76	70.8	16.50	46.4	0.9938
			100	4.91	119.6			
			150	5.78	173.2			
			200	6.41	228.2			
10×10×10	1 : 1	1 : 1	50	4.98	52.7	9.45	39.5	0.9987
			100	5.76	89.9			
			150	6.59	131.6			
			200	7.53	176.4			

表示图像分析得出的位移值与图像长边尺寸的相对比值。累计应变为剪切位移与剪切方向试样长度的比值。

需要说明的是，目前图像分析技术在小变形的时候精确度较高，而大变形时会增大误差。Geodog 采用的是定点拍摄，在剪切过程中下盒的两端有部分土体进出，导致像素块不能完全追踪，且误差随变形增加会逐渐增大。但是图像变形场分析的整体规律是正确的，并且上盒固定不动，其位移计算结果的准确度会更高。本文对位移值的大小不作重点分析，着眼于上盒拱形剪切带形成机制及变化规律的研究。图像算法本身具有相当的困难，但随着图像分析需求的大幅度提升，精确度会越来越高。

依据不同剪切时刻的位移场云图，可以将砂土试样剪切带扩展过程划分为 5 个阶段，可以总结为：

- 1) 初始挤密阶段：剪切刚开始，上下直剪盒发生微小错动，全局变形水平较低且均匀，沿着剪切方向土体颗粒逐渐挤密。
- 2) 局部屈服阶段：上下盒之间已形成了一条明显的水平主剪切带，此时上盒土体的破裂面具

有多种发展趋势。

3) 剪切带发展阶段：在上盒中下部逐渐形成一条向上凸起的弧形副剪切带，此时剪应力尚未达到峰值，但副剪切带已经基本形成。

4) 峰值应力剪切带：剪应力峰值时主副剪切带间的拱形剪切破坏区域略有减小，但更加清晰。

5) 软化阶段：剪应力达到峰值后，试样发生一定程度的软化，此后由于法向应力的约束，拱形剪切区域随剪切位移的增加继续减小，但变化幅度较慢，一直持续到试验结束。

有理由相信，若砂土试样能够不受剪切盒尺寸限制，无限剪切下去，副剪切带可能会最终完全消失。但考虑到土体强度主要是以峰值时刻的剪应力为参考标准，因此，土样中的剪切破坏可认为是沿着主、副两条剪切带而展开的。

3.2 峰值剪应力时刻剪切带变化规律

图 8 所示为 10 cm×10 cm×5 cm 试样在不同法向应力下剪应力达峰值时的位移云图。

图 8 中根据云图颜色分界线，人工勾勒出副剪切带的位置，同时采用绘图软件在人工标定的副剪切带上提取坐标点，便于对副剪切带进行分析。由图 8 可以看出随着剪切的进行，当剪应力

达到峰值点时, 各组试验的水平主剪切带和拱形副剪切带已完全形成; 而随着法向应力的增大, 主副剪切带间的拱形剪切破坏区域逐渐增大。

为了进一步研究副剪切带, 对砂土试样在不同法向应力下, 剪应力达峰值时的拱形副剪切带进行曲线拟合, 得到副剪切带形状随法向应力变化的函数表达式, 进而可以得出副剪切带上的正应力和剪应力, 以获得副剪切带上的抗剪强度指标, 与水平主剪切带上的强度指标进行对比, 分析变化规律。

3.3 副剪切带曲线拟合及强度分析

利用数据处理软件 Matlab 对人工勾勒出的副剪切带进行曲线拟合。由于副剪切带的形状呈现较为常见的二次抛物线特点, 通过二次多项式函

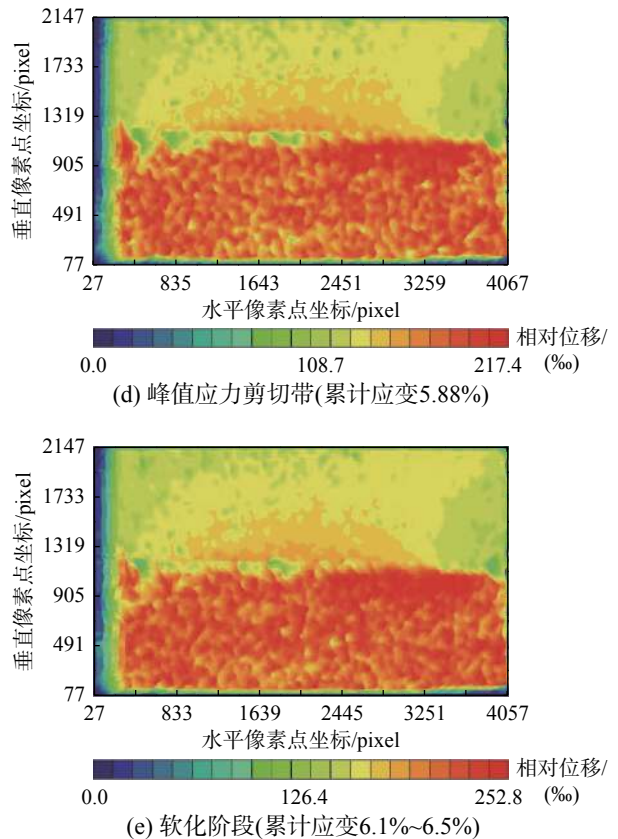
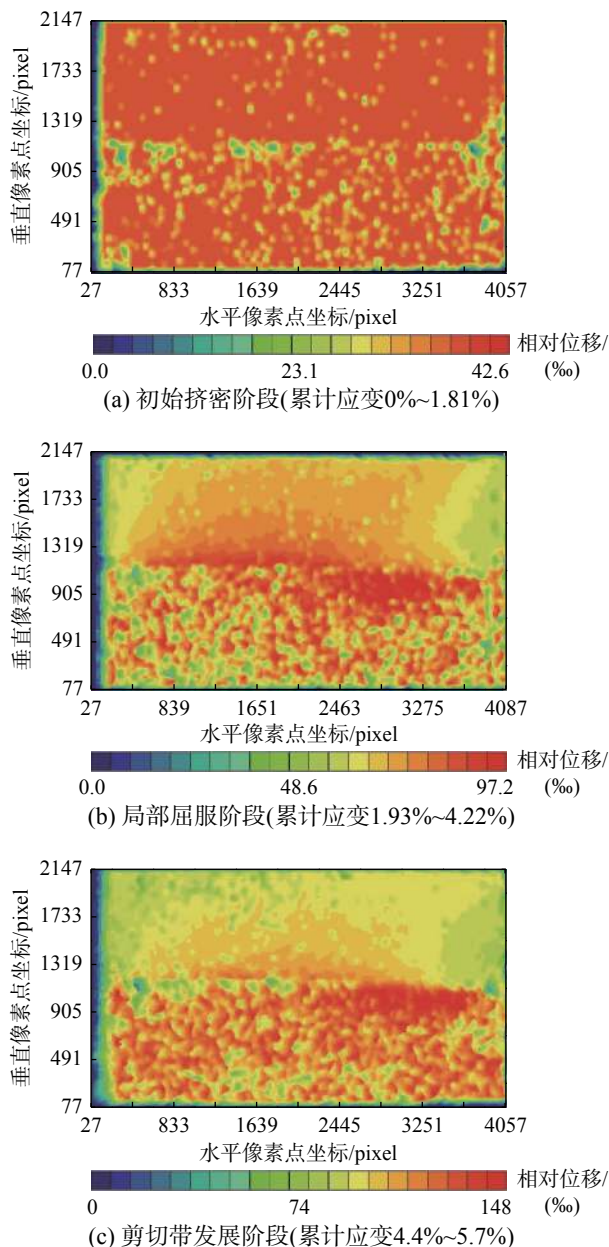


图 7 直剪试验典型阶段位移云图

Fig. 7 Displacement diagrams of typical stages for shear test 数进行拟合, 可以得到拟合度较高的函数表达式。尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 试样在不同法向应力下, 剪应力达到峰值时刻的副剪切带拟合曲线如图 8 所示。图中定义坐标原点为剪切缝左侧端点, 即上下盒间主剪切带的最左侧点处; 采用实际尺寸作为坐标系统, 单位为 mm。

试样在不同法向应力下的副剪切带形状可用如下公式统一表示:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

式中: y/mm 代表曲线上一点的纵坐标; x/mm 代表曲线上一点的横坐标, 坐标原点为剪切缝左侧端点; A 、 B 、 C 为拟合参数, 如表 3 所示。不同法向应力下拟合参数 A 和 B 变化不大, 因此可以近似取平均值, 保留 3 位小数, 确定参数 A 取为 -0.012 , 参数 B 取为 1.034 。

由表 3 可知, 参数 C 随法向应力的增加而线性增大, 可以通过线性拟合获得参数 C 与法向应力 K 的关系式:

$$C = 0.03K - 13.681 \quad (2)$$

结合式 (1) 和式 (2), 可得 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 试样在不同法向应力下副剪切带的函数表达式:

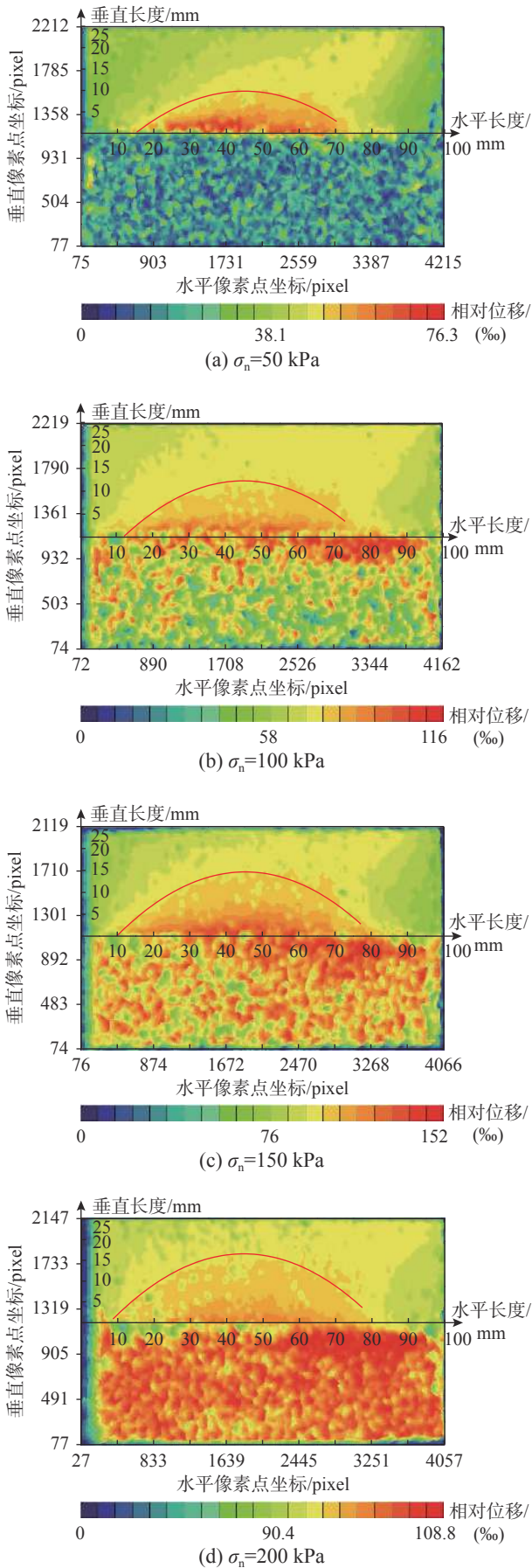


图8 峰值时刻位移图及副剪切带

Fig. 8 Displacement maps at peak time and sub-shear bands

表3 副剪切带拟合结果

Table 3 Fitting results for sub-shear bands

试样尺寸/ cm ³	法向应力/ kPa	拟合 参数A	拟合 参数B	拟合 参数C	拟合度
10×10×5	50	-0.0110	0.9845	-12.2660	0.929 90
	100	-0.0112	1.0094	-10.4261	0.943 10
	150	-0.0117	1.0585	-9.2839	0.962 60
	200	-0.0121	1.0818	-7.5962	0.941 80

$$y = -0.012x^2 + 1.034x - 0.03K - 13.681 \quad (3)$$

在确定副剪切带的函数表达式之后,对主、副剪切带之间的拱形区域进行受力分析,可以进一步得出副剪切带所确定的强度指标 c_2 和 φ_2 。根据试验结果,由峰值时刻的正应力和剪应力可以得出水平主剪切带所确定的土体抗剪强度指标 c_1 和 φ_1 。通过对比主、副剪切带所确定参数的差异,进一步研究直剪试验中剪切带的形成机制。试验中上盒固定不动,下盒从右往左剪切进行试验,对主、副剪切带之间的拱形区域进行受力分析,如图9所示。

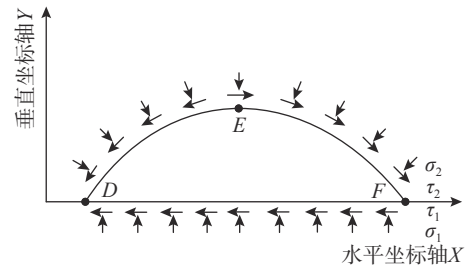


图9 剪切破坏区域受力分析

Fig. 9 The stress analysis for shear failure area

假定主、副剪切带上的正应力和剪应力均匀分布,定义水平主剪切带上的正应力为 σ_1 、剪应力为 τ_1 ,据此确定土体的抗剪强度指标为 c_1 、 φ_1 ;同理,拱形副剪切带上的正应力为 σ_2 、剪应力为 τ_2 ,由其确定的抗剪强度指标为 c_2 、 φ_2 。

如图9所示,在拱形副剪切带上定义D、E、F三点,其对应的横坐标分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ,根据副剪切带的函数表达式可以确定:

$$x_1, x_3 = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / (2A) \quad (4)$$

$$x_2 = -B / (2A) \quad (5)$$

式中, A 、 B 、 C 即为式(1)中的拟合参数。将副剪切带曲线上任意一点的切线与 X 轴的夹角设为 θ ,则 $\theta = \arctan(2Ax + B)$,据此将拱形副剪切带上的正应力和剪应力沿水平方向和竖直方向分解,可分别列出拱形破坏区域(图9)在水平方向和竖直方

向上的平衡方程:

水平方向:

$$\int_{x_1}^{x_2} \tau_2 \cos \theta dx + \int_{x_2}^{x_3} \tau_2 \cos(-\theta) dx = \tau_1 (x_3 - x_1) \quad (6)$$

竖直方向:

$$\int_{x_1}^{x_2} \sigma_2 \cos \theta dx + \int_{x_2}^{x_3} \sigma_2 \cos(-\theta) dx - \int_{x_1}^{x_2} \tau_2 \sin \theta dx + \int_{x_2}^{x_3} \tau_2 \sin(-\theta) dx = \sigma_1 (x_3 - x_1) \quad (7)$$

当法向应力 K 一定时, 副剪切带的曲线方程就确定; 同时根据试验结果, 剪应力峰值时刻主剪切带上的正应力 σ_1 和剪应力 τ_1 也确定, 由此根据式 (4)~式 (7) 可以求解出副剪切带上的正应力 σ_2 和剪应力 τ_2 。根据不同的法向应力水平, 可求出四组副剪切带上的 σ_2 和 τ_2 , 如表 4 所示。通过对 4 组 σ_2 、 τ_2 值进行线性拟合, 便可求出拱形副剪切带上的抗剪强度指标 c_2 和 ϕ_2 , 如图 10 所示。

表 4 主/副剪切带强度参数对比

Table 4 Comparison on strength parameters of primary and secondary shear bands

试样尺寸/ cm ³	主剪切带 正应力 σ_1 /kPa	主剪切带 剪应力 τ_1 /kPa	主剪切带 抗剪强度指标	副剪切带 正应力 σ_2 /kPa	副剪切带 剪应力 τ_2 /kPa	副剪切带 抗剪强度指标
10×10×5	50	52.7	$c_1=7.6$ kPa $\phi_1=43.1^\circ$	53.659	56.557	$c_2=8.2$ kPa $\phi_2=43.2^\circ$
	100	103.0		108.120	111.364	
	150	150.2		163.625	163.843	
	200	193.2		219.886	212.410	

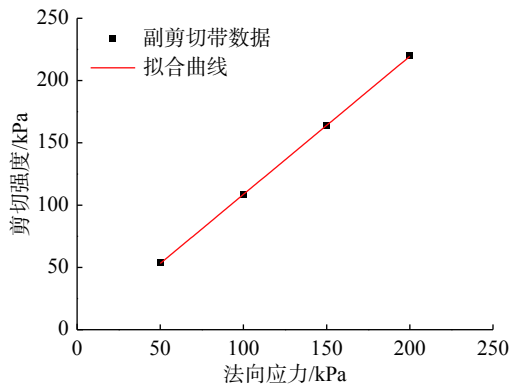


图 10 副剪切带强度拟合曲线

Fig. 10 The strength fitting curve of sub-shear bands

表 4 同时列出了主剪切带确定的强度指标 c_1 和 ϕ_1 , 与副剪切带强度指标 c_2 和 ϕ_2 进行对比, 可以看出, 10 cm×10 cm×5 cm 尺寸试样副剪切带上的正应力和剪应力均比主剪切带上的应力值大, 且应力水平越高, 主、副剪切带的应力差值越大。同时, 由主、副剪切带所确定的内摩擦角基本相同, 而副剪切带确定的黏聚力 c_2 也仅比主剪切带确定的 c_1 大 7.89%, 增加幅度较小。因此, 基本可以认为主、副剪切带得出的抗剪强度指标是一致的, 从而也间接证明了副剪切带存在的合理性, 是符合土的抗剪强度理论的。

4 讨论

4.1 剪切带的形成机制及影响因素

本文砂土可视化直剪试验中发现了主、副两条剪切带, 而且在剪应力形成峰值前就已经形

成。黏土直剪试验中并没有发现该类现象, 但碎石土的大型直剪试验中也发现了主、副两条剪切带^[21], 笔者认为形成主、副两条剪切带的本质原因是剪胀; 颗粒旋转、翻滚, 甚至破碎都会引起土体剪胀, 使得颗粒运动偏离水平面, 一侧向斜上方运动, 受到顶板的约束, 另一侧被迫向斜下方运动。

砂土直剪试验和离散元模拟也发现了剪切带偏离水平剪切缝的现象, 如文献 [14, 16], 并指出颗粒形状是剪切带偏离的关键。虽然剪切带发生了倾斜以及不均匀性, 但并未形成明显的拱形副剪切带; 对比分析发现, 二者试样的高度相对较小, 拱形剪切带尚未充分拱起, 就受到顶板抑制, 因此剪切带只是偏离, 未能形成拱形副剪切带。可见试样尺寸, 尤其是高度和长度的比值, 对剪切带形态影响严重, 并且试样长边尺寸越大, 剪切时推进的长度就越长, 颗粒翻滚的距离就增加, 造成剪胀和副剪切带更加明显。另外, 文献 [15, 17] 也指出剪切带的厚度对强度指标和剪切带的形态也有较大影响。

由此可见, 剪切带的影响因素包括: 土体剪胀特性、颗粒形状、试样的高长比、试样剪切方向的尺寸、剪切缝的厚度等, 不仅影响剪切带的形态, 其测得的强度指标也相差较大。笔者认为, 副剪切带的存在会造成土体的抗剪强度被高估, 因为理想的直剪试验只考虑剪切面上的正应力 σ 和剪应力 τ , 而拱形副剪切带会带动更多的土

体抵抗外荷载,相当于抗剪材料总量的增加,造成测得的强度偏高,当然该假设有待进一步试验验证。那么如何准确测量土体的强度指标呢?三轴试验测量的结果更准确吗,会不会也存在副剪切带?需要如何修正试验方法以测得更准确的土体强度参数来指导工程实践呢?这些问题值得国内外同行们探讨解决。

4.2 存在不足与未来努力方向

受限于研究手段,以及笔者本身的研究水平,尚存在一些考虑不全面之处,有待进一步改进:

1) 为了便于拍照观察,本文砂土可视化直剪试验所采用的是方形直剪盒;对于圆形直剪盒,以及土体的三轴试验过程中,如何对试样进行图像观测分析,研究剪切带的形成过程,值得进一步探索。

2) 本文通过直剪试验过程中对剪切盒侧表面进行观测,研究剪切带的形成机制和扩展过程。尽管采取了一定的润滑措施,减小砂土与剪切盒边界的摩擦,但仍难以完全消除。试样内部其他位置剪切带的变形规律是否和侧表面完全一致,需要研发土体内部变形量测技术手段进行验证。

3) 本文主要研究砂土直剪试验过程中剪切带,尤其是副剪切带的形成机制,所选用砂土含水率较低,不涉及固结问题,因此采用快剪的方式。对于砂土试样的含水率、固结问题以及密实度等材料因素的影响,留待后续研究。

5 结论

本文通过不同尺寸的砂土可视化直剪试验,对剪切带扩展过程进行了总结,研究了副剪切带的形成机制,同时开展了破坏区域的受力分析,对主/副剪切带强度参数进行了对比,主要结论如下:

(1) 通过 5 种尺寸规格砂土试样的直剪试验,对试验结果进行对比分析,发现试样尺寸对抗剪强度指标确有一定的影响,当试样太薄或者太扁,即边长尺寸差异较大时,测得的强度参数也会偏离平均值,造成较大误差;建议砂土直剪试验剪切盒的长边与短边之比不宜大于 2,且不应大于 4。

(2) 通过对典型尺寸的砂土可视化直剪试验进行图像分析,可以将剪切带的扩展过程划分为 5 个阶段,即初始挤密阶段、局部屈服阶段、剪切

带发展阶段、峰值应力剪切带阶段和软化阶段。

(3) 对不同法向应力下剪应力峰值时的图像进行位移场分析,发现剪切破坏区域不是始终沿着水平剪切缝发展,而是在上盒中下部逐渐形成一条向上凸起的拱形副剪切带,剪切破坏区域是沿着主、副两条剪切带而展开的。随着剪切位移的增加,拱形剪切破坏区域逐渐减小;而随着法向应力的增大,剪应力峰值时刻的拱形破坏区域逐渐增大。

(4) 通过对剪应力峰值时的拱形破坏区域进行受力分析发现,拱形副剪切带上的正应力和剪应力均大于水平主剪切带;由副剪切带得出的内摩擦角和主剪切带近似,黏聚力比主剪切带大 8% 左右。主/副剪切带的强度指标基本一致,间接证明了副剪切带存在的合理性,符合土的抗剪强度理论。

参考文献:

- [1] Tatsuoka F, Nakamura S, Huang C C, et al. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests on sand [J]. *Soils and Foundations*, 1990, 30(1): 35 — 54.
- [2] Wang J, Gutierrez M. Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects [J]. *Geotechnique*, 2010, 60(5): 359 — 409.
- [3] Kozicki J, Niedostatkiewicz M, Tejchman J, et al. Discrete modelling results of a direct shear test for granular materials versus FE results [J]. *Granular Matter*, 2013, 15(5): 607 — 627.
- [4] 邵龙潭, 刘港, 郭晓霞. 三轴试样破坏后应变局部化影响的实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(3): 385 — 394.
Shao Longtan, Liu Gang, Guo Xiaoxia. Effects of strain localization of triaxial samples in post-failure state [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(3): 385 — 394. (in Chinese)
- [5] 李航, 陆烨, 孙康. 标准砂直剪试验的PFC数值模拟[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(5): 780 — 788.
Li Hang, Lu Ye, Sun Kang. PFC numerical simulation of direct shear tests on standard sand [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(5): 780 — 788. (in Chinese)
- [6] 杨升, 李晓庆. 基于PFC3D的砂土直剪模拟及宏观分析[J]. *计算力学学报*, 2019, 36(6): 777 — 783.
Yang Sheng, Li Xiaoping. Shear simulation and macro meso analysis of sand based on PFC3D [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, 36(6): 777 — 783. (in Chinese)
- [7] 洪勇, 李子睿, 唐少帅, 等. 平均粒径对砂土剪切特性的影响及微观机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6): 1814 — 1822.

- Hong Yong, Li Zirui, Tang Shaoshuai, et al. Effect of average particle size on shear properties of sand and its mesomechanical analysis [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(6): 1814 — 1822. (in Chinese)
- [8] 王鹏鹏, 郭晓霞, 桑勇, 等. 基于数字图像相关技术的砂土全场变形测量及其DEM数值模拟[J]. *工程力学*, 2020, 37(1): 239 — 247.
Wang Pengpeng, Guo Xiaoxia, Sang Yong, et al. Full-field deformation measurement of sand using the digital image correlation technique and numerical simulation using the discrete element method [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(1): 239 — 247. (in Chinese)
- [9] 王璇, 徐明. 胶结型可燃冰砂土剪切特性的离散元模拟[J]. *工程力学*, 2021, 38(2): 44 — 51.
Wang Xuan, Xu Ming. Discrete element simulation of the shear behavior of cemented methane hydrate-bearing sands [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(2): 44 — 51. (in Chinese)
- [10] 卢应发, 张凌晨, 张玉芳, 等. 边坡渐进破坏多参量评价指标[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 132 — 147.
Lu Yingfa, Zhang Lingchen, Zhang Yufang, et al. Multi parameter evaluation index of progressive failure of landslide [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 132 — 147. (in Chinese)
- [11] 李福林, 彭芳乐, 雷亮, 等. 平面应变条件下砂土局部化剪切带的有限元模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 850 — 857.
Li Fulin, Peng Fangle, Lei Liang, et al. Finite element simulation of strain localization on a shear band of sand under plane strain condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 850 — 857. (in Chinese)
- [12] 郭莹, 高军程. 初始成样含水率对饱和细砂固结与剪切过程的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(5): 510 — 516.
Guo Ying, Gao Juncheng. Effect of initial sampling water ratio on consolidation and shear process of saturated fine sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(5): 510 — 516. (in Chinese)
- [13] 孔亮, 陈凡秀, 李杰. 基于数字图像相关法的砂土细观直剪试验及其颗粒流数值模拟[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2971 — 2978.
Kong Liang, Chen Fanxiu, Li Jie. Meso-direct-shear test of sand based on digital image correlation method and its PFC numerical simulation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2971 — 2978. (in Chinese)
- [14] 潘远阳, 魏玉峰, 李远征, 等. 直剪试验下砂土剪切带形成的细观变形机制[J]. *水利水运工程学报*, 2020(3): 82 — 91.
Pan Yuanyang, Wei Yufeng, Li Yuanzheng, et al. Study on microscopic deformation mechanism of sand soil shear zone in direct shear test [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(3): 82 — 91. (in Chinese)
- [15] Lai Z S, Chen Q S. Characterization and discrete element simulation of grading and shape-dependent behavior of JSC-1A Martian regolith simulant [J]. *Granular Matter*, 2017, 19(4): 1 — 14.
- [16] Tang H X, Du T, Zhang L J, et al. A plane strain testing apparatus characterized by flexible loading and noncontact deformation measurement and its application to the study of shear band failure of sand [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2018, 14(9): 1 — 16.
- [17] Kawamoto R, Ando E, Viggiani G, et al. All you need is shape: Predicting shear banding in sand with LS-DEM [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 111: 375 — 392.
- [18] Wiebicke M, Andò E, Viggiani G, et al. Measuring the evolution of contact fabric in shear bands with X-ray tomography [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(12): 79 — 93.
- [19] 李元海, 朱合华, 靖洪文, 等. 基于数字照相的砂土剪切变形模式的试验研究[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(5): 685 — 689.
Li Yuanhai, Zhu Hehua, Jing Hongwen, et al. Experimental investigation of shear deformation patterns in sands based on digital image correlation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(5): 685 — 689. (in Chinese)
- [20] 李元海. 数字照相变形量测技术及其在岩土模型实验中的应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
Li Yuanhai. Study on digital photography-based deformation measurement technique and its application in geo-physical model experiment [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [21] 王晓帅, 王子寒, 景晓昆, 等. 粗粒土大型直剪试验宏观研究与离散元模拟[J]. *深圳大学学报 (理工版)*, 2020, 37(3): 279 — 286.
Wang Xiaoshuai, Wang Zihan, Jing Xiaokun, et al. A macro-micro study and distinct element simulation on large-scale shear test of coarse-grained soil [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(3): 279 — 286. (in Chinese)