

粗砂与结构物接触面的剪切特性试验研究

赵 程^{1,2}, 谢俊飞¹, 王文东³, 周依盟¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土工程及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市合流工程监理有限公司, 上海 200120)

摘要: 利用同济大学研制的大型多功能界面剪切仪, 对粗砂与结构物的剪切变形特性进行研究. 采用在剪切盒内灌注彩色砂条的方法研究剪切带的空间分布特性. 结果表明, 彩色砂条的变形可以反映剪切带厚度和空间分布. 剪切带厚度为 6~11 mm, 厚度随着法向应力的增加呈增加的趋势; 剪切带厚度在空间上的分布呈现出均匀性, 在剪切方向(X 轴方向)上呈现中间大两端小的趋势, 在垂直剪切方向(Y 轴方向)上离散性较小、分布近似均匀. 剪切板凹槽的约束作用, 使得凹槽内的砂土颗粒带动附近砂土颗粒运动, 从而形成剪切带. 土体的剪胀特性是由于剪切带内砂土的变形导致的, 剪切初始时剪胀速率较快, 达到抗剪强度后剪胀速率减慢.

关键词: 大型直剪试验; 剪切带; 力学特性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

direction (X direction), the shear zone exhibits a tendency that shear zone is thick at the central position and thin at both ends of the shear box. The thickness of the shear zone is approximately uniform in the vertical shear direction (Y direction). Under the friction action between particles, the sand particles in the groove drive the sand particles nearby to move together and thus the shear zone is formed during the tests. The dilatancy of sand is caused by the deformation of the sand particles in the shear zone. The dilatancy rate is fast at the initial of the experiment, and then the dilatancy rate slows down after the shear strength reaches the peak.

Key words: large-scale direct shear test; shear band; mechanical behavior

Experimental Study on Shear Behavior of Interface Between Coarse Sand and Structure

ZHAO Cheng^{1, 2}, XIE Junfei¹, WANG Wendong³, ZHOU Yimeng¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Confluence Engineering Supervision Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: The shear stress characteristics of the interface between coarse sand and structure were quantitatively analyzed and discussed by using the multi-functional interface shear instrument. The colored sand strips were fixed into a shear box to characterize the movement of sand particles during the tests. The results show that the spatial distribution of shear zone after shear experiment could be reflected by the color sand strips. The thickness of the shear zone formed in the shear experiments are about 6~11 mm, and the thickness of the shear zone increases with normal stress. The spatial distribution of the shear zone is irregular. In the shear

结构物与土体之间的相互作用在土木工程中广泛存在, 如桩与周围土体、地下连续墙与墙后土体的相互作用等. 由于结构物与土体的刚度相差悬殊, 受到外部荷载时, 在接触面处可能出现滑移、错动、脱开、张闭等非连续现象. 接触面处的力学特性涉及到非线性、大变形和局部不连续等问题, 已成为土体与结构物相互作用研究的核心课题之一.

Potyondy^[1]最先采用直剪仪进行了土体与不同粗糙度结构物的接触面力学特性研究, 首次提出采用光滑和粗糙来定性描述建筑材料的表面粗糙度. Clough 等^[2]进行了直剪试验, 研究了土与混凝土接触面的力学特性, 得到了应力-应变双曲线模型, 该模型目前仍在广泛应用. Martinez 等^[3]首次提出了界面粗糙形式对砂土与结构物界面强度的影响, 研究主要关注剪切带力学特性, 对剪切带分布研究较少. 殷宗泽等^[4]通过在混凝土表面埋设潜望镜, 利用大尺寸直剪试验观察剪切过程中接触面处的土颗粒位移情况. 胡黎明等^[5-6]基于透明的直剪盒进行了不同相对粗糙度下接触面的力学特性试验, 发现接触

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(41202193, 41572262); 上海市教委科研创新项目(15ZZ016); 上海市青年科技启明星计划(17QC1400600)

第一作者: 赵 程(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程. E-mail: zhaocheng@tongji.edu.cn

面的力学和变形特性在达到接触界面的某一临界相对粗糙度时表现出不同特性. 张嘎等^[7-9]将数字图像技术用于直剪试验,从宏、细观两个角度研究了粗粒土和结构物接触面的剪切特性. White 等^[10]提出了一种非接触式土体变形测量新技术,该系统由数字摄影、近景摄影测量和粒子图像测速分析技术(PIV)组成,可以观测到剪切带表面土颗粒的运动,但不能观测剪切带内部空间分布. 上述成果主要研究了粗糙度对剪切带力学特性和剪切带表面形貌特征的影响,而对剪切带内部空间分布研究较少.

在前人研究的基础上,对试验方法进行改进,采用在砂样中灌注彩色砂的方法对砂土的运动进行标识. 通过观察剪切结束时彩色砂条的变形来研究粗粒土和结构物接触面的剪切特性.

1 剪切特性试验

1.1 试验设备

试验设备为大型多功能界面剪切仪(SJW - 200),如图 1 所示,主要性能指标如表 1 所示.

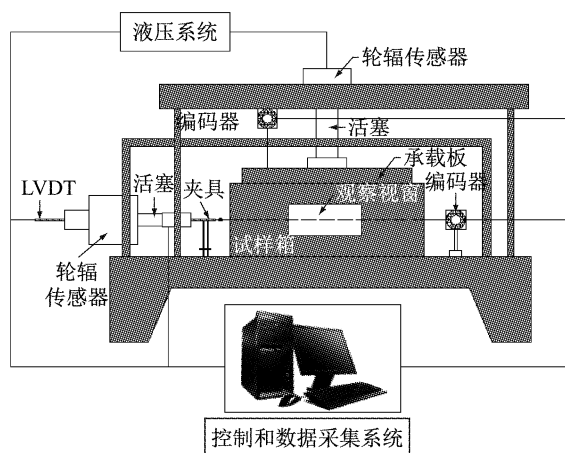


图 1 大型多功能界面剪切仪结构示意图(SJW-200)

Fig.1 Structure diagram of large-scale interface shear apparatus (SWJ-200)

表 1 大型多功能界面剪切仪(SJW-200)主要性能指标

Tab.1 Main performance indices of large-scale interface shear apparatus

剪切盒尺寸 (长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	最大荷载/ kN		最大位移/ mm		剪切速率/ (mm·min ⁻¹)
	法向	法向	切向	切向	
600×400×100	200	200	150	50	0.1~50.0

1.2 试验材料

(1) 标准砂

众多研究表明,土体与结构物剪切时接触面的

变形特性以及抗剪强度等受众多因素的影响,如土的种类、含水率、密度以及法向应力、结构物的粗糙度等.

土体的密度和含水率对剪切带特性有明显影响. 土体相对密度越大,结构面抗剪强度越大. 密实砂土剪切应力-应变关系呈现应变软化现象,松散砂土呈现应变硬化现象^[11]. 砂土与结构物接触面抗剪强度随着含水率的增大而减小. 随着土体含水率的增大,接触面的黏聚力先增大后减小,在塑性状态含水率附近达到峰值. 接触界面的内摩擦角随着土体含水率的增加而增加^[12].

为了使试验具有可重复性,试验用砂为福建 ISO 标准砂,砂土处于饱和状态,砂土的密实度通过重锤(10 kg)压实的方法保证一致. 砂土的平均粒径 $D_{50}=0.8$ mm. 砂土的筛分颗粒组分如图 2 所示.

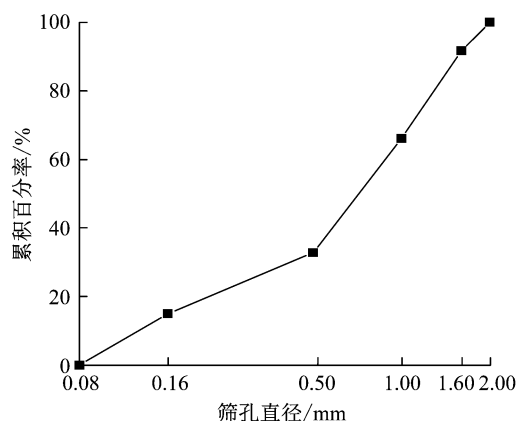


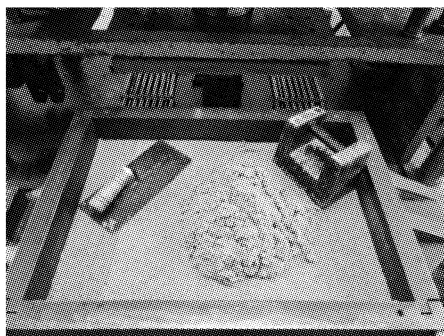
图 2 筛分曲线

Fig.2 Sieve-analysis curve

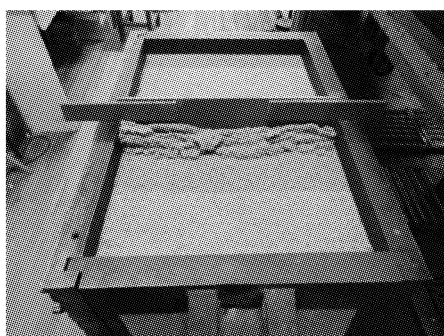
试验前将 ISO 标准砂放入水里浸泡使其完全饱和. 将饱和后的砂样分层填在剪切盒上盒中,每层填筑大约 2 cm,分四层填筑. 每填筑一层用质量为 10 kg 的标准重锤压实一遍,如图 3a 所示. 为了保证每次剪切时砂样的厚度为一定值,填筑砂样时要多填筑一些,然后用一定高度的板把多余的砂土刮出来,如图 3b 所示.

(2) PVC 板

结构物采用人工粗糙度的硬质聚氯乙烯(PVC)板,PVC 板表面制作成如图 4 所示的标准齿型形状,齿型截面为等腰梯形并保持齿型角度 $\alpha=45^\circ$,同时满足 $S_1=S_2$,可知界面的凹处体积始终和凸出部分体积相等. 在保持其他条件不变的情况下,仅通过改变谷峰距 h 来调 PVC 板的表面粗糙度,因此界面粗糙度即可用 h 的大小来表示. 试验所用 PVC 板的谷峰距 $h=4$ mm.



a 分层填砂压实



b 统一填砂厚度

图 3 分层填装砂样

Fig.3 Filling sand into shear box by layers

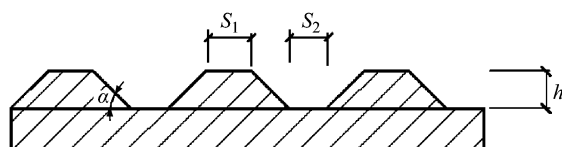


图 4 结构物形状及粗糙度定义示意图

Fig.4 Schematic diagram of structure shape and roughness definition

1.3 试验方案

本试验研究土体与结构物剪切时接触面的剪切特性,因此需对如图 1 所示剪切仪进行改装.上剪切盒装填砂土,下剪切盒安置 PVC 板(模拟结构物).改装后的剪切设备如图 5 所示.上剪切盒砂土装填结束后,通过彩色砂条限位板 7 在砂土中预留彩色砂定位孔 9.限位板的俯视图如图 6 所示.在定位孔内灌注自制的彩色砂,灌注完彩色砂的实物图如图 7 所示.灌注彩色砂的目的是为了标记和凸显结构物表面砂土颗粒的移动,由于自制彩色砂是通过试验用砂染色而来,即彩色砂本身就是试验用砂,所以彩色砂的变形完全表征了剪切盒内砂土的变形规律.

试验准备工作完成后进行剪切,试验结束时出现如图 8 所示的示意图.从图 8 可见,剪切过程中,剪切板的移动会带动与之接触的一定厚度范围内的砂土颗粒的运动,从而在剪切板附近形成具有一定

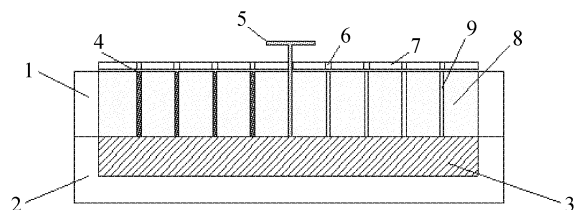
1. 上剪切盒; 2. 下剪切盒; 3. PVC 板; 4. 彩色砂; 5. 成孔装置;
6. 限位孔; 7. 限位板; 8. 粗砂; 9. 所成砂孔

图 5 改装后的剪切仪

Fig.5 Modified shear apparatus

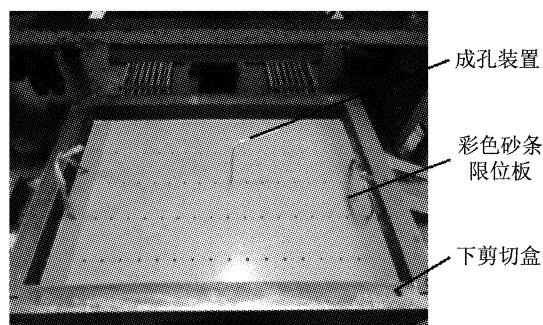


图 6 预制彩色砂孔

Fig.6 Making vertical hole in sand

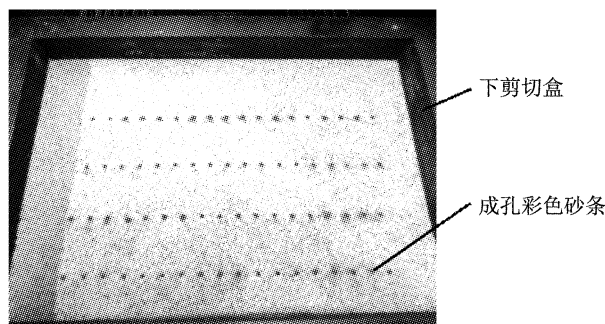
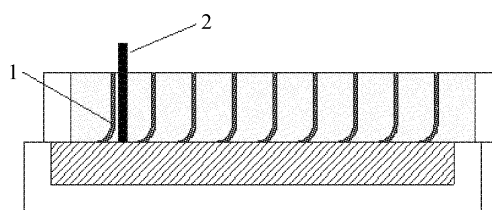


图 7 灌注彩色砂条

Fig.7 Pouring colored sand in vertical hole



1. 彩色砂条的临界变形位置; 2. 测量尺

图 8 剪切试验后彩色砂条变形示意图

Fig.8 Diagram of colored sand deformation after shear test

厚度的剪切带.由于彩色砂条与周围砂土产生同步协调变形,因此可以通过研究彩色砂条的变形形态来研究剪切带的形态.剪切结束时每一条彩色砂条都会存在一个临界变形位置,如图 8 中的编号 1,此

位置以下的彩色砂土颗粒都发生了颗粒运动,以上位置没有发生颗粒运动. 临界位置距离结构物表面的距离就是剪切带在此处的厚度. 可知,每个彩色砂条都有一个这样的空间临界位置,本试验的主要机理就是通过研究剪切前后彩色砂条的变化来研究土体与结构物接触面的剪切特性. 图 9 为实际试验中剪切前后彩色砂条的变化情况,说明了试验的可行性和合理性.

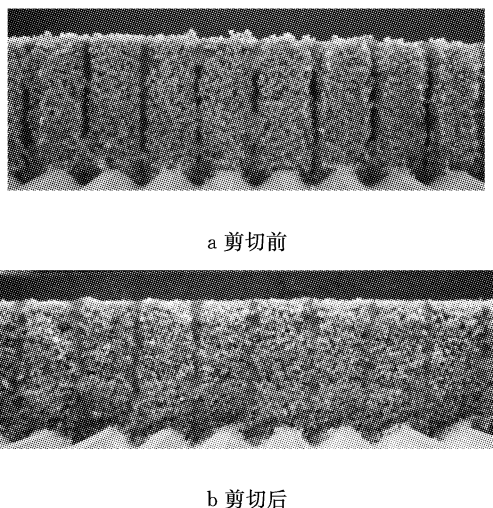


图 9 彩色砂土剪切试验前后对比

Fig.9 Comparison of colored sand before and after shear test

剪切试验中法向荷载的加载方案为:100、150、200、250、300、350 kPa. 剪切时采用位移控制,速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,剪切位移达到 30 mm 时停止.

2 试验结果及分析

2.1 剪切变形特性

(1) 剪切带的变形特性

试验结果发现,土体与结构面相互作用时,剪切面并非是土体与结构物的交界面,而是形成一个具有一定厚度的接触面,将该接触面定义为剪切带^[13]. 剪切带形成的原因是由于结构物与土体发生剪切时,结构物表面附近的土颗粒受到结构面的约束作用,结构面移动时带动一定厚度范围内的土颗粒产生运动,从而在结构物表面形成了具有一定厚度的剪切带,如图 10 中的黑色虚线包络. 因此,土与结构物的接触面应该看为一个剪切错动带,而不是简单的一个面. 下面参照图 10 对剪切带的变形特性进行详细描述.

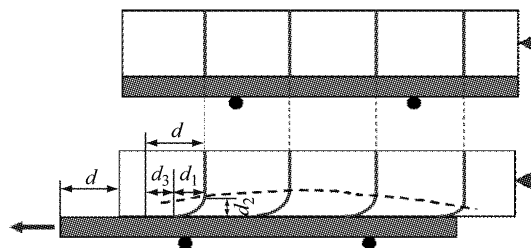
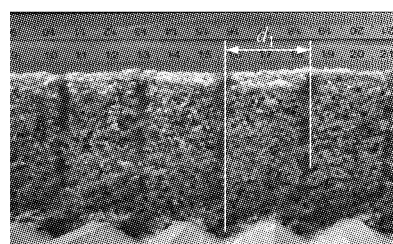


图 10 剪切试验剪切带示意图

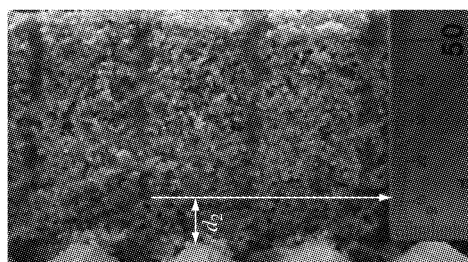
Fig.10 Schematic diagram of shear zone after shear test

如图 10 所示,当结构物向左移动的距离为 d 时,与结构物表面接触的砂土颗粒运动了 d_1 ,将 d_1 定义为剪切位移. 土体与结构物的错动位移定义为 $d_3 = d - d_1$. 当 $d > d_1$ 、 $d_3 > 0$ 时,说明土体与结构物之间产生了滑移错动;当 $d = d_1$ 、 $d_3 = 0$ 时,说明两者之间没有产生错动. 距离结构面越近,土颗粒的运动就越大. 离结构面一定距离时存在一个临界位置,临界位置以下的土颗粒发生了运动,临界位置以上的土颗粒没有发生运动,则把结构面距离临界位置的垂直距离定义为剪切带的厚度,即图 10 中的 d_2 .

图 11 给出了剪切试验中法向应力 $P = 200 \text{ kPa}$ 、谷峰距 $h = 4 \text{ mm}$ 时,剪切盒内某一位置处的剪切变形情况. 灌注彩色标识砂时,砂条的底部恰好位于剪切板的凹槽处或齿顶部. 从图 11a 可以看出,剪切结束时,砂条的底部依然位于凹槽处或齿的顶部,这说明交界面处的砂土颗粒和剪切板没有产生相对位移,即 $d_3 = d - d_1 = 0$. 剪切带的剪切位移 $d_1 = 27 \text{ mm}$ (见图 11a、b),剪切带的厚度 $d_2 = 11 \text{ mm}$ (见图



a 剪切后彩色砂条剪切位移测量



b 剪切带厚度测量

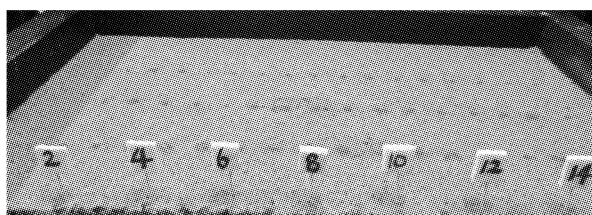
图 11 剪切带几何变形

Fig.11 Deformation of shear zone

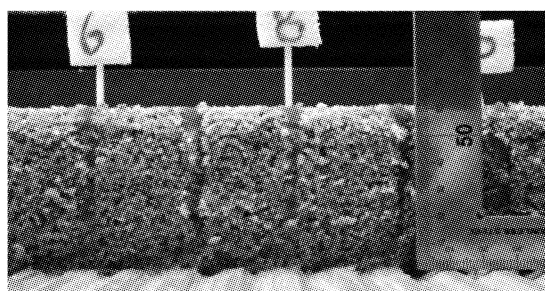
11b).

(2) 剪切带的空间分布

剪切带的空间分布主要指剪切带的厚度在空间的分布情况,在本试验中将剪切盒内所有彩色砂条的临界变形位置的空间坐标测量并记录下来.剪切结束时,推出剪切盒,将上剪切盒的前部打开,标定每个彩色砂条在剪切盒内的空间分布位置(见图 12a).打开剪切盒前端后把遮盖彩色砂条的砂铲掉,使彩色砂条完全暴露,然后用刻度尺测量每个彩色砂条的变形转折点(见图 12b).



a 标记彩色砂条的位置



b 彩色砂条变形点测量

图 12 测量彩色砂条的变形

Fig.12 Deformation measurement of colored sand band

对于剪切带的空间分布, Z 轴坐标为剪切带的厚度, X 、 Y 轴坐标为在剪切盒内的位置(见图 13), X 轴坐标为剪切方向, Y 轴坐标为垂直剪切方向.将测量的空间坐标绘制在空间坐标系内,空间点所包络的曲面即为剪切带的空间曲面.图 14 给出了法向应力 $P=200$ kPa 时剪切带的空间分布.可以看出,不同法向应力下剪切带的空间分布具有相似规律.剪切试验中剪切带的空间分布是不均匀的,总体呈现

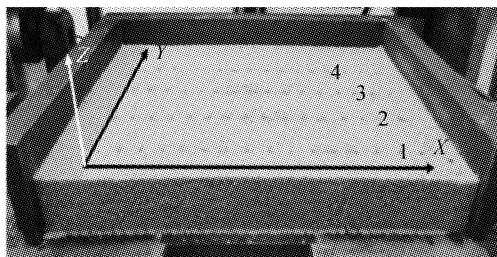


图 13 彩色砂条空间分布

Fig.13 Spatial distribution of colored sand

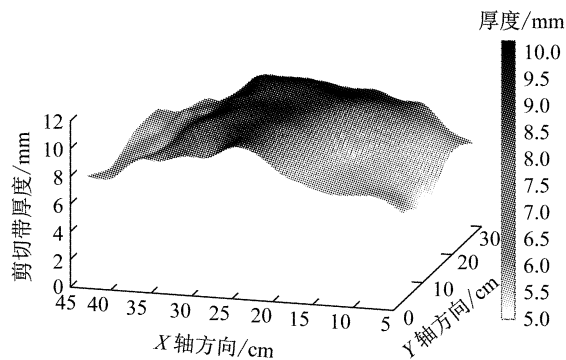


图 14 剪切带空间分布 ($h=4$ mm)

Fig.14 Spatial distribution of shear zone ($h=4$ mm)

出中部大两端小的趋势.为了更加系统地研究剪切带空间分布的不均匀性,分别在 X 轴方向和 Y 轴方向研究剪切带分布规律.

2.2 剪切带沿 X 轴方向的分布

图 15 为剪切板谷峰距 $h=4$ mm、法向应力 P 分别为 100、200、300 kPa 时,第 1、2、3、4 排(见图 13)位置处剪切带包络线沿 X 轴方向的空间分布.从整体趋势看,剪切带在沿 X 轴方向上分布是不均匀的,呈现出中间大两端小的趋势,即剪切带沿 X 轴方向先是逐渐增大,在剪切盒中部位置时达到最大并且稳定一段距离,然后开始减小.出现这种现象的主要原因是:底部剪切板从右往左运动时,靠近剪切盒左侧的砂土颗粒受到挤压,使得左侧颗粒变得较为密实,形成如图 16 所示的挤压区,右侧颗粒则呈现疏松状态,形成如图 16 所示的松动区.靠近剪切盒左侧的密实颗粒受到的约束作用大,颗粒移动的阻力大,因此左侧剪切带的厚度变小;靠近剪切盒右侧的颗粒剪切时呈现疏松状态,没有提供足够的外力使其移动.

四排彩色砂条所显示的剪切带包络线并没有完全重合,说明剪切盒内的剪切带在 Y 轴方向上也具有一定的不均匀性.随着法向应力的增大,第 1、2、3、4 排位置处的四条剪切带分布曲线趋近重合,说明随着法向应力增加剪切带沿 Y 轴方向上的分布是趋近均匀的.同时,随着法向压力的增大,四条曲线的起伏程度减小,曲线趋于水平,说明随着法向应力的增大在整个剪切盒内剪切带的空间分布趋于相同,边界效应的影响减弱.

不同法向应力作用下,测量剪切结束后每条彩色砂条的临界变形位置,发现剪切盒内剪切带的厚度在 6~11 mm 之间.砂样的平均粒径 $D_{50}=0.8$ mm,即剪切带的厚度范围为 7~14 倍的平均粒径.

2.3 剪切带沿 Y 轴方向的分布

如图 13 所示,在本试验中平行于 Y 轴的彩色砂

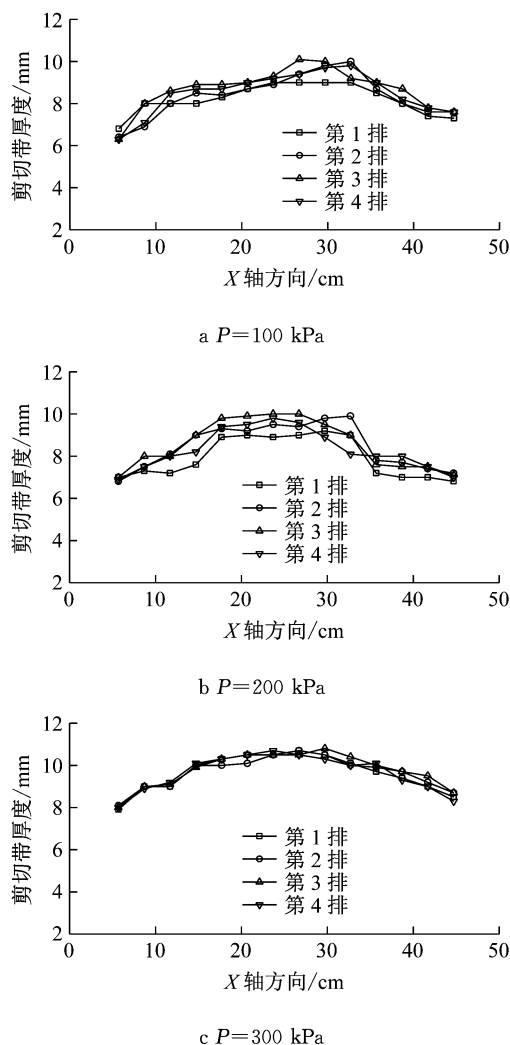


图 15 剪切带厚度沿 X 轴方向分布 ($h=4$ mm)
Fig. 15 Distribution of shear zone thickness in X direction ($h=4$ mm)

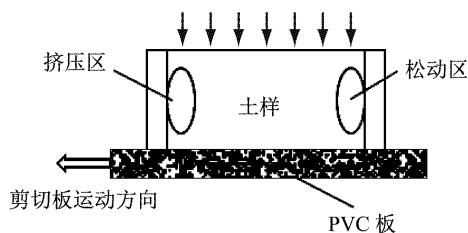


图 16 受力区域分析
Fig. 16 Analysis on stress distribution

条共有 15 列. 规定最左侧一列为第 1 列, 后面依次编号. 数据处理时测量每一列彩色砂条的临界变形位置的高度, 将平行于 Y 轴的每一列的彩色砂条的临界变形高度在 Y-Z 坐标中用曲线连接起来, 形成每列剪切带在 Y 轴方向的包络线, 用来研究每列剪切带在 Y 轴方向的变化.

在上述 X-Z 曲线中选取离散性最大的曲线做 Y-Z 曲线, 因为 X-Z 曲线的离散性反映了剪切带在

Y 轴方向上的分布情况. 对比发现, 法向应力越小, X-Z 曲线的离散性越大, 即剪切带在 Y 轴方向离散性越大.

为了更好地显示剪切带沿 Y 轴方向的分布, 图 17 给出了 Y 轴方向偶数列彩色砂条形成的剪切带包络图. 试验结果显示, 图中的曲线都近似为直线, 表明每条剪切带在 Y 轴方向的空间分布近似直线, 即同一列位置处的剪切带在 Y 轴方向上的分布趋于均匀; 图中存在个别曲线波动大的情况, 但是小于 X 轴方向的波动. 对比可以发现, 在 X 轴方向上的不均匀性远大于在 Y 轴方向上的不均匀性.

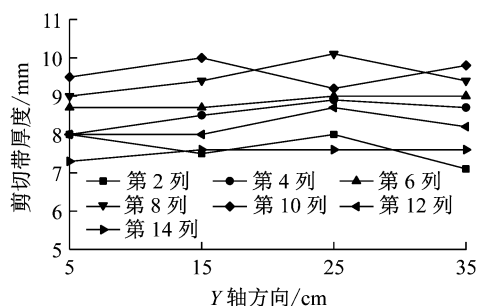


图 17 剪切带厚度沿 Y 轴方向分布 ($h=4$ mm, $P=100$ kPa)

Fig. 17 Distribution of shear zone thickness in Y direction ($h=4$ mm, $P=100$ kPa)

2.4 剪切带形成机理分析

结构物的谷峰距 $h=4$ mm, 颗粒尺寸 ($D_{50}=0.8$ mm) 小于结构面谷峰距. 结构物表面齿与齿之间的凹槽相对于砂土颗粒尺寸大得多, 凹槽可以容纳一定量的沙土颗粒, 如图 18 所示. 凹槽内的砂土颗粒由于受法向应力 P 的作用被压实, 再加上凹槽边界 a、b、c 的约束, 使得在剪切过程中凹槽内砂土颗粒能够随着剪切板一起运动, 并且越靠近凹槽的底部的砂土颗粒越密实、越容易随剪切板一起运动. 凹槽内运动的砂土颗粒由于摩擦力会带动周围砂土颗粒的运动, 从而在剪切过程中形成具有一定厚度的剪切带.

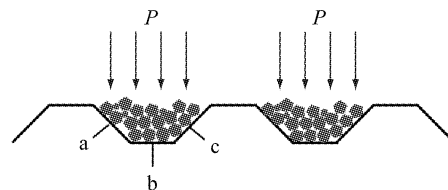


图 18 结构物与砂土颗粒的相互作用 ($h=4$ mm)
Fig. 18 Interaction between structure and sand ($h=4$ mm)

剪切带的形成原因是由于剪切板凹槽的约束作

用,使得凹槽内砂土颗粒位移与剪切板位移保持一致.在颗粒间摩擦力作用下,凹槽内的砂土颗粒带动附近砂土颗粒运动,从而在剪切过程中形成具有一定厚度的剪切带.

2.5 法向应力对剪切带厚度的影响

法向应力对剪切带厚度的影响较大.在本试验粗糙度下随着法向应力的增大剪切带厚度也在增大.图 19 为不同法向应力下剪切带厚度分布.可以看出,法向应力为 300 kPa 时剪切带厚度最大,明显高于其他剪切应力情况.对于谷峰距 $h=4$ mm 时,法向应力越大,凹槽处的砂土颗粒越密实,颗粒间摩擦力越大,越容易与剪切板一起运动,所以剪切带厚度就越大.

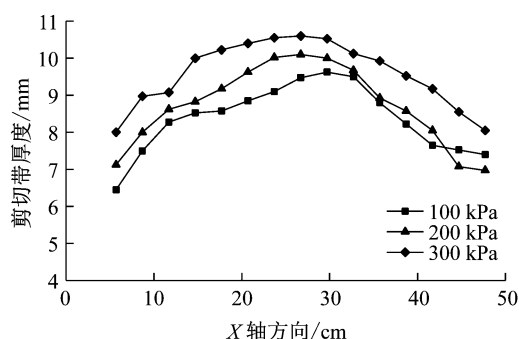


图 19 不同法向应力下剪切带厚度沿 X 轴方向分布

Fig. 19 Distribution of shear zone thickness under different normal stresses in X direction

3 剪切试验力学特性分析

本研究给出了不同法向应力下谷峰距 $h=4$ mm 时剪切试验结果.试验结果包括:剪应力与剪切位移的关系曲线;相对法向位移与剪切位移的关系曲线,约定试验中土体剪胀时法向位移为正,剪缩时法向位移为负.

结果表明,不同法向应力下的剪应力和剪切位移关系曲线具有相似规律(见图 20).开始剪切时,接触面的剪应力随着剪切位移的增大而增大,当剪切位移达到 8 mm 左右时均出现峰值,表现出明显的软化现象.软化后剪应力在较大的位移条件下趋于一个稳定值,即剪切破坏应力,并且法向应力越大剪切破坏应力越大.

相对法向位移与剪切位移的关系曲线在不同法向应力下也呈现出相似规律(见图 21).相对法向位移随着剪切位移的增大呈现出增大趋势,并且曲线

的斜率存在拐点,拐点位置位于峰值应力附近.刚开始时曲线斜率较大,说明此时剪胀的速率大,当剪切位移达到 8 mm 附近即峰值应力附近时曲线的斜率变小.出现这种现象的主要原因是:剪切带内颗粒达到抗剪强度后砂土颗粒发生翻转、滚动等运动,导致剪胀速率减小.

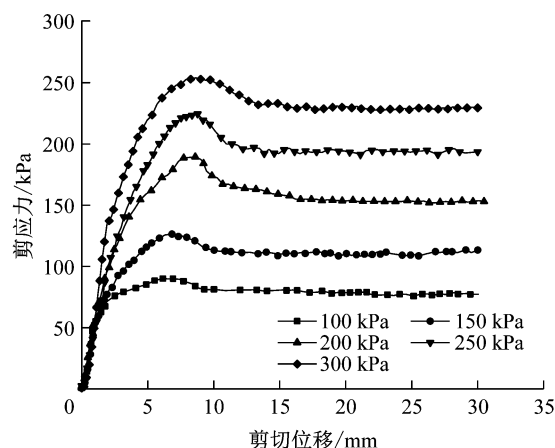


图 20 剪应力和剪切位移关系

Fig. 20 Relation between shear stress and shear displacement

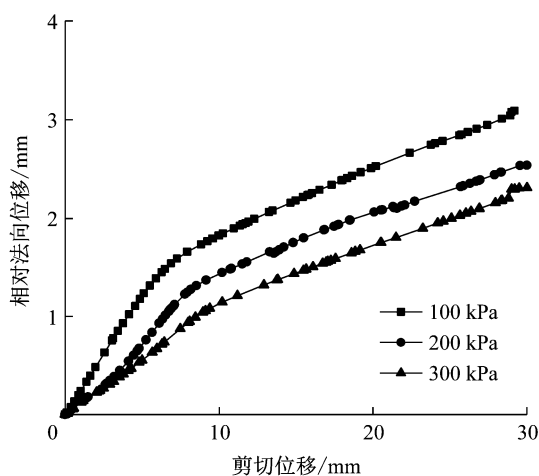


图 21 相对法向位移和剪切位移关系

Fig. 21 Relation between normal displacement and shear displacement

图 22 给出了抗剪强度与法向应力的拟合关系曲线,其中抗剪强度取不同法向应力下接触面的峰值剪应力.接触面的抗剪强度与法向应力具有较好的线性关系,即抗剪强度随着法向压力的增大呈现线性增大.接触面的抗剪强度采用摩尔-库仑准则的摩擦角 φ 来描述,如图 22 拟合曲线所示,本次试验砂土与剪切板接触面摩擦角 φ 为 40.4° .

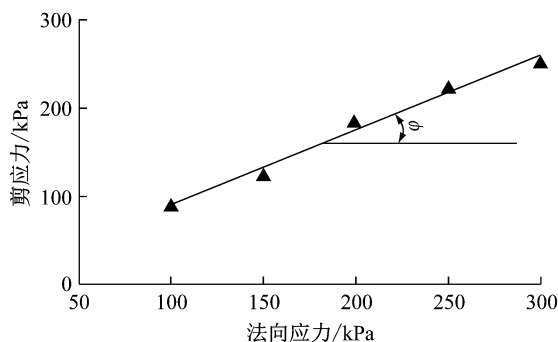


图22 剪应力和法向应力关系

Fig.22 Relation between shear stress and normal stress

4 结论

(1) 剪切盒内灌注彩色砂条, 试验后彩色砂条的变形可以反映剪切带厚度和空间分布. 试验中剪切带厚度为 6~11 mm, 约为砂土颗粒平均粒径($D_{50}=0.8$ mm)的 7~14 倍.

(2) 由于剪切盒的边界效应, 使得剪切带厚度在空间分布上呈现出不均匀性. 剪切带厚度在剪切方向上(X 轴方向)呈现中间大两端小的趋势, 在垂直剪切方向上(Y 轴方向)离散性较小、分布近似均匀.

(3) 由于剪切板凹槽的约束作用, 因此使得凹槽内砂土颗粒位移与剪切板位移保持一致. 在颗粒间摩擦力作用下, 凹槽内的砂土颗粒带动附近砂土颗粒运动, 从而在剪切过程中形成具有一定厚度的剪切带.

(4) 土体表现出剪胀特性是由剪切带的变形导致的. 剪切初始时剪胀速率较大, 达到抗剪强度后剪胀速率减小. 原因可能为: 达到抗剪强度后剪切带内颗粒发生翻转、滚动等运动, 导致剪胀速率减小.

(5) 在剪切过程中剪切带的剪应力呈现出明显的软化现象, 并且接触面的抗剪强度与法向应力具有良好的线性关系, 可以用摩尔-库仑准则的摩擦角 φ 来描述.

参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*, 1971, 97(12): 1659.
- [3] MARTINEZ A, FROST J D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces [J]. *Géotechnique Letters*, 2017, 7(1): 104.
- [4] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14.
YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14.
- [5] 胡黎明, 濮家骢. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 432.
HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 432.
- [6] 胡黎明, 马杰, 张丙印, 等. 粗粒料与结构物接触面力学特性缩尺效应 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(3): 327.
HU Liming, MA Jie, ZHANG Bingyin, *et al.* Scaling effect on the mechanical behavior of the interface between coarse-grained materials and a structure [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(3): 327.
- [7] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研究应用 [J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(2): 149.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 149.
- [8] 张嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8): 903.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, LIANG Dongfang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 903.
- [9] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 21.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 21.
- [10] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D, *et al.* A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis [C]//The Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam: AA Balkema Publishers, 2001: 539-542.
- [11] 庄丽, 宫全美. 减围压平面应变压缩试验条件下丰浦砂中剪切带特性研究 [J]. *岩土力学*, 2016(增 1): 201.
ZHUANG Li, GONG Quanmei. Shear band characteristics of Toyoura sand in plane strain compression with decreasing confining pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016 (S1): 201.
- [12] 李建华, 祝方才, 廖新贵. 土与结构物的接触特性研究 [J]. *湖南工业大学学报*, 2009, 23(3): 1.
LI Jianhua, ZHU Fangcai, LIAO Xingui. Study on contact characteristics between soil and structure [J]. *Chinese Journal of Hunan University of Technology*, 2009, 23(3): 1.
- [13] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及应用 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(6): 62.
ZHANG Dongji, LU Tinghao. Establishment and application of a interface model between soil and structure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 62.