

# 石英砂剪切带内部结构演化特征的环剪试验研究

高欣, 李延, 黄之辉, 周力, 赵建军

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

**[摘要]** 滑坡的宏观力学特性往往受滑带内部微观结构的影响, 因此深入研究滑带内部微观结构的演变规律对于滑坡研究具有重要意义。通过石英砂环剪试验, 模拟了剪切作用下颗粒状滑带的形成演化过程, 利用 CT 扫描成像系统及图像处理技术, 定量分析剪切带内部结构演变特征。研究结果表明: 随着剪切位移增大, 颗粒破碎导致剪切带内细颗粒逐渐增多, 最终形成上下层细颗粒较少, 核心层细颗粒富集的 3 层剪切带结构; 剪切位移达到 25 m 时, 细小颗粒在核心层两侧边界聚集形成细颗粒带, 越靠近核心层边界细颗粒占比和颗粒磨圆度越大; 剪切位移增大至 100 m 时, 细颗粒带内形成 2 层连续发育细颗粒聚集的剪切滑动面。以上发现对于深入理解滑带的形成演化机制及内部结构的演变规律具有十分重要的意义。

**[关键词]** 滑坡; 滑带; 环剪试验; 石英砂; CT 扫描

**[分类号]** P694

**[文献标志码]** A

## Investigating the evolution of shear zones through ring shear tests on quartz sand

GAO Xin, LI Yan, HUANG Zhihui, ZHOU Li, ZHAO Jianjun

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** The macroscopic mechanical properties of landslides are often influenced by the microstructure of the shear zone. Therefore, it is important to study the microstructural evolution of the shear zone to better understand the nature and occurrence of landslides. In this study, we simulated the formation and evolution of shear zones by using the ring shear test on coarse quartz sand. We used X-ray computed tomography scanning and image analysis to quantitatively analyze the internal structural characteristics of the shear zone. The results showed that with increasing shear displacement, particle fragmentation led to a gradual increase in the number of fine particles within the shear zone. A three-layer structure was observed after shearing: upper and lower layers, and a core layer. The upper and lower layers had fewer fine particles than the core layer, which had a high concentration of them. After a shear displacement of 25 m, the accumulation of fine particles led to the formation of fine particle layers along the boundaries of the core layer. Furthermore, there was an

**[收稿日期]** 2023-09-25。

**[第一作者]** 高欣(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 滑坡灾害形成机理与防治, E-mail: 3143387409@qq.com。

**[引用格式]** 高欣, 李延, 黄之辉, 等, 2024. 石英砂剪切带内部结构演化特征的环剪试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 316-327.

Gao X, Li Y, Huang Z H, et al. . 2024. Investigating the evolution of shear zones through ring shear tests on quartz sand[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(2): 316-327.

increasing ratio of fine particles in the core layer and a corresponding enhancement in particle roundness when approaching the boundary. When the shear displacement was 100 m, shear surfaces were observed within the fine particle layers, indicating that the shear behavior of the particles of quartz sand was primarily concentrated on these surfaces. These findings had significant implications for our understanding of the formation and internal structural evolution of shear zones.

**Key words:** landslide; shear zone; ring shear; quartz sand; CT scanning

滑坡一直以来都威胁着人民生命财产安全及国家重要基础设施,因此开展滑坡的孕育演化机理研究及造成的灾害评估等具有十分重要的意义。滑带是指在滑体与滑床之间存在相对运动而形成的具有一定厚度的剪应变带,由破碎的岩土体颗粒组成(许强,2012)。滑带作为滑坡的重要组成部分,其结构特性的改变对于滑坡的孕育演化有着控制性作用(李守定等,2007)。滑带是在内外动力作用下,经过长期且复杂的演化而形成的。大量研究表明,物质基础、动力条件以及水环境在滑带形成演化过程中起到了重要作用(许强,2012;张琪等,2023)。李守定等(2007)基于对三峡大型基岩顺层滑坡滑带的研究分析提出,滑带的形成演化过程分为 3 阶段:原生软岩、层间剪切带和滑带。原生软岩在外力作用下发生剪应力集中,岩体发生破裂形成软弱带。软弱带在滑动外力作用下受到层间剪切作用,内部颗粒在剪切作用下破碎磨损,粒度变小,滑带也逐渐形成。滑带的形成和演化是一个复杂的过程,受到多种因素和机理的综合作用。

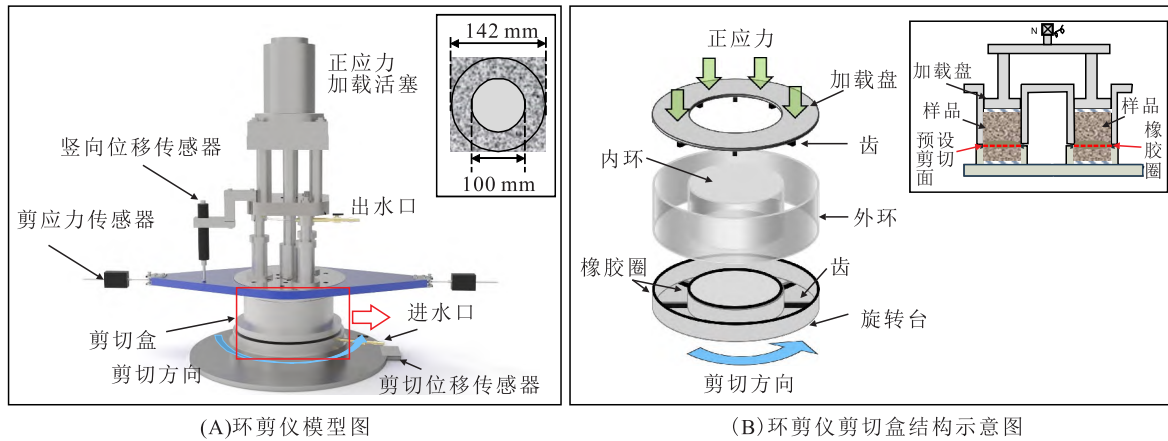
Skempton and Petley(1967)提出滑带的结构特征受物理化学环境影响大,并随着演化阶段不同展现差异。了解滑带结构特征演变规律对于揭示滑带形成演化过程及滑坡稳定性评价具有重要意义(周静静等,2020)。对于滑带结构的研究已有众多成果,包括对现场滑带的勘察分析、试验研究以及数值模拟等。Furuki et al.(2019)通过对滑坡滑带土的结构特征分析,提出滑带的演化过程。但现场地质环境复杂,取样难度大等都对研究结果造成了影响。有许多学者通过三轴试验、直剪试验等模拟滑带的形成演化过程,分析了剪切带厚度、倾角、孔隙比等结构特征的演变规律(Han and Vardoulakis,1991;Finno et al.,1997;蔡正银和李相菘,2003;毕忠伟等,2011;左永振等,2015;王子寒等,2022)。但这些研究结果不适合用来描述长距离剪切下剪切带结构特征的演化。因此,能够实现长距离剪切的环剪试验已被

广泛用于研究滑坡滑带形成演化等相关研究(Mandl et al.,1977;Wang and Sassa,2002;Wafid et al.,2004;Torabi et al.,2007;Jiang et al.,2016;Hu et al.,2017;Sho et al.,2018;Vafaei et al.,2019),获得了在不同条件下(如不同材料、应力条件、剪切速度和位移)形成的剪切带结构。如 Wafid et al.(2004)通过不同剪切距离的不排水环剪试验,研究分析了剪切带结构随剪切位移的演变,并通过对剪切带分层级配分析,提出剪切带的层状结构。然而,大多研究聚焦于宏观分析剪切带外部结构的变化,对于剪切带内部微观结构的演变特征尚不清楚,而微观结构的变化一般会引起宏观参数的改变。CT 扫描成像系统能够实现微米级别的识别精度,是研究颗粒材料微观结构特征的有效手段。

因此,为模拟滑带内部岩石颗粒在剪切作用下发展演化的过程,本文采用石英粗砂,开展一系列不同剪切位移的环剪试验,观察分析不同剪切阶段的剪切带结构特征。结合 CT 扫描成像系统及图像处理技术,定量分析剪切带内部微观结构特征演变规律,总结分析剪切位移对剪切带内颗粒粒径分布及颗粒特征的影响,从而初步揭示剪切带内微观结构演变机制。

## 1 试验方案

试验仪器采用 ICL-2 大型环剪仪(Sassa et al.,2014),在地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)完成。其结构组成如图 1 所示,由伺服电机系统、液压伺服系统、数据采集记录系统组成。由外环和内环组成的剪切盒,内径 100 mm,外径 142 mm,有效高度 84 mm,侧面同时安装 2 个扭矩传感器(图 1)。环剪仪相比于常规直剪仪以及三轴仪,具有剪切面稳定以及剪切位移更长的优势(Wafid et al.,2004)。如图 1-B 所示,样品放于剪切盒后,通过加载盘施加法向应力,伺服系统通过旋转底盘带动下剪切盒沿预定剪切面剪切。



(A)环剪仪模型图

(B)环剪仪剪切盒结构示意图

图 1 大型环剪试验仪 (ICL-2)

Fig. 1 Schematic diagram of the ring-shear (ICL-2)

试验采用饱和排水剪切试验的方法,研究石英砂粗砂颗粒在不同剪切位移下的剪切带结构特征的演化规律。石英砂是自然界中主要造岩矿物之一,主要矿物为二氧化硅(李勇等,2023),颗粒形状不规则,多呈菱形、球状,纯白色,坚硬耐磨,莫氏硬度为 6~7,密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>。为更好地观测剪切试验过程中剪切带内部颗粒尺寸、形状等演变特征,选用粒径均一(0.8~1 mm)的石英砂颗粒。首先将相同质量的石英砂平均分层倒入剪切盒中,将样品均匀压实到约 45 mm 的高度,从而保证样品初始孔隙比基本一致,初始孔隙比  $e$  约为 0.89(表 1)。采用 CO<sub>2</sub> 驱替饱和法和法对试样进行饱和处理,从试样底部进水口缓慢通入二氧化碳气体,并从顶部排水口排出,持续约 1 h。将水管接入进水口,以较低的水头差缓慢进行饱和,饱和时间约为 12 h。随后关闭排水管道,施加正应力,若孔隙压力增量达到正应力增量的 95% 以上时,即可视为饱和完成(Sassa et al., 2004)。饱和完成后,将法向正应力逐级调整,每增加 200 kPa

且待竖向位移稳定后再次调整法向应力,直至达到 1 000 kPa。待竖向位移完全稳定后将剪切速度设定为 5 mm/s,剪切到目标位移后停止试验。为了比较不同剪切阶段剪切带内部结构的差异,进行了 5 组不同剪切位移的饱和排水剪切实验(表 1)。

表 1 试验方案

Table 1 Detail information on the ring shear tests

序号	正应力/ kPa	剪切速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	剪切 位移/m	初始 孔隙比 $e$
1			5	0.895
2			15	0.893
3	1000	5	25	0.892
4			65	0.890
5			100	0.893

试验停止后,取出剪切盒中的剪切带样品,利用 CT 扫描、级配分析等获取剪切带内部结构特征,如图 2-A。达到预定剪切位移后,抬起加载盘,移开外环,得到完整的剪切样品,从剖面上可

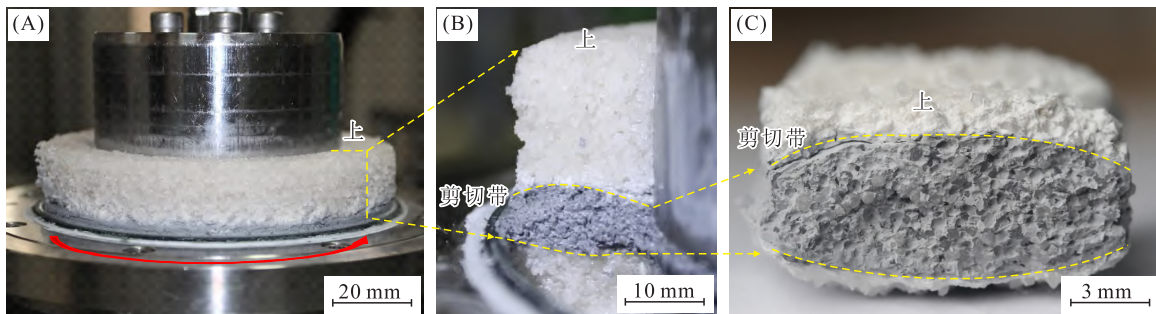


图 2 剪切带(100 m)样品示意图

Fig. 2 The sample obtained after the 100 m of shearing

(A)完整剪切盒内样品;(B)剪切盒内样品剖面图;(C)取出后剪切带样品示意图

以清晰地分辨剪切带的位置与范围(图 2-B)。取出样品后,剪切带上下部分的松散颗粒自由散落,最终得到如图 2-C 所示的剪切带样品。采用天津三英公司生产的 NanoVoxel-2000 系列高性能 CT 系统对剪切带样品进行无损检测,获得剪切带的内部结构图像(图 3-B)。

为进一步分析剪切带内部微观结构特征,采用 Liu et al. (2011)自主研发的 PCAS 软件对图像进行分析处理。PCAS 软件是用于图像中颗粒、孔隙识别并且对其几何特征进行定量分析与

统计的专业软件。从 CT 扫描获得的灰度图上可以看出(图 3-B),根据灰度值的差别可以将图像分为 2 部分:深灰色部分是细小颗粒组成的集合体,而浅灰色的为残留的大颗粒。设置一定的灰度阈值将图像二值化,提取目标粒径  $>30 \mu\text{m}$  的颗粒(图 3-F),修复并强化图像(图 3-E)。对目标颗粒进行分析(图 3-D),识别并获取每个颗粒的几何参数(面积、周长、形状系数、长度、宽度和主轴方向),从而得到数字图像内颗粒特征的统计参数(彭双麒等,2020)。

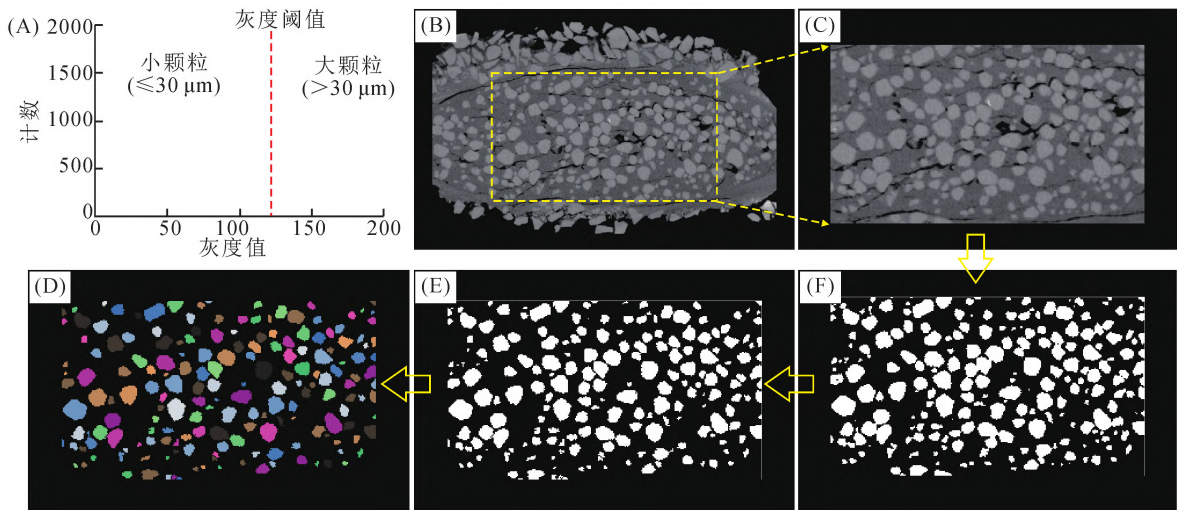


图 3 CT 图像处理过程

Fig. 3 Digital image processing

(A)CT 图像灰度分布图;(B)剪切带样品 CT 扫描获取的灰度图;(C)框选范围;  
(D)分析后颗粒标记图;(E)强化图像;(F)提取颗粒

## 2 试验结果

饱和排水剪切实验过程中,剪切应力与竖向位

移随剪切位移的变化曲线如图 4 所示。图 4-A 为 5 组不同剪切位移(5 m, 15 m, 25 m, 65 m, 100 m)的试验结果,由此可以看出 5 组试验结果重复性良

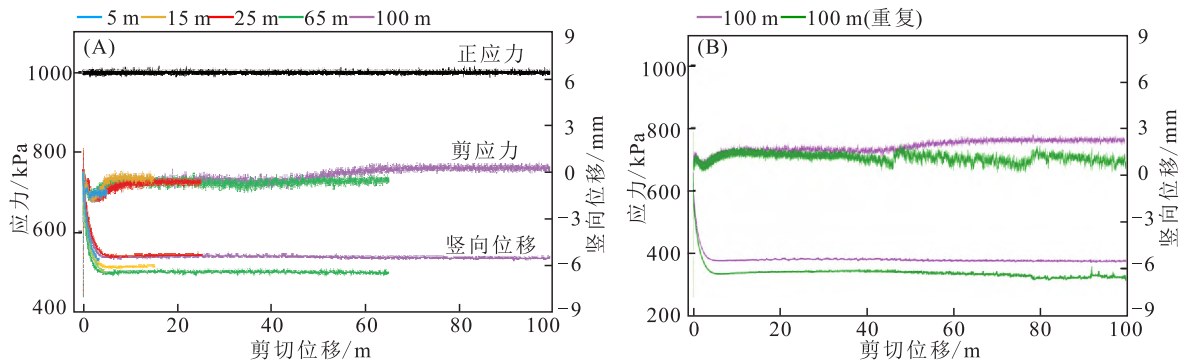


图 4 不同剪切位移石英砂试样的剪应力和竖向位移随剪切位移变化曲线

Fig. 4 Relationships between the shear resistance, and the height and shear displacement of quartz sand under different shear displacements

(A)不同剪切位移的剪切曲线;(B)剪切位移为 100 m 的重复试验

好,剪应力曲线趋势基本一致。并且针对长距离剪切试验,即剪切位移为 100 m 的试验,进行了重复试验,结果如图 4-B 所示,试验重复性良好。当剪切位移超过 5 m 后,剪应力略微上升后达到稳定状态不再改变,残余内摩擦角约为 36.8°。剪切位移继续增大,剪应力和样品体积不再改变。

### 2.1 剪切带试验结果分析

剪切试验结束后,得到不同剪切位移的剪切带样品。对比剪切带结构差异,分析其演变过程。如图 5,将样品从剪切盒中取出,自然干燥后得到沿半径方向垂直于预定剪切面的剪切带

剖面。剪切带内为变形集中区域,初始均一的石英砂颗粒在 5 m 的剪切位移中破碎,产生大量细小颗粒,形成厚度约 8.5 mm 的密实剪切带(图 5-B,C)。随着剪切位移增大内部颗粒破碎,剪切带厚度减小并稳定至约 8 mm。并且当位移达到 25 m 后,破碎产生的细小颗粒积聚于剪切带上下两侧,形成清晰的剪切带边界(图 5-D)。剪切距离达到 100 m 后,剪切带上下边界形成十分明显的剪切面,剪切面不是十分平直的面,呈不规则的凸面覆盖于剪切带外侧(图 5-F)。

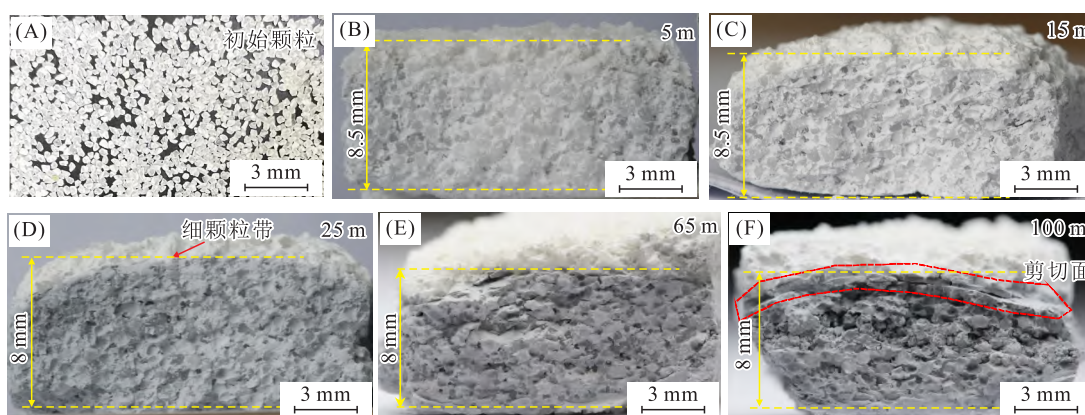


图 5 不同剪切位移(5 m,15m,25 m,65 m,100 m)的剪切带样品剖面图(沿半径方向,垂直于预定剪切面)

Fig. 5 Profiles of the shear zones of samples with different shear displacements

### 2.2 剪切带微观结构

为进一步分析剪切带的内部结构,通过 CT 扫描样品获取剪切带内部微观结构图像,图 6 中浅灰色为大颗粒,深灰色为细小颗粒( $\leq 30 \mu\text{m}$ )

的集合体。图 6-A 展示的是初始颗粒集合体的剖面图,图上较小的颗粒截面为棱角状颗粒的边角。当剪切位移达到 5 m 后(图 6-B),颗粒破碎产生的细小颗粒填充于孔隙之中,大颗粒的棱角

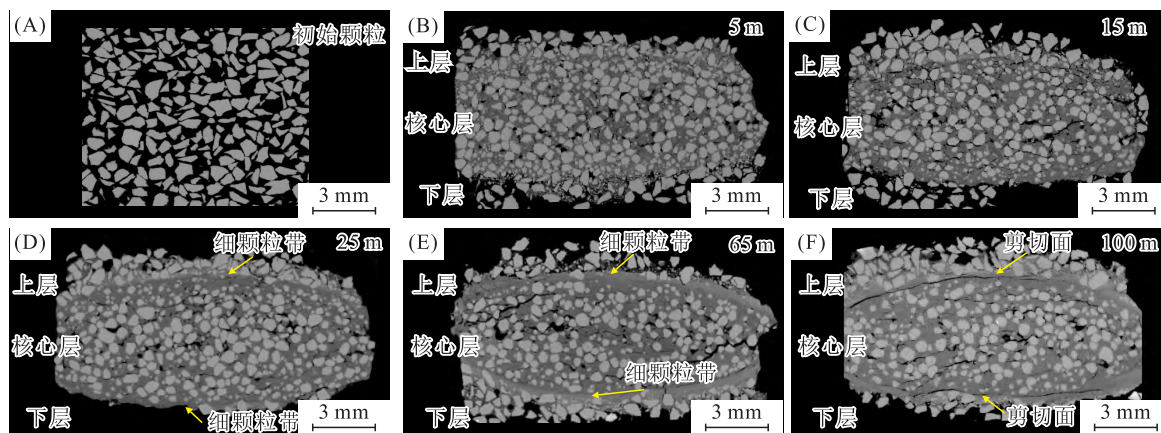


图 6 不同剪切位移(5 m,15m,25 m,65 m,100 m)的剪切带 CT 扫描图像(沿半径方向,垂直于预定剪切面)

Fig. 6 Profiles of samples with different shear displacements

被磨损,形状趋近于圆形。根据细颗粒的含量可将剪切带分为 3 层:上下 2 层细颗粒含量少,大颗粒棱角分明;中间核心层细颗粒填充于孔隙之中,大颗粒形状明显较圆。剪切位移为 5 m 时(图 6-B),剪切带剖面呈矩形,3 层之间边界模糊。当剪切位移达到 25 m 时(图 6-D),深灰色面积占比增多,内部颗粒破碎产生的细小颗粒增多。并且可以在核心层与上下 2 层的边界处看到深灰色的带状结构,即细小颗粒集聚而成的细颗粒带。剪切带剖面呈椭圆形,边界清晰,且核心层内颗粒分布不均匀,中心位置的大颗粒明显比两侧要多且颗粒尺寸较大。随着剪切位移的进一步增长,细颗粒带变厚(图 6-E),内部颗粒分布不均匀性增大。在剪切位移达到 100 m 时,细颗粒带的厚度有所增大,并且在细颗粒带内即核心层边界处发育出剪切面(图 6-F)。

### 2.3 100 m 剪切带内部微观结构

如图 6 所示,剪切位移对于剪切带结构的形成演化起关键作用,当剪切位移达到 100 m 时,剪切带结构如图 7 所示。图 7-A 中剪切带样品通

过 CT 扫描获取内部结构图像并构建三维模型。如图 7-B 所示,以剪切面为界,剪切带可被分为 3 层:上层和下层为参与剪切较少的棱角状颗粒组成,核心层为剪切变形集中区域。剖面图 I-I 上(图 7-C),核心层区域深灰色面积占比明显较多,细颗粒富集于此,大颗粒形状趋近于圆形。与图 6-D,E 所示的一致,核心层两侧形成了细颗粒带,不同的是在细颗粒带内发育了剪切面,在剖面 II-II(图 7-D)上可以看到剪切面呈凸面覆盖于核心层外侧。此外,从剖面 I-I 与 II-II 可以看出,在垂直于剪切面的纵向分布上,颗粒粒径组成存在差异,远离剪切面的中心位置颗粒粒径明显较大。

对同样剪切位移为 100 m 的试验样品进行了观测,结果如图 8 所示。图 8-A 中为剪切位移为 100 m 的重复试验得到的剪切带样品剖面图,从该剖面图中可以清晰看出,同样在剪切带边界处形成了剪切面。俯视角度下观察暴露的剪切面,表面光滑,基本没有大颗粒的存在。并且,从剪切带的 CT 图像中也可以看出,剪切面呈凸状包裹在剪切带核心部分外。

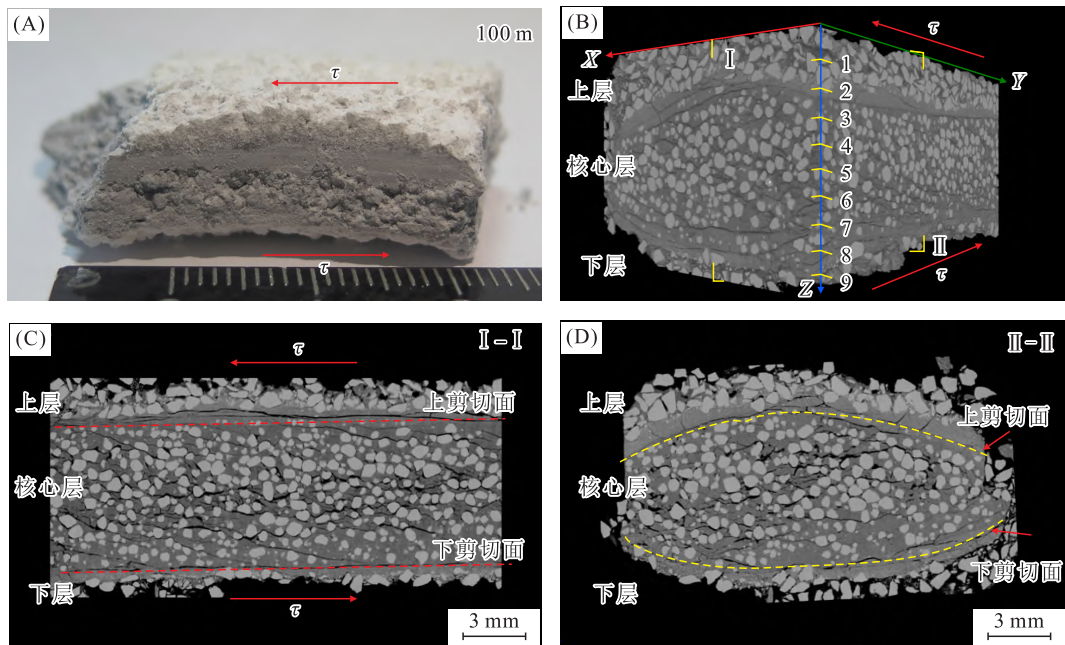


图 7 剪切位移达到 100 m 后的剪切带样品 CT 扫描图像

Fig. 7 CT scanning images of the shear zone of the sample with a shear displacement of 100 m

(A) 剪切位移达到 100 m 后的剪切带样品;

(B) 剪切位移达到 100 m 后的剪切带样品 CT 扫描获取的三维模型图; (C) I-I 剖面图; (D) II-II 剖面图

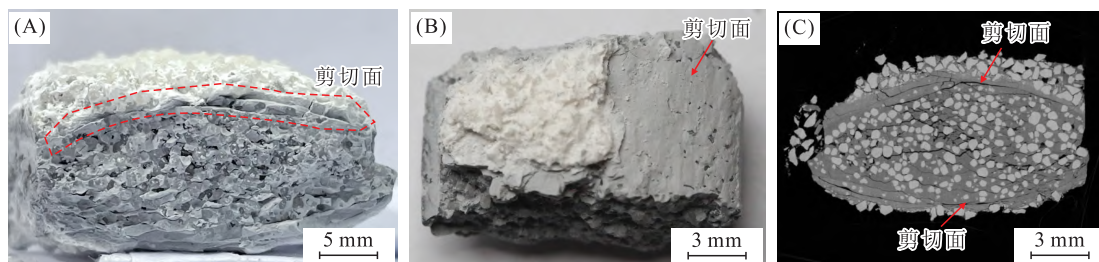


图 8 剪切位移为 100 m 的重复试验样品

Fig. 8 The test sample subjected to repeated shear displacements of 100 m

(A) 剪切位移为 100 m 的重复试验样品剖面图; (B) A 图样品俯视图; (C) 剪切带 CT 扫描图像

为进一步观测剪切带纵向结构的差异,如图 7-B 所示,在剪切带不同高度处取平行于剪切方向的切片图(图 9)。切面 1(图 9-A)位于上层,切面 9(图 9-I)位于下层,棱角状的大颗粒占据了切片图的主要部分。切面 2~8 位于核心层内,细颗粒占比较多。切面 2(图 9-B)及切面 8(图 9-H)

贯穿细颗粒带,组成以  $\leq 30 \mu\text{m}$  的小颗粒为主。相比于切面 5(图 9-E),切面 3(图 9-C)与切面 7(图 9-G)靠近剪切面,其中的颗粒尺寸与大颗粒的面积占比明显较小。总的来说,剪切带内部颗粒组成纵向分布差异较大,距剪切面越近大颗粒面积占比越小。

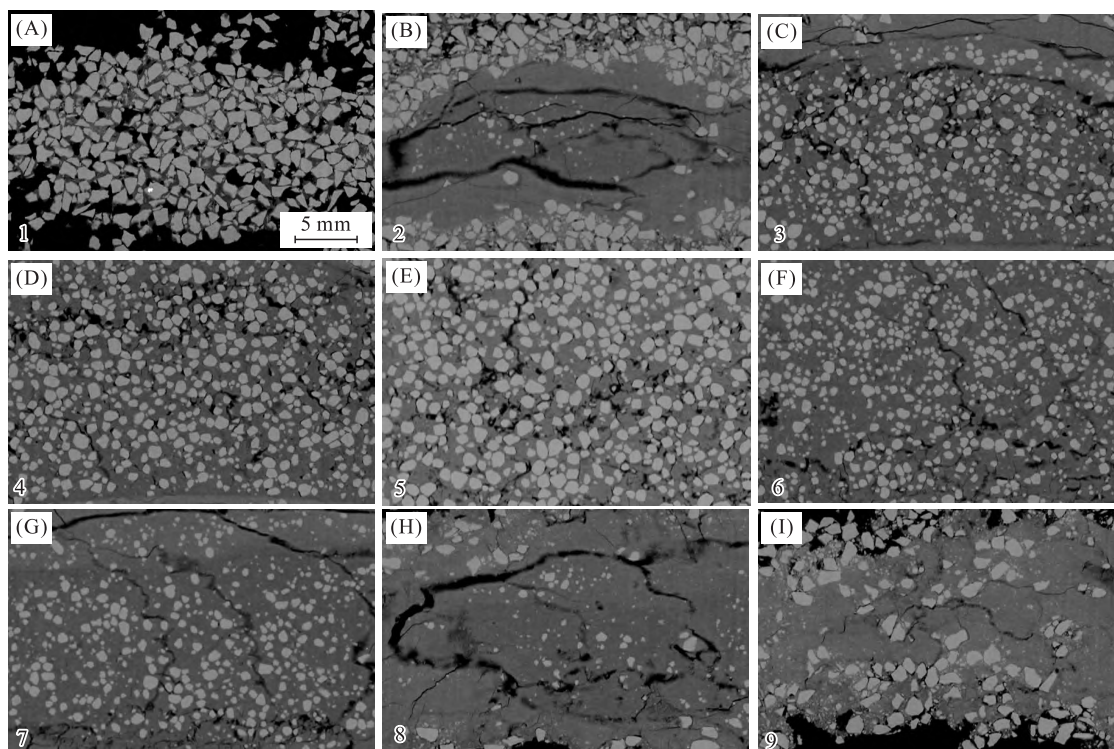


图 9 不同高度(图 7-B)平行于剪切面的剪切带切片图

Fig. 9 Slices at different heights within the shear zone

(A) 图 7-B 中所取切面 1; (B) 切面 2; (C) 切面 3; (D) 切面 4; (E) 切面 5; (F) 切面 6; (G) 切面 7; (H) 切面 8; (I) 切面 9

### 3 分析讨论

#### 3.1 剪切带颗粒级配

颗粒破碎在剪切带结构演化过程中起到关键

作用(汪发武, 2019), 但由上文的切面可以看出剪切带内部上、下层及核心层的颗粒破碎程度不相同。如图 10 所示, 在剪切位移达到 5 m 时, 上层、下层及核心层的颗粒级配曲线相似, 剪切带内部

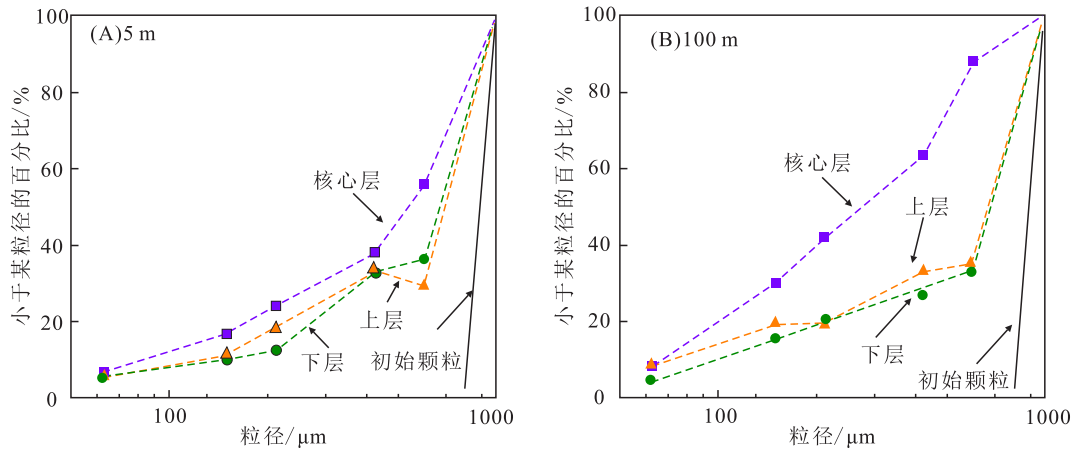


图 10 剪切带内的分层级配分析结果

Fig. 10 Results of analysis of gradation of shear zones of different heights  
(A)剪切位移为 5 m 的剪切带样品;(B)剪切位移为 100 m 的剪切带样品

整体颗粒破碎程度相近。然而当剪切位移达到 100 m 后,3 层之间颗粒级配曲线差异明显,核心层级配曲线整体上移,颗粒破碎程度远大于上下 2 层。剪切带形成后,剪切应变集中于剪切带核心层内,变形破坏导致的颗粒运动、破碎等也集中于核心层内。

取 5 组不同剪切位移下的剪切带样品的核心层,对其进行筛分,得到表 2 的颗粒尺寸分布结果。初始粒径均一的石英粗砂在剪切变

形过程中破碎,粒径减小,随着剪切位移增大,<0.25 mm 的石英砂颗粒占比增大。在 100 m 的剪切带内粒径 >0.5 mm 的石英粗砂占比降为 24.87%,<0.25 mm 的石英砂颗粒占比提高至 46.9%。

综上所述,剪切位移的增加,会促进剪切带核心层的大颗粒持续破碎,细颗粒占比逐渐增多。而剪切带上下 2 部区域的破碎程度接近,且随剪切位移的增加破碎程度变化不大。

表 2 剪切带核心层内部颗粒尺寸分布

Table 2 The particle size distribution within the core of the shear zones

剪切位移/m	粒径范围内的质量百分比/%		
	>0.5 mm	[0.25,0.5] mm	<0.25 mm
0	100	0	0
5	53.90	18.45	27.65
15	44.09	18.93	36.98
25	30.35	24.55	45.10
65	29.21	25.29	45.50
100	24.87	28.23	46.90

### 3.2 剪切带内颗粒特征

随着剪切位移的改变,内部的颗粒组成发生变化,且颗粒特征也在不断的剪切磨损中演变。从图 9 中不同位置的剪切带切面图中可以看出,距剪切面的距离不同颗粒形状与尺寸不同。因此选用大颗粒面积占比、颗粒平均形状系数,及概率熵作为统计参数描述切面图中颗粒特征。

大颗粒面积占比( $N$ ):描述颗粒组成的特征参数,图像上粒径 >30  $\mu\text{m}$  的颗粒总面积与图像

总面积之比, $N$  越大表明大颗粒占比越多,颗粒破碎程度越低。

$$N = A_p / A_t \quad (1)$$

式中: $A_p$  为粒径 >30  $\mu\text{m}$  颗粒的面积总和; $A_t$  为图像总面积。

颗粒平均形状系数( $F$ ):描述颗粒形状的特征参数,图像上粒径 >30  $\mu\text{m}$  颗粒的形状系数平均值。 $F$  越大,图像中颗粒整体形状越接近圆形,颗粒的磨损程度越大。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (4\pi \frac{S}{C^2})_i}{n} \quad (2)$$

式中:  $S$  为颗粒面积;  $C$  为颗粒周长;  $n$  为颗粒数量。  $F$  处于  $(0, 1)$  范围内, 数值越接近于 1, 颗粒形状越接近圆形。

概率熵( $H$ )描述颗粒排列方向的特征参数。颗粒方向指的是颗粒长轴与水平方向的夹角,  $H$  代表图像中  $>30 \mu\text{m}$  颗粒的分布状况, 数值越大排列越随机, 越不具备定向性。

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \log_n(P_i) \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为各角度范围内颗粒数量百分比。  $H$  处于  $(0, 1]$  范围内, 当  $H=1$  时, 颗粒随意排列;  $H=0$  时, 颗粒在同一方向上排列。

对核心层内的 5 张切面图(图 9-C~G), 即切

面 3~7 进行图像处理及分析, 获取剖面颗粒特征的统计参数, 结果如图 11 所示。从上剪切面向下, 大颗粒( $>30 \mu\text{m}$ )的面积占比先增大至 28% 后减小到 19%, 表明距剪切面越远细颗粒占比越少。与之相反, 颗粒平均形状系数先减小后增大, 表明越接近剪切面颗粒形状越接近圆形。描述颗粒定向性的特征参数概率熵( $H$ )稳定在 0.98 (图 11-D), 表明剪切带内未形成定向排列。

在 100 m 剪切带图像处理的基础上, 对其余剪切位移的剪切带均做同样的处理, 定量化分析剪切带内部颗粒特征演变规律。对 5 组不同剪切位移的剪切带核心层均进行了图像分析处理, 结果如图 12 所示。由图 12-A 可知, 核心层内大颗粒面积占比整体随剪切位移的增大而减小, 表明在剪切过程中颗粒破碎产生的细小颗粒增多。在剪切位移为 5 m 时, 边界和中心的大颗粒占比差

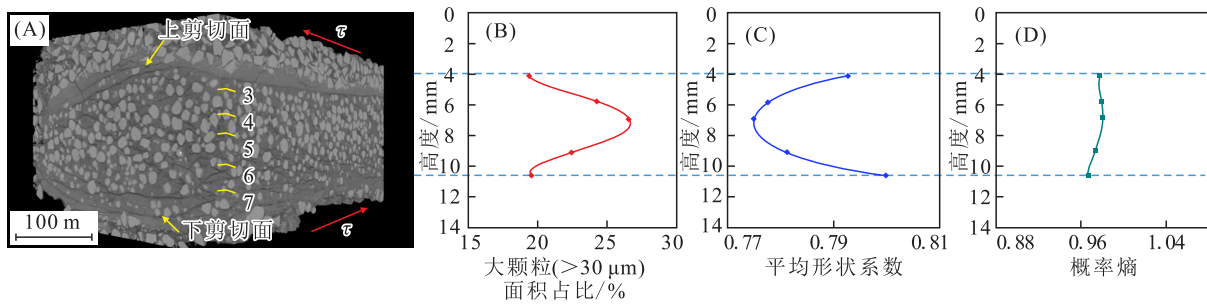


图 11 剪切带(100 m)内颗粒特征分布

Fig. 11 Distribution of particle characteristics in the shear zone (100 m)

(A) 剪切位移为 100 m 的剪切带样品 CT 扫描三维示意图; (B) 不同高度切面大颗粒( $>30 \mu\text{m}$ )面积占比; (C) 不同高度切面中颗粒平均形状系数; (D) 不同高度切面中颗粒方向分布概率熵

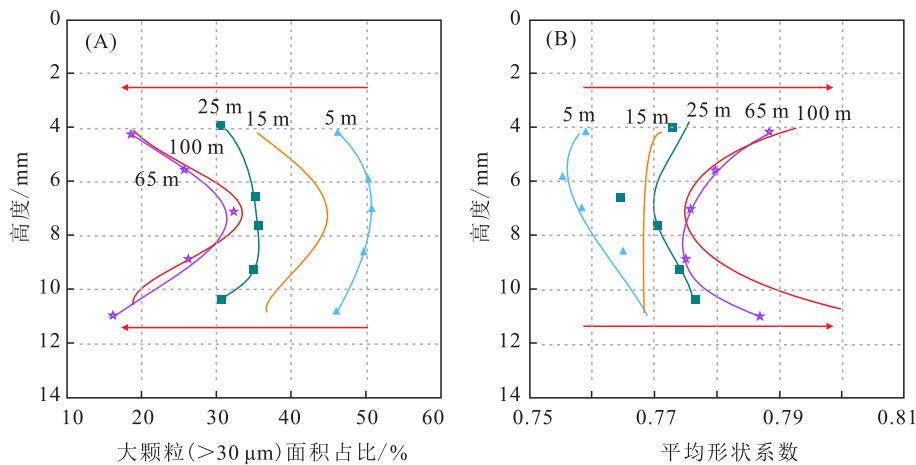


图 12 剪切带演化过程中内部颗粒特征的演变特征

Fig. 12 Changes in the internal grain characteristics of the samples during the evolution of the shear zone

(A) 剪切带样品内不同高度大颗粒( $>30 \mu\text{m}$ )面积占比分布随剪切位移变化关系; (B) 剪切带样品内不同高度颗粒平均形状系数分布随剪切位移变化关系

值为 5%。25 m 之后差异逐渐增大,当剪切位移增长到 100 m 后,差值增大为 15%。颗粒破碎在剪切带纵向方向上是不均匀的,边界和中心位置的差异是随剪切位移增大而增大的。在图 12-B 中,剪切导致颗粒棱角被磨损,整体形状系数增大,颗粒形状逐渐趋近圆形。剪切带内颗粒形状的演变也是不均匀的,剪切位移为 5 m 时,整体颗粒形状系数约为 0.76。25 m 后出现明显差异,当剪切位移为 100 m 时,边界处颗粒平均形状系数为 0.8,中心颗粒为 0.775,边界处大颗粒

的磨圆度大于中心大颗粒。

为进一步验证图像处理结果,将剪切带内的大颗粒取出后,采用电子扫描显微镜(SEM)获取如图 13 所示的颗粒图像。初始石英砂颗粒棱角分明,随着剪切破碎,剪切位移为 5 m 时(图 13-B)颗粒边角已经被磨损。在剪切位移为 15 m 时(图 13-C),已经没有明显的棱角。随着剪切位移进一步增大,颗粒外表被打磨的更加光滑,形状更趋近于圆球形(图 13-D~F)。

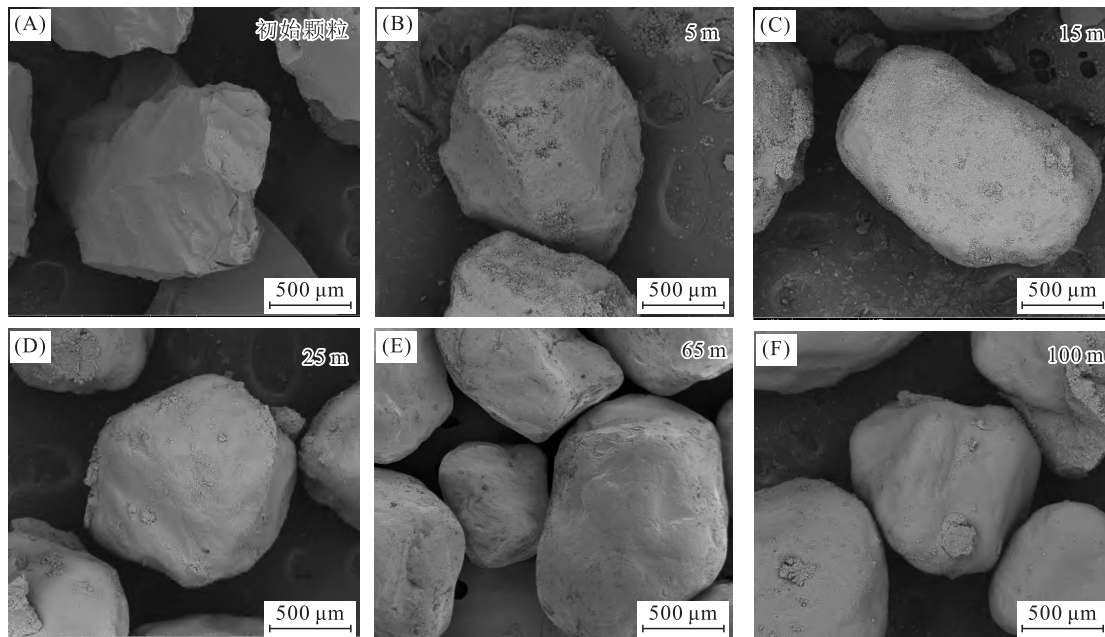


图 13 不同剪切位移(5 m,15 m,25 m,65 m,100 m)的剪切带内大颗粒 SEM 图像

Fig. 13 SEM images of large particles within the shear zones

结合上文分析结果可以得出:在剪切开始时,剪切沿着预定的平面进行,变形破坏导致的颗粒破碎产生了大量的细小颗粒,填充于孔隙中。在剪切位移为 5 m 时形成了一个厚度约为 8.5 mm 的剪切带,根据细颗粒含量可分为 3 层,上下 2 层大颗粒棱角分明细颗粒较少,核心层大颗粒较圆,细颗粒富集。随着剪切位移增大,核心层内颗粒破碎产生的细小颗粒增多,两侧形成明显的细颗粒带(图 6-D)。并且由于剪切带内的应变局部化,剪切带以对称、不均匀的形式演化,边界处的细颗粒占比与颗粒的形状系数逐渐大于中心位置的颗粒。最终当剪切位移足够大时,剪切带两侧的细颗粒带内发育出剪切面。

### 3.3 研究局限性及展望

本文针对相同试验条件下的石英粗砂在不同剪切位移阶段的剪切带结构进行了研究分析,并结合 CT 扫描与图像处理技术,量化分析了剪切带内部微观结构的演变过程,对于颗粒状滑带形成演化机制的研究具有一定的参考价值,但仍然存在一定的局限性。

(1)采用 CT 扫描系统分辨率有限,仅能对粒径  $>30 \mu\text{m}$  的颗粒进行提取分析,未考虑细小颗粒对剪切带形成演化过程的影响。

(2)在石英粗砂的环剪试验中,只在相同试验条件下分析了不同剪切位移的剪切带结构差异,未考虑其他应力条件,如正应力、剪切速度等对于剪切带结构形成演化的影响,有待更进一步的

研究。

(3)研究了石英粗砂环剪试验过程中剪切带内部结构的演变,石英砂性质稳定不易破碎,研究结论适用于与其性质相似的矿物材料,是否对于所有岩土材料具有普适性有待更深入的研究。

## 4 结论

本文观察分析了剪切带形成演化过程中内部微观结构的演变,通过不同剪切位移的石英粗砂环剪试验,模拟了不同剪切阶段剪切带的形成及演化过程。并利用 CT 扫描成像系统,直接观察到不同剪切阶段的剪切带内部结构。结合图像处理及粒径分析,定量分析了剪切带内颗粒特征演变规律。研究结果对于深入了解颗粒状滑带的形成演化过程及内部结构的演变机制具有重要意义,并为滑坡孕育发展的研究提供了参考。研究结果表明:

a. 随着剪切位移增大,颗粒破碎产生的细小颗粒增多,剪切带内形成 3 层结构样式:上下 2 层细颗粒含量较少,大颗粒呈棱角状;核心层为变形集中区,富含细颗粒且随剪切位移增大而增多,大颗粒形状趋近于圆形。

b. 当剪切位移达到 25 m 后,由于小颗粒( $\leq 30 \mu\text{m}$ )的积聚在剪切带核心层边界形成细颗粒带;在剪切位移达到 100 m 时,剪切带两侧细颗粒带内发育出剪切面。

c. 剪切带核心层内不同高度处颗粒特征差异随剪切位移增大而增大,大颗粒面积占比最大相差 15%,且剪应变集中导致边界处颗粒平均形状系数增大至 0.8,颗粒形状更趋近于圆形。

## [ 参 考 文 献 ]

- 毕忠伟,孙其诚,刘建国,等,2011. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 60(3): 372-381.
- Bi Z W, Sun Q C, Liu J G, *et al.*, 2011. Development of shear band in a granular material in biaxial tests[J]. *Acta Physica Sinica*, 60(3): 372-381. (in Chinese)
- 蔡正银,李相菘,2003. 无黏性土中剪切带的形成过程[J]. 岩土工程学报, 25(2): 129-134.
- Cai Z Y, Li X S, 2003. Formation of shear band in cohesionless soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 25(2): 129-134. (in Chinese)
- 李守定,李晓,吴疆,等,2007. 大型基岩顺层滑坡滑带形

成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 191(12): 2473-2480.

- Li S D, Li X, Wu J, *et al.*, 2007. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 191(12): 2473-2480. (in Chinese)
- 李勇,张宇翔,姜玉诗,等,2023. 应用磁测法快速检测石英砂中铁含量的研究[J/OL]. 矿物岩石, 1-8[2023-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=9hl5eXOdJcbHXRsexhzBGiRfBNP6zlc6hnWm8jUS0UwOfJN7a7Qm31FW5AIT13SrkkSbeNC0MdaQLQYFzU8yzWtejAz4cGpt1nUbU134GPFyKxjgnosOEx0JLDzfDhhIqsG5lmF8=&uniplatform=NZKPT&flag=copy>.
- Li Y, Zhang Y X, Jiang Y S, *et al.*, 2023. Study on rapid determination of iron content in quartz sand by magnetic measurement[J/OL]. *Mineralogy and Petrology*, 1-8[2023-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=9hl5eXOdJcbHXRsexhzBGiRfBNP6zlc6hnWm8jUS0UwOfJN7a7Qm31FW5AIT13SrkkSbeNC0MdaQLQYFzU8yzWtejAz4cGpt1nUbU134GPFyKxjgnosOEx0JLDzfDhhIqsG5lmF8=&uniplatform=NZKPT&flag=copy>. (in Chinese)
- 彭双麒,许强,郑光,等,2020. 白格滑坡一碎屑流堆积体颗粒识别与分析[J]. 水利水电技术, 51(2): 144-154.
- Peng S Q, Xu Q, Zheng G, *et al.*, 2020. Recognition and analysis of deposit body grain of Baige Landslide-Debris Flow[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51(2): 144-154. (in Chinese)
- 汪发武,2019. 地震诱发的高速远程滑坡过程中土结构破坏和土粒子破碎引起的两种不同的液化机理[J]. 工程地质学报, 27(1): 98-107.
- Wang F W, 2019. Liquefactions caused by structure collapse and grain crushing of soils in rapid and long runout landslides triggered by earthquakes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(1): 98-107. (in Chinese)
- 王子寒,张若钰,景晓昆,等,2022. 砂土可视化直剪试验与剪切带形成机制研究[J]. 工程力学, 39(7): 217-226.
- Wang Z H, Zhang R Y, Jing X K, *et al.*, 2022. A study on forming mechanism of shear band and visual shearing tests of sand[J]. *Engineering Mechanics*, 39(7): 217-226. (in Chinese)
- 许强,2012. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 20(2): 145-151.

- Xu Q, 2012. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. *Journal of Engineering Geology*, 20(2): 145–151. (in Chinese)
- 张琪, 巨能攀, 张成强, 等, 2023. 库水位变化时陡倾软弱顺层岩质滑坡变形机制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 50(2): 206–217.
- Zhang Q, Ju N P, Zhang C Q, *et al.*, 2023. Landslide deformation mechanism of steep weak bedding rock under the variation of reservoir water levels[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(2): 206–217. (in Chinese)
- 周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 等, 2020. 滑带土蠕变过程及微观结构演化分析[J]. *水文地质工程地质*, 47(3): 115–121.
- Zhou J J, Zhao F S, Yuan X Q, *et al.*, 2020. Creep process and the microstructural evolution of sliding-zone soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(3): 115–121. (in Chinese)
- 左永振, 程展林, 赵娜, 2015. 千枚岩碎屑土三轴试验剪切带扩展性状的 CT 研究[J]. *岩土工程学报*, 37(8): 1524–1531.
- Zuo Y Z, Cheng Z L, Zhao N, 2015. Expansion mechanism of shear bands in phyllite detritus soil by CT technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(8): 1524–1531. (in Chinese)
- Finno R J, Harris W W, Mooney M A, *et al.*, 1997. Shear bands in plane strain compression of loose sand[J]. *Géotechnique*, 47(1): 149–165.
- Furuki H, Chigira M, 2019. Structural features and the evolutionary mechanisms of the basal shear zone of a rockslide[J]. *Engineering Geology*, 260: 105214.
- Han C, Vardoulakis I G, 1991. Plane-strain compression experiments on water-saturated fine-grained sand[J]. *Géotechnique*, 41(1): 49–78.
- Hu W, Xu Q, Wang G, *et al.*, 2017. Shear resistance variations in experimentally sheared mudstone granules: A possible shear-thinning and thixotropic mechanism[J]. *Geophysical Research Letters*, 44: 11040–11050.
- Jiang Y, Wang G, Kamai T, 2016. Fast shear behavior of granular materials in ring-shear tests and implications for rapid landslides[J]. *Acta Geotechnica*, 12(3): 645–655.
- Liu C, Shi B, Zhou J, *et al.*, 2011. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. *Applied Clay Science*, 54(1): 97–106.
- Mandl G, de Jong L N J, Maltha A, 1977. Shear zones in granular material: An experimental study of their structure and mechanical genesis[J]. *Rock Mechanics*, 9: 95–144.
- Sassa K, Dang K, He B, *et al.*, 2014. A new high-stress undrained ring-shear apparatus and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama megaslide in Japan[J]. *Landslides*, 11: 827–842.
- Sassa K, Fukuoka H, Wang G, *et al.*, 2004. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics [J]. *Landslides*, 1(1): 1–5.
- Sho K, Hiroaki K, Shohei N, *et al.*, 2018. Shear-induced permeability reduction and shear-zone development of sand under high vertical stress[J]. *Engineering Geology*, 238: 86–98.
- Skempton A W, Petley D J, 1967. The Strength Along Structural Discontinuities in Stiff Clays [C]//*Proceedings of Geotechnical Conference, Oslo*: 29–46.
- Torabi A, Braathen A, Cuisiat F, *et al.*, 2007. Shear zones in porous sand: Insights from ring-shear experiments and naturally deformed sandstones[J]. *Tectonophysics*, 437: 37–50.
- Vafaei N, Fakharian K, Sadrekarimi A, 2019. An experimental study on effect of boundary condition on particle damage in shear zone of crushed sand[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 9546–9561.
- Wafid M A, Sassa K, Fukuoka H, *et al.*, 2004. Evolution of shear-zone structure in undrained ring-shear tests [J]. *Landslide*, 1(2): 101–112.
- Wang G H, Sassa K, 2002. Post-failure mobility of saturated sands in undrained load-controlled ring shear tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4): 821–837.

(责任编辑:黄维婷)