

河南三门峡槐扒滑坡内在机制分析

——滑带土自愈特性试验

万丰源, 董文萍*, 董金玉, 徐启翔

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年3月28日; 发布日期: 2025年4月10日

摘要

滑坡作为典型渐进式地质灾害, 其剪切带的强度演化规律直接影响灾害的复活机制与防控策略。本研究针对滑带土剪切破坏后呈现的抗剪强度自恢复现象, 创新性地提出剪切带“损伤-愈合-再活化”的动态演化理论。以豫西黄土滑坡区典型的三门峡槐扒滑坡原状滑带土为研究对象, 采用自主研发的环剪试验系统, 设计多工况“剪切-停滞-再剪切”循环试验, 系统揭示不同法向应力(100~300 kPa)和停滞时间(3~72 h)耦合作用下滑带土自愈合效应的时空演化规律。研究揭示: 滑带土自愈合强度恢复率与停滞时间呈显著正相关, 在300 kPa法向应力下停滞72 h后恢复率达42.3%; 自愈效应具有显著的时间依赖性, 但易受后期变形破坏影响, 0.5 mm位移即可导致83%的愈合强度损失。法向应力的增大显著提升了强度恢复速率, 而恢复幅度随停滞时间延长呈指数增长趋势, 并在72小时后趋于稳定。基于微观结构分析和能量耗散理论, 首次构建考虑黏土矿物重结晶和孔隙水膜重建的双机制愈合模型。研究成果突破了传统残余强度理论的局限性, 为滑坡多级防控体系的构建提供科学依据, 推动防灾工程从被动治理向主动调控转变。

关键词

原状滑带土, 残余强度, 自愈合强度恢复, 环剪试验

Analysis of the Internal Mechanism of Huaiba Landslide in Sanmenxia, Henan

—Self-Healing Characteristics Test of Sliding Zone Soil

Fengyuan Wan, Wenping Dong*, Jinyu Dong, Qixiang Xu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 8th, 2025; accepted: Mar. 28th, 2025; published: Apr. 10th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 万丰源, 董文萍, 董金玉, 徐启翔. 河南三门峡槐扒滑坡内在机制分析[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 616-634.
DOI: 10.12677/hjce.2025.144067

Abstract

Landslide, as a typical progressive geological hazard, the shear zone strength evolution law directly influences the disaster reactivation mechanism and prevention strategies. This study innovatively proposes the dynamic evolution theory of “damage-healing-reactivation” for shear zones, targeting the self-recovery phenomenon of shear strength in post-failure sliding zone soils. Taking undisturbed sliding zone soils from the typical Sanmenxia Huaipa Landslide in the loess area of western Henan as research objects, self-developed ring shear testing systems were used to design multi-condition “shear-stagnation-re-shear” cyclic tests. The spatio-temporal evolution laws of self-healing effects in sliding zone soils under the combined action of different normal stresses (100~300 kPa) and stagnation times (3~72 h) were systematically revealed. Research findings show that: The self-healing strength recovery rate of sliding zone soils has a significant positive correlation with stagnation time, reaching 42.3% after 72 h of stagnation under 300 kPa normal stress; The self-healing effect exhibits significant time-dependence but is vulnerable to subsequent deformation and failure, with 0.5 mm displacement causing 83% loss of healed strength; Increasing normal stress significantly enhances the strength recovery rate, while the recovery amplitude shows an exponential growth trend with prolonged stagnation time, tending to stabilize after 72 hours. Based on microstructure analysis and energy dissipation theory, a dual-mechanism healing model considering clay mineral recrystallization and pore water film reconstruction was first established. These research results break through the limitations of traditional residual strength theory, providing scientific basis for constructing multi-level landslide prevention systems and promoting the transformation of disaster prevention engineering from passive treatment to active regulation.

Keywords

Undisturbed Slide Zone Soil, Residual Strength, Self-Healing Strength Recovery, Ring Shear Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡作为一种严重的地质灾害，其稳定性分析和防治设计对于减少经济损失和保护人民生命财产安全全具有重要意义。在滑坡稳定性分析和设计计算中，滑带土的残余强度值是一个关键参数。现有研究表明，在滑坡稳定期，滑带土的抗剪强度可能会因为自愈合现象而提高。因此，探究滑坡滑带土样在残余状态下的愈合特性，并分析不同法向应力和停顿时间对愈合效果的影响，显得尤为重要。

近年来，相关学者对边坡破坏强度的恢复特性进行了一系列的研究。张荣等[1]利用环剪仪，研究发现，滑带土的抗剪强度与轴向应力大小呈现出较强的线性关系，且低含水率是滑带土抗剪强度峰后软化现象明显。D'Appolonia [2]表明崩积层黏性土的剪切面，会经历“愈合”，导致预先存在破坏面的剪切强度大于残余值。Chandler [3]指出，滑坡再次滑动前，其滑带剪切强度在稳定期会出现恢复现象。Angeli *et al.* [4] [5]研究了包含伦敦黏土在内的不同正常固结黏土的强度恢复机制，发现无论采用直剪试验还是环剪试验，恢复强度都随时间增大。Stark and Hussain [6]对四种天然土体做了室内环剪试验强度恢复试验，表明了100 kPa或更小的低有效法向应力下，强度恢复很明显，在有效正常应力为100 kPa或更低的高塑性土、液限在80%~112%之间的恢复抗剪强度更接近于长时间恢复期后的完全软化强度。这是由于低塑性土体的完全软化强度和剩余强度之间的差异较小。卢远航等[7]发现滑带土中含有较多黏土矿物会降

低试样的结构强度。Eigenbrod [8]研究了细粒土在渗透过程中发生自愈合现象。缪海波等[9][10]对库岸深层的滑坡滑带土进行强度恢复的试验分析,研究表明在静置时间短的情况下,峰值强度会有显著的强度恢复现象,但随着剪切位移的变化,在较短的位移会发生衰减的情况,认为可能是滑带土的本身的颗粒结果,或者土颗粒之间的相互作用等对滑带土的强度恢复具有一定的影响。闫琦玮等[11]-[12]研究了红层滑坡自愈合现象,在反复剪切试验中通过控制保持时间来分析剪切面恢复强度与保持时间的关系,以及在不同法向应力下恢复强度的规律。总结出了法向应力没有保持时间对恢复强度的影响显著,随着时间的增长恢复强度越来越大,并对摩擦系数进行了回归分析。Jiang *et al.* [13]通过室内环剪试验在不同剪切速率和不同粒径下对滑坡的自愈合情况进行了探究,得出了滑坡发生加速蠕变破坏这一次的峰值强度要比上一次的峰值强度高。李小伟等[14]在对黄土滑坡滑带土进行环剪试验时发现剪切速率对滑带土的软化特性影响明显。王辉等[15]通过对性质较为特殊的黄土开展直剪试验,探究了不同法向应力及恢复时间的强度愈合规律。谈云志等[16]探究了重塑石灰土的强度恢复机制,说明了改良石灰土和石灰土提高了强度恢复性能,通过微观和 X 衍射分析了剪切面处土的结构。Miao and Wand [17]认为滑带土在经历较长时间的再次固结后,受二次压缩影响引起剪切带体积变化,造成强度明显恢复。

也有研究表明,滑带土塑性对强度愈合有重要影响。Gibo *et al.* [18]得出以粉砂为主的试样,具有强度恢复特征。陈传胜等[19]也认为以粉粒和沙粒为主的低塑性滑带土在较低的有效法向应力下强度恢复较为明显。Ramiah *et al.* [20]以 4 天为停顿时间,研究了重塑正产固结高岭石和膨润土的强度恢复特征,结果表明高塑性土体(膨润土)即使在较短的停顿时间下,其强度恢复也比较明显。Stark *et al.* [21]对两种不同塑性的土体开展了为期 230 天的强度恢复环剪试验,结果表明强度恢复大小随塑性的增加而增大,并且,这种强度恢复特征在经历非常小的位移后就会迅速减小。Carrubba and Del Fabbro [22]以 30 天为停顿时间,发现 Montona flysch 的恢复强度要比 Rosazzo flysch 多,因为 Montona flysch 的塑性强,这与 Stark *et al.* [21]结论相似。Bhat *et al.* [23][24]以塑性不同的三种土体为对象,进行了 1、3、7、15、30 天的强度恢复试验,结果表明高塑性土体比低塑性土体拥有较高的恢复强度,且停顿 3 天内的土体摩擦角没有增加,而停顿 30 天的土体摩擦角仅增加了 1°。尽管当前研究已揭示滑坡在再激活阶段滑面强度略胜于残余强度的现象,但对于大位移下剪切下自愈现象的全面系统性阐释仍显匮乏。

本文在众多学者对滑坡自愈合特性研究的基础上,以三门峡槐扒滑坡原状滑带土为研究对象,采用德国 WILLE ARS-3 型环剪仪,模拟滑带土大位移剪切条件下的残余强度特性。在控制停顿时间、法向应力等因素的前提下,对滑坡滑动面愈合效应的产生因素进行分析,并利用 SEM 特征,进一步探究强度恢复的内在机制。

2. 工程概况

三门峡市槐扒滑坡位于河南省三门峡市渑池县陈村乡槐扒黄河提水工程的东南方山体上,西至西坡沟,南以煤窑沟断层及南侧山前陡壁为界,北临黄河岸边黄土阶地。滑坡体有 7 处小煤窑及铝土矿窑井,下部多被采矿开挖,较平缓,采矿形成的大型矿坑,致使前缘地形较缓,而中后部地形略陡,自然坡角约 30°。上部崩塌积层碎石土杂乱无章,碎石含量不均匀,局部碎石含量高,并夹杂滚石。滑坡体主滑方向 324°左右,西侧冲沟(西坡沟)断面呈“V”字形,切割较深,冲沟上游煤窑沟断层南侧已被矿区矿渣完全堵塞,高度达上百米;东侧发育有一较浅冲沟,底部高程为 301~350 m。

滑坡前缘,由于岩层阻滑作用,剪出口出露(图 1(a))、地面鼓胀(图 1(b)),岩土表层崩裂明显,裂缝簇状出现,分布密集。滑坡中部,东北区域,主要为剪切裂缝和先剪后张裂缝,多有土条、土楔,裂缝两侧相对位移明显(图 1(c)~(d));东部区域,多大型纵向裂缝,先剪后拉,平行滑动方向,多有条形土条,上宽下窄(图 1(e))。滑坡后缘主要为张拉裂缝,醉汉林、马刀树现象分布在该区(图 1(f)~(g)),表面裂缝纵

横交错、张拉开裂形成土格子、土楔子，裂缝上宽下窄(图 1(h))，呈树状分布。滑坡南北长 550 m，东西宽 450 m，总体积约 $400 \times 104 \text{ m}^3$ 。后缘高程 437 m，前缘最低高程 295 m，平面布置如图 2 所示。

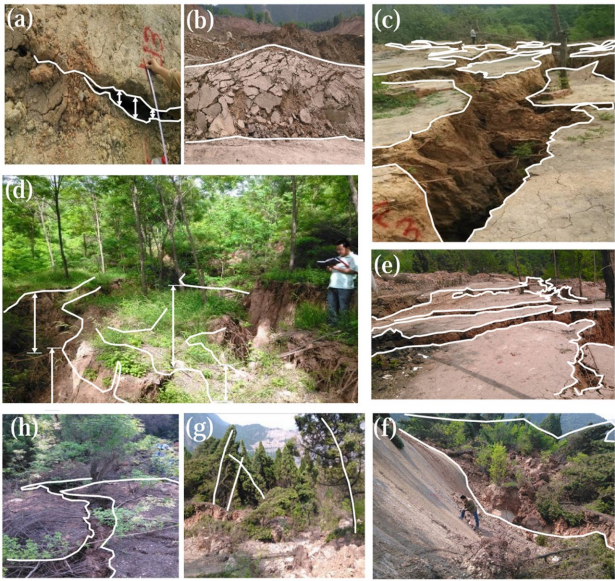


Figure 1. Fracture distribution
图 1. 裂缝分布

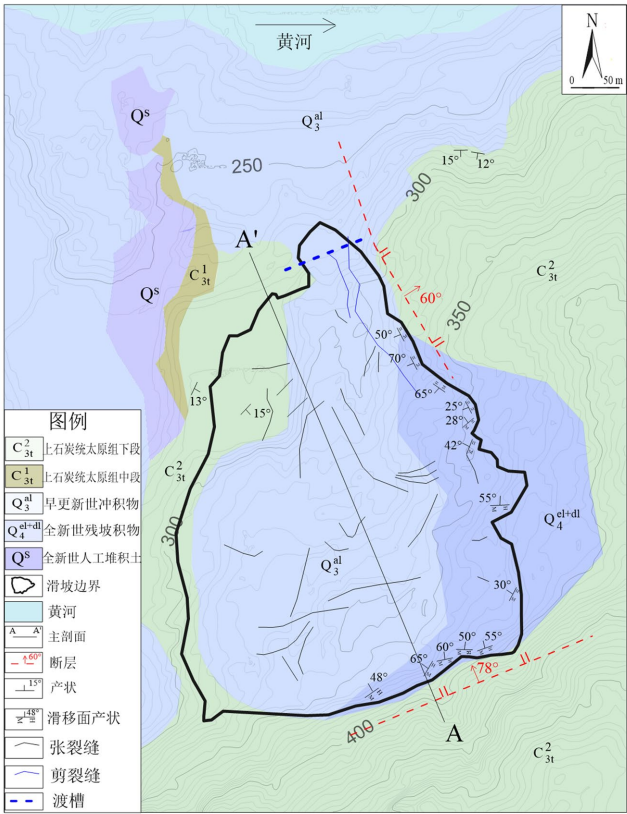


Figure 2. Engineering geological plane
图 2. 工程地质平面

滑坡滑带土为土岩接触带的全风化泥岩及砂岩层,厚 0.2~0.5 m,滑坡滑面如图 3 所示。坡面多柏树生长,地层岩性多为残坡积物及全风化基岩,滑带(床)倾角为 $17.8^{\circ}\sim 52^{\circ}$,大多在 35° 左右;滑体厚 13~29 m。滑体为第四系坡崩积和冲积碎石土,基岩为互层的反倾砂岩和泥岩。滑坡剖面如图 4 所示。



(a) 土岩滑面



(b) 全风化泥岩滑面

Figure 3. Landslide sliding surface
图 3. 滑坡滑面

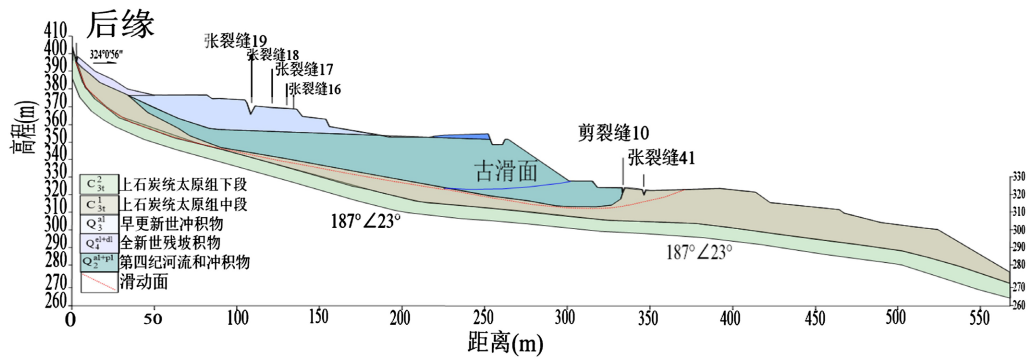


Figure 4. A-A' section
图 4. A-A'剖面

3. 土样基本物性

试样选用槐扒滑坡原状滑带土,在室内进行常规物理特性试验,液限为 34.4%,塑限为 19.8%,塑性指数 14.6。土样各项物理指标如表 1 所示。采用激光粒度仪获取原状样粒径分布曲线,如图 5 所示。可以看出,滑带土土样属低液限粉质黏土。

土样全岩矿物组成中以石英为主(如表 2、表 3 所示), 含量约为 57.3%, 黏土矿物含量约为 23.6%, 以伊利石为主, 含量约为 43%, 具有很强的吸水膨胀性和水质软化性, 易风化、崩解, 影响岩土体的工程特性。滑坡受强降雨影响, 黏土矿物极易聚集在滑带附近, 影响土体工程力学性质, 对滑坡稳定性极为不利。

Table 1. Basic physical property indexes
表 1. 基本物性指标

含水(%)	天然密度(kg/m³)	液限(%)	塑限(%)	塑性指数	饱和含水(%)
18.21	2.12	34.4	19.8	14.6	24.1

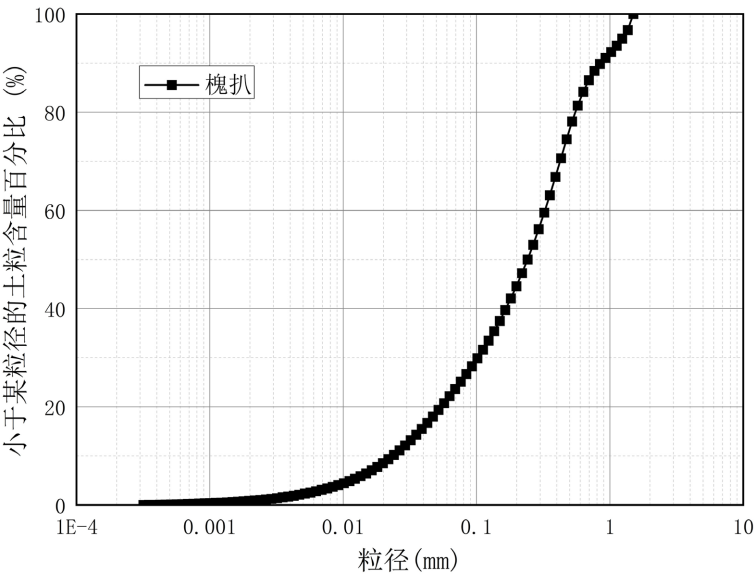


Figure 5. Sample size distribution curve
图 5. 样品粒度分布曲线

Table 2. Rock composition of samples
表 2. 样品岩石组成

矿物种类和含量/%					黏土矿物/%
石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	
57.3	1.6	6.5	10.1	0.9	23.6

Table 3. Mineralogical composition of samples
表 3. 样品矿物学组成

黏土矿物相对含量/%				混层比/%	
伊蒙混层 I/S	伊利石 I	高岭石 K	绿泥石 C	SI/S	SC/S
28	43	11	18	50	/

4. 试验方案

为分析和探讨土体强度恢复情况, 对比初始状态和停顿时间下的滑带土环剪剪切强度, 试验总体按照“剪切-停顿-剪切-停顿-剪切”的循环方式开展。首先对试样进行固结, 固结完成后将试样剪切至残余强度状态; 然后, 在法向应力、剪应力保持不变的情况下保持停顿状态, 达到设计停顿时间后, 对试样再次剪切至残余强度状态; 此后, 循环此过程。试验过程中, 记录土体第一次剪切完成所达到的

抗剪强度和残余强度值，以及试样在不同停顿时间下剪切后的抗剪强度和残余强度值。

试验采用原状样环剪试验，模拟滑坡在大位移剪切条件下可能出现的强度恢复状态。由于试验持续时间较长，试验过程中对防止水分蒸发做了有效处理。具体试验方案如下：

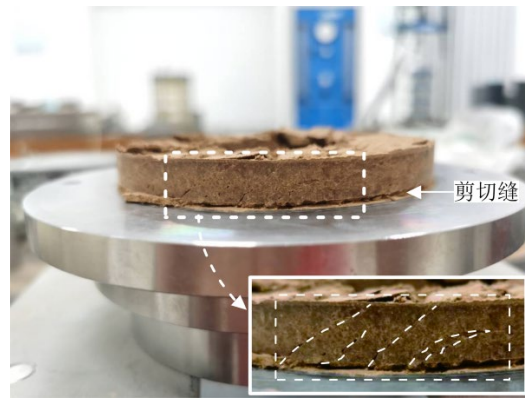
(1) 试样固结稳定后，以 0.2 mm/min 速率进行剪切，当试样首次达到残余状态后，保持法向应力、剪应力不变，由此可重现滑坡复活时的原位应力条件。将试样停顿 3 h，然后将试样剪切至新的稳定残余强度状态；接着继续停顿 6 h，并剪切至下一个残余状态；接着继续停顿 12 h，并剪切至下一个残余状态；接着停顿 24 h，并剪切至下一个残余状态；最后停顿 72 h 后再次剪切至残余状态。

(2) 上述剪切循环状态，分别设置在三个不同法向应力进行试验，分别为 50、100、200 kPa。

为方便描述，本文定义了强度恢复值和恢复速率。强度恢复值：再次剪切得到的峰值抗剪强度与前一次剪切残余强度的差值；恢复速率：强度恢复值与停顿时间的比值。

5. 试验结果

5.1. 剪切带特征



(a) 剪切后土样整体形态



(b) 下剪切盒土样表面形态

Figure 6. The failure mode of the specimen after shearing
图 6. 剪切后的试样破坏形态

在“剪切 - 停顿 - 剪切 - 停顿 - 剪切”的环剪循环试验结束后，将剪切盒从环剪仪器上整体取出，卸下螺丝，打开剪切盒，取出装有试样的上下剪切环。试样经过多次剪切，上下两部分分离彻底，剪切

带特征清晰完整,如图 6 所示。剪切缝将试样一分为二,如图 6(a)所示,剪切带明显,且上剪切盒试样裂缝,由剪切面向上表面逐步发展,细小且稠密。从图 6(b)可以看出,下剪切盒土样剪切面整体光滑,并能清晰看到大位移剪切后的划痕,剪切方向明显,局部凹凸不平。

5.2. 不同法向应力下强度恢复特征

天然含水率的原状样在 50 kPa、100 kPa、200 kPa 下正常固结完成后剪切,并依次停顿 3 h、6 h、12 h、24 h、72 h 后,再次剪切,得到不同法向应力下的应力位移曲线,如图 7~9 所示,可以看到滑带土具有明显的强度恢复迹象,土样再次开始剪切时,在非常小的相对位移下有一个明显的峰值,当位移进一步增加,强度迅速降低到残余强度。三个压力下的初始剪切峰值强度、残余强度分别为 65.2、60.6 kPa, 74.13、68.59, 125.74、113 kPa,其结果遵循不同法向应力下,剪切强度随法向应力增大而增大的规律。

在同一法向应力作用下,随着停顿时间的延长,抗剪强度会高于上一次剪切的残余强度,某种程度上表明滑带土具有强度恢复现象。恢复的强度是脆性的,经历一个很小的位移后很快消失。停顿 3 h 后的土样剪切曲线不具备一致的规律性,这可能是因为在初始剪切完成后,3 h 的停顿时间相对短暂,剪切带处的土颗粒孔隙、黏结性等没有完全恢复,颗粒依旧处于相对错乱的状态,故强度恢复不明显。Ikari *et al.* [25] 研究结果表明,在停顿时间小于 3000 s 时,其恢复强度值与停顿时间之间没有明显的规律性。所以对停顿 3 h 的试验结果不做过多的分析讨论,对超过 3 h 的数据进行细致的分析讨论。

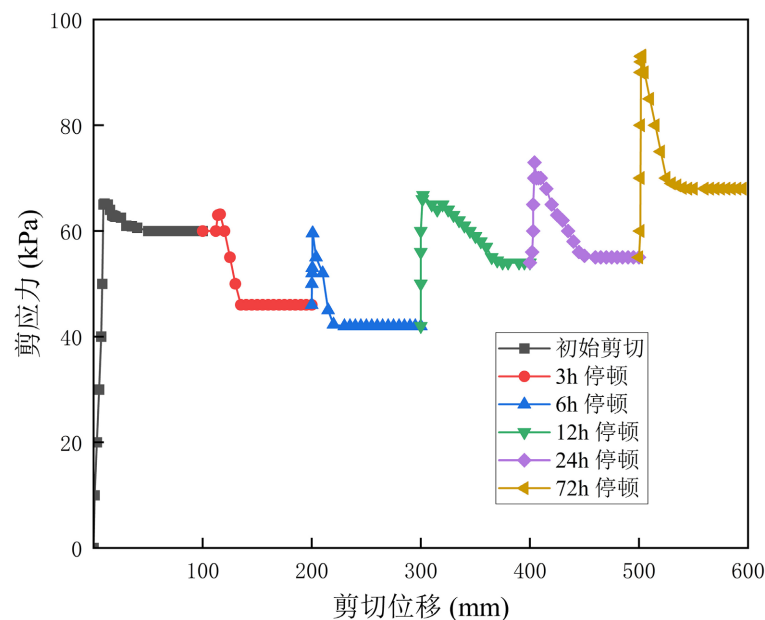


Figure 7. Strength recovery curve at 50 kPa
图 7. 50 kPa 下强度恢复曲线

停顿 6 h、12 h、24 h、72 h 状态下, 50 kPa、100 kPa、200 kPa 法向应力峰值强度较前一次剪切均有所增加如表 4 所示, 法向应力的变化对土体剪切带抗剪强度的恢复有一定影响, 但强度的恢复值并不完全取决于法向应力的增减。法向应力增加, 促使土颗粒间接触面积不断增加, 孔隙率不断减少, 矿物质颗粒间的孔隙被细小的土颗粒不断挤压填充, 颗粒发生重新排列, 剪切面处排列方式得到了优化, 孔隙度减少, 密实度不断提高, 颗粒与颗粒间的相互作用力不断增大, 从而表现为再次剪切时抗剪强度的恢复提高, 但是, 土体的密实度是有限的, 孔隙和孔隙连通体数量都呈现出先增加后减少最后趋于稳定的趋势[26][27], 一旦接触面积和孔隙率达到饱和, 极有可能峰值强度会随着法向应力的增加而增加, 随后

停止增加并趋于稳定。故法向应力对土体强度恢复的影响，是有限度的。

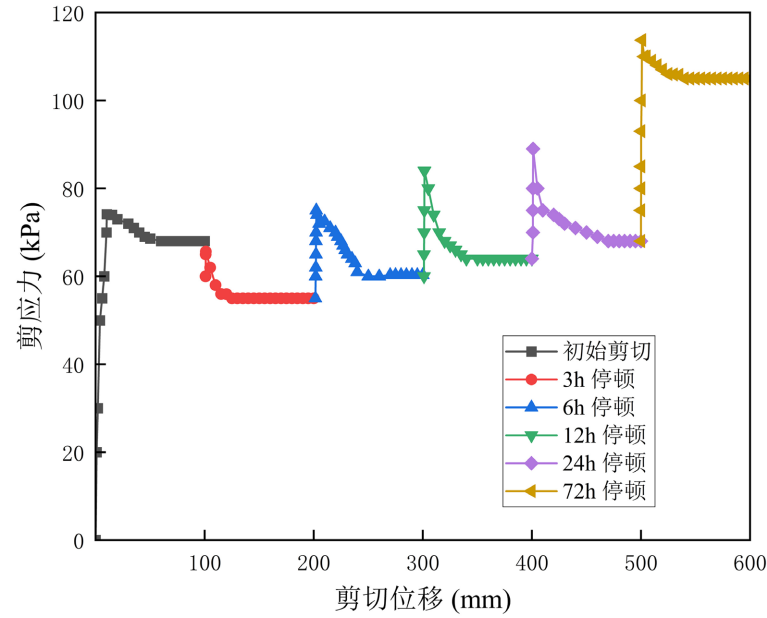


Figure 8. Strength recovery curve at 100 kPa
图 8. 100 kPa 下强度恢复曲线

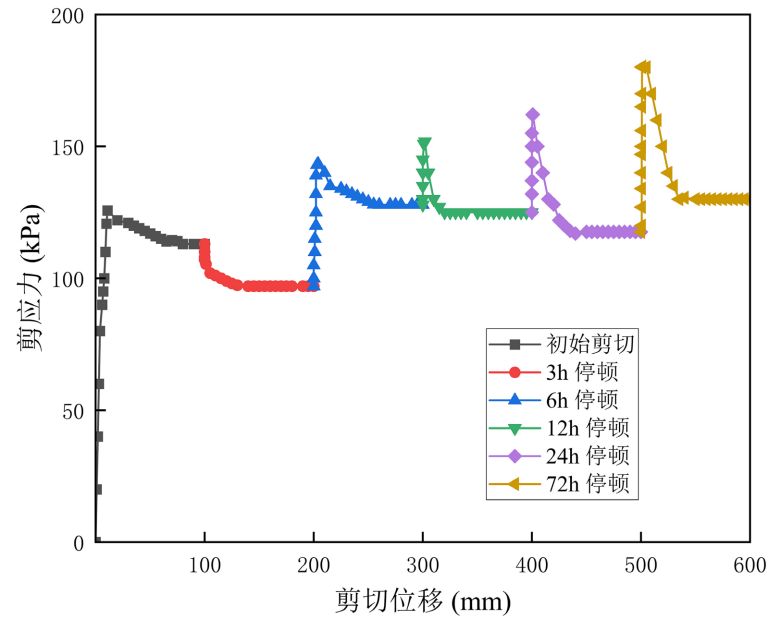


Figure 9. Strength recovery curve at 200 kPa
图 9. 200 kPa 下强度恢复曲线

Table 4. Peak strength (kPa)
表 4. 峰值强度(kPa)

愈合时间(h)	法向应力(kPa)		
	50	100	200
6	61.80	75.62	143.45

续表

12	66.78	84.34	151.82
24	72.95	89.70	162.13
72	93.10	113.72	180.23

5.3. 不同停顿时间下强度恢复特征

对停顿 6 h、12 h、24 h、72 h，剪切得到的强度恢复做回归分析，如图 10 所示。可以明显地看出，随着停顿时间的增加，土样剪切面处强度恢复情况不断提升，强度恢复值不断增加。停顿时间增加，也就意味着土样的固结时间不断增加，土样硬化时间增长，表现出剪切面处抗剪强度的增大，其强度恢复值增加，由此可见强度恢复对时间的依赖性。滑坡滑带土在不同停顿时间作用下，其剪切面抗剪强度的增加，就是土体具有一定程度强度愈合特性的表征，表现为强度恢复值随着停顿时间的增大而明显增大。另外，从图中还可以看出，200 kPa 下的强度恢复值明显高于 50、100 kPa 下的，50 kPa 与 100 kPa 下的强度恢复值相对接近些，由此可知，高法向应力作用下的强度恢复情况要优于低压力下的。

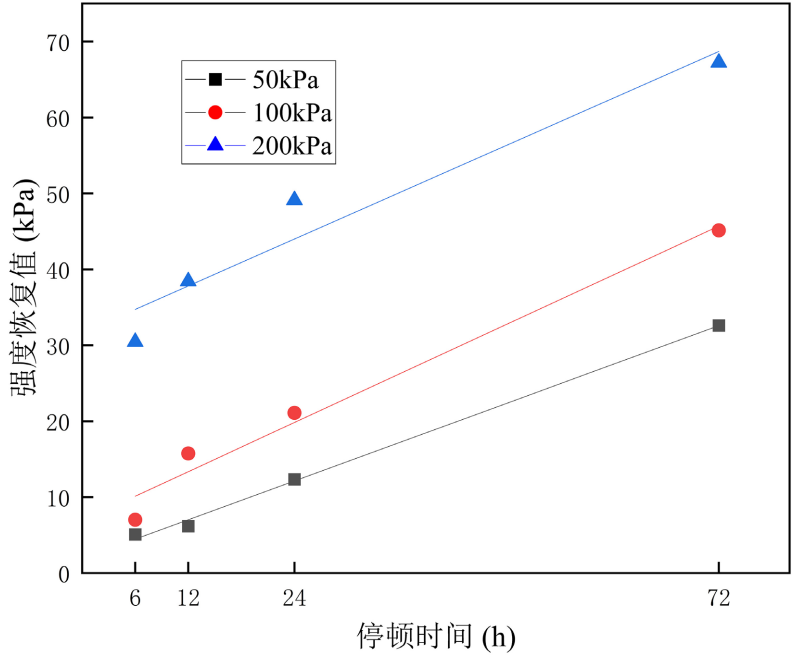
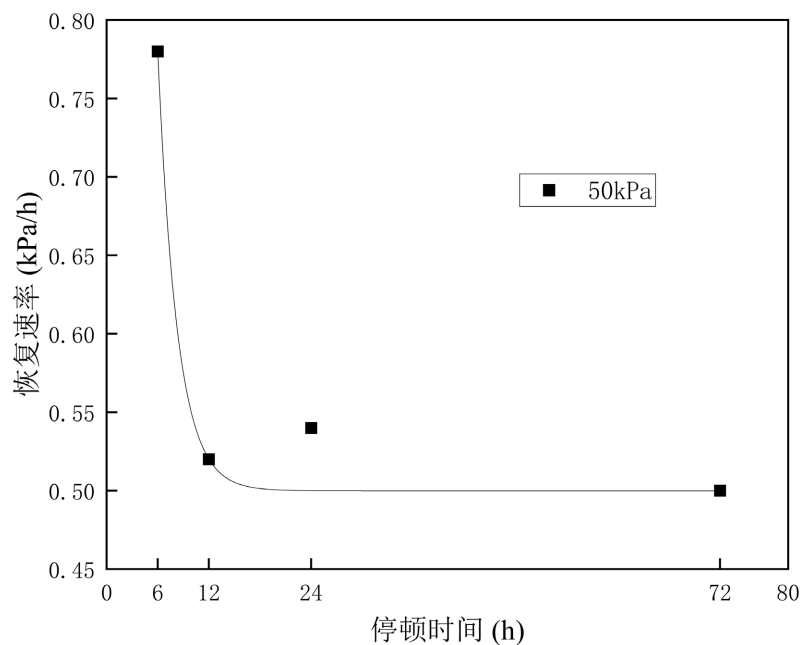


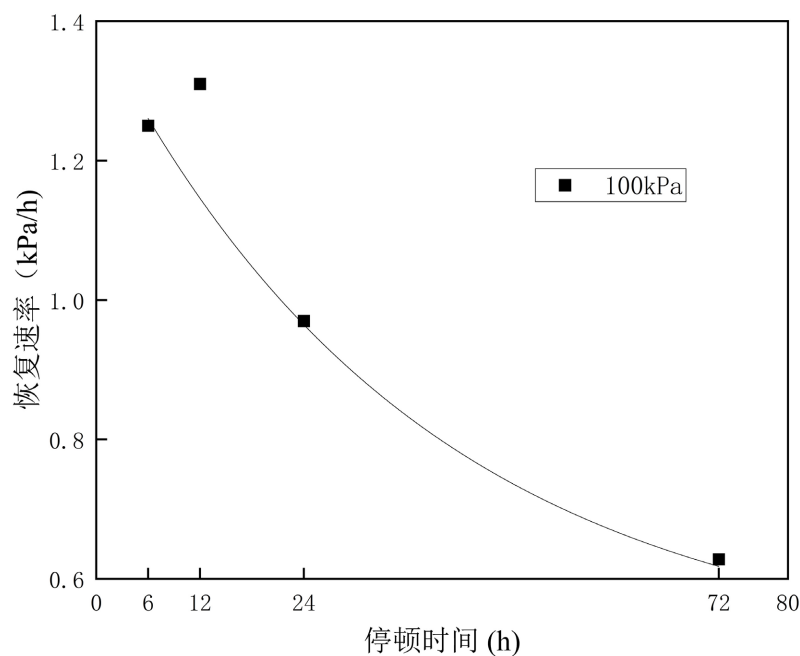
Figure 10. Relationship between pause time and strength recovery value under different normal stresses
图 10. 在不同法向应力下停顿时间与强度恢复值的关系图

需要注意的是，对于低塑性土，抗剪强度随停顿时间逐渐增大的特性，并不是无限的，当停顿时间超过 100 天，抗剪强度增大到一定程度，会逐渐趋向于完全软化强度值[21]。抗剪强度的大小由土体本身结构性决定，峰值强度和残余强度都体现出了一定的恢复性，反应了土体在停顿期是有结构性恢复性的。在大位移剪切作用下，土样剪切至残余强度状态后，土颗粒在一定的法向应力和停顿时间作用下，产生胶结作用，尤其是位于剪切面处的土颗粒，会发生相互作用，在持续性的应力作用下，致使剪切面处土体抗剪强度得以恢复升高。在愈合期内抗剪强度恢复的多少与土体本身的矿物质成分以及含量的多少有关，在相同的应力和停顿时间下，表现出来的恢复速率大小也不一样。

将停顿时间与恢复速率进行非线性拟合回归分析,如图 11 所示。由图可以看出,随着停顿时间的延长,恢复速率慢慢减缓,最终趋于稳定,6 h 的停顿时间,反而是恢复速率最高的时间段。随着停顿时间的不断增加,土颗粒的接触面积不断增加,矿物质颗粒之间的孔隙由于时间的推移,被细小的土颗粒不断地填充挤压,土样孔隙度不断变小,颗粒与颗粒之间的咬合力不断增大,土样胶结程度增大,土体逐渐密实,但孔隙的减小最终会达到饱和状态,所以,在停顿时间不断增长的过程中,土样剪切面的土颗粒密合程度也会达到饱和,土样剪切面处的恢复速率也就会逐渐减小。故强度恢复速率会随着停顿时间的增长慢慢减小,强度恢复值达到饱和,最终趋于稳定停止恢复。



(a) 50 kPa



(b) 100 kPa

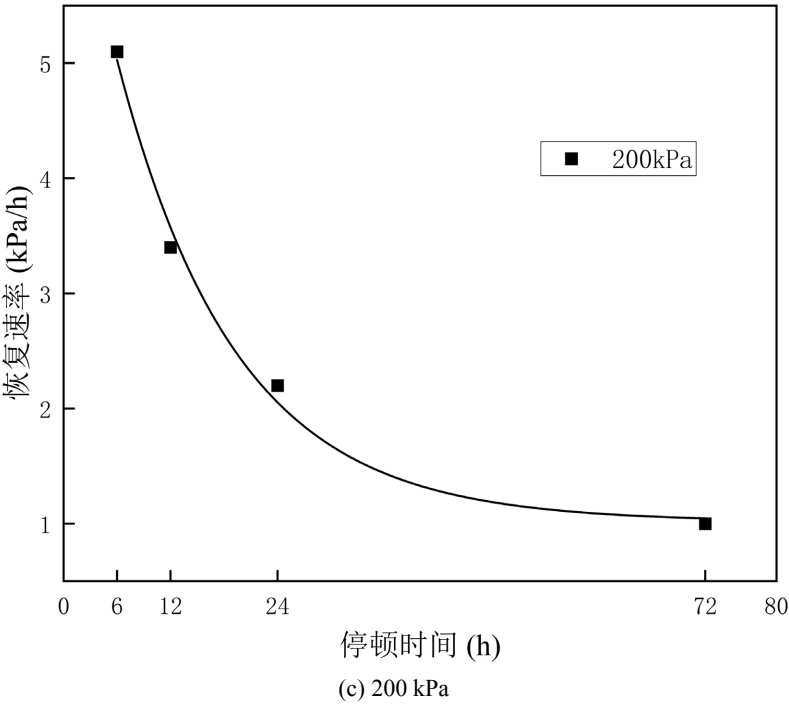


Figure 11. Relationship between pause time and recovery rate under different normal stresses
图 11. 不同法向应力下停顿时间与恢复速率关系曲线

6. 强度恢复影响因素分析

6.1. 法向压力与强度恢复的关系

表 5 汇总了不同法向应力下不同愈合时间对应的强度恢复值和恢复速率。
图 12 为不同愈合时间下法向应力与强度恢复值的关系图。由图和表可得在法向应力 50、100、200 kPa 下，愈合时间 6 h 时强度恢复值分别为 1.2、7.03、30.45 kPa，愈合 12 h 时强度恢复值为 6.18、15.75、38.82 kPa，愈合 24 h 时强度恢复值为 12.35、21.11、49.13 kPa，愈合 72 h 时强度恢复值为 32.6、45.13、67.23 kPa。由此可见，在相同愈合时间下，其强度恢复值随着压力的增大均有所增加，在低压力时，强度恢复增加值较少，而在高压力下强度恢复值明显增加较多。

Table 5. Recovery strength value and recovery rate index
表 5. 恢复强度值和恢复速率指标

法向应力/kPa	指标	停顿时间/h				
		3	6	12	24	72
50	强度恢复值	3.55	1.2	6.18	12.35	32.60
	恢复速率	1.15	0.85	0.52	0.51	0.45
100	强度恢复值	0	7.03	15.75	21.11	45.13
	恢复速率	0	1.17	1.31	0.88	0.63
200	强度恢复值	18.20	30.45	38.42	49.13	67.23
	恢复速率	6.20	5.07	3.26	2.05	0.93

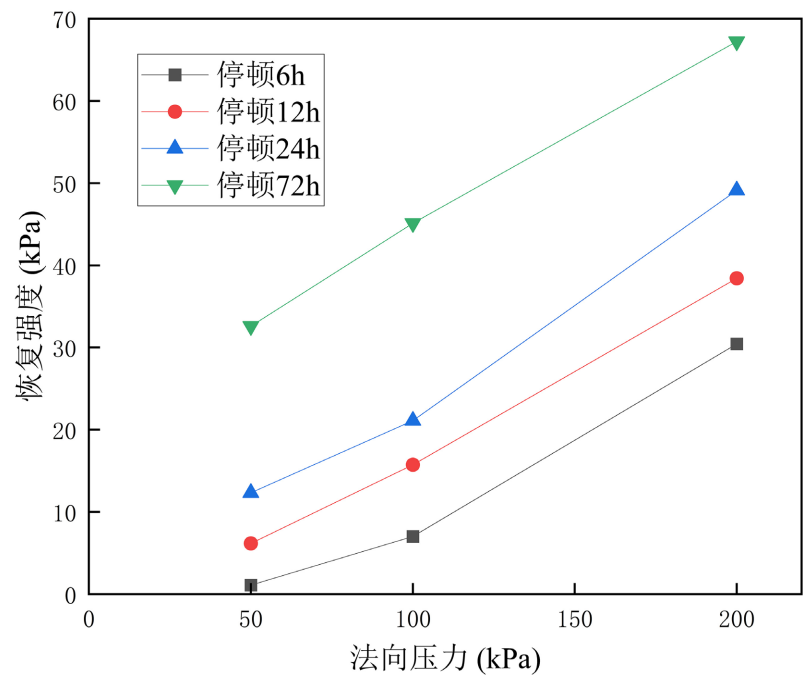


Figure 12. Relationship between normal stress and strength recovery value under different healing time

图 12. 不同愈合时间下法向应力与强度恢复值的关系

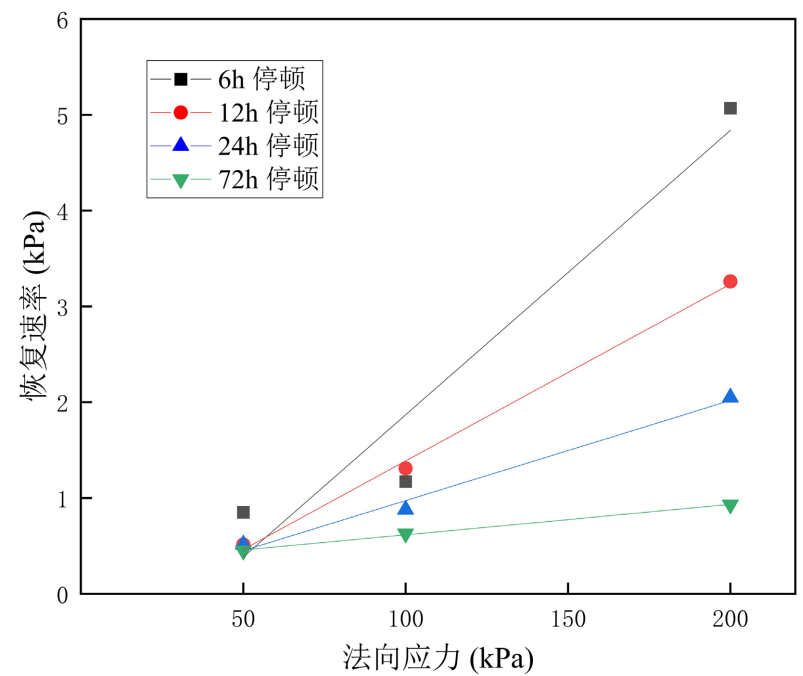


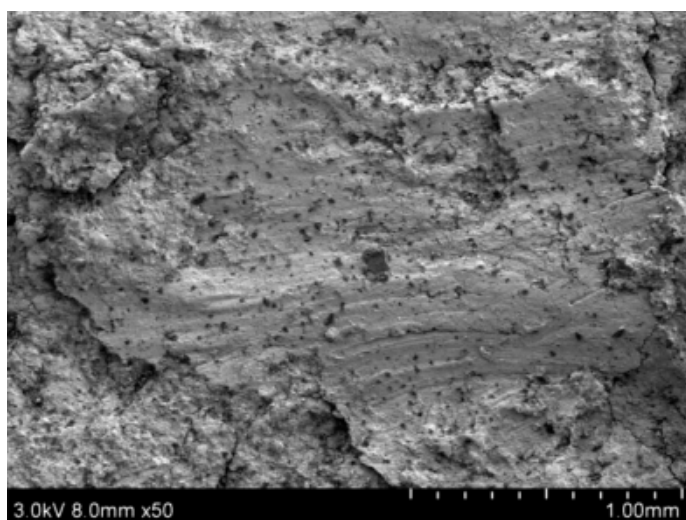
Figure 13. The relationship between normal pressure and strength recovery rate under different pause time

图 13. 不同停顿时间下法向压力与强度恢复速率的关系

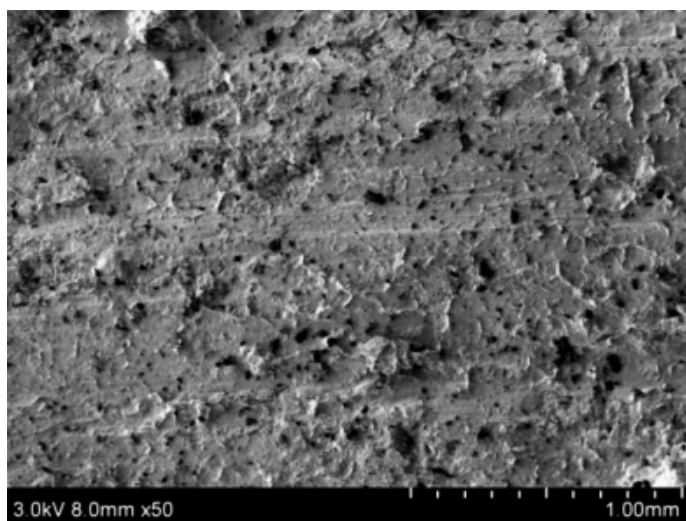
随着法向应力的增加，每个愈合时间下的强度恢复值曲线都表现出增长的趋势，说明法向应力对强度的恢复是有影响的，与此同时，还可以看到，同一法向应力下，停顿时间与强度恢复值的关系，即，停

顿时间越长, 强度恢复值越大, 在停顿时间为 72 h 时强度恢复值达到最高。

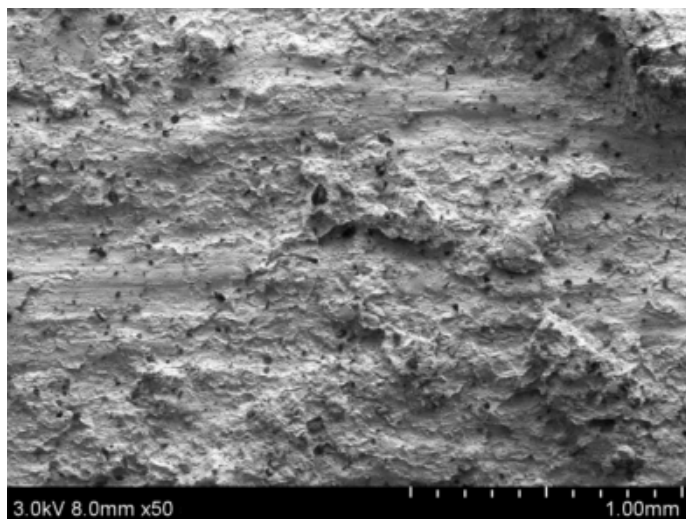
不同停顿时间下法向应力与强度恢复速率的关系如图 13 所示, 可以看出, 在相同停顿时间下, 强度恢复速率随着法向应力的增大而增大, 两者呈正相关性, 这主要是由于法向压力的增加使剪切面上的土颗粒密实度提高, 颗粒与颗粒间的咬合力增大导致的。随着法向应力的增大, 停顿时间的变长, 斜率逐渐变小, 法向应力从 50 kPa 增至 200 kPa, 在分别停顿 6 h、12 h、24 h、72 h 时, 恢复速率分别提高了 4.22 kPa/h、2.72 kPa/h、1.53 kPa/h、0.48 kPa/h, 可见, 随着法向应力、停顿时间的增加, 恢复速率提高值逐渐减小。法向应力增加, 停顿时间增大, 势必导致颗粒与颗粒接触面积、接触时间增加, 面与面之间相互作用增强, 相互之间的摩擦力增大, 由此试样抗剪强度就会增高。另一方面, 土颗粒之间的空隙是由土体内的矿物质及土体本身性质所决定的, 土体的接触面孔隙比、密实度是有限的, 即使再高的法向应力作用, 再长的停顿时间, 剪切面处的抗剪强度在土体密实度逐渐变化下的强度恢复值是有限的, 当剪切面处土颗粒达到绝对密实后, 此时的土颗粒接触面积已达到饱和, 即使停顿时间再长, 强度恢复值达到饱和状态, 强度恢复速率就会减小甚至停止。综上所述, 随法向应力的增大, 强度恢复速率虽然表现出增加的趋势, 但增加的幅值随停顿时间的增长最后趋于稳定。



(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



(c) 200 kPa

Figure 14. SEM characteristics of shear surface after the end of “shear-pause-shear-pause-shear”

图 14. “剪切 - 停顿 - 剪切 - 停顿 - 剪切”结束后剪切面 SEM 特征

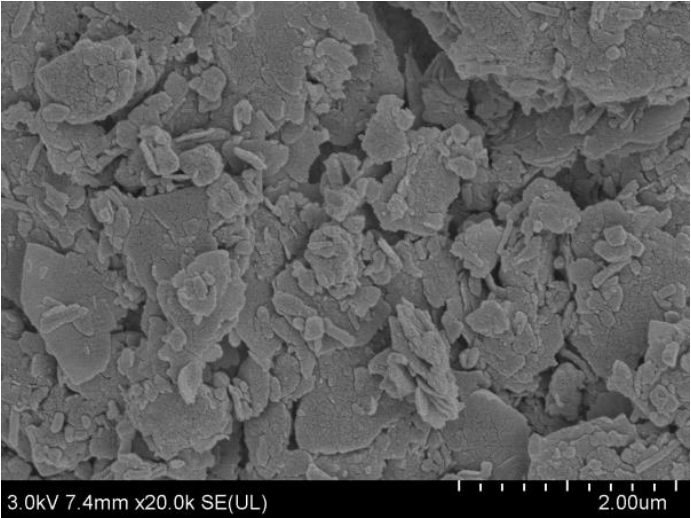
图 14 为“剪切 - 停顿 - 剪切 - 停顿 - 剪切”结束后剪切面 SEM 特征(50 倍)。相同停顿时间下，低压下的试样剪切表面相对粗糙，且起伏明显，分布有较多的裂隙和孔隙，土颗粒在低压力作用下，相互错动，导致滑动痕迹相对不明显也较错乱。相较高压下的试样，低压力试样内部颗粒间发生体积扩容，某种程度上，增大了剪切面附近的孔隙度，密实度相对高压试样也偏低，粗颗粒发生滚动推挤，造成剪切面的粗糙。

随着压力的增加，较粗的颗粒，发生崩解，形成更细小的颗粒，较大的压力致使黏土矿物较快地完成定向排列，致使剪切面更加平整、紧实、光滑，定向滑痕更加明显。

6.2. 停顿时间与强度恢复的关系

Ikari *et al.* [25]研究表明，停顿时间的长短对滑坡的恢复是有明显影响的，超过一定的停顿时间才有明显的愈合现象，其摩擦愈合与保持时间呈对数线性关系，且较长的停顿时间，愈合速度会趋于稳定并达到饱和。也就是说，在较小的停顿时间下，愈合现象并不明显，这也就对本文停顿三小时的强度恢复现象有了合理的解释。

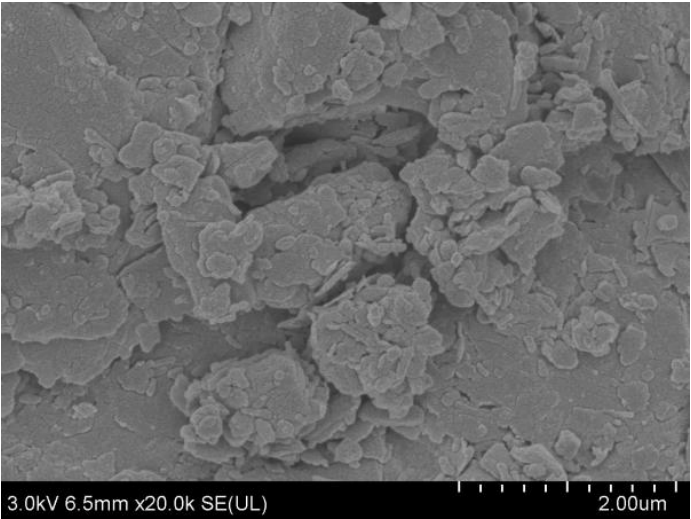
由上述结果可知，土体剪切即使达到残余强度状态，也就是通常意义上的颗粒已经形成了定向排列，但实际上，当土体再次产生剪切，强度还是产生了一定程度的恢复特性，这与土颗粒内部矿物面对面的排列方式直接相关。强度恢复机制包含范德华力和触变性。光滑的剪切面比粗糙的剪切面表现出更多的范德华吸引力，具有定向排列的光滑板状黏土颗粒比随机排列的黏土颗粒具有更大的范德华吸引力。Mitchell and Soga [28]认为黏土颗粒在给定的环境条件下(压力、温度、水等)吸收阳离子。土颗粒表面的净负电荷被水中的阳离子中和[29]。交换反应一般取决于阳离子的价态和水中阳离子的相对浓度，而剪切面强度的恢复则很可能是阳离子交换的原因。触变性指的是土体在成分、体积不变的前提下，所发生的等温的、可逆的、随时间可变化的材料硬化过程。也就是说，虽然土体剪切达到了残余强度，但其实，土颗粒内部并没有达到完全平衡状态。此时的不平衡状态主要是由于颗粒内部黏土矿物近距离面对面的接触方式形成的高排斥力所导致的。在这种不平衡状态下，土颗粒将会重新调整，从而达到新的强度值。



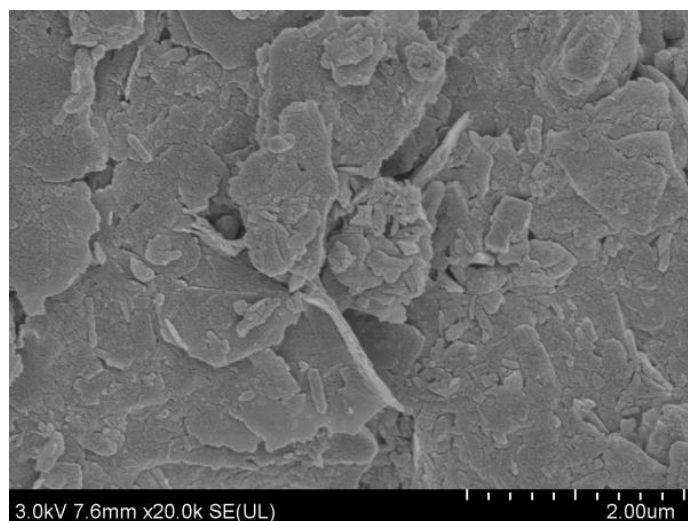
(a) 3 h



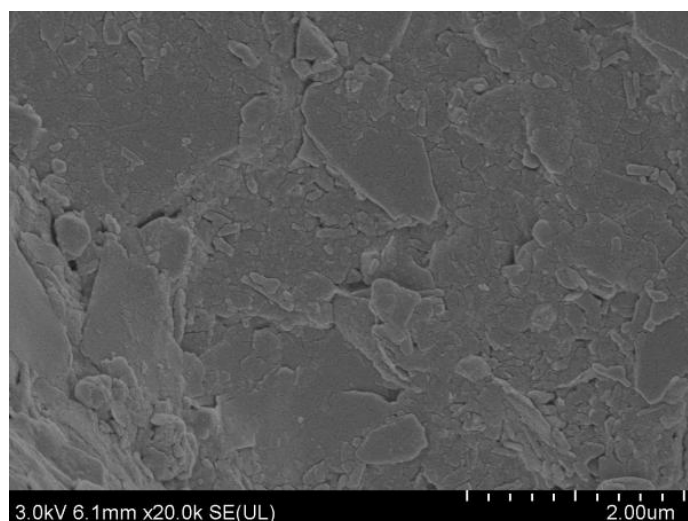
(b) 6 h



(c) 12 h



(d) 24 h



(e) 72 h

Figure 15. SEM characteristics of shear plane with different pause times at 100 kPa

图 15. 100 kPa 下不同停顿时间的剪切面 SEM 特征

图 15 为 100 kPa 下, 3、6、12、24、72 h 愈合时间下的剪切面 SEM 特征(2 万倍)。3 h 愈合时间下, 土颗粒单元以面面接触形式为主, 颗粒间孔隙较大, 接触不紧密, 均匀性较差, 此时的土颗粒处于松散状态。6 h 愈合时间下, 土颗粒单元仍以面面接触形式为主, 但大孔隙略微减小, 颗粒与颗粒之间的联结性开始增强。12 h 愈合时间下, 大孔隙再次减小, 土颗粒之间的联结性再次增强, 土体变得较为密实。24 h 愈合时间下, 大孔隙几乎没有了, 土体也更加密实。也再次说明, 强度的恢复与剪切面处结构的变化直接相关。72 h 愈合时间下, 大小孔隙几乎都没有了, 土体也更加致密。

7. 结论

本文以三门峡槐扒原状滑带土为研究对象, 采用“剪切 - 停顿 - 剪切 - 停顿 - 剪切”的循环方式开展环剪试验, 研究滑带土的强度恢复特征, 得到以下初步认识:

(1) 当土样首次剪切达到残余强度后, 在剪应力、法向应力保持不变的前提下再次剪切, 抗剪强度表

现出增大的现象,但这种强度恢复特征在经历非常小的位移后就会迅速减小。

(2) 相同停顿时间下,随着法向应力的增大,土体的强度恢复值随之增大。低压下,强度恢复值较小,高压下,强度恢复值明显。

(3) 相同法向应力下,随着停顿时间的增长,恢复强度会不断增加。随着停顿时间的增长,恢复速率虽然一直在增加,但增加的幅值也越来越小,最后趋近于零。

参考文献

- [1] 张荣, 吴益平, 李小伟, 等. 不同含水率下滑带土抗剪强度特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 195-199.
- [2] D'Appolonia, E., Alperstein, R. and D'Appolonia, D.J. (1967) Behavior of a Colluvial Slope. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **93**, 447-473. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001001>
- [3] Chandler, R.J. (1977) Back Analysis Techniques for Slope Stabilization Works: A Case Record. *Géotechnique*, **27**, 479-495. <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.4.479>
- [4] Angeli, M.-G., Gasparetto, P., Menotti, R.M., Pasuto, A. and Silvano, S. (1996) A Visco-Plastic Model for Slope Analysis Applied to a Mudslide in Cortina D'ampezzo, Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **29**, 233-240. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjegh.1996.029.p3.06>
- [5] Angeli, M., Gasparetto, P. and Bromhead, E. (2004) Strength-Regain Mechanisms in Intermittently Moving Slides. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*, Rio de Janeiro, 28 June-2 July 2004, 689-696.
- [6] Stark, T.D. and Hussain, M. (2010) Shear Strength in Preexisting Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**, 957-962. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000308](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000308)
- [7] 卢远航, 王森, 熊然, 等. 红层滑坡滑带土结构强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(21): 177-181.
- [8] Eigenbrod, K.D. (2003) Self-Healing in Fractured Fine-Grained Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **40**, 435-449. <https://doi.org/10.1139/t02-110>
- [9] 缪海波. 三峡库区侏罗系红层滑坡变形破坏机理与预测预报研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [10] 缪海波, 殷坤龙, 王功辉. 库岸深层老滑坡间歇性复活的动力学机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2645-2653.
- [11] 闫琦玮. 红层滑坡土壤自愈的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国科学院山地灾害与环境研究所, 2021.
- [12] 闫琦玮, 李新坡, 何思明, 等. 典型红层滑坡滑带土自愈合效应试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3041-3048.
- [13] Jiang, S., Wang, Y., Tang, C., et al. (2019) Movement Mechanism of a Reactivated Slow-Moving Landslide Based on Ring Shear Test. *Geological Science and Technology Information*, **38**, 256-261.
- [14] 李小伟, 吴益平, 张荣, 等. 滑带土抗剪强度特性的环剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(27): 273-276, 282.
- [15] 王辉, 高东源, 吴博. 考虑剩余剪应力的滑带土强度再生试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 102-106.
- [16] 谈云志, 喻波, 刘云, 等. 重塑石灰土的强度恢复方法与机制初探[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 633-639.
- [17] Miao, H. and Wang, G. (2021) Effects of Clay Content on the Shear Behaviors of Sliding Zone Soil Originating from Muddy Interlayers in the Three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology*, **294**, Article 106380. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106380>
- [18] Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. and Nakamura, S. (2002) Strength Recovery from Residual State in Reactivated Landslides. *Géotechnique*, **52**, 683-686. <https://doi.org/10.1680/geot.52.9.683.38837>
- [19] 陈传胜, 张建敏, 文仕知. 基于有效垂直应力水平的滑带土强度参数适用性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1705-1711.
- [20] Ramiah, B.K., Purushothamaraj, P. and Tavane, N.G. (1973) Thixotropic Effects on Residual Strength of Remoulded Clays. *Indian Geotechnical Journal*, **3**, 189-197.
- [21] Stark, T.D., Choi, H. and McCone, S. (2005) Drained Shear Strength Parameters for Analysis of Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 575-588. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2005\)131:5\(575\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:5(575))
- [22] Carrubba, P. and Del Fabbro, M. (2008) Laboratory Investigation on Reactivated Residual Strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**, 302-315. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2008\)134:3\(302\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:3(302))

-
- [23] Bhat, D.R., Bhandary, N.P. and Yatabe, R. (2013) Experimental Study of Strength Recovery from Residual Strength on Kaolin Clay. *International Journal of Civil Engineering*, **7**, 67-73.
- [24] Bhat, D.R., Yatabe, R. and Bhandary, N.P. (2013) Study of Preexisting Shear Surfaces of Reactivated Landslides from a Strength Recovery Perspective. *Journal of Asian Earth Sciences*, **77**, 243-253.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.08.023>
- [25] Ikari, M.J., Carpenter, B.M., Vogt, C. and Kopf, A.J. (2016) Elevated Time-Dependent Strengthening Rates Observed in San Andreas Fault Drilling Samples. *Earth and Planetary Science Letters*, **450**, 164-172.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.036>
- [26] 李学, 宋晶, 赵洲, 等. 饱和细粒土孔隙结构定量表征[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 153-156.
- [27] 李学, 张鹏, 宋晶. 饱和细粒土固结过程中微观结构研究[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 180-186.
- [28] Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005) Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley and Sons.
- [29] Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice. *Soil Science*, **68**, 149-150.