

DOI: 10.11779/CJGE20230350

# 膨胀土残余强度的变速率效应及工程启示

鄢俊彪<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>\*1,2</sup>, 李甜果<sup>1,2</sup>, 周振华<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 残余强度对滑坡的变形、稳定性具有重要影响, 滑坡运动全过程中往往涉及到变速率问题, 具体表现为加速率和减速率作用。为研究膨胀土残余强度的加速率和减速率效应, 开展了一系列变速率环剪试验, 分析了膨胀土残余强度在不同加速率和减速率条件下的变化规律, 并讨论了残余强度的加速率和减速率效应在滑坡不同变形发展阶段中起的作用。结果表明: 加速率和减速率均对残余强度具有强化作用(正作用), 加速率对残余强度的强化作用比减速率的更显著, 在较大法向应力条件下残余强度的加速率和减速率效应更显著。残余强度的加速率和减速率效应是剪切速率变化导致剪切面状态变化的结果, 剪切面上土颗粒在变速率条件下须重新调整以适应新的剪切速率条件, 从而导致了残余强度变化。在滑坡运动全过程当中, 残余强度的加速率和减速率效应对滑坡向减速堆积状态演化有利。

**关键词:** 膨胀土; 残余强度; 速率效应; 环剪试验; 滑坡

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)07-1445-08

作者简介: 鄢俊彪(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事膨胀土的力学特性与灾害防治技术方面的研究工作。E-mail: yanjunbiao21@mails.ucas.ac.cn。

## Effects of variable shear rate on residual strength of expansive soils and its engineering enlightenment

YAN Junbiao<sup>1,2</sup>, KONG Lingwei<sup>1,2</sup>, LI Tianguo<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhenhua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The residual strength has a key impact on the deformation and stability of landslides. The whole process of landslide movement often involves the phenomenon of variable shear rates, which is manifested by the acceleration rate and deceleration rate. In order to investigate the effects of the acceleration and deceleration rates on the residual strength of expansive soils, a series of ring shear tests with variable shear rates are conducted to analyze the variation rules of residual strength of expansive soils under different acceleration and deceleration rates, and the role of the effects of the acceleration and deceleration rates of the residual strength at different deformation stages of landslides is discussed. The results show that both the acceleration rate and the deceleration rate have a strengthening effect on the residual strength (positive effects), and the strengthening effects of the acceleration rate on the residual strength are more significant than those of the deceleration rate. The effects of the acceleration and deceleration rates on the residual strength are more significant under the larger normal stress conditions. The effects of the acceleration and deceleration rates on the residual strength are considered to be the result of changes in the state of the shear plane caused by changes of the shear rate, and the soil particles in the shear plane must be readjusted to adapt to the new shear rate conditions under variable shear rate conditions, resulting in changes in the residual strength. During the whole process of landslide movement, the effects of the acceleration and deceleration rates on the residual strength are beneficial for the evolution of landslides towards a deceleration accumulation state.

**Key words:** expansive soil; residual strength; rate effect; ring shear test; landslide

## 0 引言

膨胀土是一种特殊土, 具有典型的胀缩性, 工程中通常将其归为不良地质问题<sup>[1]</sup>。膨胀土在国内外分布广泛<sup>[2]</sup>, 据统计, 中国已发现有 20 多个省市分布着膨胀土<sup>[3]</sup>。有关膨胀土的工程问题频发, 尤其是以边

坡失稳最为严重<sup>[4]</sup>, 如南水北调工程穿越了 387 km 膨胀土地段, 沿线存在 150 多处膨胀土渠道滑坡<sup>[5]</sup>。滑

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509901)

收稿日期: 2023-04-21

\*通信作者 (E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

坡的发生与剪切带土体强度密切相关,且滑坡通常发生大变形剪切破坏,意味着剪切带土体常常处于残余强度状态<sup>[6]</sup>,研究残余强度对评价膨胀土滑坡的变形和稳定性具有重要意义。

事实上,滑坡在运动过程中存在不同变形发展阶段,其运动速率往往是变化的,或是加速运动或是减速运动,即:在外界条件变化下或工程扰动情况下,边坡可能发生变形失稳,首次失稳过程中滑坡运动速率是从0(静止状态)逐渐增大,称为加速滑动过程;在经历长距离运动后,滑坡势必会逐渐稳定并堆积下来,滑坡滑动速率逐渐减小,称为减速堆积过程。因此,关注残余强度的加速率或减速率效应十分必要。

目前,环剪试验因能对试样进行连续大变形剪切作用而被广泛用于测试土体的残余强度。已有学者研究了各种影响因素作用下土体残余强度的演化规律,如含水率<sup>[7]</sup>、法向应力<sup>[8]</sup>、土粒组分<sup>[9]</sup>、剪切速率<sup>[10-13]</sup>、超固结比<sup>[14]</sup>、干湿循环条件<sup>[17]</sup>以及试验方式<sup>[18]</sup>。其中,剪切速率对残余强度的影响是研究的热点,通常认为剪切速率对强度具有强化作用(正作用)、弱化作用(负作用)和中性作用<sup>[19]</sup>。然而,滑坡运动过程通常并非恒速率,如何评估残余强度的加速率与减速率效应,是实际工程中需要明晰的问题。Duong等<sup>[20]</sup>研究了膨润土残余强度的加速率效应,但缺乏对减速率效应的研究。进一步厘清膨胀土残余强度的加速率与减速率效应,有助于对膨胀土滑坡运动全过程的认识。

本文以南阳膨胀土为研究对象,通过变速率环剪试验系统研究了加速率和减速率条件下膨胀土残余强度的演化特征,并讨论了残余强度的加速率与减速率效应在滑坡运动全过程中所起的作用。

## 1 材料和试验

### 1.1 试验膨胀土样基本物性参数

试验膨胀土样取自河南南阳内邓高速公路师岗收费站附近,通过探槽法采取块状土体样品,取样深度超过0.5 m,避免表层根植土的影响。试验土样呈黄褐色,含少量铁锰质结核,为一种典型的膨胀土<sup>[21]</sup>。通过室内基本物理力学试验获得的土体基本物理指标如表1所示,表明该膨胀土具有弱膨胀潜势,饱和度高,为硬塑黏土。

表1 试验膨胀土基本物性参数

Table1 Basic physical parameters of test expansive soils

天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	相对质量密度 $G_s$	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$
1.97	2.73	26.06	47.3	22.1	25.2	0.12	50

### 1.2 环剪试验

环剪试验因可对试样进行单方向连续剪切,能很好模拟滑坡过程土体的大变形剪切特性,是一种理想的测试土体残余强度方法<sup>[22]</sup>。环剪试验基本原理如图1所示,环形试样在扭矩的作用下被剪切,剪切盒中间留有微小缝隙以确保试样沿着该缝隙发生剪切破坏。试样剪切面上的剪应力和剪切位移可通过扭矩和剪切速率换算得到。试验所用环剪仪器为DTA-138型土工环剪仪,剪切盒外径150 mm、内径100 mm、高20 mm,试样剪切面积98.16 cm<sup>2</sup>,可实现的旋转剪切速率范围为0.0005°~50°/min。

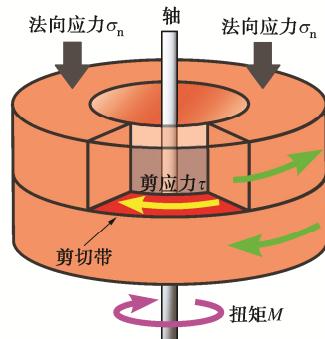


图1 环剪试验示意图

Fig. 1 Diagram of ring shear tests

试验所用的膨胀土为重塑土。实际上,采用重塑样进行环剪试验有两种备样方法,分别为控制重塑样干密度和含水率以及对泥浆样进行固结。采用对泥浆试样进行重新固结的制样方式的优势在于能够准确控制土体的固结压力,以使得更好单独研究剪切速率对土体残余强度作用,该固结方法在以往研究中也经常被使用<sup>[15]</sup>。参考ASTMD6467-21规范<sup>[16]</sup>中所建议的环剪试验备样方法,本研究中采用对泥浆试样进行固结的方式制备重塑样,并经过试验发现75%液限含水率的试样在固结过程中不易被挤出剪切盒,因此试验中统一采用75%液限值试样即含水率为35.5%。试样首先分别在50, 100, 150, 200 kPa的压力下进行固结,固结过程中试样充分排水,当每小时竖向位移变化不大于0.005 mm时,即认为试样已固结稳定,固结稳定后保持法向应力不变,以0.1°/min(0.109 mm/min)的剪切速率对试样进行首次剪切至残余强度,发现膨胀土经历大约20~30 mm剪切位移便能够达到稳定的残余强度阶段。以此为基础,首次剪切时

间统一设置为 5 h (剪切位移为 32.7 mm), 为研究残余强度的加速率与减速率效应, 首次剪切至恒定残余强度后开始进行变速率剪切, 加速率或减速率定义为剪切速率增量  $\Delta v_s$  与时间增量  $\Delta t$  之比:

$$\alpha = \frac{\Delta v_s}{\Delta t} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为加速率 (正值) 或减速率 (负值);  $v_s$  为剪切速率;  $t$  为时间。

Mazzanti 等<sup>[23]</sup>的调查结果表明滑坡的加速率从 0.83 到 82.11 mm/h<sup>2</sup> (0.022 mm/min<sup>2</sup>)。本研究中环剪试验的加速率和减速率分别设置为 0.016, 0.032, -0.016, -0.032 mm/min<sup>2</sup>。以 0.109 mm/min 的剪切速率首次对试样剪切至稳定的残余强度状态后再按如图 2 所示的试验方案开展加速率和减速率环剪试验, 每组加速率或减速率环剪试验均设置 5 种不同的剪切速率,  $\pm 0.016 \text{ mm/min}$  加 (减) 速率环剪试验方案中剪切速率范围为 0.109~4.905 mm/min,  $\pm 0.032 \text{ mm/min}$  加 (减) 速率环剪试验方案中剪切速率范围为 0.109~9.701 mm/min, 每种速率剪切时间保持为 1 h, 剪切速率分级同增量加速或减速。试样在整个剪切过程中允许排水, 根据剪切速率不同, 排水条件不同, 慢速率条件下土体排水条件较快速率条件下更好。当试验结

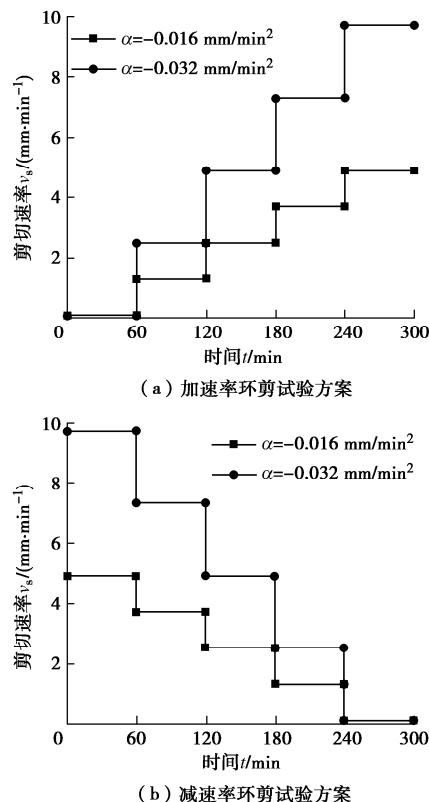


图 2 加速率和减速率环剪试验方案

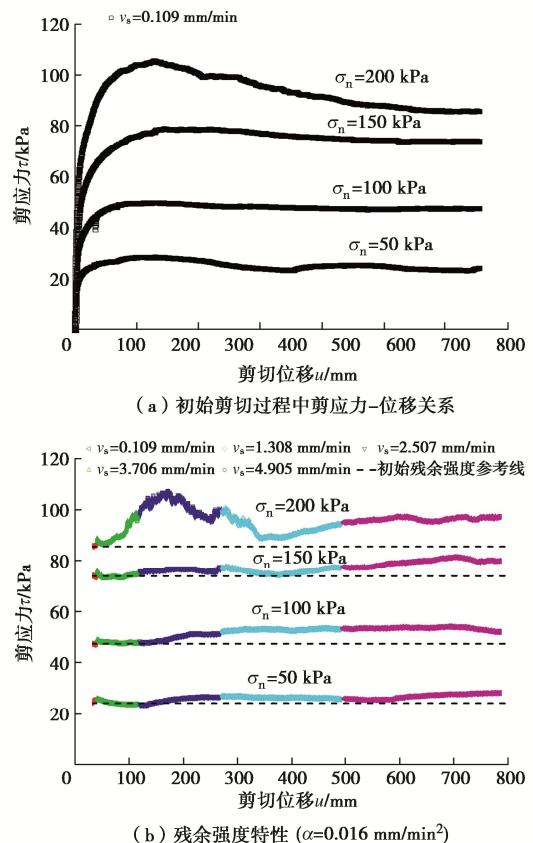
Fig. 2 Ring shear test schemes with different acceleration and deceleration rates

束后测试土体的干密度和含水率, 对不同变速率条件下试样的测试结果取平均值, 获得试样在 50, 100, 150, 200 kPa 压力下固结后的干密度分别为 1.36, 1.44, 1.48, 1.51 g/cm<sup>3</sup>; 含水率分别为 32.8%, 29.9%, 28.8%, 28.1%, 其中试验后含水率变低是因固结过程中试样进行了排水作用所致。

## 2 膨胀土残余强度的变速率效应

### 2.1 膨胀土残余强度的加速率与减速率响应特征

不同法向应力  $\sigma_n$  和剪切加 (减) 速率条件下膨胀土的剪应力-位移关系如图 3 所示。本文重点关注膨胀土的残余强度特性, 首次剪切过程中膨胀土的剪应力-位移关系曲线类似, 简洁起见, 图 3 仅展示了剪切加速度为 0.016 mm/min<sup>2</sup> 条件下的首次剪切过程, 首次剪切过程的剪切速率恒为 0.109 mm/min。图 3 表明膨胀土在首次剪切过程中表现为明显的软化现象 (图 3 (a)), 这主要是由于首次剪切过程中土体剪切面已形成, 土体紧密结合状态的结构被破坏, 土体单元从无序排列状态演化至有序定向排列, 导致了剪切强度的降低。理论上, 由于首次剪切过程试验条件一致, 不同加速率或减速率条件下获得的初始残余强度 (即首次剪切过程中的残余强度) 也应该相一致。图 3 中不同剪切加速率和减速率条件下膨胀土初始残余强度相差甚微, 表明残余强度试验结果准确可靠。



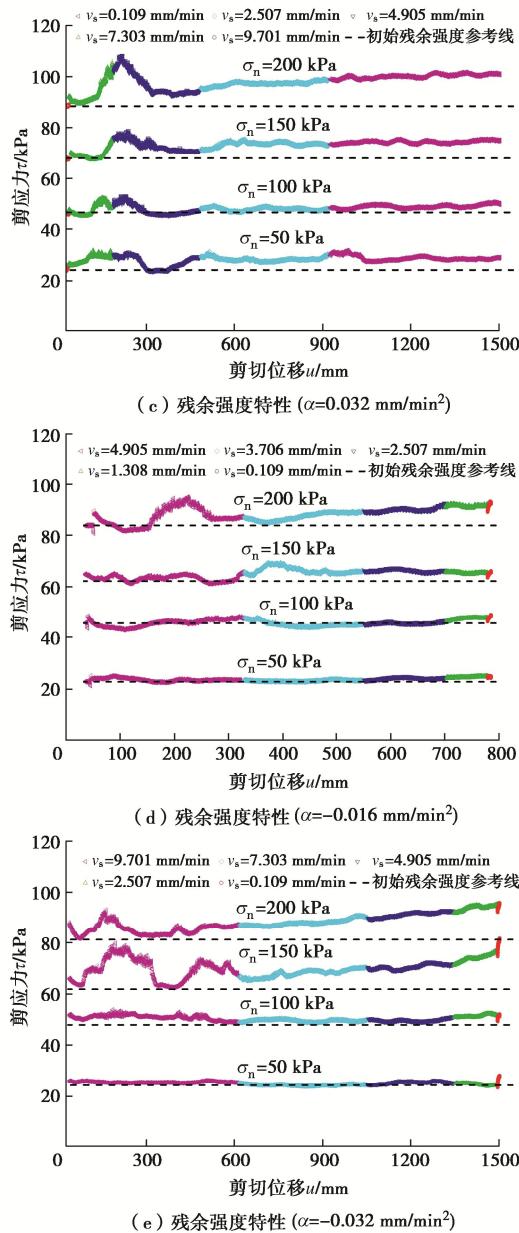


图3 不同加速率和减速率条件下膨胀土环剪试验结果

Fig. 3 Ring shear test results of expansive soils under different acceleration and deceleration rates

对比不同剪切变速率条件下膨胀土的残余强度特性, 剪切速率对残余强度具有强化作用(正作用), 变速率条件下残余强度总体比初始残余强度更大。残余强度的速率强化作用是由于随着剪切速率的增大, 土体受剪切时除了需要克服滑移阻力外, 还需要克服更多滚动阻力与换位阻力。与此同时, 剪切速率增大也可能导致土颗粒的破碎<sup>[24]</sup>, 土颗粒本身强度比颗粒间强度要大, 这也会诱导残余强度的增大。然而, 伴随着剪切速率的增大, 土体在剪切过程中逐渐从排水条件向不排水条件过渡, 导致孔隙水压力增大及剪切强度减小, 这正是局部剪切过程中, 残余强度呈现下降变化特征的缘由。

从图3还可以看出, 随着剪切速率的连续变化, 土体的残余强度波动幅度较大, 尤其是在较大法向应力条件下更为显著。究其原因, 主要是随着剪切速率的增大或减小, 土体剪切面状态发生变化所造成, 在恒定剪切速率条件下, 土颗粒排列方式不断调整以适应当前剪切速率状态, 当剪切速率变化时, 土颗粒排列方式势必重新调整以适应新的剪切速率状态, 该种颗粒排列状态的变动演化重组导致残余强度的不断变化。在更大的法向应力条件下, 剪切面状态的调整更为困难, 由此造成剪切强度变化幅度也更大。在加速率或减速率更大的工况条件下, 如图3(c), (e)所示, 残余强度的速率效应更为显著, 也即残余强度随速率变化而增长的幅度更大且波动幅度更大, 这一方面是由于随着加速率增大, 剪切速率整体上也随之增大, 速率的正效应更为显著; 另一方面是加速率或减速率增大意味着速率变化更快, 由速率变化造成的剪切面状态变化效应更显著, 也就导致了残余强度波动幅度更大。此外, 残余强度的速率效应随法向应力水平增大而更加显著, 在低法向应力水平下, 无论是加速率还是减速率工况, 残余强度几乎稳定不变, 其速率效应均不够显著, 这同样是在更大法向应力下, 剪切面状态变化时所调整的阻力更大所致。

对比残余强度的加速率效应和减速率效应, 表明在减速率作用下残余强度变化相对更小, 尤其是在较低法向应力条件下更是如此, 也即残余强度的减速率效应与加速率效应相比更不显著。究其原因, 在加速率条件下, 剪切速率对残余强度的强化作用更为显著, 不断增大的剪切速率使得土颗粒间产生更多滚动阻力与换位阻力, 颗粒破碎现象也更为突出, 致使加速率条件下残余强度变化更大。图3也表明在不同剪切加速率和减速率条件下, 尽管剪切速率相同, 膨胀土的残余强度性状也不同, 如加速率分别为0.016, 0.032 mm/min<sup>2</sup>工况条件下, 剪切速率同为2.507 mm/min时的残余强度存在较大差异, 如图3(b), (c)所示; 另外加(减)速率分别为0.016, -0.016 mm/min<sup>2</sup>条件下, 剪切速率同为4.905 mm/min时的残余强度也存在差异, 如图3(b), (d)所示, 这些都表明加速率和减速率均会影响膨胀土的残余强度, 不仅体现在剪切速率大小方面, 也体现在剪切速率变化方面。

初始剪切过程中存在稳定的残余强度值, 其几乎不随剪切位移而变化, 称之为初始残余强度 $\tau_{r0}$ , 如图3所示。将变速率条件下的残余强度 $\tau_r$ 比上初始残余强度值可直观观察变速率对残余强度的相对影响, 如图4所示。从图4可直观看出, 剪切速率对残余强度的强化作用, 残余强度比 $\tau_r/\tau_{r0}$ 总体上大于1, 最大可达1.30~1.35; 残余强度比同时呈现出明显的波动性,

表明剪切速率变化对剪切面状态影响显著。加速率或减速率越大(图4(b), (d)), 残余强度比总体越大, 表明加速率或减速率大小对残余强度影响显著。可见, 不论在何种变速率条件下, 残余强度比总体上呈现增大趋势, 加速率和减速率对残余强度均具有强化作用。

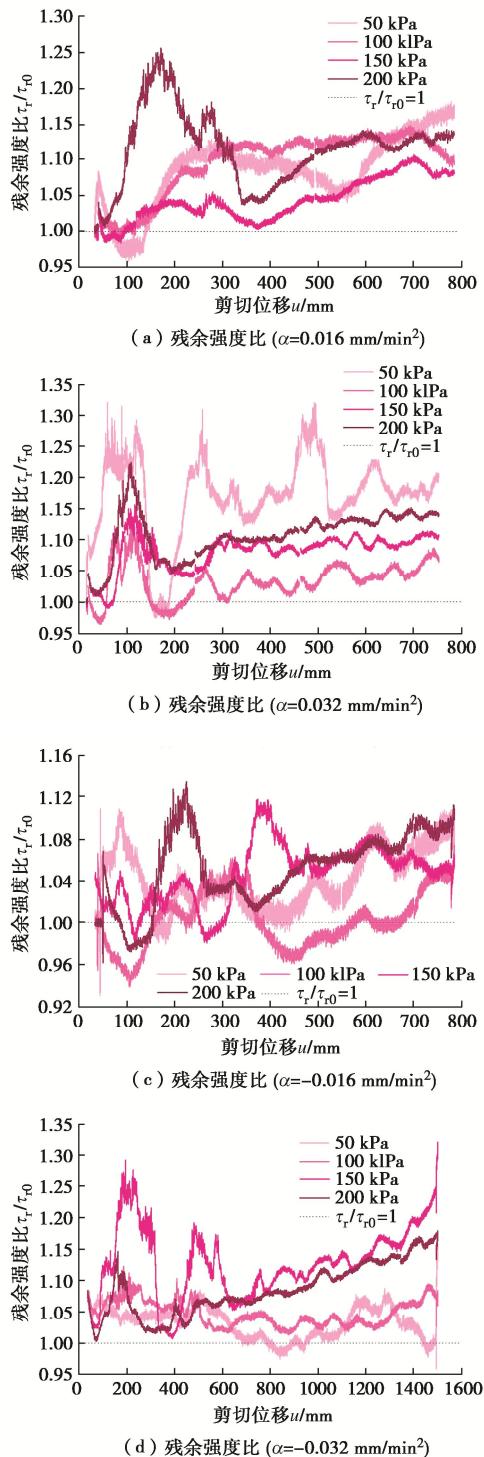


图4 不同加速率和减速率条件下膨胀土的残余强度比

Fig. 4 Residual strength ratios of expansive soils under different acceleration and deceleration rates

为单独分析不同剪切速率作用下残余强度变化规律, 考虑到残余强度局部波动幅值较大, 根据图4计

算出不同剪切速率下的平均残余强度比, 如图5所示。

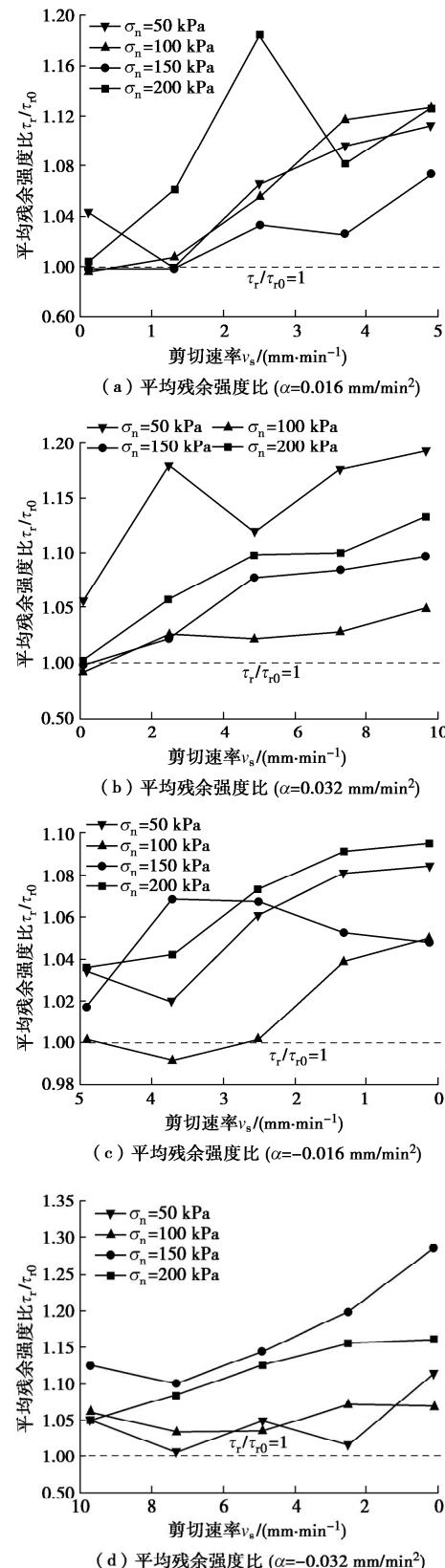


图5 不同剪切速率下膨胀土平均残余强度比

Fig. 5 Average residual strength ratios of expansive soils under different shear rates

图5表明在加速率条件下, 平均残余强度比随着剪切速率增大总体呈现增大趋势, 局部出现减小; 而

在减速率条件下, 平均残余强度比则随着剪切速率减小总体上也呈现增大趋势, 部分情况下也出现减小; 说明只要剪切速率发生变化, 均可能造成剪切强度总体上呈增大趋势。推测其缘由, 主要是剪切速率变化必然引起剪切面上土颗粒重新调整以适应新的剪切速率条件, 从而导致剪切强度发生变化。图 5 还同时表明, 尽管同样的剪切速率条件, 在不同加速率或减速率情况下土体残余强度比仍存在较大差异, 进一步印证了加速率和减速率效应不可忽略。

## 2.2 加速率与减速率作用下膨胀土的剪切面特征

土体的残余强度与剪切面特征密切相关。通过对环剪试验结束后土体剪切面进行扫描电镜试验, 观察到剪切面微观特征如图 6 所示。图 6 (a), (b) 是在法向应力为 150 kPa 水平下, 不同变速率条件下的剪切面微观特征, 图 6 (c), (d) 是在加速率  $-0.016 \text{ mm/min}^2$  条件下不同法向应力水平下的剪切面微观特征。图 6 表明土体经历大位移剪切变形后, 剪切面上颗粒定向性显著, 能观察到明显擦痕, 且剪切面相对光滑平整, 这是土体强度从峰值衰减为残余强度的内因。对比不同变速率条件下土体的剪切面特征, 发现在更大的剪切速率变化情况下, 土体剪切面上擦痕更为显著, 且擦痕深度更深 (图 6 (b)), 更深的擦痕意味着土体剪切面相对更粗糙且强度更大, 这可能是变速率大小对残余强度强化效应的主要原因之一。图 6 (c), (d) 表明在更大的法向应力条件下, 剪切面上擦痕也更为显著, 这同样说明土体在大法向应力条件下加速率和减速率效应更为显著。此外, 剪切面上擦痕更深意味着剪切带更厚, 土体在剪切过程中黏滞作用更明显, 导致剪切阻力更大, 残余强度呈现强化效应。

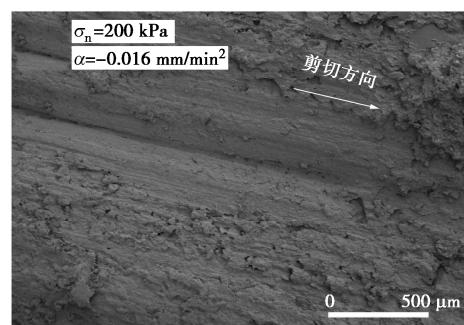
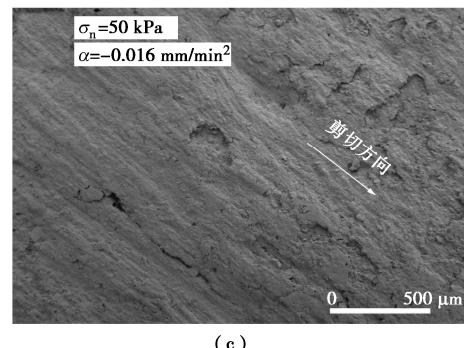
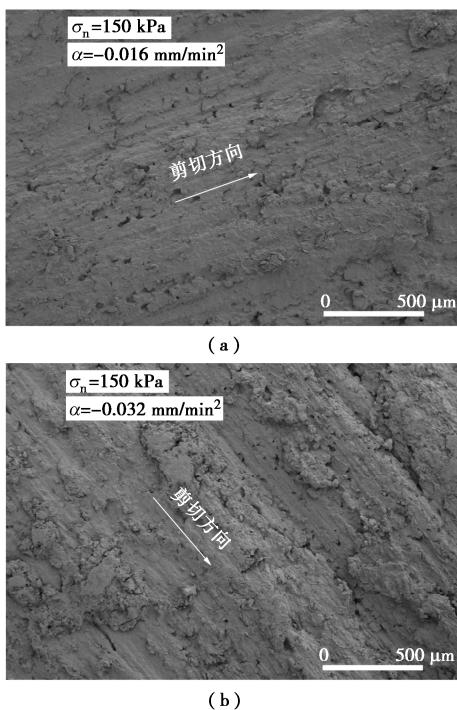


图 6 膨胀土剪切面微观结构特征

Fig. 6 Microstructural characteristics of shear zone of expansive soils

## 3 残余强度的变速率效应对滑坡运动过程的启示

实际工程中, 滑坡无论是在加速滑动、减速堆积的变形发展阶段, 还是在古滑坡复活、蠕变条件下, 抑或是膨胀土边坡处于长期、反复变形中, 滑坡的滑动变形速率均不同, 或加速运动或减速运动。本研究表明残余强度存在变速率效应, 且该效应急总体上呈现为正效应, 即土体在加速变形或减速变形过程中, 残余强度总体上表现为增大趋势。

以典型的滑坡运动-堆积变形阶段为例, 分析残余强度的变速率效应在滑坡运动过程中的作用。边坡首次失稳时, 变形速率从 0 开始逐渐增大, 此时加速率效应发挥作用, 导致残余强度呈增大趋势, 这可能会促使滑坡运动变缓, 运动加速率逐渐变小, 直至演化为减速率运动状态, 此时减速率效应开始起作用, 尽管减速率对残余强度的强化作用比加速率的强化作用相对更小, 尤其是在较低法向应力条件下, 但减速率对残余强度的强化作用仍能够促使滑坡进一步减速, 直至堆积下来。因此, 残余强度的变速率效应对滑坡运动的减速堆积具有一定促进作用。特别需要说明的是, 尽管滑坡运动过程中受到地形地貌因素的控制, 比如较陡地形条件下滑坡一般做加速运动, 而较缓地形条件下滑坡运动缓慢并趋于停止。但是, 在滑坡运动-堆积全过程中速率变化对残余强度的影响以及促

进滑坡减速堆积的正反馈作用应当给予关注考虑。

作为一种对气候变化极敏感的高塑性黏土, 膨胀土在大气影响下往往经历反复的干湿循环作用, 进而使得膨胀土次生裂隙发育, 土体结构性被破坏, 强度显著降低, 导致膨胀土边坡易于沿着剪切带发生首次变形失稳, 剪切带土体在大变形情况下达到残余强度状态。Bishop等<sup>[25]</sup>的研究结果表明残余强度受结构性影响较小, 意味着重塑土的残余强度一定程度上可代表原状土的残余强度。由于大气影响深度较小, 通常在2~4 m范围内, 导致膨胀土边坡的失稳模式以浅层性为特征<sup>[26-27]</sup>, 也就意味着膨胀土滑坡运动过程中滑带所处的应力环境为低应力水平。而本研究结果也表明在低法向应力条件下, 残余强度的加速率和减速率正效应相对不明显, 也即浅层膨胀土滑坡运动过程中, 这种残余强度的加速率和减速率效应对促进该类滑坡的减速堆积作用不显著, 这可能是膨胀土边坡浅层失稳长期且频繁发生的因素之一。

膨胀土滑坡的滑动面埋深通常表现为前缘和后缘较浅, 中部相对深<sup>[26]</sup>, 而边坡坡脚位置处往往存在应力集中现象, 导致坡脚处易于首先发生小规模的更浅层滑动。坡脚处应力水平比滑坡中段更低, 残余强度的加速率和减速率效应更为不显著, 即滑坡以变速率滑动时坡脚处的残余强度强化效应较滑坡中段更微弱, 坡脚处更易于变形, 这可能是促进膨胀土边坡牵引式变形破坏的原因之一。

关于膨胀土滑坡的其他特性如季节性和方向性, 主要是由大气影响所造成, 季节变化强烈时期以及阳坡面干湿循环作用强烈。而干湿循环促进了膨胀土边坡的浅层失稳, 浅层失稳模式下滑面土体残余强度的加速率和减速率效应又更不显著, 该效应对膨胀土滑坡的减速堆积作用甚微, 滑坡更容易长期发生变形失稳。

总的来说, 膨胀土边坡的失稳特性使得变速率对残余强度的强化作用不显著, 难以很好促进膨胀土滑坡的减速堆积作用, 这也从另一个侧面反映出膨胀土边坡易发生变形失稳破坏。

## 4 结 论

本研究通过变速率环剪试验探讨膨胀土残余强度的加速率和减速率效应, 并分析该效应在滑坡不同变形发展阶段中的作用, 得到以下3点结论。

(1) 加速率或减速率对膨胀土残余强度均产生了强化作用, 更大的加速率和减速率条件下膨胀土的残余强度增大幅度更大, 加速率对残余强度的强化作用比减速率的更显著, 更大法向应力条件下加速率和减

速率效应也更显著。

(2) 加速率和减速率对残余强度的影响是由于剪切速率变化引起了剪切面状态特性发生变化所引起, 通常表现为剪切面上土颗粒重新调整以适应新的剪切速率状态, 致使其剪切强度发生变化。

(3) 在滑坡运动全过程当中, 残余强度的变速率强化效应促使了滑坡趋于减速堆积状态, 但浅层膨胀土滑坡运动全过程中变速率效应相对不显著。

## 参考文献:

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161. (KONG Lingwei, CHEN Zhenghan. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161. (in Chinese))
- [2] KATTI D R, SRINIVASAMURTHY L, KATTI K S. Molecular modeling of initiation of interlayer swelling in Na-montmorillonite expansive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(9): 1385-1395.
- [3] 吴珺华, 袁俊平, 卢廷浩. 非饱和膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 363-367. (WU Junhua, YUAN Junping, LU Tinghao. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 363-367. (in Chinese))
- [4] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15. (BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15. (in Chinese))
- [5] NIU X Q. The first stage of the middle-line south-to-north water-transfer project[J]. Engineering, 2022, 16: 21-28.
- [6] YAN J B, ZOU Z X, MU R, et al. Evaluating the stability of Outang landslide in the Three Gorges Reservoir Area considering the mechanical behavior with large deformation of the slip zone[J]. Natural Hazards, 2022, 112(3): 2523-2547.
- [7] LIAN B Q, PENG J B, WANG X G, et al. Moisture content effect on the ring shear characteristics of slip zone loess at high shearing rates[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(2): 999-1008.
- [8] 范志强, 唐辉明, 谭钦文, 等. 滑带土环剪试验及其对水库滑坡临滑强度的启示[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1698-1706. (FAN Zhiqiang, TANG Huiming, TAN Qinwen, et al. Ring shear tests on slip soils and their enlightenment to critical strength of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2019, **41**(9): 1698-1706. (in Chinese))
- [9] MIAO H B, WANG G H. Effects of clay content on the shear behaviors of sliding zone soil originating from muddy interlayers in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Engineering Geology, 2021, **294**: 106380.
- [10] ZHU R S, XIE W L, LIU Q Q, et al. Shear behavior of sliding zone soil of loess landslides via ring shear tests in the South Jingyang Plateau[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(6): 244.
- [11] LIAN B Q, WANG X G, PENG J B, et al. Shear rate effect on the residual strength characteristics of saturated loess in naturally drained ring shear tests[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, **20**(10): 2843-2856.
- [12] MIAO H B, WANG G H. Shear rate effect on the residual strength of saturated clayey and granular soils under low- to high-rate continuous shearing[J]. Engineering Geology, 2022, **308**: 106821.
- [13] KANG X, WANG S, WU W, et al. Residual state rate effects of shear-zone soil regulating slow-to-fast transition of catastrophic landslides[J]. Engineering Geology, 2022, **304**: 106692.
- [14] 孙 涛, 洪 勇, 栾茂田, 等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究 [J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 2000-2004, 2010. (SUN Tao, HONG Yong, LUAN Maotian, et al. Shear strength behavior of overconsolidated clay in ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2000-2004, 2010. (in Chinese))
- [15] 周葆春, 王江伟, 单丽霞, 等. 不同膨胀潜势等级的膨胀土残余强度环剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(6): 1325-1331. (ZHOU Baochun, WANG Jiangwei, SHAN Lixia, et al. Torsional ring shear tests on residual strength of low, medium, high swelling soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(6): 1325-1331. (in Chinese))
- [16] Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Fine-Grained Soils: ASTM D6467-21[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- [17] 谢辉辉, 许振浩, 刘清秉, 等. 干湿循环路径下弱膨胀土峰值及残余强度演化研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊 1): 245-252. (XIE Huihui, XU Zhenhao, LIU Qingbing, et al. Evolution of peak strength and residual strength of weak expansive soil under drying-wetting cycle paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 245-252. (in Chinese))
- [18] 王 顺, 项 伟, 崔德山, 等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(10): 2967-2972. (WANG Shun, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 2967-2972. (in Chinese))
- [19] KIMURA S, NAKAMURA S, VITHANA S B, et al. Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range[J]. Landslides, 2014, **11**(6): 969-979.
- [20] DUONG N T, SUZUKI M, VAN HAI N. Rate and acceleration effects on residual strength of Kaolin and Kaolin-bentonite mixtures in ring shearing[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(5): 1153-1172.
- [21] YAN J B, KONG L W, WANG J T. Evolution law of small strain shear modulus of expansive soil: from a damage perspective[J]. Engineering Geology, 2023, **315**: 107017.
- [22] 洪 勇, 孙 涛, 栾茂田, 等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 628-634. (HONG Yong, SUN Tao, LUAN Maotian, et al. Development and application of geotechnical ring shear apparatus: an overview[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 628-634. (in Chinese))
- [23] MAZZANTI P, BOZZANO F, CIPRIANI I, et al. New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study[J]. Landslides, 2015, **12**(1): 55-68.
- [24] 何建乔, 魏厚振, 孟庆山, 等. 大位移剪切下钙质砂破碎演化特性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 165-172. (HE Jianqiao, WEI Houzhen, MENG Qingshan, et al. Evolution of particle breakage of calcareous sand under large displacement shearing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 165-172. (in Chinese))
- [25] BISHOP A W, GREEN G E, GARGA V K, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. Géotechnique, 1971, **21**(4): 273-328.
- [26] 殷宗泽, 徐 彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 454-459. (YIN Zongze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 454-459. (in Chinese))
- [27] LU J F, KONG L W, LIU X Y, et al. Multihazard risk model for reliability analysis of expansive soil landslide based on T-S fuzzy logic[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2022, **8**(2): 04022008.