

文章编号: 1005-0523(2024)04-0021-09



加卸载条件下红黏土强度变形与能量耗散规律研究

刘明星^{1,2}, 徐伊健^{1,2}, 卢苇红^{1,2}, 刘恩龙³

(1. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】为掌握江西红黏土在直剪加卸载作用下的变形特性以及能量耗散规律。【方法】对江西红黏土进行了剪切加卸载条件下的直剪试验研究, 并对其强度变形特性和能量耗散规律进行了分析。【结果】获取了红黏土在直剪加卸载条件下不同法向应力作用时的剪切应力、剪切位移、法向位移和能量耗散等力学行为的变化结果。【结论】红黏土在直剪加卸载作用下, 低法向应力时耗散能增加的速率相较于高法向应力的工况要低。总体来说, 耗散能与法向应力呈正相关关系, 法向应力越大, 塑性变形消耗的能量越大。随着剪切加卸载次数的增加, 耗散能也在逐渐增加。红黏土在加卸载直剪试验过程中整体呈现为剪缩变形, 剪切卸载阶段法向位移增大, 再加载阶段法向位移先增加后减少, 产生剪胀变形, 当剪切位移达到卸载前的值时剪胀结束。剪切加卸载会增加红黏土的法向位移, 增大剪缩量, 卸载作用对法向位移的影响随着法向应力的增加逐渐减少。

关键词: 红黏土; 剪切加卸载; 强度变形特性; 能量耗散

中图分类号: TU446

文献标志码: A

本文引用格式: 刘明星, 徐伊健, 卢苇红, 等. 加卸载条件下红黏土强度变形与能量耗散规律研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 21-29.

Study on the Strength and Deformation Properties and the Energy Dissipation Law of Red Clay Subjected to Loading and Unloading of Shearing

Liu Mingxing¹, Xu Yijian¹, Lu Weihong¹, Liu Enlong²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-mitigation and Emergency Management;
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: 【Objective】To master the deformation characteristics and the law of energy dissipation of Jiangxi red clay under the condition of shear loading-unloading. 【Methods】The direct shear loading-unloading tests are finished, and the strength and deformation properties and the law of energy dissipation are studied. 【Results】The mechanical behavior of red clay under various normal stresses, including shear stress, shear displacement, normal displacement and energy dissipation, are obtained. 【Conclusion】The dissipation energy increase rate under shear loading and unloading is comparatively lower for low normal stress as compared to high normal stress. On the whole, the dissipation of energy has positive correlation with the normal stress, and the greater the normal stress, the greater the energy consumed by the plastic deformation. The dissipated energy under the same unload-

收稿日期: 2024-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108319); 江西省自然科学基金项目(20224BAB214069)

ing conditions increases with the increasing of numbers of unloading the red clay exhibits shear shrinkage during unloading and loading in a direct shear test. Normal displacement increases during the unloading stage, followed by an increase and then decrease during reloading, resulting in shear expansion deformation. Shear expansion ends when the shear displacement reaches its value before unloading. Shear unloading will increase the normal displacement and the shear shrinkage of red clay, and this effect of unloading on the normal displacement becomes weaker with the increase of normal stress.

Key words: red clay; shear loading-unloading; strength and deformation properties; energy dissipation

Citation format: LIU M X, XU Y J, LU W H, et al. Study on the strength and deformation properties and the energy dissipation law of red clay subjected to loading and unloading of shearing[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 21-29.

【研究意义】由于高速公路以及高速铁路等交通工程的大力建设和红黏土在南方地区的广泛分布,无法避免地将红黏土作为路基材料。红黏土作为一种南方特有的土壤,有着高含水率、高液限和高孔隙比的特性,主要分布在我国的湖南、广东、江西等地区。不同地区的红黏土也会因为其形成过程导致其成分有所差异,红黏土的成分与其工程特性又有着密切关系,这种差异会导致不同地区的红黏土在工程性质上截然不同。而对于黏土来说,由于抗压强度比抗剪强度高,所以导致土体破坏的原因大多是剪切破坏。而实际工程中的荷载不会处于一个恒定的状态,例如车辆产生的交通荷载;施工开挖中产生的动荷载。这些都可以看作是对土体进行加卸载的过程。因此,研究红黏土在加卸载条件下的剪切力学特性具有重要的现实意义,将为红黏土路基的设计建造和运营维护提供理论指导,从而降低红黏土路基产生破坏和稳定性问题带来的灾害和损失。

【研究进展】近年来国内外部分学者针对加卸载条件下黏土和其他岩土材料的变形演化与能量耗散规律进行了一定的研究。Dang等^[1]考虑剪切过程中试样的旋转对结果的影响,得出了倾斜度随着法向荷载的增加而增加,随着剪切速率的增加而减少的结论。Soonkie等^[2]使用改良剪切试验设备,对非饱和土壤进行多级直剪试验,得出非饱和土的基质吸力与摩擦角具有一定规律,在吸力值低时,与基底吸力有关的摩擦角大于有效摩擦角,随着吸力的增加,摩擦角减小。Thian等^[3]通过研究近海黏土在不同超固结比下的直剪加卸载变形特征,得到了随着循环次数与应力幅值成反比,与孔隙水压成

正比的规律。章为民等^[4]通过固结试验对两种重塑黏土的加卸载全过程进行对比,得到了固结系数以及回弹系数是有规律的循环变化。彭木文等^[5]对红黏土进行固结不排水循环剪切试验,发现了剪切过程中胶结强度不断损失,摩擦强度代替胶结强度进行抗剪的结论。陈勇等^[6]通过等向固结应力下反复加卸载试验,发现了前期固结压力进行加卸载会产生不可恢复的塑性变形,并结合曲线特点,建立加卸载次数及应力状态的数学模型。曹宇春等^[7-8]针对粗砂以及粉砂进行加卸载直剪试验,得到了粗砂和粉砂峰值内摩擦角与最大剪胀角之间的线性关系;崔宏环等^[9]进行了不同温度、围压以及含水率条件下的三轴循环加卸载试验,通过计算加卸载下滞回环的面积定义了耗散能,发现耗散能与损伤变量成正比关系。何亮等^[10]根据能量耗散原理建立了圆度损伤模型,得出了剪切条件下,粗粒土的强度与圆度损伤成反比的结论。Zhang等^[11]通过PFC2D颗粒流模拟与直剪试验,研究了节理岩石的能量耗散与微观损伤演变的规律,结果表明在剪切作用下节理呈现4个耗散趋势,耗散能量增量的演变与微裂纹的发展完全一致。

【创新特色】综上所述,学者针对砂土、一般黏土和岩石等进行了直剪或三轴剪切条件下的加卸载力学特性研究,取得一定成果。但是针对红黏土的加卸载力学特性研究鲜有发现,红黏土在加卸载条件下的强度变形特性还不是特别清楚,尤其是红黏土在加卸载变形过程中的能量耗散规律仍不清楚。因此,针对红黏土在剪切条件下的加卸载变形破坏规律进行直剪试验研究,并从能量角度对其能量耗散规律进行分析,将显得必要和紧

迫。**【关键问题】**本文通过直剪加卸载试验研究,分析江西红黏土在不同加卸载次数下的强度变形特性和加载-卸载过程中能量的演化规律,结论对于实际工程将具有一定的指导意义。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验所用红黏土取自江西省南昌市,取样深度

约为2~3 m。土体以褐红色为主,夹杂少量淡黄色。其液性指数为0.6,塑性指数为24.1,土体基本物理特性如表1所示。

将红黏土放入烘箱中,使其在108℃下烘干24 h,用碎土锤碾碎后过2 mm筛备用。土样含水率控制为最优含水率19.3%,利用土工试验规范规定公式计算达到最大干密度所需土体质量。将土压入尺寸为 $\phi 70\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的环刀内得到试样土样。

表1 江西红黏土基本物理特性

Tab.1 Basic physical properties of Jiangxi red clay

Specific gravity of particles	Natural moisture content/%	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Optimum moisture content/%	Maximum dry density/(g/cm ³)
2.545	26.7	51.2	27.1	19.3	1.62

1.2 试验方法

本文采用了直剪加卸载试验对江西红黏土的加卸载强度变形特性进行研究。试验仪器为浙江吉欧科技有限公司制造的ADSS全自动直剪单剪仪。实验参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)规定的直剪方案,制定了本文的试验方法。对试样施加法向应力,并固结10 min。法向应力设置4组,分别为100,200,300,400 kPa。然后保持法向应力不变,以0.8 mm/min的剪切速率对试样进行剪切。在剪切过程中,分别设置水平剪切卸载0次,1次,2次,3次,4次5种剪切工况。卸载时,将水平剪切应力设置为0进行卸载;加载时,仍以0.8 mm/min的剪切速率进行剪切。为了更好地获取加卸载过程的试验数据,对于卸载试验的工况数据1 s记录1次,而未进行卸载的工况数据每10 s记录1次。当剪切位移达到6 mm时,试验结束。

2 江西红黏土加卸载力学特性分析

2.1 未卸载时红黏土变形规律

未进行卸载时,江西红黏土在不同法向应力下的剪切应力-剪切位移关系曲线如图1所示。由图1可看出,不同法向应力下的江西红黏土的应力-位移曲线均呈现应变硬化的特性,剪应力均没有出现峰值。本次试验统一取6 mm处剪应力作为抗剪强度,可以发现随着法向应力的增大,剪切强度和变形模量均逐渐增大。产生这种现象的原原因是法向应力较小时,不会导致红黏土在剪切过程中产生较大的剪缩变形。土颗粒之间的孔隙较大,有效应

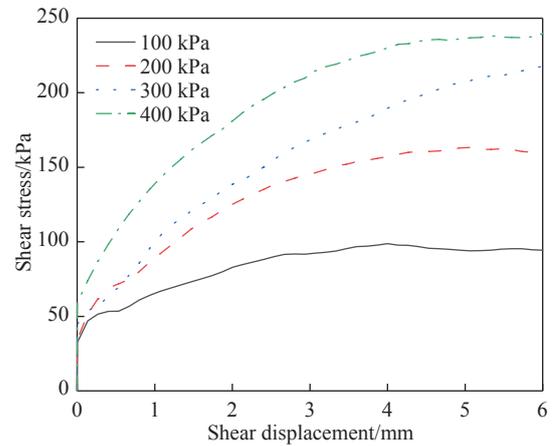


图1 不同法向应力下剪切应力和剪切位移关系曲线
Fig. 1 Shear stress-shear displacement curves under different normal stresses

力接触点较少;而在大法向应力工况下,红黏土在剪切过程中会产生较大的剪缩变形,土颗粒与颗粒之间的接触点也相对较多。因此,在法向应力较小时,产生的剪切应力也较小。

如图2所示为不同法向应力下法向位移与剪切位移关系曲线,其中法向位移为正代表方向向下,即剪缩;法向位移为负代表方向向上,即剪胀。可以看到,红黏土试样主要发生剪缩变形,随着剪切位移增加,剪缩位移整体上逐渐增大。但是当法向应力较小时,可以看到在剪切过程后期,法向位移表现出了一定的剪胀情况。随着法向应力的增加,相同剪切位移处的法向变形逐渐增大,即剪缩变形与法向应力呈正相关增加。这说明红黏土除了受法向荷载作用会产生压密外,剪切荷载的施加会使

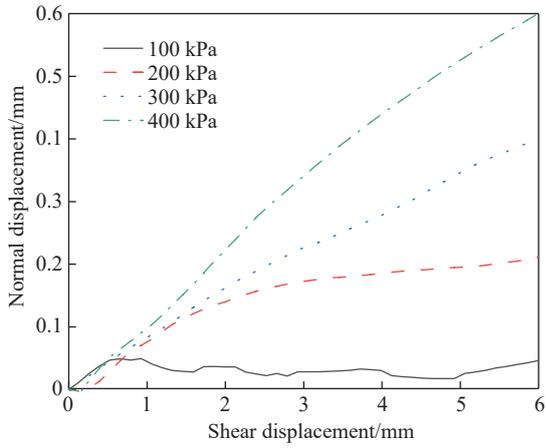


图2 不同法向应力下法向位移和剪切位移关系曲线
 Fig. 2 Normal displacement-shear displacement curves under different normal stresses

红黏土不断变密实,法向应力越高剪切荷载越高,从

而剪缩密实程度越高。但是在低法向应力下剪切密实的过程会较早结束,进入到剪胀变形破坏过程。

2.2 加卸载条件下红黏土变形规律

图3为4次加卸载工况时不同法向应力下的剪应力-剪切位移关系曲线。在低法向应力的工况下,红黏土的剪应力-剪切位移曲线在加载初期出现了应力稳定的屈服“台阶”。这是因为,低法向应力作用下,试样在固结阶段压实不够密实,还未发生屈服,而在高法向应力固结下土样相较于低法向应力状态要更加密实,已经发生了屈服。在低法向应力条件下进行剪切时,剪应力的提高对试样有一个进一步的压密作用,土体发生屈服,这种剪切压密作用或屈服相对于低法向应力固结后的低密实度而言要更显著,从而导致土体内部出现应力变化不大而应变增加的“台阶”。

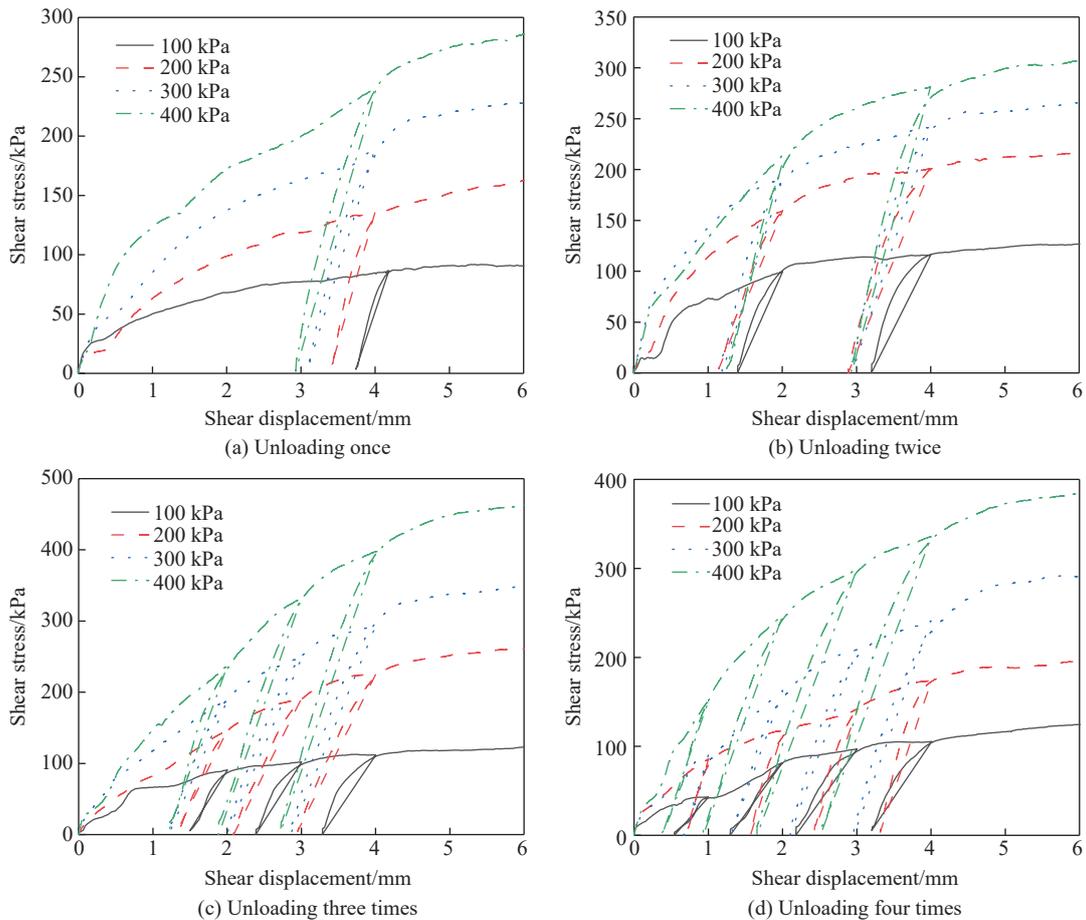


图3 不同法向应力下的剪应力-剪切位移关系曲线
 Fig. 3 Shear stress-shear displacement relationship curves under different normal stresses and under different unloading conditions

弹性剪切位移为每次加载-卸载结束后剪切位移的回弹值,图4为在剪切位移为1,2,3,4 mm处卸载4次工况时,不同法向应力下剪切弹性位移与卸载次数的关系曲线。随着法向应力和剪切次数的变化,弹性剪切位移大小集中在0.3~1.5 mm之间。整体上,弹性剪切位移随法向应力的增加而增加,随着卸载次数的增多而增加。这是因为加载初期时,土样内存在孔隙,产生的塑性变形占主要部分,随着循环的增加,土颗粒的咬合更加密实,使得塑性变形逐渐减少,回弹位移逐渐增多。

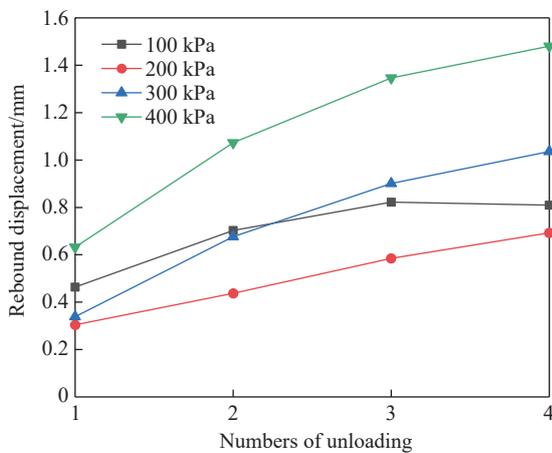


图4 卸载4次工况下剪切回弹位移与卸载次数关系
Fig. 4 Relationship between the elastic shear displacement and the number of unloading under the condition of unloading 4 times

加卸载条件下的红黏土处于弹塑性状态,红黏土试样经过剪切卸载和再加载后,卸载曲线与再加载曲线形成滞回圈。滞回圈的长轴斜率反映了红黏土试样的刚度大小,会随着法向应力的增加以及卸载次数的增多而变化,计算长轴斜率 k 为

$$k = \frac{\tau}{dx} \quad (1)$$

式中: k 为斜率, kPa/mm; τ 为从卸载开始到卸载结束的剪应力减少值, kPa; x 为剪切开始到剪切结束的位移变化量, mm。

图5为卸载4次工况时不同法向应力下滞回圈长轴斜率与卸载次数关系曲线。在法向应力较低情况下,红黏土滞回曲线的斜率随着卸载次数的增加呈现出非线性衰减变化,低法向应力工况下的衰减速率由慢到快。表明在低法向应力工况下的试样在加载前期刚度较大,随着卸载次数的增多逐渐失去抵抗变形能力。高法向应力工况下卸载次数

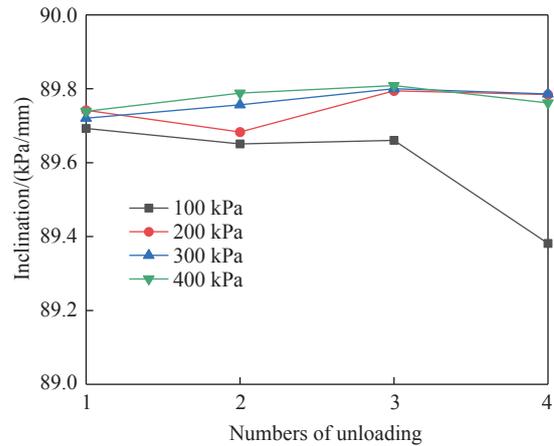


图5 卸载4次工况时滞回圈长轴斜率-卸载次数关系
Fig. 5 Relationship between the slope of the long axis of the hysteresis loop and the number of unloading when unloading 4 times

对斜率的影响不大,这是因为高法向应力下的试样增强了土颗粒之间的有效应力,土颗粒与颗粒之间的摩擦增大,提高了土体抵抗变形的能力。

图6为卸载4次工况时的法向位移-剪切位移关系曲线。由图可知,在进行卸载前,法向位移先是随着剪切位移增加整体呈现剪缩特性。在1,2,3,4 mm处分别进行4次卸载时,由于剪应力的卸载,剪切位移具有一定的回弹。由于卸载时,仪器剪应力设置为0,剪应力再加载需要一定时间,所以法向位移剪切位移曲线在加载开始阶段表现为不发生剪切位移,只产生法向剪缩变形。随着剪切继续加载,法向位移随着剪应力的增加呈现先剪胀,再剪缩的特点。这表明在剪切过程中,由于土颗粒

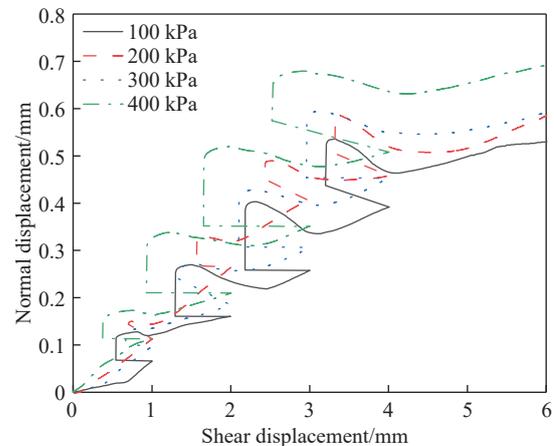
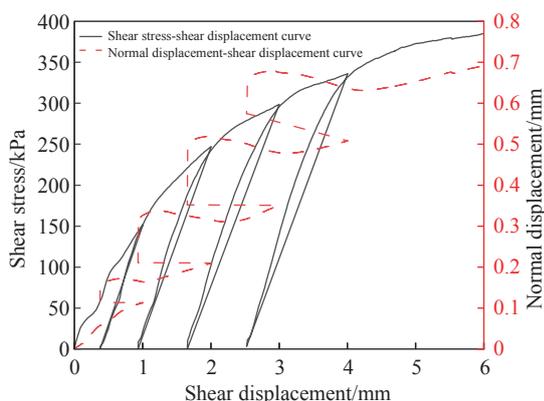


图6 4次卸载条件下的法向位移-剪切位移关系曲线
Fig. 6 Normal displacement-shear displacement curves under the condition of unloading four times

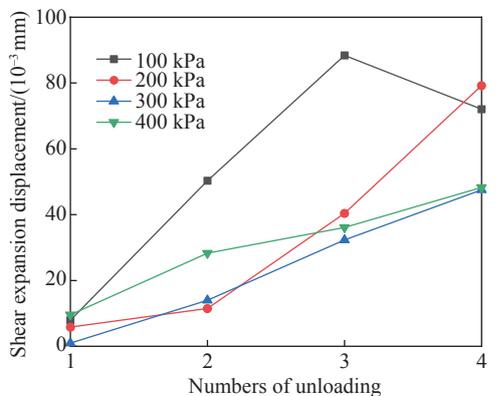
的上抬导致试样发生一定程度的剪胀。随着剪切的加载继续,试样整体呈现为剪缩变形。

和未卸载工况相比,经过4次加卸载后的红黏土试样均发生了局部剪胀。而未卸载工况下的红黏土试样只在100 kPa应力工况下产生了少量剪胀变形。在论文给定次数的加卸载作用下,红黏土整体上均表现为剪缩变形。不同法向应力工况时,相较于未卸载工况,4次加卸载对于剪缩变形的剪缩量有很明显的提高。局部剪胀的出现和整体体缩量的增加表明剪切卸载会显著改变红黏土的剪胀、剪缩变形特性。

对比剪应力位移曲线与法向位移剪切位移曲线。如图7可知,红黏土试样在剪切加卸载过程中整体呈现剪缩性,在卸载-加载区呈现局部剪胀性,并且如图所示剪胀距离随卸载次数增加而增大,且剪切位移达到卸载前的值时剪胀结束,应力应变曲线在,卸载-加载区产生滞回圈。随着剪切继续加载,试样呈现剪缩变形,应力应变曲线呈硬化型。



(a) Shear stress-shear displacement curve and normal displacement-shear displacement curve



(b) Relationship curve between dilatancy displacement and numbers of unloading

图7 卸载4次条件下的关系曲线

Fig. 7 Curves under conditions unloading four times

这个现象可以由二元介质理论^[12]来解释,剪胀发生时,胶结元破损导致强度降低,但是摩擦元的代偿强度将超过胶结元的强度损失,应力位移曲线呈现硬化特性。

图8为卸载4次工况与未卸载工况在剪切位移6 mm处的法向位移对比。未卸载和卸载4次两种工况下总法向位移均随法向应力增加而近似线性增加。可以看到,卸载工况下的总法向位移均高于未卸载工况,说明剪切卸载作用会增加红黏土的法向位移,其体缩增大。但是,卸载作用对法向位移的影响随法向应力的增大逐渐减少。这是因为,法向应力越高,红黏土样在固结和剪切共同作用下的压密程度越高,从而使得卸载体缩的效果逐渐减轻。

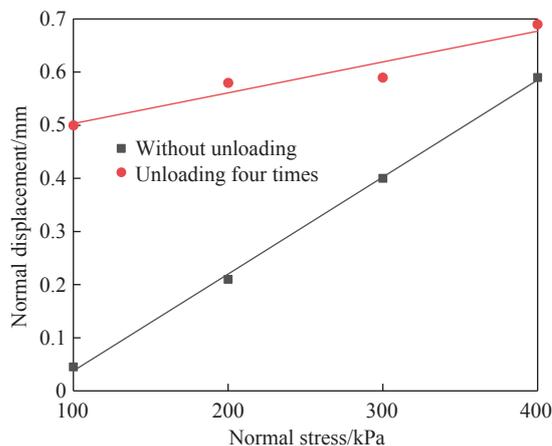


图8 不同卸载条件下总法向位移随法向应力变化关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of total normal displacement with normal stress under different unloading conditions

2.3 加卸载对抗剪强度的影响

图9为多次卸载后法向应力条件下红黏土试样峰值抗剪强度与卸载次数的关系。对于各级卸载后的法向应力,总体来看,强度随着法向应力的增加而增大,加卸载作用对于红黏土的抗剪强度影响较大。高法向应力下加卸载作用产生的影响,相较于低法向应力下产生的影响要明显。这是因为较大的法向应力作用下土体之间的孔隙被压缩,增加了土颗粒之间的接触。形成了接触面更多的土骨架,增加了土颗粒之间的摩擦力。对于低法向应力的情况来说,由于加载-卸载-再加载对于试样内部孔隙变化影响不大,对于黏土的密实度影响也不大,导致强度增减变化不大。但是对于高法向应力

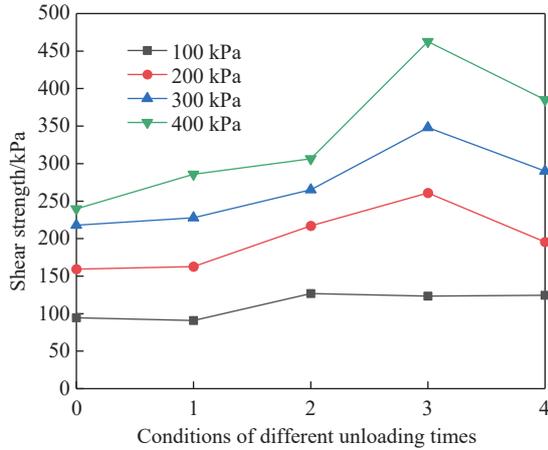


图9 抗剪强度与卸载次数关系
Fig. 9 Relationship between shear strength and conditions of different unloading times

的情况来说,土体破坏面上承受的正应力较大,土颗粒直剪的接触面多,导致摩擦引起的抵抗破坏能力较大。高法向应力下的剪切卸载时产生的影响也相较于低法向应力下卸载时产生的影响要明显,卸载1次,2次,以及3次工况时抗剪强度随着卸载次数的增加而增大,卸载4次工况时抗剪强度有所降低。

3 能量分析

3.1 红黏土加载-卸载-加载的能量公式

黏土直剪试验下的剪切过程满足热力学第二定律,能量以一种形式转化成另一种形式,剪切盒受到水平力做功以及竖向力做功^[13]。加载卸载过程中,剪切盒对试样做的总功即土样吸收的总应变能,其中卸载过程中会具有一定的弹性变形,整个卸载过程中弹性变形引起的应变能,另一部分克服摩擦力做功,以磨损的形式散失。这部分能量散失为不可逆的过程,导致系统整体能量逐渐减少。这部分耗散能使得黏土内部发生损伤或者使得试样在加卸载的过程中以塑性变形累积产生的势能。另外还可能包括土颗粒间重新排列所需的能量,土颗粒在剪切盒内产生翻滚的动能与势能等。

耗散能直接影响加卸载过程中能量的流失与黏土的破损机理,耗散能在单个循环加卸载过程中的大小也反映了黏土力学强度的一种衰减程度。室内直剪试验求出的第 n 次循环耗散能 U_n 的公式为

$$U_n = \int_{\varepsilon_{i,n-1}}^{\varepsilon_{u,n-1}} [\varphi_n(\varepsilon) - \eta_{n-1}(\varepsilon)] d\varepsilon \quad (2)$$

式中 $\varphi_n(\varepsilon)$ 为第 n 段加载曲线函数方程; $\eta_{n-1}(\varepsilon)$ 为 $n-1$ 段卸载曲线函数方程; $\varepsilon_{u,n-1}$ 为应力位移曲线中加载曲线与卸载曲线的第 $n-1$ 个交点; $\varepsilon_{i,n-1}$ 为第 $n-1$ 次加载开始的点。滞回圈的面积大小也对应了耗散能的大小,滞回圈面积越大表明土体能量耗散能力越强,滞回圈面积越小表明土体吸收能量能力差,具有滑移的性质。

3.2 多次卸载下红黏土耗散能分析

力在土体颗粒之间传递,能更好地解释存储塑性功的问题。土骨架指的是土体间相互接触,共同作用的颗粒形成的固体框架。在土体中,体积应力较大的局部易发生体积变形,这部分称为“主骨架”。而体积应力较小的部分,易发生剪切变形,这部分称为“次骨架”。在直剪试验中,大部分耗散能由剪切变形引起,产生在“次骨架”中^[14]。

图10为相同位置处耗散能随不同次数卸载条件变化的曲线图,对于只在4 mm处卸载时的工况来说,随着法向应力的增大,耗散能也在增加。这是由于法向应力的增加,增大土体内部的有效应力土颗粒之间耗散的由于摩擦力以及颗粒翻转消耗的能量也增加了。法向应力在100~300 kPa时,卸载2次工况耗散能相比于卸载1次工况耗散能大,卸载3次以及卸载4次工况的耗散能均小于卸载2次工况下的耗散能。

图11为卸载4次条件下耗散能与卸载次数关系图,通过对图11的观察,总体上来说,耗散能与法向应力成正比关系,法向应力越大,塑性变形消耗的能量越大。随着循环次数的增加,耗散能也在逐

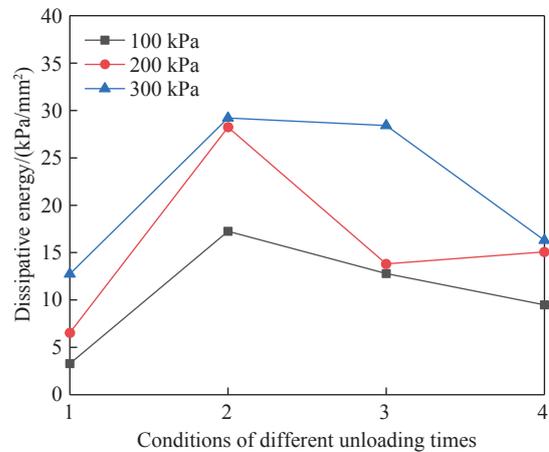


图10 相同位置处耗散能与不同卸载次数条件的关系
Fig. 10 Relationship between dissipated energy at the same position and conditions of different unloading times

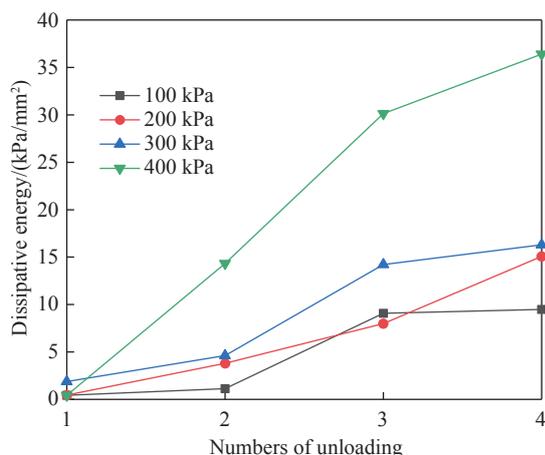


图 11 卸载 4 次条件下耗散能与卸载次数变化图
Fig. 11 Plot of dissipated energy versus numbers of unloading under conditions of unloading four times

渐增加。在低法向应力的工况下,耗散能增加的速率相较于高法向应力的工况低,在 400 kPa 法向应力作用下耗散能的增幅趋势明显。这是因为在高法向应力的作用下,剪应力产生的塑性能大部分都被剪切过程中的摩擦力以及颗粒滑移做功耗散了,只有小部分的能量存储在土体内部,并在反向塑性加载的时候恢复。

4 结论

针对江西红黏土进行了不同法向应力和不同剪切加卸载次数的直剪试验,围绕红黏土的加卸载强度变形特性以及加卸载条件下的能量耗散规律进行研究,得到如下结论。

1) 红黏土在剪切初期出现了剪应力不变、剪切位移迅速增加的“台阶”,随着法向应力的增加,应力-位移“台阶”逐渐不明显。卸载阶段红黏土样会产生弹性剪切位移,整体上,弹性剪切位移随着法向应力的增加而增加,随着卸载次数的增多而增加。

2) 剪切加卸载条件下红黏土的法向位移整体呈现为剪缩变形,且随剪切荷载增加不断增大,而不同于未卸载工况下在低法向应力时剪切后期出现剪胀的规律。在卸载阶段,法向压缩位移增大;再加载阶段,法向压缩位移先增加后减少,产生了短暂的剪胀过程,剪切位移达到卸载前的值时剪胀结束。相比未卸载工况,剪切加卸载会显著增加红黏土的总法向压缩位移,但是这种卸载体缩作用随法向应力的增大逐渐减弱。

3) 红黏土的抗剪强度在相同加卸载工况下随

着法向应力的增加而增大。加卸载作用对于红黏土抗剪强度影响较大,整体上抗剪强度随着不同工况卸载次数的增加呈现出先增加后降低的趋势。

4) 同一卸载工况下不同卸载次数的耗散能随着法向应力的增加和加卸载次数的增加均逐渐增大,法向应力较低时耗散能随加卸载次数增加而增大的速率相较于法向应力较高时要慢得多。不同卸载工况下相同位置处耗散能随法向应力增加逐渐增大,随卸载次数的增加整体上呈现先增大后减小的趋势。

参考文献:

- [1] DANG W G, KONIETZKY H, FRUHWIRT T, et al. Rotation and stress changes on a plane joint during direct shear tests rotation and stress changes on a plane joint during direct shear tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89: 129-135.
- [2] SOONKIE N, MARTE G, PANAYIOTIS D, et al. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3): 272-280.
- [3] THIAN S Y, LEE C Y, Shear strength degradation behavior of offshore clay under cyclic loading[J]. Soil Mech Found Eng, 2018, 54: 430-435.
- [4] 章为民, 顾行文, 王芳, 等. 土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 979-987.
ZHANG W M, GU X W, WANG F, et al. Swelling tests on soils and simulation method for unloading-swelling process[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 979-987.
- [5] 彭木文, 左双英, 杨国生, 等. 循环加卸载作用下贵阳红黏土损伤特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1466-1476.
PENG M W, ZUO S Y, YANG G S, et al. Experimental study on damage characteristics of Guiyang red clay under cyclic loading and unloading[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1466-1476.
- [6] 陈勇, 隆海鹏, 曹玲, 等. 反复等向加卸载路径下粉质黏土变形特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 145-151.
CHEN Y, LONG H P, CAO L, et al. Cyclic response and modeling of saturated silty clay due to repeated isotropic loading and unloading[J]. Journal of Disaster Prevention

- and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 145-151.
- [7] 曹宇春,汪科迪. 卸载对粗砂抗剪强度影响的直剪试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 84-91.
CAO Y C, WANG K D. Direct shear test study on the effect of unloading on the shear strength of coarse sand[J]. Journal of Civil Engineering, 2020, 53(1): 84-91.
- [8] 曹宇春,汪科迪. 卸载条件下粉砂的抗剪强度特性研究[J]. 浙江科技学院学报, 2019, 31(5): 405-411.
CAO Y C, WANG K D. Study on shear strength characteristics of silty sand under unloading conditions[J]. Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology, 2019, 31(5): 405-411.
- [9] 崔宏环,王文涛,何静云,等. 循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与滞回环演化规律[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 174-182.
CUI H H, WANG W T, HE J Y, et al. Strength characteristics of the melting silty clay under cyclic loading and evolution law of hysteresis loop[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2020, 47(4): 174-182.
- [10] 何亮,魏玉峰,潘远阳,等. 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 120-126.
HE L, WEI Y F, PAN Y Y, et al. Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2019, 46(5): 120-126.
- [11] ZHANG, X, JIANG, Y, WANG G, et al. Mechanism of shear deformation, failure and energy dissipation of artificial rock joint in terms of physical and numerical consideration[J]. Geoscience Journal, 2019, 23(3): 519-529.
- [12] 沈珠江,刘恩龙,陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力应变关系[J]. 岩土工程学报, 2005(5): 489-494.
SHEN Z J, LIU E L, CHEN T L. General stress-strain relationship of binary medium model for geological materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005(5): 489-494.
- [13] 翟明磊,郭保华,李冰洋,等. 岩石节理分级剪切加载-蠕变-卸载的能量变形特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2865-2872.
ZHAI M L, GUO B H, LI B Y, et al. Energy and deformation characteristics of rock joints with under multi-stage shear loading-creep-unloading conditions[J]. Geotechnics, 2018, 39(8): 2865-2872.
- [14] 秦理曼,迟世春,林皋. 基于能量耗散的土体本构关系及其参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(S2): 5625-5633.
QIN L M, CHI S H, LIN G. A model of soil constitutive relation based on energy dissipation and its parameters determination[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(S2): 5625-5633.



第一作者:刘明星(1989—),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为岩土体动力学。E-mail:l-mxing@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)