

# 重塑弱膨胀土抗剪强度的环剪试验研究

蒋晓庆<sup>1</sup>, 李永彪<sup>2</sup>

(1. 安徽广播电视大学 开放学院, 安徽 合肥 230022;  
2. 安徽建筑大学 建筑结构与地下工程重点实验室, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**利用STHJY型环剪仪,对合肥地区弱膨胀土进行同级4次剪切环剪试验,探索残余强度与竖向应力和含水率的关系,研究发现:随着竖向应力的增加,残余强度在增加;随着含水率的增加,残余内摩擦角 $\varphi$ 和残余黏聚力 $c$ 呈减小趋势。其中 $\varphi$ 随着含水率的增加降低幅度呈逐渐加大趋势, $c$ 随着含水率的增加降低幅度呈先增大后减小的趋势。通过数据拟合分析发现:残余强度与竖向应力呈良好的正线性相关关系,并符合Mohr-Coulomb准则;残余内摩擦角 $\varphi$ 与含水率呈良好的负指数关系。

**关键词:**环剪试验;竖向应力;含水率;残余强度;弱膨胀土

**中图分类号:**TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2019)04-0047-04

边坡稳定性分析评价及设计中,土的残余强度是不可忽略的因素。Skempton<sup>[1]</sup>最早提出残余强度概念。残余强度是指土体在经过大位移剪切变形情况下,最终趋于保持稳定的强度,反映土体剪切过程强度衰减的规律。环剪试验能准确地测定土体的残余强度,是一种空心扭剪试验,剪切位移是无限的,且剪切过程中剪切面积保持不变,能够满足大变形位移的强度衰减研究<sup>[2-3]</sup>。

张笛等<sup>[4]</sup>采用ARS型环剪仪对滑带土进行环剪试验,认为滑带土残余强度与剪切速率、法向应力和含水率都有关系,残余强度与法向应力成正线性关系。洪勇等<sup>[5]</sup>通过改良的大型环剪仪测定粉质黏土的残余强度,提出在相同含水率和剪切速率下,残余强度随法向应力的增大而增加。王伟等<sup>[6]</sup>通过HJ-1型环剪仪试验确定重塑黄土的残余强度,认为正应力越大,黄土的残余强度越大;含水率越高,残余强度越低,而且含水率与残余内摩擦角呈负指数关系。胡再强等<sup>[7]</sup>通过反复剪切试验和环剪试验测定黄土的残余强度,发现剪切试验的残余强度高于环剪试验的残余强度,认为上下剪切盒由于反复剪切造成量力环测得的强度值包含上下剪切盒的摩擦力,导致结果偏大。吴

迪等<sup>[8]</sup>对采用环剪仪测定原状残积土的残余强度,认为含水率对残余内摩擦角有显著影响,而残余内摩擦角是影响残余强度的最重要因素。张晓丽<sup>[9]</sup>采用直剪/残余剪切试验系统,对河北磁县膨胀土进行了残余强度的研究,发现在反复直剪过程中,土体剪应力分布不均匀,剪切面相互接触的面积随位移的增大而减少,导致试样的正应力不稳定,且反复直剪试验受位移限制,造成膨胀土残余强度测得值偏高。这一点同左巍然等<sup>[10]</sup>的研究结论相同,左巍然等通过反复直剪试验测定某高速公路宁明灰白膨胀土的残余强度,提出膨胀土的残余强度和它的结构及应力历史无关,可以采用重塑土样测定膨胀土的残余强度。

鉴于反复直剪试验的缺陷,本文通过环剪仪对合肥地区弱膨胀土的残余强度进行研究,以重塑膨胀土为试验土样,研究竖向应力、含水率对重塑弱膨胀土残余强度的影响,初步探讨合肥地区重塑弱膨胀土的剪切特征,为揭示合肥地区膨胀土边坡滑坡的稳定性分析和设计提供理论参考。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土样

试验选用的土样来自安徽合肥包河区包公园

收稿日期:2019-07-06

基金项目:安徽省省级质量工程项目(2017zhkt120)

作者简介:蒋晓庆(1985—),女,安徽亳州人,讲师,硕士,主要研究方向为非饱和膨胀土的强度特性。

某处,取土深度为 2.5~4 m。土样呈黄褐色,含少量球状铁锰结核。在室内实验室对该土样进行常规的物理特性试验,试验指标如表 1。

表 1 弱膨胀土土样的物理性质

Table 1 Physical properties of weak expansive soil samples

指标	数值	
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.09	
液限 $W_L$ /%	40.7	
塑性指数 $I_p$ /%	20.6	
含水率 $w$ /%	19.4	
自由膨胀率 $\sigma_{ef}$ /%	39	
	$d > 0.01$	36.83
不同颗粒粒径(mm)	$0.005 \leq d \leq 0.01$	15.71
所占比例/%	$0.002 \leq d < 0.005$	10.11
	$0 < d < 0.002$	37.35

## 1.2 试验设备

试验采用的仪器为浙江土工仪器制造有限公司生产的 STHJY 型环剪仪,主要由扭矩显示器、上部操作系统和下部操作系统构成。上部操作系统包括试样容器、竖向加荷部件、百分表等;下部操作系统包括砝码、杠杆、水平度盘等。

试验试样为环形土样,尺寸外径为 100 mm,内径为 60 mm,高为 20 mm。对试样所能施加的最大法向应力为 900 kPa,扭矩传感器所能测量的扭矩最大值为 300 N·m,转速最大值为 90°/min,试验的剪切速度为 1°/min。

## 1.3 试验步骤

将土样放置在 105 °C 干燥烘箱机烘干 8~10 h,取出后进行碾碎并过 0.5 mm 筛;按照设计含水率 18%、20%、22%、24%,分别对土样及纯净水准确称重,再用喷雾瓶对土样进行均匀喷洒;搅拌均匀后放入保鲜袋中密封,然后放入保湿箱养护 24 h,保证水土充分混合,养护后测得的实际含水率分别为 17.4%、19.5%、21.3%、23.2%;将土样分别放入专门制环刀土样容器并击实,再用千斤顶顶出土样,放入环剪仪剪切盒内。实验中,竖向应力加载前将土样固结 24 h。

环剪试验方法大致有 3 种,一种是单级单次剪切,这种方法缺点是系统偏差过大,残余强度值偏大。一种是同级多次剪切,这种方法为一个土样在同一个竖向应力作用下,连续剪切 4 次且最后 3 次残余强度值比较接近。该方法的优点是系统偏差较小,试验数值准确;缺点是每次试验持续

时间长,不同应力试验时都要重新配置土样,试验过程繁琐。最后一种是多级剪切,即同一个试样分别在不同竖向应力作用下测定其残余强度。这种方法优点是试验周期短,且不需要多次配置土样,试验方便;缺点是测定结果很粗略,不准确。

本文为了精确测定合肥地区弱膨胀土的残余强度,采取同级 4 次剪切试验,竖向应力分别为 100、200、300、400 kPa。

## 2 试验结果分析

环剪试验的扭矩显示器得出的曲线图为  $M-\theta$  关系曲线,根据环剪试验理论,假定剪切面上正应力和剪应力是均匀分布的,得到剪切应力  $\tau$  和剪切位移  $S$  的计算公式如下:

$$\tau = \frac{M}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi D^2 dr} = \frac{3M}{2\pi(D_2^3 - D_1^3)} \quad (1)$$

$$s = \pi \cdot D_m \cdot v \cdot t / 360 \quad (2)$$

式中: $M$  为试验扭矩, N·mm;  $D_1$  为内环直径, mm;  $D_2$  为外环直径, mm;  $D_m$  为公称直径, mm;  $v$  为剪切速度, °/min;  $t$  为剪切时间, s。

根据式 1 可得试验的残余强度值,如表 2 所示。根据表 2 得到不同含水率下竖向应力与残余强度的关系图,见图 1。由图 1 可知:在相同含水率下,随着竖向应力的增加,弱膨胀土的残余强度在增加。通过数据拟合分析发现,残余强度与竖向应力呈现较强的正相关关系,相关系数  $R$  分别为 0.958 0、0.966 8、0.949 6、0.954 0。显然,残余强度与竖向应力之间的关系是符合 Mohr-Coulomb 准则的。在相同竖向应力作用下,残余强度随着含水率的升高而不断降低。当  $\sigma = 100、200、300、400$  kPa 时,在  $w = 17.4\%$  和  $w = 23.2\%$  下,残余强度差值分别为 16.5、30.5、42.2、43.0 kPa。显然,竖向应力越大,随着含水率的增大,残余强度降低幅度越大。

表 2 各组土样的残余强度测定值表

Table 2 Table of residual strength measured values of different groups of soil samples kPa

竖向应力 $\sigma$	含水率/%			
	17.4	19.5	21.3	23.2
100	54.7	51.3	40.3	38.2
200	99.8	94.2	76.2	69.3
300	120.4	106.5	93.2	78.2
400	132.3	125.6	100.3	89.3

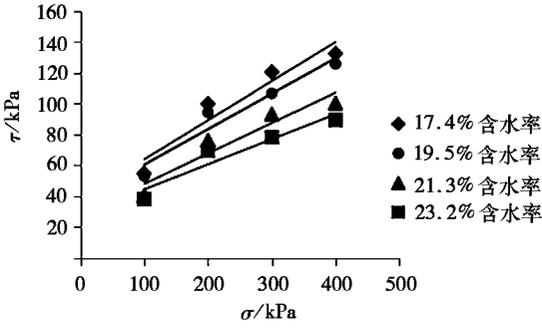


图 1 不同含水率下竖向应力与残余强度关系曲线  
Fig 1 Relationship curve between vertical stress and residual strength under different water content

由于残余强度与竖向应力之间的关系符合 Mohr-Coulomb 准则,根据 Mohr-Coulomb 准则进行数值拟合,得出不同含水率与残余强度内摩擦角  $\phi$  和残余黏聚力  $c$  之间的关系,见表 3。由表 3 可知,随着含水率的增加,残余强度内摩擦角  $\phi$  和残余黏聚力  $c$  均呈减小趋势。其中  $\phi$  随着含水率的增加降低幅度在逐渐加大, $c$  随着含水率的增加降低幅度呈先增大后减小的趋势,这是由于合肥地区弱膨胀土的矿物成分以伊利石为主,在伊利石颗粒吸水之后发生溶解,促使颗粒之间水膜加厚,摩擦强度变小,导致  $\phi$  和  $c$  的降低。

图 2 为残余内摩擦角  $\phi$  与含水率  $w$  之间的关系。由图 2 可以看出残余内摩擦角  $\phi$  与含水率  $w$  之间呈良好的负指数关系,相关系数  $R = 0.9933$ 。

表 3 不同含水率的残余强度参数表  
Table 3 Table of residual strength parameters with different water content

残余强度参数	含水率/%			
	17.4	19.5	21.3	23.2
残余内摩擦角 $\phi/(^\circ)$	14.2	12.9	11.1	9.2
残余黏聚力 $c/\text{kPa}$	38.5	37.4	28.3	28.2

图 3 为含水率为 17.4% 时,不同竖向应力作用下的剪应力—剪位移曲线(剪应力和剪位移的大小通过式(1)和式(2)求得)。从图 3 可以看出:首次剪切变形中,剪应力在很短的时间内达到峰值强度,然后逐渐衰减,基本上在 20 mm 以后强度趋于稳定,呈现出明显的应变软化现象。但是经过首次剪切之后,土样没有形成连续的剪切面,剪切破坏后剪切面附近土颗粒尚未充分形成定向排列,颗粒间的咬合摩擦作用还比较大,所以此时残余强度比较大。经过第 2 次剪切后,土样

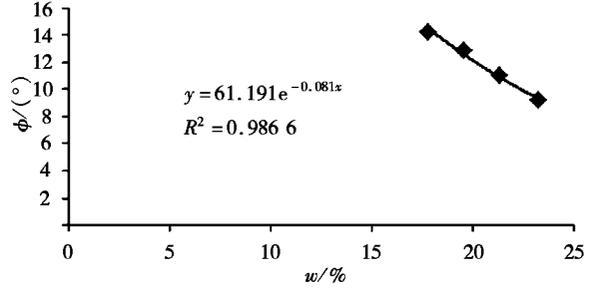
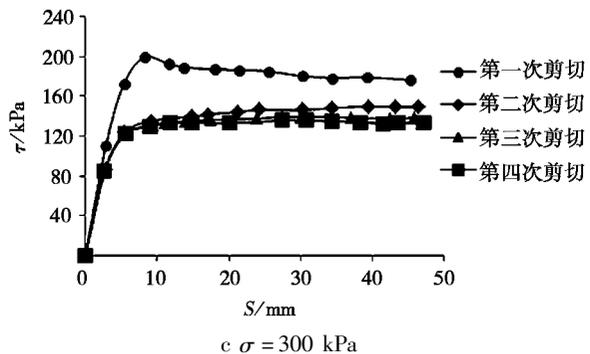
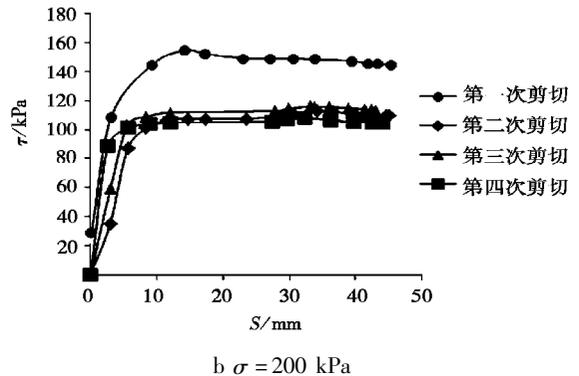
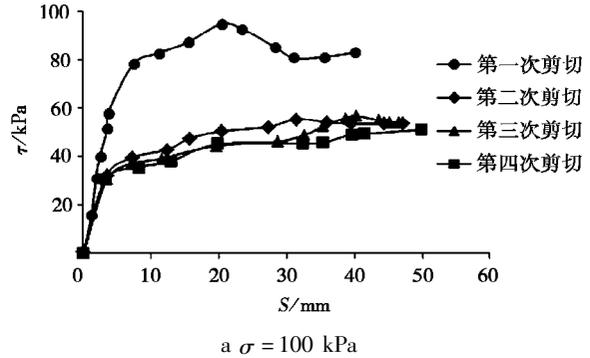


图 2 不同含水率与残余内摩擦角关系曲线  
Fig 2 Relationship curve between different water content and residual internal friction angle

基本上形成连续的剪切面,残余强度出现快速降低;在经过第 3、4 次剪切时,剪应力呈现出基本稳定状态,即可以第 4 次的剪应力稳定值作为最终的残余强度。



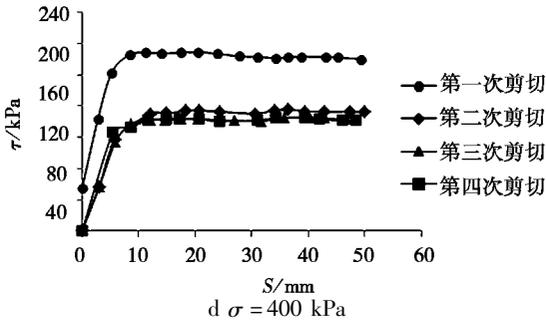


图 3  $w = 17.4\%$  时不同竖向应力作用下剪应力—剪位移曲线

Fig 3 Shear stress-shear displacement curve under different vertical stresses when  $w = 17.4\%$

### 3 结论

(1) 在相同的含水率下, 残余强度随竖向应力的增加而增大, 并呈现良好的线性关系, 符合

Mohr-Coulomb 准则; 在相同的竖向应力下, 残余强度随含水率的增加呈降低趋势, 且含水率越大, 竖向应力越大, 残余强度降低幅度越大。

(2) 随着含水率的增加, 膨胀土土样的残余强度内摩擦角和残余黏聚力均呈减小趋势, 但是两者的降低幅度不同。通过数值拟合可以发现, 残余内摩擦角与含水率呈良好的负指数关系。

(3) 试验所采用的合肥地区弱膨胀土在环剪试验中出现了应变软化现象, 这主要与土体剪切面的连续性和黏土颗粒的定向排列有关。应变软化现象主要发生在第一次剪切变形中, 此时的残余强度值偏大, 经过后面 3 次剪切, 变形曲线逐渐平稳, 残余强度变化幅度较小, 剪应力趋于稳定的残余状态, 最终以第 4 次剪切的强度稳定值作为残余强度。

### 参考文献:

[1] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. Géotechnique, 1964, 14(2): 77-102.

[2] 尹占巧, 许成顺, 刘海强, 等. 环剪仪在超固结土残余强度分析中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 556-560.

[3] 许成顺, 尹占巧, 杜修力, 等. 黏性土的抗剪强度特性试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1433-1438.

[4] 张笛, 滕伟福, 安琪. 黄土地临江 1 号滑坡体滑带土残余强度试验研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(2): 39-45.

[5] 洪勇, 岳玉秋, 郑孝玉, 等. 大连滨海粉质黏土剪切力学特性环剪试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(5): 1475-1481.

[6] 王伟, 骆亚生. 重塑黄土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 110-113.

[7] 胡再强, 林山, 李宏儒, 等. 洛川 Q2 黄土残余强度影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 6-11.

[8] 吴迪, 简文彬, 徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2045-2050.

[9] 张晓丽. 膨胀土残余强度试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.

[10] 左巍然, 杨和平, 刘平. 确定膨胀土残余强度的试验研究[J]. 长沙交通学院学报, 2007, 23(1): 23-27.

## Ring Shear Experimental Study on Shear Strength of Remolded Weak Expansive Soil

JIANG Xiaoqing<sup>1</sup>, LI Yongbiao<sup>2</sup>

(1. Open College, Anhui Open University, Hefei Anhui 230022, China; 2. Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei Anhui 230601, China)

**Abstract:** By using the STHJY type ring shear apparatus, four shear ring shear tests were carried out on weak expansive soil in Hefei area at the same level to explore the relationship between residual strength and vertical stress and water content. It is found that the residual strength increases with the increase of vertical stress. With the increase of water content, residual internal friction angle  $\varphi$  and residual cohesion  $c$  decrease. Through data fitting analysis, it is found that there is a good positive linear correlation between residual strength and vertical stress, which conforms to Mohr - Coulomb criterion. The residual internal friction angle  $\varphi$  has a good negative exponential relationship with water content.

**Keywords:** ring shear test; the vertical stress; water content; residual strength; the weak expansive soil

(责任编辑:李华云)