

文章编号: 1006-4710(2015)01-0113-07

# 泾阳黄土抗剪强度的环剪试验研究

李凌芸, 党进谦, 王炜

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以泾阳滑带土为研究对象, 采用 HJ-1 型环剪仪对泾阳县的重塑黄土进行了单级环剪试验, 研究了不同含水率, 干密度, 剪切速度下重塑黄土在较大剪切位移下的强度变化规律。研究表明: 土体应力-应变曲线呈软化现象; 粘聚力和内摩擦角均随含水率的增加而降低; 剪切速度越大的其达到峰值强度所需的剪切位移越小, 粘聚力越大, 但其对内摩擦角影响不显著; 干密度与峰值强度呈正相关关系, 对残余强度的影响不明显。脆性指数随含水率和剪切速率的增大而减小。

**关键词:** 黄土; 剪切速度; 环剪试验; 峰值强度; 残余强度; 脆性指数

**中图分类号:** TU411.7 **文献标志码:** A

## Research on ring-shear test of loess shear resistance strength in Jingyang

LI Lingyun, DANG Jinqian, WANG Wei

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** With the loess in Jingyang landslide zone as the research object, HJ-1 type of ring shear apparatus is adopted to carry out the single grade ring shear tests of the remolded loess in Jingyang county to study the strength varying laws of remolded loess with different moisture contents, dry density and shear speed under the larger shear displacement. The research results indicate that the stress-strain curves of soil body appear to be weakened; the cohesion force and internal friction angles decrease with an increase in moisture contents. The larger the shear speed reaching the peak value is, the smaller the required shear displacement is and the larger the internal cohesion force is, but its effect upon the internal friction angle is not obvious. The dry density and peak value strength are found to be in positive correlative relation without obvious effect upon residual strength. The brittle index decreases with an increase moisture content and shear speed.

**Key words:** loess; shear speed; ring-shear test; shear peak strength; residual strength; brittle index

黄土滑坡灾害以其数量多、分布最广、危害最严重, 成为我国地质灾害中最严重的一种, 给社会造成了巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。滑坡的发生过程中会形成滑带土, 它对于滑坡的发展、变形、稳定性评价有重要的意义, 是滑坡的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>, 滑带土随时间变化, 其滑动速率、含水率、干密度等均发生改变, 所以滑带土的研究成为研究滑坡的一个重点及难点问题, 而土体的应力应变特性与滑坡发生机理密切相关。Skempton<sup>[4]</sup>认为, 一旦滑动面形成, 不论何种类型的土, 其强度都由残余强度控制。Hvorslev<sup>[5]</sup>

指出, 只有扭转剪切方法可以较好地测定土的残余强度。环剪仪是可以进行扭转剪切试验的一种土工试验设备, 具有独特的设计构造和试验功能, 主要特点是可以研究大剪切位移条件下土体的峰值强度和残余强度等力学参数<sup>[6-7]</sup>, 对于边坡稳定性分析以及滑坡防治具有重要意义。国内外对于残余强度的研究主要集中于粘土, 针对黄土残余强度的研究较少。黄土的水敏性是黄土最重要的特点<sup>[8]</sup>之一, 黄土高边坡土体的稳定性主要受到坡体含水率的控制<sup>[9-10]</sup>, 在地下水位上涨、降雨等因素的作用下, 滑

收稿日期: 2014-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NECT-06-0864)。

作者简介: 李凌芸, 女, 硕士生, 研究方向为岩土力学性质。E-mail: lilingyun828@126.com。

通讯作者: 党进谦, 男, 教授, 研究方向为岩土工程理论与计算。E-mail: dangjinqian@163.com。

带土剪切应变及应变速率随变形过程不断发生变化<sup>[11]</sup>,再加上滑坡中滑带土的特殊性,所以有必要对黄土这种具有水敏性的特殊土在不同含水率、干密度、剪切速率下的残余强度进行研究。

为了研究边坡土体在大应变条件下的强度和变形问题,本文采用 HJ-1 型环剪仪,对不同剪切速率、含水率,干密度下的重塑黄土进行了环剪试验,研究其峰值强度、残余强度及变形规律,为黄土滑坡工程评价、治理提供科学依据。

## 1 试验土样

本试验所用土料取自泾阳县太平镇,土料基本物理指标见表 1。纵向取土深度约 4.0 m,属于晚更新世  $Q_3$  黄土。陆相黄色粉砂质土状堆积物,它表现为棕黄色、黄灰色或黄红色,具有多孔性、垂直节理发育、层理不明显等特殊性质。测得天然含水率为 16.2%,天然干密度为  $1.28 \text{ g/cm}^3$ ,比重 2.74,天然孔隙比为 1.14。经标准轻型击实试验测得该土料的最大干密度为  $1.70 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率 18.1%。

表 1 试验土料基本物理指标

Tab. 1 The basic physical indexes of experimental specimen

土样来源	液限/%	塑限/%	塑性指数	按塑性指数分类	颗粒组成/%		
					>0.075 mm	0.005~0.075 mm	<0.005 mm
某砖窑	32.7	16.4	16.3	CL	0.88	69.86	29.26

## 2 试验设备及方法

### 2.1 试验仪器

本试验所用仪器为江苏溧阳永昌工程实验仪器厂生产的 HJ-1 型环剪仪,主要由四部分组成:动力系统、法向加载系统、土样剪切系统、数据输出系统,具体有试样容器、机架部件、单杠杆式法向加荷部件、变速部件、扭矩、荷载传力部件等。

试样所能施加的最大法向应力:  $P_{\max} = 900 \text{ kPa}$ ;仪器的扭矩量程:  $M_{\max} = 300 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;仪器所能提供转速:  $\nu = 3.2 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-2} \text{ 转/min}$ 。

用环剪仪对黄土进行大剪切位移下的力学特性研究,环剪试验作为一种空心扭转剪切试验,其优点突出表现在试验过程中剪切面积恒定不变,剪切位移可以无限大,避免了直剪试验中反复重置剪切盒对试样的扰动,更重要的是由于试样宽度相对于空心环的半径而言较窄,这样实心扭剪试验中剪切面上应力分布均匀,通过对空心圆柱试样施加扭矩使试样发生剪切变形直到破坏,以此测定土的应力-应

变关系与残余强度。试验采用  $100 \text{ mm}$ (外径) $\times 60 \text{ mm}$ (内径) $\times 20 \text{ mm}$ (高)的空心圆环重塑试样,试样面积:  $S = 50.27 \text{ cm}^2$ 。试样平均直径:  $D_m = 8.17 \text{ cm}$ ;

### 2.2 试验方案

将原始土料进行充分晾晒,处于风干状态时,用  $2 \text{ mm}$  方孔径的土工筛对土料进行筛分,将筛好的土料密闭保存。用压实法制备给定含水率的环剪试样,同一组试样的干密度控制在  $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  的误差内。用保鲜膜包住并放于养护缸内以备用。进行滑带土在不同法向应力条件下的环剪试验对滑带土的峰值强度残余强度及达到残余强度所需的最小剪切位移变化进行了研究,试验共分为 3 组,第一组控制剪切速率分别为  $5.0 \text{ mm/min}$ ,  $1.0 \text{ mm/min}$ ,  $0.5 \text{ mm/min}$ ,其他因素不变。第二组控制含水率为  $13\%$ ,  $16\%$ ,  $19\%$ ,  $22\%$ ,其他因素不变。第三组控制干密度为  $1.28 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,含水率为  $13\%$ ,  $16\%$ ,  $19\%$ 。试验方案如表 2 所示。

表 2 重塑黄土的环剪试验研究方案

Tab. 2 Ring shear test plan of remolded loess

试样编号	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	剪切速率/ (mm/min)	法向应力 $P / \text{kPa}$	剪切方式
CS1-CS9	16	1.52	5.0、1.0、0.5		
CS10-CS22	13、16、19、22	1.52	1.0	100、200、300	单级剪
CS23-CS48	13、16、19	1.28、1.52、1.70	1.0		

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 剪切速率对重塑黄土试验结果的影响

图 1 为在三种不同剪切速率  $v_1 = 0.5 \text{ mm/min}$ ,  $v_2 = 1.0 \text{ mm/min}$ ,  $v_3 = 5.0 \text{ mm/min}$  下黄土试样的剪应力-剪切位移曲线。由图 1 可知试样的强度随着剪切位移的增加基本呈现软化形态,剪切速率大的试样峰值强度越大,达到峰值强度所需的剪切位移越大。在不同法向应力情况下,剪切速率对残余强度有一定影响。考虑到仪器在剪切过程中存在排水现象,小速率剪切试验过程较慢,导致大剪切速度下的剪应力越大,因此在较低剪切速率下的强度会比高剪切速率下的小,但是不同剪切速率间残余强度相差较小( $<20 \text{ kPa}$ )。

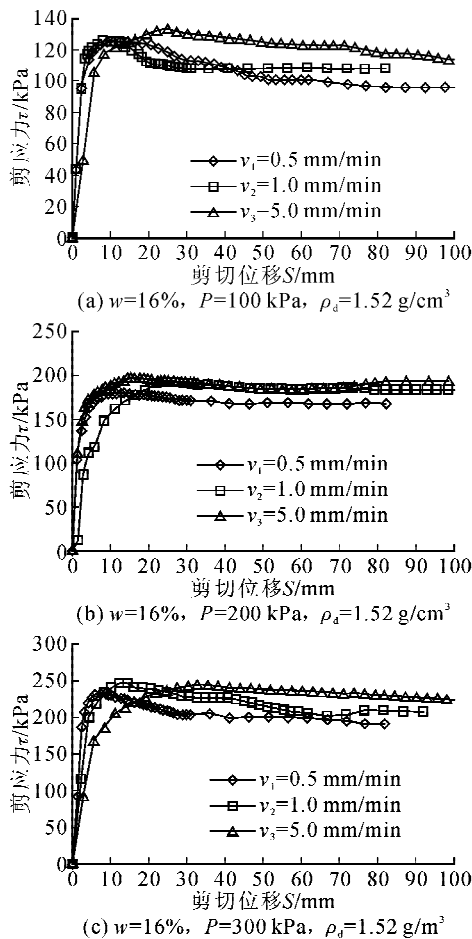


图 1 不同剪切速率下黄土剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig. 1 Shear stress and displacement relation curves under different shear rate

#### 3.2 含水率对重塑黄土试验结果的影响

图 2 分别是相同干密度 ( $\rho_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$ )、不同含水率的试样在三个不同有效法向应力  $P = 100 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ kPa}$ 、 $300 \text{ kPa}$  下的剪应力-剪切位移曲线。

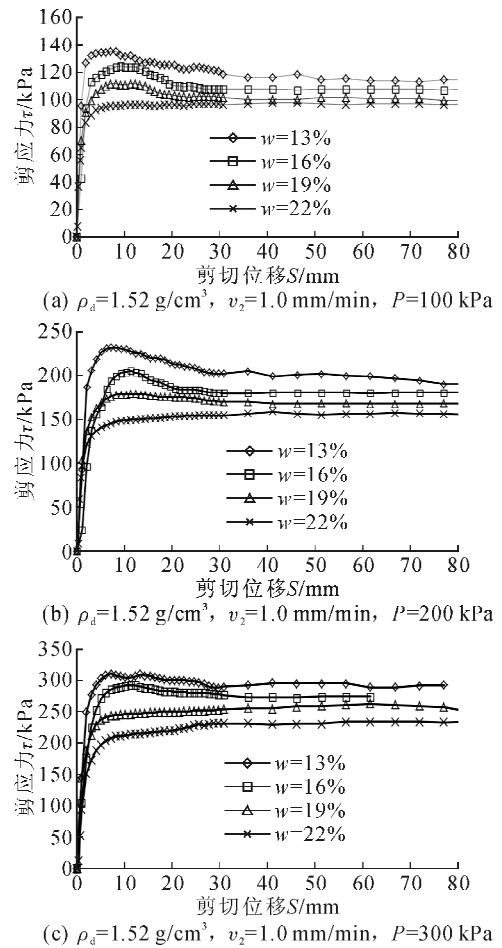


图 2 不同含水率下试样剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig. 2 Shear stress and shear displacement relation curves of specimens under different moisture content

从图 2 可以看出,试样达到峰值强度之前,在相同有效法向应力的情况下,含水率低的试样在达到峰值强度时对应的剪切变形最小,即曲线斜率最大,含水率较低的试样比含水率高的试样易出现强度的软化。低含水率的试样在较小的有效法向应力作用下,更容易出现软化现象,而当含水率高且有效法向应力大的时候,剪应力-剪切位移曲线呈现硬化型。当剪切位移达到 40 mm 左右的时候,各含水率试样的剪应力已基本达到稳定值,这时试样达到了残余强度。从图 2 中可以看出,含水率不只对黄土的峰值强度有影响,对残余强度也有同样的影响规律,即随着含水率的增加,达到同一剪切位移所需要的剪应力值越小。四个不同含水率(13%, 16%, 19%, 22%)试样的残余强度具有明显的差别:残余强度随含水率的增大而减小,减小值随有效法向应力的增大而增大,即有效法向应力对含水率在试样残余强度的减小上具有放大作用,且随着有效法向应力的增加,含水率导致的残余强度之间的差值减小。

含水率较大时,土体内部的易溶盐等矿物更容

易溶解,土颗粒之间的粘聚力降低,所以含水率高的试样其强度较低;骨架间的孔隙被水填充,根据有效应力原理,水分不承担剪应力,承担剪应力的全部是土颗粒;水分在较粗颗粒之间起着润滑和软化作用,降低了土粒之间咬合摩阻力,因此土体的强度随着含水率的增加而降低。试样在软化后达到稳定的残余强度,随着剪切位移的增大,剪切面附近的土颗粒逐渐定向排列,孔隙水有向剪切面附近靠拢的趋势,造成土体中水分分布不均匀,且多数集中到剪切面附近,这部分水对土颗粒的润滑作用更加明显。所以,在残余强度稳定阶段,含水率的增加降低了残余强度值。

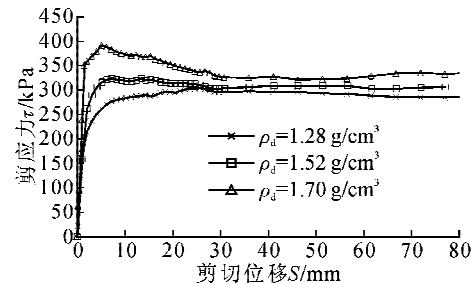
### 3.3 干密度对重塑黄土试验结果的影响

图3表示在含水率分别为13%、16%、19%时,不同干密度对重塑黄土的峰值强度及残余强度的影响。从图3中可以看出,不同干密度对重塑黄土的强度影响规律相似,即随着剪切位移的增加,试样强度迅速经过弹性阶段达到峰值强度,随着剪切位移的增加,干密度 $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.52 \text{ g/cm}^3$ 的试样达到峰值强度之后,强度逐渐降低,随着剪切位移的继续增加逐渐稳定在一个浮动较小的强度值范围内; $\rho_d = 1.28 \text{ g/cm}^3$ 的试样经过弹性阶段,达到峰值强度以后,强度基本保持不变。干密度与重塑黄土的峰值强度呈正相关关系,对残余强度的影响不明显。干密度较大的试样,强度出现软化现象,干密度较小的试样强度呈现弱硬化型,且干密度越大强度软化越明显。

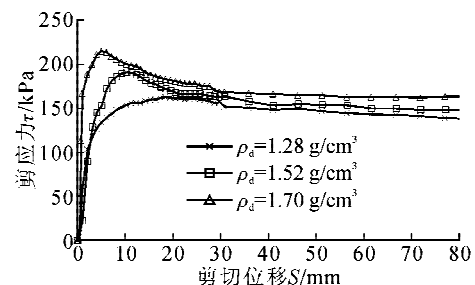
在达到峰值强度以前,随着剪切试验的进行,土颗粒之间的扭剪作用越来越强,密度较大的试样在制样、固结的时候,内部土颗粒已经形成强大的胶结作用,所以在剪切试验刚开始,这些试样的强度可以很迅速的增大至峰值强度;密度较小的试样,制样、固结的时候试样内部还留有空隙,在剪切试验刚开始的时候,扭剪作用先将土体挤压压实,之后才逐渐形成剪切面将试样破坏,所以密度小的试样强度增加较慢。密度较大的试样其峰值强度高,对黄土进行环剪试验得出的结论与邓津<sup>[12]</sup>对黄土的动三轴试验、王林浩<sup>[13]</sup>对不同干密度黄土状粉土的直剪试验得出的结论一致。

试样强度超过峰值强度以后,剪切面逐步形成,随着剪切位移的增加,剪应力逐渐减小。密度较大的试样其强度衰减较明显,原因是随着试样从峰值强度降低到残余强度的过程中,剪切面逐步形成并稳定,剪切面上的土颗粒在扭剪力的作用下不断调整定位逐渐形成新的排列,密度较大的试样破坏较

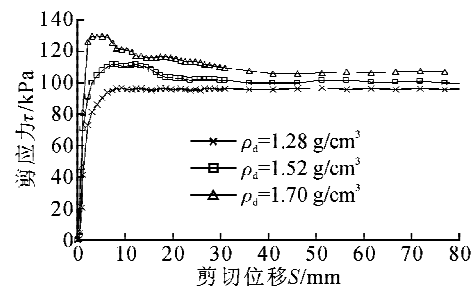
快,其结果就是剪切面上的颗粒调整排列作用发生的较早一些,所以剪应力降低得明显;相反密度较小的试样其强度降低的不明显。经过剪切面颗粒的重新排列组合以后,剪切面上的密度趋于一致,所以干密度对黄土的残余强度影响较小。



(a)  $w=13\%$ ,  $v_2=1.0 \text{ mm/min}$ ,  $P=300 \text{ kPa}$



(b)  $w=13\%$ ,  $v_2=1.0 \text{ mm/min}$ ,  $P=200 \text{ kPa}$



(c)  $w=13\%$ ,  $v_2=1.0 \text{ mm/min}$ ,  $P=100 \text{ kPa}$

图3 不同干密度下试样剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress and shear displacement relation curves under different dry densities

### 3.4 抗剪强度结果

环剪试验获得的试验结果是扭矩和角位移,这与真三轴、平面应变等试验不同,所以在求取强度指标时不需要绘制莫尔应力圆,只需把试验结果换算得到剪应力与剪位移,通过线性拟合、回归分析即可求得试样的峰值、残余强度参数。拟合包线如图4所示,强度指标见表3。

由表3可以看出,剪切速率对重塑黄土的峰值强度、残余强度影响较小,基本呈现大剪切速率得到的峰值粘聚力 $c$ 大。随着干密度的增加,土体的峰值强度增大。总体来看,本次试验设定的三组剪切速率对土体峰值强度、残余强度的影响较含水率、干密度的影响要小很多。

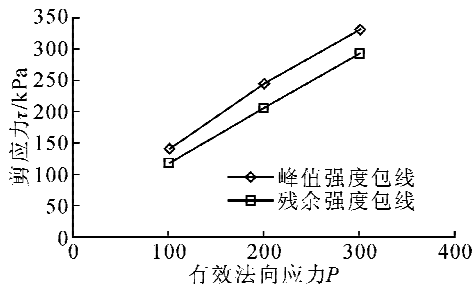


图4 试样抗剪强度拟合包线

Fig. 4 The shear strength fitting envelope of specimens

表3 不同初始条件下试样的峰值强度指标和残余强度指标  
Tab. 3 Peak strength and residual strength indexes under different initial conditions

含水率/干密度/ % (g/cm <sup>3</sup> )	剪切 速率/ (mm/min)	峰值强度指标		残余强度指标		
		100-200-300 c /kPa	φ / (°)	100-200-300 c /kPa	φ / (°)	
1.28	1.0	18.4	43.8	10.1	43.6	
	0.5	49.2	43.5	30.4	41.0	
13	1.52	51.3	41.0	33.5	40.6	
	5.0	56.1	46.1	37.6	41.9	
1.70	1.0	75.5	40.9	42.5	39.7	
1.28	1.0	21.8	41.8	7.6	41.3	
	0.5	38.0	41.3	9.3	40.6	
16	1.52	40.1	39.7	31.7	39.3	
	5.0	53.4	38.3	33.9	38.6	
1.70	1.0	42.6	40.8	40	40.6	
1.28	1.0	27.0	34.0	15.0	34.0	
	0.5	30.3	34.6	25.2	33.8	
19	1.52	30.5	37.5	28.3	36.5	
	5.0	43.1	37.9	29.5	36.6	
1.70	1.0	42.8	33.8	36.6	32.2	
22	1.52	1.0	28.1	33.8	25.2	33.2

将表3中峰值内摩擦角与残余内摩擦角进行拟合,得出适用于泾阳黄土在试验含水率区间的经验公式:

$$\varphi_r = 0.6169\varphi^{1.135}, R = 0.8872 \quad (1)$$

其中,  $\varphi_r$ —残余内摩擦角,  $\varphi$ —峰值内摩擦角。

$$c_r = 0.3981c^{1.1232}, R = 0.762 \quad (2)$$

其中,  $c_r$ —残余内粘聚力,  $c$ —峰值粘聚力。

含水率与粘聚力、内摩擦角的关系如图5、6所示。由图可知,同一剪切速率1.0 mm/min、干密度1.52 g · cm<sup>-1</sup>下,在试验设定的含水率范围内(13%,16%,19%,22%),峰值粘聚力随着含水率的

升高而减小,残余粘聚力随着含水率的增加变化幅度较小;峰值内摩擦角和残余内摩擦角随着含水率的增加而减小;峰值粘聚力与残余粘聚力之间的差值随着含水率的增加越来越小,而峰值内摩擦角与残余内摩擦角之间的差值却几乎不变。

峰值粘聚力  $c$  在 75.5~18.4 kPa 之间,残余粘聚力  $c_r$  在 7.6~42.5 kPa 之间,即在较大剪切位移作用下,土体的初始结构遭到破坏,土颗粒完全形成定向排列,粘聚力降低较多,此时内摩擦角为土体峰值强度的决定性因素。所以整体来说随着含水率的增加,  $c$  值小范围内波动、 $\varphi_r$  显著减小,表现在土体强度上即残余强度随着含水率的增加而降低。黄土浸水后软化,残余强度显著降低,所以在降雨、冻融等作用下也就更容易发生边坡失稳而导致滑坡。

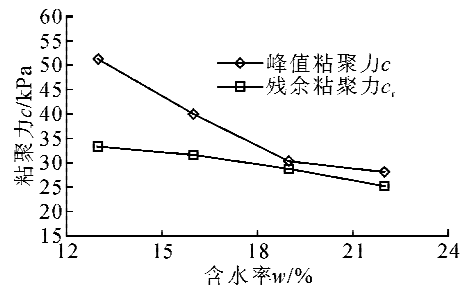


图5 含水率与粘聚力的关系曲线

Fig. 5 Relationship between water contents and cohesion

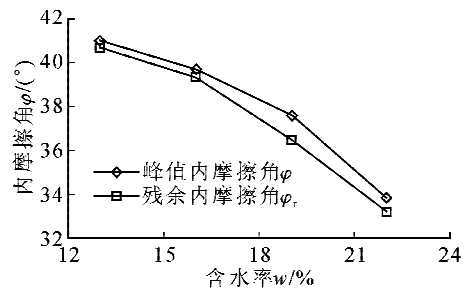


图6 含水率与内摩擦角的关系曲线

Fig. 6 Relationship between water contents and friction angle

### 3.5 脆性指数

Bishop<sup>[14]</sup>首次提出脆性指数  $I_B$ :

$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_r}{\tau_f} \quad (3)$$

式中,  $I_B$ —脆性指数,  $\tau_f$ —剪切面的峰值强度,  $\tau_r$ —剪切面的残余强度。

土体的应变软化和脆性程度有关,因此脆性指数又叫应变软化系数,变化范围为0~1,同残余因素一样脆性指数也可以用来衡量天然土体滑动后剪切面的残余状态,但是  $I_B$  的描述对象可以具体到剪切面上某一部分的土体。  $I_B$  越大说明土样越脆,也

就是峰值强度与残余强度的差值越大,强度软化越明显。 $I_B = 0$  时土样从脆性完全变为塑性,  $I_B = 1$  时土样完全软化。

将不同含水率的试样在不同剪切速率作用下应变大小及脆性指数列入表4中。从表4中可以看出,相同含水率的试样在同一剪切速率下的脆性指数随着干密度的增大而增大,说明干密度大的试样其强度软化现象明显,经过大剪切位移后,剪切面已经形成定向排列,颗粒之间作用的减弱程度比干密度小的试样要明显。随着剪切速率的增加,脆性指数呈现减小的趋势。随着含水率的增加,脆性指数呈现减小的趋势,说明在低含水率的条件下,经过大剪切位移后,试样强度由峰值强度稍减小便达到残余强度,总体来说软化不明显。

表4 不同初始条件下试样的应变及脆性指数  
Tab.4 Peak strength and residual strength and brittleness index of normally consolidated specimens under different initial conditions

含水率/ %	干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	剪切速率/ (cm/min)	平均脆性指数
13	1.28	0.10	0.05
		0.05	0.15
	1.52	0.10	0.13
		0.50	0.10
16	1.70	0.10	0.28
		0.05	0.09
	1.52	0.10	0.10
		0.50	0.08
19	1.70	0.10	0.24
		0.05	0.09
	1.52	0.10	0.09
		0.50	0.04
22	1.70	0.10	0.10
		0.05	0.07
	1.52	0.10	0.09
		0.50	0.00

#### 4 结 论

本文对取自泾阳县的重塑黄土进行了不同初始条件的环剪试验,探究了黄土的峰值强度与残余强度的规律及试样的变形特征,本章主要得出了以下定性的结论。

1) 试样的强度随着剪切位移的增加基本呈现

软化形态。本试验所设定的剪切速率对正常固结重塑黄土达到峰值强度的时间及大小影响较小,达到残余强度所需的剪切位移随剪切速率的增大而减小。

2) 含水率对正常固结重塑黄土的峰值强度与残余强度影响规律一致,即随着含水率的增大试样内摩擦角和黏聚力减小。含水率大的试样越先达到峰值强度,含水率较低的试样比含水率高的试样易出现强度的软化。

3) 干密度与重塑黄土的峰值强度呈正相关关系,对残余强度的影响不明显。干密度较大的试样,较易出现软化现象,干密度较小的试样强度呈现弱硬化型,且干密度越大强度软化越明显。

4) 正常固结黄土的脆性指数较小,说明试样强度的软化现象不明显。脆性指数随着剪切速率和含水率的增加,呈现减小的趋势。

#### 参考文献:

- [1] 陈松,徐光黎,陈国金,等. 三峡库区黄土坡滑坡滑带工程地质特征研究[J]. 岩土力学, 2009. 30(10): 3048-3052.  
Chen Song, Xu Guangli, Chen Guojin, et al. Research on engineering geology characteristics of soil in sliding zone of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3048-3052.
- [2] 辛鹏,吴树仁,石菊松. 簸箕山大型老滑坡滑动带结构特征及力学性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 327:1382-1391.  
Xin Peng, Wu Shuren, Shi Jusong. Structural characteristics of soft-rock slip zone and experimental study of its formation mechanism in boji mountain large-scale old landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 327:1382-1391.
- [3] Anson R W W, Hawkins A B. Analysis of a sample containing a shear surface from a recent landslide south Cotswolds[J]. Geotechnique, 1999, 49(1):33-41.
- [4] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Geotechnique, 1985, 35(1):3-18.
- [5] American Society for Testing and Materials. Laboratory shear testing of soils[S]. Committee D-18 on Soils for Engineering Purposes, Philadelphia, 1964.
- [6] Sassa K. Mechanisms of landslide triggered debris flow [C]//Proceedings of IUFRO Conference (Div. 8). Kyoto; Kluwer Academic Publishing, 1998; 471-490.
- [7] 王顺,项伟,崔德山. 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.
- [8] 冯志炎, 谢定义. 复杂加载条件下原状黄土结构性定量参数变化全过程分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 72-75.
- Feng Zhiyan, Xie Dingyi. Quantitative analysis of soil structure variations in whole process under complex loading conditions of intact loess[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1): 72-75.
- [9] 高建勇, 邢义川, 陈艳霞. 黄土高边坡稳定性预测模型研究[J]. 岩土工程学报. 2011, (S1): 170-176.
- Gao Jianyong, Xing Yichuan, Chen Yanxia. Prediction model for stability of high loess slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, (S1): 170-176.
- [10] 党进谦, 蒋仓兰, 吉中亮. 剪切速率对结构性黄土力学性状的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 459-463.
- Dang Jinqian, Jiang Canglan, Ji Zhongliang. Effects of shear rate on mechanical behavior of structured loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 459-463.
- [11] 王宇, 李晓, 张搏. 降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 416-425.
- Wang Yu, Li Xiao, Zhang Bo. Dynamic progressive failure revolution research on landslide under precipitation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (4): 416-425.
- [12] 邓津, 王兰民, 吴志坚. 弹塑性黄土微结构与动变形模型的建立与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (s2): 3995-4001
- Deng Jin, Wang Lanmin, Wu Zhijian. Establishment and analysis of elasto-plastic loess microstructure and dynamic deformation model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (s2): 3995-4001
- [13] 王林浩, 白晓红, 冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (S2): 132-136.
- Wang Linhao, Bai Xiaohong, Feng Junqin. Discussion on shearing strength influencing factors of compacted loess-like backfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 132-136.
- [14] 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]. Geotechnique, 1971, 21 (4): 273-328.

(责任编辑 杨小丽)