

DOI: 10.11779/CJGE2017S1002

# 洛川 Q<sub>2</sub> 黄土残余强度影响因素试验研究

胡再强, 林 山, 李宏儒, 张 龙

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 自然界存在许多天然黄土边坡, 当它们发生滑动时, 发现这些滑坡的滑动面上的平均剪应力, 比它们的抗剪强度小得多, 发生上述现象的一个重要因素就是土的残余强度问题, 因此研究黄土的残余强度具有深刻意义。试验结果表明: 环剪仪是目前测量土残余强度最符合实际的仪器, 单级剪切是作为测量土残余强度的首选剪切方式; 洛川 Q<sub>2</sub> 黄土的初始结构对其残余强度几乎无影响; 洛川 Q<sub>2</sub> 重塑黄土的残余强度参数  $c_r$ 、 $\phi_r$  随着初始含水率的增大而减小; 洛川 Q<sub>2</sub> 重塑黄土的残余强度参数  $c_r$ 、 $\phi_r$  随干密度的增大而增大; 洛川 Q<sub>2</sub> 重塑黄土的残余黏聚力  $c_r$  随着剪切速率的增大而减小, 残余内摩擦角  $\phi_r$  随着剪切速率的增大呈先增大后减小的趋势。

**关键词:** 洛川黄土; 环剪仪; 残余强度

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0006 - 06

**作者简介:** 胡再强(1964 - ), 男, 陕西周至人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程的研究。E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

## Factors residual strength of Luochuan loess

HU Zai-qiang, LIN Shan, LI Hong-ru, ZHANG Long

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In the loess regions loess landslide is one of the major geological disasters. Every year it results in a large number of casualties and destructions. It is found that the average shear stress on the sliding surface of these landslides is much smaller than their shear strength when the natural loess slope is slided. One of the most important factors in the occurrence of these phenomena is the residual strength of soil. So the study on the residual strength of loess is of great significance. The test results show that the ring shear apparatus is the most realistic instrument to measure the residual strength of the soil, and the best way of measuring the residual strength of loess is single-stage shear. The ring shear test residual strength of Luochuan Q<sub>2</sub> loess is more realistic than the repeated shear. The initial structure of Luochuan Q<sub>2</sub> loess has few influences on the residual strength. The residual strength parameters ( $c_r$ ,  $\phi_r$ ) of Luochuan Q<sub>2</sub> loess decrease with the increasing moisture content. The increase in the initial dry density causes the increase of the residual strength parameters of Luochuan Q<sub>2</sub> remolded loess. Luochuan remolded Q<sub>2</sub> residual remolded cohesion  $c_r$  decreases with the increasing shear rate, and the residual friction angle  $\phi_r$  increases firstly and then decreases with the increasing shear rate.

**Key words:** Luochuan loess; ring-shear apparatus; residual strength

## 0 引 言

土残余强度参数的取值对于边坡稳定性分析评价及设计都起着至关重要的作用, 所以对土体的残余强度的研究具有重要意义。对于土的残余强度的研究, Skempton<sup>[1]</sup>提出“残余强度”概念及理论, 为滑带土在强度指标的选择上提供了理论层面上的依据, 并通过长期的观察和试验研究, 发现处于活动蠕变状态的滑坡滑带土残余黏聚力趋近 0。Kanji<sup>[2]</sup>通过试验研究滑带土残余强度与塑性指数间的关系, 得出了残余强度和塑性指数之间的关系曲线和经验公式。Chandler<sup>[3]</sup>指出, 在滑坡发生再次滑动之前, 滑带土的抗剪强度

存在一个明显的恢复阶段, 土的孔隙水的化学特性、矿物成分都会对滑带土残余强度的再生恢复有一定的影响。Kenney<sup>[4]</sup>首先研究了黏性土的化学成分对残余强度的影响, 研究结果表明, 充满饱和钠离子的高岭石矿物的残余强度明显低于充满饱和钙离子的高岭石矿物的残余强度; 含蒙脱石矿物的黏土比含高岭石矿物的黏土具有更高的塑性指数及更低的残余强度。Skempton<sup>[5]</sup>研究表明, 在较缓慢试验剪切速率范围内

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778152); 陕西省重点实验室重点项目(2014SZS15-Z02)

收稿日期: 2016 - 11 - 28

(0.002~0.01 mm/min), 残余强度值的变化很小, 可以忽略; 当剪切速率超过 100 mm/min 时, 强度会出现较大的变化, 甚至降低到低速下的 60%。当有效法向应力小于 150 kPa 时, 残余强度与有效法向应力间具有明显的非线性关系。

李青云等<sup>[6]</sup>认为, 土的矿物成分、孔隙水的化学特性对残余强度有一定的影响。陈晓平等<sup>[7]</sup>通过现场大剪试验和室内固结快剪试验分析了含粗粒滑带土的剪切性状, 发现粗粒含量较高的滑带土与一般黏性土相比, 其残余强度与峰值强度的比值较大。赵锡宏等<sup>[8]</sup>通过对上海的原状黏性土和人工制备的高岭土等一系列的剪切带试验得到: 剪切带的开始出现在应力峰值前, 而形成峰值后, 随后发生软化, 最后达到残余强度。李兴国等<sup>[9]</sup>利用改装后的应变控制式直剪仪测试土的残余强度, 提出了残余因素  $R$  及脆性指数  $IB$ , 认为天然土体中滑动面的残余状态可以用残余因素  $R$  及脆性指数  $IB$  衡量; 残余强度摩擦角  $\varphi_r$  随着土的黏粒含量、塑性指数的增加而降低, 但随着土中碳酸盐的增加而提高。孙涛等<sup>[10]</sup>通过环剪仪测定超固结土的残余强度认为在剪切速率为 0.01 cm/s 时, 超固结黏土在剪切位移为 25~30 mm 时达到残余强度。并提出超固结比和围压对超固结土的残余强度有影响, 剪切速率只对峰值强度到残余强度的发挥长度有影响对残余强度几乎没有影响。吴迪等<sup>[11]</sup>利用环剪仪对残积土的抗剪强度进行研究, 认为残积土达到峰值强度所对应的应变介于 0.02~0.06 之间, 而到达基本稳定的残余强度所需要的应变介于 0.06~0.20 区域内; 矿物成分直接影响土体的抗剪强度, 其中对  $c_r$  影响较小, 而对  $\varphi_r$  影响较大。

本文在总结国内外学者对土残余强度研究的基础上, 以洛川 Q<sub>2</sub> 黄土为研究对象, 分别用直剪仪和环剪仪研究了试验仪器、剪切方式、初始含水率、初始结构、干密度、剪切速率对其残余强度的影响。

# 1 试验土样及试验方案、方法

## 1.1 试验土样

本文试验土样取自洛川黑木沟黄土标准剖面附近边坡, 采取具有代表性的 Q<sub>2</sub> 黄土, 取土深度 10 m。试样土样的基本物理性质指标见表 1。

表 1 试验土样的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of soil samples						
土样 编号	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 w/%	G <sub>s</sub>	液限 w <sub>l</sub> /%	塑限 w <sub>p</sub> /%	塑性指数 I <sub>p</sub>
Q <sub>2</sub>	1.55	11.6	2.71	32	20	12

## 1.2 试验方案及方法

为了研究黄土残余强度的影响因素, 制定的具体试验方案见表 2。

# 2 试验结果分析

## 2.1 试验仪器对 Q<sub>2</sub> 重塑黄土残余强度的影响分析

目前测定土残余强度的主要仪器有环剪仪和直剪仪, 为了研究两种仪器测定结果差异, 对 Q<sub>2</sub> 重塑黄土进行了反复剪切试验和环剪试验。

图 1, 2 分别为 Q<sub>2</sub> 黄土利用四联直剪仪和环剪仪得到的  $\tau - s$  关系曲线, 由图中可以看出: 反复剪切条件下, 随着剪切次数的增加, 剪应力趋于一个稳定值, 本试验反复剪切在第四次土样强度几乎等于第三次剪切土样的剪切强度, 所以认为第四次剪切土样达到残余强度状态。环剪条件下, 土样强度在峰值之前呈近线性增长; 越过峰值, 随着剪切位移的增加, 出现峰值后应变软化, 土样强度开始降低, 当剪位移量足够大时, 残余剪切发生在土中一个由颗粒定向排列所形成的低抗剪强度剪切面, 且剪切面光滑, 表现在土样的强度趋于一个稳定值, 即残余强度。

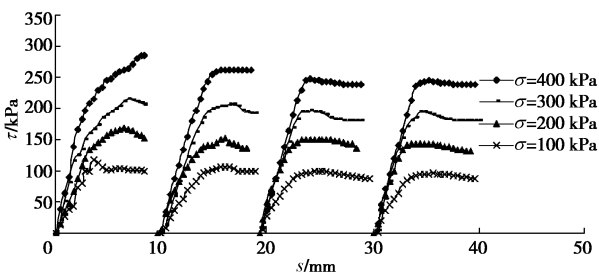


图 1 反复剪切试验条件下 Q<sub>2</sub> 重塑黄土  $\tau - s$  曲线  
Fig. 1  $\tau - s$  curves of Q<sub>2</sub> remolded loess under repeated shear tests

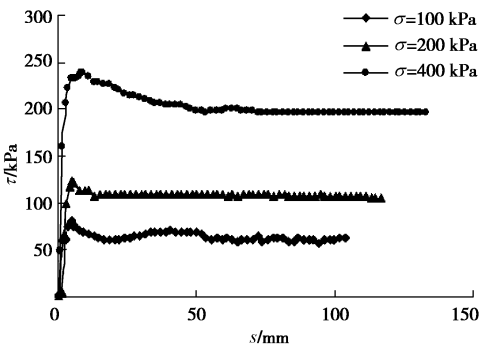


图 2 环剪试验条件下 Q<sub>2</sub> 重塑黄土  $\tau - s$  曲线  
Fig. 2  $\tau - s$  curves of Q<sub>2</sub> remolded loess using ring shear apparatus

由图 1, 2 可知, 不管是反复剪切试验还是环形剪



表 2 洛川黄土残余强度影响因素试验方案及方法

Table 2 Factors for residual strength and test methods for Luochuan loess

影响因素	土样	土样状态	试验仪器	试验方法
试验仪器	Q <sub>2</sub> 重塑黄土	$\rho_d=1.55\text{ g/cm}^3$ , $w=11.6\%$	直剪仪 环剪仪	单剪, $v=0.1\text{ mm/min}$
剪切方式	Q <sub>2</sub> 重塑黄土	$\rho_d=1.55\text{ g/cm}^3$ , $w=11.6\%$	环剪仪	单剪, 多级剪切, $v=0.1\text{ mm/min}$
初始结构、 初始含水率	Q <sub>2</sub> 原状、 重塑黄土	$\rho_d=1.55\text{ g/cm}^3$ , $w=8.0\%$ , 11.6%, 16.0%, 20.0%, 28.0%	环剪仪	单剪, $v=0.1\text{ mm/min}$
干密度	Q <sub>2</sub> 重塑黄土	$\rho_d=1.45, 1.55, 1.65\text{ g/cm}^3$	环剪仪	单剪, $v=0.1\text{ mm/min}$
剪切速率	Q <sub>2</sub> 重塑黄土	$\rho_d=1.55\text{ g/cm}^3$ , $w=11.6\%$	环剪仪	单剪, $v=0.01, 0.1, 1\text{ mm/min}$

切试验, Q<sub>2</sub> 黄土的残余强度均随着固结压力的增大而增大。

由图 3 和表 3 可知, 反复剪切试验所得的各级固结压力下的残余强度大于环剪试验所得残余强度, 表现在反复剪切所得 Q<sub>2</sub> 重塑黄土残余黏聚力  $c_r=27.34\text{ kPa}$ , 残余内摩擦角  $\varphi_r=28.2^\circ$ , 而环剪试验所得对应值为  $c_r=14.0\text{ kPa}$ ,  $\varphi_r=24.6^\circ$ 。因为在反复剪切试验过程中, 随着剪切位移的增大, 土样剪切面积逐渐减小; 而且上下剪切盒发生摩擦, 导致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。而环剪仪剪切面固定不变, 法向应力稳定, 上下剪切盒分离, 不存在上下剪切盒摩擦而导致测量结果与实际脱离。因此认为环剪试验是目前测定土残余强度最有效、最合理的仪器。

表 3 Q<sub>2</sub> 重塑黄土反复剪切和环形剪切残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  汇总表

Table 3 Residual strength parameters of Q<sub>2</sub> remolded loess using repeated shear and ring shear tests

土样状态	试验仪器	$c_r/\text{kPa}$	$\varphi_r/(^\circ)$
Q <sub>2</sub> 重塑黄土	四联剪切仪	27.3	28.2
	环剪仪	14.0	24.6

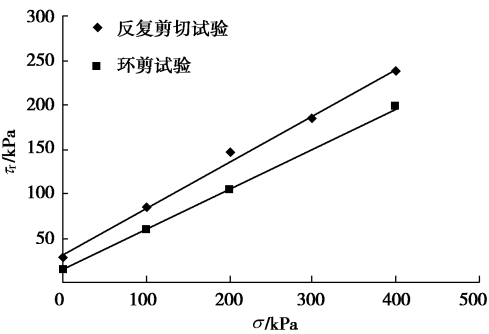


图 3 反复剪切和环剪试验残余强度和法向应力线性拟合曲线  
Fig. 3 Linear fitting curves between residual strength and normal stress using repeated shear and ring shear tests

2.2 试验方法对 Q<sub>2</sub> 重塑黄土残余强度的影响分析

目前利用环剪仪测定残余强度的方法主要有 3 种: 单级剪切试验、预剪切试验、多级剪切试验。本节以洛川 Q<sub>2</sub> 重塑黄土为对象, 主要对比单级剪切试验和多级剪切试验对 Q<sub>2</sub> 重塑黄土的残余强度的影响。

图 2, 4 分别为 Q<sub>2</sub> 重塑黄土单级剪切试验和多级剪切试验条件下得到的  $\tau - s$  曲线, 由图 2, 4 中可以发现, 竖向压力为  $\sigma=100\text{ kPa}$  条件下所得的  $\tau - s$  曲线相近, 第一级固结压力下均为初次剪切, 峰值明显, 峰值后强度衰减明显; 当竖向压力为  $\sigma=200, 400\text{ kPa}$  条件下所得到的  $\tau - s$  曲线差别较大, 单级剪切试验所得的  $\tau - s$  曲线峰值明显, 峰值后强度衰减明显; 而多级剪切试验得到的  $\tau - s$  曲线峰值和峰值后强度衰减不明显。多级剪切峰值主要是因为再次固结而引起的强度再生, 但再生强度较小, 因此峰值不明显。两种剪切方式得到的  $\tau - s$  曲线差异主要因为单级剪切在每级压力下, 土样剪切面上的黏土颗粒进行定向排列, 因此峰值明显; 而多级剪切在第一次剪切后, 黏土颗粒已经发生定向排列, 下一次剪切剪切面上主要发生黏土颗粒间的滑动摩擦。

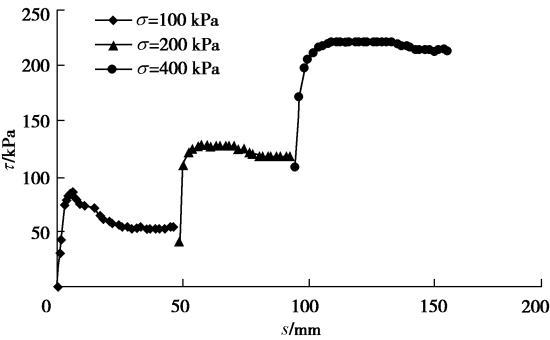


图 4 Q<sub>2</sub> 重塑黄土多级剪切  $\tau - s$  曲线  
Fig. 4  $\tau - s$  curves of Q<sub>2</sub> remolded loess using multi-level ring shear tests

图 5 表示两种剪切方式下残余强度和法向应力线

性拟合曲线, 将图 5 中所得到的残余强度参数制表得到表 4 不同剪切方式下 Q<sub>2</sub> 重塑黄土环形剪切残余强度参数表。

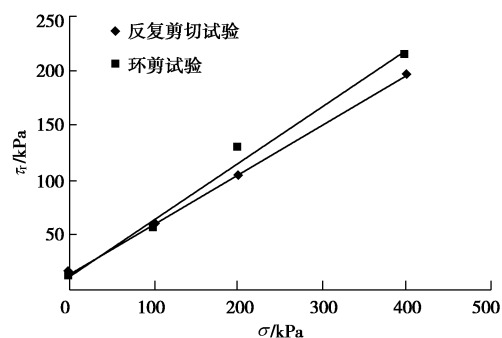


图 5 Q<sub>2</sub> 重塑黄土单级剪切和多级剪切试验残余强度和法向应力线性拟合曲线

Fig. 5 Linear fitting curves between residual strength and normal stress of Q<sub>2</sub> remolded loess using single-stage and multi-level ring shear tests

表 4 两种剪切方式下 Q<sub>2</sub> 重塑黄土环形剪切残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  汇总表

Table 4 Residual strength parameters of Q <sub>2</sub> remolded loess using different shear tests			
土样状态	剪切方式	$c_r/\text{kPa}$	$\varphi_r/(^{\circ})$
Q <sub>2</sub> 重塑黄土	单级剪切	14.0	24.6
	多级剪切	12.2	27.4

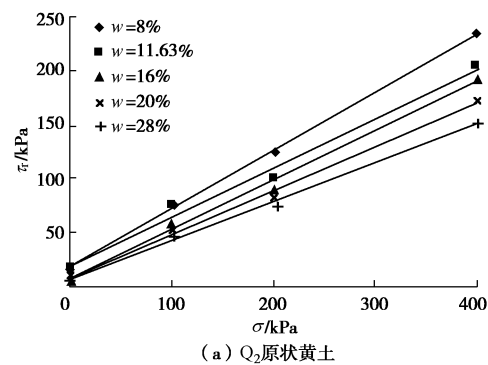
由图 5, 表 4 中可以看出, 单级剪切试验所得的残余黏聚力  $c_r$  略大于多级剪切试验所得的黏聚力  $c_r$ , 而残余内摩擦角正好相反。且剪切方式对残余黏聚力  $c_r$  影响不大, 两种方式下仅差 1.8 kPa, 而对残余内摩擦角  $\varphi_r$  影响明显, 两者相差 2.8°。因为多级剪切过程中, 试样经过多次固结, 使其密实度增大, 所以残余强度结果偏大。

2.3 初始含水率和初始结构对 Q<sub>2</sub> 黄土残余强度的影响分析

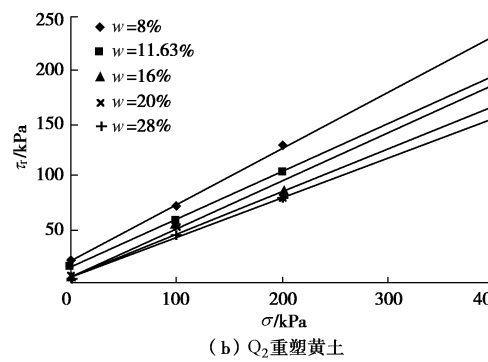
图 6 为不同初始含水率条件下洛川 Q<sub>2</sub> 原状、重塑黄土的残余强度和法向应力线性拟合曲线, 表 5 为不同初始含水率条件下洛川 Q<sub>2</sub> 黄土的残余强度参数表。

由图 6 和表 5 可以看出: 不论是原状还是重塑黄土, 其残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  均随着初始含水率的增大而减小, 但是对  $c_r$  的影响小于  $\varphi_r$ , 主要原因是初始含水率的增大使土样中的胶结物质溶解, 黄土颗粒间的水膜加厚, 颗粒间的摩擦强度减小, 因此残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  表现为随初始含水率增大而减小; 同一初始含水率条件下, 原状黄土和重塑黄土的残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  比较接近, 因为大的剪切位移条件下, 黄土的

原有结构已经遭到了彻底破坏, 说明初始结构对黄土的残余强度影响不大。



(a) Q<sub>2</sub> 原状黄土



(b) Q<sub>2</sub> 重塑黄土

图 6 不同初始含水率 Q<sub>2</sub> 黄土环剪条件下残余强度和法向应力及线性拟合曲线

Fig. 6 Linear fitting curves between residual strength and normal stress of Q<sub>2</sub> loess under different initial water contents

表 5 不同初始含水率下 Q<sub>2</sub> 原状、重塑黄土环形剪切残余强度参数  $c_r$ ,  $\varphi_r$  汇总表

Table 5 Residual shear strength parameters of crust and remolded loess under different initial water contents			
土样状态	含水率/%	$c_r/\text{kPa}$	$\varphi_r/(^{\circ})$
Q <sub>2</sub> 原状黄土	8.0	20.0	28.2
	11.6	19.8	24.5
	16.0	8.2	24.6
	20.0	10.0	21.9
	28.0	8.0	19.6
Q <sub>2</sub> 重塑黄土	8.0	22.0	27.6
	11.6	14.0	24.6
	16.0	7.5	24.2
	20.0	7.0	21.9
	28.0	7.5	19.1

2.4 干密度对 Q<sub>2</sub> 重塑黄土残余强度的影响分析

由图 7 和表 6 中可以看出重塑黄土的残余黏聚力  $c_r$  随着干密度的增大呈增大的趋势, 但是影响不是很明显。重塑黄土的残余内摩擦角  $\varphi_r$  随着干密度的增大而增大, 影响比较明显。这是因为试验干密度的增大,

使得剪切过程中剪切面上的颗粒接触面积增大, 从而导致残余强度增大。

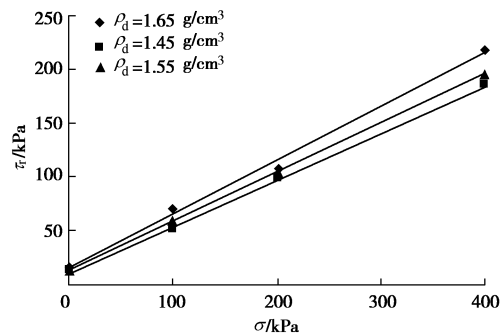


图 7 不同干密度  $Q_2$  重塑黄土残余强度和法向应力线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting curves between residual strength and normal stress of  $Q_2$  remolded loess under different dry densities

表 6 不同干密度下  $Q_2$  重塑黄土环形剪切残余强度参数  $c_r$ 、 $\varphi_r$  汇总表

Table 6 Residual strength parameters of $Q_2$ remolded loess using ring shear tests under different dry densities			
土样状态	干密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	$c_r/kPa$	$\varphi_r/(^\circ)$
$Q_2$ 重塑黄土	1.45	12.9	23.5
	1.55	14.0	24.1
	1.65	16.0	27.6

2.5 剪切速率对  $Q_2$  重塑黄土残余强度的影响分析

由图 8 及表 7 可以看出  $Q_2$  重塑黄土的残余黏聚力  $c_r$  随着剪切速率的增大而减小, 残余内摩擦角  $\varphi_r$  随着剪切速率的增大呈先增大后减小的趋势, 当速率较小 ( $v=0.01, 0.1$  mm/min) 时, 剪切速率对其残余强度参数指标的影响不大, 当剪切速率较大 ( $v=1$  mm/min) 时, 剪切速率对残余强度参数指标的影响较大, 该结论与 Skempton 在对残余强度研究中的结论一致。

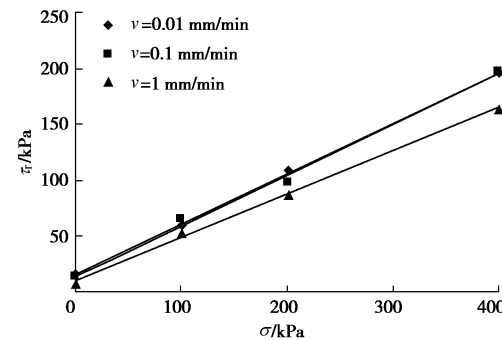


图 8  $Q_2$  重塑黄土不同剪切速率下残余强度和法向应力及线性拟合曲线

Fig. 8 Linear fitting curves between residual strength and normal stress of  $Q_2$  remolded loess under different shear rates

表 7 不同剪切速率下  $Q_2$  重塑黄土环形剪切残余强度参数  $c_r$ 、 $\varphi_r$  汇总表

Table 7 Residual strength parameters of $Q_2$ remolded loess using ring shear tests under different shear rates			
土样状态	剪切速率/( $mm \cdot min^{-1}$ )	$c_r/kPa$	$\varphi_r/(^\circ)$
$Q_2$ 重塑黄土	0.01	16.5	24.1
	0.1	14.0	24.6
	1	7.9	21.7

3 结 论

(1) 通过对比分析认为环剪仪是目前测定土残余强度最有效、最合理的仪器, 单级剪切是测定土残余强度的首选剪切方式。

(2) 通过对比分析发现初始结构对  $Q_2$  黄土残余强度参数指标无明显影响, 但初始含水率对黄土残余强度参数指标影响明显, 表现为残余强度参数  $c_r$ 、 $\varphi_r$  均随着初始含水率的增大而减小, 但是对  $c_r$  的影响小于  $\varphi_r$ 。

(3) 通过对比分析发现  $Q_2$  重塑黄土的残余黏聚力  $c_r$  随着初始干密度的增大呈增大的趋势, 但是影响不是很明显; 重塑黄土的残余内摩擦角  $\varphi_r$  随着初始干密度的增大而增大, 影响比较明显。

(4) 通过对比分析发现  $Q_2$  重塑黄土的残余黏聚力  $c_r$  随着剪切速率的增大而减小, 当速率较小 ( $v=0.01, v=0.1$  mm/min) 时, 剪切速率对其残余强度参数指标的影响不大, 当剪切速率较大 ( $v=1$  mm/min) 时, 剪切速率对残余强度参数指标的影响较大。

参考文献:

[1] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. Géotechnique, 1964, 14: 77 - 101.

[2] KANJI M A. The relationship between drained friction angles and Atteberg limits of natural soils[J]. Géotechnique, 1974, 24(4): 671 - 674.

[3] CHANDLER R J. Back analysis techniques for slope stabilization works: a case record[J]. Géotechnique, 1977, 27(4): 479 - 495.

[4] KENNEY T C. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils[C]// Proceedings of Geotechnical Conference. Oslo, 1967.

[5] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslide, folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, 35(1): 3 - 18.

[6] 李青云, 王幼麟. 泥化夹层错动带残余强度与比表面的相关性研究[C]// 第二次全国岩土力学与工程会议论文集. 北京, 1989: 319 - 325. (LI Qing-yun, WANG You-lin. Study

- on relationship between the residual strength of argillaceous interlayer shear zone and specific surface[C]// Proceedings The Second National Geotechnical Mechanics and Engineering Conference. Beining, 1989: 319 - 325. (in Chinese))
- [7] 陈晓平, 黄井武, 尹赛华, 等. 滑带土强度特性的试验研究[J]. 北京: 岩土力学, 2011, **32**(11): 3212 - 3218. (CHEN Xiao-ping, HUANG Jing-wu, YIN Sai-hua, et al. Experimental study of strength property of slip zone soils[J]. Beijing: Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3212 - 3218. (in Chinese))
- [8] 赵锡宏, 张启辉, 等. 土的剪切带试验与数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. (ZHAO Xi-hong, ZHANG Qi-hui, et al. Test and numerical analysis of soil shear zone[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [9] 李兴国, 鄢重新. 土的反复剪切及其残余强度[J]. 工程勘察, 1984(3): 55 - 59. (LI Xing-guo, YAN Chong-xin. Repeated shear and the residual strength of soil[J]. Engineering Investigation and Survey, 1984(3): 55 - 59. (in Chinese))
- [10] 孙涛. 利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 - 2010. (SUN Tao. Shear strength behavior of over-consolidation clay in ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2000 - 2010. (in Chinese))
- [11] 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. (WU Di, JIAN Wen-bin, XU Chao. Research on shear strength of residual soils by ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2045 - 2050. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)

(上接 130 页)

- [3] 张奎, 张志刚. 给水排水管道系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (ZHANG Kui, ZHANG Zhi-gang. Pipeline system of water supply and drainage[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 张邦芾. 基坑工程地下水渗流场特性研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2014. (ZHANG Bang-fu. Study on the characteristics of groundwater seepage field in foundation pit engineering[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2014. (in Chinese))
- [5] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [6] 刘丰敏. 考虑初始水力坡度和层间补给的降水引起地面沉降研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2016. (LIU Feng-min. research on ground settlement caused by dewatering considering the initial hydraulic gradient and interlayer recharge[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2016. (in Chinese))
- [7] 姚天强, 石振华. 基坑降水手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (YAO Tian-qiang, SHI Zhen-hua Manual of foundation pit dewatering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, s2006. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)