

# 黄土完全软化强度的试验研究

强 菲, 赵法锁, 宋 飞

(长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

**摘要:** 为了准确获取复活蠕滑型黄土滑坡滑带土抗剪强度参数, 需要开展黄土的完全软化强度试验研究。以山西黄土为研究对象, 采用直接固结法和预压固结法制备饱和和重塑试样, 并进行了不同剪切速率下的直剪试验和三轴固结排水剪切试验。结果表明: 低法向应力下, 制样方法对完全软化强度的影响不大, 而高法向应力下, 预压固结试样的完全软化强度大于直接固结试样; 预压固结直剪试验的剪切速率对完全软化强度的影响不大; 三轴固结排水剪切试验中, 预压固结应力相同时, 完全软化强度随围压的增加而增大, 围压相同时, 完全软化强度随预压固结应力的增加而增大, 且应力应变曲线在一定应变范围内重合; 黄土的完全软化黏聚力近似为 0 kPa, 预压固结试样的完全软化内摩擦角更接近实际状态。研究结论为复活蠕滑型滑坡稳定性分析中进行强度参数测试时重塑饱和土样的制样方法和试验方法提供了依据。

**关键词:** 完全软化强度; 直接固结法; 预压固结法; 剪切速率; 直剪试验; 三轴固结排水剪切试验; 完全软化黏聚力; 完全软化内摩擦角

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)02-0302-04

## Experimental study on fully softened strength of loess

QIANG Fei, ZHAO Fa suo, SONG Fei

(College of Geology Engineering and Geomatic, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Experimental study on fully softened strength of loess needs to be performed in order to accurately acquire the shear strength parameters of the slip soil in the resurgent and creeping loess landslide. In this paper, direct consolidation method and preloading consolidation method were used to prepare the saturated remolded samples of loess in Shanxi Province for the direct shear tests with different shear rates and triaxial consolidation drained shear tests. Research results showed that (1) the fully softened strength is not affected by sampling methods under low normal stress conditions, but the fully softened strength of preloading consolidation samples is greater than that of direct consolidation samples under high normal stress conditions; (2) the fully softened strength is not affected by the rates of the direct shear tests in which samples were prepared by preloading consolidation method; (3) for the triaxial consolidation drained shear tests, the fully softened strength increases with the increasing of the confining pressure under the same preloading consolidation stress and it increases with the increasing of preloading consolidation stress under the same confining pressure, and the stress-strain curves appear to overlap within a certain range of strain; and (4) the fully softened cohesions of samples are close to 0 kPa, and the fully softened friction angles of preloading consolidation samples are closer to the actual condition. The research results provide reference for the sampling methods and experimental methods of strength parameter tests in the stability analysis of resurgent and creeping loess landslides.

**Key words:** fully softened strength; direct consolidation method; preloading consolidation method; shear rate; direct shear test; triaxial consolidation drained shear test; fully softened cohesion; fully softened friction angle

复活蠕滑型滑坡在黄土高原地区频繁发生, 该类滑坡复活前滑带土在降雨或人工灌溉等外界因素影响下极易达到饱和和重塑或接近饱和和重塑状态, 其峰值强度被定义为完全软化

强度<sup>[1,2]</sup>, 属于抗剪强度的属性强度之一<sup>[3]</sup>。已有学者通过室内试验发现抗剪强度受试验方法、剪切速率、法向应力或围压等因素的影响<sup>[4,5]</sup>。在诸多抗剪强度及其参数的影响因素研

究中,人们对剪切速率的影响关注居多<sup>[6-14]</sup>,而针对制样方法对黄土抗剪强度影响的研究仍较少。本文以山西黄土为试验对象,采用直接固结法和预压固结法制备饱和和重塑试样,通过不同剪切速率的直剪试验和三轴固结排水剪切试验对试样进行完全软化强度测定,系统分析制样方法、剪切速率、试验方法、法向应力和围压对黄土完全软化强度的影响。

## 1 试样制备

### 1.1 试验方案

试验土样取自山西狮子河村某离石黄土(Q<sub>2</sub>)边坡。激光粒度测试结果表明(图1),该处离石黄土粒组成分以粗粉

粒为主,其含量大于60%;细粉粒及黏粒含量较少,分别为12.49%和14.58%。土样其他物理参数见表1。

本次试验采用直接固结和预压固结两种方法制备饱和和重塑试样。预压固结法制备试样时,直剪试验预压固结应力取200 kPa,三轴试验预压固结应力取200 kPa和300 kPa,待预压固结稳定后对试样施加100 kPa和200 kPa两种法向应力或围压进行二次固结,稳定后进行不同剪切速率的直剪试验和三轴固结排水剪切试验。直接固结法制备试样时,直接固结应力取100 kPa和200 kPa,待固结稳定后直接进行该直接固结应力下的直接固结直剪快剪试验。饱和和重塑试样编号及试验方法见表2。

表1 试验土样的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of tested soil

土样编号	取样地点	地层年代	黏粒含量 (%)	比重 G <sub>s</sub> / (g·cm <sup>-3</sup> )	容重 γ / (g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率 ω <sub>0</sub> (%)	塑限 ω <sub>p</sub> (%)	液限 ω <sub>L</sub> (%)	塑性指数 I <sub>P</sub>	液性指数 I <sub>L</sub>	干密度 ρ <sub>d</sub> / (g·cm <sup>-3</sup> )	天然孔隙比 e <sub>0</sub>
H10	狮子河村	Q <sub>2</sub>	14.6	2.71	1.63	11.1	19.2	25.7	6.5	-1.3	1.47	0.847

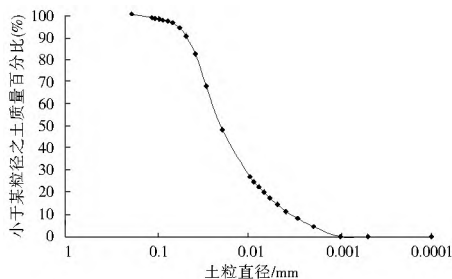


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain composition curve

表2 试样编号

Tab. 2 Sample numbers

制样方法	试验方法		
	直剪(快剪)	直剪(慢剪)	三轴
直接固结法	H10 1		
	H10 2		
预压固结法	KH10 2-1	MH10 2-1	SH10 2-1
	KH10 2-2	MH10 2-2	SH10 2-2
			SH10 3-2

注: H10 1中H10代表样号,1代表直接固结应力100 kPa,本次试验直接固结应力取100 kPa和200 kPa;预压固结试样KH(MH,SH)10-2-1中KH10代表直剪快剪样号,MH10代表直剪慢剪样号,SH10代表三轴样号,2代表预压固结应力200 kPa,1代表二次固结法向应力或围压为100 kPa。直剪试验预压固结应力取200 kPa,三轴试验预压固结应力取200 kPa和300 kPa,二次固结法向应力或围压取100 kPa和200 kPa。

### 1.2 试样制备方法

取适量天然土样,碾碎并过2 mm筛,加入适量水并均匀搅拌成饱和和重塑土膏,放入保湿器中静置48 h至水分分散均匀。

#### (1) 直接固结法。

首先将调制的饱和和重塑土膏填入高度2 cm、面积30 cm<sup>2</sup>的圆形环刀内,然后装入应变控制式直剪仪中并分别在100 kPa和200 kPa直接固结应力下进行固结。为防止固结过程中挤浆,可逐级施加直接固结应力,待固结稳定后直接在直剪仪上进行该直接固结应力下的直接固结直剪快剪试验。

#### (2) 预压固结法。

首先,准备一个15 cm×10 cm×10 cm的固结容器(图2(a))和一个10 cm×10 cm×5 cm的方盒(图2(b))。

其次,用纱布将固结容器底部封好并预先放入一张10 cm×10 cm的浸湿滤纸;用粗砂填满方盒,保证土膏的固结排水状态,将固结容器置于方盒之上,然后将调制好的饱和和重塑土膏均匀填入固结容器,顶面刮平并依次放滤纸、纱布、塑料片和盖子,见图2(c)。

然后,采用剪切蠕变仪<sup>[15]</sup>的滑轮式垂直加压系统对固结容器中的饱和和重塑土膏施加200 kPa或300 kPa预压固结应力(图2(d)),预压固结应力可逐级施加。为了防止固结时间过长导致饱和度降低,将土样和盖子的缝隙用饱水棉花塞紧。待固结稳定后用脱模仪(图2(e))推出试块(图2(f)),并将其制备成预压固结直剪环刀试样或预压固结三轴土柱试样(编号见表2)。

最后,将预压固结直剪环刀试样装入直剪仪中,施加100 kPa和200 kPa两种二次固结法向应力,稳定后分别进行速率为1.2 mm/min和0.02 mm/min的预压固结直剪快剪试验和预压固结直剪慢剪试验;将预压固结三轴土柱试样装入三轴仪中,施加100 kPa和200 kPa两种围压,稳定后进行三轴固结排水剪切试验。

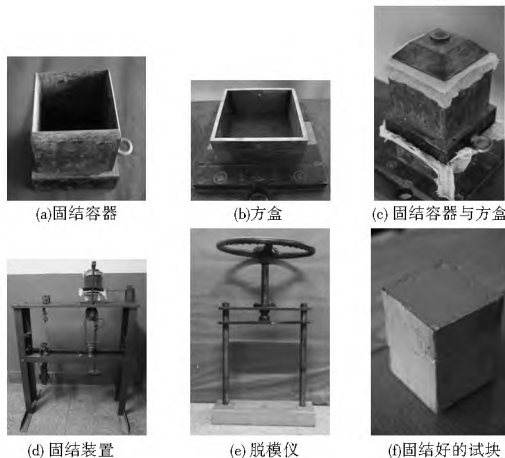


图2 固结仪器

Fig. 2 Consolidation devices

## 2 试验结果对比分析

### 2.1 制样方法对比

直接固结法制备试样时,在对饱和和重塑土膏施加直接固结应力的瞬间,土膏极易挤出导致厚度降低,直接影响剪切面的形成,进而影响直剪试验的结果。预压固结法解决了上述问题,不仅满足了试样的尺寸要求,而且饱和效果好,密实度均匀。从直接固结法和预压固结法的制样过程可以看出,两者的本质区别在于应力路径,直接固结法是一个直接加载的过程,而预压固结法是一个卸载再加载的过程。

### 2.2 直接固结直剪快剪与预压固结直剪快剪对比

直接固结直剪快剪试样 H10-1、H10-2 与预压固结直剪快剪试样 KH10-2-1、KH10-2-2 的剪应力与剪切位移关系曲线见图 3。直剪快剪的剪切速率均为 1.2 mm/min,历时 3~5 min,剪至剪切变形超过 6 mm 停止。

由图 3 可见,预压固结试样 KH10-2-1 与直接固结试样 H10-1 的应力应变曲线接近,两者的完全软化强度基本相等。预压固结试样 KH10-2-2 的剪应力在剪切位移小于 0.6 mm 范围内接近于零,而直接固结试样 H10-2 的剪应力迅速上升;当剪切位移等于 3.485 mm 时,试样 KH10-2-2 与试样 H10-2 的剪应力相等;当剪切位移大于 3.485 mm 时,试样 KH10-2-2 的剪应力大于试样 H10-2 的剪应力,直至剪切破坏,最终试样 KH10-2-2 的完全软化强度大于试样 H10-2。

综上,制样方法在低法向应力下对完全软化强度的影响不大;在高法向应力下,直接固结试样比预压固结试样在低应变范围内强度更容易发挥,但超过一定应变值,预压固结试样的强度将超过直接固结试样,且预压固结试样的完全软化强度大于直接固结试样。

### 2.3 预压固结直剪快剪与预压固结直剪慢剪对比

预压固结直剪快剪试样 KH10-2-1、KH10-2-2 与预压固结直剪慢剪试样 MH10-2-1、MH10-2-2 的剪应力与剪切位移关系曲线见图 4。直剪快剪速率为 1.2 mm/min,直剪慢剪速率为 0.02 mm/min。

由图 4 可见,直剪慢剪试样 MH10-2-1、MH10-2-2 的剪应力在剪切位移小于 1 mm 范围内均接近于零,而直剪快剪试样 KH10-2-1、KH10-2-2 的剪应力迅速上升,这归因于慢剪过程中剪切带土剪胀产生的瞬时负孔隙水压力有充足的时间来消散,有效应力呈逐渐增大趋势。当剪切位移等于 2.6 mm 时,试样 MH10-2-1 与试样 KH10-2-1 的剪应力相等;当剪切位移大于 2.6 mm 时,试样 MH10-2-1 的剪应力大于试样 KH10-2-1,直至剪切破坏,但最终两者的完全软化强度值相等。当剪切位移等于 4.5 mm 时,试样 MH10-2-2 与试样 KH10-2-2 的剪应力相等;当剪切位移大于 4.5 mm 时,两者的应力应变曲线基本重合,最终试样 KH10-2-2 的完全软化强度大于试样 MH10-2-2。

综上,在低应变范围内,剪切速率较快的试样强度比剪切速率较慢的试样更容易发挥;直剪快剪和直剪慢剪的应力应变曲线必然在某一应变值处相交,超过该应变值后,剪切速率对完全软化强度的影响不大,且二次固结法向应力越大,快剪和慢剪的应力应变曲线相交时的剪应变越大。

### 2.4 三轴试验结果分析

三轴固结排水剪切试样 SH10-2-1、SH10-2-2、SH10-2-3 的剪应力与剪切位移关系曲线见图 5。轴向应变控制速率为 0.012 mm/min。

由图 5 可见,试样 SH10-2-2 的完全软化强度大于试样 SH10-2-1,即完全软化强度随围压的增加而增大。轴向应变小于 10% 时,试样 SH10-2-2 与试样 SH10-3-2 的应力应变曲线基本重合;轴向应变在 10%~15% 范围内,试样 SH10-3-2 的主应力差大于试样 H10-2-2;轴向应变等于 15% 时,试样均达到峰值强度,即试样 SH10-3-2 的完全软化强度大于试样 H10-2-2 的完全软化强度;轴向应变超过 15% 后,应力应变曲线均开始平稳下降。

综上,在三轴固结排水剪切试验中,同一预压固结应力制备的试样,其完全软化强度随围压的增加而增大;不同预压固结应力制备的试样在相同围压条件下剪切得到的完全软化强度随预压固结应力的增加而增大,且其应力应变曲线在一定应变范围内重合。

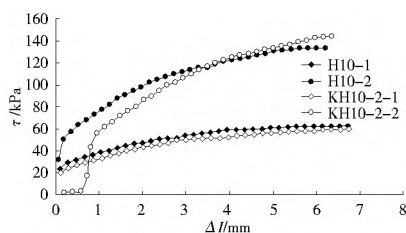


图 3 两种制样方法下试样的应力应变关系曲线

Fig. 3 Stress strain curves of samples under two preparing methods

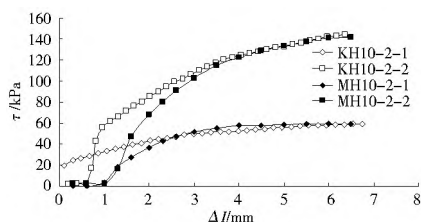


图 4 不同剪切速率下试样的应力应变关系曲线

Fig. 4 Stress strain curves of samples under different shear rates

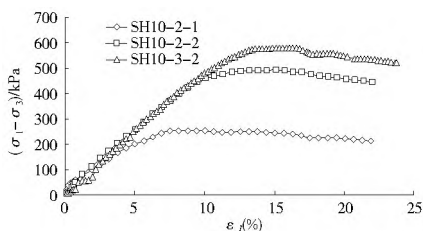


图 5 预压固结三轴固结排水剪切试样的应力应变关系曲线

Fig. 5 Stress strain curves of preloading consolidation samples in the triaxial consolidation drained shear tests

## 3 完全软化强度参数对比分析

根据试验结果,获得不同试样的完全软化强度参数(黏聚力和内摩擦角)分别如下。

直接固结直剪快剪试样 H10-1、H10-2 的黏聚力为 0.8 kPa,内摩擦角为 31.2°。

预压固结三轴固结排水剪切试样 SH10-2-1、SH10-2-2 的黏聚力为 3.6 kPa,内摩擦角为 33°。

预压固结直剪快剪试样 KH10-2-1、KH10-2-2 的黏聚力为 0 kPa, 内摩擦角为 33.2°。

预压固结直剪慢剪试样 MH10-2-1、MH10-2-2 的完全软化强度参数与预压固结直剪快剪相同。

由此可知,不同的制样方法、试验方法和剪切速率试验测得的完全软化黏聚力均接近于 0 kPa; 预压固结三轴固结排水剪切试验测得的完全软化内摩擦角比直接固结直剪快剪结果大将近 2°, 而与预压固结直剪慢剪和预压固结直剪快剪结果相近, 仅差 0.2°。由于三轴试验结果更接近复活蠕滑型滑坡滑带土的应力状态, 因此本次预压固结三轴固结排水试验、预压固结直剪慢剪和预压固结直剪快剪结果更为准确, 同时也说明对复活蠕滑型黄土滑坡进行预测及稳定性分析时, 采取预压固结法制备试样测得的完全软化强度参数更接近实际状态。

## 4 结论

本文对山西黄土的完全软化强度进行了系统的试验研究。试验采用直接固结法和预压固结法两种方法制备饱和和重塑试样, 进行了不同剪切速率下的直剪试验和三轴固结排水剪切试验, 分析了不同的制样方法、剪切速率、试验方法、法向应力或围压对黄土完全软化强度及其参数的影响, 得出如下结论。

(1) 预压固结法与直接固结法的加载路径不同, 制样效果也不同。预压固结法更能满足试样的尺寸要求, 且制样效果好。

(2) 预压固结法与直接固结法在低法向应力下对完全软化强度的影响不大; 在高法向应力下, 直接固结试样的强度在低应变范围内比预压固结试样更容易发挥, 超过该应变范围, 后者强度将超过前者, 即预压固结试样的完全软化强度大于直接固结试样的完全软化强度。

(3) 预压固结直剪快剪试样在低应变范围内比直剪慢剪试样更易发挥; 两者的应力应变曲线必然在某一应变值处相交, 法向应力越大, 曲线相交时对应的剪应变越大。超过该值后, 剪切速率对完全软化强度的影响不大。

(4) 三轴固结排水剪切试验中, 同一预压固结应力制备出来的试样, 其完全软化强度随围压的增加而增大; 不同预压固结应力制备出来的试样在相同围压条件下剪切得到的完全软化强度随预压固结应力的增加而增大, 且其应力应变曲线在一定应变范围内重合。

(5) 黄土的完全软化黏聚力近似为 0 kPa; 预压固结直剪慢剪、预压固结直剪快剪测得的完全软化强度参数比直接固结直剪快剪更接近三轴固结排水剪切试验的结果, 即预压固结法制备试样测得的完全软化强度参数更符合实际状态。

## 参考文献(References):

- [1] 强菲. 黄土的完全软化强度研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. (QIANG Fei. Study on fully softened shear strength of loess [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- [2] Timothy D Stark, Hisham T Eid. Slope stability analyses in stiff fissured clays[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 1997, 123(4): 335-343.
- [3] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1849-1854. (LIU Xiaoli, DENG Jianhui, LI Guangtao. Shear strength properties of slip soils of landslides: an overview[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1849-1854. (in Chinese))
- [4] 齐剑峰, 栾茂田, 聂影, 等. 饱和黏土剪切变形与强度特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(4): 551-556. (QI Jianfeng, LUAN Maotian, NIE Ying, et al. Experimental study of shear and strength behavior of saturated clay[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(4): 551-556. (in Chinese))
- [5] 吕宾林, 王金文, 蔡德钧. 剪切速率对黏土不排水强度影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(1): 73-75. (LYU Binlin, WANG Jinwen, CAI Degou. Experimental study of influence of shear rate on clay undrained strength[J]. Railway Engineering, 2013(1): 73-75. (in Chinese))
- [6] 杨小平, 李永红. 剪切速率对结构性黄土力学性质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 136-138. (YANG Xiaoping, LI Yonghong. Influence of shearing rate on mechanical property of constructional loess[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(3): 136-138. (in Chinese))
- [7] 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): 459-462. (DANG Jinqian, JIANG Canglan, JI Zhongliang. Effects of shear rate on mechanical behavior of structural loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 459-462. (in Chinese))
- [8] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 728-733. (XU Xiaofeng, WEI Houzhen, MENG Qingshan, et al. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse grained soils in large scale direct shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese))
- [9] 胡伟娜, 潘璇, 寇明珠, 等. 剪切速率对饱和粉质黏土快剪指标影响分析[J]. 水运工程, 2013(8): 173-177. (HU Weina, PAN Xuan, KOU Mingzhu, et al. On shear rate on saturated silty clay test results in direct shear test[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(8): 173-177. (in Chinese))
- [10] 周杰, 周国庆, 赵光思, 等. 高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2805-2810. (ZHOU Jie, ZHOU Guoqing, ZHAO Guangsi, et al. Analysis of influence of shear rate on shear strength of sand under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2805-2810. (in Chinese))
- [11] 刘子诏. 剪切速率对凝聚力和摩擦角的影响规律[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(2): 116-120. (LIU Zizhao. Influence of shearing rate on cohesion and friction angle[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(2): 116-120. (in Chinese))
- [12] 姜洪伟, 赵锡宏. 剪切速率对各向异性不排水剪强度影响分析[J]. 同济大学学报, 1997, 25(4): 390-395. (JIANG Hongwei, ZHAO Xihong. Analysis of the shearing rate effect on anisotropic undrained strength of clays[J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(4): 390-395. (in Chinese))
- [13] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhurjiang. Theoretical Soil Mechanics[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [14] 龙建辉. 高速远程黄土滑坡预测预报方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008. (LONG Jianhui. Research on forecasting methods of the loess landslide with high speed and long run distance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [15] 蔺晓燕. 一种新型剪切蠕变仪的研制与应用[D]. 西安: 长安大学, 2009. (LIN Xiaoyan. Development of a new type of shear creep apparatus and its application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))