

重塑黄土抗剪强度的环剪试验研究

王 炜, 骆亚生

(1. 山西农业大学 城乡建设学院, 山西 太谷 030801; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 研究大应变条件下黄土强度的影响因素及规律, 为黄土地区发生滑坡等大变形破坏提供理论依据。[方法] 利用环剪仪对重塑黄土进行大剪切位移下的剪切试验, 探究不同正应力及剪切方式对不同含水率的重塑黄土其残余强度的影响。[结果] 正应力越大, 残余强度越大, 达到残余强度所需的剪切位移越小; 随着含水率的增大, 残余黏聚力浮动值不大, 残余内摩擦角逐渐减小, 并据此拟合出残余内摩擦角与含水率的参考公式; 从脆性指数的角度得出所研究的重塑黄土的应变软化都不明显, 且脆性指数随着正应力和含水率的增加而降低。[结论] 重塑黄土的峰值强度和残余强度受含水率、正应力的影响规律相似, 可通过含水率对残余强度进行估算。

关键词: 重塑黄土; 环剪试验; 残余强度; 脆性指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0110-04

中图分类号: TU411

文献参数: 王炜, 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.019; Wang Wei, Luo Yasheng. Experimental study on shear strength of remolded loess by ring shear test[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 110-113. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.019

Experimental Study on Shear Strength of Remolded Loess by Ring Shear Test

WANG Wei^{1,2}, LUO Yasheng²

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To study the influencing factors and rules of loess strength under large strain condition in order to provide a theoretical basis for large deformation damages like landslide in loess area. [Methods] Large shear displacement test with ring shear apparatus were conducted to explore the influence of positive stress and shear modes on the residual strength of remolded loess at different water content levels. [Results] The results showed that the greater the effective normal stress, the greater residual strength was, and the smaller the required shear displacement would be. The residual cohesive force fluctuated slightly and the residual internal friction angle decreased with the increase of water content, and a reference formula between residual internal friction angle and water content was fitted. From the perspective of brittle index, strain softening of the remolded loess was not obvious, and the brittleness index decreased with the increase of effective normal stress and water content. [Conclusion] The responses of the peak strength and residual strength to water content and positive stress were similar. Thus the residual strength can be estimated by water content.

Keywords: remolded loess; ring shear test; residual strength; brittleness index

黄土由于其水敏性、大孔隙性、弱胶结等特性容易大规模滑坡, Skempton^[1]指出滑坡滑动面上的平均剪应力比其抗剪强度小很多的原因是残余强度的存在。残余强度是指在排水剪切试验中, 随着剪切位移的增加, 土体强度先增加后减小到一个稳定值, 即排水剪切

试验中的最小强度或最终强度。因此, 研究土的残余强度可以探究土体破坏后强度的降低规律。

残余强度是一个短期强度, 滑坡发生后边坡的稳定性评价应该用残余强度^[2]; 谭文辉等^[3]分别用峰值强度与残余强度对边坡提出加固措施是安全经济的。

收稿日期: 2017-06-09

修回日期: 2017-07-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于土体结构性变化的黄土滑坡灾变机理研究”(51178392); 山西农业大学青年科技创新基金(J141702131)

第一作者: 王炜(1988—), 女(汉族), 山西省寿阳县人, 硕士, 助教, 主要从事黄土力学与工程的研究。E-mail: 1508276934@qq.com。

通讯作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程研究。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

人们通过各种手段对土样进行室内剪切试验以研究残余强度参数; Bishop 等^[4], Townsend 等^[5]对伦敦黏土进行试验, 任惠芳^[6]对宝中线取得的黏土试样进行了残剪试验, 发现土的残余强度与原始结构、初始密度、固结历时无关。戴福初等^[7]对香港大屿山残坡积土进行环剪试验, 发现残余强度与正应力之间的关系, 指出环剪试验有单剪、预剪和多级剪 3 种。任惠芳^[6]、戴福初等^[7]、孙涛等^[8]探究了剪切速率对残余强度的影响。任惠芳^[6]、张昆等^[9]、周平根^[10]通过试验及资料总结, 得出残余强度与土的黏粒含量、塑性指数 (I_p)、比表面积 B 之间的经验关系。

目前残余强度的主要试验仪器有: 环剪仪, 应变式直剪仪, 三轴剪切仪, 还有现场大面积剪切仪。杨有莲等^[11]指出, 残余强度可由扭转剪切方法精确测出。洪勇等^[12]总结国内外环剪试验得出的大剪切位移下的强度衰减规律较好。直剪和三轴试验中试样的剪切面很小且剪切变形量不大, 环剪仪克服了这些不足, 且能够在试验中保持剪切面面积不变, 另外环剪仪可以设定滑动距离, 控制剪切速度, 是目前测试土的残余强度较为先进可靠的方法。黄土是一种特殊性的结构土, 目前对该类土进行环剪试验的研究成果还较少, 因此本文拟利用 HJ-1 型环剪仪, 对不同含水率的重塑黄土在不同正应力、不同剪切方式下进行环剪试验, 研究其峰值强度、残余强度及变形规律, 并从残余强度角度对大变形下黄土的工程性质(如浸水软化性、脆性指数)进行分析, 为黄土地区发生滑坡等大变形破坏提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用土料取自陕西省泾阳县太平镇崔师某砖窑, 取土的纵向深度约 4.0 m, 属于晚更新世马兰黄土, 显棕黄色, 其主要的物理指标见表 1。

表 1 试验土料基本物理指标

天然含水率/%	天然干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/%
16.2	1.28	2.74	32.7	16.4	16.3

1.2 试验仪器

试验采用的仪器为 HJ-1 型环剪仪, 该仪器主要用于测量土的残余强度。该仪器由轴向加载系统, 变速箱, 扭矩显示器, 水平角度表盘和剪切盒组成, 可提供的剪切速率为 $3.0 \times 10^{-6} \sim 2.1 \times 10^{-2}$ r/min, 能满足多种试验的要求。施加到试样上的最大法向应力为 900 kPa, 剪切扭矩最大值为 300 N·m。

1.3 试验步骤

本试验采用重塑土样。制备过程为将土样烘干碾碎, 过 2 mm 的土工筛, 喷洒试验设定含水率所需的水量, 并且让水与土进行 24 h 以上的充分作用, 制备成尺寸为 $\varphi 100$ mm(外径) \times $\varphi 60$ mm(内径) \times 20 mm(高), 密度为 $1.52 g/cm^3$ 的试样。根据计算得试样的面积为 $50.27 cm^2$, 试样平均直径为 8.17 cm。

为避免调整变速箱档位对土样造成的扰动, 装样前就调好变速箱的档位。将土样装入剪切盒, 并在正应力下进行固结。待固结完成后, 记录水平角度表盘读数作为转角初始值, 开始扭转剪切。

1.4 试验原理及计算公式

用 HJ-1 型环剪仪进行剪切试验过程中, 剪切位移可以无限增大, 空心试样的剪切面积保持定值, 剪切面上正应力和剪应力均匀分布^[11]。HJ-1 型环剪仪工作原理见图 1。试验过程中, 剪切面的变形随着半径而变化, 由于试样宽度较小, 一般采用平均剪应力 τ 和平均剪切位移 S , 这 2 个量可通过试验的直接成果扭矩 M 和角位移 θ ^[13] 计算得出(表 2)。计算公式为:

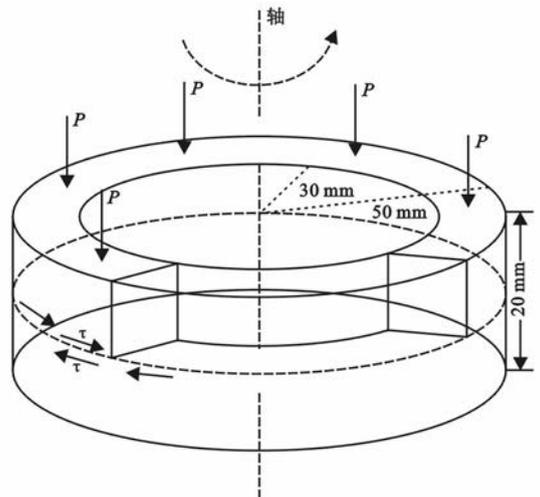
平均剪应力 τ

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

平均剪切位移 S

$$S = \frac{\theta \cdot \pi \cdot D_m}{360^\circ} = 8.17\pi v_2 t \quad (2)$$

式中: r_1 ——试样圆环内半径(cm); r_2 ——试样圆环外半径(cm); M ——扭矩(N·m); θ ——剪切角位移($^\circ$); v_2 ——下剪切盒转速(转/min); D_m ——试样直径(cm); 根据试验设置选剪切速率为 0.1 m/min; t ——扭转剪切历时(min)。



注: P 为剪切面上正应力; τ 为剪应力。

图 1 HJ-1 型环剪仪工作机理

表 2 重塑黄土环剪试验方案

试样编号	含水率/%	正应力/kPa
CS ₁ -CS ₃	13	100~150~200~300, 200~300~400~600, 300~400~600~800
CS ₄ -CS ₆	16	100~150~200~300, 200~300~400~600, 300~400~600~800
CS ₇ -CS ₉	19	100~150~200~300, 200~300~400~600, 300~400~600~800
CS ₁₀	22	100~150~200~300

注:CS 表示试样是重塑制备而成;正应力加载方式采取多级加载,每级加载剪切前需重新固结稳定,且环剪方向与之前的方向保持一致。

2 试验结果与分析

2.1 剪切面形态及试验结果

重塑黄土试样的剪切破坏,土样在剪切盒闭合处分为上下两层(如图 2 所示)。剪切面高低不平,说明剪切带是不规则的土层,且原始土样呈黄褐色,而剪切破坏之后的土体呈深黄褐色,图 2b 和 2c 对比可

知,剪切带附近的土体随着含水率的增加表现出泥化现象,其颜色也逐渐变深。另外环剪过程中,孔隙水只能从剪切盒下部或者剪切盒中间排出,所以排水过程较为缓慢,随着剪切位移的增加,土颗粒随着孔隙水一起向剪切盒处运移,所以破坏面上土颗粒较为细腻,这一结论与廖建民等^[14]、王顺等^[15]所得结论一致。

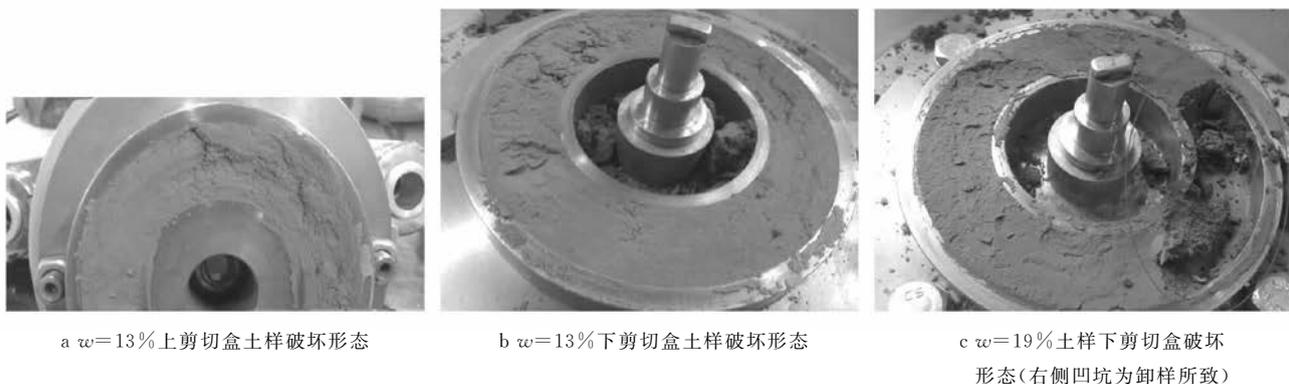


图 2 环剪试验下重塑黄土剪切面特征

图 3 所示为不同含水率的重塑黄土土样在相同的正应力加载作用下所得到的多级剪切剪应力—剪切的位移曲线。

从图 3 中可以看出:①固结结束开始环剪试验后,随着剪切位移的增加,土体强度逐渐增加,达到其最大值即峰值强度后,剪应力会有一定的降低,最后稳定在残余强度,此时土体已被破坏。之后在进行固

结、环剪试验,剪应力—剪切位移曲线与第一级形状相似,但达到残余强度时的剪切位移要小很多,这时因为土体破坏之后土颗粒之间的咬合黏结作用降低,故随着加载级别的增大,土体更容易达到残余强度。②加载级别越高,正应力越大,得到的峰值强度与残余强度均越大,而含水率对土体的峰值强度和残余强度的影响规律相同。

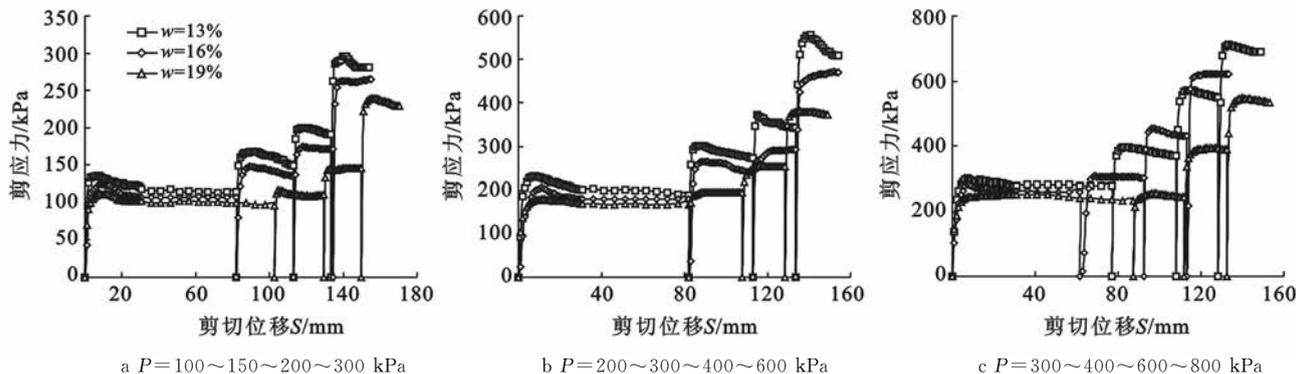


图 3 重塑黄土在多级剪切下的剪应力—剪切位移关系曲线

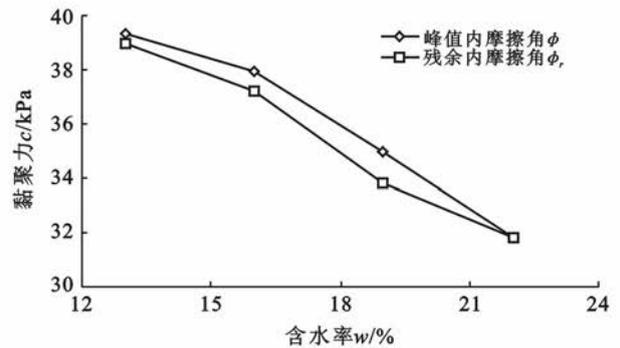
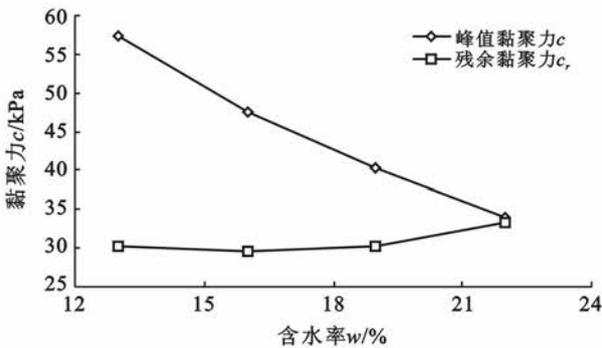
2.2 重塑黄土的浸水软化性

将峰值强度和残余强度与对应的正应力进行线性拟合,得出不同含水率的重塑黄土其峰值强度指标 c, φ 和残余强度指标 c_r, φ_r 。由图 4 可知,随着含水率的增加,残余强度黏聚力 c_r 值相差范围在 10 kPa 之内,残余强度内摩擦角 φ_r 值逐渐减小。由于残余强度生效的时候,土体结构已经破坏,大剪切位移下土体颗粒已经发生定向排列,故此时黏聚力对土体的抗剪强度几乎没有贡献了,即 φ_r 才是土体残余强度得主要贡献者。图 4a 显示残余黏聚力大约在 30 kPa 左右,分析原因可能是土颗粒在环剪的过程中被挤到

剪切缝,剪切盒上下摩擦造成的。残余黏聚力 c_r 受含水率影响不明显,残余内摩擦角 φ_r 随着含水率的增加明显降低,表现为土体残余强度随着含水率的增加而降低。因此,在边坡稳定性评价中,应该慎重考虑降雨、冻融等作用对土体残余强度的影响。

评价边坡稳定性时,残余黏聚力较小且不起主导作用,为安全起见按零记,而残余内摩擦角作用较大,所以应慎重选择,将表 3 中同级正应力条件下得到的残余内摩擦角与试样含水率进行拟合,得出适用于该种土的参考公式:

$$\varphi_r = 53.437e^{-0.024w}, R^2 = 0.9839 \quad (3)$$



a 黏聚力与含水率的关系曲线

b 内摩擦角与含水率的关系曲线

图 4 含水率与残余黏聚力、残余内摩擦角关系曲线

2.3 重塑黄土的应变软化分析及脆性指数

Bishop^[16]首次提出脆性指数 I_B ,脆性程度与应变软化有关,所以脆性指数又叫做应变软化系数。脆性指数的定义是最大剪应力与最小剪应力的差值再除以最大剪应力,因此 I_B 的范围在 0~1 之间,越大说明土样脆性越强,即残余强度比峰值强度衰减程度越大,强度软化越明显。本文中相关结果如表 3 所示。

表 3 不同含水率试样在各级正应力下的峰值强度、残余强度及脆性指数

含水率/ %	正应力/ kPa	峰值强度/ kPa	残余强度/ kPa	脆性指数
13	100	135.44	114.49	0.15
	200	231.91	198.78	0.14
	300	300.86	278.42	0.07
16	100	124.73	107.67	0.14
	200	205.21	180.07	0.12
	300	280.83	260.84	0.07
19	100	112.05	96.47	0.14
	200	180.10	164.02	0.09
	300	252.83	235.40	0.07
22	100	97.93	96.46	0.01
	200	158.34	156.39	0.01
	300	232.33	220.88	0.01

从表 3 中可得,不同含水率、不同正应力作用下的峰值强度、残余强度下,脆性指数都较小,即峰值强度与残余强度差值不大,软化现象不明显。随着正应力的增加,脆性指数呈减小的趋势,说明在较大正应力作用下试样的剪切特性表现为弱软化,试样达到峰值强度之后略微减小便达到残余强度。随着含水率的增加,脆性指数呈现减小的趋势,说明在高含水率的条件下,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。

3 结论

(1) 重塑黄土在荷载下,先达到峰值强度,然后出现弱软化达到残余强度。随着正应力的增大,重塑黄土的残余强度增大,且达到残余强度所需的剪切位移越小,即越易达到残余强度。

(2) 含水率对重塑黄土的峰值强度有影响,对大应变条件下的残余强度也有影响,主要表现在残余内摩擦角度随含水率的增大而减小,通过拟合得出残余内摩擦角与含水率的参考公式,且相关性较好。

(3) 本文所选重塑黄土的应变软化都较弱,表现为脆性指数都较小,且脆性指数随着正应力和含水率的增加而降低。

- Karst stand[J]. *Plant And Soil*, 1995,168-169(1):151-160.
- [3] 张福锁,曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. *土壤学报*,1992,29(3):239-250.
- [4] 廖超林,傅灵芝,盛浩,等. 紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J]. *农业工程学报*,2014,30(21):111-119.
- [5] Riley D, Barber S A. Bocarbonate accumulation and pH changes at the soybean root soil interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969,33:905-908.
- [6] 詹媛媛,薛梓瑜,任伟,等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. *生态学报*,2009,29(1):59-66.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2005.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理分析[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [9] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*,2007,40(9):1973-1979.
- [10] 张超,刘国彬,薛蕊,宋籽霖,张昌胜. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. *中国农业科学*,2011,44(3):507-515.
- [11] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. *植物生态学报*,2013,37(3):197-208.
- [12] 沈慧,姜凤崎,杜晓军,等. 水土保持林土壤肥力及评价指标[J]. *水土保持学报*,2000,14(2):60-65.
- [13] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J]. *西安理工大学学报*,2009,25(4):377-382.
- [14] 周萍,刘国彬,侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. *草地学报*,2008,16(4):396-402.
- [15] 刘金福,洪伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[J]. *山地学报*,2001,19(6):565-569.
- [16] 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等. 沙棘一侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. *西北林学院学报*,2007,22(5):1-6.
- [17] 侯杰,叶功富,张立华. 林木根际土壤研究进展[J]. *防护林科技*,2006(1):30-33.
- [18] 吉艳芝,冯万忠,陈立新,等. 落叶松混交林根际与非根际土壤养分、微生物和酶活性特征[J]. *生态环境* 2008,17(1):339-343.
- [19] 苏永中,赵哈林,张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. *应用生态学报*,2002,13(7):802-806.
- [20] 薛梓瑜,周志宇,詹媛媛,等. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征[J]. *生态学报* 2010,30(2):0341-0349.

(上接第 113 页)

[参 考 文 献]

- [1] Skempton A W. Long-term stability of clay slopes[J]. *Geotechnique*, 1964,14(2):157-168.
- [2] 田斌,戴会超,王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2004,23(17):2887-2892.
- [3] 谭文辉,任奋华,苗胜军. 峰值强度与残余强度对边坡加固的影响研究[J]. *岩土力学*,2007,28(S1):616-618.
- [4] 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.
- [5] Townsend F C, Gilbert P A. Tests to measure residual strengths of some clay shales[J]. *Geotechnique*. 1973,23(2):267-271.
- [6] 任惠芳. 浅析滑坡土的残余强度[J]. *青海地质*,1995(2):70-74.
- [7] 戴福初,王思敬,李焯芬. 香港大屿山残坡积土的残余强度试验研究[J]. *工程地质学报*,1998,6(3):223-229.
- [8] 孙涛,洪勇,栾茂田,等. 采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):2000-2004.
- [9] 张昆,郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. *铁道工程学报*,2007,24(8):13-15.
- [10] 周平根. 滑带土强度参数的估算方法[J]. *水文地质工程地质*,1998(6):30-32.
- [11] 杨有莲,朱俊高,余挺,等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. *岩土力学*,2009,(11):3256-3260.
- [12] 洪勇,孙涛,栾茂田,等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. *岩土力学*,2009,30(3):628-634.
- [13] 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.
- [14] 廖建民,吴益平,欧光照,等. 采用环剪仪对滑带土抗剪强度特性的研究[J]. *武汉理工大学学报*,2013,35(10):92-95.
- [15] 王顺,项伟,崔德山,等. 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.
- [16] Bishop A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]// *Proceedings of the Geotechnical Conference on the Shear Strength of Natural Soils and Pocks*. Oslo: Norwegian Geothchnical Institute, 1967:142-150.