

剪切方式对重塑黄土残余强度的影响

王 炜^{1,2}, 骆亚生²

(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] 探究剪切方式对重塑黄土残余强度的影响, 为黄土滑坡工程评价及治理提供科学依据。[方法] 利用环剪仪对泾阳重塑黄土进行环剪试验。[结果] 重塑黄土的峰值强度及残余强度均随着有效法向应力的增加而增大。随着有效法向应力的增加, 土体达到残余强度所需的剪切位移减小; 重塑黄土的变形表现为受剪压缩。单级剪得到的残余强度指标值与多级剪切得到的残余强度指标值的均值相近。[结论] 剪切方式建议首选单级剪切。

关键词: 黄土; 环剪试验; 剪切方式; 残余强度; 变形

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0177-05

中图分类号: TU411

文献参数: 王炜, 骆亚生. 剪切方式对重塑黄土残余强度的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 177-181. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.027. Wang Wei, Luo Yasheng. Effect of different ring shear tests on residual strength of remolded loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 177-181.

Effect of Different Ring Shear Tests on Residual Strength of Remolded Loess

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] Exploring the influence of shearing method on the residual strength of remolded loess in order to provide a scientific basis for the evaluation and treatment of loess landslide engineering. [Methods] To explore the influence of different shear modes on peak strength, residual strength and deformation, ring shear test was carried out on Jingyang loess by ring shear apparatus. [Results] The peak strength and residual strength of remolded loess increased with the increase of effective normal stress, and the greater the effective normal stress, the easier the loess to achieve the residual strength. The deformation of remolded loess is shown as shear compression. The average value of residual strength index obtained by single-stage shear and multistage shear was close. [Conclusion] The shear method is recommended for single-stage shear.

Keywords: loess; ring-shear test; shear method; residual strength; deformation

滑带土随着滑坡的发生而形成并发展,是滑坡的重要组成部分^[1],从滑带土角度对滑坡进行研究有重要的意义^[2],因此要从多方面对滑带土进行研究,目前地质方面的研究已有不少成果^[3],滑带土强度特性的研究是滑坡研究中最重要内容,自 1964 年 Skempton^[4]提出残余强度后,滑坡土体的强度研究便为以残余强度为主。残余强度的获取方式较多,主要包括反分析评价法^[5]、数值模拟法^[6-8],以及试验测算^[9]。李妥德^[9]总结指出残余强度的测试途径主要包括:大位移剪切、预制切面剪切和沿天然剪切面剪

切,主要的试验仪器有:环剪仪、应变式直剪仪、三轴仪和现场大面积剪切仪。环剪仪的剪切过程为空心扭转,其优点在于剪切过程中剪切面面积稳定、面上应力均匀分布^[10],试样可以沿着一个方向连续剪切,且有效法向应力、剪切速率都可控制,因此扭转剪切测得的残余强度准确率高^[11],能较好地模拟滑坡^[12-13]。黏土的残余强度研究成果较多,而黄土作为一种特殊性质的土体,再加上滑带土的重要性及特殊性^[14-15],且土在不同剪切方式下的应力—应变状态和强度指标存在差异^[16]。

收稿日期:2018-05-14

修回日期:2018-06-01

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项目(2017020)

第一作者:王炜(1988—),女(汉族),山西省寿阳县人,硕士,助教,主要从事水工程与环境的研究工作。E-mail:1508276934@qq.com。

为了了解土体在不同剪切方式下的应力—应变状态及强度指标、变形特性等问题,本文采用 HJ-1 型环剪仪,对重塑黄土进行了环剪试验,探究其峰值强度、残余强度及变形规律,为黄土滑坡工程评价及治理提供科学依据。

1 环剪试验

1.1 试验仪器与土样

本试验所用试验仪器为 HJ-1 型环剪仪。该仪器主要用于测量土的残余强度,提供的最大法向应力为 900 kPa,最大扭矩值为 300 N·m,剪切速率为 $3.00 \times 10^{-6} \sim 2.10 \times 10^{-2}$ r/min,可以设置有效法向应力和剪切速率,根据试样沉降或固结时间来控制固

结过程,试验中可记录一系列的角位移 θ ,扭矩 M ,试样沉降量及试验时间 t 。

本试验所用土料取自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,其主要的物理指标详见表 1。原状土取样难度大,运输保存容易受干扰,而土体的初始结构、应力历史对其残余强度无影响^[17],故试验采用重塑试样。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 以上的充分混合,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/cm³ 的试样。根据计算得试样的面积为 50.27 cm²,试样平均直径为 8.17 cm。

表 1 试验土料基本物理指标

天然含水率/%	天然干密度/(g·cm ⁻³)	比重	天然孔隙比	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
16.2	1.28	2.74	1.14	1.70	18.1	32.7	16.4	16.3

1.2 试验原理

剪切过程中,上剪切盒与扭矩荷重帽固定,剪切盒中的试样随着下剪切盒以剪切速率旋转,在剪切力的作用下,试样产生剪切裂纹、逐渐形成剪切面,最后达到剪切破坏。由于环剪仪的特点,剪切过程中剪切面上正应力和剪应力近似认为均匀分布,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 个量可以通过扭矩 M 和角位移 θ 计算求得,其中扭矩 M 由扭矩显示器读取,角位移 θ 等于下剪切盒的旋转速率 v_2 与剪切时间 t 的乘积。

(1) 平均剪应力 τ :

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

(2) 平均剪切位移 S :

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

式中: r_1 ——试样圆环内半径(cm); r_2 ——试样圆环外半径(cm); v_2 ——下剪切盒转速(转/min); D_m ——试样平均直径; t ——扭转剪切历时(min)。

1.3 试验方案

环剪仪的剪切方式主要分为^[5]:单级剪切试验、预剪试验和多级剪切试验。本次试验采用的剪切方式为单级剪与多级剪。具体试验方案详见表 2。

表 2 重塑黄土的环剪试验方案

试样编号	含水率 w /%	有效法向应力 P /kPa	剪切方式	剪切速率/(mm·min ⁻¹)
CS1-CS9	13,16,19	100~150~200~300	多级剪	1.0
		200~300~400~600		
		300~400~600~800		
CS10-CS13	13,16,19,22	100,200,300	单级剪	1.0

2 结果与分析

2.1 单级剪试验结果

为探究有效法向应力对黄土强度的影响,取不同含水率 13%,16%,19%,22% 的试样,在同一剪切速率下进行单级环剪试验,得出的剪应力—剪切位移曲线如图 1 所示。

由图 1 可知,随着剪切位移的增加,土体的强度

迅速增加,且有效法向应力越大,强度增加越快,表现为土体强度曲线斜率与有效法向应力呈正相关。土体强度达到峰值强度后,大多出现了强度的软化,而较小有效法向应力(100 kPa)下的强度软化要明显于较大有效法向应力(300 kPa)下的软化现象。随着剪切位移的持续增加,土体的强度逐渐稳定,达到残余强度。土体的峰值强度随着有效法向应力的增加而增加,因为垂直压力较大时,土体的结构变密实,土颗

粒更容易形成次生结构。而残余强度随着有效法向应力的变化规律与峰值强度相同,且有效法向应力较大时,达到残余强度所需要的剪切位移较小,因为有效法向应力越大,土样内部的孔压越小,土体颗粒间的摩擦作用越大,内部结构更容易破坏,进而沿着剪切方向形成剪切面;相反有效法向应力较小时,试样土颗粒之间的胶结强度变化很小,起主要作用的是黏聚强度,而达到残余强度时,黏聚强度显著减小^[18]。

所以强度软化现象在低有效法向应力时表现明显,而高有效法向应力时表现不明显或呈现弱硬化。由图1还可看出,含水率为19%试样在有效法向应力300 kPa及含水率为22%的试样强度曲线为弱硬化,其原因可能是高含水率的试样在剪切过程中,由于土体排水的过程中携带了部分土颗粒,这部分土颗粒随着下剪切盒的旋转,被挤压到剪切盒之间增大了摩擦造成了误差^[19]。

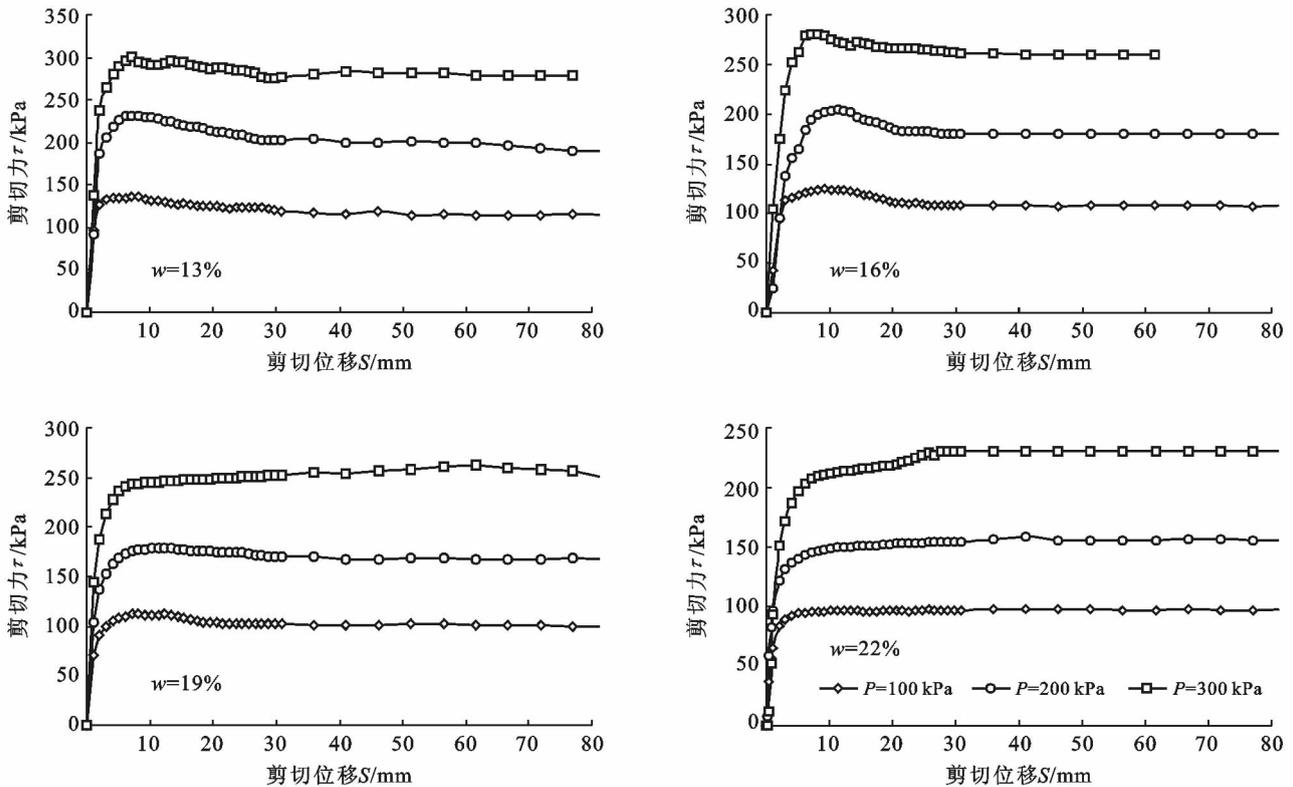


图1 重塑黄土单级剪切试验剪应力—剪切位移关系曲线

2.2 多级剪试验结果

图2所示为不同含水率试样在同一剪切速率下的多级剪切应力—剪切位移关系曲线。从图2可知,①第一级剪切实质上就是单级剪切,随着剪切位移的增加,土体迅速达到峰值强度,之后逐渐减小,趋于稳定时达到残余强度,这时已形成剪切面,总体上呈现应变软化型;②在新的固结荷载作用后,继续进行环剪试验,土体强度的变化规律与第一级荷载作用时的规律相似,总体上各级荷载作用下的峰值强度、残余强度均较前一级的有明显提高,这是因为较大的有效法向应力将土体挤密压实,土颗粒之间形成新的较大的黏结结构,故其峰值强度、残余强度都变大;③试样所受的有效法向应力越大,达到残余强度所需的剪切位移越小,但峰值强度与残余强度之间的衰减越不明显,因为第一级荷载作用后,土颗粒完成定向排列,

颗粒之间的摩擦咬合作用减弱,土体越容易达到残余强度。

图3为试样多级剪切的沉降位移—剪切位移曲线。由图3可知,沉降位移与分级荷载呈对应关系,第一段实质是单级剪切的沉降位移—剪切位移曲线。初始阶段,土体在较小有效法向应力作用下由于剪胀作用导致沉降位移变化明显,随着剪切位移的增大,沉降位移逐渐稳定,试样达到残余强度。由图3可知,试样最大的沉降位移为3 mm,即试样高度的15%。土体的沉降位移随有效法向应力的增加而增大;图3中低有效法向应力下土体沉降规律明显,高有效法向应力下土体沉降无明显规律。在低有效法向应力作用时,土体沉降的主要控制因素为有效法向应力;而有效法向应力较大时,沉降的控制因素变为含水率和有效法向应力的共同作用。对比图2和图3

可知,沉降位移表现出明显的阶段性,即初始剪胀阶段、颗粒运移压密阶段、稳定压密阶段^[20]。初始剪胀阶段:土体前期结构遭到破坏,颗粒之间的摩擦、搓揉作用较大,土颗粒重新分布并形成稳定的排列,土体形成裂缝和剪切面,这一阶段剪应力急剧增大;颗粒运移压密阶段:随着剪切位移的增加,部分土颗粒被碾碎,增加了土体中细颗粒的比例,剪切面附近的粗颗粒向上下运移,扭剪作用使水分移动过程中携带了部分的细颗粒,促使剪切面附近的土颗粒形成定向排列。剪切过程中,仪器开合剪切缝不密封,试样剪切面的土颗粒随着环剪过程被挤出剪切盒,试样沉降位移也会变大;在稳定压密阶段:细粒土为主的剪切面上,土颗粒沿着剪切方向形成定向排列,试样沉降位移稳定,强度也达到残余强度。

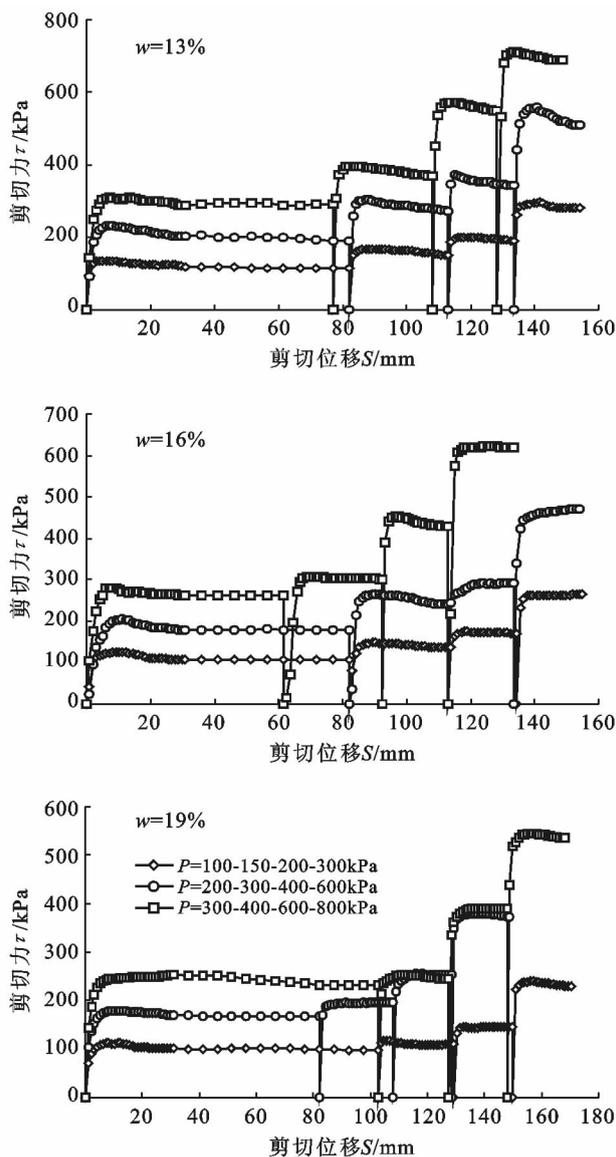


图 2 重塑黄土多级剪切试验剪应力—剪切位移关系曲线

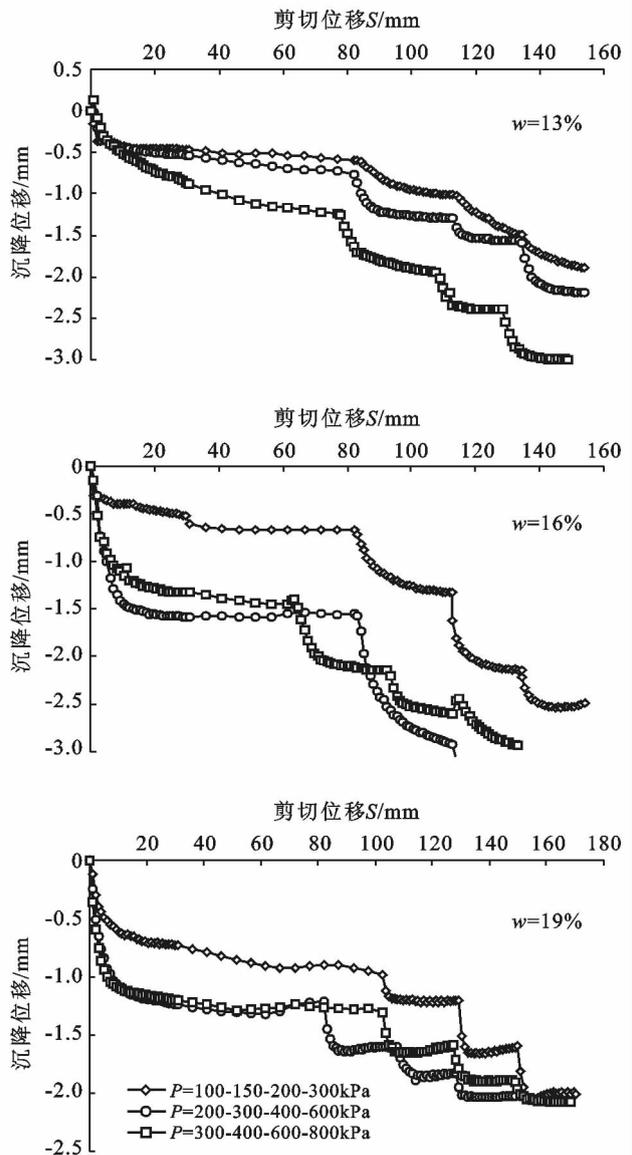


图 3 不同含水量下的沉降位移—剪切位移关系曲线

2.3 残余强度结果比较

由表 3 可知,残余黏聚力比峰值黏聚力显著减小,而残余内摩擦角较峰值内摩擦角略小,这是因为达到残余强度时,土体内部的黏聚作用明显降低。相同法向应力下,单级剪的残余强度指标与多级剪的残余强度指标的均值相差不多。分析不同剪切方式下残余强度指标差异的原因有两点,一是孔隙水压力在多级剪中消散较慢,土粒在前期已定向排列;二是由于多级剪试验中试样受到多次剪切后,剪切带上会挤出一些土颗粒到仪器的剪切缝中,这样上下剪切盒之间的摩擦增大,影响了试验结果。所以剪切方式的不同,对残余强度参数的测定造成影响。工程实践中为确保安全,在选择剪切方式的时候应该首选单级剪切。

表3 不同试验条件下试样的峰值强度指标和残余强度指标

强度类别	法向应力级别/kPa	含水率 13%		含水率 16%		含水率 19%		含水率 22%	
		c/kPa	$\varphi/^\circ$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	c/kPa	$\varphi/^\circ$
峰值强度	100-200-300	57.3	39.35	47.5	37.95	40.3	34.99	34.0	31.80
多级剪 残余强度	100-150-200-300	26.6	39.69	20.2	38.65	17.1	34.21		
	200-300-400-600	30.4	38.31	22.9	35.75	48.7	27.47		
	300-400-600-800	37.5	39.35	25.1	35.75	16.7	32.21		
	残余强度均值	31.5	39.12	22.7	36.72	27.5	31.30		
单级剪 残余强度	100-200-300	30.2	39.00	29.7	37.23	30.2	33.82	33.4	31.80

3 结论

(1) 重塑黄土的峰值强度及残余强度均随着有效法向应力的增加而增大,第1级荷载作用后会出现软化,第2,3及4级荷载作用后,试样很快达到残余强度,试样达到残余强度所需的剪切位移与其受到的有效法向应力呈负相关关系。

(2) 重塑黄土的变形表现为受剪压缩。低含水率的土体在多级剪切后,沉降变形随有效法向应力的增大而增大,当土体含水率高于塑限值时,沉降变形受含水率与有效法向应力共同作用的影响。

(3) 剪切方式对土体的强度有影响,表现在多级剪切与单级剪切得出的强度指标大小不同,所以为保证结果的精确性,剪切方式应首选单级剪切。

[参 考 文 献]

- [1] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory [J]. Geotechnique, 1985,35(1):3-18.
- [2] 李凌云,党进谦,王炜. 泾阳黄土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 西安理工大学学报,2015,31(1):113-119.
- [3] 李晓,梁收运,郑国东. 滑带土的研究进展[J]. 地球科学进展,2010,25(5):484-491.
- [4] Skempton A W. Long-term stability of clay slopes [J]. Geotechnique, 1964,14(2):157-168.
- [5] 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):32-38.
- [6] 吴剑,冯夏庭. 高速剪切条件下土的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3064-3069.
- [7] 高俊合,于海学,赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报,2000,33(4):42-46.
- [8] 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.
- [9] 李妥德,张颖均. 1979. 国内外滑坡土残余强度的研究现状(滑坡文集(二))[M]. 北京:中国铁道出版社,1979.
- [10] 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,2009,30(11):3257-3260.
- [11] American Society for Testing and Materials. Laboratory shear Testing of Soils [C]// Philadelphia: Committee D-18 on Soils for Engineering Purposes,1964.
- [12] Sassa K, Fukuoka H, Wang G H, et al. Untrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics[J]. Landslides, 2004,1:7-19.
- [13] 汪发武. 高速滑坡形成机制:土粒子破碎导致超孔隙水压力的产生[J]. 长春科技大学学报,2001,31(1):64-69.
- [14] 魏燕珍,邓辉,谢轲,等. 滑坡堆积体粗粒滑带土强度参数确定方法研究[J]. 工程勘察,2013(6):23-27.
- [15] 崔自治,朱楠,王晓芸. 黄土自重湿陷性评价的理论与试验研究[J]. 兰州理工大学学报,2013,39(6):115-117.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 陈传胜,张建敏,文仕知. 基于有效垂直应力水平的滑带土强度参数适用性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1705-1711.
- [19] 丁树云,毕庆涛,蔡正银,等. 环剪仪的试验方法研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):197-201.
- [20] 赵阳,周辉,冯夏庭,等. 不同因素影响下层间错动带颗粒破碎和剪切强度特性试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):13-21.